



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Γενικευμένη περιοχοποίηση
παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων
στην Ελλάδα και ανάλυση υδατικού
ισοζυγίου στο πλαίσιο Budyko**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΑΔΑ ΜΑΡΙΑΝΝΑ

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2025

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Γενικευμένη περιοχοποίηση παραμέτρων υδρολογικών
μοντέλων στην Ελλάδα και ανάλυση υδατικού ισοζυγίου
στο πλαίσιο Budyko**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΛΑΔΑ ΜΑΡΙΑΝΝΑ

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2025

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ολοκληρώνοντας τις προπτυχιακές σπουδές μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., με την παρούσα διπλωματική εργασία, κλείνει ένα από τα πιο σημαντικά κεφάλαια της ζωής μου. Κάθε βήμα αυτής της πορείας μου δίδαξε κάτι σημαντικό. Έπειτα από πέντε χρόνια προσπάθειας και αφοσίωσης, αισθάνομαι την ανάγκη να αφιερώσω λίγα λόγια σε όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου σε αυτή τη διαδρομή.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη στον κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και την αμέριστη υποστήριξή του. Από την πρώτη στιγμή με ξεχώρισε και μου εμπιστεύθηκε ένα απαιτητικό θέμα, με πλήθος δεδομένων βροχόπτωσης και απορροής για την Ελλάδα, παρέχοντάς μου τη γνώση και την υπομονή που χρειάστηκα για να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία. Η καθοριστική του συμβολή, τόσο επιστημονικά όσο και προσωπικά, με ενέπνευσε να αγαπήσω τον τομέα της Υδρολογίας και να εξερευνώ πέρα από το μάθημα. Η παρουσία του υπήρξε αναντικατάστατη σε όλη αυτή την πορεία.

Θέλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Γιώργο Μπαριάμη για τη συνεισφορά του στην παροχή των απαραίτητων γεωχωρικών δεδομένων, τα οποία υπήρξαν καθοριστικά για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης όλα τα μέλη του εργαστηρίου για το θετικό κλίμα και την παρουσία τους, που συνέβαλαν ώστε να νιώθω μέρος ενός ευρύτερου συνόλου. Θέλω να ευχαριστήσω ξεχωριστά την Κατερίνα Κολιούκου, Υποψήφια Διδάκτορα, για το ενδιαφέρον, τις συμβουλές και τα ενθαρρυντικά της λόγια. Της εύχομαι κάθε επιτυχία στην πορεία της.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά την κ. Θεανώ Ηλιοπούλου, Δρ. ΕΔΙΠ του Ε.Μ.Π., για την καθοδήγηση και τη στήριξή της, χάρις στην οποία η συμμετοχή μου στο συνέδριο της EGU στη Βιέννη αποτέλεσε μία από τις πιο ξεχωριστές εμπειρίες των φοιτητικών μου χρόνων. Εκεί είχα την ευκαιρία να παρουσιάσω την ερευνητική μας εργασία μαζί με τις συμφοιτήτριες μου, Χριστίνα Σταυροπούλου και Μυρτώ Τουρλάκη, στις οποίες είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων για τη συνεργασία, την αμοιβαία στήριξη και τις όμορφες στιγμές που μοιραστήκαμε. Δεν θα ήταν ίδια η εμπειρία αν δεν ήταν εκείνες.

Ευχαριστώ, επίσης, τις καλές μου φίλες, Φωτεινή και Κατερίνα για όλες τις στιγμές που μοιραζόμαστε όλα αυτά τα χρόνια. Η παρουσία τους έκανε τα φοιτητικά μου χρόνια πιο όμορφα και ευχάριστα.

Τέλος, το πιο μεγάλο «ευχαριστώ» το οφείλω στην οικογένειά μου, και συγκεκριμένα στη μητέρα μου, Ευαγγελία, που είναι το στήριγμά μου σε κάθε αγωνία και σκέψη και αποτελεί για μένα πρότυπο δύναμης, αλλά και την αδερφή μου, Χριστίνα, που πάντα βρίσκεται δίπλα μου. Ευχαριστώ, επίσης, τη γιαγιά και τον παππού μου, Βάγια και Στέργιο, και τον νονό

μου, Κώστα, για την αγάπη και τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου. Δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στη μνήμη του πατέρα μου, Δημήτρη. Η απουσία του έγινε για μένα κίνητρο να συνεχίσω με περισσότερη δύναμη, και ελπίζω ότι από εκεί που βρίσκεται θα είναι περήφανος και ευτυχισμένος για τα επιτεύγματά μου. Οφείλω στους γονείς μου ό,τι έχω καταφέρει, για την αγάπη, τη στήριξη και τις αξίες που μου ενέπνευσαν.

Κλείνω αυτό τον πρόλογο με ένα απόσπασμα του Ε. Π. Παπανούτσου:

“Στη γνώση κάθε κατάκτηση, κάθε βήμα εμπρός προέρχεται από το θάρρος, από τη σκληρότητα απέναντι στον εαυτό μας, από την εντιμότητα απέναντι στον εαυτό μας.”

Λαδά Μαριάννα,

Αθήνα, Νοέμβριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΣΤΟ
ΠΛΑΙΣΙΟ BUDYKO**

Μαριάννα Λαδά

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2025

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από πολύπλοκες γεωμορφολογικές διαφοροποιήσεις και έντονη χωρική υδροκλιματική μεταβλητότητα, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη γενίκευση των παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων. Επιπλέον, η περιορισμένη διαθεσιμότητα υδρομετρικών δεδομένων στην χώρα δημιουργεί την ανάγκη για τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης και θεωρητικών πλαισίων για την κατανόηση των υδρολογικών διεργασιών. Η μελέτη αποσκοπεί στη φυσική ερμηνεία των διεργασιών που διαμορφώνουν τη συμπεριφορά των λεκανών απορροής σε διαφορετικές υδρογεωμορφολογικές συνθήκες. Παρά το γεγονός ότι διεθνώς έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για την περιοχοποίηση παραμέτρων σε αδιαμέριστα εννοιολογικά μοντέλα και την εφαρμογή του πλαισίου Budyko, περιορισμένος αριθμός έχει επικεντρωθεί σε ελληνικές λεκάνες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία αξιοποιούνται μηνιαίες χρονοσειρές βροχόπτωσης, δυνητικής εξατμοδιαπνοής και παρατηρημένης απορροής από 35 λεκάνες που κατανέμονται σε έξι Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας. Αρχικά, διερευνάται η καταλληλότητα διαφορετικών εκδοχών ενός αδιαμέριστου εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου ως προς τον αριθμό και τη φυσική ερμηνεία των παραμέτρων, με στόχο την επιλογή της βέλτιστης δομής. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η βαθμονόμηση του γενικευμένου μοντέλου, το οποίο περιγράφεται από 20 παραμέτρους και βασίζεται σε τέσσερις μονάδες υδρολογικής απόκρισης (HRUs), σε επιλεγμένες λεκάνες, αντιπροσωπευτικές των διαφορετικών φυσιογραφικών και

υδρολογικών συνθηκών, ενώ η επαλήθευση εφαρμόζεται στις υπόλοιπες, προκειμένου να αξιολογηθεί η ικανότητα μεταφοράς των παραμέτρων. Παράλληλα, πραγματοποιείται ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου στο πλαίσιο Budyko συναρτήσει του δείκτη ξηρότητας, για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των μακροπρόθεσμων μέσων όρων βροχόπτωσης, δυνητικής εξατμοδιαπνοής και πραγματικής εξατμοδιαπνοής, καθώς και την αξιολόγηση εμπειρικών προσεγγίσεων από τη διεθνή βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη γενίκευση παραμέτρων παρέχει ικανοποιητική προσομοίωση της μηνιαίας απορροής, ενώ η ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου στο πλαίσιο Budyko αποδεικνύει ότι οι λεκάνες εμφανίζουν μεγαλύτερο υδατικό περιορισμό σε σχέση με το θεωρητικά αναμενόμενο λόγω της έντονης υδροκλιματικής μεταβλητότητας και την επικράτηση ξηρών περιόδων στη χώρα.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

**GENERALIZED REGIONALIZATION OF HYDROLOGICAL MODEL
PARAMETERS ACROSS GREECE AND WATER BALANCE ANALYSIS WITHIN
THE BUDYKO FRAMEWORK**

Marianna Lada

Academic supervisor: Andreas Efstratiadis, Associate Professor NTUA

Athens, November 2025

ABSTRACT

Greece is characterized by complex geomorphological variations and pronounced spatial hydroclimatic variability, which makes the generalization of hydrological model parameters challenging. Moreover, the limited availability of hydrometric data in the country necessitates the use of simulation models and theoretical frameworks for understanding hydrological processes. This study aims to provide a physical interpretation of the processes that shape catchment behavior under different hydro – geomorphological conditions. Although several studies have been conducted internationally on the regionalization of parameters in lumped conceptual models and the application of the Budyko framework, few have focused on Greek catchments. In this thesis, monthly time series of precipitation, potential evapotranspiration, and observed streamflow from 35 catchments distributed across six River Basin Districts of Greece are utilized. Initially, the suitability of different versions of a lumped conceptual hydrological model is examined with respect to the number and physical interpretation of its parameters, aiming at the selection of the optimal model structure. Subsequently, the generalized model, defined by 20 parameters and based on four hydrological response units (HRUs), is calibrated using selected catchments representative of diverse physiographic and hydrological conditions, while validation is conducted on the remaining catchments to assess the transferability of parameters. Additionally, the water balance is analyzed within the Budyko framework as a function of the aridity index, to investigate the relationship between long-term averages of precipitation, potential evapotranspiration, and actual evapotranspiration, as well as to evaluate empirical

approaches from the international literature. The results indicate that the proposed parameter regionalization provides satisfactory simulation of monthly streamflow, while the water analysis within the Budyko framework demonstrates that the catchments exhibit a stronger degree of water limitation than theoretically anticipated, attributable to the pronounced hydroclimatic variability.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	v
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	x
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	xv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενική τοποθέτηση	1
1.2 Αντικείμενο και στόχοι	1
1.3 Διάρθρωση της εργασίας	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	5
2.1 Υδρολογικός κύκλος και λεκάνη απορροής	5
2.2 Υδατικό ισοζύγιο	5
2.3 Πλαίσιο Budyko	6
2.4 Υδρολογικά μοντέλα.....	10
2.5 Βαθμονόμηση και παραμετροποίηση μοντέλων	12
2.6 Η έννοια της περιοχοποίησης παραμέτρων.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΕΡΙΟΧΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	15
3.1 Η έννοια της μονάδας υδρολογικής απόκρισης.....	15
3.2 Παραμετροποίηση σε επίπεδο ΜΥΑ.....	16
3.3 Υλοποίηση της προσέγγισης στις λεκάνες απορροής της μελέτης.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	19
4.1 Θέσεις ελέγχου και γεωμετρικά δεδομένα λεκανών	19
4.2 Συλλογή και επεξεργασία χρονοσειρών.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	27
5.1 Ανάλυση δομής και παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων.....	27
5.1.1 Υδρολογικό μοντέλο P01	27
5.1.2 Υδρολογικό μοντέλο P02.....	29

5.1.3	Υδρολογικό μοντέλο P03.....	31
5.1.4	Υδρολογικό μοντέλο P04.....	32
5.1.5	Υδρολογικό μοντέλο P05.....	33
5.1.6	Υδρολογικό μοντέλο P06.....	35
5.1.7	Υδρολογικό μοντέλο P07.....	35
5.1.8	Υδρολογικό μοντέλο P08.....	37
5.1.9	Υδρολογικό μοντέλο P09.....	38
5.1.10	Εναλλακτική εξίσωση για την εκτίμηση της άμεσης απορροής	38
5.2	Βιβλιογραφικά υδρολογικά μοντέλα μηνιαίας κλίμακας	39
5.2.1	Υδρολογικό μοντέλο PMS	39
5.2.2	Υδρολογικό μοντέλο GR2M	41
5.2.3	Υδρολογικό μοντέλο Ol' dekor	43
5.3	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης στην R.....	44
5.4	Κριτήρια αξιολόγησης και βαθμονόμησης μοντέλων	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΝΑ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ		47
6.1	Βαθμονόμηση και συγκριτική αξιολόγηση υδρολογικών μοντέλων	47
6.2	Επιλογή και ανάλυση βέλτιστου υδρολογικού μοντέλου.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΠΕΡΙΟΧΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ		57
7.1	Εκτίμηση παραμέτρων μέσω βαθμονόμησης.....	57
7.2	Επαλήθευση μοντέλου	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ BUDYKO		67
8.1	Ανάλυση βάσει παρατηρημένων δεδομένων.....	67
8.2	Ανάλυση βάσει προσομοιωμένων δεδομένων	70
8.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων παρατηρημένων και προσομοιωμένων δεδομένων.....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....		73
9.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα.....	73
9.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		76
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....		81
Παράρτημα Α: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικών μοντέλων		81

Παράρτημα Β:	Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων απορροών - P05	92
Παράρτημα Γ:	Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων απορροών κατά τη διαδικασία της περιοχοποίησης των παραμέτρων	109
Παράρτημα Δ:	Αρχείο κώδικα R του υδρολογικού μοντέλου	123

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Αδιάστατο γράφημα Budyko.	7
Εικόνα 2.2: Αδιάστατο γράφημα Budyko κατά Andréassian et al. (2012)	9
Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση ενός υδρολογικού μοντέλου προσομοίωσης [Ευστρατιάδης, 2008].....	10
Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας παραγωγής των μονάδων υδρολογικής απόκρισης.	16
Εικόνα 4.1: Υδατικά Διαμερίσματα (ΥΔ) της Ελλάδας με διαθέσιμα δεδομένα.	19
Εικόνα 4.2: Χάρτης υδρομετρικών σταθμών και λεκανών απορροής της μελέτης – ΥΔ Δυτικής (EL01) και Βόρειας Πελοποννήσου (EL02).	21
Εικόνα 4.3: Χάρτης υδρομετρικών σταθμών και λεκανών απορροής της μελέτης – ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04), Ηπείρου (EL05) και Θεσσαλίας (EL08).	21
Εικόνα 4.4: Χάρτης με τις θέσεις υδρομετρικών σταθμών ΥΔ Θράκης, με ένδειξη αυτών που χρησιμοποιούνται ως θέσεις βαθμονόμησης και επαλήθευσης [ΣΔΛΑΠ, 2023].	22
Εικόνα 4.5: Διαγράμματα διασποράς μεταξύ των μέσων ετήσιων υδρολογικών μεταβλητών.	26
Εικόνα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P01.	27
Εικόνα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P02.	29
Εικόνα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P03.	31
Εικόνα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P04.	33
Εικόνα 5.5: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P05.	34
Εικόνα 5.6: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P06.	35
Εικόνα 5.7: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P07.	36
Εικόνα 5.8: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P08.	37
Εικόνα 5.9: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P09.	38
Εικόνα 5.10: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου PMS.....	39
Εικόνα 5.11: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου GR2M.	42
Εικόνα 6.1: Σύγκριση μέτρων επίδοσης (NSE, KGE, logNSE, CRabs) των δύο εναλλακτικών εκδοχών των μοντέλων P03 – P09.	47
Εικόνα 6.2: Σύγκριση των τεσσάρων κριτηρίων αξιολόγησης μεταξύ των δώδεκα υδρολογικών μοντέλων.	48
Εικόνα 6.3: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Πόρο Ρηγανίου (πριν την κατασκευή του φράγματος του Ευήνου).	51
Εικόνα 6.4: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Λάδωνα.	51
Εικόνα 6.5: Διαγράμματα διασποράς μεταξύ των παραμέτρων του μοντέλου και υδρολογικών διεργασιών.	53
Εικόνα 6.6: Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μέσης ετήσιας παρατηρημένης (Q_{obs}) και προσομοιωμένης (Q_{sim}) απορροής.	54

Εικόνα 6.7: Διαγράμματα διασποράς και συσχέτιση μεταξύ των υδρολογικών διεργασιών στις λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης.	35
Εικόνα 7.1: Μέτρα επίδοσης NSE, KGE, logNSE του γενικευμένου υδρολογικού μοντέλου στις δεκατέσσερις θέσεις βαθμονόμησης.	58
Εικόνα 7.2: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αυλακίου (ΜΥΑ).	60
Εικόνα 7.3: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Κλειδωνιά (ΜΥΑ).	61
Εικόνα 7.4: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Κρεμαστών (ΜΥΑ).	61
Εικόνα 7.5: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Άνω Δροσίνη (ΜΥΑ).	62
Εικόνα 7.6: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Καρύταινας (ΜΥΑ).	62
Εικόνα 7.7: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γεφ. Κόνιτσας (ΜΥΑ).	65
Εικόνα 7.8: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Σμόκοβου (ΜΥΑ).	65
Εικόνα 7.9: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πλαστήρα (ΜΥΑ).	66
Εικόνα 8.1: Διαφορετικές αναπαραστάσεις των καμπυλών Budyko και παρατηρήσεις από την περιοχή μελέτης.	68
Εικόνα 8.2: Εναλλακτική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ μακροπρόθεσμης απορροής (Q), δυνητικής εξατμοδιαπνοής (PET) και κατακρήμνισης (P): $Q/P = f(PET/P)$	69
Εικόνα 8.3: Διαφορετικές αναπαραστάσεις των καμπυλών στο πλαίσιο Budyko και προσαρμογή της καμπύλης Turc – Mezentsev στα προσομοιωμένα αποτελέσματα.	70
Εικόνα 8.4: Εναλλακτική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ μακροπρόθεσμης απορροής (Q), δυνητικής εξατμοδιαπνοής (PET) και κατακρήμνισης (P), με βάση την προσομοιωμένη απορροή: $Q/P = f(PET/P)$	71
Εικόνα Π.1: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αυλακίου.	92
Εικόνα Π.2: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Ευήνου.	92
Εικόνα Π.3: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πλαστήρα.	93
Εικόνα Π.4: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Κρεμαστών.	93
Εικόνα Π.5: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Μεσοχώρας.	94
Εικόνα Π.6: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Μόρνου.	94

Εικόνα Π.7: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Πόρο Ρηγανίου (μετά την κατασκευή του φράγματος του Ευήνου).	95
Εικόνα Π.8: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γέφυρα Κόνιτσας.	95
Εικόνα Π.9: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Κλειδωνιά.	96
Εικόνα Π.10: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πηγών Αώου.	96
Εικόνα Π.11: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Λούρου.	97
Εικόνα Π.12: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Κιοτέκι.	97
Εικόνα Π.13: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πουρναρίου.	98
Εικόνα Π.14: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Βοβούσα.	98
Εικόνα Π.15: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αμπελιά.	99
Εικόνα Π.16: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Μουζακίου.	99
Εικόνα Π.17: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πύλης.	100
Εικόνα Π.18: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Σμοκόβου.	100
Εικόνα Π.19: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Σκοπιάς.	101
Εικόνα Π.20: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αλαγονίας.	101
Εικόνα Π.21: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γέφυρα Κόκκορη.	102
Εικόνα Π.22: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Καρβελιώτη.	102
Εικόνα Π.23: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Καρύταινας.	103
Εικόνα Π.24: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Νέδοντα.	103
Εικόνα Π.25: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Τριπόταμα.	104
Εικόνα Π.26: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γλαύκου.	104
Εικόνα Π.27: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Άνω Δροσίνη.	105

Εικόνα Π.28: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αρκουδόρεμα.	105
Εικόνα Π.29: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Δεσπάτη.	106
Εικόνα Π.30: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Φονιά.	106
Εικόνα Π.31: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Μπούσδα.	107
Εικόνα Π.32: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό Τρίκορφου.	107
Εικόνα Π.33: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Ξηροπόταμου.	108
Εικόνα Π.34: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Ευήνου (ΜΥΑ).	109
Εικόνα Π.35: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γλαύκου (ΜΥΑ).	109
Εικόνα Π.36: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Μεσοχώρας (ΜΥΑ).	110
Εικόνα Π.37: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Μόρνου (ΜΥΑ).	110
Εικόνα Π.38: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Μουζάκι (ΜΥΑ).	111
Εικόνα Π.39: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Πόρο Ρηγανίου - πριν την κατασκευή του φράγματος του Ευήνου (ΜΥΑ).	111
Εικόνα Π.40: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Πύλης (ΜΥΑ).	112
Εικόνα Π.41: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Βοβούσας (ΜΥΑ).	112
Εικόνα Π.42: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αλαγονίας (ΜΥΑ).	113
Εικόνα Π.43: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αμπελιάς (ΜΥΑ).	113
Εικόνα Π.44: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πηγών Αώου (ΜΥΑ).	114
Εικόνα Π.45: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αρκουδόρεμα (ΜΥΑ).	114
Εικόνα Π.46: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Δεσπάτη (ΜΥΑ).	115
Εικόνα Π.47: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Φονιά (ΜΥΑ).	115

Εικόνα Π.48: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Καρβελιώτη (ΜΥΑ).	116
Εικόνα Π.49: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Κιοτέκι (ΜΥΑ).	116
Εικόνα Π.50: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γέφυρας Κόκκορη (ΜΥΑ).	117
Εικόνα Π.51: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα του Λάδωνα (ΜΥΑ).	117
Εικόνα Π.52: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Λούρου (ΜΥΑ).	118
Εικόνα Π.53: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Μπούσδα (ΜΥΑ).	118
Εικόνα Π.54: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Νέδοντα (ΜΥΑ).	119
Εικόνα Π.55: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πουρναρίου (ΜΥΑ).	119
Εικόνα Π.56: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Πόρο Ρηγανίου - μετά την κατασκευή του φράγματος του Ευήνου (ΜΥΑ).	120
Εικόνα Π.57: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Σκοπιά (ΜΥΑ).	120
Εικόνα Π.58: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Τρίκορφο (ΜΥΑ).	121
Εικόνα Π.59: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Τριπόταμα (ΜΥΑ).	121
Εικόνα Π.60: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Ξηροπόταμου (ΜΥΑ).	122

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά μονάδων υδρολογικής απόκρισης.	15
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκανών απορροής ανάντη των θέσεων ελέγχου των υδρολογικών μοντέλων.	23
Πίνακας 4.2: Κατανομή εκτάσεων μονάδων υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ) στις λεκάνες απορροής ανάντη των θέσεων ελέγχου του υδρολογικού μοντέλου (km ²).	24
Πίνακας 6.1: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης του υδρολογικού μοντέλου P05.	50
Πίνακας 7.1: Βελτιστοποιημένες παράμετροι μοντέλου για κάθε ΜΥΑ.	59
Πίνακας 7.2: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης του γενικευμένου υδρολογικού μοντέλου.	59
Πίνακας 7.3: Σύγκριση στατιστικών χαρακτηριστικών προσομοιωμένων και παρατηρημένων παροχών στις λεκάνες βαθμονόμησης του μοντέλου, για την κοινή περίοδο των δύο δειγμάτων.	60
Πίνακας 7.4: Χρονική περίοδος και αποτελεσματικότητα (NSE και KGE) μοντέλου κατά την περίοδο επαλήθευσης.	63
Πίνακας 7.5: Σύγκριση στατιστικών χαρακτηριστικών προσομοιωμένων και παρατηρημένων παροχών στις λεκάνες επαλήθευσης του μοντέλου, για την κοινή περίοδο των δύο δειγμάτων.	64
Πίνακας Π.1: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου Oldekor κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.	81
Πίνακας Π.2: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου GR2M κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.	82
Πίνακας Π.3: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου PMS κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.	83
Πίνακας Π.4: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P01 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.	84
Πίνακας Π.5: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P02 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.	85
Πίνακας Π.6: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P03 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.	86
Πίνακας Π.7: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P04 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.	87
Πίνακας Π.8: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P06 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.	88
Πίνακας Π.9: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P07 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.	89
Πίνακας Π.10: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P08 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.	90
Πίνακας Π.11: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P09 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.	91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική τοποθέτηση

Η κατανόηση της υδρολογικής συμπεριφοράς των λεκανών απορροής αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για τη διαχείριση των υδατικών πόρων και την αξιολόγηση των επιπτώσεων των ακραίων υδρολογικών φαινομένων, όπως οι πλημμύρες και οι ξηρασίες. Στις μεσογειακές περιοχές, πολλές λεκάνες απορροής χαρακτηρίζονται από μικρό ή μεσαίο μέγεθος και έντονη υψομετρική διαφοροποίηση, με αποτέλεσμα οι υδρολογικές διεργασίες να παρουσιάζουν σημαντική χωρική και χρονική μεταβλητότητα. Η πολυπλοκότητά τους, σε συνδυασμό με την εποχική εναλλαγή μεταξύ βροχερών χειμώνων και ξηρών καλοκαιριών και τις απότομες κλίσεις, καθιστά τις λεκάνες αυτές ευάλωτες σε πλημμύρες ταχείας απόκρισης και σε περιόδους υδατικού ελλείμματος, απαιτώντας αξιόπιστες προσεγγίσεις προσομοίωσης για την ορθολογική διαχείριση των υδάτων. Ωστόσο, η αξιόπιστη προσομοίωση της υδρολογικής συμπεριφοράς σε τέτοιες λεκάνες απορροής συναντά συχνά το εμπόδιο της περιορισμένης διαθεσιμότητας ή της χαμηλής ποιότητας μετρήσεων. Η έλλειψη επαρκών δεδομένων καθιστά ιδιαίτερα απαιτητική τη βαθμονόμηση και την εφαρμογή σύνθετων μοντέλων, αναδεικνύοντας την ανάγκη για προσεγγίσεις που μπορούν να λειτουργήσουν με περιορισμένες πληροφορίες, εξασφαλίζοντας παράλληλα ικανοποιητική ακρίβεια στην προσομοίωση και εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου.

1.2 Αντικείμενο και στόχοι

Στο πλαίσιο αυτό, το αντικείμενο της παρούσας μελέτης αφορά την ανάπτυξη και αξιολόγηση εννοιολογικών αδιαμέριστων υδρολογικών μοντέλων συνεχούς προσομοίωσης σε μηνιαία χρονική κλίμακα με εφαρμογή σε ένα πλήθος λεκανών απορροής στην Ελλάδα. Αρχικά, η μελέτη επικεντρώνεται στην αναζήτηση ενός βέλτιστου μοντέλου, με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό παραμέτρων ώστε να περιγράφεται με ικανοποιητική ακρίβεια η υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών. Ο κύριος στόχος είναι η αποδέσμευση της παραμετροποίησης από τη χωρική διακριτότητα, ώστε το μοντέλο να μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε λεκάνη απορροής. Η προσέγγιση στηρίζεται στην έννοια των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (ΜΥΑ) που αναπαριστούν εδαφικούς τύπους με ομοιογενή φυσιογραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Η διαμόρφωση των ΜΥΑ βασίζεται σε ένα θεμελιώδη και ευρέως χρησιμοποιούμενο υδρολογικό μέγεθος, τον αριθμό καμπύλης απορροής *CN* (*curve number runoff*). Η ταυτόχρονη βαθμονόμηση των παραμέτρων για

κάθε ΜΥΑ παρέχει τη δυνατότητα γενίκευσής τους, καθιστώντας δυνατή την εφαρμογή του μοντέλου σε κάθε λεκάνη απορροής, εφόσον είναι γνωστά τα ποσοστά συμμετοχής της σε κάθε ΜΥΑ.

Παράλληλα, πραγματοποιείται ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου με βάση το πλαίσιο Budyko, ως εργαλείο ελέγχου των δεδομένων μηνιαίων χρονοσειρών κατακρήμνισης, δυνητικής εξατμοδιαπνοής και παρατηρημένης απορροής, καθώς και για την αξιολόγηση της υδρολογικής συμπεριφοράς των ελληνικών λεκανών απορροής.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η διπλωματική εργασία, εκτός από την παρούσα Εισαγωγή (**Κεφάλαιο 1**), περιλαμβάνει 8 ακόμη κεφάλαια. Η διάρθρωση των κεφαλαίων έχει ως εξής:

Το **Κεφάλαιο 2** επικεντρώνεται στο θεωρητικό υπόβαθρο της υδρολογικής προσομοίωσης λεκανών απορροής, με έμφαση στα εννοιολογικά αδιαμέριστα μοντέλα, στις μεθόδους περιοχοποίησης των παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων και στην ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου στο πλαίσιο Budyko.

Στο **Κεφάλαιο 3** προτείνεται μια εναλλακτική προσέγγιση περιοχοποίησης των παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων, η οποία βασίζεται στην έννοια της μονάδας υδρολογικής απόκρισης, ενώ παράλληλα παρέχεται μια συνοπτική περιγραφή της μεθοδολογικής διαδικασίας που πρόκειται να εφαρμοστεί.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, καθώς και τα διαθέσιμα δεδομένα στο πλαίσιο της αρχικής ανάλυσης.

Στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφεται η μεθοδολογία της μελέτης, περιλαμβάνοντας τόσο τα ανεπτυγμένα υδρολογικά μοντέλα, όσο και μοντέλα βασισμένα στη βιβλιογραφία, καθώς και οι μέθοδοι βαθμονόμησής τους.

Στο **Κεφάλαιο 6** εφαρμόζονται τα υδρολογικά μοντέλα και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης των παραμέτρων κάθε λεκάνης απορροής μέσω κατάλληλων δεικτών επίδοσης, ενώ ταυτόχρονα εξετάζονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για την παραγωγή της άμεσης απορροής. Βάσει της σύγκρισης των αποτελεσμάτων, επιλέγεται το βέλτιστο μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιείται στη συνέχεια.

Στο **Κεφάλαιο 7** πραγματοποιείται η περιοχοποίηση των παραμέτρων και η καθολική βαθμονόμηση του βέλτιστου μοντέλου, με ταυτόχρονη εκτίμηση των παραμέτρων για κάθε Μονάδα Υδρολογικής Απόκρισης (ΜΥΑ). Επιπλέον, γίνεται εφαρμογή των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων σε επιλεγμένες θέσεις επαλήθευσης, προκειμένου να αξιολογηθεί η δυνατότητα γενίκευσης και μεταφοράς του μοντέλου σε διαφορετικές λεκάνες απορροής.

Το **Κεφάλαιο 8** εστιάζει στην ανάλυση του ετήσιου υδατικού ισοζυγίου με βάση το πλαίσιο Budyko, λαμβάνοντας υπόψη τα υδατικά και ενεργειακά όρια, με στόχο τη διερεύνηση της κατανομής της κατακρήμνισης σε πραγματική εξατμοδιαπνοή και απορροή.

Στο **Κεφάλαιο 9** πραγματοποιείται η σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζοντας τα συμπεράσματα που προκύπτουν, ενώ γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Τέλος, στο **Παράρτημα** παρατίθενται τα αποτελέσματα που υποστηρίζουν τη μελέτη. Συγκεκριμένα, στο **Παράρτημα Α** παρουσιάζονται οι πίνακες με τα βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης των υδρολογικών μοντέλων. Στο **Παράρτημα Β** περιλαμβάνονται τα διαγράμματα σύγκρισης προσομοιωμένης και παρατηρημένης απορροής που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση ανά λεκάνη, ενώ στο **Παράρτημα Γ** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα της ταυτόχρονης βαθμονόμησης που προέκυψε από την περιοχοποίηση των παραμέτρων. Στη συνέχεια, στο **Παράρτημα Δ** παρατίθεται το αρχείο κώδικα R της βαθμονόμησης του υδρολογικού μοντέλου για την εκτίμηση των παραμέτρων των ΜΥΑ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την υδρολογική προσομοίωση λεκανών απορροής, περιλαμβάνοντας βασικές έννοιες του υδρολογικού κύκλου, τις κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων και την παραμετροποίησή τους. Στη συνέχεια, γίνεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση στην υπόθεση Budyko και στην έννοια της περιοχοποίησης των παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων.

2.1 Υδρολογικός κύκλος και λεκάνη απορροής

Ο υδρολογικός κύκλος περιγράφει την αέναη κίνηση του νερού ανάμεσα στους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και την ξηρά, η οποία συνοδεύεται από μετατροπές ανάμεσα στις τρεις φυσικές φάσεις του, την υγρή, την αέρια και τη στερεή. Οι κύριες συνιστώσες του κύκλου περιλαμβάνουν την κατακρήμνιση, την απορροή (επιφανειακή και υπόγεια) και την εξατμοδιαπνοή. Ειδικότερα, το νερό εξατμίζεται από τη θάλασσα και την ξηρά και διαπνέεται από τη βλάστηση, με αποτέλεσμα να ανέρχεται στην ατμόσφαιρα υπό μορφή υδρατμών, λόγω των διαφορών θερμοκρασίας και πίεσης. Στη συνέχεια, συμπυκνώνεται δημιουργώντας νέφη. Μέσω των κατακρημνισμάτων επιστρέφει στην ξηρά και τη θάλασσα, όπου ένα μέρος του απορρέει επιφανειακά προς τους υδάτινους αποδέκτες, ενώ άλλο μέρος διηθείται στο έδαφος εμπλουτίζοντας την εδαφική υγρασία και τους υπόγειους υδροφορείς.

Καθοριστική για την υδρολογική ανάλυση είναι η χωρική κλίμακα της λεκάνης απορροής (ή *υδρολογικής λεκάνης*), η οποία λειτουργεί ως φυσικό όριο συγκέντρωσης και απορροής των υδάτων. Η Ελλάδα, λόγω της έντονης γεωμορφολογικής ανομοιομορφίας της, παρουσιάζει μεγάλο αριθμό λεκανών απορροής με κυρίαρχη παρουσία μικρών και μεσαίων λεκανών απορροής.

2.2 Υδατικό ισοζύγιο

Το υδατικό ισοζύγιο αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του υδρολογικού κύκλου και προκύπτει ως συνέπεια της αρχής διατήρησης της μάζας. Εφόσον η λεκάνη απορροής θεωρηθεί ως το υπό μελέτη υδρολογικό σύστημα, το υδατικό ισοζύγιο περιγράφει την κατανομή της βροχόπτωσης (P) σε απώλειες λόγω (πραγματικής) εξατμοδιαπνοής (ET), σε επιφανειακή και υπόγεια απορροή (Q) που εκβάλλει στην έξοδο της λεκάνης, καθώς και σε πιθανές ανταλλαγές νερού με τα υποκείμενα υδρογεωλογικά συστήματα. Στην ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου ενδιαφέρουν και οι ενδιάμεσες διεργασίες και αποθηκεύσεις νερού, όπως η κατείσδυση προς τον υδροφορέα, η οποία καθορίζει την τροφοδοσία και τη

διαθεσιμότητα των υπόγειων αποθεμάτων. Η έννοια των φυσικοποιημένων υδατικών ισοζυγίων βασίζεται στην παραδοχή ότι ο υδρολογικός κύκλος δεν έχει επηρεαστεί από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, όπως είναι οι απολήψεις ή οι εκτροπές. Αντίθετα, τα πραγματικά ισοζύγια λαμβάνουν υπόψη αυτές τις παρεμβάσεις, μέσω διαχειριστικών μοντέλων, επιτρέποντας τη σύγκριση της τρέχουσας ή μελλοντικά αναμενόμενης κατάστασης με τις συνθήκες αναφοράς. Το υδατικό ισοζύγιο εκφράζεται από τη σχέση:

$$\Delta S = P - ET - Q \quad (2.1)$$

όπου ΔS είναι η μεταβολή στην (εδαφική και υπόγεια) αποθήκευση της λεκάνης απορροής.

2.3 Πλαίσιο Budyko

Το πλαίσιο Budyko αποτελεί μια προσέγγιση για την κατανόηση της σχέσης μεταξύ βροχόπτωσης, εξατμοδιαπνοής και απορροής σε λεκάνες υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, βασίζεται στην ομώνυμη υπόθεση, σύμφωνα με την οποία τα μακροπρόθεσμα ισοζύγια νερού και ενέργειας στην επιφάνεια της Γης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον δείκτη ξηρότητας (*aridity index*) της λεκάνης απορροής:

$$\phi = \frac{PET}{P} \quad (2.2)$$

όπου P είναι η μακροπρόθεσμη βροχόπτωση (mm/έτος) και PET είναι η μακροπρόθεσμη δυνητική εξατμοδιαπνοή (mm/έτος).

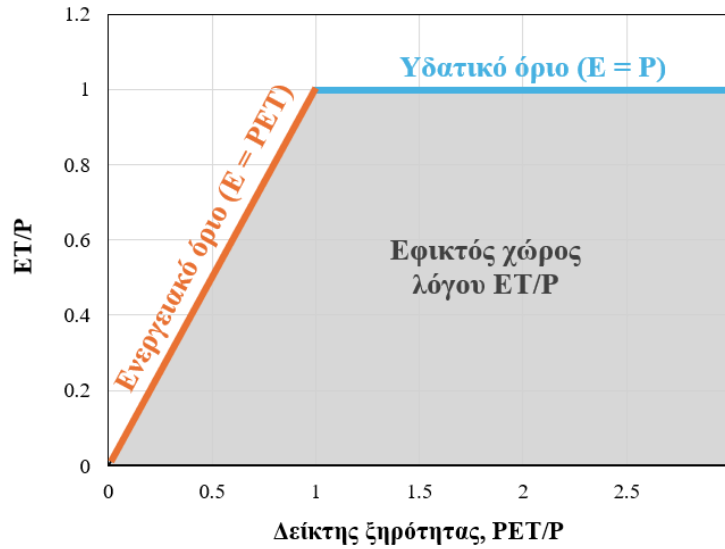
Το γράφημα Budyko (Εικόνα 2.1) είναι αδιάστατο, καθώς συσχετίζει τρεις μεταβλητές: τη μακροπρόθεσμη πραγματική εξατμοδιαπνοή με τη βροχόπτωση και τη δυνητική εξατμοδιαπνοή. Η πραγματική εξατμοδιαπνοή περιορίζεται από δύο θεμελιώδη όρια: το υδατικό όριο, σύμφωνα με το οποίο η εξατμοδιαπνοή (ET) δεν μπορεί να υπερβεί τη διαθέσιμη βροχόπτωση, και το όριο ενέργειας, σύμφωνα με το οποίο η εξατμοδιαπνοή δεν μπορεί να ξεπεράσει τη δυνητική εξατμοδιαπνοή (PET).

$$\text{Υδατικό όριο:} \quad E = P \quad (2.3\alpha)$$

$$\text{Ενεργειακό όριο:} \quad E = PET \quad (2.3\beta)$$

Για την απεικόνιση του γραφήματος Budyko χρησιμοποιούνται οι μακροπρόθεσμοι μέσοι όροι των παραπάνω μεταβλητών, δηλαδή για δεδομένα τουλάχιστον 10 ετών. Με την παραπάνω υπόθεση, επιτρέπεται να αγνοηθεί η δυναμική της αποθήκευσης της λεκάνης απορροής (εδαφικής και υπόγειας) και να εκτιμηθεί η πραγματική εξατμοδιαπνοή με βάση την παρατηρημένη απορροή και τις βροχοπτώσεις της λεκάνης, με το ετήσιο υδατικό ισοζύγιο να εκφράζεται από τη σχέση:

$$P = Q + ET \quad (2.4)$$



Εικόνα 2.1: Αδιάστατο γράφημα Budyko.

Στο άρθρο των Andréassian *et al.* (2016) πραγματοποιείται ανασκόπηση της ιστορικής εξέλιξης της υπόθεσης Budyko, αναδεικνύοντας τη σημαντική συνεισφορά του Evald Oldekop. Αρχικά, ο Oldekop (1885-1952) πρότεινε την έννοια της μέγιστης εξάτμισης σε μια λεκάνη απορροής, αναδιατυπώνοντας τη σχέση του Schreiber (2.5) και αντιστοιχίζοντας την εμπειρική παράμετρο (k) με τη μέγιστη δυνατή εξάτμιση, η οποία καθορίζεται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Έπειτα από δοκιμές πρότεινε τη σχέση (2.6) συναρτήσει του δείκτη ξηρότητας. Η μετεωρολογική διατύπωση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής (PET) έγινε από τον Thornthwaite σχεδόν τρεις δεκαετίες αργότερα. Υποστήριξε ότι, για τον χαρακτηρισμό του κλίματος μιας περιοχής ως υγρού ή ξηρού, δεν επαρκεί μόνο η γνώση της ποσότητας βροχόπτωσης, αλλά απαιτείται επίσης η εκτίμηση της σχέσης μεταξύ της διαθέσιμης βροχόπτωσης και της απαιτούμενης ποσότητας νερού για την κάλυψη των αναγκών της εξατμοδιαπνοής.

Schreiber:
(1904)

$$\frac{ET}{P} = 1 - e^{-\frac{k}{P}} \quad (2.5)$$

Oldekop:
(1911)

$$\frac{ET}{P} = \varphi \cdot \tanh\left(\frac{1}{\varphi}\right) \quad (2.6)$$

Budyko:
(1974)

$$\frac{ET}{P} = \left(\varphi \cdot \tanh\left(\frac{1}{\varphi}\right) \cdot (1 - e^{-\varphi}) \right)^{0.5} \quad (2.7)$$

Τις τελευταίες δεκαετίες ενίοτε χρησιμοποιείται η σχέση του Oldekor, όμως οι περισσότερες μελέτες στις καμπύλες Budyko χρησιμοποιούν τις παραμετρικές σχέσεις Turc – Mezentsev (Εξ. 2.8) και Tixeront – Fu (Εξ. 2.9):

$$\text{Turc – Mezentsev:} \quad \frac{ET}{P} = \left(1 + \left(\frac{PET}{P}\right)^{-n}\right)^{-\frac{1}{n}} \quad \text{όπου } n > 0 \quad (2.8)$$

$$\text{Tixeront – Fu:} \quad \frac{ET}{P} = 1 + \frac{PET}{P} - \left(1 + \left(\frac{PET}{P}\right)^m\right)^{\frac{1}{m}} \quad \text{όπου } m > 1 \quad (2.9)$$

Όλες οι εξεταζόμενες καμπύλες έχουν τις ίδιες ασύμπτωτες, όμως δεν υπάρχει τιμή της παραμέτρου n ή m για την οποία οι καμπύλες να ταυτίζονται πλήρως με την καμπύλη του Oldekor. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι εξισώσεις (2.8) και (2.9), αν και είναι διαφορετικές, δίνουν παρόμοια αποτελέσματα για την επιλογή $m \approx n + 0.72$ (Andréassian *et al.*, 2019).

Οι Chen *et al.* (2023) αναφέρουν ότι οι υδρολόγοι, προκειμένου να βελτιώσουν την απόδοση του μοντέλου, εισάγουν στην καμπύλη παραμέτρους που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Η παράμετρος P_w (watershed – characteristic – related parameter) είναι εκείνη που ρυθμίζει την κατανομή της βροχόπτωσης σε εξατμοδιαπνοή και απορροή για έναν δεδομένο δείκτη ξηρασίας. Σε λεκάνες με υψηλότερες τιμές P_w , η βροχόπτωση απομακρύνεται κυρίως μέσω της εξατμοδιαπνοής, με μικρότερη συμβολή στην απορροή. Ορισμένες μελέτες αναφέρουν την παράμετρο P_w ως την ικανότητα συγκράτησης νερού μιας λεκάνης απορροής (Zhou *et al.*, 2015). Στη μελέτη των Chen *et al.* (2023) αναπτύσσεται μια νέα προσέγγιση για την εκτίμηση της παραμέτρου P_w στο πλαίσιο του Budyko, βασισμένη σε υδρολογικά ομοειδείς ομάδες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παράμετρος P_w σχετίζεται με την εδαφική υγρασία και τη φυτοκάλυψη, με τη σχέση αυτή να διαφοροποιείται ανάλογα με τις συγκεκριμένες ομάδες. Διαπιστώθηκε ότι το όριο εδαφικής υγρασίας (Soil Moisture) των 20 mm διαχωρίζει τις λεκάνες σε δύο διαφορετικά υδατικά καθεστώτα. Σε ξηρές λεκάνες ($SM \leq 20$ mm), με την αύξηση της εδαφικής υγρασίας η παράμετρος P_w αυξάνεται, ενώ σε υγρές λεκάνες ($SM \geq 20$ mm) μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι η διαπνοή αυξάνεται, όταν αυξάνεται η εδαφική υγρασία σε ξηρές συνθήκες.

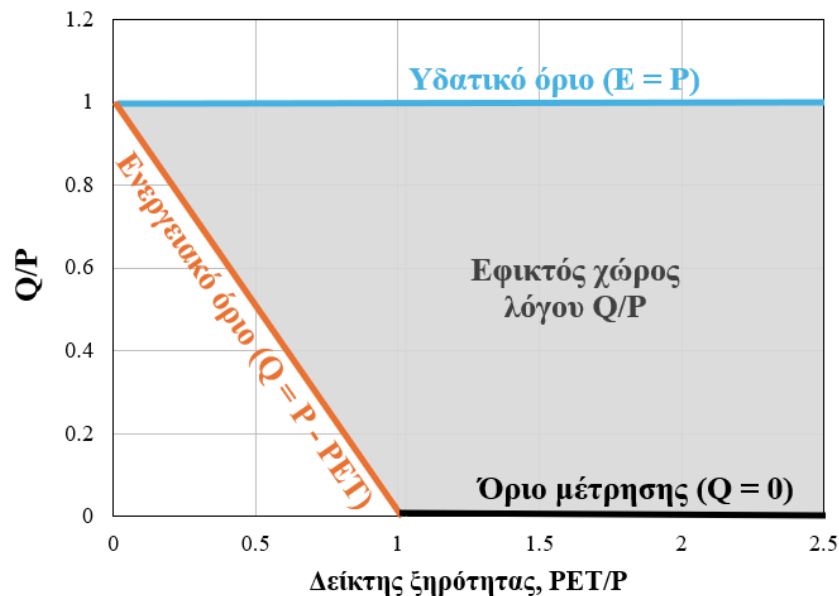
Οι Andréassian *et al.* (2012) εξέτασαν την ενδεχόμενη εγκατάλειψη της κλασικής αναπαράστασης του πλαισίου Budyko και την αντικατάσταση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής με την απορροή. Με βάση αυτή την προσέγγιση, υπάρχουν τρεις υδρολογικοί περιορισμοί:

$$\text{Υδατικό όριο:} \quad Q \leq P \quad (2.10)$$

$$\text{Ενεργειακό όριο:} \quad Q \geq P - PET \quad (2.11)$$

$$\text{Όριο μέτρησης:} \quad Q \geq 0 \quad (2.12)$$

Η κλασική αναπαράσταση της υπόθεσης Budyko είναι ισοδύναμη με την ακόλουθη στην **Εικόνα 2.2**, καθώς και οι δύο στηρίζονται στο υδατικό ισοζύγιο. Ειδικότερα, δεδομένης της βροχόπτωσης και μιας εκ των δύο υπολοίπων μεταβλητών, δύναται να εκτιμηθεί και η τρίτη ($ET = P - Q$ ή $Q = P - ET$). Ωστόσο, η κλασική αναπαράσταση εμφανίζει εγγενή περιορισμό σε λεκάνες που έχουν υπόγειες εισροές (*gaining*), δηλαδή σε περιπτώσεις όπου η μέση ετήσια απορροή υπερβαίνει τη βροχόπτωση. Σε αυτές τις συνθήκες, προκύπτει αρνητικός λόγος ET/P , αντιβαίνοντας τη φυσική ερμηνεία της εξατμοδιαπνοής. Αντίθετα, στη νέα προσέγγιση οι λεκάνες αυτές εντάσσονται άνω του υδατικού ορίου.



Εικόνα 2.2: Αδιάστατο γράφημα Budyko κατά Andréassian *et al.* (2012)

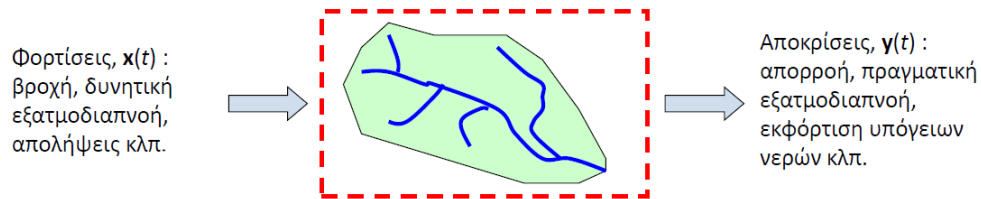
Επισημαίνεται ότι όταν ένα σημείο βρίσκεται πάνω από το υδατικό όριο, αυτό μπορεί να σημαίνει ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση έχει υποεκτιμηθεί, ότι υπάρχουν εισροές προς τη συγκεκριμένη λεκάνη απορροής που δεν έχουν συνεκτιμηθεί – φαινόμενο σύνηθες σε καρστικές περιοχές – ή ότι υπερεκτιμήθηκε η απορροή. Όταν ένα σημείο βρίσκεται κάτω από το ενεργειακό όριο ($Q < P - PET$), τότε η λεκάνη δεν θεωρείται υδρολογικά κλειστή (*leaky*). Η συγκεκριμένη συμπεριφορά μπορεί να ερμηνευτεί με τους εξής τρόπους: η λεκάνη έχει υπόγειες απώλειες προς γειτονική λεκάνη, η βροχόπτωση έχει υπερεκτιμηθεί, γι' αυτό και αναμένεται μεγαλύτερη απορροή, οι μετρήσεις της απορροής ή/και της εξατμοδιαπνοής περιλαμβάνουν σφάλματα και έχουν υποεκτιμηθεί.

2.4 Υδρολογικά μοντέλα

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αναπαράσταση όλων των ζητούμενων διεργασιών του υδατικού ισοζυγίου είναι αναγκαία η χρήση υδρολογικών μοντέλων. Ως υδρολογικό μοντέλο ορίζεται ένα σύνολο μαθηματικών σχέσεων που αξιοποιούν δεδομένα πεδίου και βασίζονται σε λογικές υποθέσεις για τους φυσικούς μηχανισμούς του υδρολογικού κύκλου, με στόχο να εκτιμηθούν ποσοτικά οι κυριότερες υδρολογικές μεταβλητές, όπως είναι η απορροή στην έξοδο της λεκάνης. Η γενική μαθηματική αναπαράσταση ενός υδρολογικού μοντέλου είναι:

$$y(t) = h[x(t), \lambda, \theta, s_0, s_b] \quad (2.10)$$

όπου $x(t)$ οι μεταβλητές εισόδου του μοντέλου ή χρονοσειρές φόρτισης, $y(t)$ οι μεταβλητές εξόδου ή χρονοσειρές απόκρισης, λ τα μετρήσιμα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (π.χ. έκταση λεκάνης), θ τα μη μετρήσιμα μεγέθη (παράμετροι), s_0 οι αρχικές τιμές των μεταβλητών, s_b οι οριακές συνθήκες.



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση ενός υδρολογικού μοντέλου προσομοίωσης [Ευστρατιάδης, 2008]

Ένα υδρολογικό μοντέλο μπορεί να περιγράψει:

- **Μεμονωμένα γεγονότα** (*event – type*), όπως είναι η αιχμή μιας πλημμύρας ή ένα υδρογράφημα. Σε αυτήν την περίπτωση, η αναπαράσταση του γεγονότος συνήθως γίνεται με εμπειρικές προσεγγίσεις (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που δεν αφορούν τη μελέτη, όπως η εξατμοδιαπνοή και η διήθηση.
- **Συνεχή ή διαχρονική εξέλιξη** των υδρολογικών διεργασιών σε μια χωρική ενότητα, όπως μια λεκάνη απορροής (*continuous - time*). Η προσέγγιση διέπεται από κάποιο φυσικό ή εννοιολογικό υπόβαθρο, το οποίο καθορίζει τις σχέσεις μεταξύ των διεργασιών και επιτρέπει την ποσοτική προσομοίωσή τους.

Ανάλογα με τη χωρική κλίμακα και την παραμετροποίησή τους τα μοντέλα διακρίνονται σε **αδιαμέριστα** (*lumped*), **ημικατανεμημένα** (*semi-distributed*), **ημιαδιαμέριστα** (*semi-lumped*) και **κατανεμημένα** (*distributed*). Σε ένα αδιαμέριστο μοντέλο, η λεκάνη απορροής θεωρείται ως μια ενιαία μονάδα και το υδατικό ισοζύγιο αναπαρίσταται σε αυτήν, με σκοπό την εκτίμηση της απορροής στην έξοδό της. Οι εισροές του μοντέλου (π.χ. κατακρήμνιση)

εφαρμόζονται ως χρονοσειρές σε όλη την έκταση της λεκάνης διατηρώντας ενιαίες τις τιμές των παραμέτρων. Στο ημικατανομημένο μοντέλο, η λεκάνη απορροής διαιρείται σε επιμέρους υπολεκάνες, οι οποίες αντιστοιχούν είτε σε φυσικές υπολεκάνες είτε σε χωρικές ενότητες με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Σε καθεμία εφαρμόζονται διαφορετικές χρονοσειρές εισροών και διαφορετικές τιμές παραμέτρων, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι χωρικές διαφοροποιήσεις των υδρολογικών διεργασιών. Εφόσον υπολογιστεί η απορροή στην έξοδο κάθε υπολεκάνης, μέσω της μεθόδου της διόδευσης εκτιμάται η συνολική απορροή στην έξοδο της λεκάνης. Σε ένα ημιαδιαμερίστο μοντέλο γίνεται διακριτοποίηση της ενιαίας λεκάνης σε υπολεκάνες, οι οποίες παρόλο που δέχονται διαφορετικές φορτίσεις διατηρούν κοινές τιμές των παραμέτρων. Η προσέγγιση του κατανομημένου μοντέλου αφορά τη διαίρεση της λεκάνης απορροής σε «κύτταρα», δηλαδή μικρές χωρικές ενότητες ακανόνιστου γεωμετρικού σχήματος που έχουν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και τιμές παραμέτρων.

Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν επίσης να ταξινομηθούν με βάση τη μαθηματική τους δομή, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο περιγράφουν και συσχετίζουν τις υδρολογικές διεργασίες μεταξύ τους. Σε αυτήν την κατηγοριοποίηση περιλαμβάνονται τα:

- **Μοντέλα φυσικής βάσης** (*physically – based*), τα οποία αναπαριστούν διεργασίες σε πολύ μικρή χωρική κλίμακα, καθώς βασίζονται σε θεωρητικές εξισώσεις ροής και φυσικούς νόμους.
- **Εννοιολογικά μοντέλα** (*conceptual*), που απαιτούν μικρό αριθμό παραμέτρων και αναπαριστούν τα βασικά μακροσκοπικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης.
- **Στατιστικά ή στοχαστικά μοντέλα**, που διατηρούν τη στατιστική δομή ενός παρατηρημένου δείγματος των χρονοσειρών και περιλαμβάνουν στοιχειώδη φυσική συνέπεια.
- **Μοντέλα συσχέτισης δεδομένων** (*data – driven*) ή **μαύρου κουτιού** (*black – box*), τα οποία περιγράφονται από πλήθος μαθηματικών συντελεστών, χωρίς κάποια φυσική σημασία.

Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μαθηματικές δομές των μοντέλων, το εννοιολογικό μοντέλο προσφέρει σημαντική απλότητα στη δομή του, επιτρέποντας την προσομοίωση σύνθετων υδρολογικών διεργασιών με περιορισμένο αριθμό παραμέτρων. Οι παράμετροι συνήθως έχουν φυσική ερμηνεία και αντικατοπτρίζουν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Συνεπώς, διευκολύνουν την εφαρμογή του μοντέλου σε λεκάνες απορροής με περιορισμένα ή ανομοιογενή δεδομένα.

2.5 Βαθμονόμηση και παραμετροποίηση μοντέλων

Η βαθμονόμηση (*calibration*) είναι γνωστή ως το αντίστροφο υδρολογικό πρόβλημα, καθώς αποτελεί τη διαδικασία προσαρμογής των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, ώστε η προσομοιωμένη χρονοσειρά απορροής να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο την αντίστοιχη παρατηρημένη.

Παλαιότερα θεωρούνταν ότι η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα των μοντέλων μπορεί να συμβάλλει στη βελτίωση της αξιοπιστίας τους ως προς την αντιμετώπιση της πρόβλεψης υδρολογικών επιπτώσεων. Ωστόσο όταν ένα μοντέλο είναι πολύπλοκο αντιμετωπίζονται δυσκολίες στην εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων και στην επαλήθευση της δομής τους.

Οι Wagener *et al.* (2001) επισημαίνουν ότι η αντίληψη του υδρολόγου για ένα υδρολογικό σύστημα καθορίζει το εννοιολογικό επίπεδο που πρέπει να ενσωματωθεί στο μοντέλο, ενώ η σχετική σημασία των διαφορετικών διεργασιών εξαρτάται τόσο από τον σκοπό της μοντελοποίησης όσο και από την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Παράλληλα, σημειώνουν ότι από τη βαθμονόμηση ενός μοντέλου βροχής – απορροής μπορούν να εκτιμηθούν έως και 6 παράμετροι, εφόσον διατίθεται ένα δείγμα παρατηρημένης απορροής στην έξοδο της λεκάνης. Επομένως, μοντέλα με πιο πολύπλοκη δομή απαιτούν και περισσότερη πληροφορία για να βαθμονομηθούν, π.χ. χρονοσειρές παροχής σε περισσότερες από μια θέσεις.

Οι Perrin *et al.* (2000) αξιοποίησαν δεδομένα από 429 λεκάνες απορροής, κατανεμημένες σε πέντε χώρες (Αυστραλία, Βραζιλία, Γαλλία, Ακτή Ελεφαντοστού και Ηνωμένες Πολιτείες), με στόχο τη διερεύνηση της σύνδεσης της πολυπλοκότητας με την ευρωστία ενός μοντέλου, αλλά και την πιθανή συμπληρωματικότητα μεταξύ δομών μοντέλων. Στη μελέτη τους απέδειξαν ότι τα σύνθετα μοντέλα είναι καλύτερα σε λειτουργία βαθμονόμησης, αλλά υστερούν κατά τη φάση επαλήθευσης, καθώς παρουσιάζουν έλλειψη σταθερότητας, γεγονός που αποδίδεται στη δομή τους. Καταλήγουν ότι τα πιο απλά μοντέλα μπορεί να έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα ακόμη κι αν δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν κάθε πρόβλημα. Το συμπέρασμα αυτό συνδέεται με την αρχή της φειδούς, γνωστή και ως αρχή της απλότητας ή ξυράφι του Ockham, σύμφωνα με την οποία όταν δύο μοντέλα παρέχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα, προτιμάται το απλούστερο, καθώς μειώνει τον κίνδυνο υπερπροσαρμογής (*overfitting*). Συνεπώς, βασικός στόχος στη δημιουργία ενός μοντέλου θα πρέπει να είναι η κατάλληλα προσαρμοσμένη πολυπλοκότητα ανάλογα με το πρόβλημα.

2.6 Η έννοια της περιοχοποίησης παραμέτρων

Η περιοχοποίηση (*regionalization*) αποτελεί μια μεθοδολογική προσέγγιση που χρησιμοποιείται στην υδρολογία για τη μεταφορά παραμέτρων από λεκάνες απορροής με διαθέσιμα δεδομένα σε άλλες γειτονικές ή παρόμοιες λεκάνες όπου τα δεδομένα είναι

ελλιπή. Στόχος είναι να γίνει δυνατή η προσομοίωση σε περιοχές που δεν έχουν πυκνό δίκτυο μετρήσεων. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην αρχή ότι υδρολογικά όμοιες λεκάνες παρουσιάζουν παρόμοια υδρολογική συμπεριφορά, και επομένως μπορούν να περιγραφούν με παρόμοιες παραμέτρους.

Οι Pagliero *et al.* (2019) διερεύνησαν διαφορετικές τεχνικές περιοχοποίησης παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου SWAT εφαρμόζοντάς το στη Δυτική Ευρώπη. Μέσω της ανάλυσης της μερικής παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων (PLSR) απέδειξαν ότι τα βασικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής, όπως η γεωμορφολογία, οι χρήσεις γης και οι ιδιότητες του εδάφους περιγράφουν ικανοποιητικά τις μέσες υδρολογικές συνθήκες, αλλά υστερούν στην εκτίμηση των ακραίων γεγονότων.

Οι Oudin *et al.* (2008) μελέτησαν 913 λεκάνες απορροής στη Γαλλία εφαρμόζοντας τρεις προσεγγίσεις περιοχοποίησης των παραμέτρων των μοντέλων GR4J και TOPMO: (α) παλινδρόμηση, (β) χωρική εγγύτητα και (γ) φυσική ομοιότητα, που αποτελεί έναν συνδυασμό των δύο προηγούμενων.

Κατά τη μέθοδο της παλινδρόμησης αξιοποιήθηκαν τα φυσικά και υδροκλιματικά χαρακτηριστικά κάθε λεκάνης, π.χ. η έκταση, η μέση κλίση, η δασική κάλυψη και ο δείκτης ξηρότητας. Η παλινδρόμηση παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων μπορεί να δίνουν παρόμοια αποτελέσματα λόγω αλληλεπιδράσεων των παραμέτρων.

Με την προσέγγιση της χωρικής εγγύτητας, οι παράμετροι γειτονικών λεκανών «μεταφέρονται» στη λεκάνη που δεν έχουν προσδιοριστεί οι παράμετροι (*ungaged catchment*), με την υπόθεση ότι θα παρουσιάζουν παρόμοια υδρολογική συμπεριφορά. Ωστόσο αυτό εξαρτάται από την πυκνότητα του δικτύου των προσδιορισμένων λεκανών (*gaged*), οι οποίες είναι δότριες και επιλέγονται με βάση την απόσταση των κεντροειδών των λεκανών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είναι πιο αποτελεσματικός ο υπολογισμός της προσομοιωμένης απορροής στο βήμα j με βάση τη μέση τιμή των απορροών ενός πλήθους m λεκανών – δοτριών, σε σύγκριση με την εναλλακτική προσέγγιση όπου υπολογιζόταν ο σταθμισμένος μέσος όρος των παραμέτρων από τις m λεκάνες – δότριες και στη συνέχεια γινόταν η προσομοίωση της απορροής.

Κατά την περιοχοποίηση των παραμέτρων με την προσέγγιση της φυσικής ομοιότητας, οι λεκάνες – δότριες επιλέχθηκαν βάσει της ομοιότητας των φυσικών και υδροκλιματικών χαρακτηριστικών και κατατάχθηκαν αναλόγως. Στη συνέχεια, οι παράμετροι της μη προσδιορισμένης λεκάνης εκτιμήθηκαν μέσω των δύο μεθόδων της χωρικής εγγύτητας και πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της απορροής της.

Συμπεραίνουν ότι η προσέγγιση της φυσικής ομοιότητας λειτουργεί συμπληρωματικά προς εκείνη της χωρικής εγγύτητας, με τη δεύτερη να παρουσιάζει την υψηλότερη απόδοση. Ακολουθεί σε αποτελεσματικότητα η προσέγγιση της φυσικής ομοιότητας, ενώ η παλινδρόμηση καταγράφει τη χαμηλότερη επίδοση.

Η μελέτη των Pool *et al.* (2021) εστίασε στην αξιολόγηση μεθόδων περιοχοποίησης των παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων για μη μετρημένες λεκάνες, εξετάζοντας 19 διαφορετικές προσεγγίσεις σε 671 λεκάνες των ΗΠΑ. Οι συγγραφείς ανέλυσαν την απόδοση των περιοχοποιημένων παραμέτρων σε σχέση με τις τοπικές βαθμονομήσεις, εντόπισαν την ύπαρξη ιδανικών λεκανών «δοτριών» για την πλειονότητα των περιπτώσεων, και κατέδειξαν ότι η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα κριτήρια επίδοσης που εξετάζονται.

Στη μελέτη τους, οι Feigl *et al.* (2022) παρουσίασαν την πρώτη εφαρμογή μεγάλης κλίμακας της αυτόματης εκτίμησης συναρτήσεων μεταφοράς (transfer functions – TFs) για παραμέτρους ενός κατανεμημένου υδρολογικού μοντέλου. Η εκτίμηση των TFs επέτρεψε τη μεταφορά παραμέτρων σε 222 λεκάνες επαλήθευσης με ικανοποιητική ακρίβεια, αποδεικνύοντας ότι μπορεί να επιτευχθεί υψηλή απόδοση ακόμα και με περιορισμένα δεδομένα βαθμονόμησης (5 ετών) σε μη μετρημένες λεκάνες απορροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΕΡΙΟΧΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Η διαδικασία περιοχοποίησης των παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων συνήθως βασίζεται στη χωρική εγγύτητα ή/και στη φυσική ομοιότητα των λεκανών, υπό την παραδοχή ότι γεωγραφικά κοντινές ή φυσιογραφικά παρόμοιες περιοχές εμφανίζουν συγκρίσιμη υδρολογική συμπεριφορά. Η προσέγγιση αυτή υποστηρίζεται από τη σύγκριση μορφολογικών, υδροκλιματικών και εδαφολογικών μεταβλητών που περιγράφουν τις λεκάνες, όπως η φυτοκάλυψη, η κλίση και ο δείκτης ξηρότητάς τους. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια εναλλακτική προσέγγιση περιοχοποίησης, η οποία βασίζεται στην έννοια των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (ΜΥΑ).

3.1 Η έννοια της μονάδας υδρολογικής απόκρισης

Η μονάδα υδρολογικής απόκρισης (*hydrological response unit – HRU*) αποτελεί μια θεμελιώδη έννοια στην υδρολογική προσομοίωση, καθώς επιτρέπει την παραμετροποίηση των μοντέλων με τρόπο που να εξασφαλίζεται συνέπεια στις φυσικές ιδιότητες του συστήματος. Ο όρος εισήχθη από τον Flügel (1995) με σκοπό να περιγράψει τους εδαφικούς τύπους μιας λεκάνης, οι οποίοι περιλαμβάνουν κοινά υδρολογικά, φυσιογραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Η χρήση των ΜΥΑ συναντάται κυρίως σε καταναεμημένα μοντέλα φυσικής βάσης, όπως το SWAT, όπου η λεκάνη διαχωρίζεται σε επιμέρους ενότητες με διαφοροποιημένες ιδιότητες.

Η διαμόρφωση των ΜΥΑ βασίζεται στην προσέγγιση των Savvidou *et al.* (2018). Κάθε ΜΥΑ αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών του αριθμού καμπύλης απορροής (*CN*), ο οποίος εκτιμάται με βάση την κατηγοριοποίηση τριών φυσιογραφικών χαρακτηριστικών: υδατοπερατότητα, φυτοκάλυψη και αποστραγγιστική ικανότητα (**Εικόνα 3.1**).

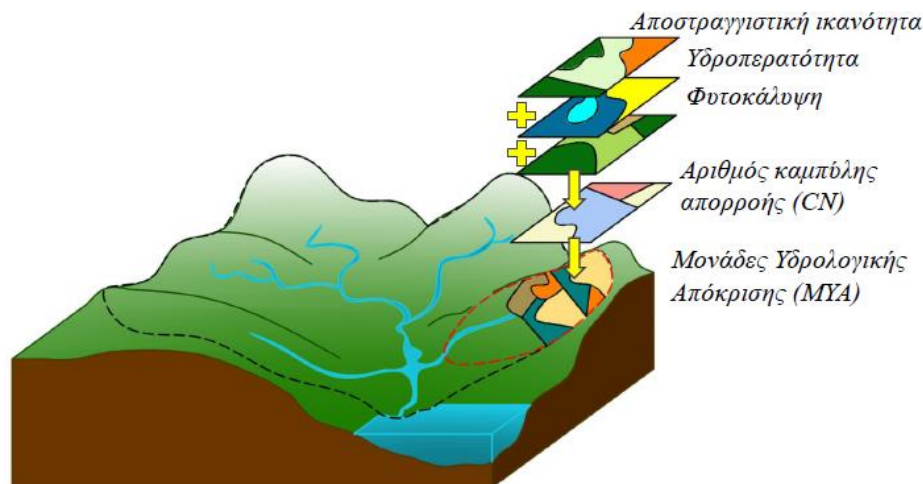
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

ΜΥΑ	Τιμές <i>CN</i>	Παραγωγή απορροής
ΜΥΑ 1	28 – 50	Πολύ χαμηλή έως αμελητέα
ΜΥΑ 2	50 – 60	Σχετικά χαμηλή
ΜΥΑ 3	60 – 75	Μέτρια έως υψηλή
ΜΥΑ 4	75 – 100	Υψηλή έως πολύ υψηλή

Πηγή: ΥΠΕΝ, 2022 – 2023.

Με υπόβαθρο τον χάρτη του *CN*, είναι εφικτή η υλοποίηση του απαιτούμενου πλήθους ΜΥΑ σε μια περιοχή, ορίζοντας αντίστοιχες κλάσεις μεταβολής του. Όσο υψηλότερη είναι η μέση τιμή του *CN* στην εν λόγω κλάση, τόσο μεγαλύτερη είναι η αναμενόμενη παραγωγή

απορροής από τη ΜΥΑ. Έχουν διαμορφωθεί τέσσερις κλάσεις ΜΥΑ, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικά εύρη CN , όπως παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.1**.



Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας παραγωγής των μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

3.2 Παραμετροποίηση σε επίπεδο ΜΥΑ

Η παραμετροποίηση των υδρολογικών μοντέλων σε επίπεδο Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης (ΜΥΑ) επιτρέπει την αντιστοίχιση παραμέτρων σε εδαφικούς τύπους, οι οποίοι παρουσιάζουν ομοιογενή υδρολογική συμπεριφορά, ανεξαρτήτως της χωρικής τους συνέχειας. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη δυνατότητα γενίκευσης και φυσικής ερμηνείας των παραμέτρων και υποστηρίζει την εκτέλεση προσομοιώσεων σε διαφορετικές λεκάνες απορροής, χωρίς να απαιτείται η εξέταση και η σύγκριση της χωρικής εγγύτητας και της κατανομής των φυσιογραφικών, υδροκλιματικών και εδαφικών χαρακτηριστικών των λεκανών για τον προσδιορισμό των πλέον όμοιων υδρολογικά περιοχών.

Με βάση αυτήν την προσέγγιση, κάθε ΜΥΑ μπορεί να αντιστοιχηθεί σε ένα διακριτό σετ παραμέτρων που περιγράφει τη συγκεκριμένη υδρολογική της συμπεριφορά. Έτσι, αν το επιλεγμένο υδρολογικό μοντέλο διαθέτει m παραμέτρους και οι λεκάνες διαχωρίζονται σε n κλάσεις ΜΥΑ, ο συνολικός αριθμός παραμέτρων υπολογίζεται ως:

$$N = m \times n \quad (3.1)$$

Κάθε σετ παραμέτρων εφαρμόζεται σε όλα τα τμήματα της ίδιας ΜΥΑ, διασφαλίζοντας τη λειτουργική συνέπεια στην προσομοίωση της συνολικής απορροής της λεκάνης και διευκολύνοντας τη βαθμονόμηση σε διαφορετικές λεκάνες απορροής. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης του γενικευμένου μοντέλου που περιγράφεται από N παραμέτρους θεωρούνται κοινές χρονοσειρές εισόδου (κατακρήμνιση, δυνητική εξατμοδιαπνοή) σε όλες

τις ΜΥΑ, ενώ οι τιμές των παραμέτρων διαφοροποιούνται, έτσι ώστε το συνολικό ύψος απορροής που παράγεται στην έξοδο της λεκάνης να είναι ίσο με:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3.2)$$

όπου Q_i το ύψος απορροής που παράγεται στη μονάδα υδρολογικής απόκρισης, i , και A_i η επιφάνεια που καταλαμβάνει η ΜΥΑ, i .

Για να διασφαλίζεται ότι το υδρολογικό μοντέλο παραμένει συνεπές με τα φυσικά χαρακτηριστικά των ΜΥΑ, είναι αναγκαία η διατήρηση των σχέσεων (3.3) και (3.4):

$$Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_4 \quad (3.3)$$

Η σχέση (3.3) υποδηλώνει ότι η ΜΥΑ 1 παράγει το μικρότερο ύψος απορροής, η ΜΥΑ 2 το επόμενο μεγαλύτερο, κ.ο.κ., σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του **Πίνακα 3.1**. Με τη σχέση (3.4), ορίζονται τα όρια αναζήτησης της χωρητικότητας εδαφικής υγρασίας, ώστε όσο πιο ξηρή είναι η ΜΥΑ, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η χωρητικότητά της. Αυτό συνάδει με το γεγονός ότι μια ξηρή ΜΥΑ χαρακτηρίζεται από χαμηλό αριθμό καμπύλης (CN), δηλαδή από μικρότερη απορροή στην έξοδο της λεκάνης.

$$K_1 > K_2 > K_3 > K_4 \quad (3.4)$$

όπου K_i η χωρητικότητα της εδαφικής υγρασίας της ΜΥΑ i .

3.3 Υλοποίηση της προσέγγισης στις λεκάνες απορροής της μελέτης

Για την εφαρμογή της παραμετροποίησης σε επίπεδο ΜΥΑ, αρχικά αξιοποιήθηκαν υδρομετρικά δεδομένα από τη 2^η Αναθεώρηση των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών (ΣΔΛΑΠ), στην οποία ζητήθηκε η κατάρτιση φυσικοποιημένων υδατικών ισοζυγίων για το σύνολο των λεκανών απορροής των ποτάμιων και λιμναίων υδατικών συστημάτων, για την περίοδο 1980 – 2021. Η διαμόρφωση των ΣΔΛΑΠ έγινε σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. Από αυτά τα δεδομένα προέκυψαν οι ΜΥΑ, οι οποίες στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν για την παραμετροποίηση του γενικευμένου μοντέλου και την ανάλυση της υδρολογικής συμπεριφοράς των λεκανών.

Στη συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί αναζήτηση μιας φειδωλής μορφής ενός αδιαμέριστου εννοιολογικού μοντέλου, με στόχο τη χρήση ενός ελάχιστου αριθμού παραμέτρων, χωρίς να χάνεται η ικανότητα αναπαράστασης της υδρολογικής συμπεριφοράς. Με αυτήν την απλοποιημένη δομή, το μοντέλο θα εφαρμόζεται αποτελεσματικά στις λεκάνες της μελέτης, διευκολύνοντας τη βαθμονόμηση, μειώνοντας την πολυπλοκότητα και ενισχύοντας τη γενίκευση των παραμέτρων. Κατά τη διάρκεια της προκαταρκτικής ανάλυσης, η οποία θα

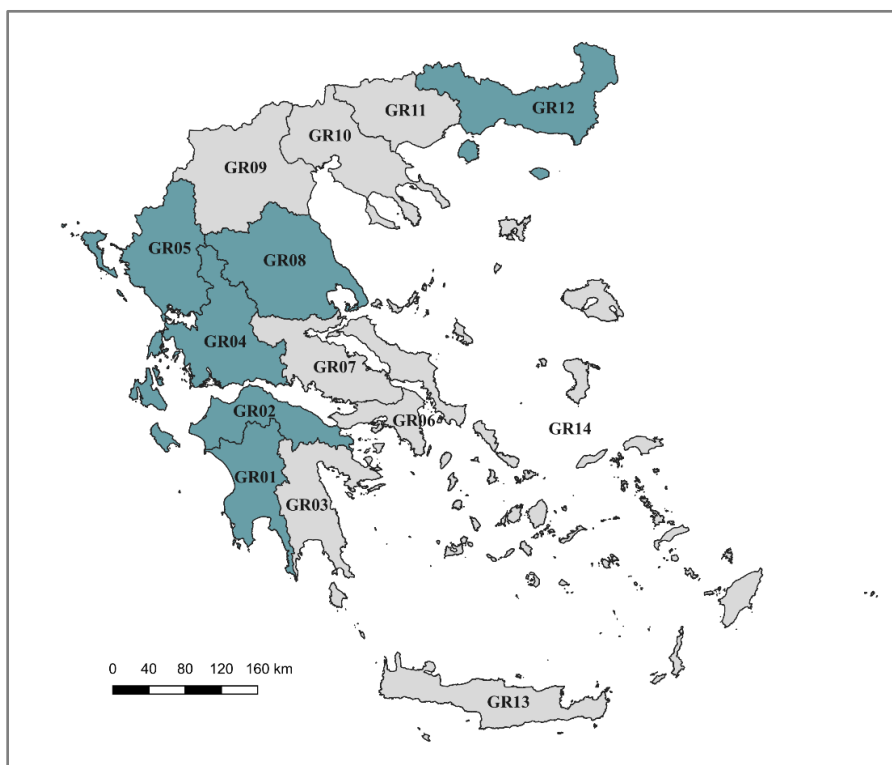
εφαρμοστεί στις 35 λεκάνες της περιοχής μελέτης, θα εξεταστούν διαφορετικές δομές και συνδυασμοί παραμέτρων, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδρασή τους στην ακρίβεια των προσομοιώσεων και να εντοπιστεί η βέλτιστη δομή του υδρολογικού μοντέλου m παραμέτρων.

Μετά την ολοκλήρωση της προκαταρκτικής ανάλυσης και την επιλογή του βέλτιστου υδρολογικού μοντέλου, πραγματοποιείται η περιοχοποίηση των παραμέτρων. Εφόσον το μοντέλο διαθέτει m παραμέτρους και οι λεκάνες διαχωρίζονται σε n ΜΥΑ, η παραμετροποίηση περιλαμβάνει συνολικά $m \times n$ παραμέτρους. Κάθε σει παραμέτρων εφαρμόζεται στις αντίστοιχες ΜΥΑ, διασφαλίζοντας τη συνέπεια του γενικευμένου μοντέλου με τα φυσικά χαρακτηριστικά των ΜΥΑ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Το παρόν κεφάλαιο περιγράφει την περιοχή μελέτης και τα διαθέσιμα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των λεκανών απορροής. Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει λεκάνες απορροής που υπάγονται σε 6 Υδατικά Διαμερίσματα (ΥΔ) της Ελλάδας, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.1**, και συγκεκριμένα στα ΥΔ της Δυτικής Πελοποννήσου (GR01), της Βόρειας Πελοποννήσου (GR02), της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (GR04), της Ηπείρου (GR05), της Θεσσαλίας (GR08) και της Θράκης (GR12).



Εικόνα 4.1: Υδατικά Διαμερίσματα (ΥΔ) της Ελλάδας με διαθέσιμα δεδομένα.

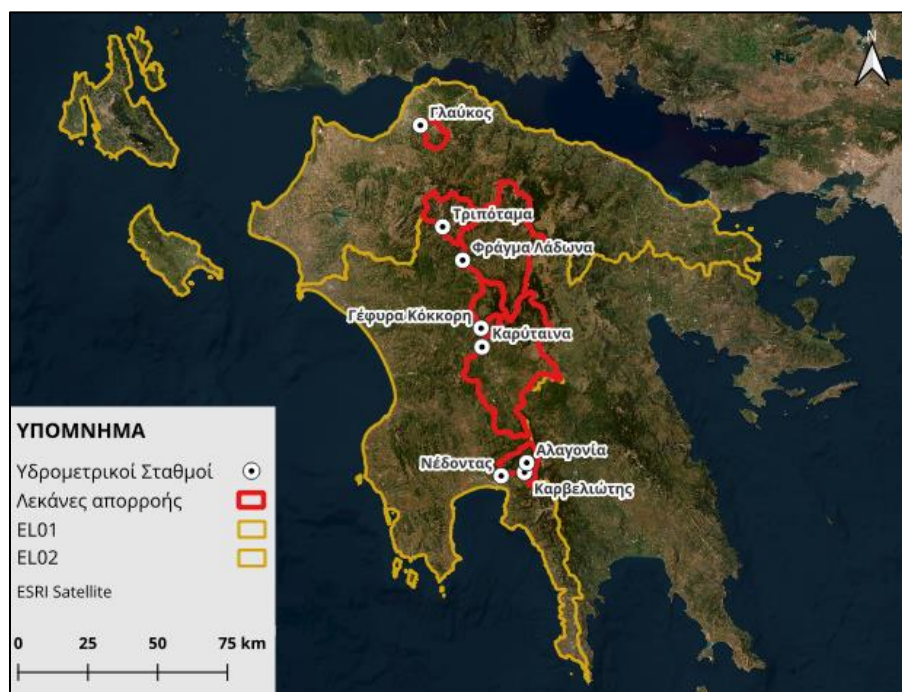
4.1 Θέσεις ελέγχου και γεωμετρικά δεδομένα λεκανών

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει 35 θέσεις ελέγχου των μοντέλων που αναπτύσσονται, οι οποίες εμφανίζονται στις **Εικόνες 4.2** έως **4.4** με τις αντίστοιχες λεκάνες απορροής. Στις προκαταρκτικές αναλύσεις της 2^{ης} Αναθεώρησης των ΣΔΛΑΠ αξιολογήθηκαν τα δείγματα παροχών ως προς την αξιοπιστία τους και αξιοποιήθηκαν όλες οι θέσεις εκτός του υδρομετρικού σταθμού της Γέφυρας Βαρβαριάδας, στον Αγραφιώτη. Στη θέση αυτή, το

παραγόμενο ύψος απορροής υπερβαίνει τα 1600 mm, κατά μέσο όρο ανά έτος, τιμή που δεν μπορεί να αιτιολογηθεί, καθώς ο συντελεστής απορροής που προκύπτει υπερβαίνει το 85%. Η υψηλή αυτή απορροή δεν μπορεί να εξηγηθεί από την υδατοπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης, δεδομένου ότι κυριαρχεί ο ασβεστόλιθος Πίνδου. Αντίστοιχα, η παροχή στη Γέφυρα Κόκκορη (π. Λούσιος) εμφανίζεται επίσης ιδιαίτερα υψηλή και δεν μπορεί να αιτιολογηθεί από την βροχύπτωση που προσπίπτει στην ανάντη λεκάνη, όμως είναι γνωστό ότι η λεκάνη αυτή τροφοδεύεται από υπόγειες εισροές που προέρχονται από το Οροπέδιο Τρίπολης. Για τον λόγο αυτό, η εν λόγω θέση θα αξιοποιηθεί στη διαμόρφωση και την αξιολόγηση των υδρολογικών μοντέλων, αλλά κατά την διαδικασία της περιοχοποίησης των παραμέτρων θα χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση του γενικευμένου μοντέλου, και όχι για βαθμονόμηση.

Στον **Πίνακα 4.1** δίνονται τα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη των λεκανών απορροής που μελετήθηκαν. Σημειώνεται ότι μεταξύ των λεκανών απορροής της περιοχής μελέτης αναφέρεται δύο φορές ο υδρομετρικός σταθμός Πόρος Ρηγανίου στον Εύηνο. Η πρώτη καταγραφή, με την ένδειξη «πριν», αντιστοιχεί στο δείγμα πριν το 1990 και αφορά στο σύνολο της ανάντη λεκάνης, ενώ η δεύτερη, με την ένδειξη «μετά», αφορά την περίοδο μετά το 2000, όταν η λεκάνη διαχωρίστηκε σε δύο τμήματα λόγω της παρεμβολής του φράγματος του Ευήνου. Έκτοτε, η λεκάνη διαθέτει δύο θέσεις ελέγχου, χωρίζοντάς την σε δύο επιμέρους, στις θέσεις του φράγματος Πόρου Ρηγανίου (μετά) και του φράγματος του Ευήνου.

Στην παρούσα μελέτη αξιοποιούνται τα αποτελέσματα της 2^{ης} Αναθεώρησης των ΣΔΛΑΠ, όπου η διαμόρφωση των τεσσάρων ΜΥΑ έγινε με βάση την προσέγγιση των Savvidou *et al.* (2018). Στον **Πίνακα 4.2** παρατίθεται η κατανομή των εκτάσεων μονάδων υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ) στις λεκάνες απορροής ανάντη των θέσεων ελέγχου του υδρολογικού μοντέλου (km²). Παρατηρείται ότι υπάρχει ποικιλία στις κατανομές των ΜΥΑ, γεγονός που καθιστά δυνατή την προσαρμογή του μοντέλου σε λεκάνες με διαφοροποιημένα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 4.2: Χάρτης υδρομετρικών σταθμών και λεκανών απορροής της μελέτης – ΥΔ Δυτικής (EL01) και Βόρειας Πελοποννήσου (EL02).



Εικόνα 4.3: Χάρτης υδρομετρικών σταθμών και λεκανών απορροής της μελέτης – ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04), Ηπείρου (EL05) και Θεσσαλίας (EL08).



Εικόνα 4.4: Χάρτης με τις θέσεις υδρομετρικών σταθμών ΥΔ Θράκης, με ένδειξη αυτών που χρησιμοποιούνται ως θέσεις βαθμονόμησης και επαλήθευσης [ΣΔΛΑΠ, 2023].

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκανών απορροής ανάντη των θέσεων ελέγχου των υδρολογικών μοντέλων.

Θέση βαθμονόμησης	ΥΔ	Έκταση (km ²)	Μέσο υψόμετρο (m)	Υψόμετρο εξόδου (m)	Χρόνος συγκέντρωσης (h)	Μέγιστο μήκος ροής (km)
Καρύταινα	01	852.4	761.0	360.0	13.3	64.7
Αλαγονία	01	20.9	1090.0	594.0	1.6	6.9
Γέφυρα Κόκκορη	01	130.1	1141.0	357.0	3.7	25.2
Καρβελιώτης	01	15.5	1093.0	586.0	1.5	7.5
Φράγμα Λάδωνα	01	755.6	917.0	393.0	11.1	61.7
Νέδοντας	01	120.8	868.0	93.0	3.3	20.2
Τριπόταμα	01	206.1	1031.0	585.0	4.9	17.1
Γλαύκος	02	62.7	1038.0	339.0	2.9	20.0
Αυλάκι	04	1364.8	1058.0	312.0	13.9	104.0
Φράγμα Ευήνου	04	352.9	1188.0	417.0	6.1	40.3
Φράγμα Κρεμαστών	04	3727.9	926.0	196.0	21.6	148.6
Μεσοχώρα	04	628.0	1397.0	665.0	7.7	43.8
Φράγμα Μόρνου	04	582.6	1054.0	329.0	7.4	42.4
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	04	869.2	988.0	177.0	7.8	40.3
Φράγμα Πλαστήρα	04	166.4	1086.0	719.0	5.4	21.1
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	04	516.3	852.0	139.0	9.5	74.2
Κλειδωνιά	05	328.9	1231.0	400.0	6.1	44.7
Φράγμα Πουρναρίου	05	1764.8	852.0	25.0	14.9	116.7
Βοβούσα	05	200.2	1498.0	971.0	6.0	36.0
Γεφ. Κόνιτσας	05	670.7	1405.0	441.0	9.0	79.5
Φράγμα Πηγών Αώου	05	85.4	1489.0	1261.0	5.5	20.0
Φράγμα Λούρου	05	342.3	690.0	66.0	7.5	50.8
Κιοτέκι	05	1473.1	546.0	2.0	17.5	114.8
Μουζάκι	08	143.1	814.0	194.0	3.6	16.0
Πύλη	08	136.3	931.0	222.0	3.6	19.4
Αμπελιά	08	601.7	575.0	162.0	12.1	65.8
Σμόκοβο	08	327.1	634.0	265.0	8.0	33.9
Σκοπιά	08	435.9	646.0	313.0	9.4	35.8
Άνω Δροσίνη	12	152.2	513.1	97.3	5.1	22.1
Αρκουδόρεμα	12	271.3	1023.8	187.3	5.1	35.5
Δεσπάτης	12	117.9	960.2	389.1	4.6	29.1
Φονιάς	12	10.2	775.6	39.3	1.1	8.0
Μπούσδα	12	161.1	1211.0	468.0	4.3	28.4
Τρίκορφο	12	553.0	551.5	16.1	10.6	67.6
Ξηροπόταμος	12	9.3	881.9	120.2	1.0	5.9

Πηγή: ΥΠΕΝ, 2022 – 2023.

Πίνακας 4.2: Κατανομή εκτάσεων μονάδων υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ) στις λεκάνες απορροής ανά την
των θέσεων ελέγχου του υδρολογικού μοντέλου (km²).

Θέση βαθμονόμησης	ΥΔ	ΜΥΑ 1	ΜΥΑ 2	ΜΥΑ 3	ΜΥΑ 4	Σύνολο
Καρύταινα	01	300.4	307.5	173.0	71.5	852.4
Αλαγονία	01	0.1	0.1	8.0	12.7	20.9
Γέφυρα Κόκκορη	01	63.7	23.6	30.4	12.4	130.1
Καρβελιώτης	01	0.4	2.4	4.6	8.0	15.5
Φράγμα Λάδωνα	01	326.2	321.1	78.5	29.8	755.6
Νέδοντας	01	48.7	18.6	25.1	28.5	120.8
Τριπόταμα	01	63.3	126.1	10.9	5.7	206.1
Γλαύκος	02	21.6	21.6	15.6	3.9	62.7
Αυλάκι	04	48.5	342.2	711.6	262.5	1364.8
Φράγμα Ευήνου	04	2.5	209.6	105.8	34.9	352.9
Φράγμα Κρεμαστών	04	126.0	1131.1	1776.7	694.0	3727.9
Μεσοχώρα	04	0.1	118.5	351.5	158.0	628.0
Φράγμα Μόρνου	04	166.4	237.7	136.1	42.4	582.6
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	04	2.7	500.0	307.6	58.9	869.2
Φράγμα Πλαστήρα	04	0.4	38.4	78.8	48.8	166.4
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	04	0.2	290.3	201.7	24.0	516.3
Κλειδωνιά	05	61.9	187.6	65.2	14.2	328.9
Φράγμα Πουρναρίου	05	150.2	648.3	827.6	138.7	1764.8
Βοβούσα	05	1.8	38.1	51.2	109.1	200.2
Γεφ. Κόνιτσας	05	19.1	198.0	142.8	310.8	670.7
Φράγμα Πηγών Αώου	05	0.2	15.2	32.2	37.7	85.4
Φράγμα Λούρου	05	205.1	92.9	33.6	10.7	342.3
Κιοτέκι	05	485.0	489.6	274.6	223.9	1473.1
Μουζάκι	08	11.9	54.9	70.8	5.5	143.1
Πύλη	08	21.0	52.3	60.4	2.6	136.3
Αμπελιά	08	93.9	244.9	216.4	46.5	601.7
Σμόκοβο	08	20.1	106.2	140.4	60.3	327.1
Σκοπιά	08	71.2	183.7	138.0	43.0	435.9
Άνω Δροσίνη	12	5.1	4.3	94.9	47.9	152.2
Αρκουδόρεμα	12	24.8	9.5	54.8	182.2	271.3
Δεσπάτης	12	18.4	2.8	41.8	54.8	117.9
Φονιάς	12	0.0	0.6	0.2	9.4	10.2
Μπούσδα	12	33.9	6.5	65.7	55.0	161.1
Τρίκορφο	12	3.3	21.9	252.1	275.6	553.0
Ξηροπόταμος	12	0.0	0.1	0.2	9.0	9.3

Πηγή: ΥΠΕΝ, 2022 – 2023.

4.2 Συλλογή και επεξεργασία χρονοσειρών

Για τη μελέτη αξιοποιούνται οι χρονοσειρές παροχών που διατίθενται σε θέσεις υδρομετρικών σταθμών και φραγμάτων. Σε αυτές τις θέσεις ελέγχου αξιολογείται η απόδοση του μοντέλου με βάση τη σύγκριση των προσομοιωμένων παροχών με τις αντίστοιχες παρατηρημένες, εκφρασμένες σε ισοδύναμα ύψη νερού. Επιπλέον, οι χρονοσειρές της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής προέρχονται από την ανάλυση των ΣΔΛΑΠ. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε υπολεκάνη παρήχθησαν οι χρονοσειρές

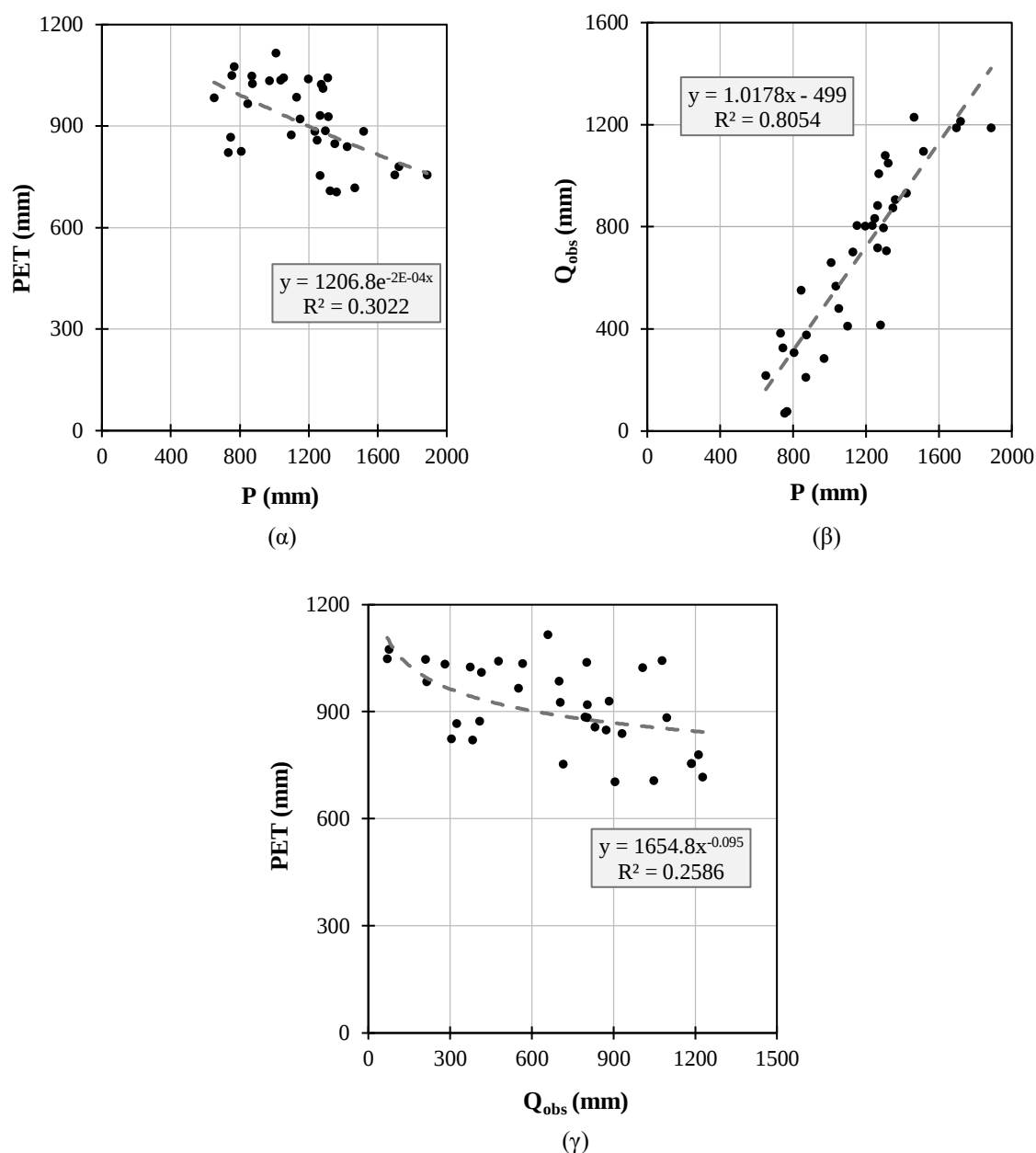
επιφανειακής κατακρήμνισης και θερμοκρασίας, με χρήση της μεθόδου των αντίστροφων αποστάσεων για τη χωρική παρεμβολή των σημειακών τιμών στις θέσεις των βροχομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Παράλληλα, εφαρμόστηκε υψομετρική αναγωγή με την εμπειρική μέθοδο της βροχοβαθμίδας και της θερμοβαθμίδας, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, η δυνητική εξατμοδιαπνοή υπολογίστηκε με χρήση παραμετρικής μεθόδου, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνητική ηλιοφάνεια και την ανηγμένη μέση ημερήσια θερμοκρασία. Οι χρονοσειρές της εξατμοδιαπνοής και της θερμοκρασίας εξάγονται σε ημερήσια κλίμακα για την περίοδο 1/1/2001 έως 31/12/2021 και σε μηνιαία για την περίοδο 1/1/1980 έως 31/12/2000, ενώ η επιφανειακή κατακρήμνιση παρήχθη σε ημερήσια κλίμακα για όλη την περίοδο (1/1/1980 έως 31/12/2021).

Οι διαθέσιμες χρονοσειρές βροχόπτωσης, δυνητικής εξατμοδιαπνοής και παρατηρημένης απορροής, όπου αυτές δίνονταν σε ημερήσια κλίμακα, μετασχηματίστηκαν σε μηνιαία μέσω της διαδικασίας συνάθροισης (*Aggregation*) του λογισμικού *Hydrognomon*.

Σχετικά με την παρατηρημένη απορροή, επισημαίνεται πως στις θέσεις της Γέφυρας Κόκκορη, του φράγματος Λάδωνα, του φράγματος Λούρου και στον υδρομετρικό σταθμό Κιοτέκι επί του Καλαμά παρατηρείται μια σταθερή βασική απορροή. Όσον αφορά τη συμπεριφορά των λεκανών του φράγματος Λούρου και Καλαμά, εξηγείται από την εξωτερική τροφοδοσία τους με νερό από γειτονική λεκάνη. Πράγματι, οι δύο λεκάνες βρίσκονται περιμετρικά του οροπεδίου Ιωαννίνων και τροφοδοτούνται από κατεισδύσεις από την κλειστή αυτή λεκάνη, ενώ το Κιοτέκι τροφοδοτείται επιπλέον με επιφανειακά νερά μέσω της σήραγγας Λαμψίστας. Προκειμένου να γίνει πλήρης προσομοίωση των πολύπλοκων υδατικών ανταλλαγών θα απαιτούνταν σύνθετα μοντέλα. Για την προσέγγιση μιας ρεαλιστικής αναπαράστασης του υδατικού ισοζυγίου, αφαιρέθηκε από την παρατηρημένη απορροή μια σταθερή απορροή ίση με 40 mm/μήνα και 20 mm/μήνα στις λεκάνες του φράγματος Λούρου και Καλαμά, αντίστοιχα. Ομοίως, στις θέσεις Γέφυρα Κόκκορη και φράγμα Λάδωνα έχει αφαιρεθεί μια σταθερή εξωτερική εισροή ίση με 5 mm/μήνα και 13 mm/μήνα, αντίστοιχα, λόγω εκφόρτισης πηγών που τροφοδοτούνται από κατεισδύσεις γειτονικών λεκανών.

Στην **Εικόνα 4.5** απεικονίζονται σε διαγράμματα διασποράς οι μέσες ετήσιες τιμές βροχόπτωσης, δυνητικής εξατμοδιαπνοής και απορροής για κάθε λεκάνη και οι προσαρμοσμένες σχέσεις μεταξύ των τριών μεταβλητών. Τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιούνται αρχικά για την ποιοτική εκτίμηση της αξιοπιστίας των δεδομένων. Ειδικότερα, παρατηρείται συσχέτιση και στις τρεις περιπτώσεις (α), (β) και (γ), και μάλιστα ισχυρή μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής, όπως αναμένεται υδρολογικά. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η δυνητική εξατμοδιαπνοή (*PET*) μειώνεται σε λεκάνες απορροής όπου υπάρχει αυξημένο ύψος κατακρήμνισης. Αυτό συμβαίνει καθώς η *PET* εκτιμάται με τη

μέθοδο Penman – Monteith, η οποία εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία και την καθαρή ακτινοβολία. Σε περιοχές με μεγαλύτερα υψόμετρα επικρατούν χαμηλότερες θερμοκρασίες, οι οποίες μειώνουν την κινητική ενέργεια των μορίων νερού, και υψηλότερη υγρασία λόγω αυξημένης βροχόπτωσης, γεγονός που οδηγεί σε μειωμένη δυνητική εξατμοδιαπνοή.



Εικόνα 4.5: Διαγράμματα διασποράς μεταξύ των μέσων ετήσιων υδρολογικών μεταβλητών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

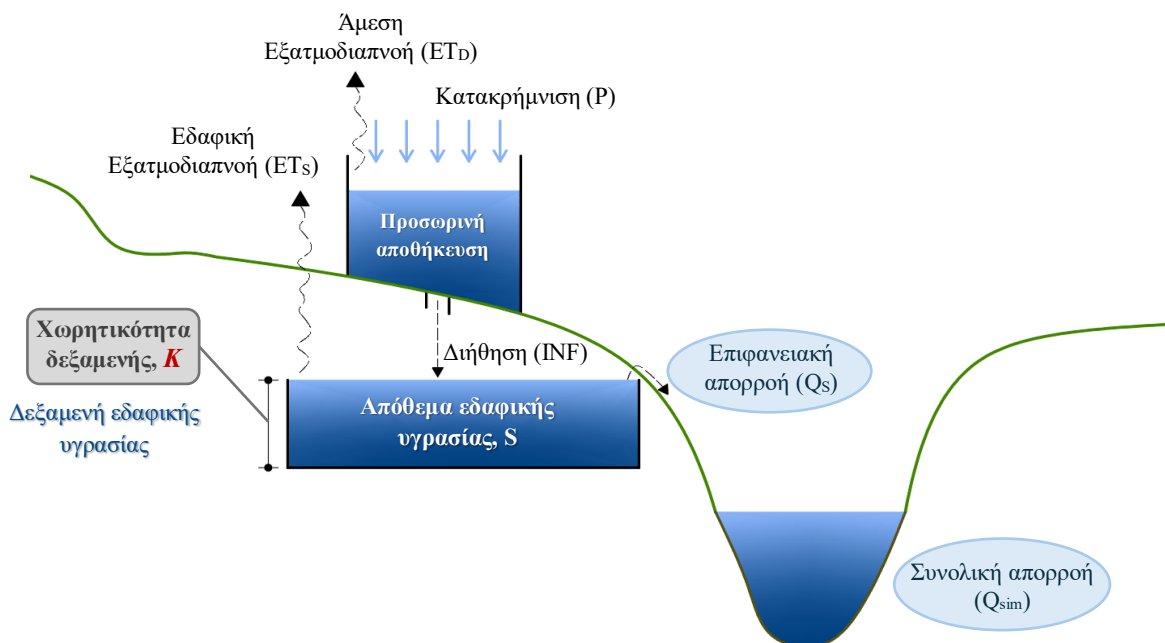
ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στόχος είναι η διερεύνηση της κατάλληλης δομής ενός υδρολογικού μοντέλου που εκτιμά ικανοποιητικά τη συνολική απορροή στην έξοδο μιας λεκάνης απορροής, περιγράφοντας τις εκάστοτε φυσικές διεργασίες που πραγματοποιούνται μεταξύ των δεξαμενών, της ατμόσφαιρας και του αποδέκτη. Κάθε υδρολογικό μοντέλο που αναπτύσσεται απαιτεί ως δεδομένα εισόδου τις μηνιαίες χρονοσειρές κατακρήμνισης, P , και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής, PET . Το πλήθος των παραμέτρων των εξεταζόμενων μοντέλων περιορίστηκε σε εννέα.

5.1 Ανάλυση δομής και παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων

5.1.1 Υδρολογικό μοντέλο P01

Στην **Εικόνα 5.1** απεικονίζεται το υδρολογικό μοντέλο P01, στο οποίο θεωρείται ότι η λεκάνη χωρίζεται σε δύο δεξαμενές, που αναπαριστούν την προσωρινή αποθήκευση του νερού στο έδαφος και την αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας (ακόρεστη ζώνη). Η παράμετρος του μοντέλου P01 είναι η χωρητικότητα (K) της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, που εκφράζει τη μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα της ακόρεστης ζώνης του εδάφους.



Εικόνα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P01.

Η κατακρήμνιση P_t αποθηκεύεται προσωρινά στην ανώτερη δεξαμενή, η οποία δεν υπόκειται σε περιορισμό χωρητικότητας. Από εκεί, μέρος της κατακρήμνισης γίνεται άμεση εξατμοδιαπνοή, ET_{D_t} , μέσω της σχέσης:

$$ET_{D_t} = \min(PET_t, P_t) \quad (5.1)$$

Η ποσότητα που απομένει, διηθείται στη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας και υπολογίζεται ως εξής:

$$INF_t = P_t - ET_{D_t} \quad (5.2)$$

Επομένως, η διαθέσιμη εδαφική υγρασία στη δεξαμενή αυξάνεται σε:

$$S_{I_t} = S_{I-t} + INF_t \quad (5.3)$$

όπου S_{I-t} η αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας στο τέλος του προηγούμενου μήνα $t-1$.

Το έλλειμμα της εξατμοδιαπνοής, ΔPET_t , υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\Delta PET_t = PET_t - ET_{D_t} \quad (5.4)$$

Μέρος της τρέχουσας εδαφικής υγρασίας διαφεύγει ως εδαφική εξατμοδιαπνοή ET_{S_t} , η οποία θεωρείται συνάρτηση του ποσοστού πλήρωσης της δεξαμενής υγρασίας και εκτιμάται με τη βοήθεια της εμπειρικής σχέσης του Thornthwaite:

$$ET_{S_t} = \begin{cases} S_{1_t} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta PET_t}{K}\right) \right], & \Delta PET_t > 0 \\ 0, & \Delta PET_t = 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

Η πραγματική εξατμοδιαπνοή δίνεται από τη σχέση (5.6) ως το άθροισμα της άμεσης (ET_{D_t}) και της εδαφικής (ET_{S_t}) εξατμοδιαπνοής:

$$ET_t = ET_{D_t} + ET_{S_t} \quad (5.6)$$

Σε αυτό το στάδιο, λόγω των απωλειών μέσω εδαφικής εξατμοδιαπνοής, το απόθεμα της εδαφικής υγρασίας υπολογίζεται ως:

$$S_{2_t} = S_{I_t} - ET_{S_t} \quad (5.7)$$

Στην περίπτωση που η δεξαμενή της εδαφικής υγρασίας κορεστεί, η περίσσεια Q_{S_t} απορρέει επιφανειακά, ήτοι:

$$Q_{S_t} = \max(0, S_{2_t} - K) \quad (5.8)$$

Στο τέλος του τρέχοντος μήνα t , η δεξαμενή αποθήκευσης εδαφικής υγρασίας έχει διαθέσιμο απόθεμα S_t και υπολογίζεται ως εξής:

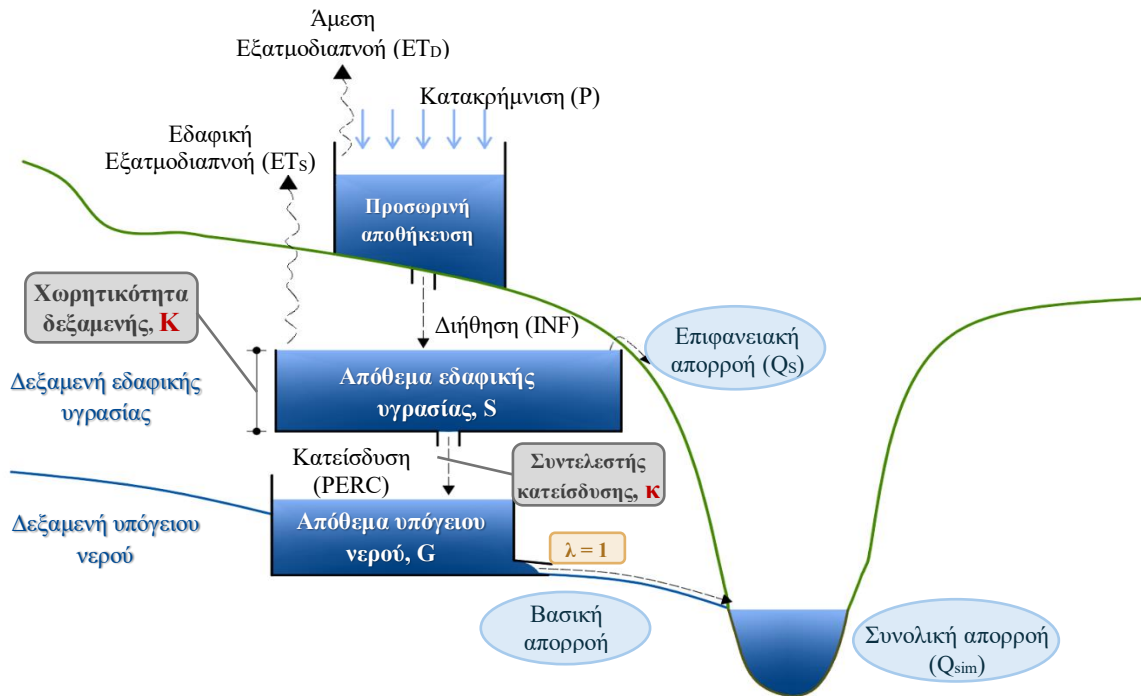
$$S_t = S_{2_t} - Q_{S_t} \quad (5.9)$$

Με τις παραπάνω υποθέσεις, η συνολική προσομοιωμένη απορροή (Q_{sim}) που καταλήγει στην έξοδο της λεκάνης ορίζεται ως η επιφανειακή απορροή (Q_{S_t}), ήτοι:

$$Q_{sim_t} = Q_{S_t} \quad (5.10)$$

5.1.2 Υδρολογικό μοντέλο P02

Αναγνωρίζοντας τη σημασία της συμβολής των υπόγειων υδάτων στη συνολική απορροή της υδρολογικής λεκάνης, εισάγεται μια επιπλέον παράμετρος, ο συντελεστής στείρευσης εδαφικής υγρασίας (κ), που εκφράζει το ποσοστό του νερού που διακινείται από τη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας προς τη δεξαμενή υπόγειου νερού, δηλαδή την κατείσδυση από την ακόρεστη προς την κορεσμένη ζώνη του εδάφους. Στην παρούσα προσέγγιση, η λεκάνη περιλαμβάνει συνολικά τρεις δεξαμενές (**Εικόνα 5.2**), έπειτα από την προσθήκη της δεξαμενής υπόγειου νερού.



Εικόνα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P02.

Η μαθηματική δομή του υδρολογικού μοντέλου P02 ακολουθεί τις σχέσεις (5.1) έως (5.7), όπως αυτές περιγράφονται στο μοντέλο P01. Στη συνέχεια και σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση, ένα ποσοστό του αποθέματος της εδαφικής υγρασίας, S_{2t} , κατεισδύει προς την κατώτερη δεξαμενή και δίνεται από τη σχέση:

$$PERC_t = \kappa \cdot S_{2t} \quad (5.11)$$

Άρα, η τρέχουσα εδαφική υγρασία μειώνεται σε:

$$S_{3t} = S_{2t} - PERC_t \quad (5.12)$$

Η επιφανειακή απορροή, δηλαδή η υπερχειλίση της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{S_t} = \max(0, S_{3t} - K) \quad (5.13)$$

Η διαθέσιμη εδαφική υγρασία στο τέλος του μήνα t υπολογίζεται ως εξής:

$$S_t = S_{3t} - Q_{S_t} \quad (5.14)$$

Η τρέχουσα αποθήκευση της δεξαμενής υπόγειου νερού, G_{I_t} , δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$G_{I_t} = G_{I_{t-1}} + PERC_t \quad (5.15)$$

Σε αυτό το σημείο εισάγεται ο συντελεστής στείρευσης υπόγειου νερού (λ), που εκφράζει το ποσοστό του υπόγειου νερού που απορρέει ως βασική απορροή στο υδρογραφικό δίκτυο και λαμβάνεται ως σταθερός και ίσος με τη μονάδα. Η βασική απορροή εκφράζεται ως εξής:

$$Q_{B_t} = \lambda \cdot G_{I_t} \quad (5.16)$$

Επομένως, η τελική προσομοιωμένη συνολική απορροή αποτελείται από τις συνιστώσες της επιφανειακής και της βασικής απορροής, όπως φαίνεται στη σχέση (5.17):

$$Q_{sim_t} = Q_{S_t} + Q_{B_t} \quad (5.17)$$

Στο τέλος του μήνα t , το απόθεμα της κατώτερης δεξαμενής υπολογίζεται ως:

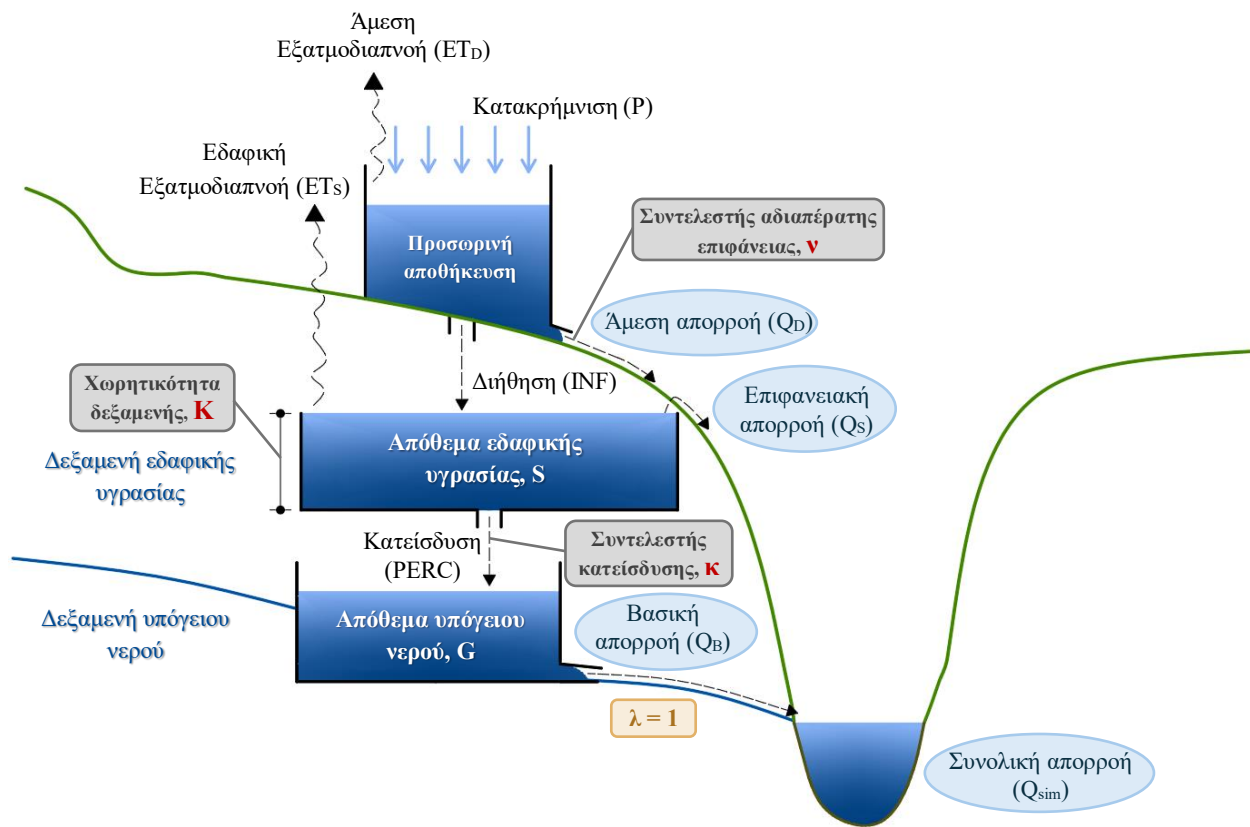
$$G_t = G_{I_t} - Q_{B_t} \quad (5.18)$$

Επισημαίνεται ότι η δεξαμενή υπόγειου νερού δεν έχει όριο χωρητικότητας. Εφόσον ο συντελεστής στείρευσης υπόγειου νερού λ ισούται με τη μονάδα, οι εξισώσεις (5.15) και

(5.18) θα μπορούσαν να παραλειφθούν στο μοντέλο P02, καθώς το απόθεμα του υπόγειου νερού στο τέλος κάθε μήνα είναι μηδενικό, διότι η ποσότητα $PERC_i$ που κατεισδύει καταλήγει αυτούσια στην έξοδο της λεκάνης, ως βασική απορροή. Ωστόσο, αναφέρονται για λόγους πληρότητας.

5.1.3 Υδρολογικό μοντέλο P03

Ένα ποσοστό των κατακρημνισμάτων, P_i , που πέφτουν στην επιφάνεια είτε του εδάφους είτε του υδρογραφικού δικτύου τροφοδοτούν την απορροή στην έξοδο της λεκάνης, μέσω της άμεσης απορροής, Q_D (Εικόνα 5.3). Εισάγεται μια νέα παράμετρος στο εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο P03, ο συντελεστής αδιαπέρατης επιφάνειας (ν), που εκφράζει το τμήμα της κατακρήμνισης που απορρέει επιφανειακά, χωρίς να διεισδύσει στο έδαφος.



Εικόνα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P03.

Η συνιστώσα της άμεσης επίγειας απορροής εκτιμάται μέσω της σχέσης:

$$Q_{D_i} = \nu \cdot P_i \quad (5.19)$$

Η εναπομένουσα βροχόπτωση υπολογίζεται ως:

$$\Delta P_t = P_t - Q_{D_t} \quad (5.20)$$

Συνεπώς, η άμεση εξατμοδιαπνοή δίνεται από τη σχέση:

$$ET_{D_t} = \min(\Delta P_t, PET_t) \quad (5.21)$$

Η ποσότητα που διηθείται στη δεξαμενή αποθήκευσης εδαφικής υγρασίας εκτιμάται ως εξής:

$$INF_t = P_t - Q_{D_t} - ET_{D_t} \quad (5.22)$$

Άρα, λόγω της διήθησης η εδαφική υγρασία στην αρχή του μήνα t αυξάνεται σε S_{I_t} και υπολογίζεται με βάση τη σχέση (5.3). Ακολούθως, υπολογίζονται το έλλειμμα της εξατμοδιαπνοής, ΔPET_t , η εδαφική εξατμοδιαπνοή, ET_{S_t} , η συνολική πραγματική εξατμοδιαπνοή, ET_t , καθώς και η τρέχουσα εδαφική υγρασία, S_{2_t} με τη βοήθεια των προαναφερθέντων σχέσεων (5.4) έως (5.7), αντίστοιχα.

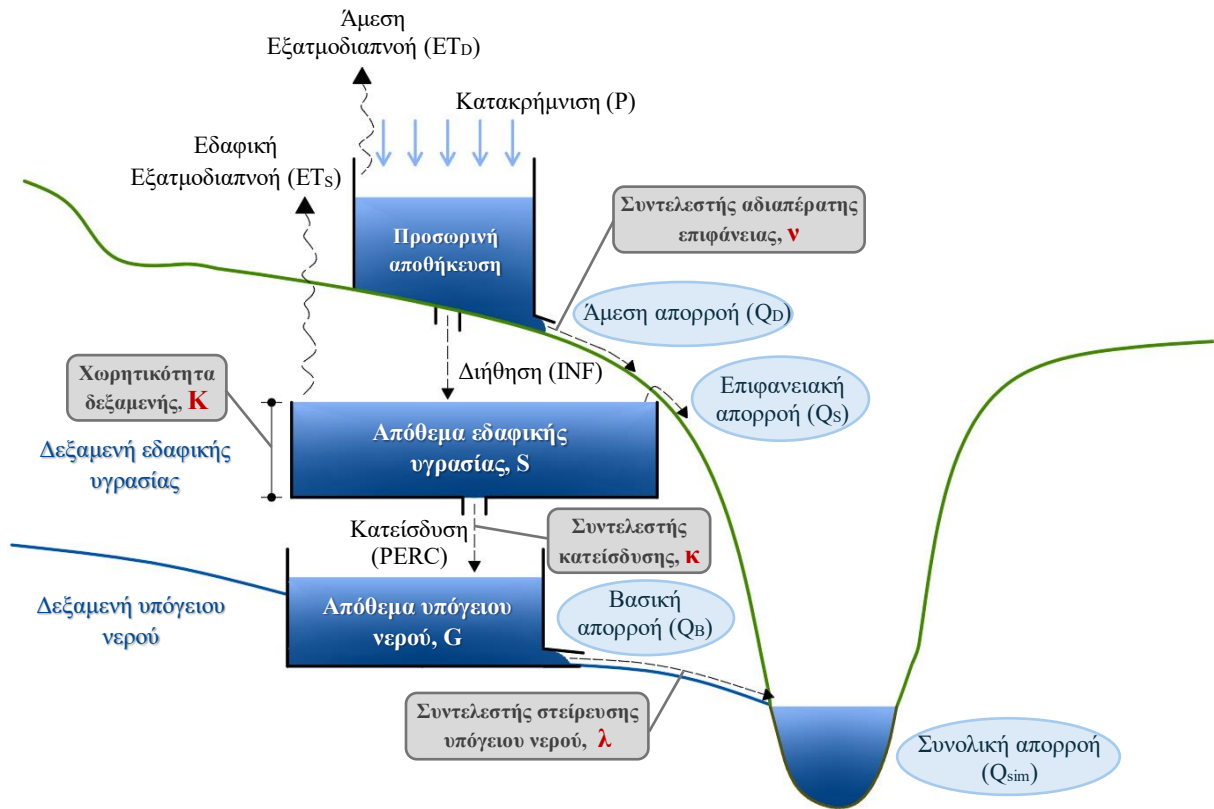
Όσον αφορά την ποσότητα που κατεισδύει στην κατώτερη δεξαμενή, $PERC_t$, την εδαφική υγρασία, S_{3_t} , την επιφανειακή απορροή, Q_{S_t} , την εδαφική υγρασία στο τέλος του μήνα t , S_t , την αποθήκευση υπόγειου νερού στην αρχή του μήνα t , G_{I_t} , τη βασική απορροή, Q_{B_t} , και το απόθεμα στην κατώτερη δεξαμενή στο τέλος του μήνα t , G_t , αυτές εκτιμώνται με βάση τις σχέσεις (5.11) έως (5.16), και (5.18), αντίστοιχα.

Με τις παραπάνω παραδοχές, η τελική προσομοιωμένη απορροή στην έξοδο της λεκάνης αποτελείται από το άθροισμα της άμεσης απορροής, Q_{D_t} , της επιφανειακής απορροής, Q_{S_t} , και της βασικής απορροής, Q_{B_t} , όπως φαίνεται και στη σχέση (5.23).

$$Q_{sim_t} = Q_{D_t} + Q_{S_t} + Q_{B_t} \quad (5.23)$$

5.1.4 Υδρολογικό μοντέλο P04

Διατηρώντας τη δομή του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P03, επιλέγεται πλέον ως ενεργή παράμετρος ο συντελεστής στείρευσης (λ), ο οποίος καθορίζει την παραγωγή της βασικής απορροής. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και με τη φύση της βασικής απορροής της, η ροή ενδέχεται να είναι διαρκής, διακοπτόμενη ή χειμαρρική (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 290). Στην **Εικόνα 5.4** παρουσιάζεται σχηματικά το μοντέλο P04, το οποίο ακολουθεί το ίδιο μαθηματικό πλαίσιο με το μοντέλο P03.



Εικόνα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P04.

5.1.5 Υδρολογικό μοντέλο P05

Η παρουσία καρστικών σχηματισμών σε μια λεκάνη απορροής υποδηλώνει την ύπαρξη αυξημένων υπόγειων απωλειών, κυρίως μέσω καταβόθρων. Συνεπώς, στο υδρολογικό μοντέλο P05 εισάγεται μια πρόσθετη παράμετρος, ήτοι ο συντελεστής υπόγειων απωλειών (μ), ο οποίος εκφράζει το ποσοστό των υπόγειων διαφυγών. Σχηματικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.5, διανοίγεται μια κατακόρυφη οπή στη δεξαμενή υπόγειου νερού.

Το υδρολογικό μοντέλο P05 ακολουθεί τις εξισώσεις του μοντέλου P04 έως και τον υπολογισμό της αποθήκευσης υπόγειου νερού στην αρχή του μήνα t , G_{I_t} . Έπειτα, μέρος του παραπάνω υπόγειου αποθέματος διαφεύγει λόγω των καρστικών σχηματισμών. Οι απώλειες εκτιμώνται μέσω της σχέσης:

$$Loss_t = \mu \cdot G_{I_t} \quad (5.24)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το τρέχον απόθεμα των υπόγειων υδάτων ως:

$$G_{2t} = G_{1t} - Loss_t \quad (5.25)$$

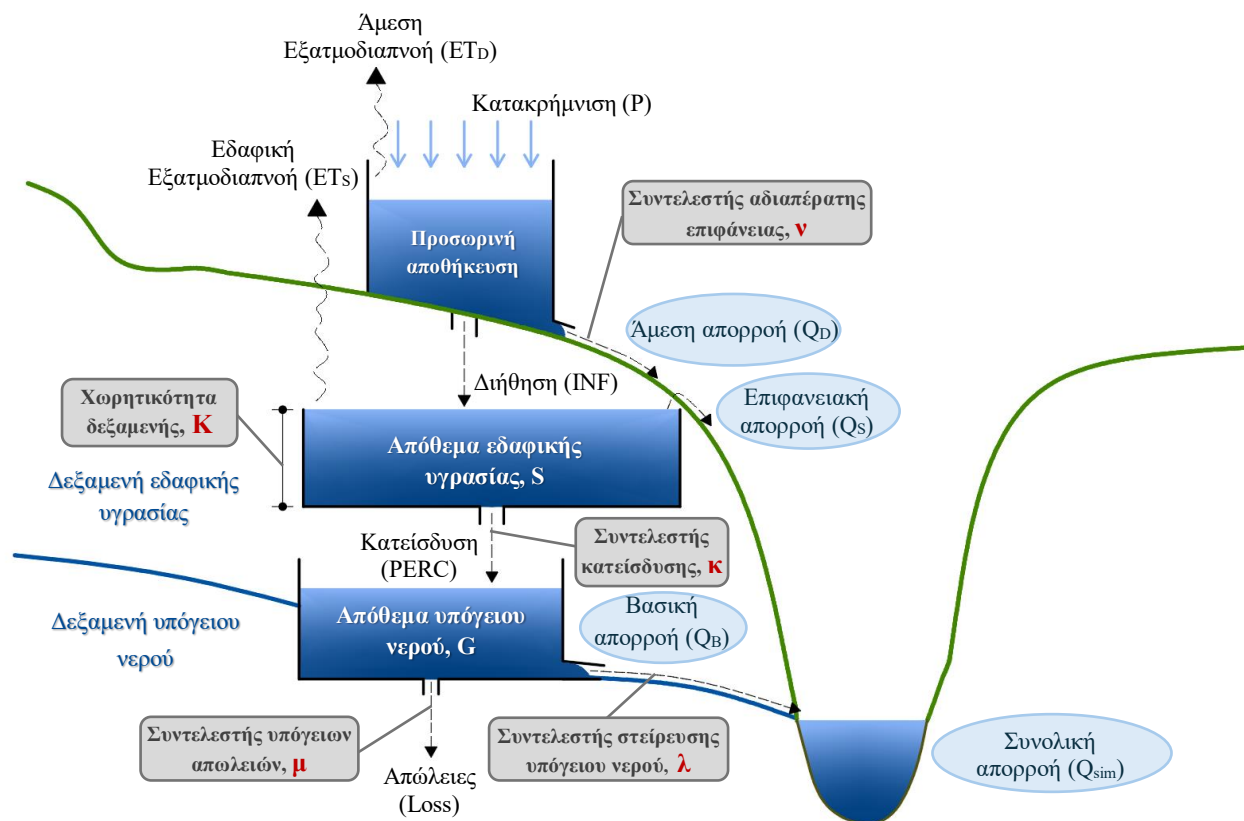
Επομένως, η βασική απορροή που καταλήγει στην έξοδο της λεκάνης απορροής δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{Bt} = \lambda \cdot G_{2t} \quad (5.26)$$

Το απόθεμα της κατώτερης δεξαμενής υπολογίζεται πλέον μέσω της σχέσης:

$$G_t = G_{2t} - Q_{Bt} \quad (5.27)$$

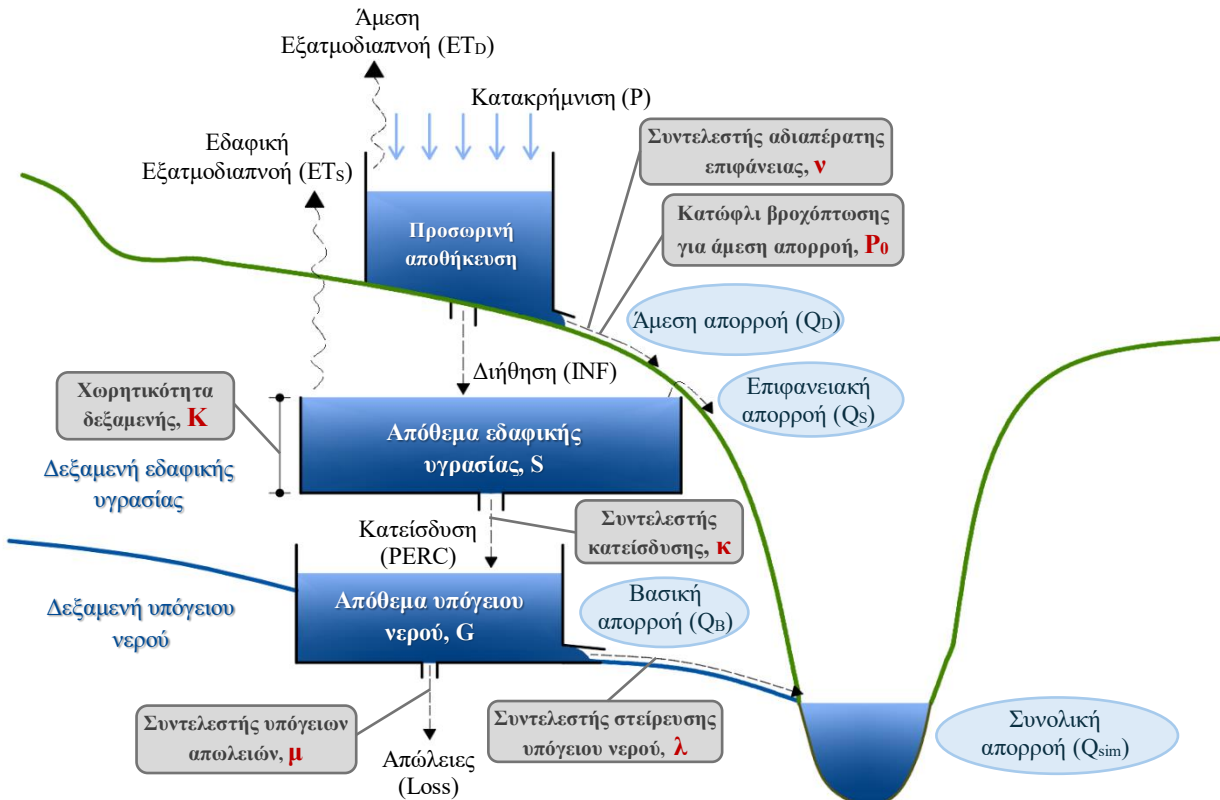
Η προσομοιωμένη συνολική απορροή δίνεται από τη σχέση (5.23), όπως στο μοντέλο P03.



Εικόνα 5.5: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P05.

5.1.6 Υδρολογικό μοντέλο P06

Στο εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο P06 εισάγεται η παράμετρος P_0 , ήτοι το κατώφλι της βροχόπτωσης για άμεση απορροή, με διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού. Ουσιαστικά, ορίζει το ελάχιστο ύψος βροχόπτωσης που απαιτείται προκειμένου να εμφανιστεί η άμεση απορροή Q_{D_t} .



Εικόνα 5.6: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P06.

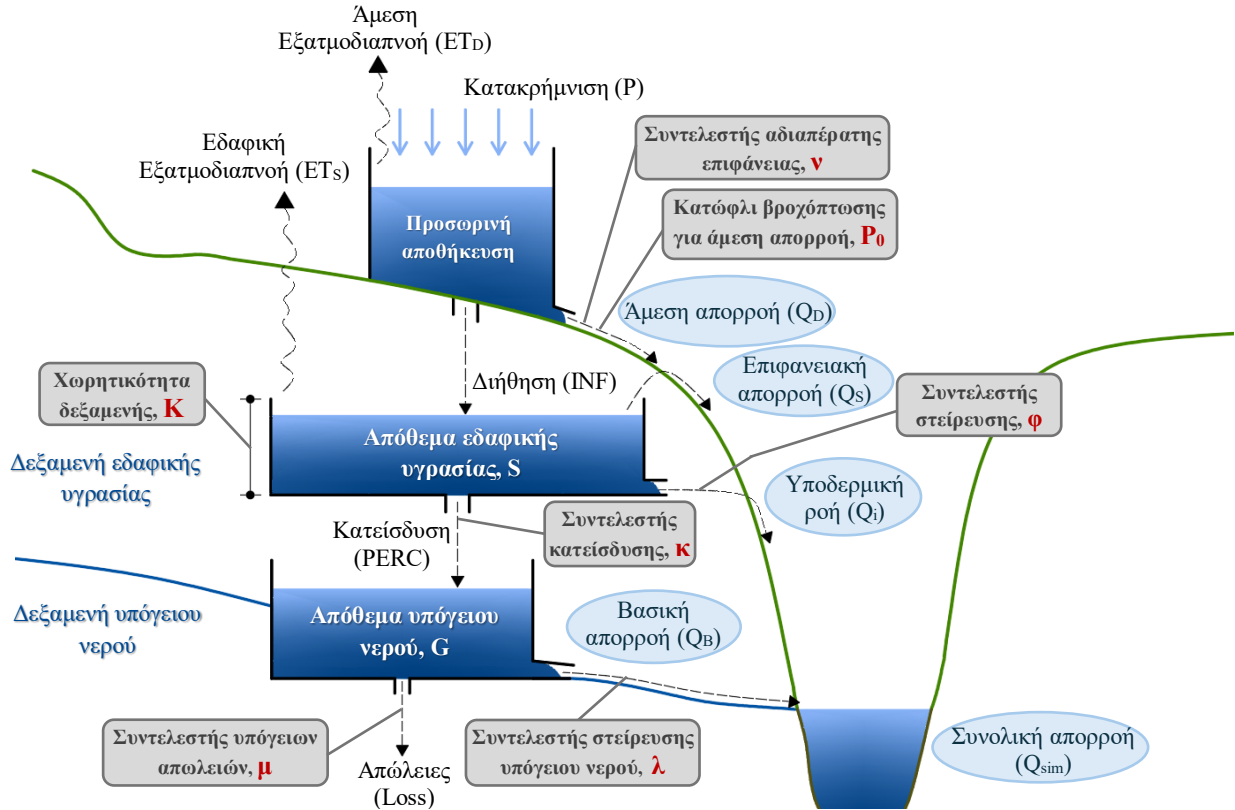
Στην Εικόνα 5.6 απεικονίζεται σχηματικά το εννοιολογικό μοντέλο P06, το οποίο ακολουθεί τη μαθηματική δομή του μοντέλου P05, με εξαίρεση τον υπολογισμό της άμεσης απορροής, η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{D_t} = \max[0, v \cdot (P_t - P_0)] \quad (5.28)$$

5.1.7 Υδρολογικό μοντέλο P07

Μια ακόμη μορφή ροής είναι η υποδερμική, η οποία παρατηρείται υπεδάφια, σε μια ζώνη κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και οφείλεται στην ανομογένεια και την ανισοτροπία των εδαφών (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999, σ. 287). Συγκεκριμένα, η υπεδάφια ροή εμφανίζεται κατά τη διάρκεια ισχυρών βροχοπτώσεων, όπου το νερό διαφεύγει

πλευρικά, αντί να διεισδύσει βαθύτερα. Για αυτό τον λόγο, διανοίγεται μια οριζόντια οπή στη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας (Εικόνα 5.7), μέσω της οποίας ένα ποσοστό του αποθέματός της καταλήγει στη συνολική απορροή.



Εικόνα 5.7: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P07.

Επομένως, η έβδομη παράμετρος του μοντέλου P07 είναι ο συντελεστής στέρειυσης (ϕ), δημιουργώντας την υποδερμική ροή, η οποία εκτιμάται από την παρακάτω σχέση:

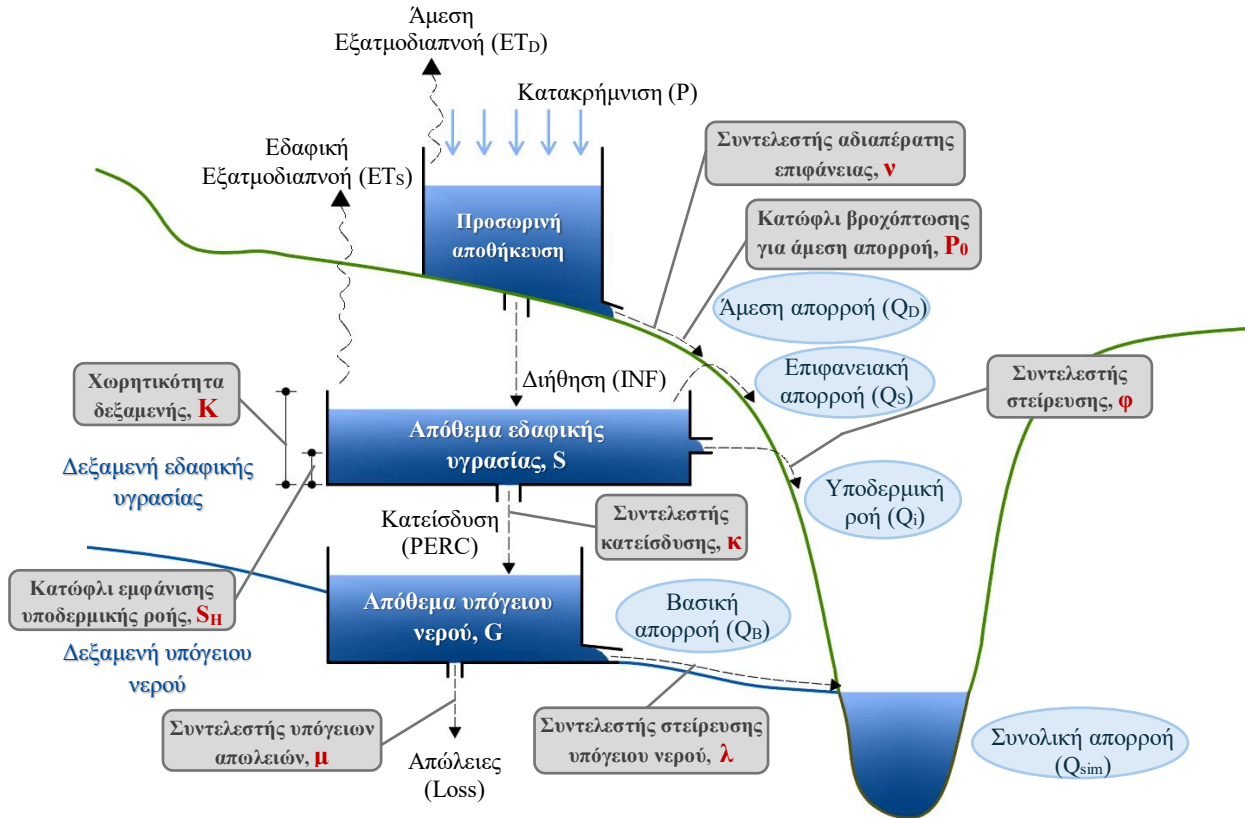
$$Q_{i_t} = \phi \cdot S_{t_t} \quad (5.29)$$

Το μοντέλο περιγράφεται μαθηματικά μέσω των εξισώσεων που ακολουθεί το μοντέλο P06, με την προσθήκη της υποδερμικής ροής Q_{i_t} , ενώ η συνολική προσομοιωμένη απορροή υπολογίζεται ως το άθροισμα της άμεσης, της επιφανειακής, της υποδερμικής και της βασικής απορροής, όπως φαίνεται στην εξίσωση:

$$Q_{sim_t} = Q_{D_t} + Q_{S_t} + Q_{i_t} + Q_{B_t} \quad (5.30)$$

5.1.8 Υδρολογικό μοντέλο P08

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η υποδερμική ροή, Q_i , παρουσιάζεται σε επεισόδια έντονων βροχοπτώσεων. Επιθυμώντας να περιγραφεί μια ξηρή περίοδος, όπως εκείνη μεταξύ Ιουνίου και Σεπτεμβρίου, η εμφάνιση υποδερμικής ροής δεν είναι ρεαλιστική και για τον λόγο αυτό εισάγεται η παράμετρος S_H , με διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού (mm), η οποία λειτουργεί ως κατώφλι εμφάνισης της υποδερμικής ροής.



Εικόνα 5.8: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P08.

Συνεπώς, η υποδερμική ροή δίνεται πλέον από την παρακάτω σχέση:

$$Q_{i_t} = \begin{cases} \varphi \cdot S_{2t}, & S_{2t} > S_H \\ 0, & S_{2t} \leq S_H \end{cases} \quad (5.31)$$

Οι υπόλοιπες διεργασίες ακολουθούν τη μαθηματική δομή του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P07.

$$Q_{D_t} = v \cdot P_t \cdot \exp(S/K - 1) \quad (5.33)$$

$$Q_{D_t} = \max[0, v \cdot (P_t - P_0) \cdot \exp(S/K - I)] \quad (5.34)$$

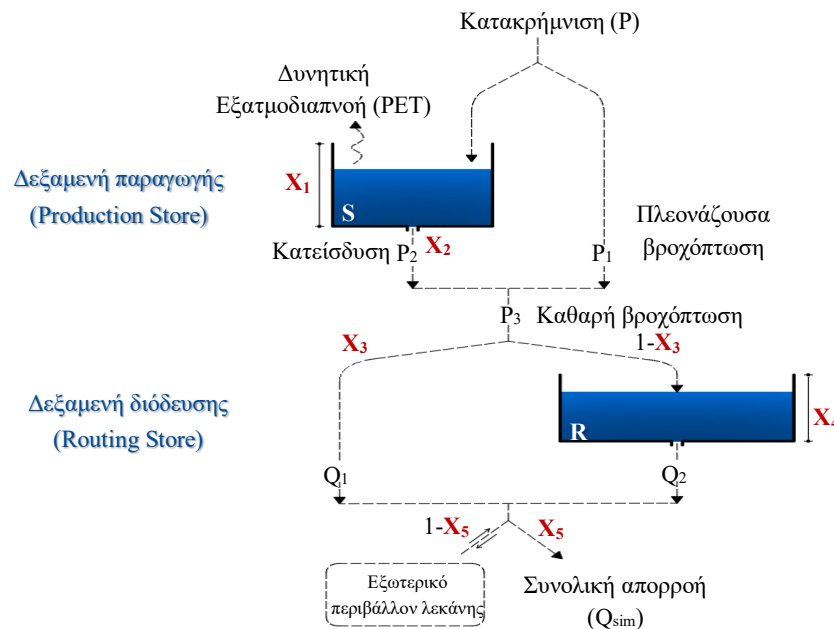
Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, ο ρυθμός άμεσης απορροής αυξάνεται όσο η χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας τείνει στον κορεσμό, δηλαδή τη μέγιστη χωρητικότητα (K).

5.2 Βιβλιογραφικά υδρολογικά μοντέλα μηνιαίας κλίμακας

Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκαν τρία μοντέλα από τη βιβλιογραφία με σκοπό τη συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης των ανεπτυγμένων μοντέλων P01 – P09 σε σχέση με ορισμένα καθιερωμένα. Συγκεκριμένα, η ανάλυση επικεντρώθηκε στα μοντέλα PMS, GR2M και Ol'dekop.

5.2.1 Υδρολογικό μοντέλο PMS

Μεταξύ των υδρολογικών μοντέλων που εξετάστηκαν περιλαμβάνεται και το μοντέλο PMS (Mouelhi *et al.*, 2006), το οποίο βασίζεται στη δομή του ημερήσιου GR4J και αποτελεί προσαρμογή του σε μηνιαία χρονική κλίμακα. Ως δεδομένα εισόδου απαιτούνται η βροχόπτωση (P) και η δυνητική εξατμοδιαπνοή (PET).



Εικόνα 5.10: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου PMS.

Το υδρολογικό μοντέλο PMS έχει 5 παραμέτρους:

- τη μέγιστη χωρητικότητα X_I (mm) της δεξαμενής παραγωγής,

- τη θετική παράμετρο X_2 ,
- το ποσοστό X_3 για παραγωγή απορροής Q_1 , όπου $0 \leq X_3 \leq 1$,
- τη μέγιστη χωρητικότητα X_4 (mm) της δεξαμενής διόδευσης και
- τη θετική παράμετρο X_5 .

Το εννοιολογικό μοντέλο PMS αποτελείται από δύο δεξαμενές, όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 5.10**. Η ανώτερη δεξαμενή αντιπροσωπεύει το απόθεμα της εδαφικής υγρασίας, S , ενώ η κατώτερη έχει απόθεμα R και ορίζεται ως η δεξαμενή διόδευσης του συστήματος.

Λόγω της βροχόπτωσης P , το απόθεμα της ανώτερης δεξαμενής γίνεται S_{1t} μέσω της σχέσης:

$$S_{1t} = \frac{S_{t-1} + X_1 \varphi_t}{1 + \varphi_t \frac{S_{t-1}}{X_1}} \quad (5.35)$$

όπου $\varphi_t = \tanh(P_t/X_1)$.

Σε περίπτωση που η ανώτερη δεξαμενή κορεστεί, η πλεονάζουσα βροχόπτωση P_{1t} , καταλήγει στην κατώτερη δεξαμενή και υπολογίζεται ως:

$$P_{1t} = P_t + S_{t-1} + S_{1t} \quad (5.36)$$

Λόγω των απωλειών της πραγματικής εξατμοδιαπνοής, το απόθεμα της ανώτερης δεξαμενής γίνεται:

$$S_{2t} = \frac{S_{1t} (1 - \psi_t)}{1 + \psi_t \left(1 - \frac{S_{1t}}{X_1}\right)} \quad (5.37)$$

όπου $\psi_t = \tanh(PET_t/X_1)$.

Στη συνέχεια, από τη δεξαμενή της εδαφικής υγρασίας ελευθερώνεται μια ποσότητα P_{2t} , μέσω της διεργασίας της κατείσδυσης, και το τελικό απόθεμα της δεξαμενής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$S_t = \frac{S_{2t}}{\left[1 + \left(\frac{S_{2t}}{X_1}\right)^{X_2}\right]^{\frac{1}{X_2}}} \quad (5.38)$$

$$P_{2t} = S_{2t} - S_t \quad (5.39)$$

Η μηνιαία καθαρή βροχόπτωση P_3 δίνεται ως το άθροισμα των P_{1t} και P_{2t} και καταλήγει στην κατώτερη δεξαμενή. Έπειτα, ένα μέρος της παραπάνω ποσότητας P_{3t} καταλήγει ως απορροή Q_{1t} . Αναλυτικότερα:

$$P_{3_t} = P_{1_t} + P_{2_t} \quad (5.40)$$

$$Q_{1_t} = X_3 \cdot P_{3_t} \quad (5.41)$$

Η συμπληρωματική ποσότητα της βροχής P_{3_t} , καταλήγει στην κατώτερη δεξαμενή, η οποία έχει τρέχον απόθεμα R_{1_t} και υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{1_t} = R_{1_{t-1}} + (1 - X_3) \cdot P_{3_t} \quad (5.42)$$

Από τη δεξαμενή διόδευσης ελευθερώνεται η απορροή Q_{2_t} , η οποία εκτιμάται μέσω της σχέσης:

$$Q_{2_t} = \frac{R_{1_t}^2}{R_{1_t} + X_4} \quad (5.43)$$

Το απόθεμα της δεξαμενής διόδευσης στο τέλος του τρέχοντος μήνα t δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$R_t = R_{1_t} - Q_{2_t} \quad (5.44)$$

Κατόπιν, μια ποσότητα των υπόγειων υδάτων είτε προστίθεται στην κατώτερη δεξαμενή είτε χάνεται από αυτήν, λόγω ανταλλαγής νερού μεταξύ της λεκάνης απορροής και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Ειδικότερα, όταν η παράμετρος X_5 είναι θετική η κατώτερη δεξαμενή τροφοδοτείται από το εξωτερικό περιβάλλον. Διαφορετικά, υπάρχουν απώλειες προς αυτό. Επομένως, η πραγματική προσομοιωμένη απορροή στην έξοδο της λεκάνης απορροής εκτιμάται ως εξής:

$$Q_{sim_t} = X_5 \cdot (Q_{1_t} + Q_{2_t}) \quad (5.45)$$

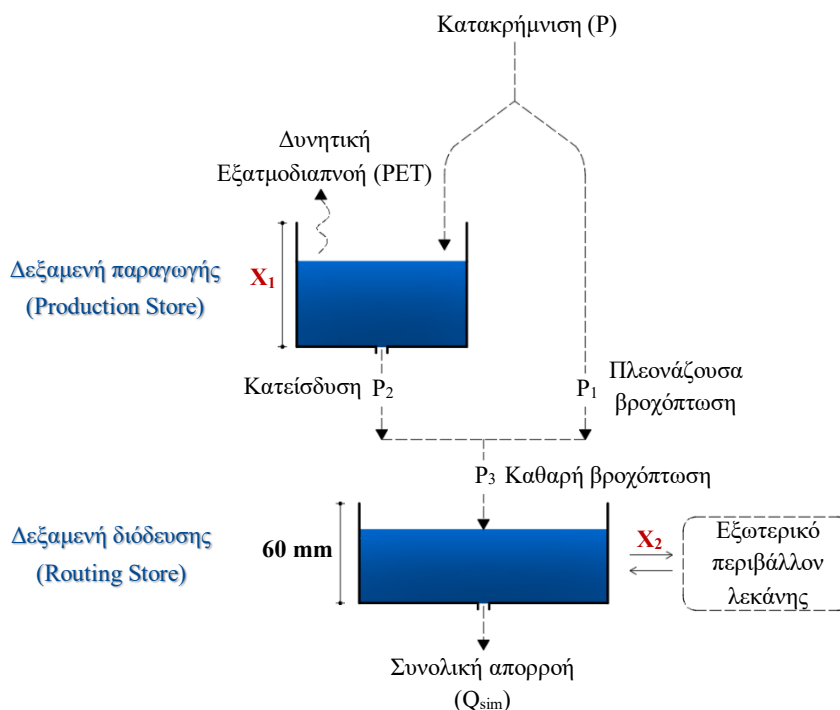
5.2.2 Υδρολογικό μοντέλο GR2M

Το μοντέλο GR2M ανήκει στην οικογένεια των μοντέλων GR, μια ομάδα εννοιολογικών συγκεντρωτικών (lumped) υδρολογικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί με διάφορα χρονικά βήματα (ωριαία, ημερήσια, μηνιαία και ετήσια). Το GR2M ειδικά έχει αναπτυχθεί για εφαρμογή σε μηνιαίο χρονικό βήμα και απαιτεί ως δεδομένα εισόδου τη μηνιαία χρονοσειρά της βροχόπτωσης (P) και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής (PET). Το μοντέλο αναπτύχθηκε αρχικά από τους Mouelhi *et al.* (2006) και στη συνέχεια ενσωματώθηκε στο πακέτο airGR της R, όπως παρουσιάζεται από τους Coron *et al.* (2017), το οποίο εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη.

Οι παράμετροι του μοντέλου GR2M είναι οι δύο παρακάτω:

- η μέγιστη χωρητικότητα X_1 (mm) της δεξαμενής παραγωγής και
- ο συντελεστής ανταλλαγής υπόγειων υδάτων X_2 .

Στην **Εικόνα 5.11** απεικονίζεται σχηματικά το εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο GR2M, στο οποίο θεωρούνται, όπως και στο PMS, δύο δεξαμενές. Η ανώτερη δεξαμενή αναπαριστά την εδαφική υγρασία της λεκάνης, ενώ η κατώτερη αναφέρεται ως δεξαμενή διόδευσης με χωρητικότητα 60 mm.



Εικόνα 5.11: Σχηματική αναπαράσταση του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου GR2M.

Λόγω της κατακρήμνισης (P) το απόθεμα της δεξαμενής παραγωγής αυξάνεται σε S_1 , σύμφωνα με τη σχέση (5.35). Έπειτα, αν η δεξαμενή κορεστεί, η περίσσεια βροχόπτωση P_1 , δίνεται από την εξίσωση (5.36). Λόγω των απωλειών της εξατμοδιαπνοής, το απόθεμα μειώνεται σε S_2 , με βάση τη σχέση (5.37).

Από την ανώτερη δεξαμενή ελευθερώνεται μια ποσότητα P_2 , μέσω της διεργασίας της κατείδυσης, και καταλήγει στη δεξαμενή διόδευσης. Το νέο απόθεμα, S_1 , της δεξαμενής παραγωγής και η ποσότητα P_2 υπολογίζονται ως εξής:

$$S_t = \frac{S_{2t}}{\left[1 + \left(\frac{S_{2t}}{X_1}\right)^3\right]^{\frac{1}{3}}} \quad (5.46)$$

$$P_{2t} = S_{2t} - S_t \quad (5.47)$$

Συνεπώς, η καθαρή βροχόπτωση P_{3t} δίνεται ως το άθροισμα των P_{1t} και P_{2t} , καταλήγοντας στη δεξαμενή διόδευσης, της οποίας το απόθεμα αυξάνεται σε:

$$R_{1t} = R_{t-1} + P_{3t} \quad (5.48)$$

Το μοντέλο GR2M θεωρεί την αδιάστατη θετική παράμετρο X_2 , η οποία όταν λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας δηλώνει ότι υπάρχουν υπόγειες εισροές στη λεκάνη, ενώ στην αντίθετη περίπτωση εκφράζει τις υπόγειες διαφυγές του συστήματος. Επομένως, η αποθήκευση, R_{2t} , της δεξαμενής διόδευσης εκτιμάται μέσω της σχέσης:

$$R_{2t} = X_2 \cdot R_{1t} \quad (5.49)$$

Συνεπώς, η δεξαμενή διόδευσης ελευθερώνει την τελική προσομοιωμένη απορροή της λεκάνης, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$Q_{sim_t} = \frac{R_{2t}^2}{R_{2t} + 60} \quad (5.50)$$

Ενώ το απόθεμα της κατώτερης δεξαμενής στο τέλος του μήνα t δίνεται από τη σχέση:

$$R_t = R_{2t} - Q_{sim_t} \quad (5.51)$$

5.2.3 Υδρολογικό μοντέλο Ol'dekor

Στη μελέτη συμπεριλαμβάνεται το μοντέλο Ol'dekor (1911), με σκοπό να διερευνηθεί το εύρος τιμών των κριτηρίων αξιολόγησης που θα παρουσιαστούν σε επόμενη ενότητα. Το μοντέλο Ol'dekor δεν έχει καμία ελεύθερη παράμετρο και δεν διατηρεί μνήμη. Αρχικά αναπτύχθηκε για ετήσιο χρονικό βήμα, καθώς είναι βασισμένο στην υπόθεση Budyko. Οι Mouelhi et al. (2006) το εφάρμοσαν σε μηνιαίο βήμα υπολογίζοντας τη μηνιαία προσομοιωμένη απορροή με την παρακάτω σχέση:

$$Q_t = P_t - PET_t \cdot \tanh\left(\frac{P_t}{PET_t}\right) \quad (5.52)$$

5.3 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης στην R

Η βαθμονόμηση των μοντέλων P01 – P09 και PMS γίνεται με τον αλγόριθμο DEoptim του ομώνυμου πακέτου στην R (Mullen *et al.*, 2011). Ο αλγόριθμος αναζητά την ελάχιστη τιμή της συνάρτησης στόχου μεταξύ καθορισμένων κατώτερων και ανώτερων ορίων για κάθε παράμετρο που βελτιστοποιείται. Η διαδικασία αποτελεί εξελικτική παγκόσμια βελτιστοποίηση μέσω του αλγορίθμου διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution) και δεν απαιτεί η συνάρτηση να είναι συνεχής ή διαφορίσιμη. Ο αλγόριθμος DEoptim χρησιμοποιείται, επίσης, κατά τη διαδικασία περιοχοποίησης των παραμέτρων με βάση τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης (MYA) στη βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου GR2M πραγματοποιείται με τον αλγόριθμο που προτάθηκε από τον Michel (1991) και είναι ενσωματωμένος στο πακέτο airGR της R. Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει αρχική αναζήτηση στον χώρο των παραμέτρων και στη συνέχεια γίνεται τοπική βελτιστοποίηση (Coron *et al.*, 2017; Coron *et al.*, 2023).

5.4 Κριτήρια αξιολόγησης και βαθμονόμησης μοντέλων

Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης των μοντέλων, το μέτρο επίδοσης που επιλέγεται προς μεγιστοποίηση είναι η αποτελεσματικότητα (efficiency), η οποία εκφράζεται μέσω του δείκτη Nash – Sutcliffe (*NSE*), και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{obs_t} - Q_{sim_t})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{obs_t} - \mu_{obs})^2} \quad (5.53)$$

όπου Q_{obs_t} η παρατηρημένη παροχή κατά το μήνα t , Q_{sim_t} η αντίστοιχη τιμή της προσομοιωμένης παροχής, μ_{obs} η μέση τιμή των παρατηρήσεων και N το μήκος του δείγματος. Ο δείκτης NSE είναι εύκολα ερμηνεύσιμος, καθώς λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1, με τη μονάδα να δηλώνει την τέλεια προσαρμογή. Σε περίπτωση που ο δείκτης NSE είναι μηδενικός, υποδηλώνεται ότι η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου ισοδυναμεί με εκείνη που προκύπτει από τη χρήση της μέσης τιμής των παρατηρήσεων, ενώ οι αρνητικές τιμές δηλώνουν μοντέλα χαμηλότερης προγνωστικής ικανότητας. Ο δείκτης NSE εστιάζει στην ακρίβεια των εκτιμήσεων κατά τις περιόδους αυξημένων παροχών (high-flow simulations) (Oudin *et al.*, 2008).

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης, καθίσταται απαραίτητη η αξιοποίηση συμπληρωματικών κριτηρίων απόδοσης από τη βιβλιογραφία, πέραν του δείκτη *NSE*, όπως επισημαίνουν και οι Perrin *et al.* (2000), προκειμένου να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη αποτίμηση της συμπεριφοράς του μοντέλου.

Το πρώτο πρόσθετο κριτήριο απόδοσης είναι ο δείκτης Kling – Gupta efficiency (**KGE**), ο οποίος δίνεται από τη σχέση (Gupta *et al.*, 2009):

$$KGE = 1 - \sqrt{(\rho - 1)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2} \quad (5.54)$$

όπου ρ είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των παρατηρημένων και των προσομοιωμένων απορροών, μ_{sim} και μ_{obs} είναι η μέση τιμή της προσομοιωμένης και της παρατηρημένης παροχής, αντίστοιχα, και σ_{sim} και σ_{obs} είναι η τυπική απόκλιση της προσομοιωμένης και παρατηρημένης απορροής, αντίστοιχα. Ο δείκτης **KGE** ελέγχει τη διατήρηση των τριών παραπάνω στατιστικών χαρακτηριστικών μεταξύ της παρατηρημένης και της προσομοιωμένης απορροής.

Το δεύτερο μέτρο επίδοσης που επιλέγεται είναι ένας λογαριθμικός μετασχηματισμός του δείκτη **NSE** και υπολογίζεται ως εξής:

$$\log NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (\ln(Q_{obs_t}) - \ln(Q_{sim_t}))^2}{\sum_{t=1}^N (\ln(Q_{obs_t}) - \ln(Q_{obs}))^2} \quad (5.55)$$

όπου $\overline{\ln(Q_{obs})}$ είναι η μέση τιμή των λογαριθμισμένων παρατηρημένων απορροών. Ο δείκτης $\log NSE$ δίνει έμφαση στην καλή προσαρμογή του μοντέλου στις χαμηλές παροχές (low-flow simulations) (Oudin *et al.*, 2008).

Το τρίτο κριτήριο αξιολόγησης που εξετάζεται δίνει έμφαση στην προσαρμογή για ενδιάμεσες τιμές απορροής (intermediate-flow simulations), σύμφωνα με τη μελέτη των Perrin *et al.* (2000), και ορίζεται ως:

$$CR_{abs} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N |Q_{obs_t} - Q_{sim_t}|}{\sum_{t=1}^N |Q_{obs_t} - \mu_{obs}|} \quad (5.56)$$

Το μέτρο CR_{abs} είναι χρήσιμο για προγνώσεις (forecasting), καθώς οι προσομοιωμένες τιμές παροχής πρέπει να είναι κοντά στις παρατηρημένες σε κάθε μήνα. Όπως και ο δείκτης **NSE**, τα κριτήρια αξιολόγησης **KGE**, $\log NSE$ και CR_{abs} κυμαίνονται μεταξύ -∞ και 1, με τη μέγιστη τιμή να υποδηλώνει τέλεια προσαρμογή του μοντέλου.

Όσον αφορά την βαθμονόμηση του γενικευμένου μοντέλου 20 παραμέτρων θεωρήθηκε εξίσου σημαντική η προσαρμογή του μοντέλου στα κριτήρια **NSE**, **KGE** και $\log NSE$. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε η βελτιστοποίηση του μέσου όρου των τριών παραπάνω μέτρων επίδοσης:

$$F = (NSE + KGE + \log NSE)/3 \quad (5.57)$$

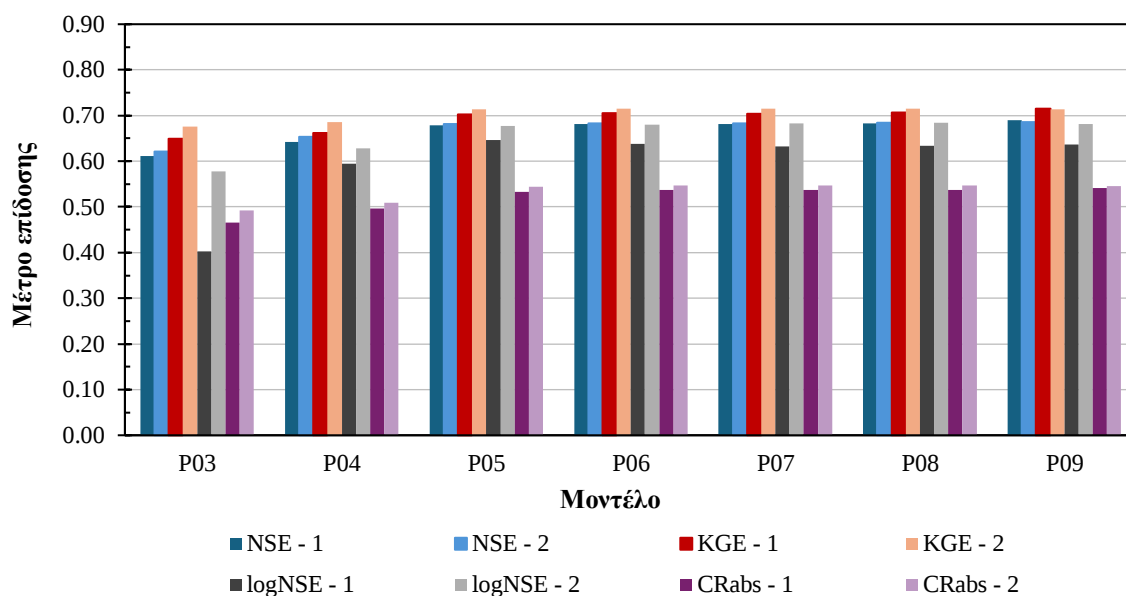
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΑΝΑ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

6.1 Βαθμονόμηση και συγκριτική αξιολόγηση υδρολογικών μοντέλων

Σε θεωρητικό – μαθηματικό πλαίσιο, η πολυπλοκότητα των μοντέλων μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση των προβλέψεων. Ωστόσο, η προσθήκη πολυπλοκότητας συνεπάγεται και επιπλέον δυσκολίες, όπως η εκτίμηση των παραμέτρων και η επαλήθευση της δομής του μοντέλου. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι η υπερπαραμετροποίηση πρέπει να αποφεύγεται, καθώς αυξάνει την αβεβαιότητα στην έξοδο, δηλαδή στην προσομοιωμένη απορροή (Perrin *et al.*, 2000). Επομένως, στόχος είναι η κατάλληλα προσαρμοσμένη πολυπλοκότητα, ώστε το μοντέλο να περιγράφει επαρκώς τη συμπεριφορά της λεκάνης απορροής χωρίς να οδηγείται σε υπερπροσαρμογή (overfitting). Με βάση τα παραπάνω, η αξιολόγηση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με ζητούμενο την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ πολυπλοκότητας και απόδοσης.

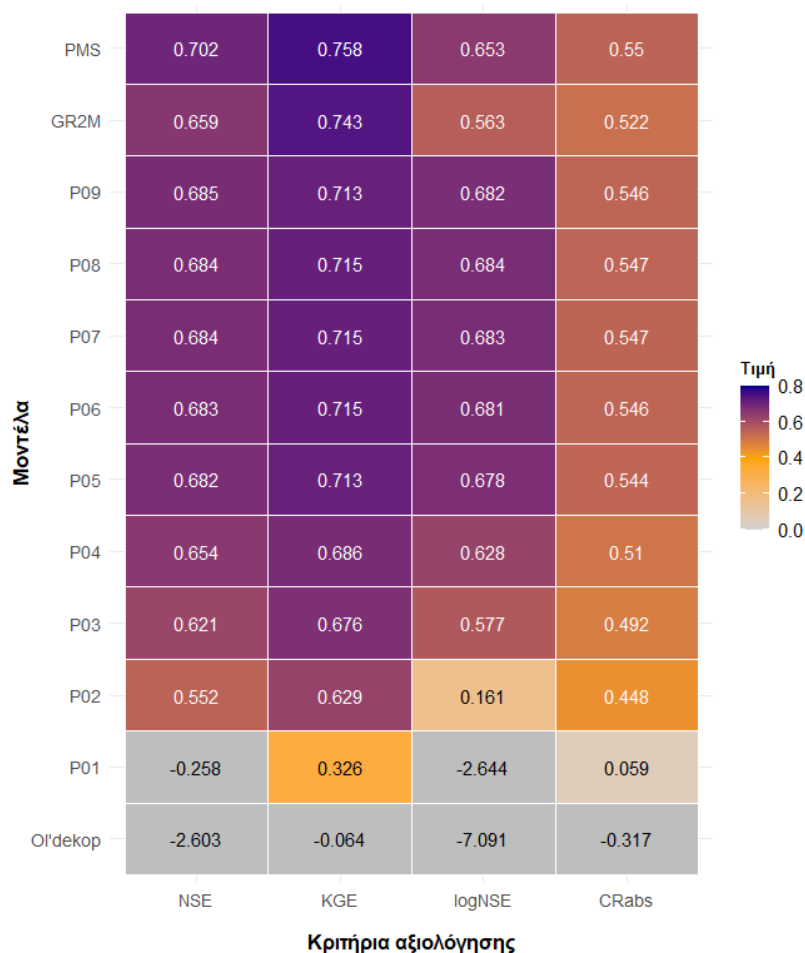
Αρχικά, εξετάζεται ποια από τις δύο προσεγγίσεις είναι πιο αποδοτική για την εκτίμηση της άμεσης απορροής στα μοντέλα P03 έως P09. Στην **Εικόνα 6.1** συγκρίνονται οι μέσες τιμές



Εικόνα 6.1: Σύγκριση μέτρων επίδοσης (*NSE*, *KGE*, *logNSE*, *CRabs*) των δύο εναλλακτικών εκδοχών των μοντέλων P03 – P09.

των μέτρων επίδοσης NSE , KGE , $\log NSE$ και $CRabs$ μεταξύ των δύο εκδοχών των μοντέλων. Παρατηρείται ότι, για όλα τα μοντέλα P03 έως P09, η δεύτερη εκδοχή τους που βασίζεται στην εκθετική σχέση (Εξ. 5.33, 5.34) εμφανίζει ελαφρώς υψηλότερες τιμές NSE και KGE . Στο μοντέλο P03, η βελτίωση είναι ιδιαίτερα εμφανής στο κριτήριο $\log NSE$, που αυξάνεται από 0.40 σε 0.58, υποδεικνύοντας καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου στις χαμηλές ροές με την προσθήκη του συντελεστή αδιαπέρατης επιφάνειας, ν , ο οποίος καθορίζει την άμεση απορροή της λεκάνης.

Στην **Εικόνα 6.2** παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των τεσσάρων κριτηρίων αξιολόγησης (NSE , KGE , $\log NSE$ και $CRabs$) που προκύπτουν από τις 35 βαθμονομήσεις των λεκανών απορροής, για κάθε ένα από τα 12 μοντέλα. Όσον αφορά τα μοντέλα P03 με P09, χρησιμοποιήθηκε η εκθετική σχέση για την εκτίμηση της άμεσης απορροής.



Εικόνα 6.2: Σύγκριση των τεσσάρων κριτηρίων αξιολόγησης μεταξύ των δώδεκα υδρολογικών μοντέλων.

Παρατηρείται ότι τα μοντέλα P04-P09 παρουσιάζουν παρόμοιες μέσες τιμές NSE , οι οποίες κυμαίνονται από 0.65 (P04) έως 0.69 (P09). Το μοντέλο PMS, με 5 παραμέτρους,

καταγράφει την υψηλότερη απόδοση ως προς τον δείκτη NSE , με μέση τιμή 0.70, συγκρίσιμη με αυτή του υδρολογικού μοντέλου P05 (0.68). Παράλληλα, το P05 υπερέχει στο κριτήριο $\log NSE$ κατά 3.9%. Τη χαμηλότερη επίδοση εμφανίζει το μοντέλο P01, με αρνητική μέση τιμή του δείκτη NSE (-0.26), ενώ το μοντέλο Ol'dekor, το οποίο δεν διαθέτει παραμέτρους, εμφανίζει μέση τιμή NSE ίση με -2.60.

Διαπιστώνεται ότι, μετά το μοντέλο P05, η αύξηση του αριθμού των παραμέτρων οδηγεί σε πολύ μικρή βελτίωση της απόδοσης των κριτηρίων αξιολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, το κριτήριο αξιολόγησης $\log NSE$ στο μοντέλο P09 βελτιώνεται μόλις κατά 0.61%, το CR_{abs} κατά 0.28%, ενώ το KGE μόνο κατά 0.05%. Επισημαίνεται ότι το μοντέλο Ol'dekor εμφανίζει χαμηλή απόδοση, με τιμές $KGE = -0.06$, $\log NSE = -7.09$ και $CR_{abs} = -0.32$.

Τα μοντέλα GR2M και PMS αποδίδουν καλύτερα από το P05 στο κριτήριο KGE , με τιμές 0.76, 0.74 και 0.71, αντίστοιχα. Αντίθετα, το P05 σημειώνει καλύτερη επίδοση από το μοντέλο GR2M στα κριτήρια $\log NSE$ και CR_{abs} , ενώ το μοντέλο PMS παρουσιάζει παρόμοια απόδοση σε σύγκριση με το P05 στα δύο παραπάνω κριτήρια.

Λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο βαθμονόμησης, NSE , επιλέγεται ως καταλληλότερο το εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο P05, καθώς παρουσιάζει ικανοποιητική απόδοση στην προσαρμογή των παρατηρημένων δεδομένων, χωρίς να υστερεί σε σχέση με τα μοντέλα που διαθέτουν περισσότερες παραμέτρους και πιο περιγραφική δομή. Παράλληλα, η απόδοσή του προσεγγίζει εκείνη του μοντέλου PMS, το οποίο αναφέρεται στη βιβλιογραφία και διαθέτει ίσο αριθμό παραμέτρων.

6.2 Επιλογή και ανάλυση βέλτιστου υδρολογικού μοντέλου

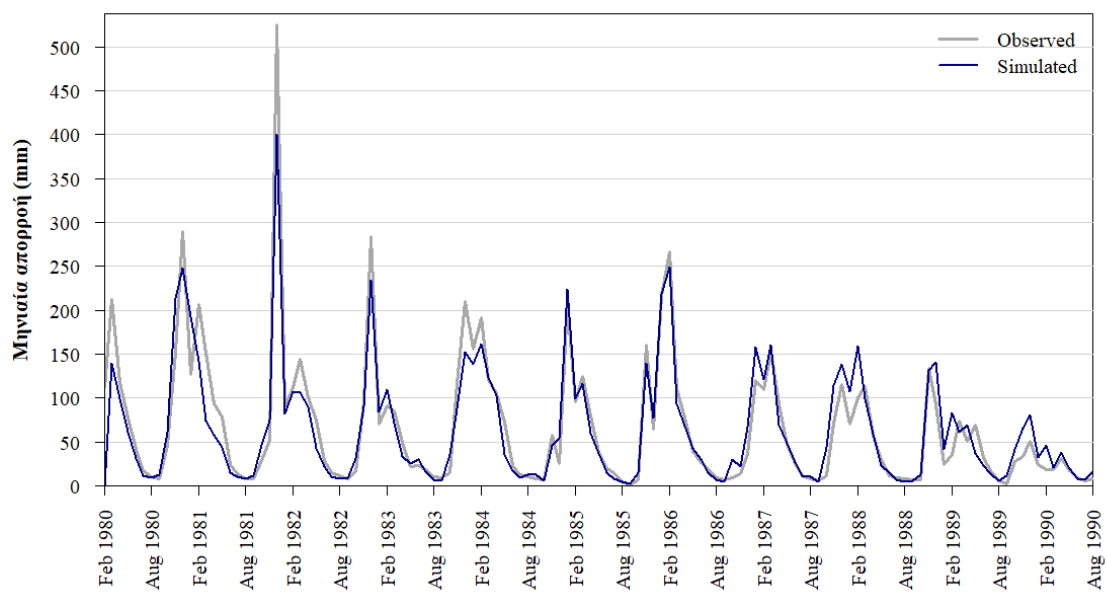
Μετά την επιλογή του μοντέλου P05 ως το πλέον κατάλληλο, ακολουθεί η ανάλυση της απόδοσής του σε κάθε εξεταζόμενη λεκάνη απορροής, με σκοπό την αξιολόγηση της επάρκειάς του σε διαφορετικά υδρολογικά περιβάλλοντα. Στον **Πίνακα 6.1** δίνονται τα βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης που πρέκυψαν από την εφαρμογή του εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου P05 στις 35 λεκάνες απορροής. Για τα υπόλοιπα υδρολογικά μοντέλα που εξετάστηκαν παρατίθενται οι αντίστοιχοι πίνακες με τα μέτρα επίδοσής τους στο **Παράρτημα Α**.

Στις **Εικόνες 6.3** και **6.4** αντιπαραβάλλονται οι προσομοιωμένες χρονοσειρές μηνιαίων απορροών, οι οποίες παράγονται από το βαθμονομημένο υδρολογικό μοντέλο P05, με τις αντίστοιχες παρατηρημένες μηνιαίες απορροές, ενδεικτικά, για τις λεκάνες απορροής στις θέσεις του υδρομετρικού σταθμού στον Πόρο Ρηγανίου (πριν την κατασκευή του φράγματος του Ευήνου) και του φράγματος Λάδωνα. Οι υπόλοιπες λεκάνες απορροής με τις παρατηρημένες και προσομοιωμένες χρονοσειρές απορροής τους παρατίθενται στο **Παράρτημα Β**. Επισημαίνεται ότι οι παρατηρημένες χρονοσειρές δεν είναι συνεχείς, διότι σε αρκετούς σταθμούς καταγράφονται περίοδοι χωρίς διαθέσιμα δεδομένα μέτρησης.

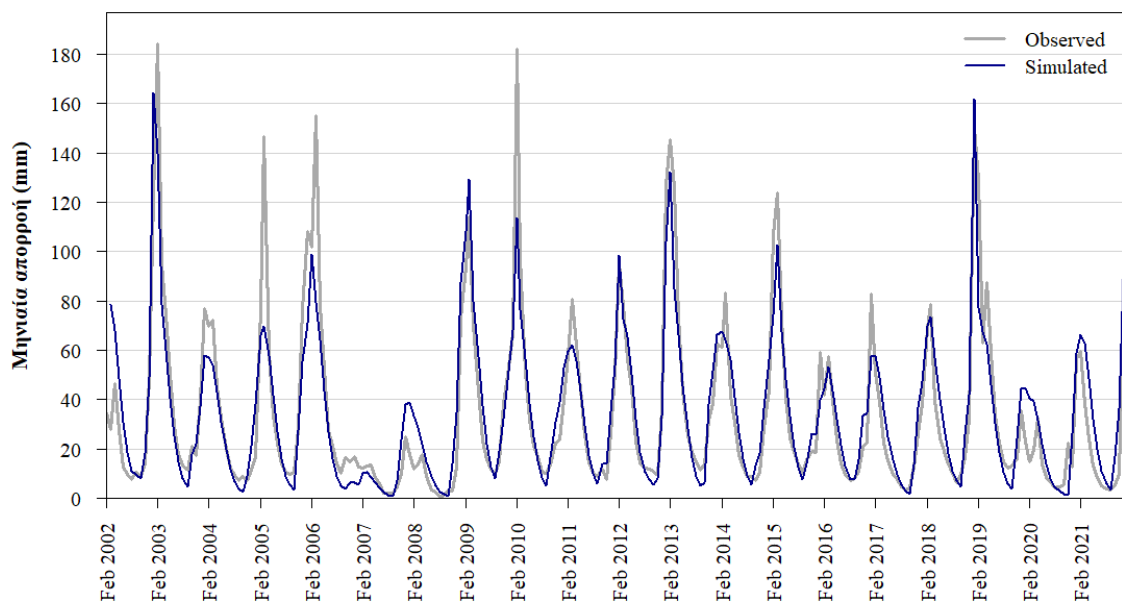
Παρατηρείται ότι το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τις παρατηρούμενες απορροές, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται συνέπεια στις φυσικές διεργασίες στις περισσότερες λεκάνες απορροής.

Πίνακας 6.1: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης του υδρολογικού μοντέλου P05.

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.59	0.56	0.83	0.60
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	0.72	0.84	0.69	0.52
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.70	0.72	0.76	0.59
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.88	0.87	0.76	0.69
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.82	0.83	0.73	0.64
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.73	0.82	0.35	0.58
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.66	0.77	0.87	0.68
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.74	0.75	0.75	0.54
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.68	0.74	0.76	0.50
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.79	0.81	0.77	0.61
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.65	0.69	0.65	0.54
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.82	0.87	0.87	0.64
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.73	0.75	0.77	0.54
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.74	0.81	0.65	0.54
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.87	0.86	0.88	0.68
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.86	0.84	0.74	0.68
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.61	0.62	0.82	0.54
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.96	0.98	0.96	0.84
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.54	0.56	0.62	0.44
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	0.76	0.75	0.68	0.55
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.82	0.85	0.85	0.64
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.89	0.88	0.86	0.69
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	0.50	0.55	0.67	0.42
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	0.63	0.70	0.34	0.45
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.65	0.54	0.69	0.52
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.72	0.72	0.86	0.59
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.80	0.82	0.48	0.58
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	0.48	0.55	0.51	0.38
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.76	0.76	0.72	0.57
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.42	0.51	0.40	0.32
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.35	0.40	0.35	0.31
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.57	0.70	0.67	0.53
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	0.29	0.34	0.42	0.27
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.63	0.67	0.50	0.41
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.51	0.55	0.49	0.40

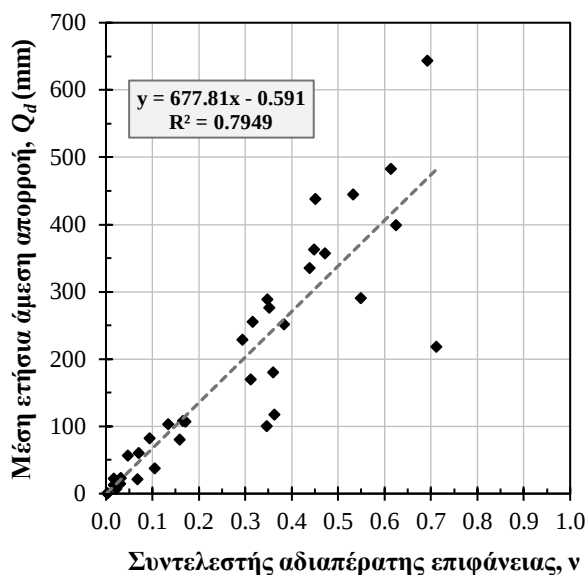


Εικόνα 6.3: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Πόρο Ρηγανίου (πριν την κατασκευή του φράγματος του Ευήνου).

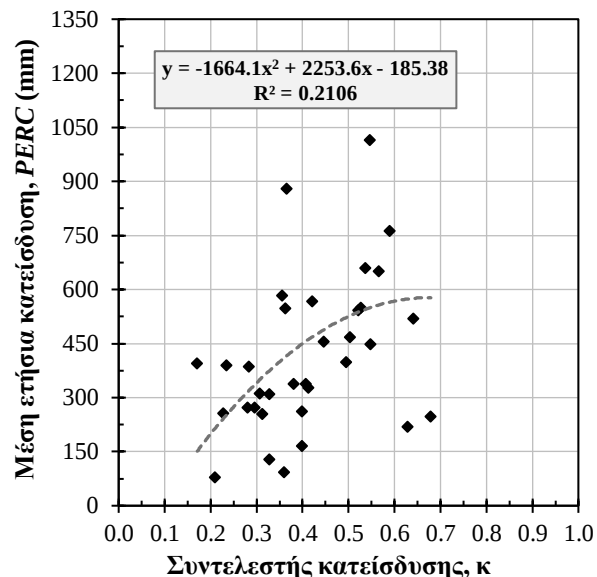


Εικόνα 6.4: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Λάδωνα.

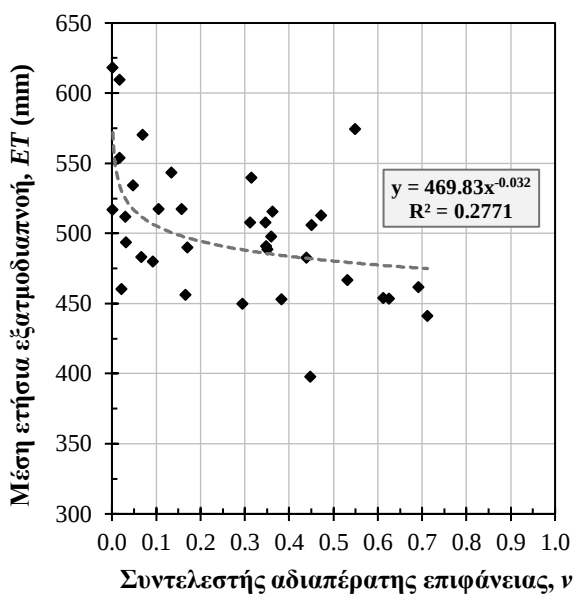
Στην **Εικόνα 6.5** απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου P05, μετά τη βαθμονόμησή τους στις λεκάνες απορροής, και των μέσων ετήσιων τιμών των υδρολογικών διεργασιών, στις περιπτώσεις που παρατηρείται συσχέτιση.



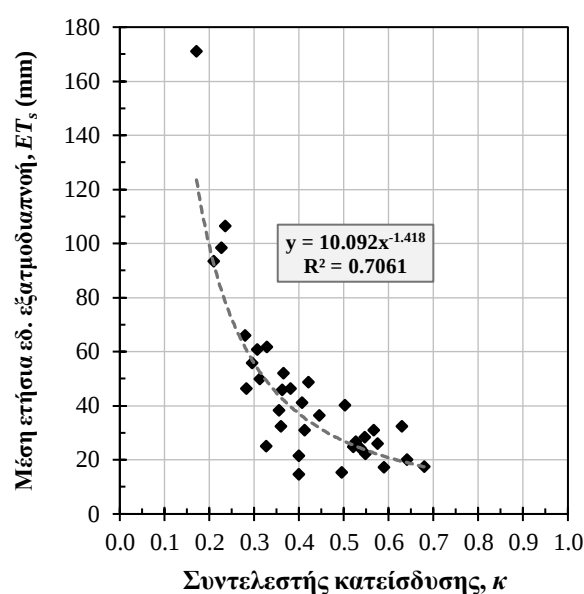
(α)



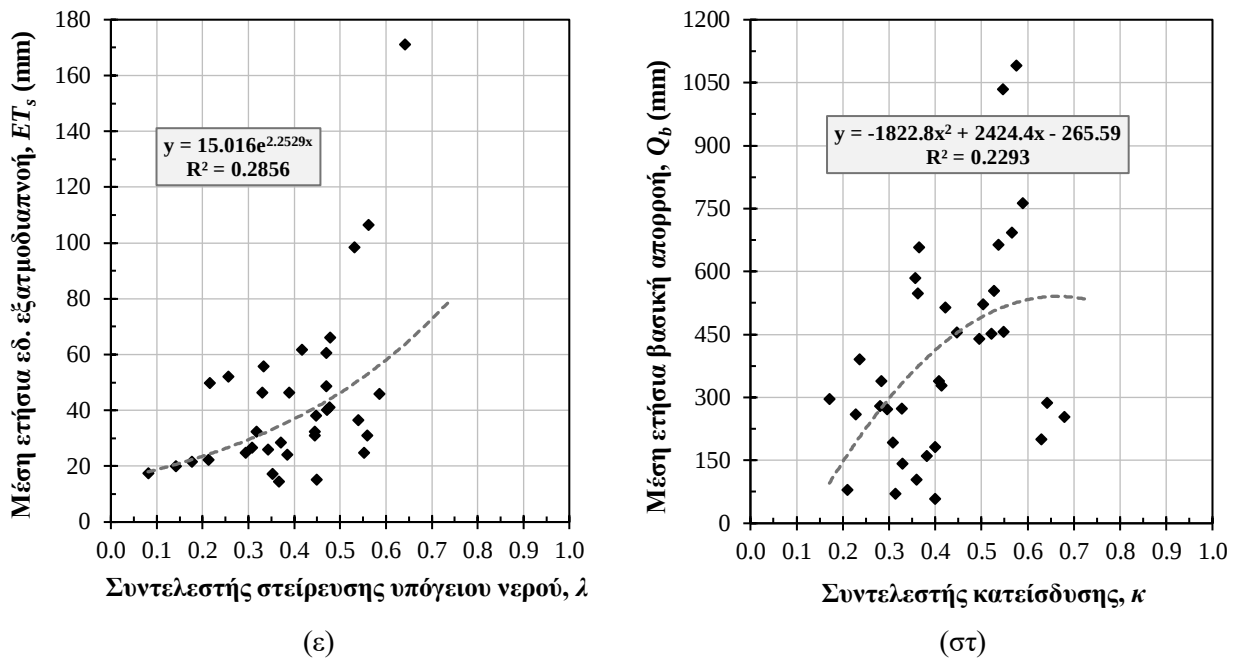
(β)



(γ)



(δ)

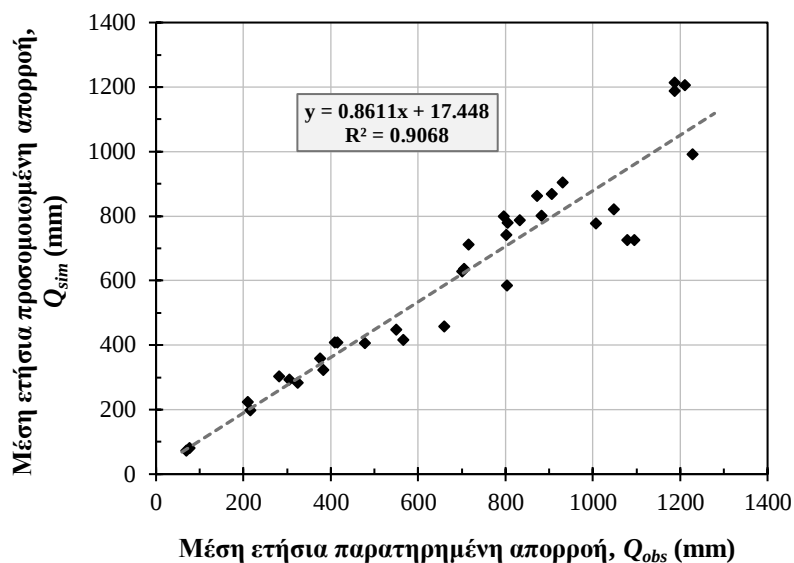


Εικόνα 6.5: Διαγράμματα διασποράς μεταξύ των παραμέτρων του μοντέλου και υδρολογικών διεργασιών.

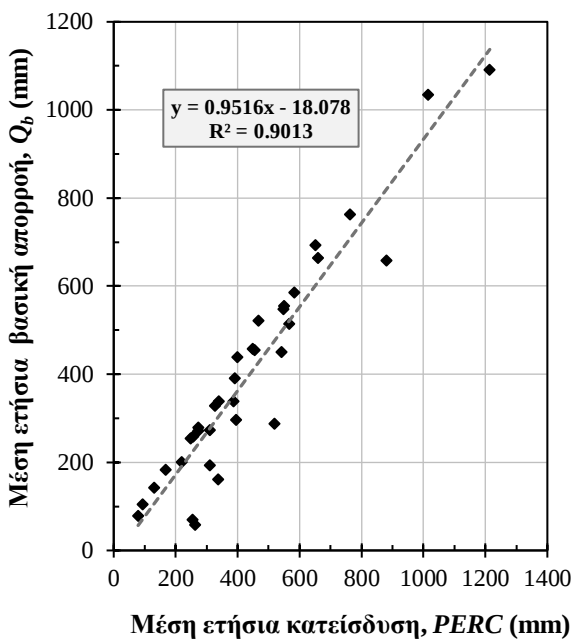
Όσον αφορά το διάγραμμα διασποράς της **Εικόνας 6.5 (β)** παρατηρείται ασθενής συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή κατείσδυσης, κ , και της μέσης ετήσιας κατείσδυσης, *PERC*, παρά το γεγονός ότι η κατείσδυση εξαρτάται θεωρητικά άμεσα από τον συντελεστή της. Η χαμηλή αυτή συσχέτιση υποδηλώνει ότι η μεταβλητότητα της κατείσδυσης δεν καθορίζεται αποκλειστικά από την τιμή του συντελεστή κ , αλλά επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την διαθέσιμη υγρασία στο εδαφικό απόθεμα S_2 (βλ. σχέση 5.11). Στο διάγραμμα (δ) απεικονίζεται η σχέση μεταξύ της μέσης ετήσιας εδαφικής εξατμοδιαπνοής, ET_s , και του συντελεστή κατείσδυσης, κ . Η προσαρμογή συνάρτησης δύναμης απέδωσε συντελεστή R^2 ίσο με 0.86, γεγονός που υποδεικνύει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ τους. Η αρνητική δυναμική μορφή της σχέσης υποδηλώνει ότι οι υψηλότερες τιμές του συντελεστή κατείσδυσης οδηγούν σε μείωση της εδαφικής εξατμοδιαπνοής, καθώς μειώνεται η διαθέσιμη εδαφική υγρασία από τον προηγούμενο μήνα.

Στην **Εικόνα 6.6** παρουσιάζεται, μέσω διαγράμματος διασποράς, η σύγκριση μεταξύ της παρατηρημένης και της προσομοιωμένης μέσης ετήσιας απορροής των λεκανών απορροής. Αντίστοιχα, στην **Εικόνα 6.7** απεικονίζεται η συσχέτιση μεταξύ των μέσων ετήσιων τιμών των κύριων υδρολογικών διεργασιών για τις λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης. Στα διαγράμματα (α) και (β) παρατηρείται σημαντική γραμμική συσχέτιση μεταξύ της μέσης ετήσιας κατείσδυσης (*PERC*) και τόσο της βασικής απορροής (Q_b) όσο και της διήθησης (*INF*). Αυτή η σχέση είναι σύμφωνη με τις φυσικές υδρολογικές διεργασίες μιας λεκάνης απορροής, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του νερού που διηθείται στη δεξαμενή

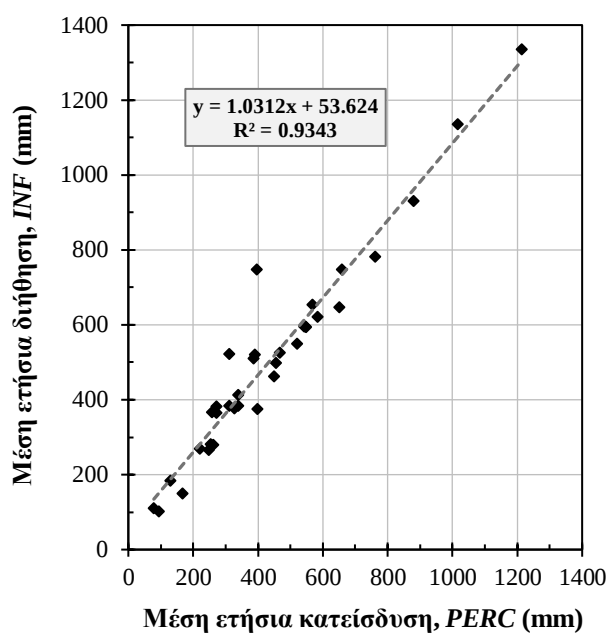
εδαφικής υγρασίας, τόσο αυξάνεται η ποσότητα που κατεισδύει στα υπόγεια ύδατα, τα οποία με τη σειρά τους καθορίζουν τη βασική απορροή της λεκάνης.



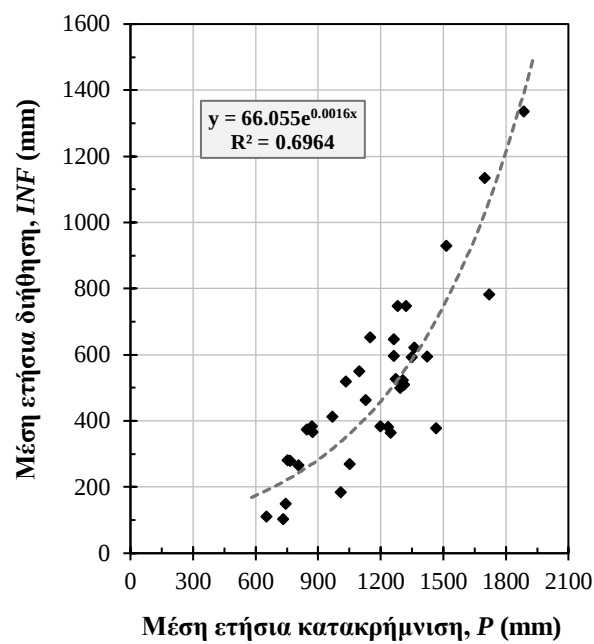
Εικόνα 6.6: Διάγραμμα διασποράς μεταξύ μέσης ετήσιας παρατηρημένης (Q_{obs}) και προσομοιωμένης (Q_{sim}) απορροής.



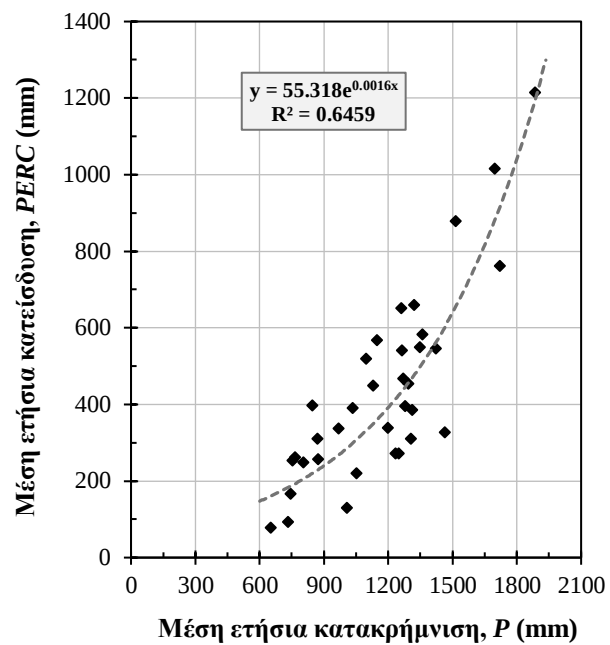
(α)



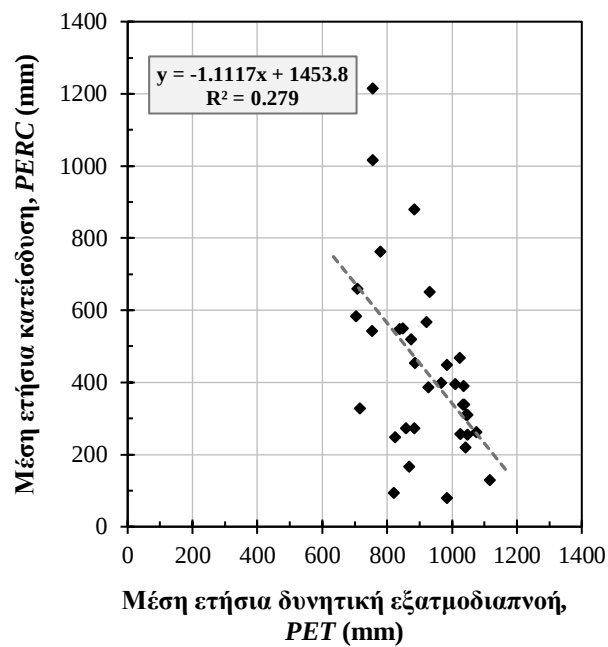
(β)



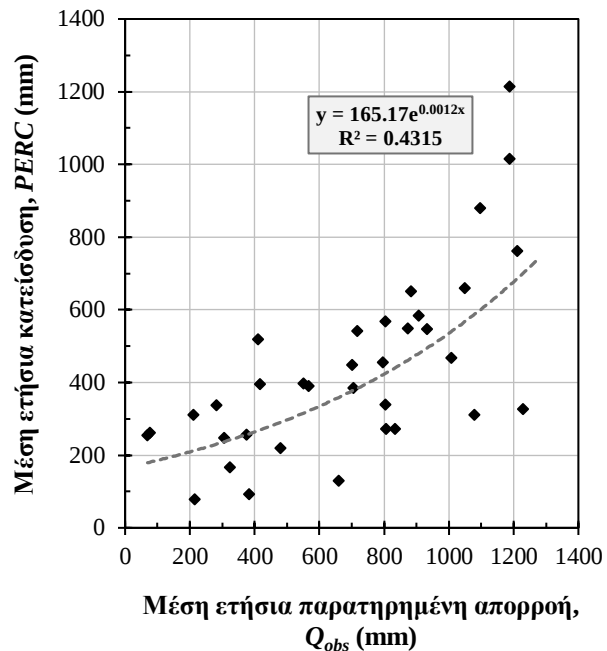
(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Εικόνα 6.7: Διαγράμματα διασποράς και συσχέτιση μεταξύ των υδρολογικών διεργασιών στις 35 λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΠΕΡΙΟΧΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το εννοιολογικό μοντέλο P05 που αναπτύχθηκε και επιλέχθηκε ως το βέλτιστο στο **Κεφάλαιο 6** περιλαμβάνει 5 παραμέτρους, ήτοι τη χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, K , τον συντελεστή αδιαπέρατης επιφάνειας, ν , τον συντελεστή κατείσδυσης, κ , τον συντελεστή στείρευσης υπόγειου νερού, λ , και τον συντελεστή υπόγειων απωλειών, μ . Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται ταυτόχρονη εκτίμηση των $4 \times 5 = 20$ παραμέτρων του γενικευμένου μοντέλου, στο οποίο η ετερογένεια των υδρολογικών διεργασιών περιγράφεται μέσω των τεσσάρων ΜΥΑ. Στη συνέχεια, γίνεται επαλήθευση του μοντέλου σε επιλεγμένες θέσεις.

7.1 Εκτίμηση παραμέτρων μέσω βαθμονόμησης

Σε όλες τις ΜΥΑ κάθε λεκάνης θεωρήθηκαν κοινές χρονοσειρές εισόδου (κατακρήμνιση, δυνητική εξατμοδιαπνοή), ενώ οι τιμές των παραμέτρων διαφοροποιήθηκαν, έτσι ώστε το συνολικό ύψος απορροής που παράγεται στην έξοδο της λεκάνης να είναι ίσο με:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^4 Q_i A_i}{\sum_{i=1}^4 A_i} \quad (7.1)$$

όπου Q_i το ύψος απορροής που παράγεται στη μονάδα υδρολογικής απόκρισης, i , και A_i η επιφάνεια που καταλαμβάνει η ΜΥΑ, i .

Οι 20 παράμετροι του μοντέλου εκτιμήθηκαν με διατύπωση των εξισώσεων σε κώδικα R, επιλύοντας ένα πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης, μέσω ενός αλγόριθμου εξελικτικής παγκόσμιας βελτιστοποίησης, DEoptim, του ομώνυμου πακέτου στην R (Mullen *et al.*, 2011).

Για τη βαθμονόμηση του γενικευμένου μοντέλου επιλέχθηκε ως στοχική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση ο μέσος όρος δεικτών NSE , KGE και $\log NSE$, καθώς εστιάζουν σε διαφορετικές πτυχές της προσαρμογής του μοντέλου και θεωρούνται εξίσου σημαντικοί. Επομένως, το μέτρο επίδοσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F = (NSE + KGE + \log NSE)/3 \quad (7.2)$$

Για να διασφαλιστεί ότι το μοντέλο παραμένει συνεπές με τα φυσικά χαρακτηριστικά των ΜΥΑ, στη στοχική συνάρτηση εισήχθη ένας πρόσθετος όρος ποινής, ώστε να διατηρείται η σχέση:

$$Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_4 \quad (7.3)$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η ΜΥΑ 1 παράγει το μικρότερο ύψος απορροής, η ΜΥΑ 2 το επόμενο μεγαλύτερο, κ.ο.κ., σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του **Πίνακα 3.1**.

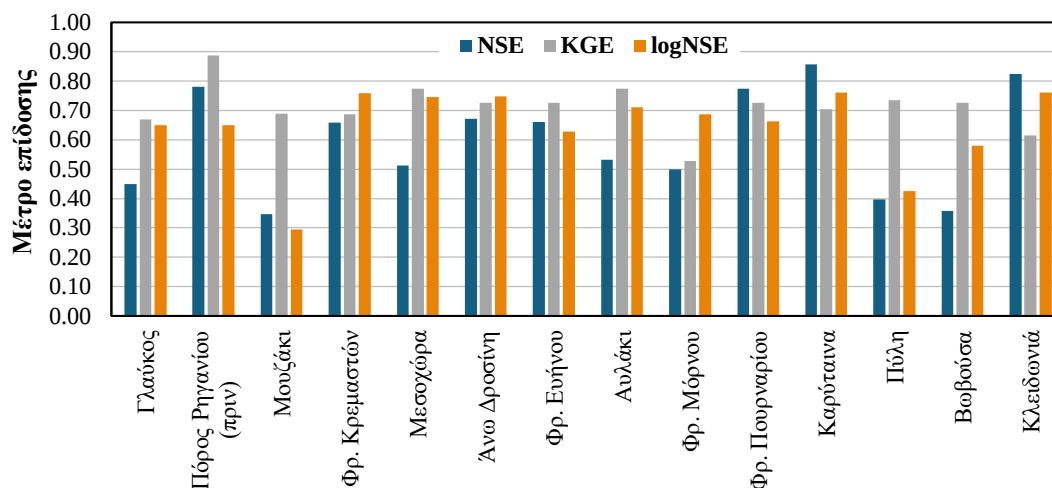
Παράλληλα, προστέθηκε όρος ποινής προκειμένου να διατηρείται η σχέση:

$$K_1 > K_2 > K_3 > K_4 \quad (8.4)$$

όπου K_i η χωρητικότητα της εδαφικής υγρασίας της ΜΥΑ i .

Με αυτόν τον τρόπο, ορίζονται τα όρια αναζήτησης της χωρητικότητας εδαφικής υγρασίας, ώστε όσο πιο ξηρή είναι η ΜΥΑ, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η χωρητικότητά της. Αυτό συνάδει με το γεγονός ότι μια ξηρή ΜΥΑ χαρακτηρίζεται από χαμηλό αριθμό καμπύλης (CN), δηλαδή από μικρότερη απορροή στην έξοδο της λεκάνης.

Μέσω της βαθμονόμησης του γενικευμένου μοντέλου στις 14 λεκάνες απορροής εκτιμήθηκαν οι βελτιστοποιημένες παράμετροι του **Πίνακα 7.1**. Στον **Πίνακα 7.2** εμφανίζονται τα μέτρα επίδοσης NSE , KGE , $\log NSE$ και CR_{abs} για καθεμία από τις λεκάνες απορροής που συμμετείχαν στη διαδικασία της βαθμονόμησης. Στην **Εικόνα 7.1** παρουσιάζεται σε μορφή ραβδογράμματος η μεταβολή των μέτρων επίδοσης για τις 14 λεκάνες.



Εικόνα 7.1: Μέτρα επίδοσης NSE , KGE , $\log NSE$ του γενικευμένου υδρολογικού μοντέλου στις δεκατέσσερις θέσεις βαθμονόμησης.

Πίνακας 7.1: Βελτιστοποιημένες παράμετροι μοντέλου για κάθε ΜΥΑ.

Παράμετρος	ΜΥΑ 1	ΜΥΑ 2	ΜΥΑ 3	ΜΥΑ 4
K (mm)	233.2	138.3	127.3	118.8
ν	0.073	0.099	0.178	0.249
κ	0.357	0.326	0.325	0.331
λ	0.010	0.347	0.350	0.375
μ	0.152	0.116	0.060	0.010

Πίνακας 7.2: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης του γενικευμένου υδρολογικού μοντέλου.

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CRabs
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.45	0.67	0.65	0.42
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.78	0.89	0.65	0.63
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.35	0.69	0.29	0.40
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.66	0.69	0.76	0.50
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.51	0.77	0.75	0.45
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.67	0.73	0.75	0.53
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.66	0.73	0.63	0.53
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.53	0.77	0.71	0.44
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.50	0.53	0.69	0.38
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.77	0.72	0.66	0.56
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.86	0.70	0.76	0.67
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.40	0.74	0.42	0.43
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	0.36	0.73	0.58	0.40
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.82	0.61	0.76	0.57

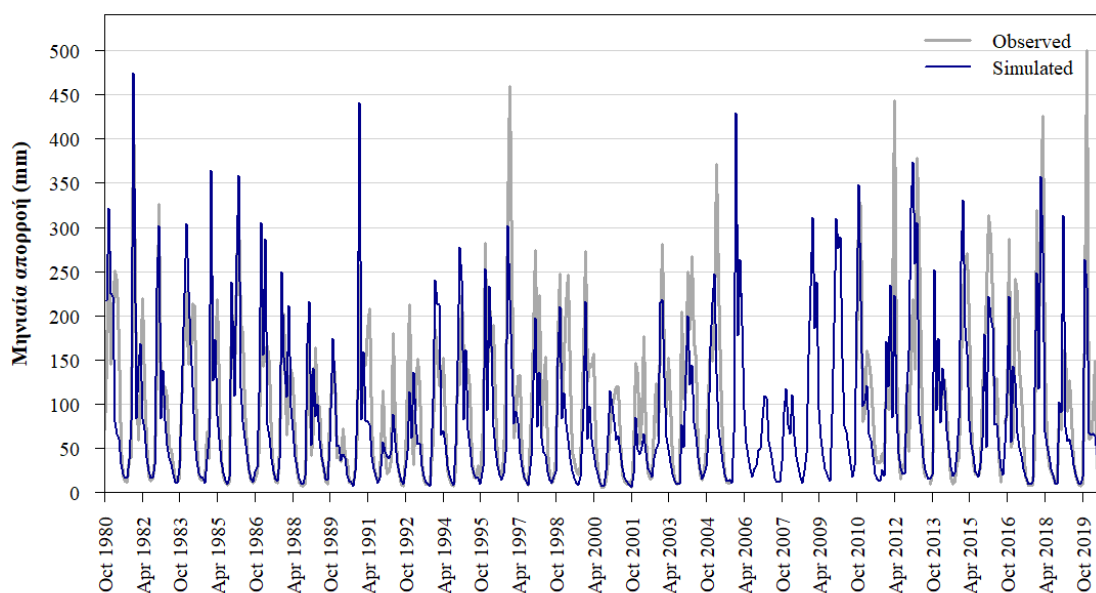
Ο μέσος όρος του συνολικού κριτηρίου F ανέρχεται σε 0.65, με επιμέρους μέσες τιμές NSE = 0.59, KGE = 0.71 και logNSE = 0.65, γεγονός που υποδεικνύει ικανοποιητική συνολική προσαρμογή του μοντέλου στις λεκάνες απορροής που βαθμονομήθηκαν.

Στον **Πίνακα 7.3** γίνεται σύγκριση των βασικών στατιστικών χαρακτηριστικών (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) των χρονοσειρών της παρατηρημένης και της προσομοιωμένης απορροής στις θέσεις βαθμονόμησης του μοντέλου. Επιπλέον, παρατίθεται ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των δύο χρονοσειρών.

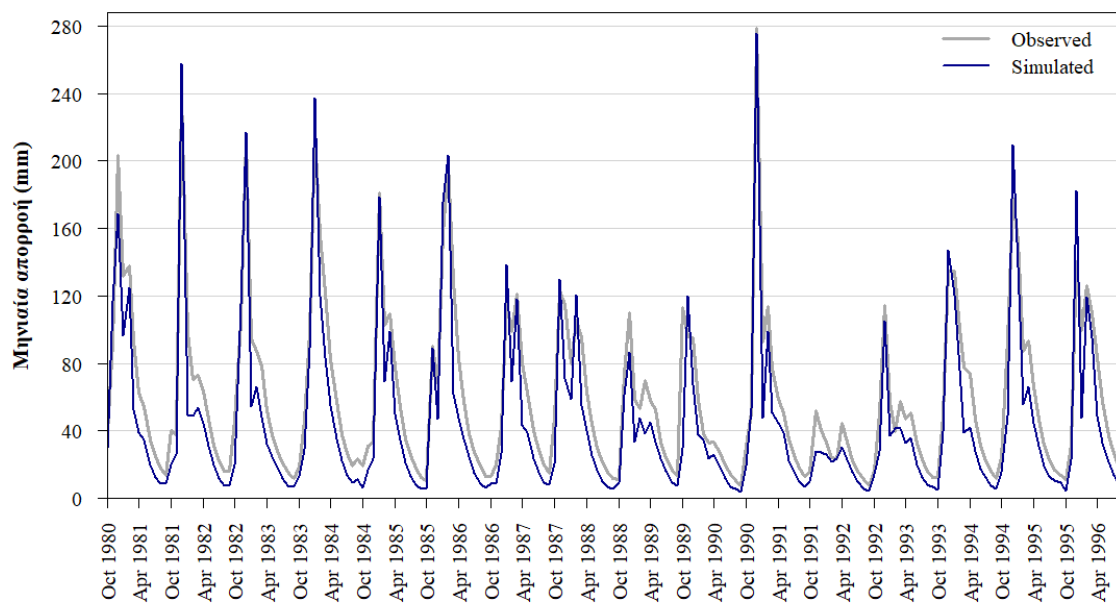
Πίνακας 7.3: Σύγκριση στατιστικών χαρακτηριστικών προσομοιωμένων και παρατηρημένων παροχών στις λεκάνες βαθμονόμησης του μοντέλου, για την κοινή περίοδο των δύο δειγμάτων.

Θέση βαθμονόμησης	Μέση τιμή (mm/month)		Τυπική απόκλιση (mm/month)		Συντελ. συσχέτισης
	Παρατηρημένη	Προσομοιωμένη	Παρατηρημένη	Προσομοιωμένη	
Γλαύκος	98.9	75.5	87.4	82.4	0.748
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	66.8	52.2	76.4	56.8	0.932
Μουζάκι	46.5	27.1	52.9	26.3	0.729
Φρ. Κρεμαστών	72.7	58.6	60.2	62.2	0.865
Μεσοχώρα	98.9	89.1	87.4	88.8	0.766
Άνω Δροσίνη	31.6	29.5	34.7	28.8	0.822
Φρ. Ευήνου	67.0	47.3	68.7	56.3	0.863
Αυλάκι	101.1	85.1	91.3	85.2	0.769
Φρ. Μόρνου	34.0	32.7	27.7	34.9	0.837
Φρ. Πουρναρίου	69.6	49.9	66.1	54.7	0.935
Καρύταινα	23.5	23.4	34.1	26.2	0.945
Πύλη	73.6	46.6	72.9	46.8	0.738
Βοβούσα	75.0	65.4	73.6	61.2	0.654
Κλειδωνιά	59.8	46.2	49.3	51.1	0.954

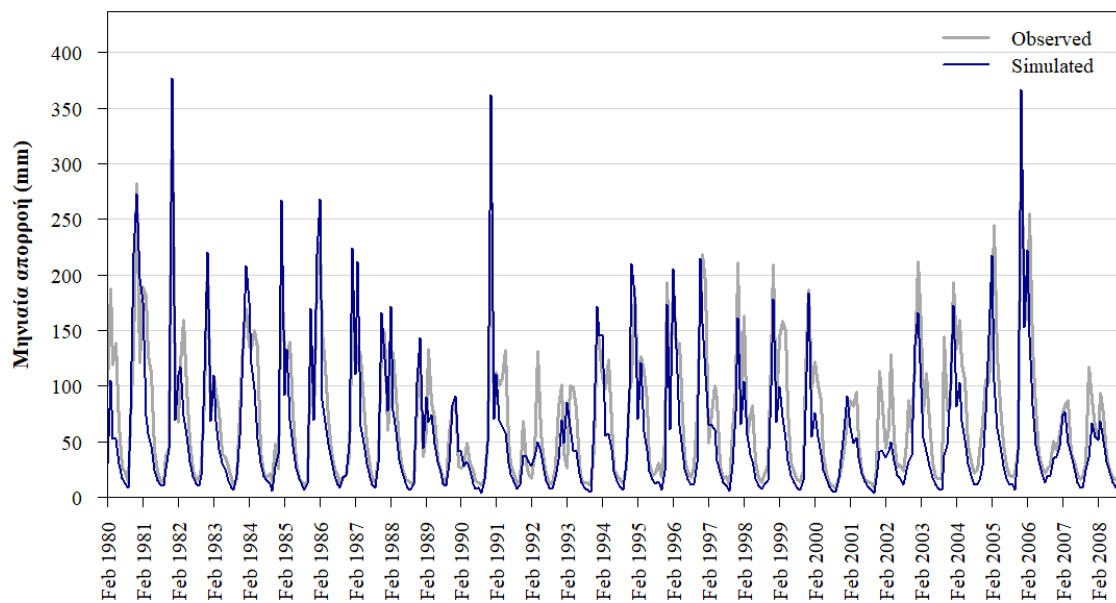
Στις **Εικόνες 7.2 έως 7.6** αντιπαραβάλλονται οι παρατηρημένες χρονοσειρές των μηνιαίων παροχών με τις αντίστοιχες προσομοιωμένες που παράγονται μέσω του βαθμονομημένου μοντέλου, ενδεικτικά για τις θέσεις: Αυλάκι, Κλειδωνιά, φράγμα Κρεμαστών, Άνω Δροσίνη και Καρύταινα. Οι αντίστοιχες απεικονίσεις για τις υπόλοιπες λεκάνες παρατίθενται στο **Παράρτημα Γ**.



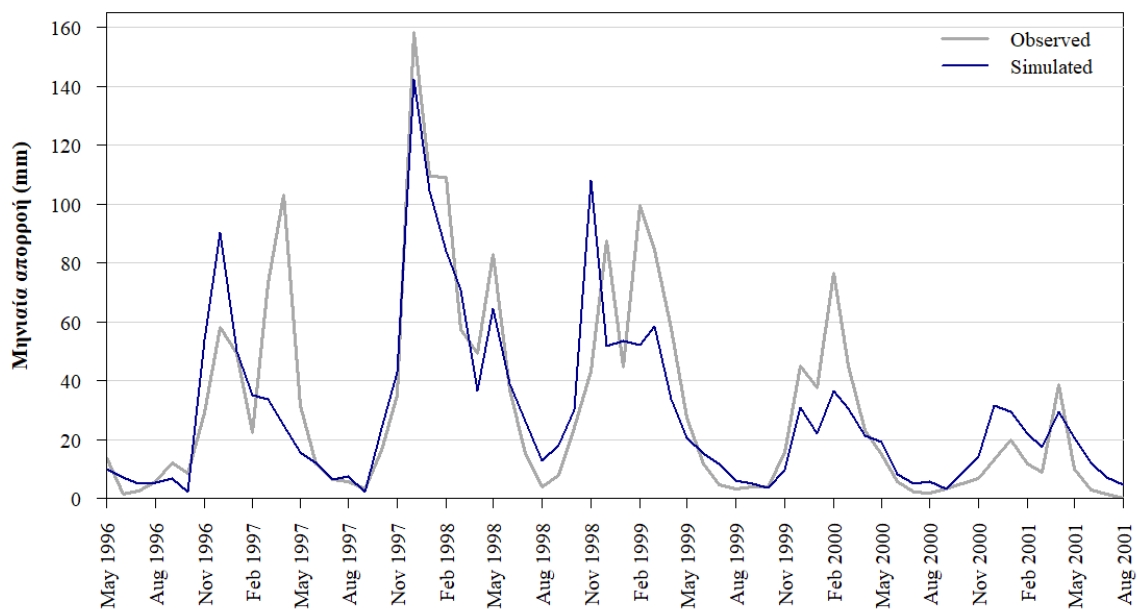
Εικόνα 7.2: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αυλακίου (MYA).



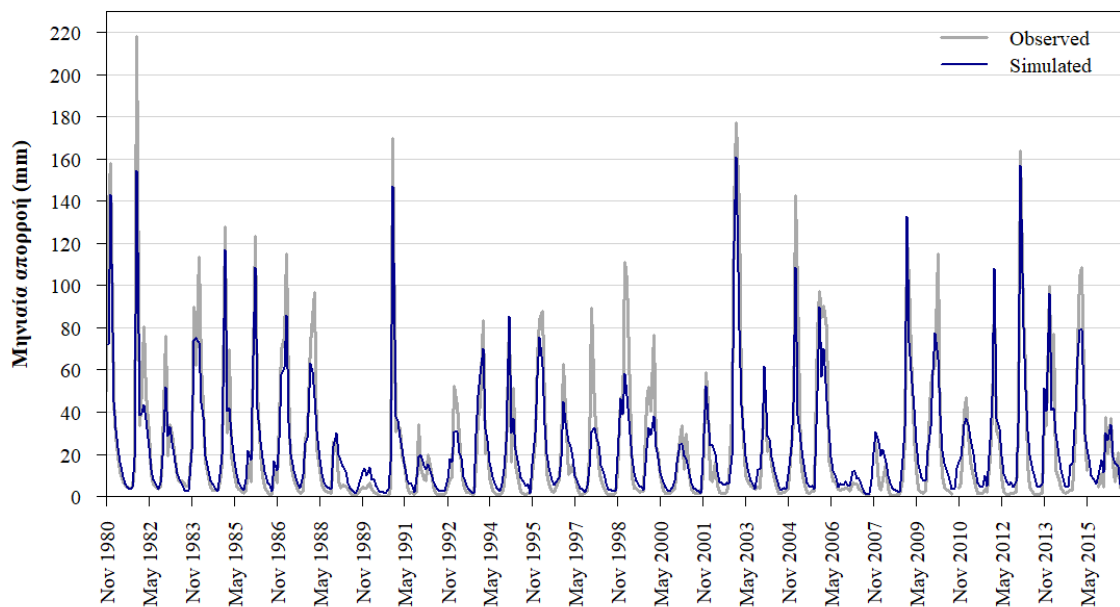
Εικόνα 7.3: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Κλειδωνιά (ΜΥΑ).



Εικόνα 7.4: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Κρεμαστών (ΜΥΑ).



Εικόνα 7.5: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Άνω Δροσίνη (ΜΥΑ).



Εικόνα 7.6: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Καρύταινας (ΜΥΑ).

7.2 Επαλήθευση μοντέλου

Έπειτα από τη διαδικασία της βαθμονόμησης για τον προσδιορισμό των 20 παραμέτρων του γενικευμένου εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου, πραγματοποιήθηκε η διαδικασία επαλήθευσης. Σε αυτήν, χρησιμοποιήθηκαν οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων, ώστε να εκτελεστεί υδρολογική προσομοίωση και να αξιολογηθεί η ικανότητα του μοντέλου να αναπαράγει τις παρατηρημένες παροχές σε διαφορετικές θέσεις της περιοχής μελέτης. Η πρακτική της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης σε χωρικά διακριτές θέσεις ενισχύει τη δυνατότητα μεταφοράς του μοντέλου σε άλλες λεκάνες (space transferability, Klemeš, 1986· Andréassian *et al.*, 2009). Αυτός αποτελεί και ο κύριος στόχος της παρούσας έρευνας, καθώς επιδιώκεται η αξιοποίησή του σε μεγάλο πλήθος λεκανών χωρίς μετρήσεις, μέσω περιοχοποίησης των παραμέτρων του.

Στον **Πίνακα 7.4** δίνονται τα μέτρα επίδοσης *NSE* και *KGE* στις θέσεις επαλήθευσης του μοντέλου. Στον **Πίνακα 7.5** γίνεται σύγκριση μεταξύ των βασικών στατιστικών χαρακτηριστικών (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) των χρονοσειρών παρατηρημένης και προσομοιωμένης απορροής και παρατίθεται ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ τους.

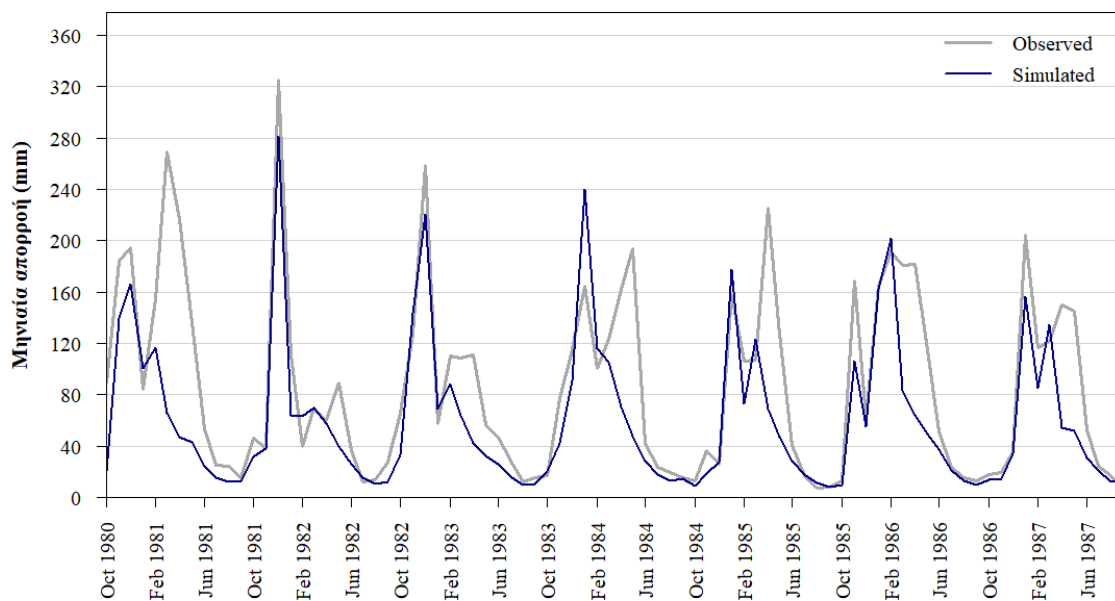
Πίνακας 7.4: Χρονική περίοδος και αποτελεσματικότητα (*NSE* και *KGE*) μοντέλου κατά την περίοδο επαλήθευσης.

Θέση επαλήθευσης	Περίοδος επαλήθευσης	NSE	KGE
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.53	0.52
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.32	0.51
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.41	0.71
Γεφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	-0.17	0.41
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.47	0.45
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.51	0.50
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.51	0.64
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.74	0.71
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.47	0.57
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	-2.97	-0.95
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	-3.33	-1.08
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.20	0.28
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.17	0.22
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.46	0.49
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	-0.04	0.32
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.44	0.52
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.42	0.38
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.45	0.45
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	-0.17	0.45
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.63	0.57
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.52	0.47

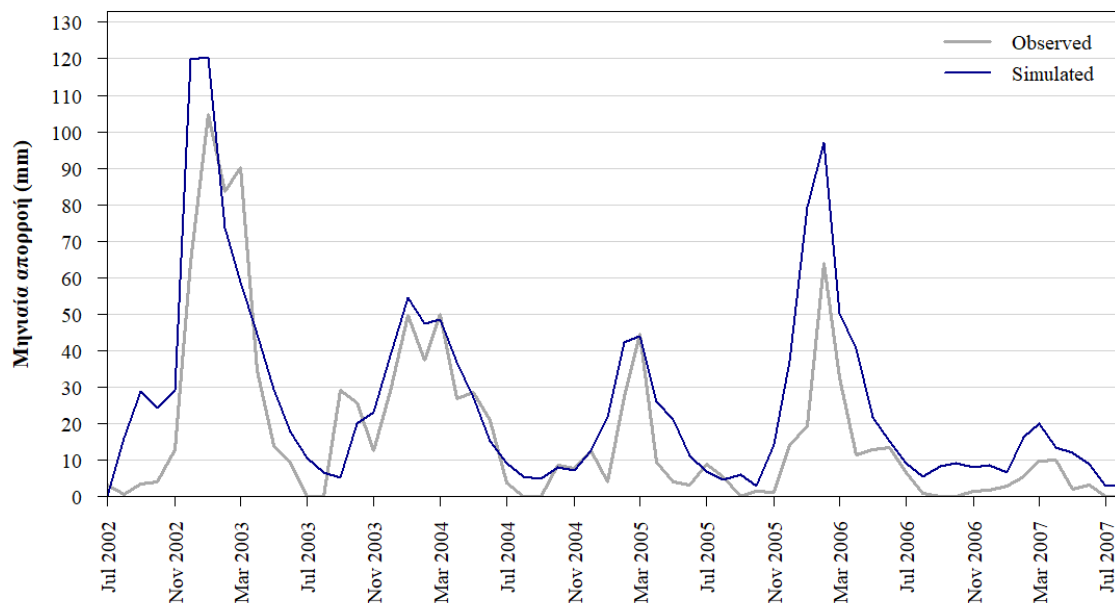
Πίνακας 7.5: Σύγκριση στατιστικών χαρακτηριστικών προσομοιωμένων και παρατηρημένων παροχών στις λεκάνες επαλήθευσης του μοντέλου, για την κοινή περίοδο των δύο δειγμάτων.

Θέση επαλήθευσης	Μέση τιμή (mm/month)		Τυπική απόκλιση (mm/month)		Συντ. συσχέτισης
	Παρατηρημένη	Προσομοιωμένη	Παρατηρημένη	Προσομοιωμένη	
Αλαγονία	80.2	60.3	118.7	98.3	0.893
Γέφυρα Κόκκορη	53.2	25.3	32.6	28.9	0.783
Καρβελιώτης	80.6	52.1	76.7	69.3	0.804
Φράγμα Λάδωνα	34.3	21.1	35.2	29.6	0.798
Νέδοντας	32.3	34.7	42.9	48.5	0.813
Τριπόταμα	54.7	36.8	57.2	46.3	0.946
Φράγμα Πλαστήρα	77.6	65.3	77.0	62.3	0.740
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	66.8	54.4	74.8	61.3	0.878
Γεφ. Κόνιτσας	87.4	61.1	73.6	58.7	0.784
Φράγμα Πηγών Αώου	102.1	70.8	106.7	66.6	0.745
Φράγμα Λούρου	59.0	38.0	42.5	47.3	0.591
Κιοτέκι	47.2	34.5	50.6	35.8	0.849
Αμπελιά	6.4	17.0	7.8	15.7	0.749
Σμόκοβο	17.8	26.5	23.5	26.7	0.855
Σκοπιά	5.7	16.5	7.3	13.7	0.630
Αρκουδόρεμα	32.2	19.1	29.1	15.1	0.645
Δεσπάτης	27.2	16.6	25.6	11.7	0.598
Φονιάς	37.2	29.1	40.3	29.0	0.870
Μπούσδα	25.7	18.8	18.8	13.8	0.429
Τρίκορφο	18.0	18.0	18.8	12.3	0.664
Ξηροπόταμος	55.8	33.0	54.0	31.6	0.798

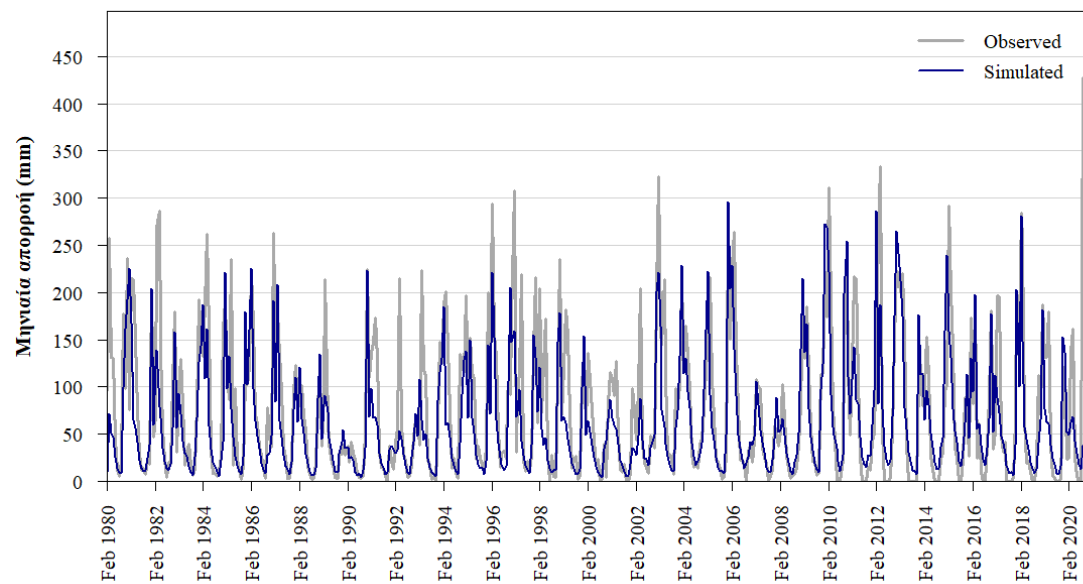
Στις **Εικόνες 7.7** έως **7.9** απεικονίζονται συγκριτικά οι παρατηρημένες και προσομοιωμένες χρονοσειρές μηνιαίας απορροής στις θέσεις: γέφυρα Κόνιτσας, Σμόκοβο και φράγμα Πλαστήρα, κατά τη διαδικασία επαλήθευσης του μοντέλου των 20 παραμέτρων. Παρατηρείται ότι οι προσομοιωμένες τιμές ακολουθούν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες παρατηρημένες, αποτυπώνοντας τις περιόδους αυξημένων και μειωμένων παροχών. Οι αντίστοιχες απεικονίσεις των λοιπών λεκανών απορροής παρατίθενται στο **Παράρτημα Γ**.



Εικόνα 7.7: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γεφ. Κόνιτσας (ΜΥΑ).



Εικόνα 7.8: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Σμόκοβου (ΜΥΑ).



Εικόνα 7.9: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πλαστήρα (ΜΥΑ).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ BUDYKO

Η καμπύλη Budyko χρησιμοποιείται συχνά για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής (ET) ως συνάρτηση του δείκτη ξηρότητας σε μια λεκάνη απορροής, ο οποίος εκφράζεται ως ο λόγος της δυνητικής εξατμοδιαπνοής προς την κατακρήμνιση (PET/P). Σε ορισμένες λεκάνες, η ετήσια εξατμοδιαπνοή μπορεί να πλησιάζει την ετήσια κατακρήμνιση. Αυτό υποδηλώνει ότι υπάρχει επαρκής διαθέσιμη ενέργεια για την εξάτμιση της βροχόπτωσης και ότι η λεκάνη είναι υδατικά περιορισμένη, καθώς το ανώτατο όριο της εξατμοδιαπνοής καθορίζεται από τη διαθεσιμότητα του νερού. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου η ετήσια εξατμοδιαπνοή μπορεί να πλησιάσει τη δυνητική εξατμοδιαπνοή, υποδηλώνει ότι η διαθέσιμη ενέργεια είναι μικρότερη από την απαιτούμενη για την εξάτμιση της ετήσιας βροχής. Συνεπώς, ανάλογα με τον δείκτη ξηρότητας και τις κλιματικές συνθήκες, η πραγματική εξατμοδιαπνοή καθορίζεται από τη διαθεσιμότητα είτε του νερού είτε της ενέργειας στο σύστημα.

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιούνται δύο αναλύσεις: η πρώτη αφορά τη μελέτη των πραγματικών, παρατηρημένων δεδομένων, προκειμένου να διερευνηθεί η μακροχρόνια υδρολογική συμπεριφορά της περιοχής μελέτης μέσω του διαγράμματος Budyko. Η δεύτερη ανάλυση εφαρμόζεται στα προσομοιωμένα δεδομένα, που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου P05.

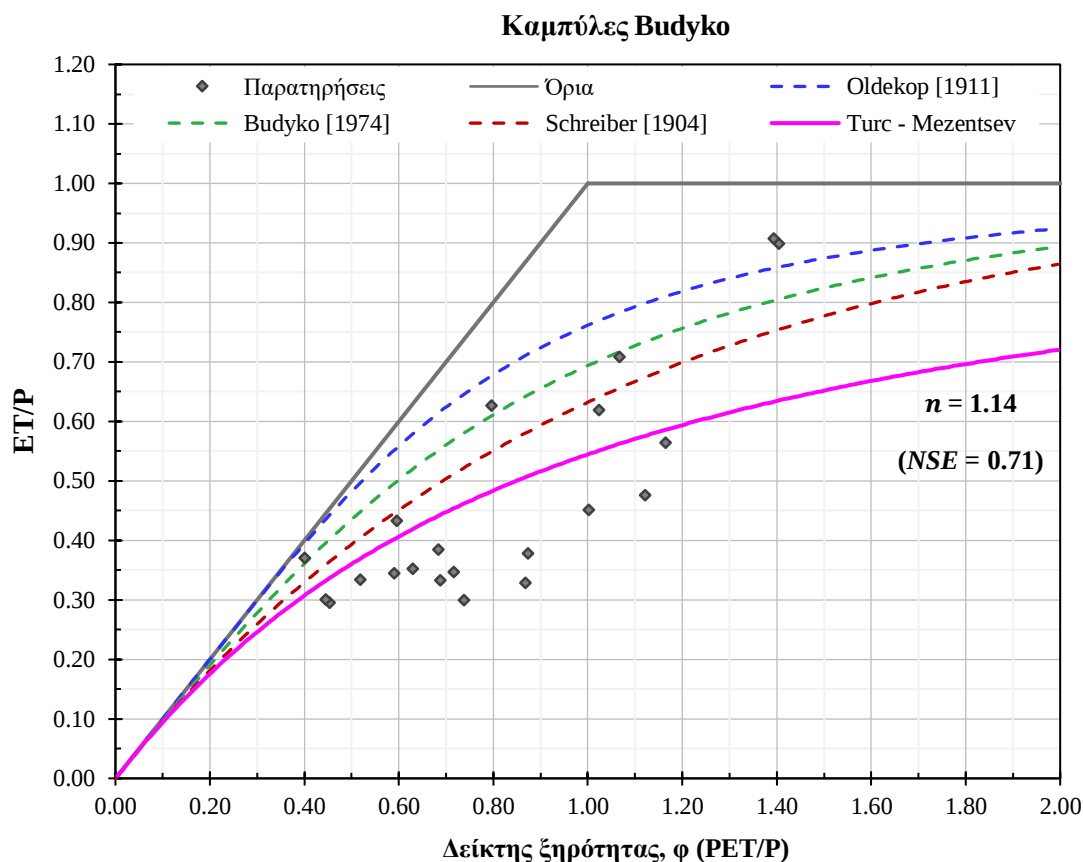
Στην απεικόνιση του γραφήματος Budyko υπάρχουν οι περιορισμοί του υδατικού ορίου ($ET = P$) και του ενεργειακού ορίου ($ET = PET$). Στα γραφήματα (Εικόνες 8.1 και 8.3) αναπαρίσταται η καμπύλη του Oldekop (1911), η καμπύλη του Budyko (1974) και η καμπύλη του Schreiber (1904), συναρτήσει του δείκτη ξηρότητας (φ). Η σύγκριση των διαφορετικών εκδοχών της καμπύλης Budyko επιτρέπει την αξιολόγηση της προσαρμοστικότητάς τους σε διαφορετικά κλιματικά και υδρολογικά καθεστάτα. Για την απεικόνιση χρησιμοποιούνται οι μακροπρόθεσμοι μέσοι όροι των τριών μεταβλητών, δηλαδή για λεκάνες απορροής που έχουν διαθέσιμα δεδομένα τουλάχιστον 10 ετών. Τα δεδομένα δεν είναι απολύτως συνεχή, χωρίς ωστόσο να παρουσιάζουν σημαντικές ελλείψεις.

8.1 Ανάλυση βάσει παρατηρημένων δεδομένων

Η ανάλυση της σχέσης μεταξύ των τριών υδροκλιματικών μεταβλητών, δηλαδή της πραγματικής εξατμοδιαπνοής (ET), της δυνητικής εξατμοδιαπνοής (PET) και της

κατακρήμνισης (P), βασίζεται στη μεθοδολογία που αναφέρθηκε παραπάνω. Στην παρούσα ενότητα, οι μακροπρόθεσμες ετήσιες ποσότητες ET των λεκανών απορροής που μελετώνται υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου (Εξ. 2.4), αξιοποιώντας τις ιστορικές μετρήσεις βροχόπτωσης και απορροής, με βάση τους μέσους όρους της κοινής χρονικής περιόδου. Μεταξύ των διαθέσιμων παραμετρικών προσεγγίσεων, Turc – Mezentsev (TM) και Tixeront – Fu (TF), επιλέχθηκε να γίνει η προσαρμογή της καμπύλης TM στα παρατηρημένα δεδομένα με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του δείκτη Nash – Sutcliffe (NSE). Η διαδικασία αυτή οδήγησε σε τιμή της παραμέτρου n ίση με 1.14 και $NSE = 0.71$. Για συνήθεις τιμές του δείκτη ξηρότητας ($0.5 < \varphi < 2$), οι τρεις μη παραμετρικές καμπύλες προσεγγίζονται από την καμπύλη Turc – Mezentsev για τις ακόλουθες τιμές της παραμέτρου n (Andréassian *et al.*, 2016):

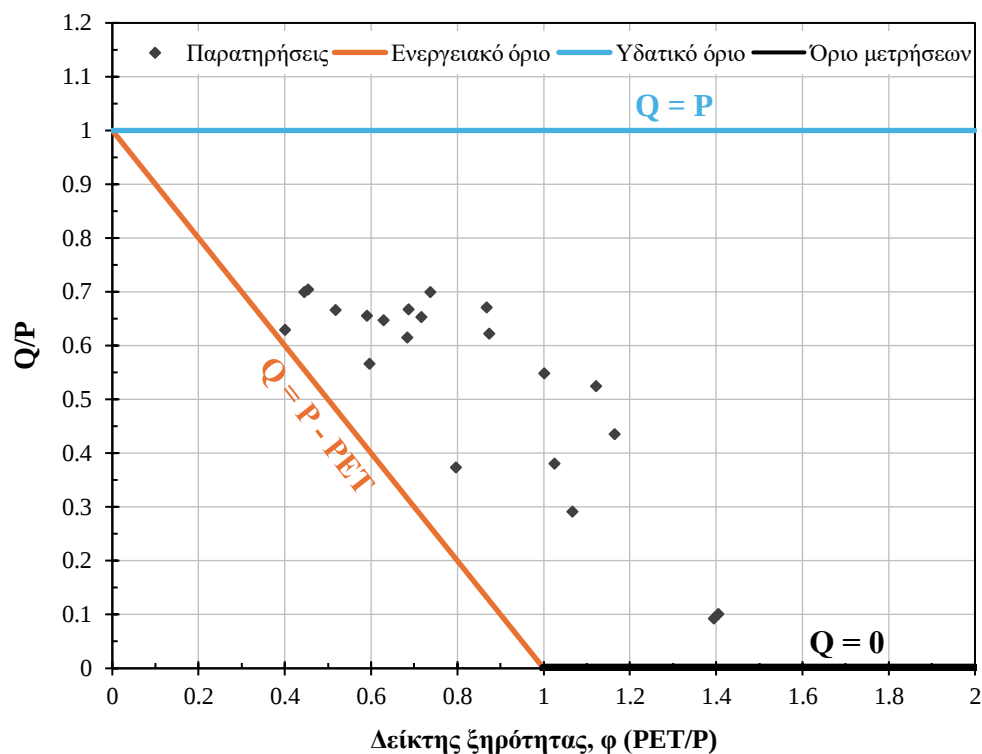
- Oldekop (1911): $n = 2.6$,
- Schreiber (1904): $n = 1.5$ και
- Budyko (1974): $n = 1.9$.



Εικόνα 8.1: Διαφορετικές αναπαραστάσεις των καμπυλών Budyko και παρατηρήσεις από την περιοχή μελέτης.

Επισημαίνεται ότι όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου n , η καμπύλη TM γίνεται πιο απότομη και η επίδραση του υδατικού περιορισμού μειώνεται. Αντίθετα, οι λεκάνες απορροής της Ελλάδας που μελετώνται εμφανίζουν μικρότερη παράμετρο n σε σχέση με τις κλασικές καμπύλες Budyko, γεγονός που υποδηλώνει ότι είναι περισσότερο υδατικά και ενεργειακά περιορισμένες. Η κατάσταση αυτή αποδίδεται στο ξηρό κλίμα της χώρας και στις εκτεταμένες περιόδους ξηρασίας, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα η διαθέσιμη ποσότητα νερού να περιορίζει την πραγματική εξατμοδιαπνοή σε σημαντικό βαθμό.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι Andréassian *et al.* (2012) εξέτασαν την πιθανή εγκατάλειψη της κλασικής αναπαράστασης του πλαισίου Budyko, διότι παρουσιάζει αδυναμία στην αναπαράσταση λεκανών απορροής που δέχονται εξωτερικές εισροές (*gaining*). Σε αυτές τις περιπτώσεις, προκύπτει αρνητικός λόγος ET/P που αντιβαίνει στη φυσική ερμηνεία της εξατμοδιαπνοής. Για τον λόγο αυτό, πρότειναν μια εναλλακτική αναπαράσταση, στην οποία θα γίνεται αντικατάσταση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής με την απορροή, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 8.2**.



Εικόνα 8.2: Εναλλακτική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ μακροπρόθεσμης απορροής (Q), δυνητικής εξατμοδιαπνοής (PET) και κατακρήμνισης (P): $Q/P = f(PET/P)$.

Η νέα αναπαράσταση βασίζεται, όπως και η κλασική, στην εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου, γεγονός που την καθιστά ισοδύναμη. Παρουσιάζει τρεις υδρολογικούς περιορισμούς:

$$\text{Υδατικό όριο:} \quad Q \leq P \quad (8.1)$$

$$\text{Ενεργειακό όριο:} \quad Q \geq P - PET \quad (8.2)$$

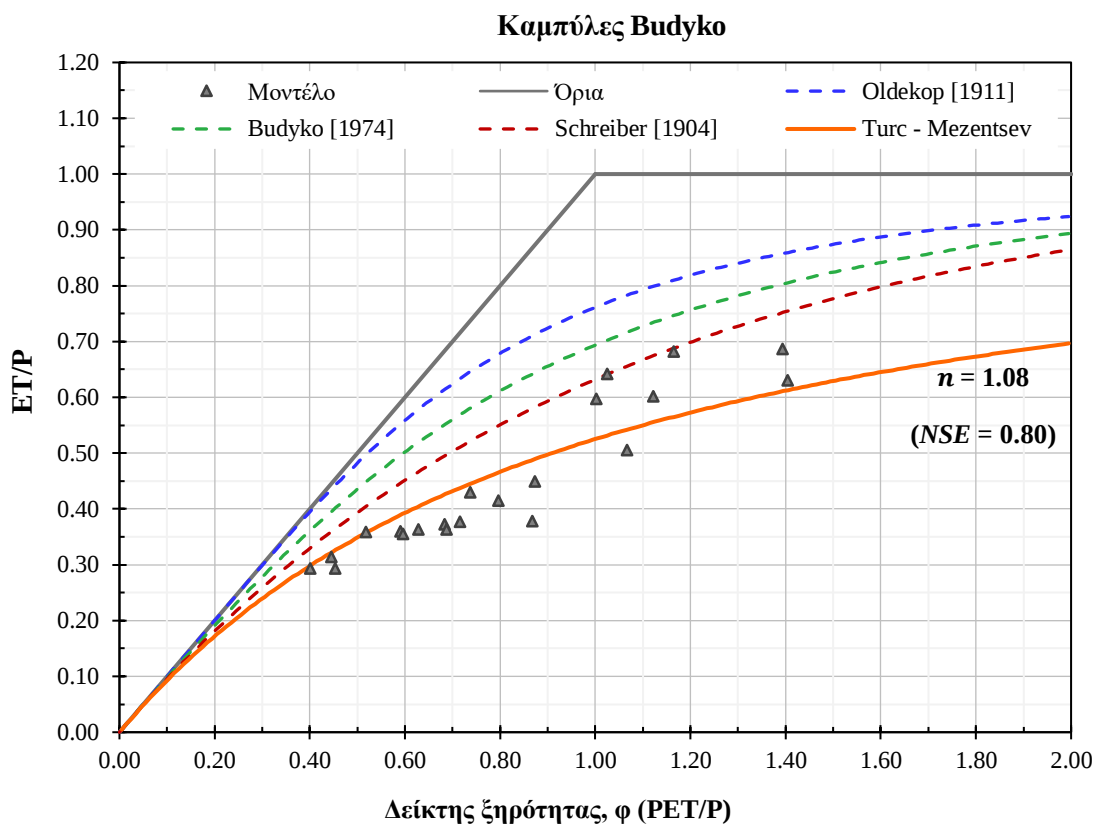
$$\text{Όριο μέτρησης:} \quad Q \geq 0 \quad (8.3)$$

Το ενεργειακό όριο υποδηλώνει ότι η απορροή θα πρέπει να ακολουθεί το υδατικό ισοζύγιο μιας κλειστής λεκάνης απορροής, καθώς προκύπτει από τη σχέση:

$$P = Q + \alpha \cdot PET, \quad \text{όπου } \alpha \leq 1 \quad (8.4)$$

8.2 Ανάλυση βάσει προσομοιωμένων δεδομένων

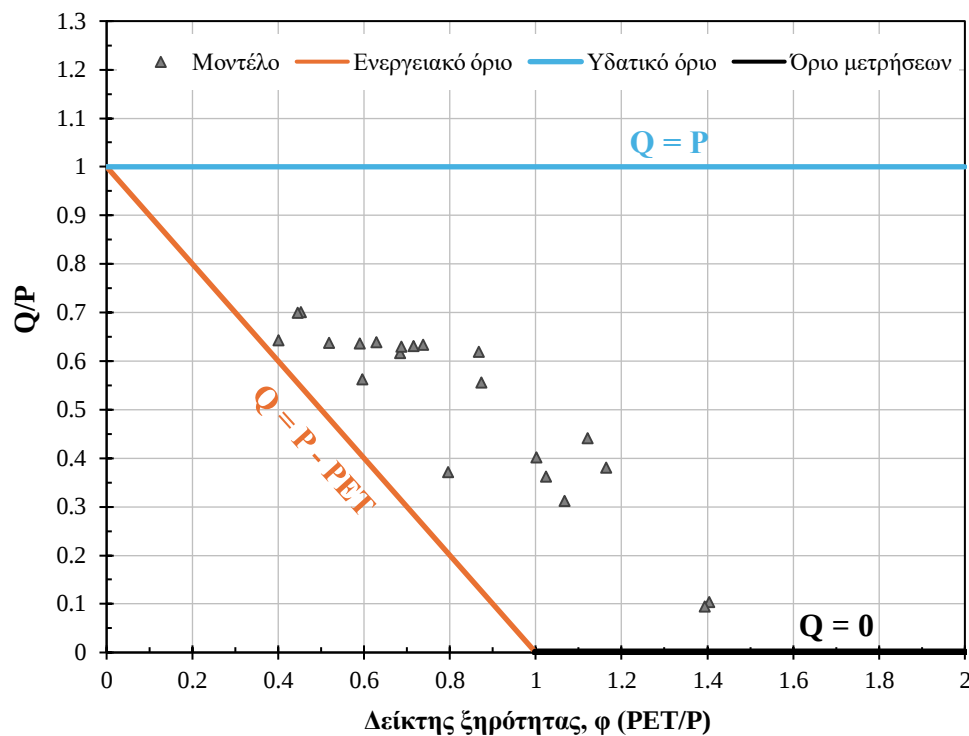
Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στην εφαρμογή του διαγράμματος Budyko στα προσομοιωμένα δεδομένα, τα οποία προέκυψαν από την βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου P05 με χρήση πέντε παραμέτρων, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.



Εικόνα 8.3: Διαφορετικές αναπαραστάσεις των καμπυλών στο πλαίσιο Budyko και προσαρμογή της καμπύλης Turc – Mezentsev στα προσομοιωμένα αποτελέσματα.

Πιο συγκεκριμένα, οι ετήσιες μακροπρόθεσμες ποσότητες της εξατμοδιαπνοής και της απορροής έχουν προκύψει μέσω της υδρολογικής προσομοίωσης των λεκανών απορροής. Για να είναι δυνατή η σύγκριση με τα παρατηρημένα δεδομένα, η προσαρμογή της καμπύλης Turc – Mezentsev πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Από την ανάλυση προέκυψε τιμή της παραμέτρου n ίση με 1.08 και δείκτης $NSE = 0.80$. Στην **Εικόνα 8.3** παρουσιάζεται η κλασική αναπαράσταση του γραφήματος Budyko.

Επιπλέον, στην **Εικόνα 8.4** παρουσιάζεται η εναλλακτική αναπαράσταση του πλαισίου Budyko στην οποία γίνεται αντικατάσταση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής με την απορροή, όπως προτάθηκε από τους Andréassian *et al.* (2012).



Εικόνα 8.4: Εναλλακτική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ μακροπρόθεσμης απορροής (Q), δυνητικής εξατμοδιαπνοής (PET) και κατακρήμνισης (P), με βάση την προσομοιωμένη απορροή: $Q/P = f(PET/P)$.

8.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων παρατηρημένων και προσομοιωμένων δεδομένων

Στην παρούσα ενότητα συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των παρατηρημένων και των προσομοιωμένων δεδομένων. Σημειώνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις, οι χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μέσων ετήσιων απορροών δεν περιλαμβάνουν πιθανές εξωτερικές εισροές στις λεκάνες, καθώς έχουν

αφαιρεθεί από τις παρατηρημένες τιμές της απορροής (βλ. Κεφάλαιο 4). Οι προσομοιωμένες χρονοσειρές προέκυψαν από την προσαρμογή του μοντέλου P05 προκειμένου να αναπαραχθούν όσο το δυνατόν πιο πιστά οι τιμές των παρατηρημένων.

Η παράμετρος n στην καμπύλη Turc – Mezentsev καθορίζει τον βαθμό υδατικού περιορισμού των λεκανών, με μεγαλύτερες τιμές να υποδηλώνουν χαμηλότερο περιορισμό. Στα παρατηρημένα δεδομένα προέκυψε μεγαλύτερη τιμή της n (1.14), ενώ στα προσομοιωμένα δεδομένα $n = 1.08$, καθώς σε αυτά έχουν ληφθεί υπόψη οι υπόγειες διαφυγές (απώλειες) και έχουν αφαιρεθεί από τις τιμές της ET , με αποτέλεσμα η προσομοιωμένη εξατμοδιαπνοή να είναι μικρότερη. Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σύγκριση με τις κλασικές καμπύλες Budyko, γεγονός που αντανακλά κυρίως την επικράτηση ξηρών περιόδων και τη μεγάλη υδροκλιματική μεταβλητότητα στην περιοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

9.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν μηνιαίες χρονοσειρές βροχόπτωσης, δυνητικής εξατμοδιαπνοής και παρατηρημένης απορροής οι οποίες καλύπτουν κυρίως την περίοδο 1980 – 2021, ενώ για τη λεκάνη απορροής ανάντη του φράγματος του Μόρνου τα δεδομένα εκτείνονται έως το 2025. Αρχικά, διερευνήθηκε η διαμόρφωση ενός αδιαμέριστου εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου που να περιγράφει ικανοποιητικά την συμπεριφορά των λεκανών απορροής, αποφεύγοντας την υπερπροσαρμογή, ώστε να εξασφαλίζεται η δυνατότητα επαλήθευσης της δομής του μοντέλου. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση 12 υδρολογικών μοντέλων μέσω της εφαρμογής και της βαθμονόμησής τους σε 35 λεκάνες απορροής. Από τη διαδικασία αυτή αναδείχθηκε ως βέλτιστο το μοντέλο P05, το οποίο παρουσιάζει απόδοση συγκρίσιμη με εκείνη του μοντέλου PMS που αναφέρεται στη βιβλιογραφία και διαθέτει ίσο αριθμό παραμέτρων.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε μια εναλλακτική προσέγγιση περιοχοποίησης των παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων, η οποία βασίζεται στην έννοια της μονάδας υδρολογικής απόκρισης. Στόχος αυτής της μη κλασικής προσέγγισης είναι η προσομοίωση της υδρολογικής συμπεριφοράς μέσω της κοινής απόκρισης των εδαφικών τύπων που απαντώνται στις λεκάνες απορροής, ανεξαρτήτως της περιοχής στην οποία βρίσκονται. Επομένως, δεν είναι αναγκαία η σύγκριση και η ταξινόμηση λεκανών απορροής που παρουσιάζουν συγκριτικά παρόμοια φυσιογραφικά και υδροκλιματικά χαρακτηριστικά. Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης του μοντέλου 20 παραμέτρων στις 14 λεκάνες απορροής, προέκυψε ικανοποιητική επίδοση του κριτηρίου Kling – Gupta Efficiency (KGE), με μέση τιμή ίση με 0.71, η οποία είναι χαμηλότερη από την τιμή 0.78 που επιτεύχθηκε κατά τη βαθμονόμηση ανά λεκάνη με το μοντέλο P05, γεγονός που αντανάκλα τη φυσιολογική μείωση της προσαρμογής κατά τη διαδικασία γενίκευσης του μοντέλου. Όσον αφορά τις θέσεις επαλήθευσης, παρουσιάζουν χαμηλότερη επίδοση στο κριτήριο KGE με μέση τιμή ίση με 0.34, σε σύγκριση με την τιμή 0.67 που καταγράφηκε κατά τη βαθμονόμηση με το μοντέλο P05.

Η ταυτόχρονη βαθμονόμηση του μοντέλου στις λεκάνες, με βάση τις MYA, οδηγεί σε πιο ρεαλιστικές και φυσικά συνεπείς τιμές των παραμέτρων, καθώς οι παράμετροι συνδέονται μέσω της κοινής υδρολογικής συμπεριφοράς των MYA, η οποία αντιπροσωπεύει τις

κυρίαρχες διεργασίες σε κάθε εδαφικό τύπο ανεξαρτήτως της λεκάνης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, περιορίζεται η υπερπροσαρμογή που συχνά παρατηρείται κατά τη βαθμονόμηση ανά λεκάνη, και ενισχύεται η σταθερότητα και η φυσική ερμηνεία των εκτιμώμενων παραμέτρων. Για τον λόγο αυτό, παρατηρείται ότι αναπαράγονται σε σημαντικό βαθμό οι διακυμάνσεις της μηνιαίας απορροής.

Στο πλαίσιο Budyko πραγματοποιήθηκαν δύο αναλύσεις για τον υπολογισμό των μακροπρόθεσμων ποσοτήτων πραγματικής εξατμοδιαπνοής, χρησιμοποιώντας είτε τα παρατηρημένα δεδομένα είτε τα προσομοιωμένα, προκειμένου να αξιολογηθεί η υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής. Παρουσιάστηκαν διαφορετικές εκδοχές της καμπύλης Budyko συναρτήσει του δείκτη ξηρότητας, ϕ , επιτρέποντας τη διερεύνηση της σχέσης των τριών υδροκλιματικών μεταβλητών. Όσον αφορά την καμπύλη Turc – Mezentsev, σημειώθηκε ότι τα παρατηρημένα δεδομένα εμφανίζουν μεγαλύτερες ποσότητες μέσης ετήσιας πραγματικής εξατμοδιαπνοής σε σύγκριση με τα προσομοιωμένα, στα οποία έχουν ληφθεί υπόψη οι υπόγειες απώλειες και έχουν αφαιρεθεί από τις τιμές της πραγματικής εξατμοδιαπνοής.

9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία ανέδειξε τον τρόπο με τον οποίο η εκτίμηση των παραμέτρων με βάση τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ) μπορεί να επηρεάσει την απόδοση ενός υδρολογικού μοντέλου, ωστόσο προσφέρει και δυνατότητες για περαιτέρω ερευνητική διερεύνηση. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή στοχαστικών μεθόδων βαθμονόμησης θα μπορούσε να ενισχύσει την εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων, δεδομένου ότι τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα είναι συχνά περιορισμένου μήκους, με αποτέλεσμα να μην είναι πάντα πλήρως αντιπροσωπευτικά των λεκανών. Με τη χρήση συνθετικών χρονοσειρών διασφαλίζεται η διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων και επιτρέπεται η αναπαράσταση ακραίων γεγονότων που εμφανίζονται σπάνια σε ιστορικά δείγματα (Efstratiadis *et al.*, 2024). Με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται δυνατή η βαθμονόμηση σε όλες τις λεκάνες απορροής της μελέτης αξιοποιώντας τις συνθετικές χρονοσειρές, ενώ η διαδικασία επαλήθευσης μπορεί να πραγματοποιείται κατά την περίοδο των ιστορικών δεδομένων. Παράλληλα, θα ήταν ενδιαφέρουσα η δοκιμή περιοχοποίησης των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου με πιο απλή δομή και η σύγκριση με το επιλεγμένο P05.

Ένα ακόμη ενδιαφέρον πεδίο για μελλοντική έρευνα αφορά την εφαρμογή της αρχής των υδρολογικά ομοειδών λεκανών απορροής (Chen *et al.*, 2023) στο πλαίσιο του Budyko, με στόχο την εκτίμηση της παραμέτρου P_w . Βάσει των αποτελεσμάτων της μελέτης αυτής, η παράμετρος P_w σχετίζεται με την υγρασία του εδάφους και την φυτοκάλυψη, ενώ η σχέση μεταξύ τους διαφοροποιείται ανάλογα με την υδρολογική ομάδα. Σε αυτό το πλαίσιο, μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να εξετάσουν κατά πόσο οι ελληνικές λεκάνες απορροής επαληθεύουν τα ευρήματα της μελέτης των Chen *et al.* (2023), προκειμένου να

δημιουργηθεί μια ταξινόμηση των λεκανών, η οποία θα μπορούσε να βασιστεί στις μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Η ενσωμάτωση αυτής της προσέγγισης αναμένεται να οδηγήσει σε πιο αξιόπιστη εκτίμηση της παραμέτρου P_w και να ενισχύσει τη φυσική τεκμηρίωση.

Μια ενδεχόμενη επέκταση της παρούσας μελέτης θα ήταν η διερεύνηση της μηνιαίας εποχιακής διασποράς των υδρολογικών μεταβλητών στο πλαίσιο Budyko, προκειμένου να αποτυπωθεί καλύτερα η επίδραση του ξηρού κλίματος της Ελλάδας και της άνισης κατανομής της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια του έτους. Η ανάλυση αυτή θα βοηθούσε στην εξήγηση του γεγονότος ότι οι λεκάνες εμφανίζουν γενικά χαμηλές τιμές πραγματικής εξατμοδιαπνοής, όπως παρατηρήθηκε στις δύο αναλύσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andréassian, V., & Perrin, C. (2012). On the ambiguous interpretation of the Turc-Budyko nondimensional graph. *Water Resources Research*, 48(10), 2012WR012532. <https://doi.org/10.1029/2012WR012532>
- Andréassian, V., & Sari, T. (2019). Technical Note: On the puzzling similarity of two water balance formulas – Turc–Mezentsev vs. Tixeront–Fu. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(5), 2339–2350. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2339-2019>
- Andréassian, V., Mander, Ü., & Pae, T. (2016). The Budyko hypothesis before Budyko: The hydrological legacy of Evald Oldekop. *Journal of Hydrology*, 535, 386–391. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.002>
- Andréassian, V., Perrin, C., Berthet, L., Le Moine, N., Lerat, J., Loumagne, C., Oudin, L., Mathevet, T., Ramos, M.-H., & Valéry, A. (2009). HESS Opinions “Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models.” *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(10), 1757–1764. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1757-2009>
- Ardia, D., Boudt, K., Carl, P., Mullen, K., M., & Peterson, B., G. (2011). Differential Evolution with DEoptim. *The R Journal*, 3(1), 27. <https://doi.org/10.32614/RJ-2011-005>
- Budyko, M. I. (1974). Climate and life (p. 508). *Academic Press*.
- Chen, Y., Chen, X., Xue, M., Yang, C., Zheng, W., Cao, J., Yan, W., & Yuan, W. (2023). Revisiting the hydrological basis of the Budyko framework with the principle of hydrologically similar groups. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(9), 1929–1943. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1929-2023>
- Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Dorchie, D., Perrin, C., & Michel, C. (2017). *airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling* (p. 1.7.6) [Dataset]. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.airGR>
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., & Andréassian, V. (2017). The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling & Software*, 94, 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>
- Donohue, R. J., Roderick, M. L., & McVicar, T. R. (2007). On the importance of including vegetation dynamics in Budyko’s hydrological model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*

- Efstratiadis, A., & Koutsoyiannis, D. (2010). One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: A review. *Hydrological Sciences Journal*, 55(1), 58–78. <https://doi.org/10.1080/02626660903526292>
- Efstratiadis, A., Nalbantis, I., & Koutsoyiannis, D. (2015). Hydrological modelling of temporally-varying catchments: Facets of change and the value of information. *Hydrological Sciences Journal*, 60(7–8), 1438–1461. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.982123>
- Efstratiadis, A., Tsoukalas, I., & Kossieris, P. (2024). Improving Model Identifiability by Driving Calibration With Stochastic Inputs. In G. A. Corzo Perez & D. P. Solomatine (Eds.), *Special Publications* (1st ed., pp. 39–61). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119639268.ch2>
- Feigl, M., Thober, S., Schweppe, R., Herrnegger, M., Samaniego, L., & Schulz, K. (2022). Automatic Regionalization of Model Parameters for Hydrological Models. *Water Resources Research*, 58(12), e2022WR031966. <https://doi.org/10.1029/2022WR031966>
- Gerrits, A. M. J., Savenije, H. H. G., Veling, E. J. M., & Pfister, L. (2009). Analytical derivation of the Budyko curve based on rainfall characteristics and a simple evaporation model. *Water Resources Research*, 45(4), 2008WR007308. <https://doi.org/10.1029/2008WR007308>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13–24. <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>
- Kourakos, V. (2022). Refining the working hypotheses of parameter identification in hydrological modelling: the concept of stochastic calibration.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1–4), 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.014>
- Mullen, K., Ardia, D., Gil, D., Windover, D., & Cline, J. (2011). DEoptim: An R Package for Global Optimization by Differential Evolution. *Journal of Statistical Software*, 40(6). <https://doi.org/10.18637/jss.v040.i06>

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., & Le Moine, N. (2008). Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44(3), 2007WR006240. <https://doi.org/10.1029/2007WR006240>

Pagliero, L., Bouraoui, F., Diels, J., Willems, P., & McIntyre, N. (2019). Investigating regionalization techniques for large-scale hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 570, 220–235. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.071>

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 242(3–4), 275–301. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00393-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00393-0)

Pool, S., Vis, M., & Seibert, J. (2021). Regionalization for Ungauged Catchments—Lessons Learned From a Comparative Large-Sample Study. *Water Resources Research*, 57(10), e2021WR030437. <https://doi.org/10.1029/2021WR030437>

Savvidou, E., Efstratiadis, A., Koussis, A. D., Koukouvinos, A., & Skarlatos, D. (2016). *A curve number approach to formulate hydrological response units within distributed hydrological modelling*. Catchment hydrology/Modelling approaches. <https://doi.org/10.5194/hess-2016-627>

Wagener, T., Boyle, D. P., Lees, M. J., Wheater, H. S., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2001). A framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 13–26. <https://doi.org/10.5194/hess-5-13-2001>

Zhou, G., Wei, X., Chen, X., Zhou, P., Liu, X., Xiao, Y., Sun, G., Scott, D. F., Zhou, S., Han, L., & Su, Y. (2015). Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 6(1), 5918. <https://doi.org/10.1038/ncomms6918>

Ευστρατιάδης, Α. (2008). Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων [Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος]. <https://doi.org/10.12681/eadd/16954>

Ευστρατιάδης, Α. (2022). Σημειώσεις μαθήματος «Υδροπληροφορική» (86 σελ.) Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ευστρατιάδης, Α., Κουτσογιάννης, Δ., Μαμάσης, Ν., Δημητριάδης, Π., & Μαχαίρας, Α. (2012). Βιβλιογραφική επισκόπηση υδρολογίας πλημμυρών και συναφών εργαλείων. ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων. Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο & Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.

Κοζάνης, Σ., Χριστοφίδης Α., & Ευστρατιάδης Α. (2010). Θεωρητική τεκμηρίωση για το λογισμικό Υδρογνώμων (έκδοση 4): Ανάπτυξη βάσης δεδομένων και εφαρμογών λογισμικού σε διαδικτυακό περιβάλλον για την «Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας» (173 σελ.). Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Κουτσογιάννης, Δ. (2000). Σημειώσεις Υδρομετεωρολογίας – Μέρος 1 (2η έκδ., 157 σελ.). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Κουτσογιάννης, Δ., & Ξανθόπουλος, Θ. (1999). Τεχνική Υδρολογία [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοιχτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-715>

Κουτσογιάννης, Δ. (2020). Ιστορική και Φιλοσοφική Εισαγωγή στην Επιστημονική Μέθοδο [Σημειώσεις για το Εργαστήριο Ανθρωπιστικών Σπουδών]. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.19594.00963/1>

Μιμίκου, Μ. Α. (1994). Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Μιμίκου, Μ. Α., & Μπαλτάς, Ε. (2018). Τεχνική υδρολογία (6η έκδ.). Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Γενική Διεύθυνση Υδάτων. (2022). 2^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Πελοποννήσου (EL01), Υδατικά ισοζύγια.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Γενική Διεύθυνση Υδάτων. (2022). 2^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Βόρειας Πελοποννήσου (EL02), Υδατικά ισοζύγια.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Γενική Διεύθυνση Υδάτων. (2023). 2^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος

Θράκης (EL12), Π3.2 Ρύθμιση μοντέλων, φυσικά υδατικά ισοζύγια, Τεύχος Α – Επιφανειακά Υδατικά Συστήματα.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Γενική Διεύθυνση Υδάτων. (2023). 2^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (EL08), Π3.2 Ρύθμιση μοντέλων, φυσικά υδατικά ισοζύγια, Τεύχος Α – Επιφανειακά Υδατικά Συστήματα.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Γενική Διεύθυνση Υδάτων. (2023). 2^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (EL04), Π3.2 Ρύθμιση μοντέλων, φυσικά υδατικά ισοζύγια, Τεύχος Α – Επιφανειακά Υδατικά Συστήματα.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Γενική Διεύθυνση Υδάτων. (2023). 2^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (EL08), Π3.2 Ρύθμιση μοντέλων, φυσικά υδατικά ισοζύγια, Τεύχος Α – Επιφανειακά Υδατικά Συστήματα.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Γενική Διεύθυνση Υδάτων. (2023). 2^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Ηπείρου (EL05), Π3.2 Ρύθμιση μοντέλων, φυσικά υδατικά ισοζύγια, Τεύχος Α – Επιφανειακά Υδατικά Συστήματα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α:

Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικών μοντέλων

Πίνακας Π.1: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου Oldekor κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.32	0.64	-8.13	0.42
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	-2.50	-0.34	-26.33	-0.80
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	-0.35	0.39	-14.76	-0.01
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	-1.14	-0.32	-2.81	-0.17
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	-1.87	-0.08	-8.36	-0.53
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	-3.73	-0.83	-0.41	-0.55
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.11	0.52	-7.63	0.13
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	-0.44	0.32	-2.79	-0.13
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.01	0.54	-2.86	0.10
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.25	0.61	-8.44	0.20
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.10	0.59	-2.75	0.20
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	-0.12	0.40	-8.36	0.01
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	-0.15	0.47	-3.31	-0.01
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	-4.66	-0.91	-10.61	-1.05
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.51	0.74	-5.04	0.28
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.40	0.70	-2.49	0.27
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	-0.03	0.53	-3.41	0.13
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	-0.52	0.09	-7.82	-0.17
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.35	0.60	-0.09	0.33
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	-4.94	-0.71	-13.16	-1.34
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	-0.71	0.22	-4.09	-0.10
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.38	0.59	-5.10	0.22
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	-0.17	0.49	-1.03	0.07
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	-30.63	-4.53	-2.74	-2.88
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	-0.38	0.31	-2.73	0.08
Πύλη	02/1986 - 10/2020	-0.01	0.54	-4.30	0.14
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	-2.75	-0.61	-3.45	-0.61
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	-31.87	-4.56	-4.84	-4.02
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	-1.00	0.16	-9.70	-0.10
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	-0.28	0.42	-7.77	-0.09
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	-1.02	0.18	-8.94	-0.35
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	-0.58	0.04	-6.26	-0.01
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	-3.67	-0.38	-36.71	-1.02
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	-0.20	0.42	-6.19	0.02
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.19	0.54	-4.78	0.22

Πίνακας Π.2: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου GR2M κατά τη βαθμονόμηση των
λεκανών απορροής.

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.69	0.77	0.24	0.66
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	0.68	0.83	0.66	0.50
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.55	0.74	0.64	0.50
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.91	0.94	0.73	0.76
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.84	0.85	0.72	0.65
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.72	0.80	0.30	0.54
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.65	0.78	0.54	0.65
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.65	0.71	0.68	0.47
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.66	0.73	0.71	0.49
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.77	0.87	0.84	0.62
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.62	0.70	0.58	0.51
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.77	0.85	0.82	0.62
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.65	0.71	0.68	0.47
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.70	0.80	0.66	0.54
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.83	0.89	0.77	0.65
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.87	0.89	0.68	0.70
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.63	0.70	0.69	0.48
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.92	0.95	0.89	0.74
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.58	0.68	0.53	0.42
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	0.64	0.71	0.54	0.42
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.83	0.86	0.85	0.68
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.87	0.93	0.82	0.67
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	0.49	0.55	0.55	0.39
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	0.32	0.50	-0.93	0.35
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.69	0.67	0.39	0.51
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.62	0.73	0.71	0.51
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.85	0.86	0.57	0.62
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	0.35	0.46	0.49	0.33
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.67	0.80	0.35	0.55
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.52	0.68	0.50	0.37
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.32	0.43	0.32	0.23
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.71	0.79	0.65	0.55
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	0.28	0.34	0.40	0.25
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.66	0.79	0.59	0.44
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.56	0.75	0.55	0.42

Πίνακας Π.3: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου PMS κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.72	0.81	0.79	0.72
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	0.74	0.84	0.75	0.57
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.74	0.84	0.87	0.67
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.91	0.91	0.83	0.75
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.86	0.84	0.77	0.67
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.75	0.81	0.25	0.61
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.66	0.78	0.93	0.70
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.69	0.72	0.68	0.49
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.67	0.73	0.72	0.49
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.81	0.87	0.82	0.63
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.65	0.71	0.59	0.53
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.81	0.85	0.85	0.62
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.69	0.72	0.68	0.49
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.76	0.82	0.68	0.57
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.87	0.91	0.91	0.69
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.87	0.88	0.64	0.69
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.64	0.72	0.71	0.49
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.95	0.97	0.96	0.82
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.59	0.69	0.55	0.43
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	0.81	0.81	0.71	0.61
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.83	0.85	0.80	0.67
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.90	0.92	0.88	0.71
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	0.49	0.57	0.57	0.40
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	0.63	0.71	0.39	0.43
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.73	0.71	0.43	0.54
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.70	0.73	0.65	0.52
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.85	0.85	0.56	0.61
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	0.43	0.49	0.41	0.35
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.71	0.78	0.66	0.54
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.51	0.63	0.54	0.36
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.37	0.46	0.29	0.25
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.56	0.72	0.75	0.50
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	0.28	0.38	0.39	0.23
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.75	0.80	0.39	0.48
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.64	0.71	0.45	0.45

Πίνακας Π.4: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P01 κατά τη βαθμονόμηση των
λεκανών απορροής.

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.50	0.50	0.00	0.52
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	-1.39	-0.06	-8.95	-0.60
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	-0.03	0.40	0.25	0.06
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.52	0.58	-0.43	0.40
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.07	0.38	-4.59	0.05
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.05	0.39	0.24	0.25
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.28	0.55	-0.12	0.24
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	-0.19	0.40	-1.18	0.00
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.16	0.56	-2.74	0.17
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.43	0.56	-2.23	0.28
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.22	0.60	-0.80	0.29
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.08	0.43	-3.03	0.08
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.02	0.51	-5.44	0.09
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	-1.36	-0.15	-2.16	-0.41
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.66	0.70	-1.30	0.40
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.59	0.68	-0.10	0.40
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	-0.03	0.48	-1.58	0.16
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.04	0.24	-3.30	-0.01
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.33	0.54	-2.14	0.34
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	-2.97	-0.41	-1.96	-0.96
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.38	0.57	-2.04	0.32
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.51	0.56	-2.19	0.28
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	-0.11	0.48	-1.43	0.13
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	-4.09	-0.62	-17.97	-0.25
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	-0.06	0.21	-2.23	0.19
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.14	0.52	-2.29	0.22
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.32	0.29	-4.58	0.28
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	-1.85	-0.16	-4.99	-0.33
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.24	0.40	-0.53	0.25
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	-0.37	0.17	-1.81	-0.17
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	-0.72	0.04	-3.26	-0.35
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.11	0.42	0.02	0.15
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	-1.78	-0.01	-6.05	-0.68
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.12	0.24	-0.82	0.10
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.12	0.45	-0.80	0.20

Πίνακας Π.5: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P02 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.56	0.51	-2.57	0.51
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	0.61	0.76	-0.48	0.37
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.63	0.67	-0.78	0.47
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.78	0.73	0.62	0.55
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.79	0.79	0.72	0.61
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.69	0.83	0.22	0.53
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.63	0.76	0.01	0.59
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.67	0.71	0.71	0.49
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.66	0.74	0.80	0.52
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.75	0.75	-0.36	0.56
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.64	0.68	0.69	0.53
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.78	0.85	0.57	0.58
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.68	0.73	0.83	0.53
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.53	0.68	0.49	0.36
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.85	0.84	0.17	0.61
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.84	0.82	0.60	0.66
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.55	0.60	0.67	0.47
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.92	0.90	0.81	0.75
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.50	0.53	0.66	0.44
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	0.43	0.65	0.43	0.28
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.78	0.84	0.83	0.61
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.84	0.82	0.08	0.59
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	0.48	0.55	0.75	0.44
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	-1.24	-0.37	-0.39	-0.36
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.56	0.47	0.80	0.50
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.69	0.69	0.84	0.56
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.77	0.72	0.40	0.50
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	0.11	0.26	-0.18	-0.07
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.73	0.75	0.62	0.56
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.25	0.37	-0.53	0.24
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.21	0.30	-0.24	0.24
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.51	0.64	-0.52	0.48
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	0.17	0.36	-0.11	0.21
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.54	0.62	-1.57	0.38
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.42	0.49	0.04	0.38

Πίνακας Π.6: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P03 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.58	0.58	0.62	0.60
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	0.65	0.79	0.28	0.43
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.63	0.67	0.30	0.48
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.81	0.77	0.55	0.57
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.79	0.79	0.72	0.61
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.69	0.82	0.21	0.53
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.63	0.77	0.55	0.60
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.67	0.71	0.71	0.49
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.66	0.72	0.80	0.52
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.77	0.79	0.63	0.59
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.64	0.67	0.67	0.53
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.79	0.86	0.80	0.61
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.68	0.73	0.83	0.53
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.54	0.70	0.53	0.40
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.85	0.88	0.74	0.64
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.84	0.82	0.75	0.67
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.55	0.60	0.68	0.47
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.93	0.93	0.90	0.76
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.52	0.54	0.65	0.44
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	0.43	0.65	0.43	0.28
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.78	0.84	0.83	0.61
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.87	0.86	0.76	0.65
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	0.49	0.55	0.73	0.44
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	0.48	0.61	0.20	0.32
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.58	0.48	0.73	0.49
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.70	0.69	0.83	0.57
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.77	0.71	0.38	0.50
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	0.18	0.27	0.17	0.19
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.74	0.75	0.75	0.57
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.39	0.48	0.38	0.29
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.27	0.35	0.34	0.29
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.53	0.67	0.72	0.52
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	0.20	0.36	0.11	0.24
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.63	0.67	0.50	0.41
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.50	0.56	0.40	0.39

Πίνακας Π.7: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P04 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.59	0.56	0.83	0.60
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	0.72	0.84	0.69	0.52
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.70	0.72	0.76	0.59
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.81	0.76	0.51	0.57
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.82	0.83	0.73	0.64
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.68	0.75	0.11	0.50
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.66	0.77	0.89	0.68
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.72	0.74	0.63	0.49
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.68	0.74	0.76	0.50
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.79	0.81	0.77	0.61
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.65	0.69	0.65	0.54
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.82	0.87	0.87	0.64
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.73	0.75	0.77	0.54
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.60	0.74	0.42	0.38
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.87	0.86	0.88	0.68
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.86	0.84	0.74	0.68
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.61	0.62	0.82	0.54
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.94	0.89	0.91	0.74
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.54	0.56	0.62	0.44
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	0.58	0.65	0.43	0.27
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.80	0.85	0.83	0.62
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.89	0.88	0.86	0.69
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	0.50	0.55	0.68	0.42
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	0.48	0.61	0.20	0.32
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.65	0.54	0.69	0.52
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.72	0.72	0.86	0.59
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.77	0.71	0.37	0.50
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	0.18	0.27	0.17	0.19
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.76	0.76	0.72	0.57
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.42	0.51	0.40	0.32
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.35	0.40	0.35	0.31
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.57	0.70	0.67	0.53
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	0.29	0.34	0.42	0.27
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.63	0.67	0.50	0.41
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.51	0.55	0.49	0.40

Πίνακας Π.8: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου R06 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.59	0.56	0.83	0.60
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	0.72	0.84	0.69	0.52
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.70	0.72	0.76	0.59
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.89	0.89	0.75	0.71
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.82	0.83	0.73	0.64
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.73	0.83	0.37	0.59
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.66	0.77	0.87	0.68
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.74	0.76	0.76	0.54
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.68	0.74	0.78	0.51
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.79	0.81	0.77	0.61
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.65	0.69	0.68	0.54
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.82	0.87	0.87	0.65
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.73	0.75	0.77	0.55
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.75	0.82	0.66	0.55
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.87	0.86	0.88	0.68
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.86	0.84	0.74	0.68
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.61	0.62	0.82	0.54
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.96	0.97	0.95	0.84
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.54	0.56	0.62	0.44
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	0.76	0.76	0.68	0.55
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.82	0.85	0.85	0.63
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.89	0.88	0.86	0.69
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	0.50	0.56	0.71	0.44
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	0.65	0.72	0.34	0.48
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.65	0.54	0.69	0.52
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.72	0.72	0.86	0.59
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.81	0.79	0.49	0.57
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	0.48	0.55	0.51	0.38
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.76	0.76	0.72	0.57
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.42	0.51	0.40	0.32
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.35	0.40	0.35	0.31
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.57	0.70	0.67	0.53
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	0.29	0.34	0.42	0.27
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.63	0.67	0.50	0.41
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.51	0.55	0.49	0.40

Πίνακας Π.9: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P07 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.

Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.59	0.56	0.83	0.60
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	0.72	0.84	0.69	0.52
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.70	0.72	0.76	0.59
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.89	0.89	0.75	0.71
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.82	0.83	0.73	0.64
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.73	0.83	0.37	0.59
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.66	0.77	0.87	0.68
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.74	0.76	0.76	0.54
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.68	0.74	0.78	0.51
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.79	0.81	0.77	0.61
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.65	0.69	0.68	0.54
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.82	0.87	0.87	0.65
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.73	0.75	0.77	0.55
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.75	0.82	0.66	0.55
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.87	0.85	0.88	0.69
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.86	0.84	0.74	0.68
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.61	0.62	0.82	0.54
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.96	0.97	0.95	0.84
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.54	0.56	0.62	0.44
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	0.76	0.76	0.68	0.55
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.82	0.85	0.85	0.63
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.89	0.88	0.86	0.69
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	0.50	0.56	0.71	0.44
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	0.65	0.72	0.34	0.48
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.65	0.54	0.69	0.52
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.72	0.72	0.86	0.59
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.81	0.79	0.49	0.57
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	0.48	0.55	0.51	0.38
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.76	0.76	0.72	0.57
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.42	0.51	0.40	0.32
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.35	0.40	0.35	0.31
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.57	0.70	0.67	0.54
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	0.29	0.34	0.42	0.27
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.63	0.66	0.59	0.42
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.51	0.55	0.49	0.40

Πίνακας Π.10: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P08 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.

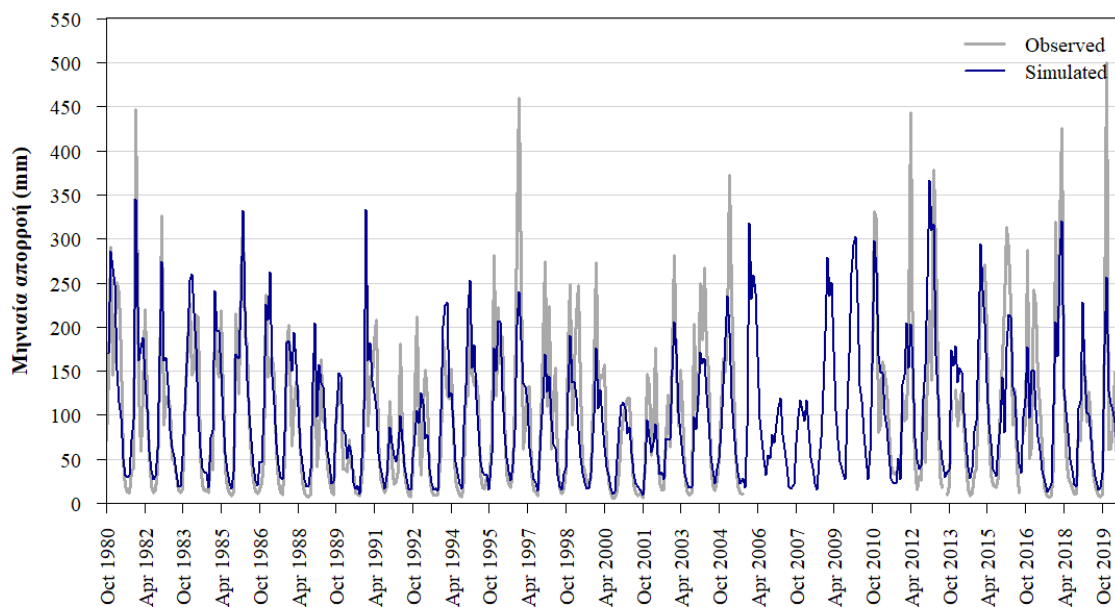
Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.59	0.56	0.84	0.61
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	0.72	0.84	0.69	0.52
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.70	0.72	0.76	0.59
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.89	0.89	0.75	0.71
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.82	0.83	0.73	0.64
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.73	0.83	0.37	0.59
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.66	0.77	0.87	0.68
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.74	0.76	0.76	0.54
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.68	0.74	0.78	0.51
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.79	0.81	0.77	0.61
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.65	0.68	0.65	0.54
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.82	0.87	0.87	0.65
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.73	0.75	0.77	0.55
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.75	0.82	0.66	0.55
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.87	0.85	0.88	0.69
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.86	0.84	0.74	0.68
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.61	0.62	0.82	0.54
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.96	0.97	0.95	0.84
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.54	0.56	0.62	0.44
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	0.76	0.76	0.68	0.55
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.82	0.85	0.85	0.63
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.89	0.88	0.86	0.69
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	0.51	0.56	0.73	0.45
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	0.65	0.72	0.34	0.48
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.65	0.54	0.69	0.52
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.72	0.72	0.86	0.59
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.81	0.79	0.49	0.57
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	0.48	0.55	0.51	0.38
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.76	0.76	0.72	0.57
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.42	0.51	0.40	0.32
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.35	0.40	0.35	0.31
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.57	0.70	0.67	0.54
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	0.29	0.34	0.42	0.27
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.63	0.66	0.59	0.42
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.51	0.55	0.49	0.40

Πίνακας Π.11: Βελτιστοποιημένα μέτρα επίδοσης υδρολογικού μοντέλου P09 κατά τη βαθμονόμηση των λεκανών απορροής.

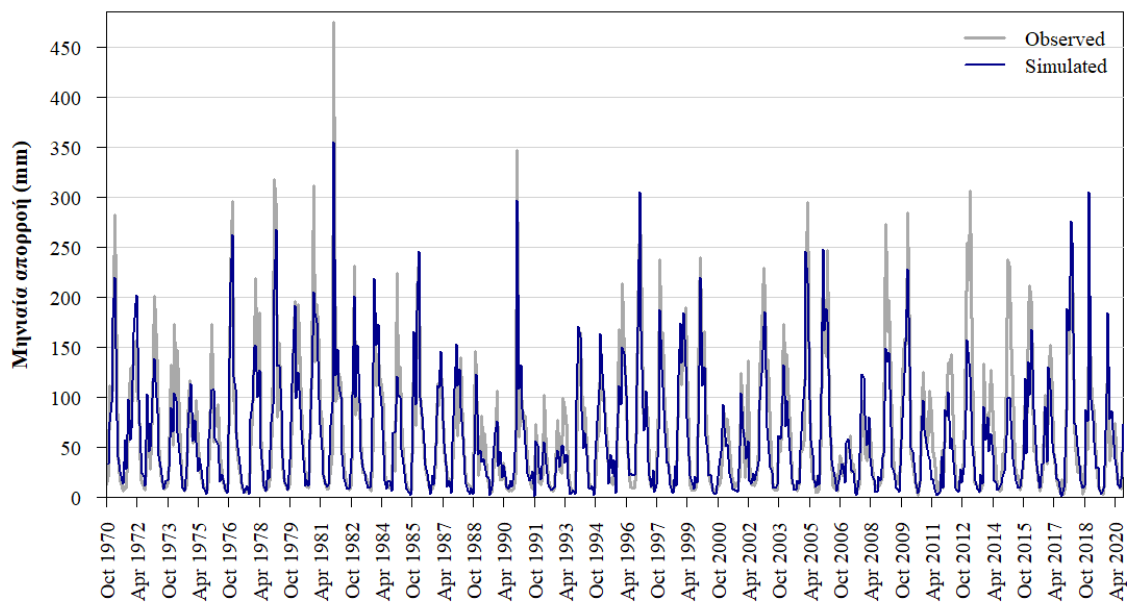
Θέση βαθμονόμησης	Περίοδος βαθμονόμησης	NSE	KGE	logNSE	CR _{abs}
Αλαγονία	04/2012 - 01/2014	0.59	0.56	0.86	0.61
Γέφ. Κόκκορη	01/1995 - 11/2019	0.73	0.82	0.73	0.55
Καρβελιώτης	01/2012 - 11/2013	0.70	0.72	0.76	0.59
Καρύταινα	11/1980 - 08/2016	0.89	0.89	0.75	0.71
Φρ. Λάδωνα	02/2002 - 12/2021	0.82	0.83	0.73	0.64
Νέδοντας	02/2012 - 01/2014	0.73	0.83	0.37	0.59
Τριπόταμα	03/2006 - 02/2010	0.66	0.77	0.87	0.68
Γλαύκος	02/1980 - 08/1989	0.74	0.76	0.76	0.54
Αυλάκι	10/1980 - 08/2020	0.68	0.74	0.78	0.51
Φρ. Ευήνου	10/1970 - 09/2020	0.80	0.80	0.78	0.61
Φρ. Πλαστήρα	02/1980 - 01/2021	0.65	0.68	0.65	0.54
Φρ. Κρεμαστών	02/1980 - 11/2008	0.82	0.85	0.84	0.63
Μεσοχώρα	02/1980 - 08/1989	0.73	0.75	0.77	0.55
Φρ. Μόρνου	01/1980 - 05/2025	0.75	0.82	0.66	0.55
Πόρος Ρηγανίου (πριν)	02/1980 - 08/1990	0.87	0.85	0.88	0.69
Πόρος Ρηγανίου (μετά)	10/2000 - 08/2010	0.86	0.84	0.74	0.68
Γεφ. Κόνιτσας	10/1980 - 09/1987	0.61	0.62	0.82	0.54
Κλειδωνιά	10/1980 - 09/1996	0.96	0.97	0.95	0.84
Φρ. Πηγών Αώου	12/1990 - 11/2020	0.56	0.56	0.47	0.38
Φρ. Λούρου	10/1980 - 09/2017	0.76	0.76	0.68	0.55
Κιοτέκι	10/1980 - 08/1989	0.82	0.85	0.85	0.63
Φρ. Πουρναρίου	08/1981 - 11/2000	0.89	0.88	0.86	0.69
Βοβούσα	11/1980 - 08/2006	0.51	0.56	0.73	0.45
Αμπελιά	02/2002 - 10/2014	0.65	0.72	0.34	0.48
Μουζάκι	10/1988 - 08/1995	0.65	0.54	0.69	0.52
Πύλη	02/1986 - 10/2020	0.72	0.72	0.86	0.59
Σμόκοβο	07/2002 - 08/2007	0.81	0.83	0.62	0.59
Σκοπιά	12/1980 - 11/2017	0.48	0.55	0.51	0.38
Άνω Δροσίνη	05/1996 - 08/2001	0.76	0.76	0.72	0.57
Αρκουδόρεμα	11/1990 - 06/2011	0.42	0.51	0.40	0.32
Δεσπάτης	11/1990 - 10/2020	0.35	0.40	0.35	0.31
Φονιάς	11/1987 - 12/1993	0.57	0.70	0.67	0.53
Μπούσδα	10/1993 - 09/2021	0.29	0.34	0.42	0.26
Τρίκορφο	08/1996 - 11/2001	0.63	0.61	0.51	0.40
Ξηροπόταμος	04/1986 - 06/1993	0.51	0.55	0.49	0.40

Παράρτημα Β:

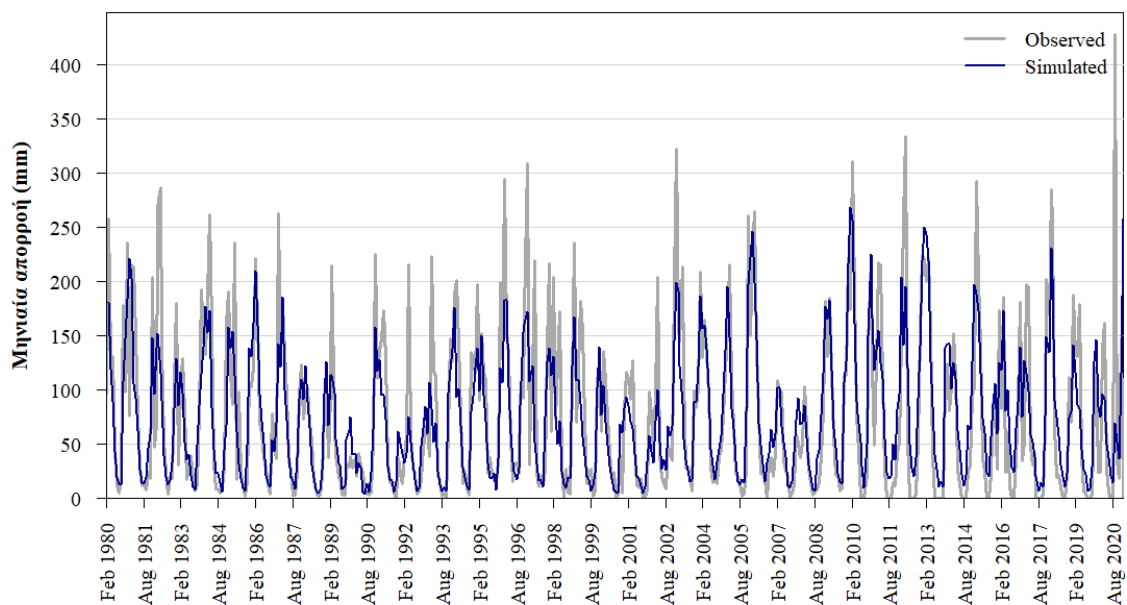
Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων απορροών - P05



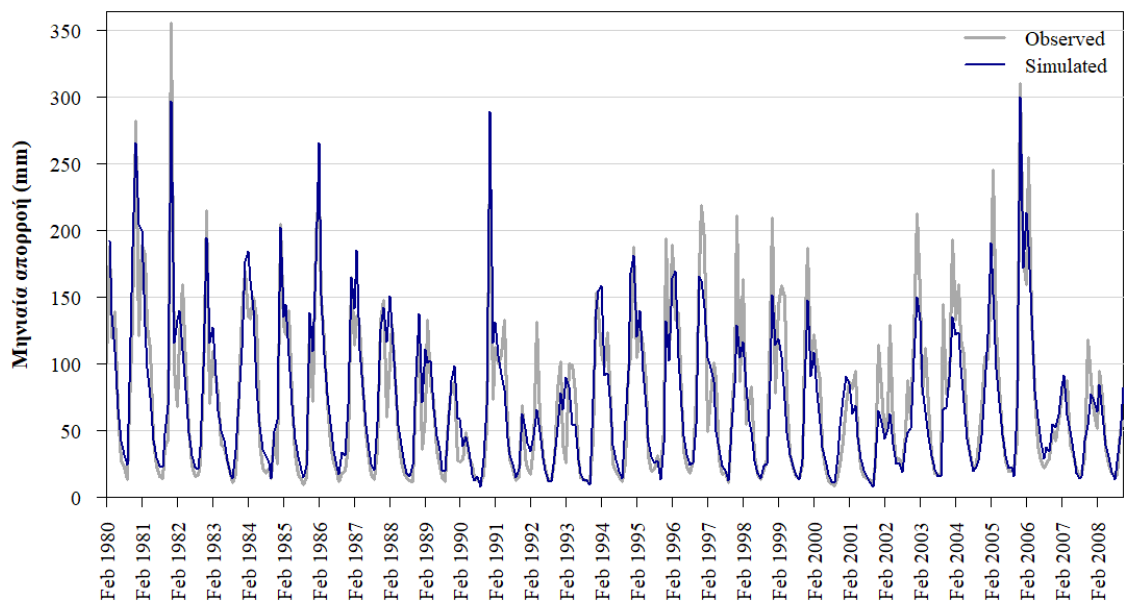
Εικόνα Π.1: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αυλακίου.



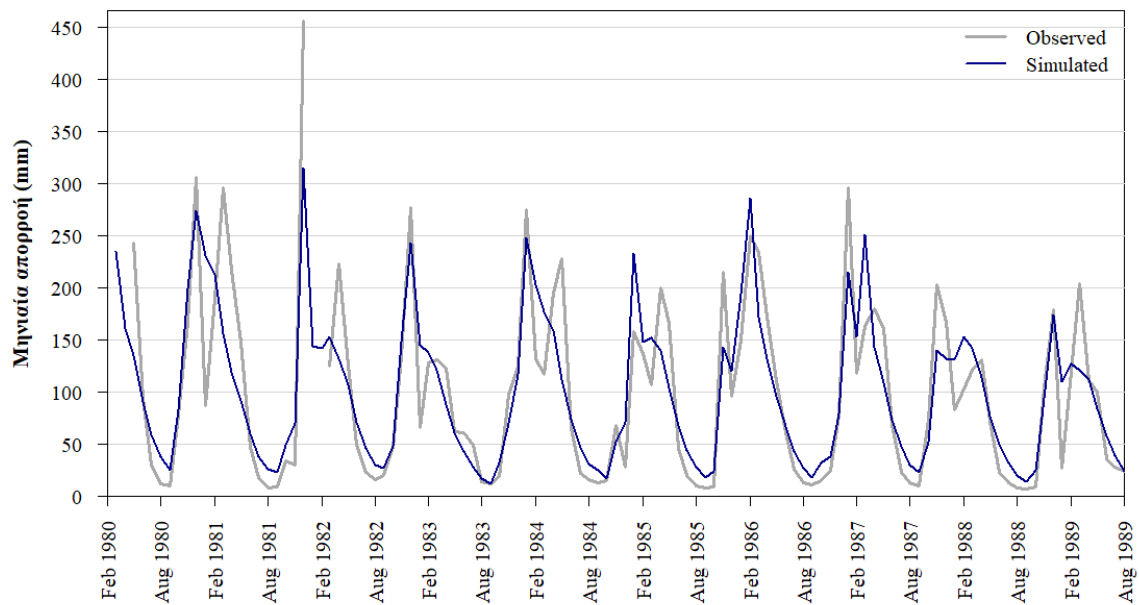
Εικόνα Π.2: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Ευήνου.



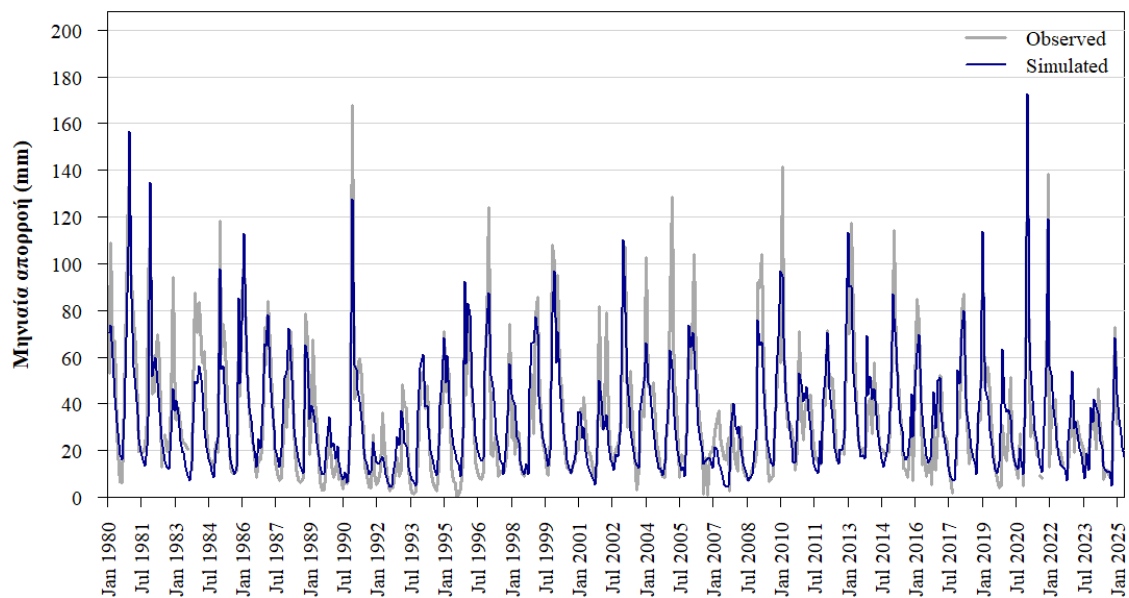
Εικόνα Π.3: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πλαστήρα.



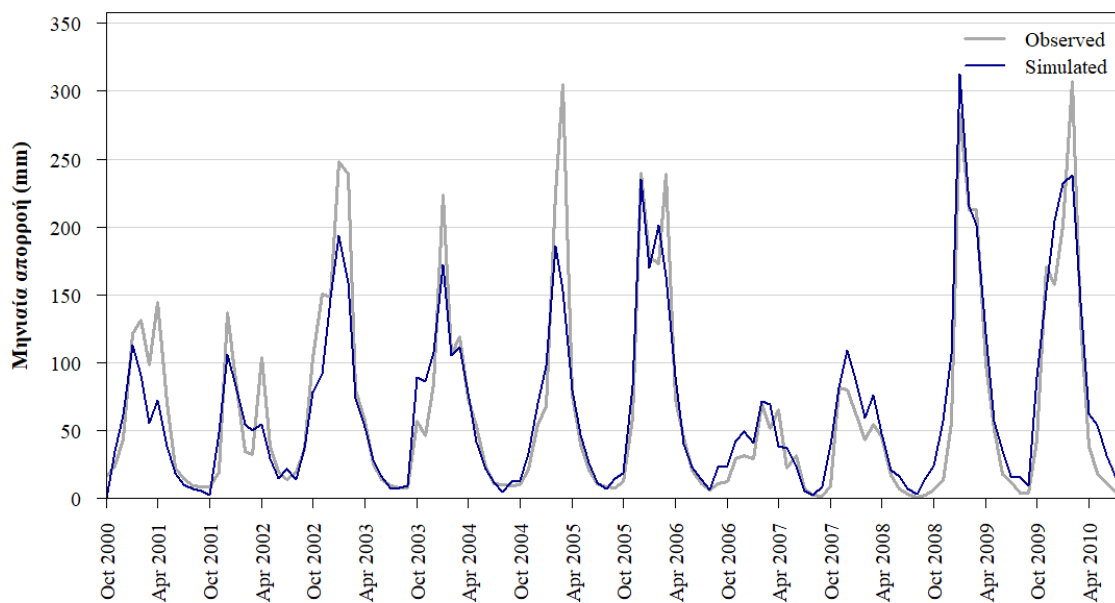
Εικόνα Π.4: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Κρεμαστόν.



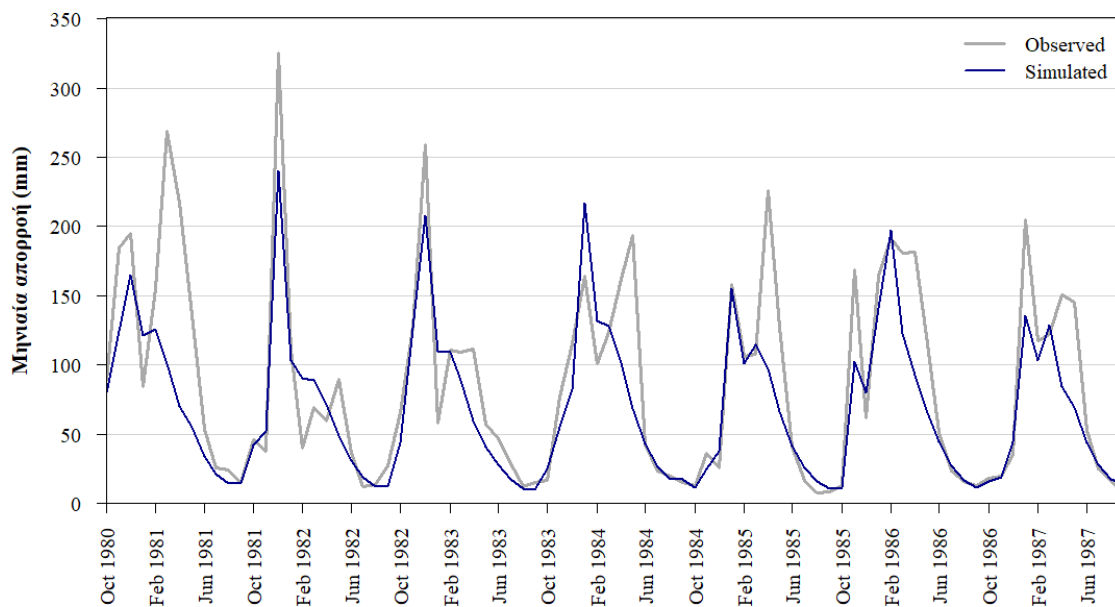
Εικόνα Π.5: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Μεσοχώρας.



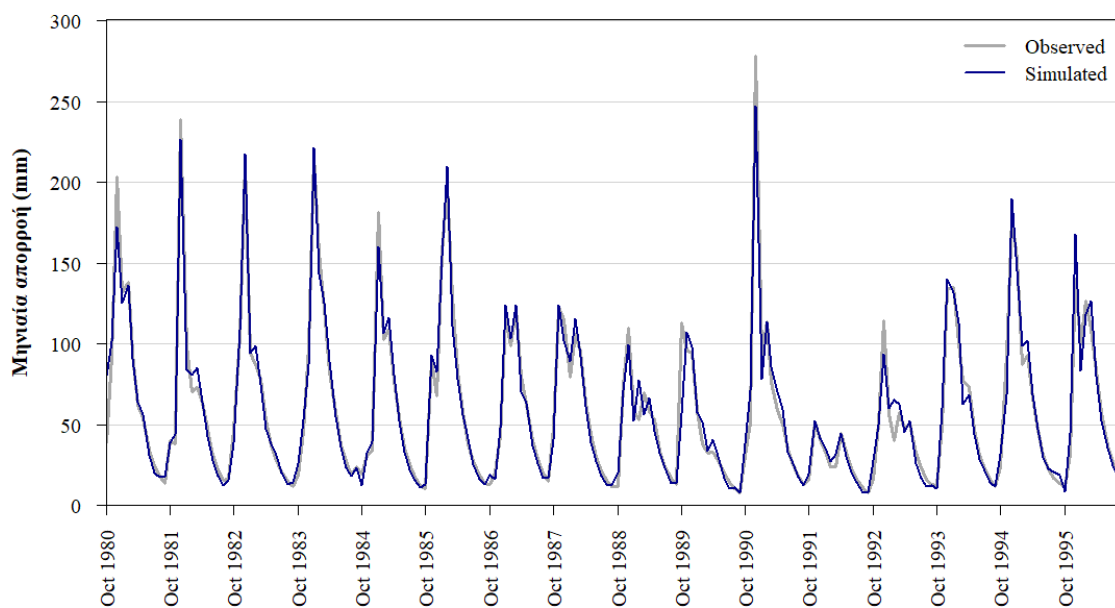
Εικόνα Π.6: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Μόρνου.



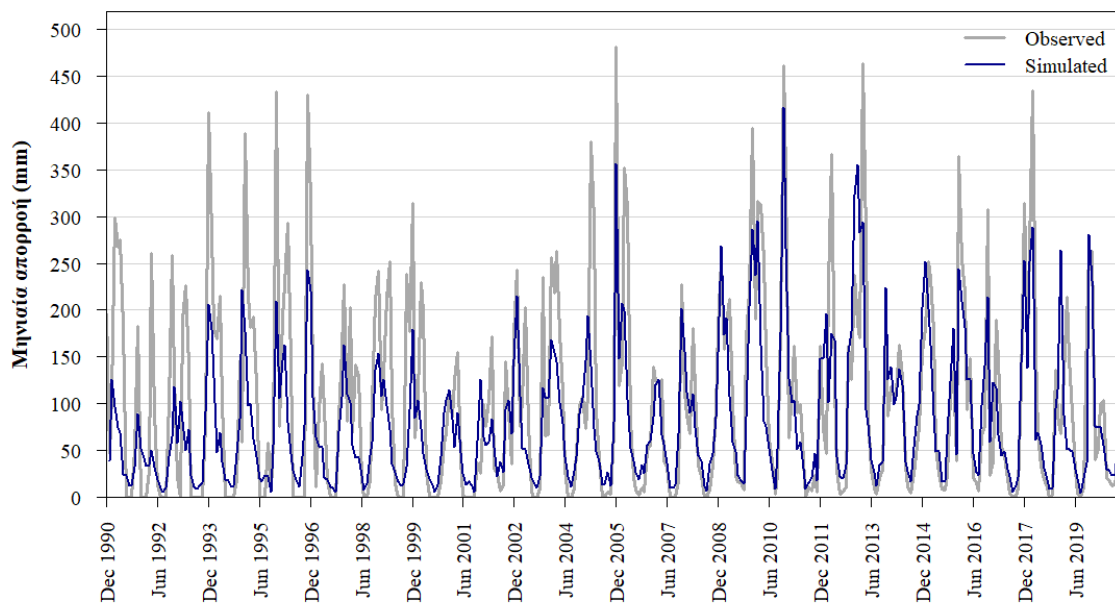
Εικόνα Π.7: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Πόρο Ρηγανίου (μετά την κατασκευή του φράγματος του Ευήνου).



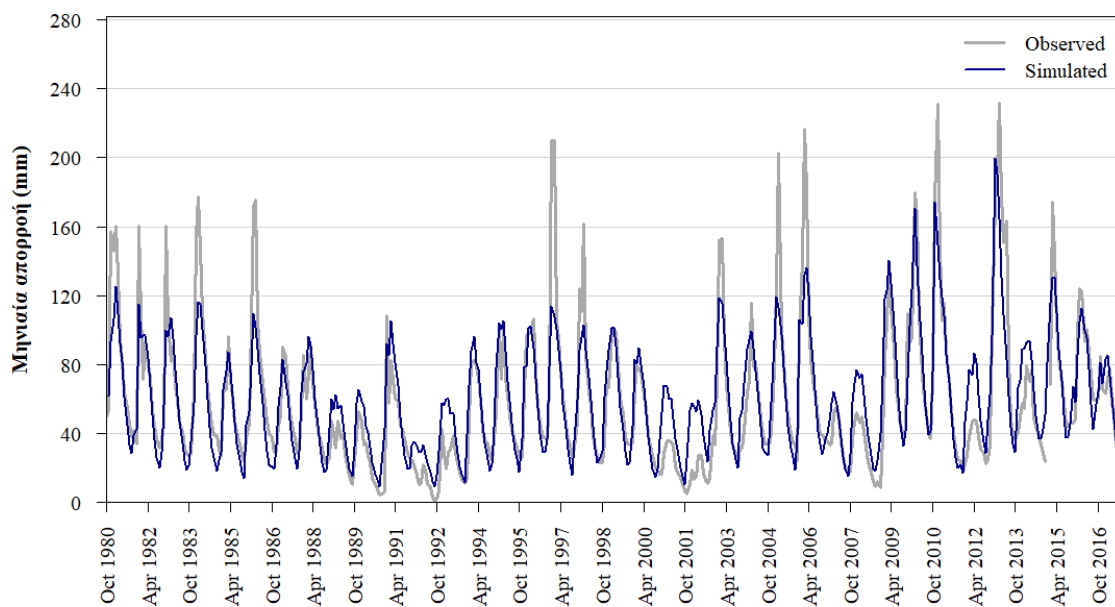
Εικόνα Π.8: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γέφυρα Κόνιτσας.



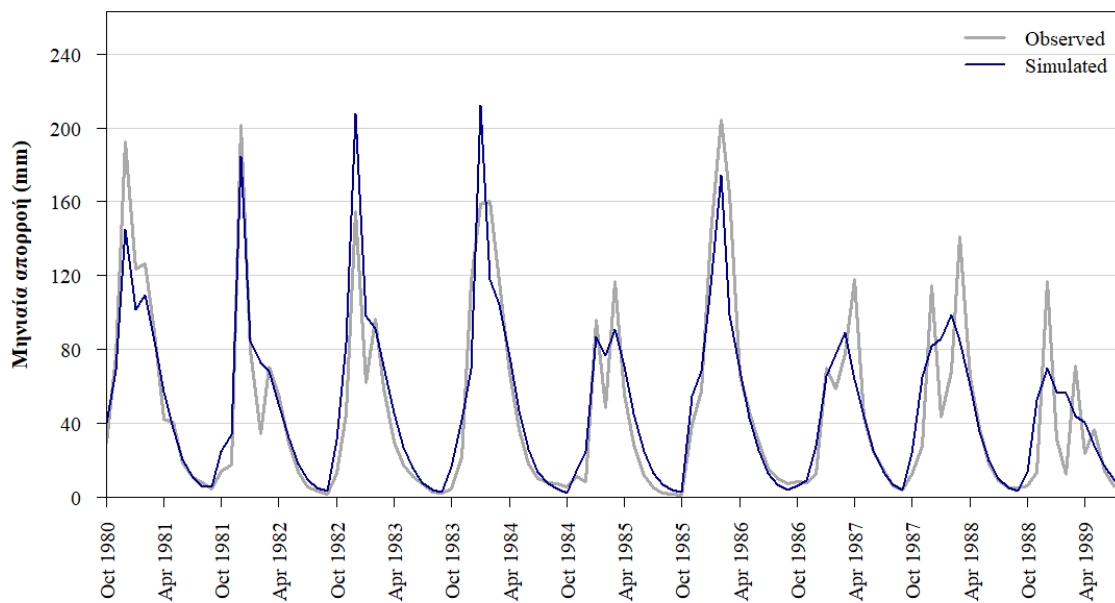
Εικόνα Π.9: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Κλειδωνιά.



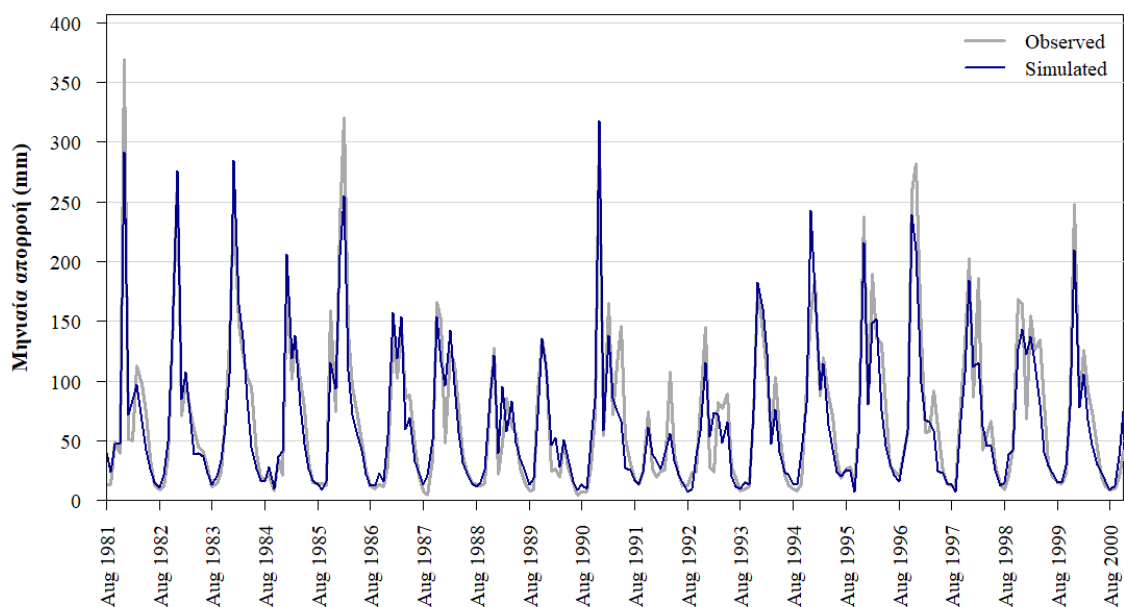
Εικόνα Π.10: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πηγών Αώου.



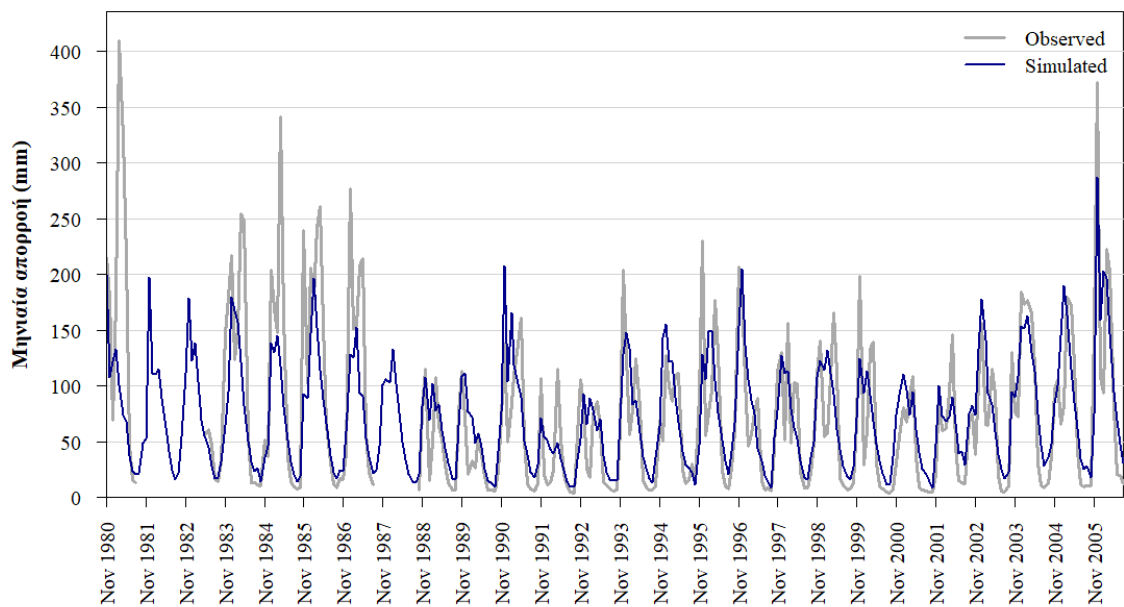
Εικόνα Π.11: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Λούρου.



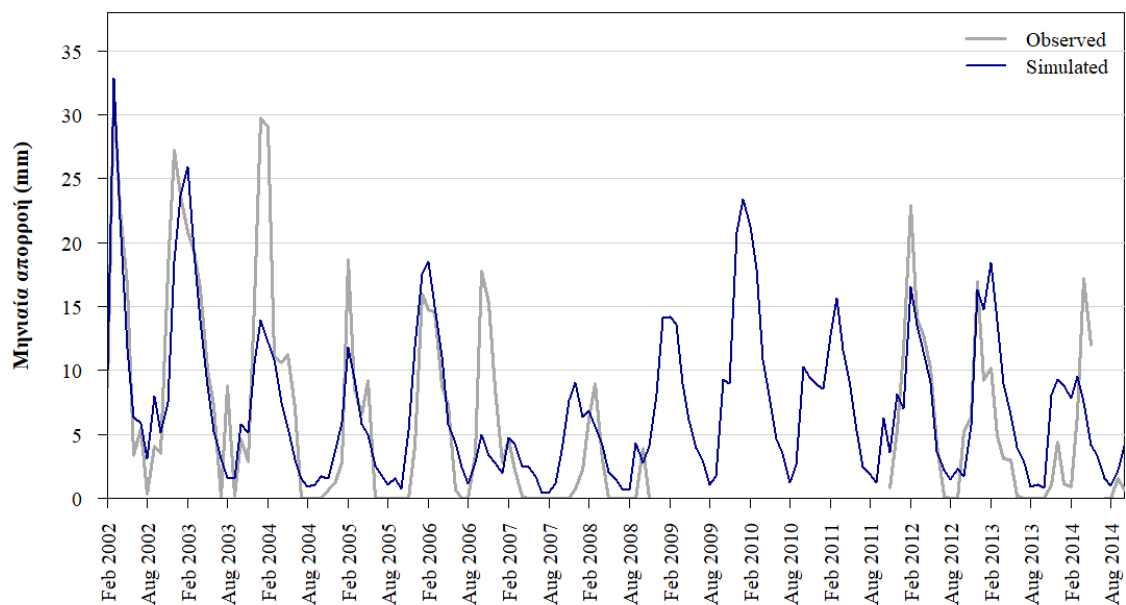
Εικόνα Π.12: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Κιοτέκι.



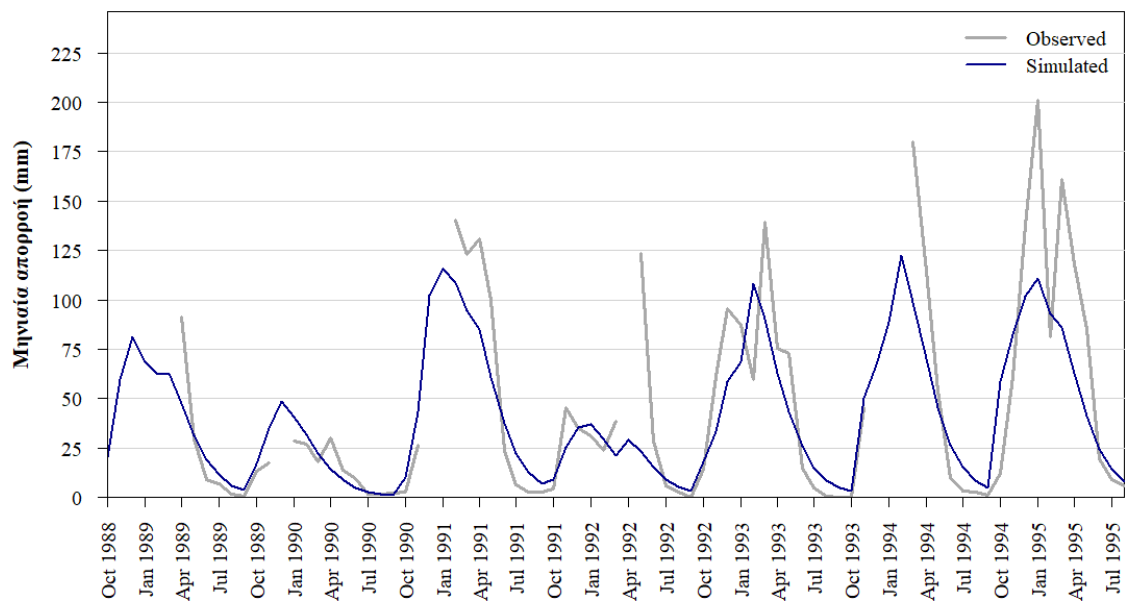
Εικόνα Π.13: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πουρναρίου.



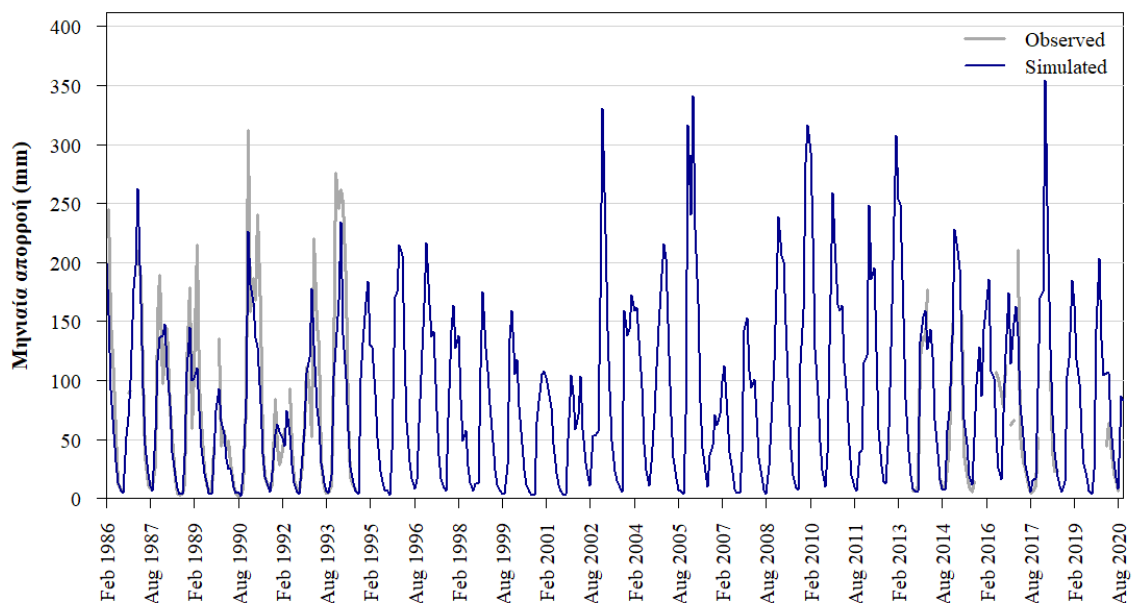
Εικόνα Π.14: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Βοβούσα.



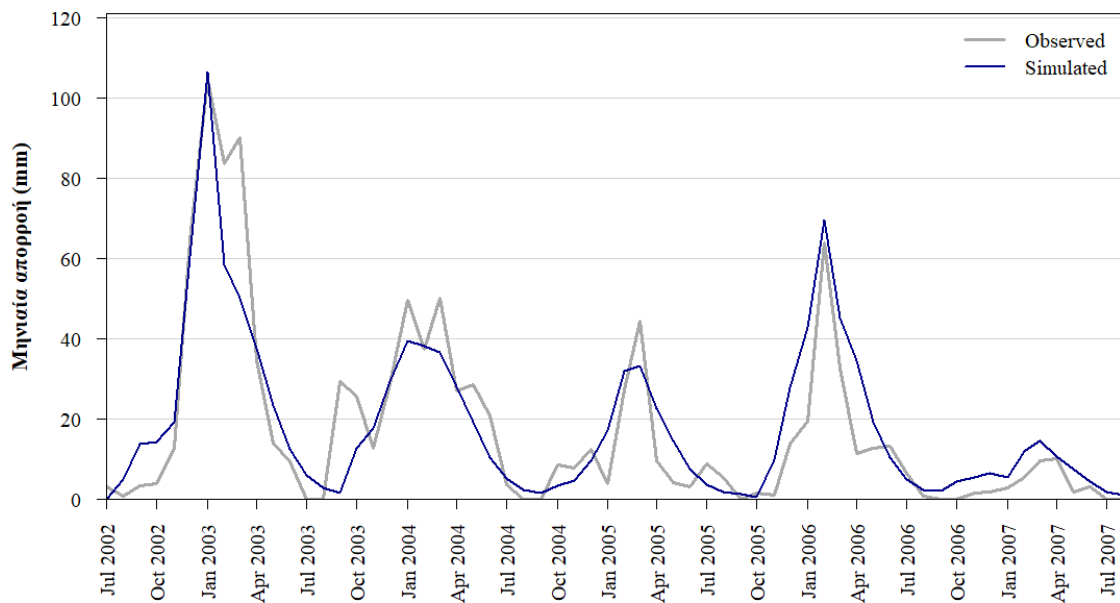
Εικόνα Π.15: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αμπελιά.



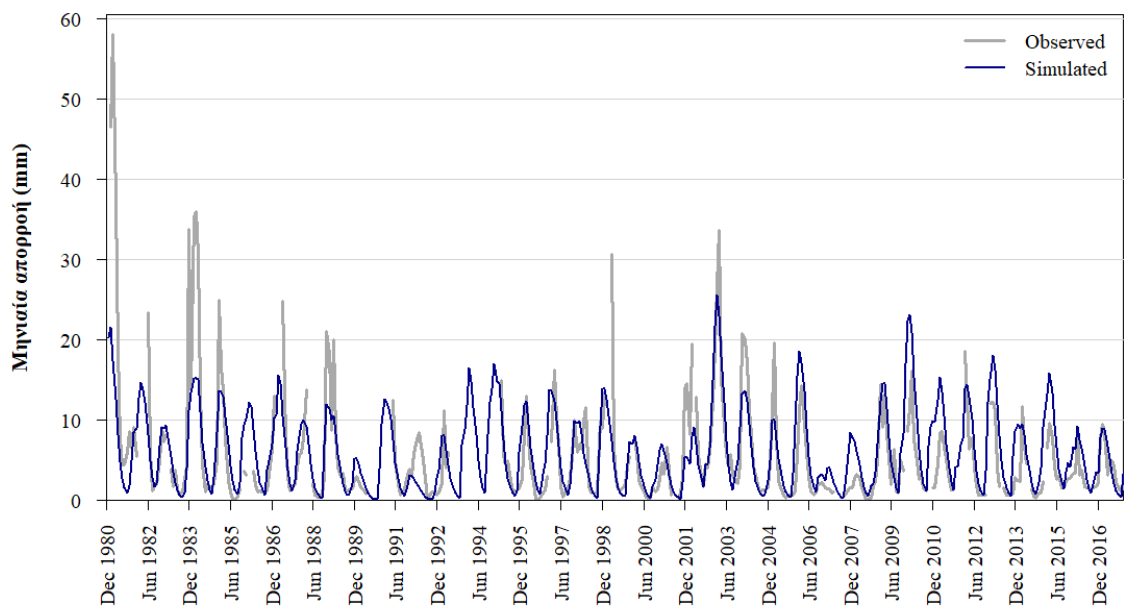
Εικόνα Π.16: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Μουζακίου.



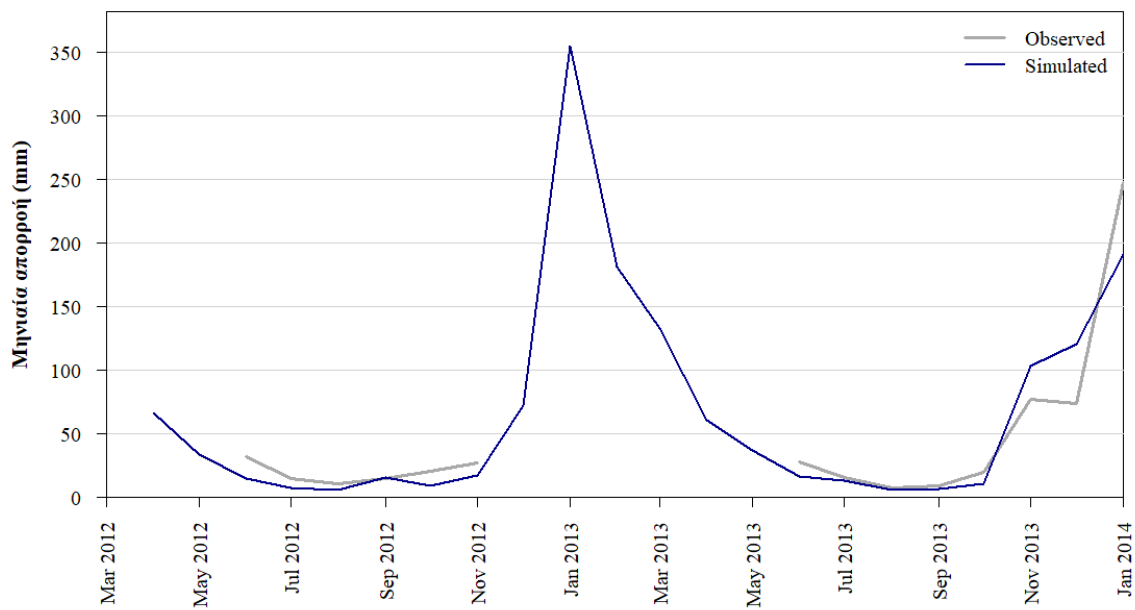
Εικόνα Π.17: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πύλης.



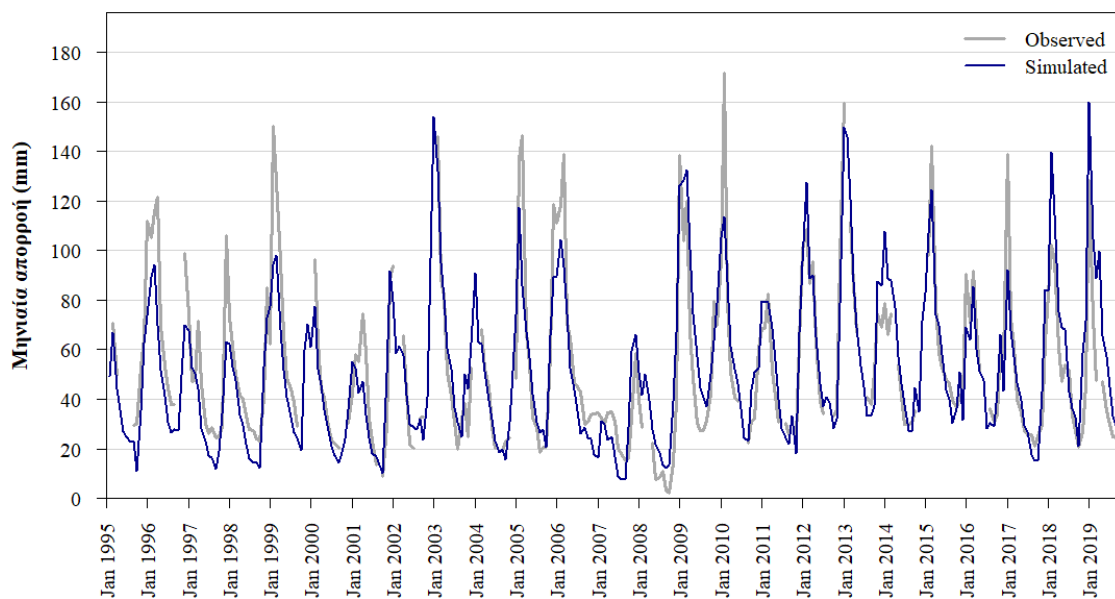
Εικόνα Π.18: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Σμοκόβου.



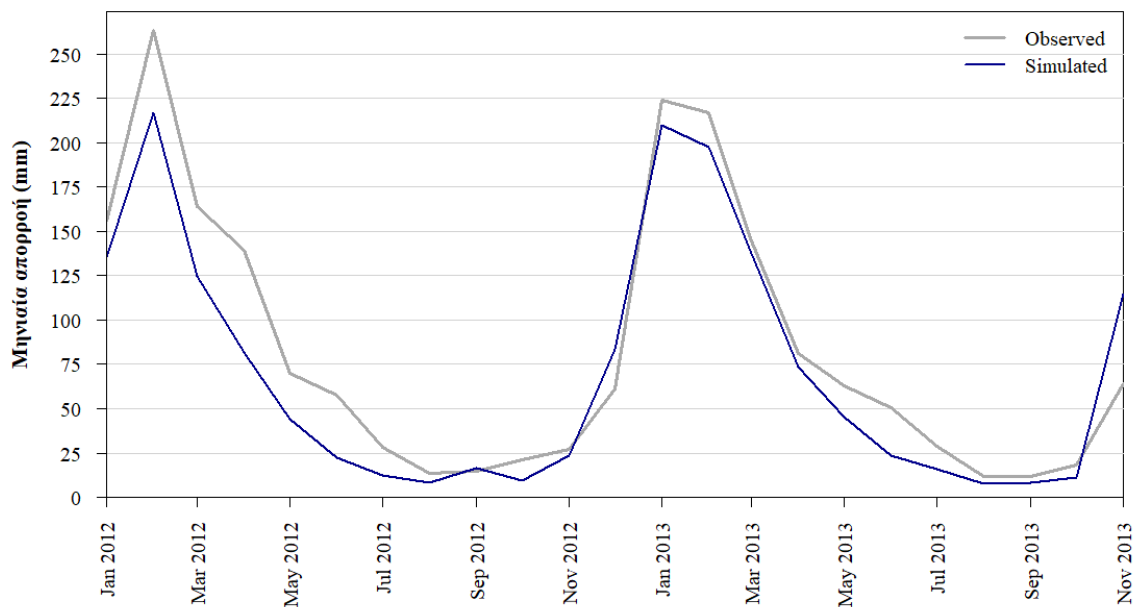
Εικόνα Π.19: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Σκοπιάς.



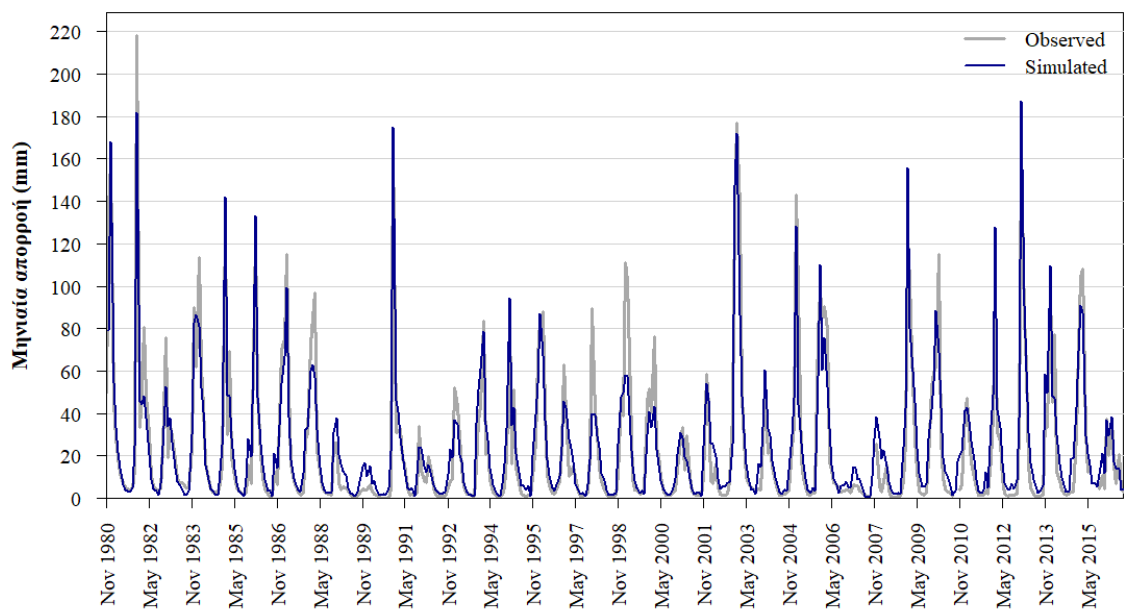
Εικόνα Π.20: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αλαγονιάς.



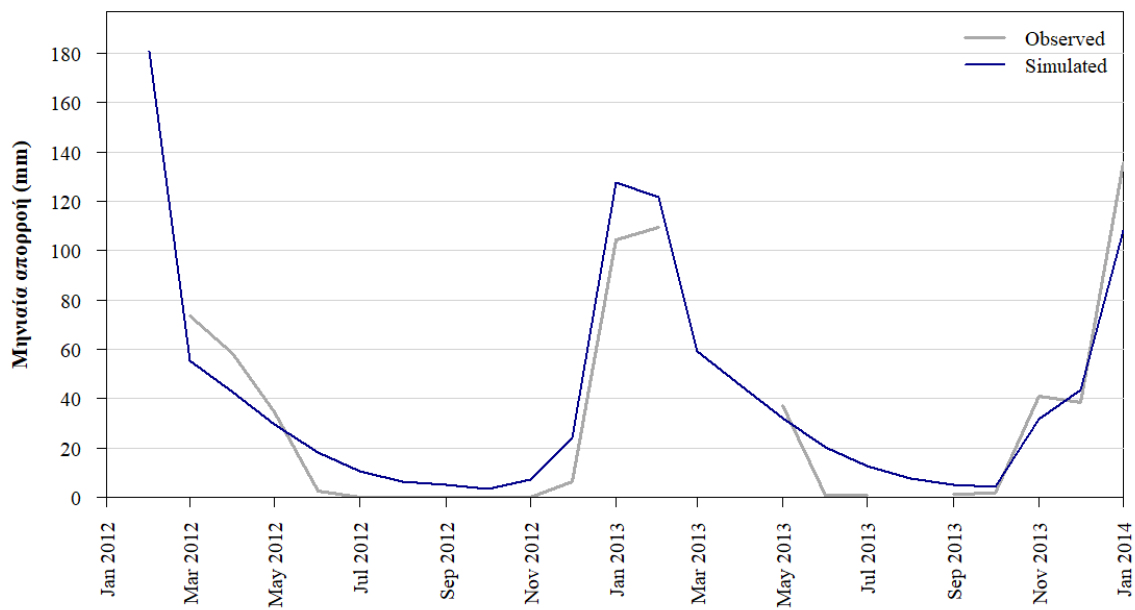
Εικόνα Π.21: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γέφυρα Κόκκορη.



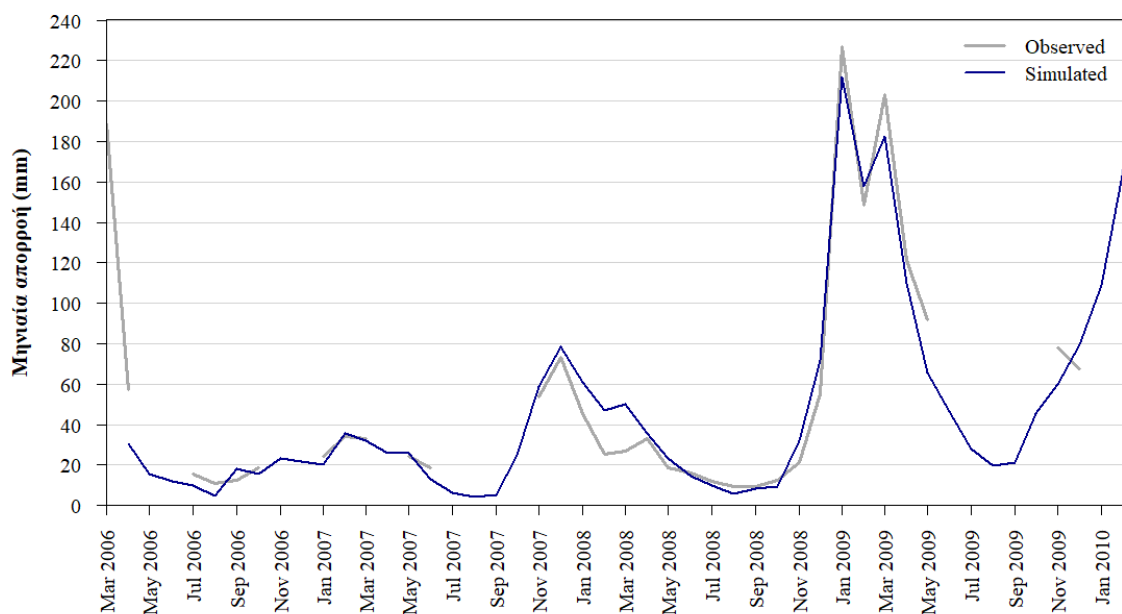
Εικόνα Π.22: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Καρβελιώτη.



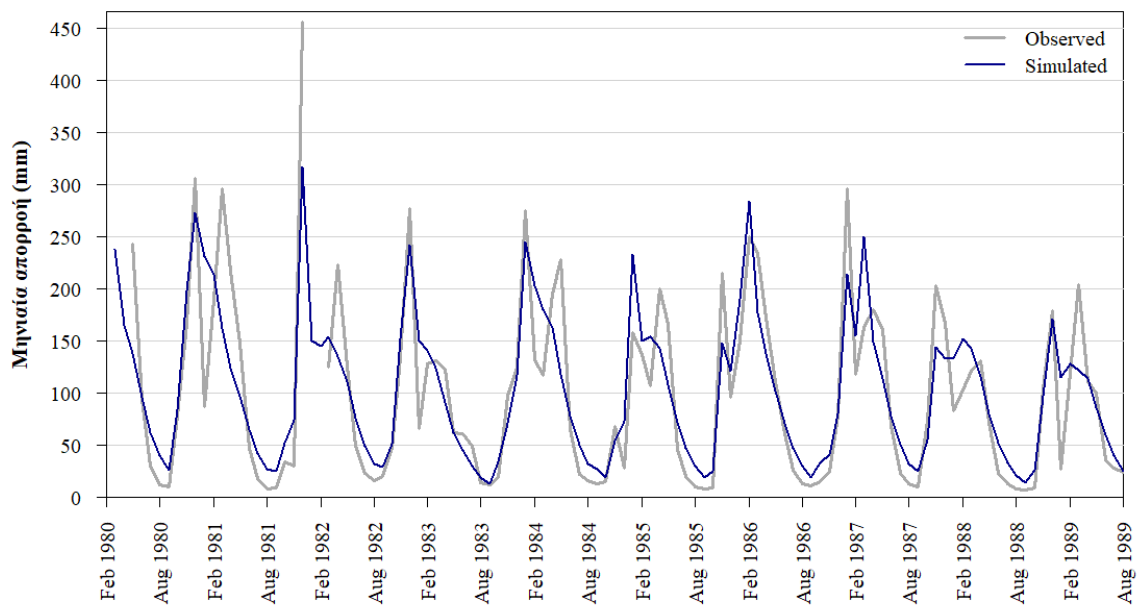
Εικόνα Π.23: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Καρύταινας.



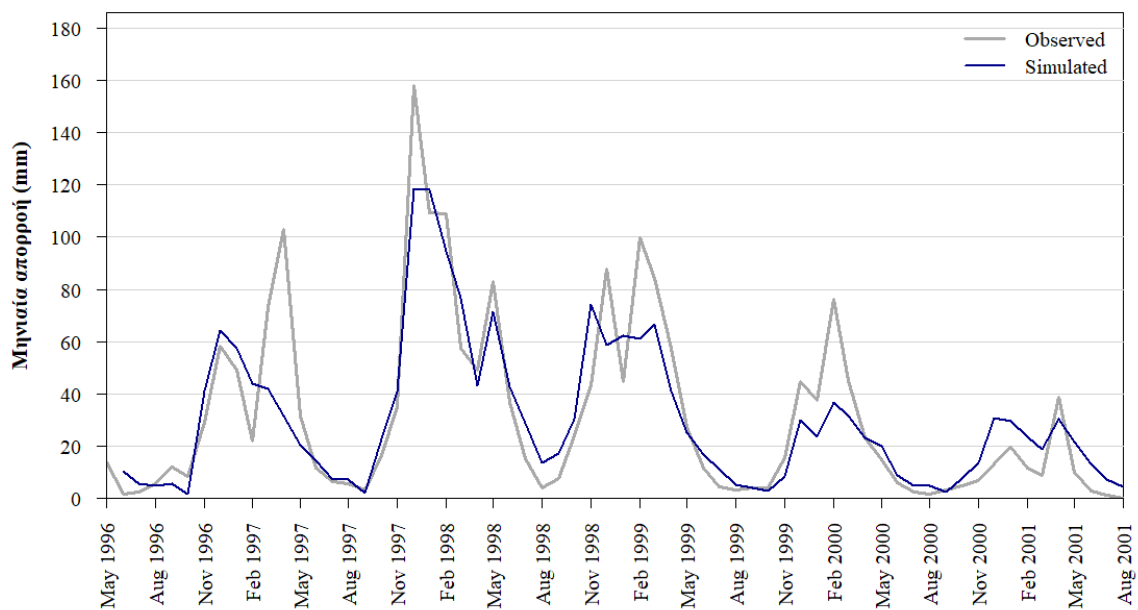
Εικόνα Π.24: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Νέδοντα.



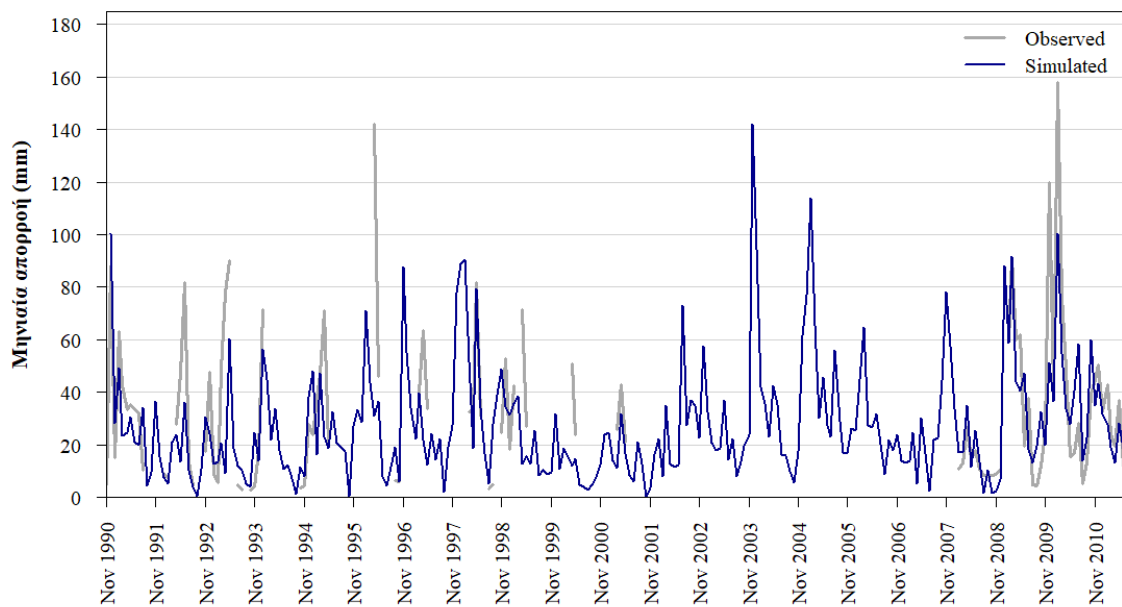
Εικόνα Π.25: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Τριπόταμα.



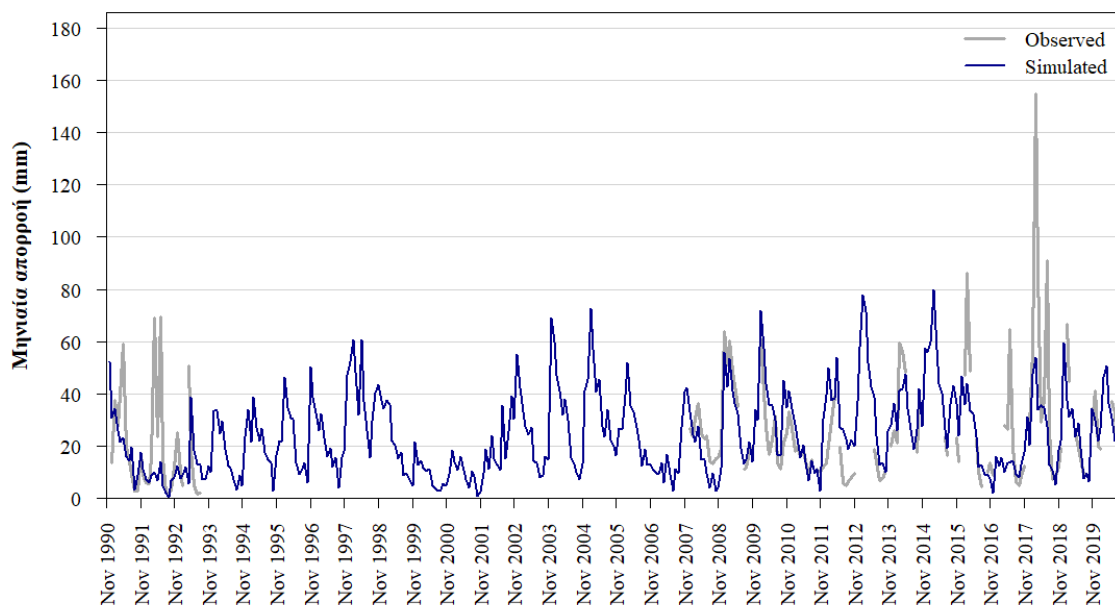
Εικόνα Π.26: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γλαύκου.



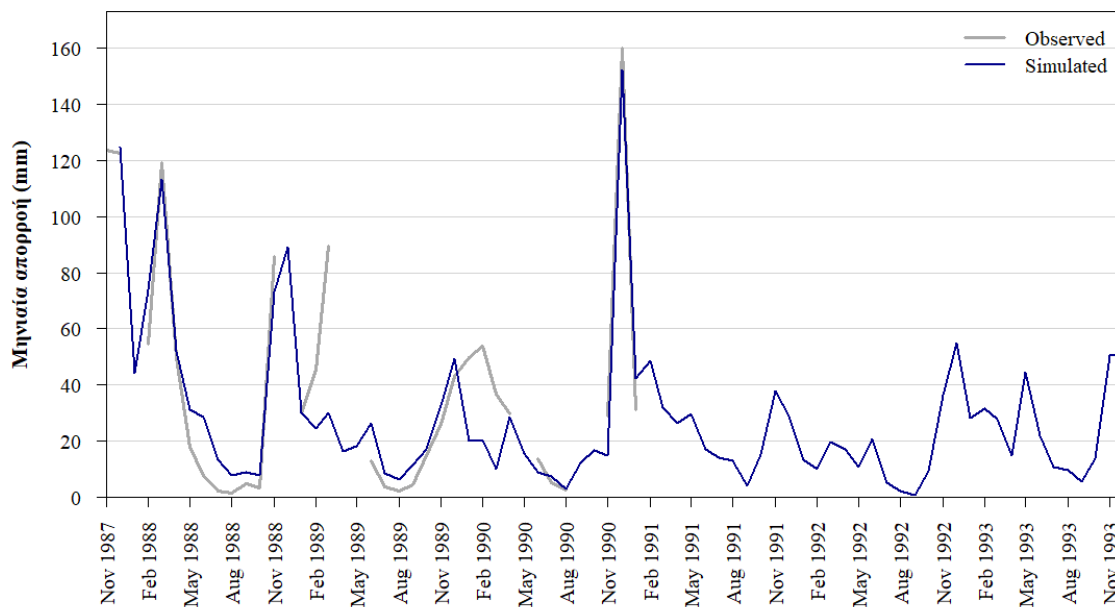
Εικόνα Π.27: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Άνω Δροσίνη.



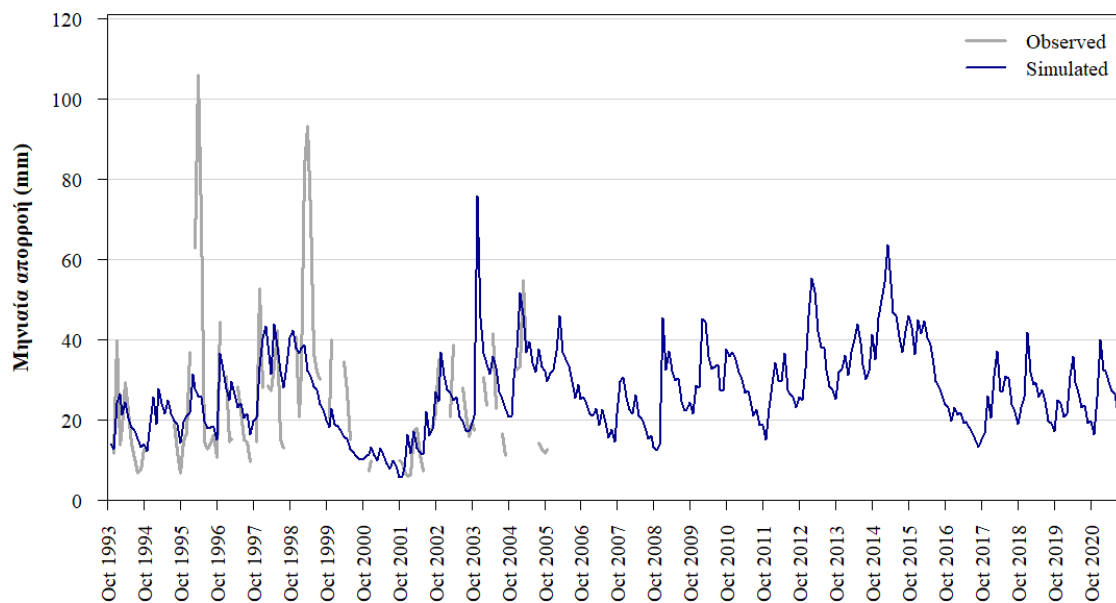
Εικόνα Π.28: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αρκουδόρεμα.



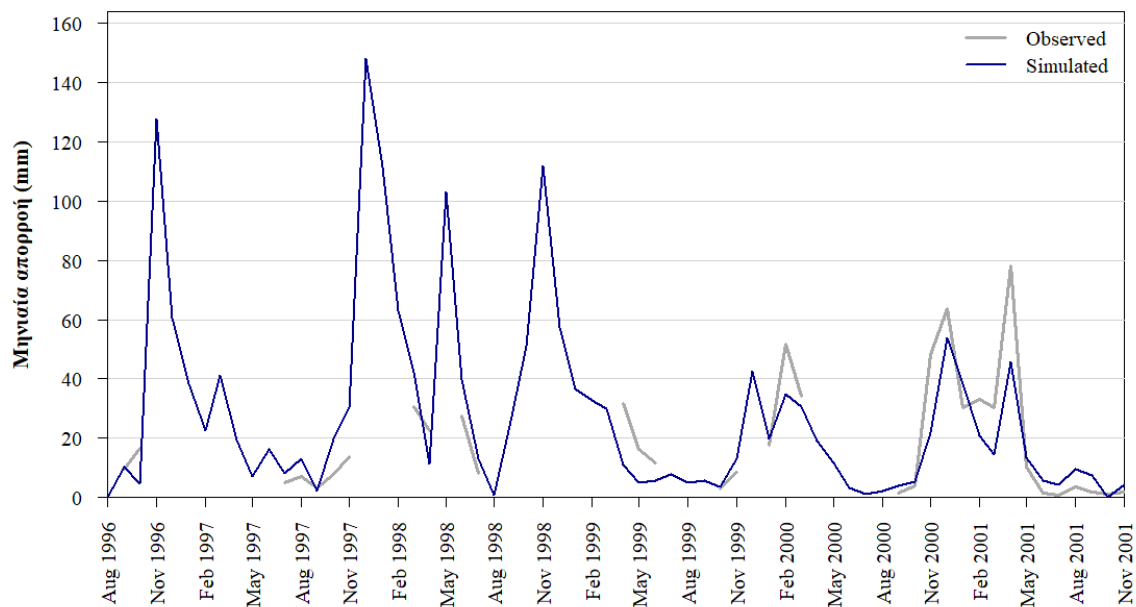
Εικόνα Π.29: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Δεσπάτη.



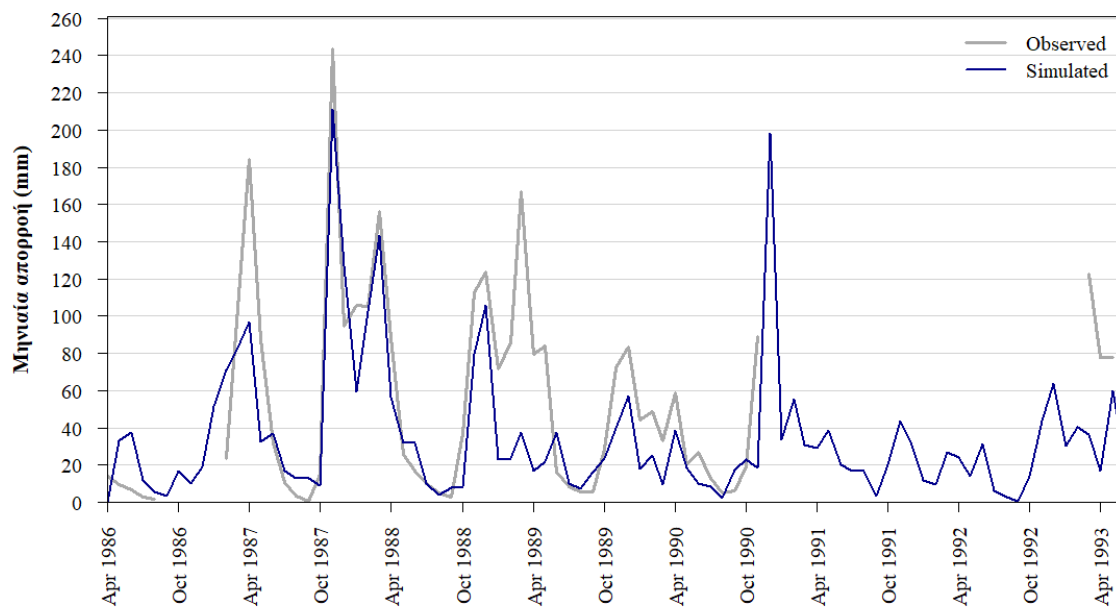
Εικόνα Π.30: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Φονιά.



Εικόνα Π.31: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Μπούσδα.



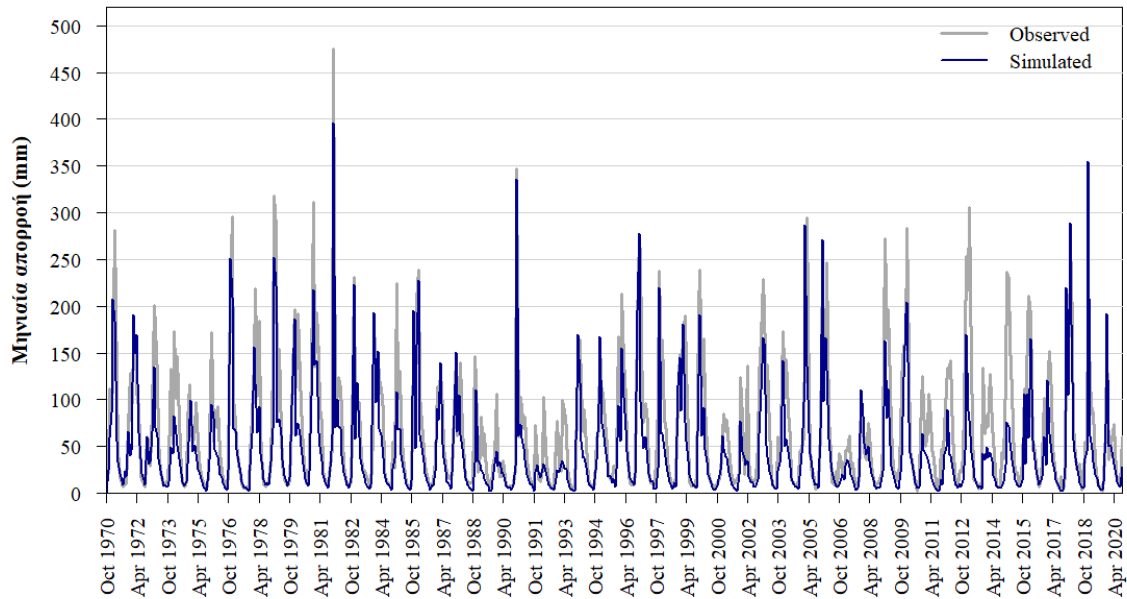
Εικόνα Π.32: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό Τρίκορφου.



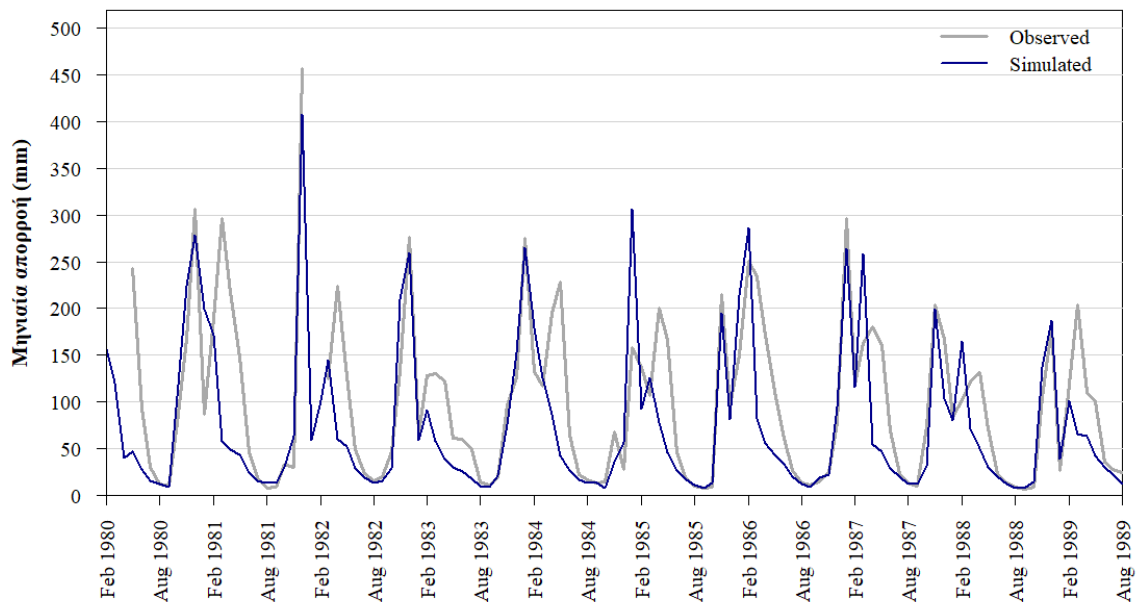
Εικόνα Π.33: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Ξηροπόταμου.

Παράρτημα Γ:

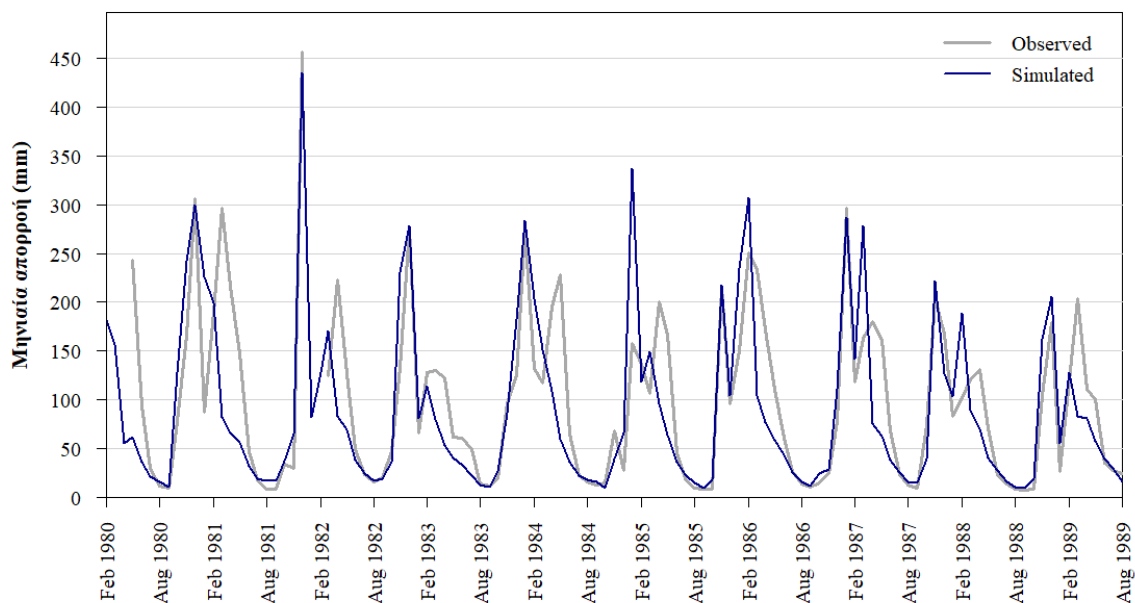
Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων απορροών κατά τη διαδικασία της περιοχοποίησης των παραμέτρων



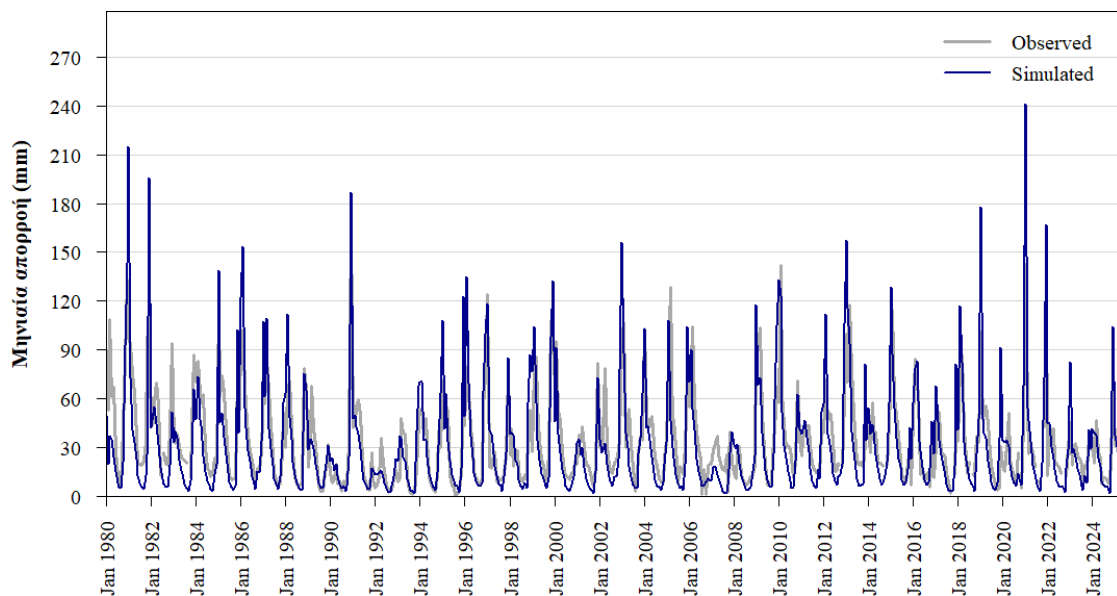
Εικόνα Π.34: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Ευήνου (ΜΥΑ).



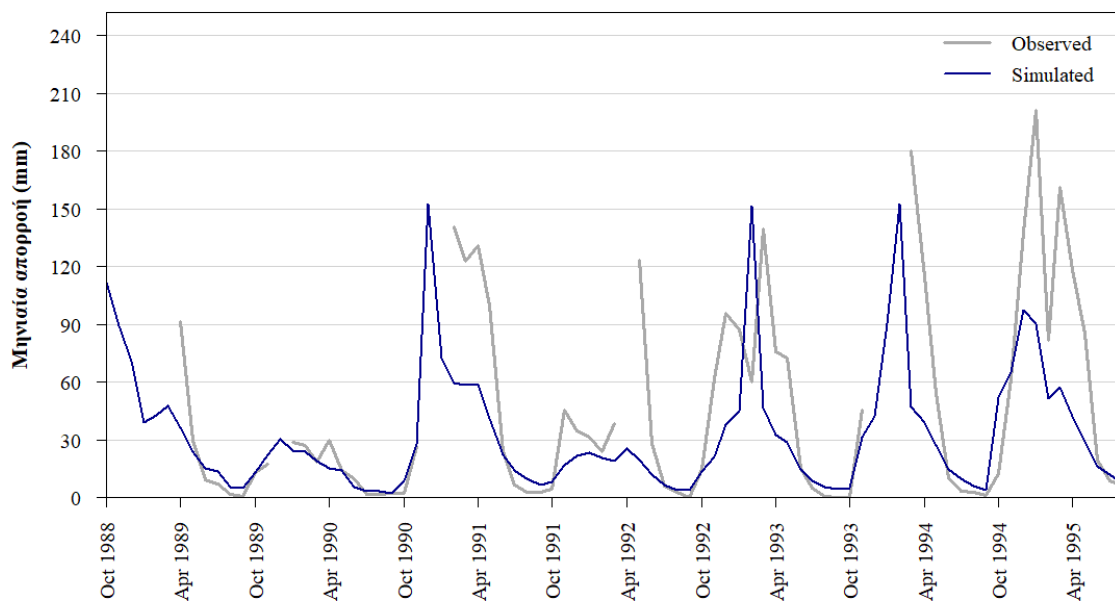
Εικόνα Π.35: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γλαύκου (ΜΥΑ).



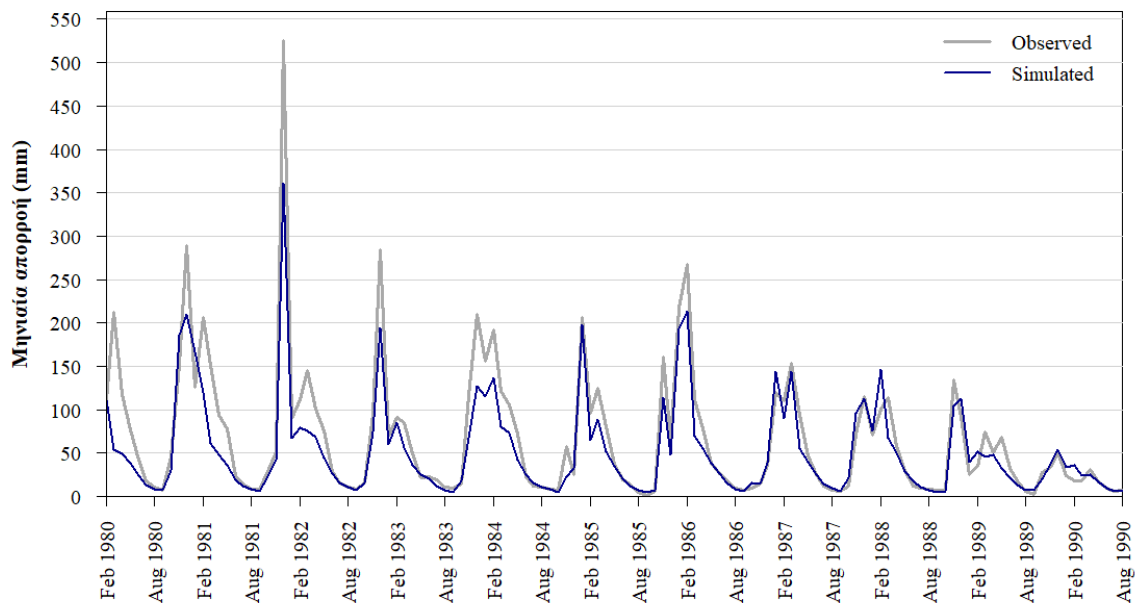
Εικόνα Π.36: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Μεσοχώρας (ΜΥΑ).



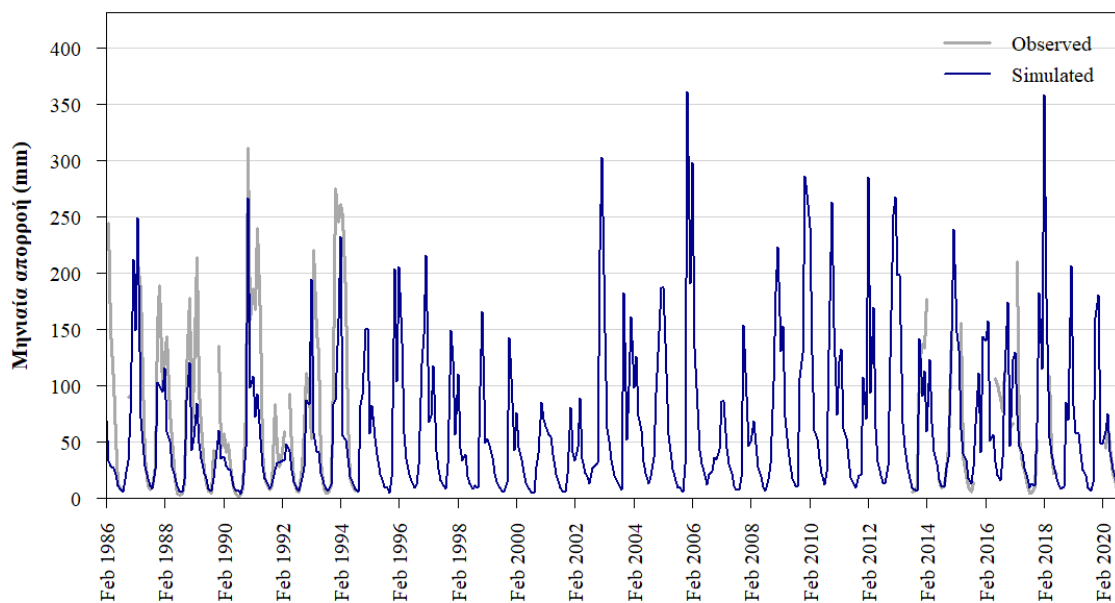
Εικόνα Π.37: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Μόρνου (ΜΥΑ).



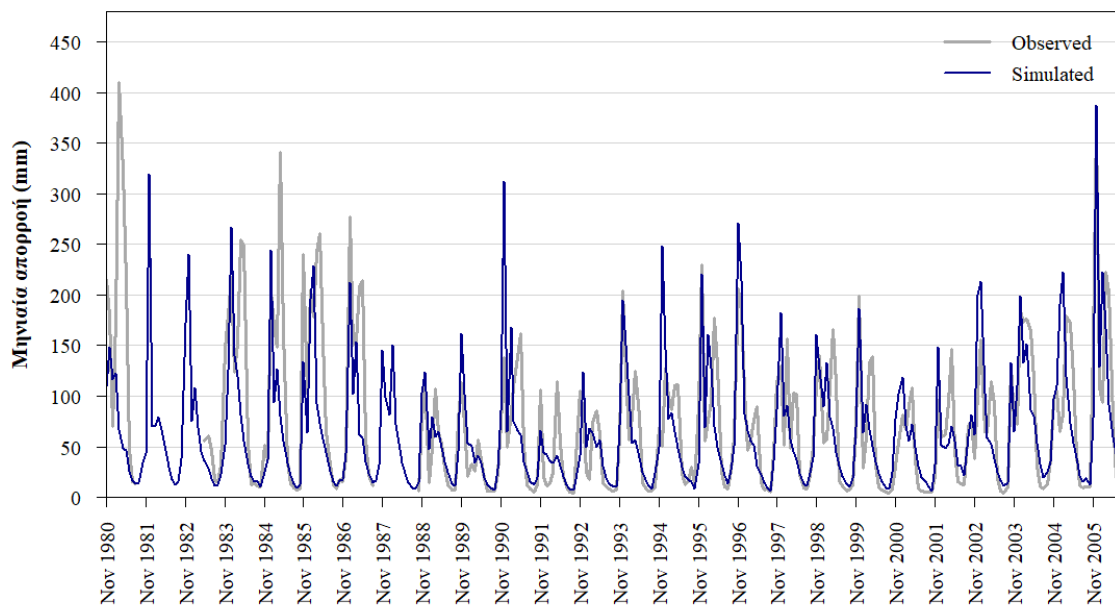
Εικόνα Π.38: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Μουζάκι (ΜΥΑ).



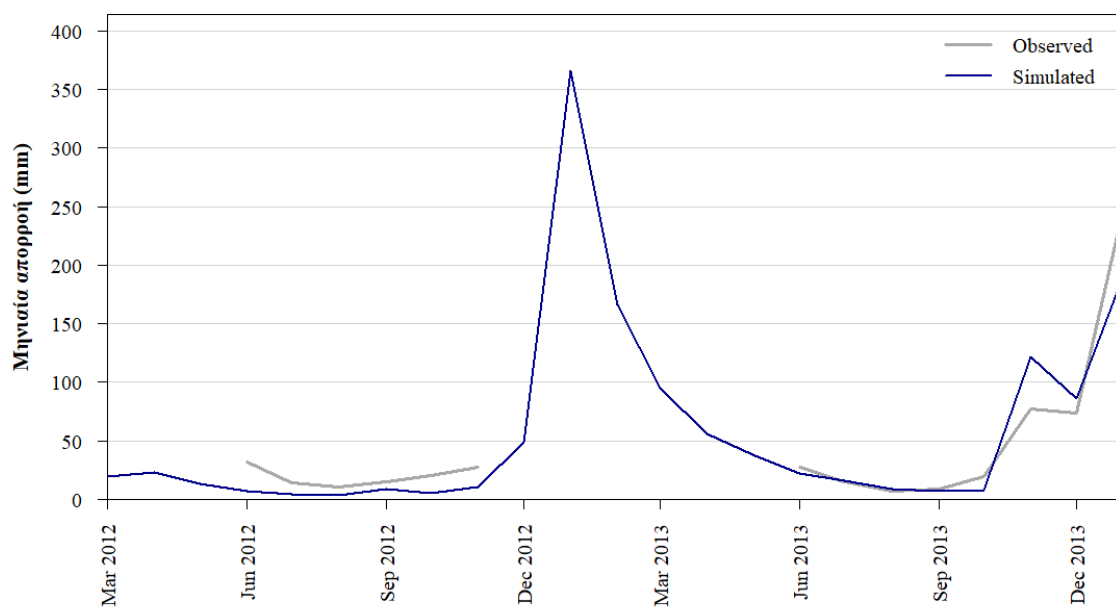
Εικόνα Π.39: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Πόρο Ρηγανίου - πριν την κατασκευή του φράγματος του Ευήνου (ΜΥΑ).



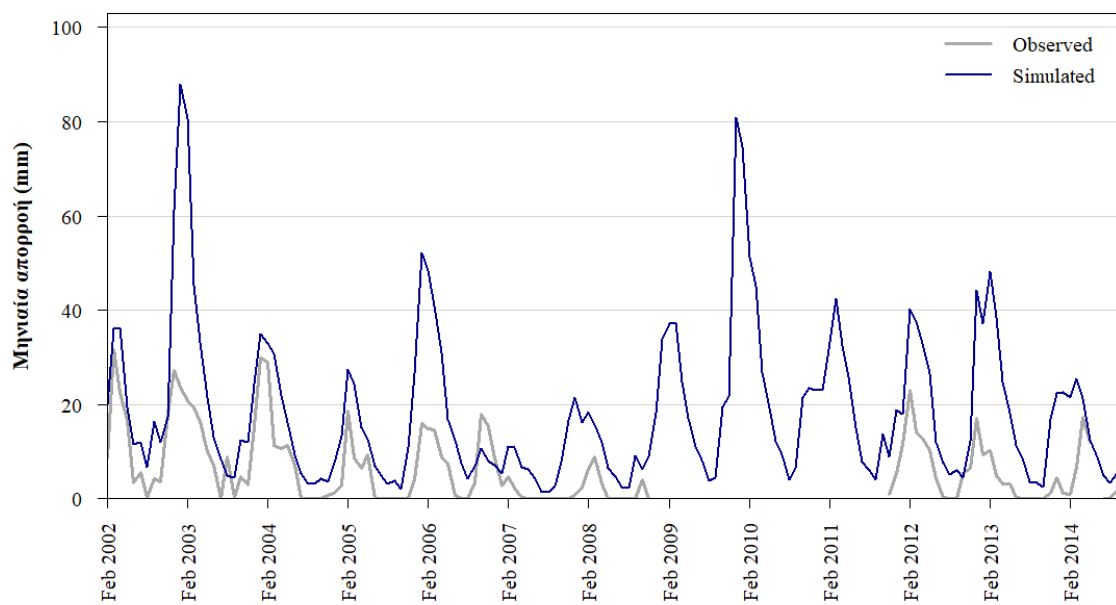
Εικόνα Π.40: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Πύλης (ΜΥΑ).



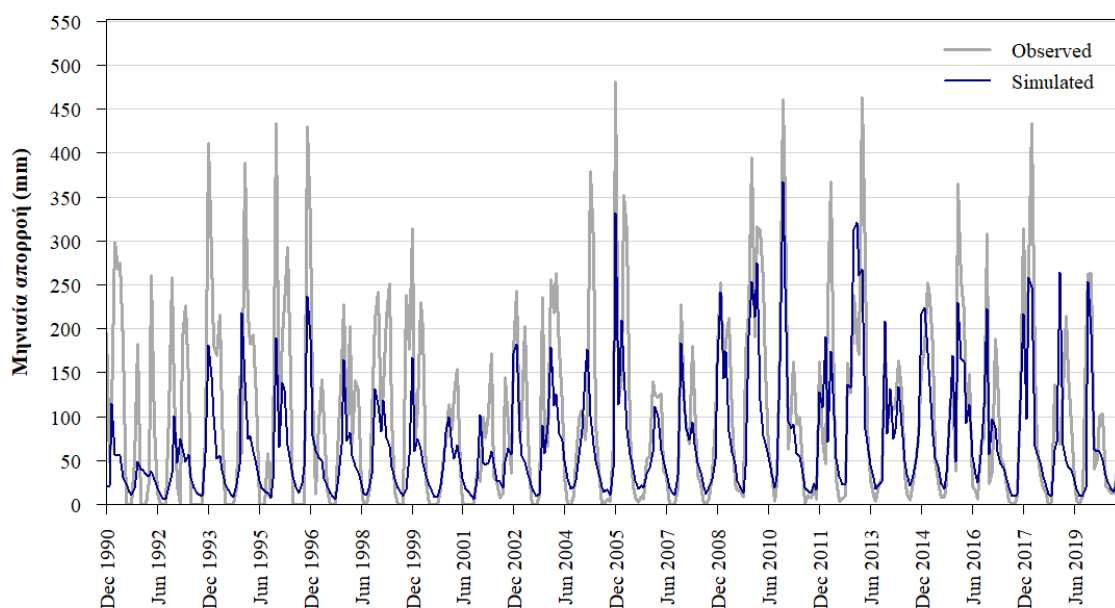
Εικόνα Π.41: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Βοβούσας (ΜΥΑ).



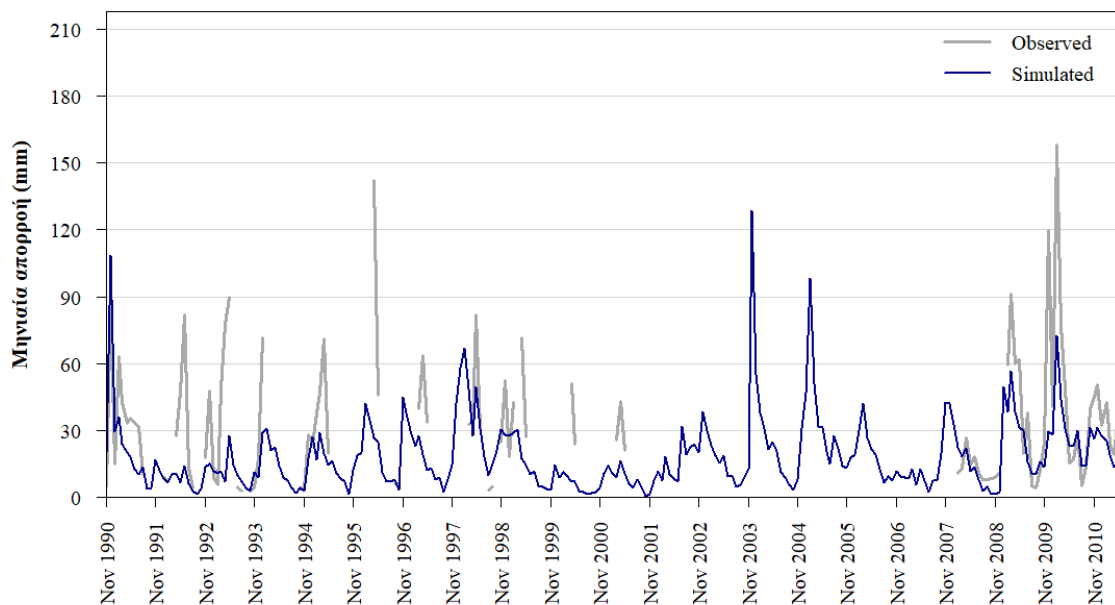
Εικόνα Π.42: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αλαγονίας (ΜΥΑ).



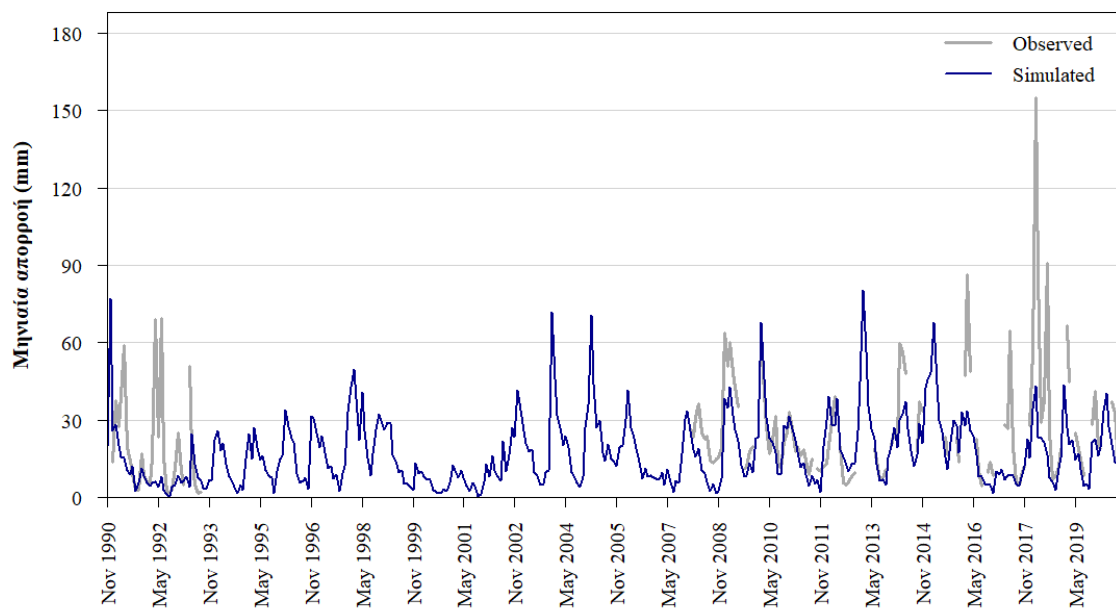
Εικόνα Π.43: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αμπελιάς (ΜΥΑ).



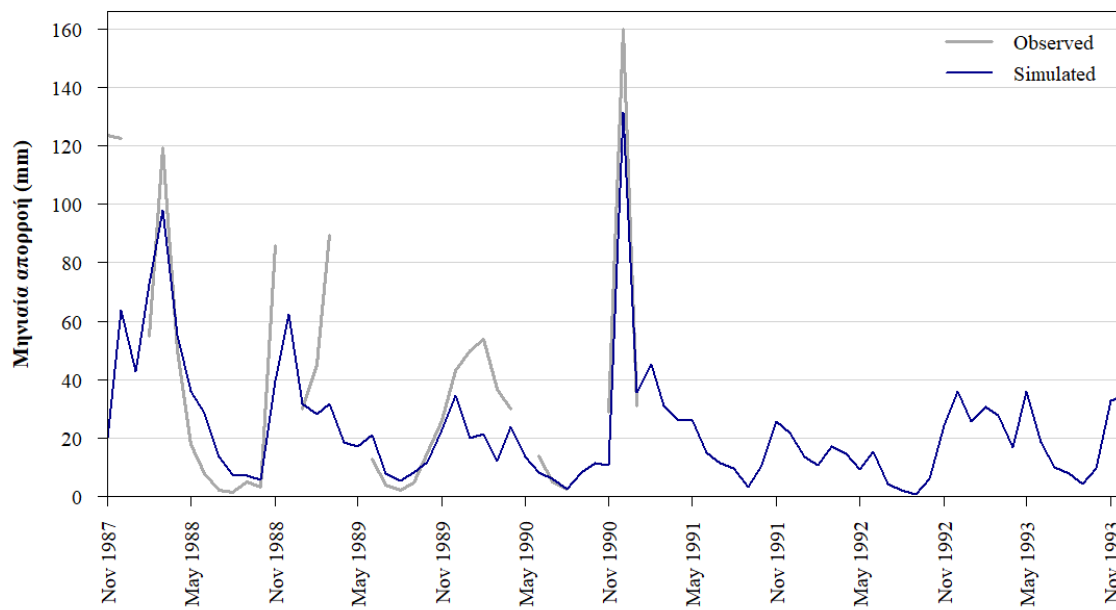
Εικόνα Π.44: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πηγών Αώου (ΜΥΑ).



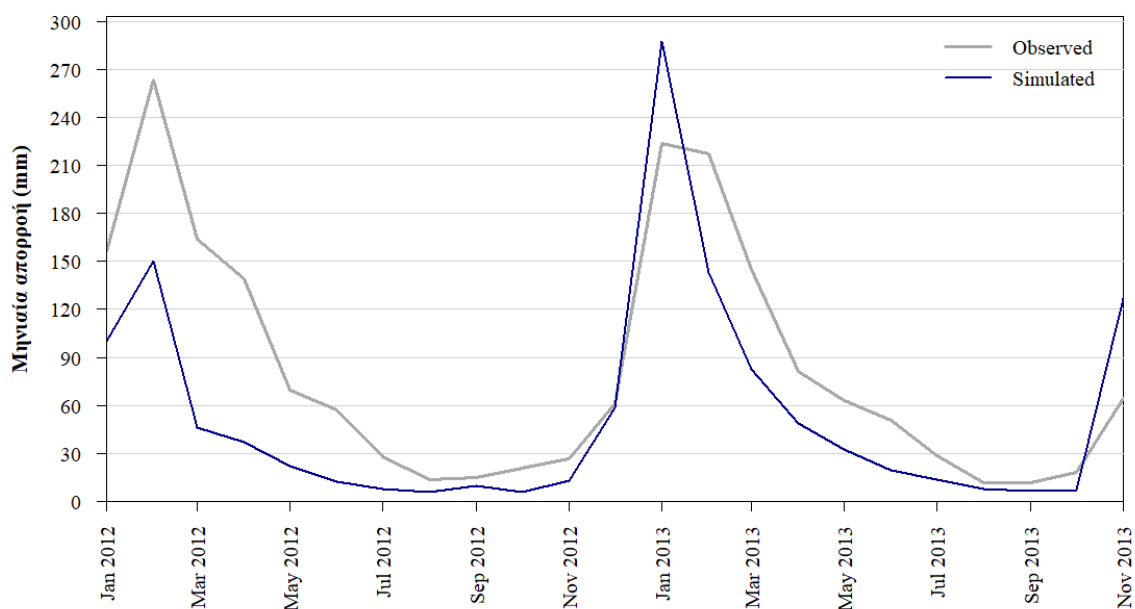
Εικόνα Π.45: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Αρκουδόρεμα (ΜΥΑ).



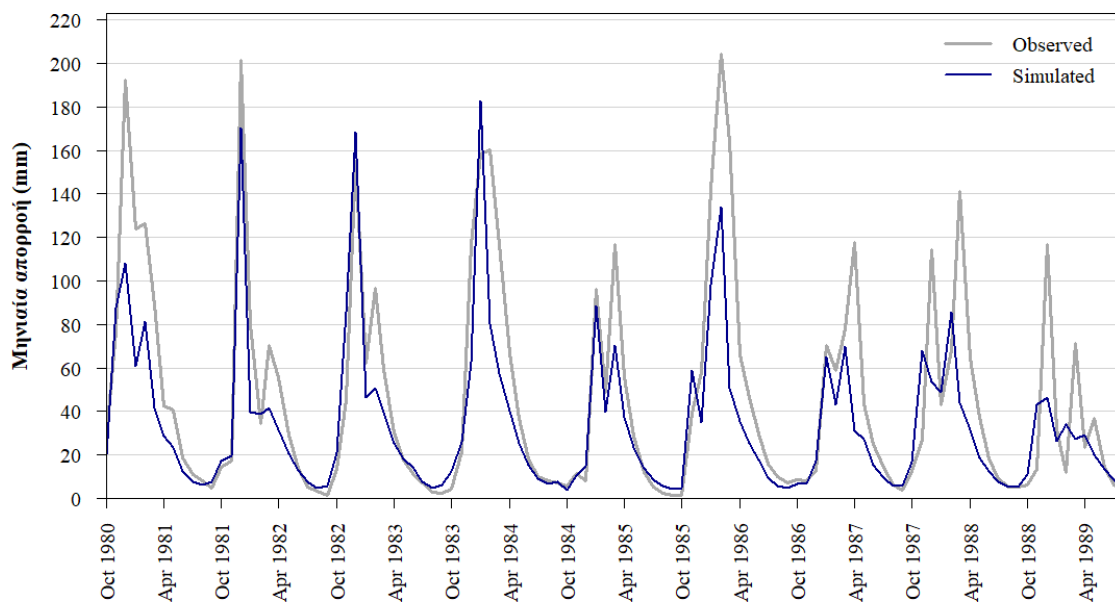
Εικόνα Π.46: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Δεσπάτη (ΜΥΑ).



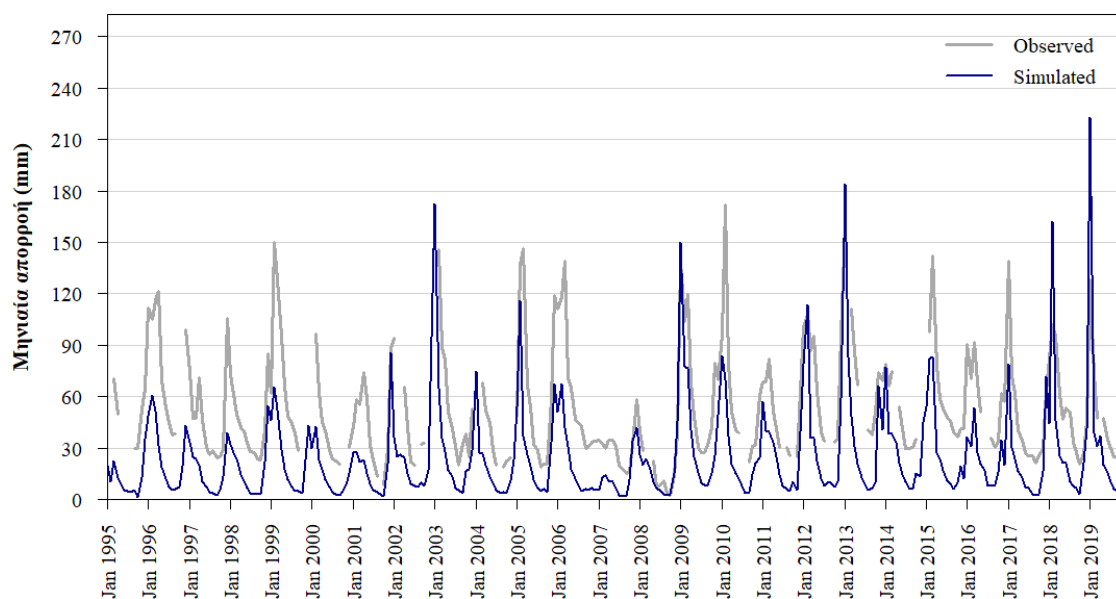
Εικόνα Π.47: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Φονιά (ΜΥΑ).



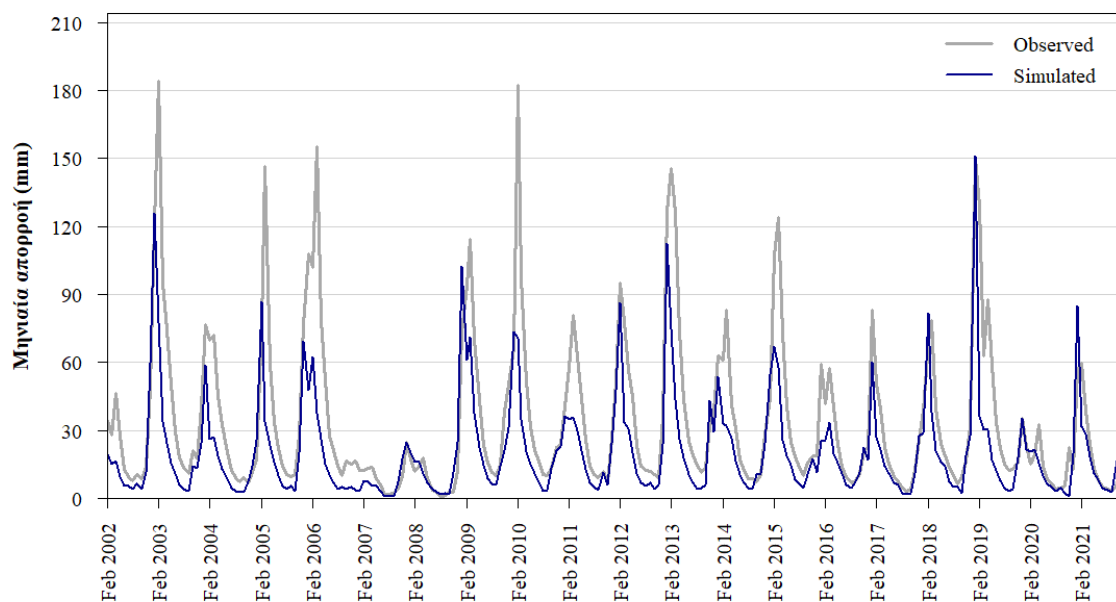
Εικόνα Π.48: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Καρβελιώτη (ΜΥΑ).



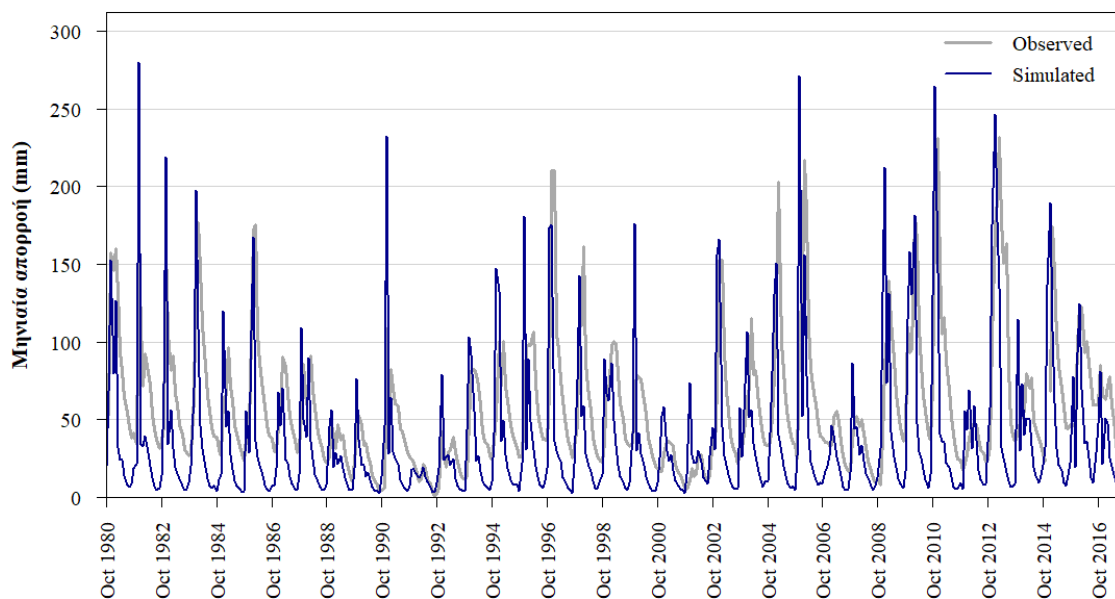
Εικόνα Π.49: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Κιοτέκι (ΜΥΑ).



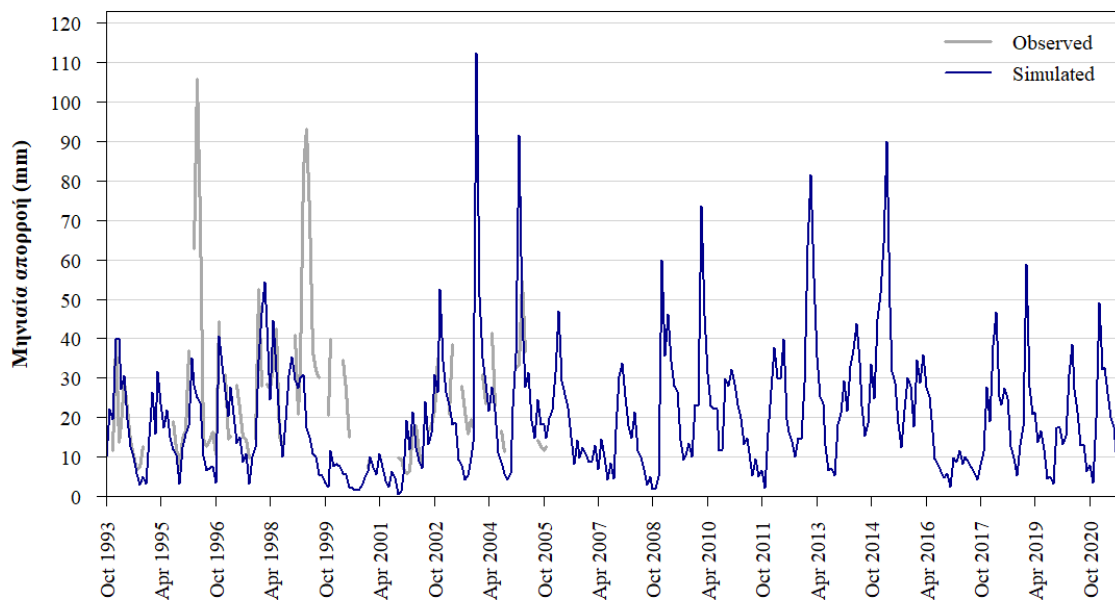
Εικόνα Π.50: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Γέφυρας Κόκκορη (ΜΥΑ).



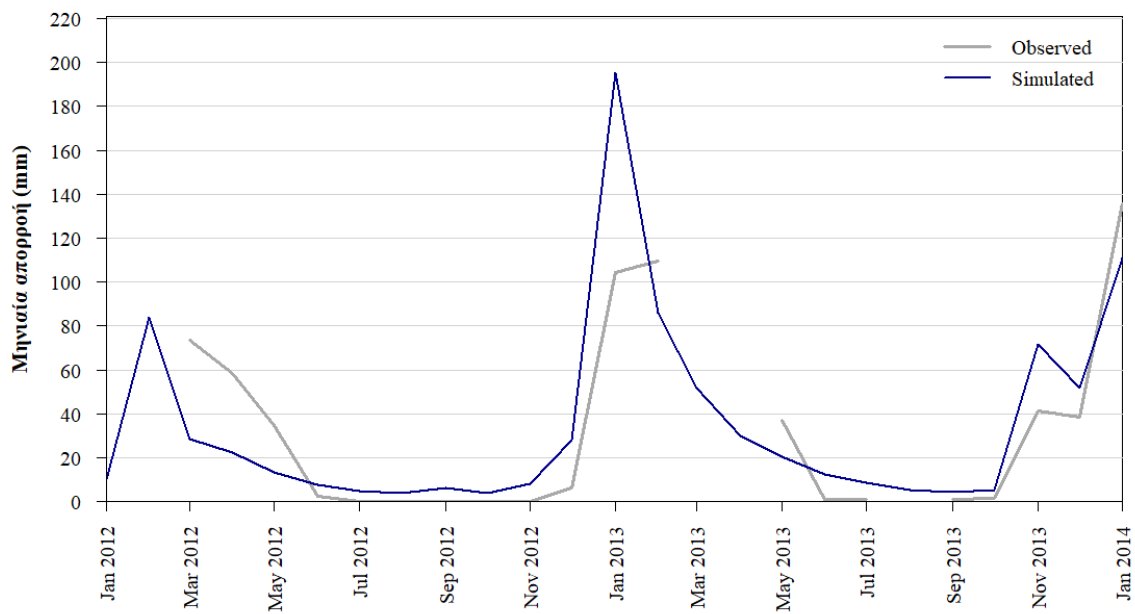
Εικόνα Π.51: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα του Λάδωνα (ΜΥΑ).



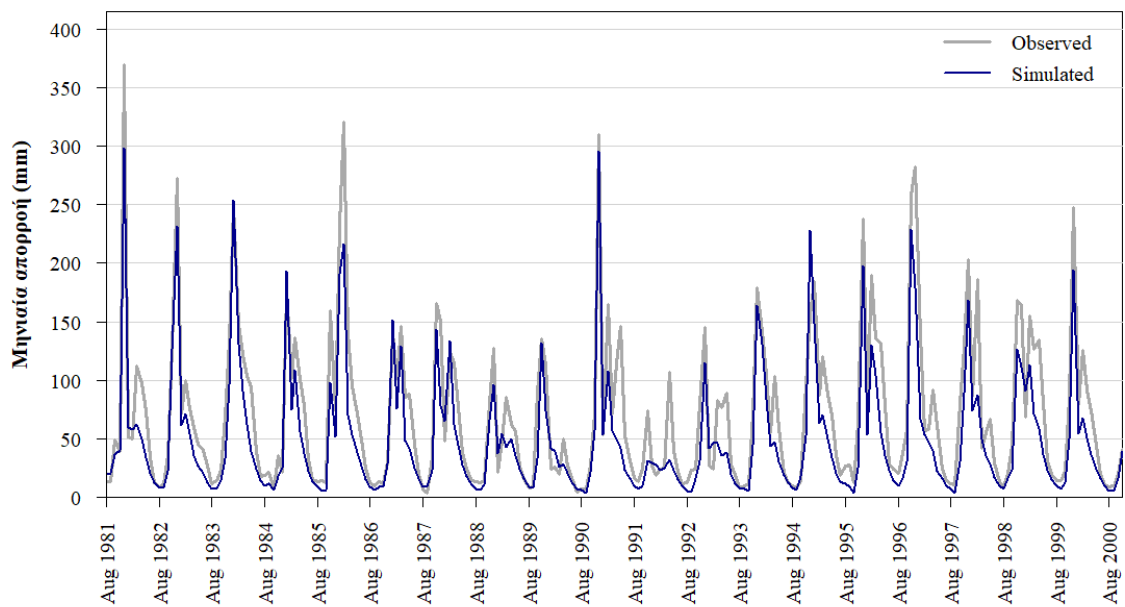
Εικόνα Π.52: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Λούρου (ΜΥΑ).



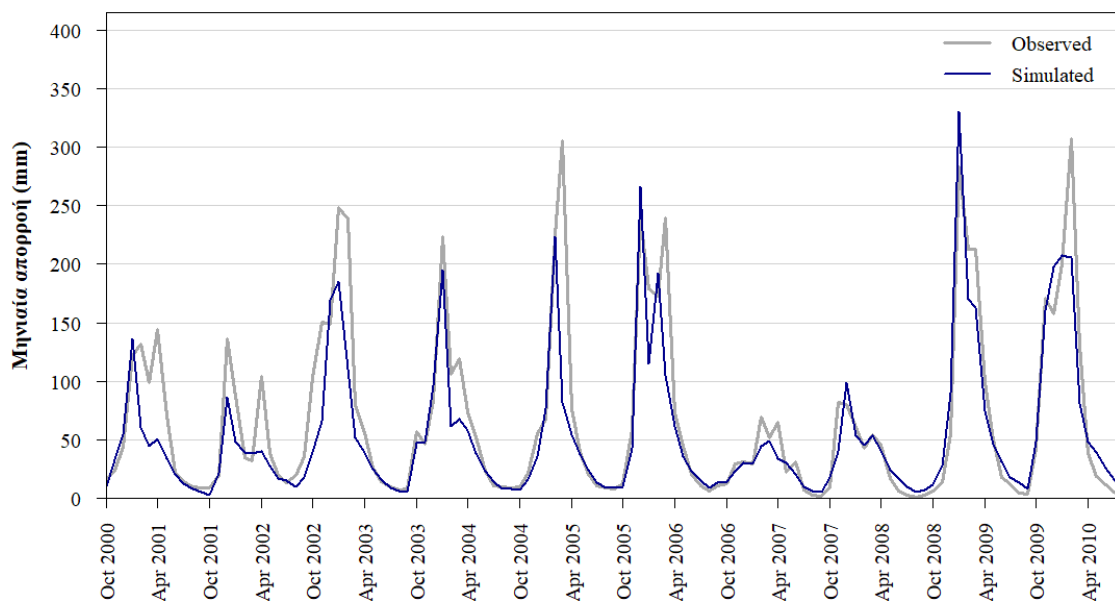
Εικόνα Π.53: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Μπούσδα (ΜΥΑ).



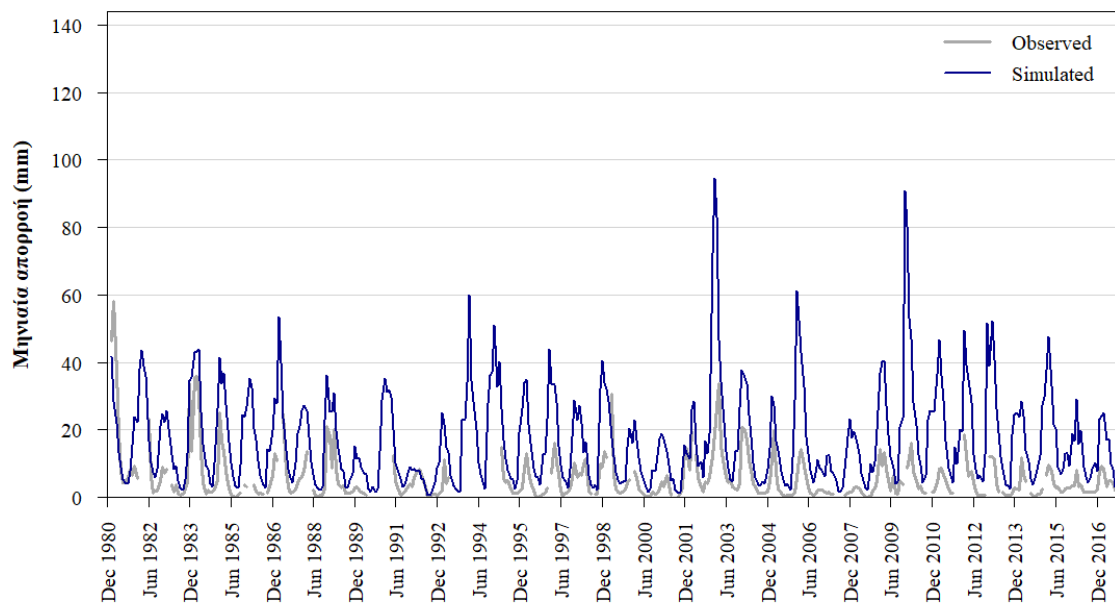
Εικόνα Π.54: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Νέδοντα (ΜΥΑ).



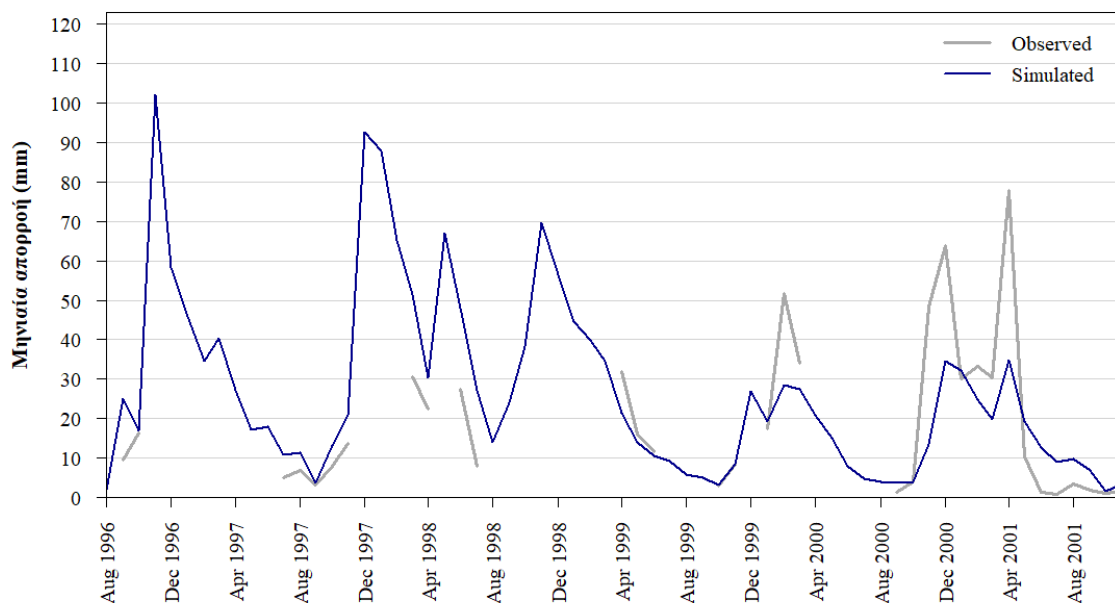
Εικόνα Π.55: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στο φράγμα Πουρναρίου (ΜΥΑ).



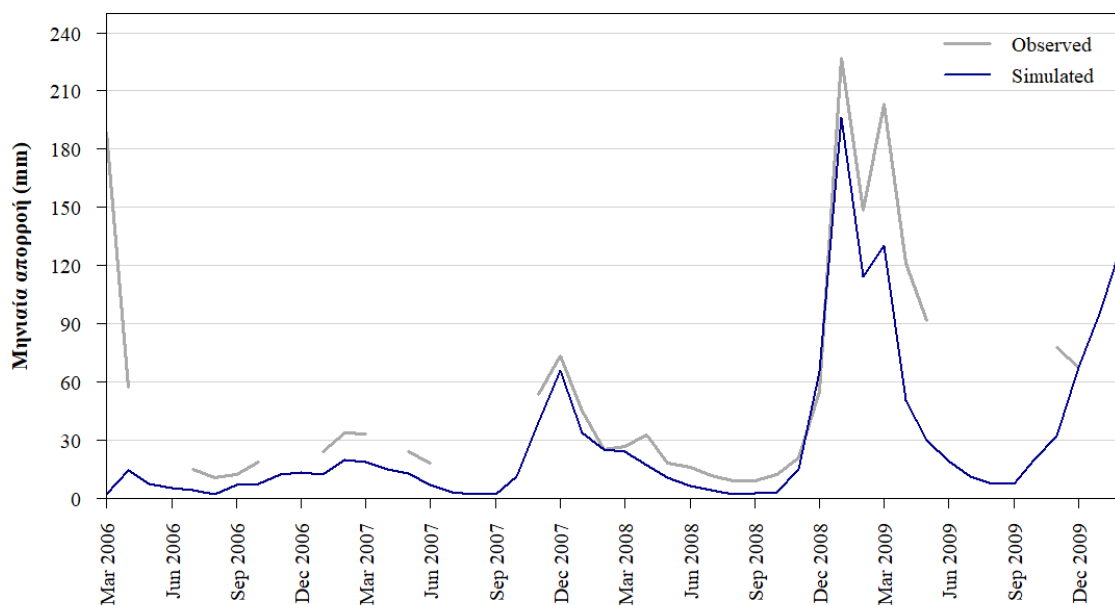
Εικόνα Π.56: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Πόρο Ρηγανίου - μετά την κατασκευή του φράγματος του Ευήνου (ΜΥΑ).



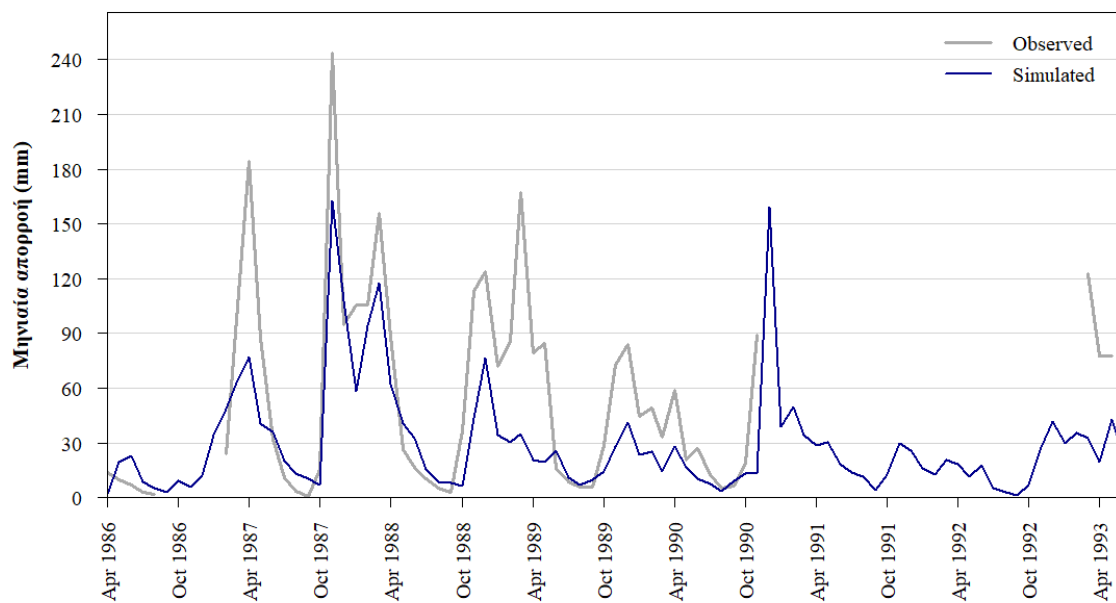
Εικόνα Π.57: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Σκοπιά (ΜΥΑ).



Εικόνα Π.58: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Τρίκορφο (ΜΥΑ).



Εικόνα Π.59: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Τριπόταμα (ΜΥΑ).



Εικόνα Π.60: Σύγκριση προσομοιωμένων και παρατηρημένων χρονοσειρών μηνιαίας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Ξηροπόταμου (ΜΥΑ).

Παράρτημα Δ: Αρχείο κώδικα R του υδρολογικού μοντέλου

Κώδικας ταυτόχρονης βαθμονόμησης 20 παραμέτρων με εφαρμογή σε 14 υδρολογικές λεκάνες

```
library(DEoptim)
```

#Ορισμός λεκανών με τα δεδομένα τους

```
basins <- list(  
  Glafkos = list(file = "path_to_glafkos_data.csv",  
                 weights = c(34.45, 34.45, 24.88, 6.22)/100),  
  Poros_no_dam = list(file = "path_to_poros_no_dam_data.csv",  
                     weights = c(0.31, 57.52, 35.39, 6.78)/100),  
  Mouzaki = list(file = "path_to_mouzaki_data.csv",  
                weights = c(8.32, 38.36, 49.48, 3.84)/100),  
  Kremasta = list(file = "path_to_kremasta_data.csv",  
                  weights = c(3.38, 30.34, 47.66, 18.62)/100),  
  Mesochora = list(file = "path_to_mesochora_data.csv",  
                   weights = c(0.02, 18.87, 55.97, 25.16)/100),  
  Ano_Drosini = list(file = "path_to_ano_drosini_data.csv",  
                    weights = c(3.35, 2.83, 62.35, 31.47)/100),  
  Evinos = list(file = "path_to_evinos_data.csv",  
                weights = c(0.71, 59.39, 29.98, 9.89)/100),  
  Avlaki = list(file = "path_to_avlaki_data.csv",  
                weights = c(3.55, 25.07, 52.14, 19.23)/100),  
  Mornos = list(file = "path_to_mornos_data.csv",  
                weights = c(28.56, 40.80, 23.36, 7.28)/100),  
  Pournari = list(file = "path_to_pournari_data.csv",  
                  weights = c(8.51, 36.74, 46.89, 7.86)/100),  
  Karytaina = list(file = "path_to_karytaina_data.csv",  
                   weights = c(35.24, 36.07, 20.30, 8.39)/100),  
  Pyli = list(file = "path_to_pyli_data.csv",  
              weights = c(15.41, 38.37, 44.31, 1.91)/100),  
  Vovousa = list(file = "path_to_vovousa_data.csv",  
                 weights = c(0.90, 19.03, 25.57, 54.50)/100),  
  Kleidonia = list(file = "path_to_kleidonia_data.csv",  
                   weights = c(18.82, 57.04, 19.82, 4.32)/100))
```

#Ανάγνωση των δεδομένων

```
for (b in names(basins)) {  
  df <- read.csv(basins[[b]]$file)  
  df$Date <- as.yearmon(df$Date, "%b-%y")  
  df$Date <- as.Date(df$Date)  
  
  basins[[b]]$P <- df$P  
  basins[[b]]$PET <- df$PET  
  basins[[b]]$Qobs <- df$Qobs}
```

#Κλήση simulated_runoff

```
source("path_to_P05_sim_model.R")
```

#NSE

```
calc_NSE <- function(Qobs, Qsim) {valid_idx <- complete.cases(Qobs, Qsim)}
```

```
Qobs <- Qobs[valid_idx]
Qsim <- Qsim[valid_idx]
1 - sum((Qobs - Qsim)^2) / sum((Qobs - mean(Qobs))^2)}
```

#Weighted model, όπου weights: τα % συμμετοχής των λεκανών στις ΜΥΑ

```
weighted_model <- function(params, P, PET, weights) {
  n <- length(P)
  Qsim_total <- numeric(n)
  Qs <- matrix(NA, nrow = n, ncol = 4)
  for(i in 1:n) {
    idx <- (i - 1) * 5 + 1
    param_i <- params[idx:(idx + 4)]
    Qi <- simulated_runoff(P, PET, param_i[1], param_i[2],
                          param_i[3], param_i[4], param_i[5])$Qsim
    Qs[i, ] <- Qi
    Qsim_total <- Qsim_total + weights[i] * Qi
  }
  return(list(Qsim = Qsim_total,
             Q1 = Qs[,1], Q2 = Qs[,2],
             Q3 = Qs[,3], Q4 = Qs[,4]))}
```

#Στοχική συνάρτηση: Objective function

```
objective_function <- function(params) {
  NSEs <- c()
  KGEs <- c()
  logNSEs <- c()
  total_penalty <- 0

  for (b in names(basins)) {
    P <- basins[[b]]$P
    PET <- basins[[b]]$PET
    Qobs <- basins[[b]]$Qobs
    weights <- basins[[b]]$weights

    output <- weighted_model(params, P, PET, weights)

    NSEs <- c(NSEs, calc_NSE(Qobs, output$Qsim))
    KGEs <- c(KGEs, KGE(Qobs, output$Qsim))
    logNSEs <- c(logNSEs, log_NSE(Qobs, output$Qsim))
  }

  #Ποινή εφόσον δεν ισχύει Q1 < Q2 < Q3 < Q4
  Qs <- cbind(output$Q1, output$Q2, output$Q3, output$Q4)
  violation <- pmax(0, Qs[,1] - Qs[,2]) +
    pmax(0, Qs[,2] - Qs[,3]) +
    pmax(0, Qs[,3] - Qs[,4])
  total_penalty <- total_penalty + sum(violation^2)}

  #Ποινή εφόσον δεν ισχύει K1 > K2 > K3 > K4
  K_vals <- params[c(1, 6, 11, 16)]
  K_violation <- pmax(0, K_vals[2] - K_vals[1]) +
    pmax(0, K_vals[3] - K_vals[2]) +
    pmax(0, K_vals[4] - K_vals[3])
  total_penalty <- total_penalty + 1e5 * K_violation
```

#Μέσος όρος μέτρων επίδοσης

```
meanNSE <- mean(NSEs, na.rm = TRUE)
meanKGE <- mean(KGEs, na.rm = TRUE)
meanLogNSE <- mean(logNSEs, na.rm = TRUE)
final_metric <- (meanNSE + meanKGE + meanLogNSE) / 3
return(-final_metric + 1e5 * total_penalty)}
```

#Όρια παραμέτρων

```
lower_bounds <- rep(c(10, 0, 0, 0, 0), 4)
upper_bounds <- rep(c(600, 0.5, 0.7, 0.7, 0.3), 4)
```

#DEoptim

```
result <- DEoptim(objective_function,
                  lower = lower_bounds, upper = upper_bounds,
                  control = DEoptim.control(trace = TRUE, itermax = 220, NP =
250, parallelType = 2))
best_params <- result$optim$bestmem
```

```
for (i in 1:4) {
  idx <- (i - 1) * 5 + 1
  params_submodel <- best_params[idx:(idx + 4)]
  cat(paste0("MYA", i, ": "), paste(round(params_submodel, 4), collapse = ", "),
"\n")}
```

#NSE ανά λεκάνη

```
for (b in names(basins)) {
  out <- weighted_model(best_params,
                        basins[[b]]$P,
                        basins[[b]]$PET,
                        basins[[b]]$weights)
  NSE_final <- calc_NSE(basins[[b]]$Qobs, out$Qsim)
  cat("\nΛεκάνη:", b, "-> NSE =", round(NSE_final, 4), "\n")}
```

#Επιπλέον κριτήριο CR_abs

```
CR_abs <- function(Qobs, Qsim) {
  valid_idx <- complete.cases(Qobs, Qsim)
  Qobs <- Qobs[valid_idx]
  Qsim <- Qsim[valid_idx]
  1 - sum(abs(Qobs - Qsim))/sum(abs(Qobs - mean(Qobs)))}
```

Κλήση του μοντέλου προσομοίωσης: P05_sim_model

```
library(DEoptim)
```

#Συνάρτηση μοντέλου

```
simulated_runoff <- function(P, PET, K, ni, kappa, lamda, mi, S_init = 100,  
G_init = 10)  
{n <- length(P)  
  Qd <- DP <- ETD <- INF <- S1 <- DPET <- ETs <- ET <- S2 <- PERC <- S3 <-  
  Qs <- S <- G1 <- Loss <- G2 <- Qb <- Qsim <- G <- numeric(n)  
  S[1] <- S_init  
  G[1] <- G_init  
  
  for (t in 2:n)  
  {Qd[t] <- ni * P[t] * exp(S[t-1]/K - 1)  
    DP[t] <- P[t] - Qd[t]  
    ETD[t] <- min(DP[t], PET[t])  
    INF[t] <- P[t] - Qd[t] - ETD[t]  
    S1[t] <- S[t - 1] + INF[t]  
    DPET[t] <- PET[t] - ETD[t]  
    ETs[t] <- ifelse(DPET[t] > 0, S1[t] * (1 - exp(-DPET[t] / K)), 0)  
    ET[t] <- ETD[t] + ETs[t]  
    S2[t] <- S1[t] - ETs[t]  
    PERC[t] <- kappa * S2[t]  
    S3[t] <- S2[t] - PERC[t]  
    Qs[t] <- max(0, S3[t] - K)  
    S[t] <- S3[t] - Qs[t]  
    G1[t] <- G[t-1] + PERC[t]  
    Loss[t] <- mi * G1[t]  
    G2[t] <- G1[t] - Loss[t]  
    Qb[t] <- lamda * G2[t]  
    Qsim[t] <- Qd[t] + Qs[t] + Qb[t]  
    G[t] <- G2[t] - Qb[t]}  
  return(list(Qsim = Qsim, S = S, G = G))}
```

#Μέτρο επίδοσης NSE

```
NSE <- function(Qobs, Qsim)  
{valid_idx <- complete.cases(Qobs, Qsim)  
  Qobs_valid <- Qobs[valid_idx]  
  Qsim_valid <- Qsim[valid_idx]  
  1 - sum((Qobs_valid - Qsim_valid)^2) / sum((Qobs_valid - mean(Qobs_valid))^2)}
```

#Μέτρο επίδοσης KGE

```
KGE <- function(Qobs, Qsim)  
{valid_idx <- complete.cases(Qobs, Qsim)  
  Qobs <- Qobs[valid_idx]  
  Qsim <- Qsim[valid_idx]  
  r <- cor(Qobs, Qsim)  
  alpha <- mean(Qsim)/mean(Qobs)  
  beta <- sd(Qsim)/sd(Qobs)  
  kge <- 1 - sqrt((r - 1)^2 + (alpha - 1)^2 + (beta - 1)^2)  
  return(kge)}
```

#Μέτρο επίδοσης logNSE

```
log_NSE <- function(Qobs, Qsim)
{valid_idx <- complete.cases(Qobs, Qsim) & Qobs > 0 & Qsim > 0
  Qobs_log <- log(Qobs[valid_idx])
  Qsim_log <- log(Qsim[valid_idx])
  1 - sum((Qobs_log - Qsim_log)^2) / sum((Qobs_log - mean(Qobs_log))^2)}
```

#Μέτρο επίδοσης CR_abs

```
CR_abs <- function(Qobs, Qsim)
{valid_idx <- complete.cases(Qobs, Qsim)
  Qobs_valid <- Qobs[valid_idx]
  Qsim_valid <- Qsim[valid_idx]
  1 - sum(abs(Qobs_valid - Qsim_valid))/sum(abs(Qobs_valid - mean(Qobs_valid)))}
```