

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Υδρολογική διερεύνηση | 3 |
| 1.1 | Σκοπός και μεθοδολογία..... | 3 |
| 1.2 | Γεωγραφικά δεδομένα και επεξεργασίες..... | 4 |
| 1.2.1 | Χάραξη λεκανών απορροής και υδρογραφικού δικτύου | 4 |
| 1.2.2 | Διαμόρφωση μονάδων υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ) | 6 |
| 1.2.3 | Υδρογεωλογικές ενότητες..... | 8 |
| 1.3 | Βροχομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες..... | 8 |
| 1.3.1 | Βροχομετρικοί σταθμοί..... | 8 |
| 1.3.2 | Συμπλήρωση και επέκταση δειγμάτων | 11 |
| 1.3.3 | Γεωγραφική μεταβλητότητα βροχοπτώσης | 11 |
| 1.3.4 | Εκτίμηση επιφανειακών βροχοπτώσεων..... | 12 |
| 1.4 | Εκτίμηση εξάτμισης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής | 15 |
| 1.4.1 | Μετεωρολογικοί σταθμοί και δεδομένα..... | 15 |
| 1.4.2 | Μεθοδολογία υπολογισμού εξάτμισης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής..... | 16 |
| 1.4.3 | Αναγωγή στη λεκάνη του Γαδουρά | 17 |
| 1.5 | Υδρομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες | 18 |
| 1.5.1 | Υδρομετρικοί σταθμοί | 18 |
| 1.5.2 | Επεξεργασία δεδομένων υδρομετρικού σταθμού Γαδουρά..... | 18 |
| 1.5.3 | Εκτίμηση ιστορικών εισροών φράγματος Γαδουρά..... | 24 |
| 1.6 | Μεθοδολογία υδρολογικής προσομοίωσης με το λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ | 27 |
| 1.6.1 | Ιστορικό..... | 27 |
| 1.6.2 | Φιλοσοφία μοντέλου και συνοπτική περιγραφή | 27 |
| 1.6.3 | Δεδομένα εισόδου | 29 |
| 1.6.4 | Μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών | 29 |
| 1.6.5 | Μοντέλο υπόγειας ροής | 32 |
| 1.6.6 | Μοντέλο κατανομής υδατικών πόρων | 33 |
| 1.7 | Προσαρμογή μοντέλου στη λεκάνη του Γαδουρά..... | 35 |
| 1.7.1 | Μεθοδολογία και παραδοχές..... | 35 |
| 1.7.2 | Σχηματοποίηση υδροσυστήματος | 36 |
| 1.7.3 | Υδρολογικές χρονοσειρές εισόδου | 37 |
| 1.7.4 | Αρχικές συνθήκες προσομοίωσης..... | 38 |
| 1.7.5 | Διατύπωση του προβλήματος βαθμονόμησης..... | 38 |
| 1.7.6 | Περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης..... | 40 |
| 1.7.7 | Αποτελέσματα μοντέλου και σχολιασμός..... | 40 |
| 1.8 | Στοχαστική υδρολογική προσομοίωση Ρόδου | 44 |
| 1.8.1 | Μεθοδολογικό πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης..... | 44 |
| 1.8.2 | Συνοπτική περιγραφή του λογισμικού ΚΑΣΤΑΛΙΑ..... | 45 |
| 1.8.3 | Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών σημειακών βροχοπτώσεων | 47 |
| 1.8.4 | Εφαρμογή μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ για στοχαστική προσομοίωση | 49 |
| 1.8.5 | Μέσα ετήσια ισοζύγια υπολεκανών και υδρογεωλογικών ενοτήτων | 50 |
| 1.8.6 | Εισροές φραγμάτων και λιμνοδεξαμενών | 52 |

1 Υδρολογική διερεύνηση

1.1 Σκοπός και μεθοδολογία

Στόχος της παρούσας διερεύνησης είναι η εκτίμηση του μηνιαίου υδρολογικού ισοζυγίου της Ρόδου, και ειδικότερα της επιφανειακής απορροής σε χαρακτηριστικές θέσεις, καθώς και της κατείδυσης, ήτοι της τροφοδοσίας των υποκείμενων υδροφόρων στρωμάτων μέσω της ακόρεστης ζώνης. Οι εν λόγω χρονοσειρές αποτελούν είσοδο του διαχειριστικού μοντέλου WEAP.

Για την υδρολογική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ 2.0, που περιγράφεται συνοπτικά στο υποκεφάλαιο 1.6. Η μεθοδολογική προσέγγιση περιλαμβάνει δύο φάσεις. Σε πρώτη φάση, το μοντέλο προσαρμόστηκε (βαθμονομήθηκε) για την αναπαραγωγή της παρατηρημένης απορροής σε χαρακτηριστικές θέσεις της λεκάνης του Γαδουρά, για την περίοδο 2000-2010. Στη συνέχεια, οι παράμετροι που προέκυψαν για τη συγκεκριμένη λεκάνη (οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές μονάδες υδρολογικής απόκρισης, ήτοι κατηγορίες εδαφών), εφαρμόστηκαν στο σύνολο του νησιού, για το οποίο πραγματοποιήθηκε στοχαστική προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών, με είσοδο συνθετικές βροχοπτώσεις μήκους 1000 ετών.

Στην Εικόνα 1.1 απεικονίζεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Ρόδου και οι θέσεις των κύριων υδραυλικών έργων, υφιστάμενων και σχεδιαζόμενων (φράγματα και λιμνοδεξαμενές).

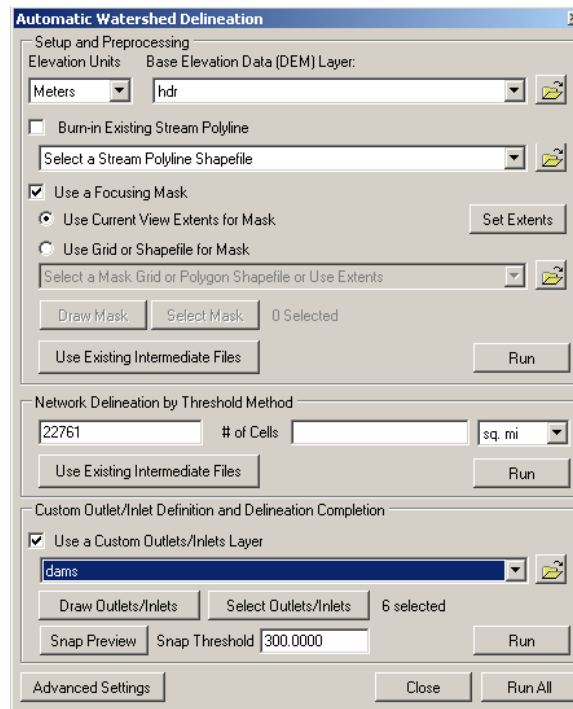


Εικόνα 1.1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και θέσεις έργων αξιοποίησης επιφανειακών υδατικών πόρων (φράγματα, λιμνοδεξαμενές). Με (M) επισημαίνονται τα μελλοντικά ή υπό κατασκευή έργα.

1.2 Γεωγραφικά δεδομένα και επεξεργασίες

1.2.1 Χάραξη λεκανών απορροής και υδρογραφικού δικτύου

Ο διαχωρισμός της Ρόδου σε υπολεκάνες έγινε με τρόπο ώστε να είναι συνεπής προς την προσέγγιση της πρόσφατης μελέτης διαχείρισης υδατικών πόρων του ΥΠΙΑΝ (Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου, 2005). Η χάραξη των υπολεκανών και του υδρογραφικού δικτύου έγινε χρησιμοποιώντας το εργαλείο «Automatic Watershed Delineation» του συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας (ΣΓΠ) MapWindow, με τις ρυθμίσεις που φαίνονται στην Εικόνα 1.2. Για τις χωρικές επεξεργασίες χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Εικόνας 1.1, διακριτότητας 25×25 m.



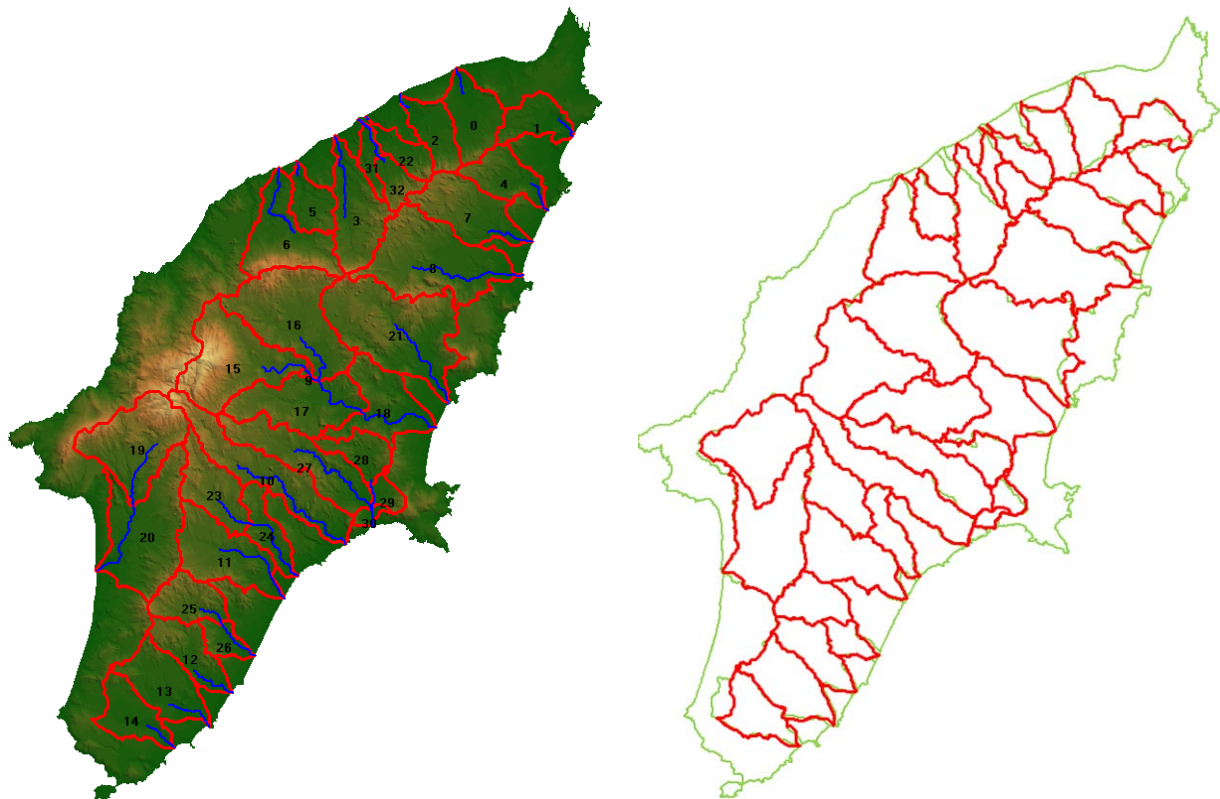
Εικόνα 1.2: Εργαλείο αυτόματης χάραξης λεκανών και υδρογραφικού δικτύου.

Για να χαρακτηριστεί σημείο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους ως σημείο υδατορεύματος πρέπει να τροφοδοτείται από ικανό αριθμό κυττάρων. Αυτός ο αριθμός αποτελεί παράμετρο που ορίζεται από τον χρήστη. Όσο χαμηλότερο είναι αυτό το όριο τόσο αυξάνεται ο αριθμός των κλάδων και των υπολεκανών που θα χαραχθούν. Το όριο αυτό επιλέχθηκε ίσο με 22761 κύτταρα για όλη την περιοχή της Ρόδου (εκτός από την λεκάνη του Σορωνή που ήταν 1000 κύτταρα), γιατί με αυτή την τιμή επιτυγχάνεται χάραξη παρόμοια με αυτή του Διαχειριστικού Σχεδίου Αιγαίου (Εικόνα 1.3, δεξιά). Στη χάραξη δεν περιελήφθησαν όσες περιοχές είχαν χαρακτηριστεί στο εν λόγω σχέδιο ως «ΥΠΟΛΟΙΠΑ Ν. ΡΟΔΟΥ», στα οποία περιλαμβάνονται διάφορες παραθαλάσσιες λεκάνες, μικρής έκτασης (κάτω από το ορισθέν κατώφλι). Ωστόσο, στην υδρολογική προσομοίωση, το τμήμα αυτό, συνολικής έκτασης 466.5 km², θεωρήθηκε ως εικονική λεκάνη, η κατείδυση της οποίας τροφοδοτεί τα υποκείμενα υδροφόρα στρώματα (βλ. 1.8.5).

Τέλος, για τον υπολογισμό της παροχής στα υπόλοιπα σημεία ενδιαφέροντος, ορίστηκαν πάνω στο υδρογραφικό δίκτυο οι θέσεις των υφιστάμενων και μελλοντικών έργων καθώς και του υδρομετρικού σταθμού Γαδουρά, ανάντη των οποίων χαράχθηκαν οι εσωτερικές υπολεκάνες του υδροσυστήματος.

Η τελική χάραξη των υπολεκανών και του υδρογραφικού δικτύου απεικονίζεται στην Εικόνα 1.3, αριστερά. Διαμορφώθηκαν συνολικά 33 υπολεκάνες (και μια εικονική), των οποίων υπολογίστηκαν το εμβαδό και το μέσο υψόμετρο (Πίνακας 1.1). Για τον υπολογισμό του τελευταίου, δημιουργήθηκε

η τομή του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων κάθε υπολεκάνης ξεχωριστά, με βάση το οποίο παρήχθη το αντίστοιχο αρχείο ισοϋψών, τύπου shapefile, με υψομετρική διακριτότητα 2 m.



Εικόνα 1.3: Χάραξη υπολεκανών (με τον αντίστοιχο κωδικό τους) και υδρογραφικού δικτύου (αριστερά) και συγκριτική απεικόνισή τους (δεξιά) με την αντίστοιχη χάραξη που υποβλήθηκε στα πλαίσια της Διαχειριστικής Μελέτης Αιγαίου (πράσινο περίβλημα).

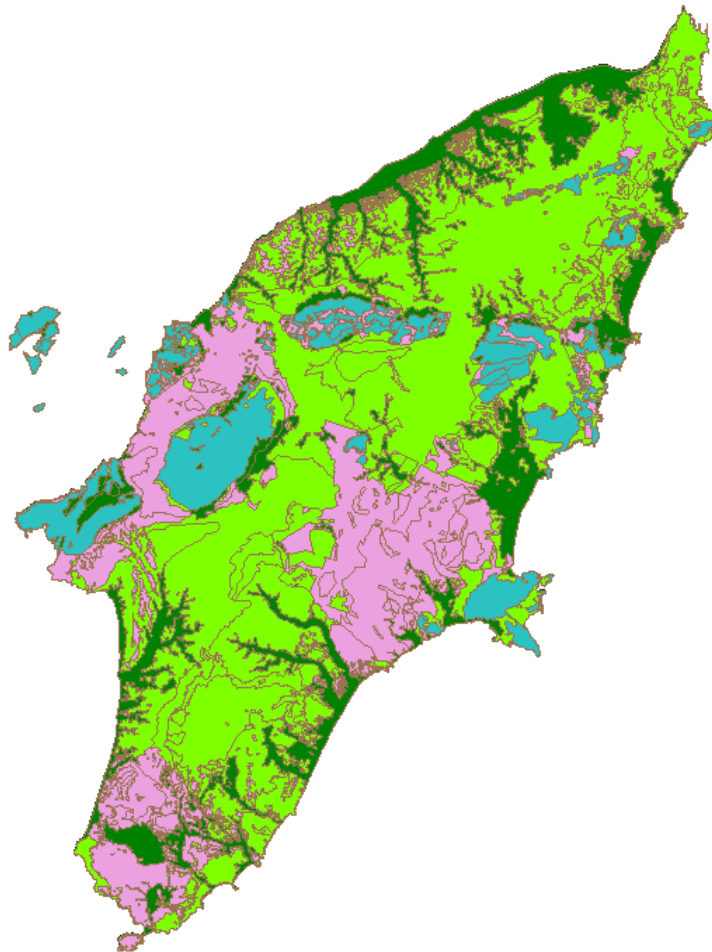
Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη υπολεκανών.

| Λεκάνη | Έκταση (km ²) | Μέσο υψόμετρο (m) | Λεκάνη | Έκταση (km ²) | Μέσο υψόμετρο (m) |
|--------|---------------------------|-------------------|--------|---------------------------|-------------------|
| 0 | 25.21 | 186.2 | 17 | 40.60 | 252.6 |
| 1 | 17.24 | 90.9 | 18 | 32.49 | 209.1 |
| 2 | 18.03 | 186.7 | 19 | 46.62 | 488.1 |
| 3 | 34.21 | 284.3 | 20 | 56.60 | 286.9 |
| 4 | 20.50 | 202.2 | 21 | 70.24 | 315.9 |
| 5 | 15.22 | 134.4 | 22 | 12.02 | 188.9 |
| 6 | 37.79 | 371.2 | 23 | 26.14 | 346.8 |
| 7 | 34.09 | 246.7 | 24 | 15.81 | 168.5 |
| 8 | 61.43 | 315.0 | 25 | 19.82 | 318.2 |
| 9 | 0.99 | 173.4 | 26 | 9.23 | 177.7 |
| 10 | 45.65 | 373.8 | 27 | 38.80 | 261.7 |
| 11 | 38.16 | 273.4 | 28 | 14.89 | 198.7 |
| 12 | 21.19 | 236.1 | 29 | 6.34 | 206.7 |
| 13 | 29.56 | 166.3 | 30 | 3.10 | 144.1 |
| 14 | 20.90 | 146.0 | 31 | 7.58 | 150.0 |
| 15 | 51.63 | 527.3 | 32 | 10.53 | 268.9 |
| 16 | 57.57 | 354.3 | | | |

1.2.2 Διαμόρφωση μονάδων υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ)

Στην προσέγγιση που υιοθετείται, ως μονάδες υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ) νοούνται περιοχές με παρόμοια γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, τα οποία αποδίδονται μέσω κοινών τιμών παραμέτρων του μοντέλου προσομοίωσης των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών. Η κατηγοριοποίηση των εδαφικών σχηματισμών και το πλήθος των ΜΥΑ ορίζονται από τον χρήστη, με κριτήριο την επιθυμητή λεπτομέρεια της παραμετροποίησης (αφού το πλήθος των παραμέτρων του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας είναι ανάλογο του αριθμού των ΜΥΑ).

Στην παρούσα ανάλυση, η δημιουργία των ΜΥΑ βασίστηκε στο συναφές θεματικό επίπεδο G_Rodos.shp, που διαμορφώθηκε στα πλαίσια της Διαχειριστικής Μελέτης Αιγαίου. Ειδικότερα, στον σχετικό πίνακα χαρακτηριστικών τιμών του υπάρχει το πεδίο HYDROG, στο οποίο περιγράφονται οι επιφανειακές εμφανίσεις των αντίστοιχων γεωλογικών σχηματισμών. Οι σχηματισμοί ταξινομήθηκαν στις τέσσερις ομάδες κατάταξης του Πίνακα 1.2, με βάση την υδατοπερατότητα. Οι δύο πρώτες ομάδες (1Α, 1Β) αφορούν σε σχηματισμούς μέτριας περατότητας (κυρίως προσχώσεις), η ομάδα 2 περιλαμβάνει σχηματισμούς υψηλής περατότητας (π.χ. ασβεστόλιθοι), ενώ η ομάδα 3 περιλαμβάνει σχηματισμούς χαμηλής περατότητας (π.χ. φλύσχης). Στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, προκειμένου να εξασφαλιστεί όσο το δυνατό πιο φειδωλή παραμετροποίηση, θεωρήθηκαν κοινές τιμές παραμέτρων για τις ομάδες 1Α και 1Β, παρόλο που οι σχηματισμοί της πρώτης έχουν λίγο μεγαλύτερη περατότητα σε σχέση με τη δεύτερη.



Εικόνα 1.4: Μονάδες υδρολογικής απόκρισης Ρόδου, χρωματισμένες ανάλογα με τον κωδικό υδατοπερατότητας (πράσινο σκούρο: 1Α, πράσινο ανοιχτό: 1Β, γαλάζιο: 2, βιολετί: 3).

Πίνακας 1.2: Κατηγοριοποίηση εδαφικών σχηματισμών σε τέσσερις ΜΥΑ.

| ΜΥΑ | Περιγραφή |
|-----|---|
| 1Α | Αλλούβια, προσχώσεις, πλευρικά κορήματα, κώνοι κορημάτων, αδρομερείς χειμαρρώδεις αποθέσεις, θαλάσσιες αναβαθμίδες. Σύστημα λεβαντινίων ιζημάτων: εναλλαγές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών και μαργών μεγάλου πάχους. |
| 1Β | Σχηματισμός Σγούρου: εναλλαγές μαργών χαλαρών κροκαλοπαγών και άμμων με αργιλικά πετρώματα. Σύστημα Βάτη: εναλλαγές μαργών με ψαμμίτες και κροκαλοπαγή. |
| 2 | Μάρμαρα με παρεμβολές η εναλλαγές, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων κερατολίθων. Μάρμαρα, ασβεστόλιθοι, δολομίτες, πυριτωμένα μάρμαρα, κερατόλιθοι, ραδιολαρίτες, χαλαζίτες |
| 3 | Οφιόλιθοι, σερπεντινίτες, περιδοτίτες γάβροι, διαβάσες κλπ. Φλύσχης: ψαμμίτες, αργιλικός σχιστόλιθος, ιλυόλιθος |

Πίνακας 1.3: Εκτάσεις ΜΥΑ που αναπτύσσονται στις υπολεκάνες και αντίστοιχα ποσοστά.

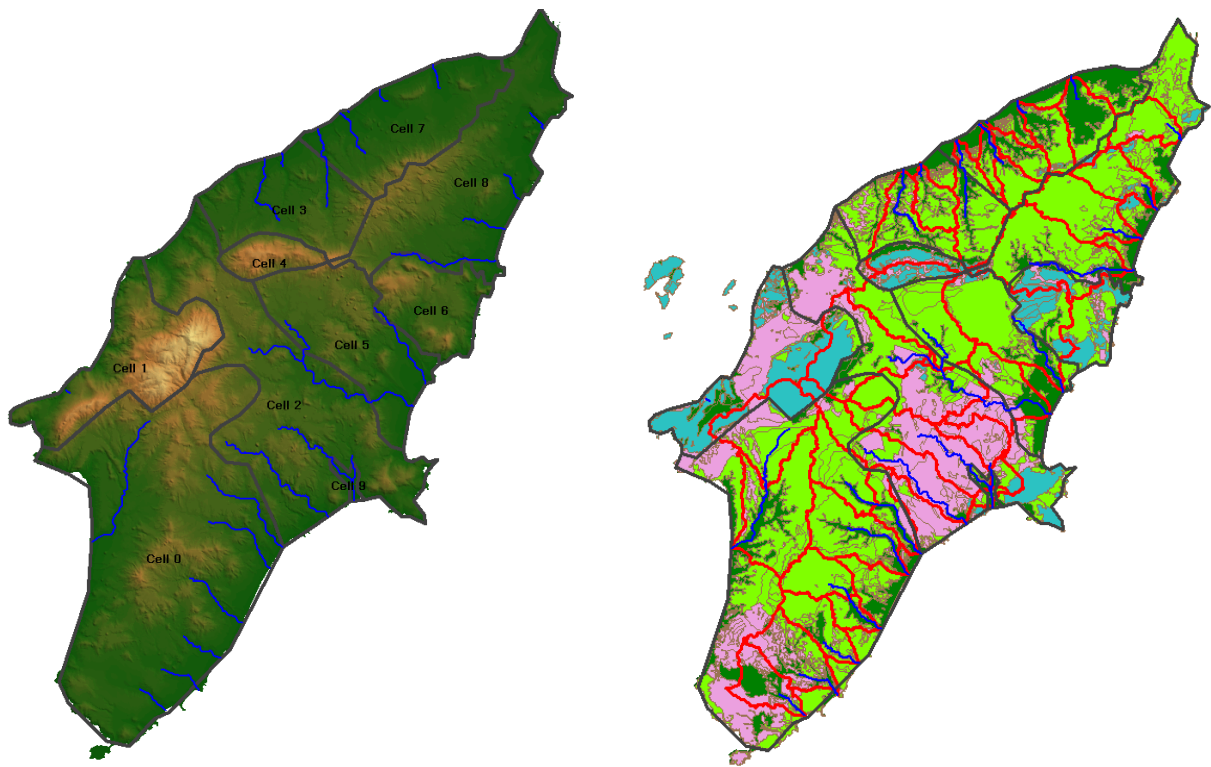
| Λεκάνη | Έκταση ΜΥΑ (km ²) | | | | Ποσοστό (%) | | | |
|--------|-------------------------------|--------|-------|--------|-------------|------|------|-------|
| | 1Α | 1Β | 2 | 3 | 1Α | 1Β | 2 | 3 |
| 0 | 13.17 | 10.78 | 1.21 | 0.06 | 52.2 | 42.7 | 4.8 | 0.2 |
| 1 | 0.28 | 15.71 | 0.44 | 0.80 | 1.6 | 91.1 | 2.6 | 4.6 |
| 2 | 5.16 | 12.06 | 0.60 | 0.21 | 28.6 | 66.9 | 3.3 | 1.2 |
| 3 | 8.57 | 24.74 | 0.79 | 0.12 | 25.1 | 72.3 | 2.3 | 0.3 |
| 4 | 1.75 | 16.71 | 1.95 | 0.09 | 8.5 | 81.5 | 9.5 | 0.4 |
| 5 | 2.62 | 11.89 | 0.00 | 0.71 | 17.2 | 78.2 | 0.0 | 4.7 |
| 6 | 9.49 | 17.19 | 6.74 | 4.36 | 25.1 | 45.5 | 17.8 | 11.5 |
| 7 | 1.20 | 32.47 | 0.42 | 0.00 | 3.5 | 95.3 | 1.2 | 0.0 |
| 8 | 8.25 | 40.31 | 9.33 | 3.54 | 13.4 | 65.6 | 15.2 | 5.8 |
| 9 | 0.10 | 0.72 | 0.17 | 0.00 | 10.1 | 72.6 | 17.3 | 0.0 |
| 10 | 2.01 | 15.11 | 2.89 | 25.63 | 4.4 | 33.1 | 6.3 | 56.2 |
| 11 | 6.94 | 30.76 | 0.00 | 0.46 | 18.2 | 80.6 | 0.0 | 1.2 |
| 12 | 3.35 | 17.26 | 0.00 | 0.59 | 15.8 | 81.4 | 0.0 | 2.8 |
| 13 | 6.41 | 9.66 | 0.00 | 13.50 | 21.7 | 32.7 | 0.0 | 45.7 |
| 14 | 7.86 | 1.72 | 0.00 | 11.32 | 37.6 | 8.2 | 0.0 | 54.2 |
| 15 | 7.69 | 19.93 | 13.65 | 10.36 | 14.9 | 38.6 | 26.4 | 20.1 |
| 16 | 2.02 | 44.37 | 8.27 | 2.92 | 3.5 | 77.1 | 14.4 | 5.1 |
| 17 | 2.19 | 20.12 | 0.97 | 17.32 | 5.4 | 49.6 | 2.4 | 42.7 |
| 18 | 6.89 | 10.56 | 0.19 | 14.86 | 21.2 | 32.5 | 0.6 | 45.7 |
| 19 | 2.59 | 20.43 | 11.67 | 11.93 | 5.6 | 43.8 | 25.0 | 25.6 |
| 20 | 11.87 | 41.91 | 0.00 | 2.83 | 21.0 | 74.0 | 0.0 | 5.0 |
| 21 | 9.45 | 45.09 | 14.09 | 1.62 | 13.5 | 64.2 | 20.1 | 2.3 |
| 22 | 3.60 | 8.01 | 0.41 | 0.00 | 29.9 | 66.6 | 3.4 | 0.0 |
| 23 | 1.91 | 24.08 | 0.00 | 0.15 | 7.3 | 92.1 | 0.0 | 0.6 |
| 24 | 3.95 | 7.60 | 0.00 | 4.27 | 25.0 | 48.1 | 0.0 | 27.0 |
| 25 | 0.53 | 19.30 | 0.00 | 0.00 | 2.7 | 97.3 | 0.0 | 0.0 |
| 26 | 2.60 | 6.32 | 0.00 | 0.31 | 28.2 | 68.5 | 0.0 | 3.3 |
| 27 | 2.23 | 9.50 | 0.00 | 27.07 | 5.8 | 24.5 | 0.0 | 69.8 |
| 28 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 14.89 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 |
| 29 | 0.69 | 2.30 | 1.82 | 1.53 | 10.9 | 36.3 | 28.7 | 24.2 |
| 30 | 0.90 | 1.66 | 0.22 | 0.33 | 28.9 | 53.4 | 7.2 | 10.5 |
| 31 | 2.72 | 4.86 | 0.00 | 0.01 | 35.8 | 64.1 | 0.0 | 0.1 |
| 32 | 0.87 | 9.54 | 0.01 | 0.11 | 8.2 | 90.6 | 0.1 | 1.0 |
| Σύνολο | 139.83 | 552.65 | 75.85 | 171.89 | 14.9 | 58.8 | 8.1 | 18.3 |

Στον πίνακα χαρακτηριστικών τιμών του G_Rodos.shp προστέθηκε το πεδίο PERM_ID, στο οποίο δόθηκαν τιμές από 1 έως 4, ανάλογα σε ποια κατηγορία ανήκει ο κάθε σχηματισμός. Η επεξεργασία του θεματικού επιπέδου έγινε με το εργαλείο «Singleparts to multipart» του Qgis, χρησιμοποιώντας ως «Unique id field» το πεδίο PERM_ID. Το αρχείο που προέκυψε χρησιμοποιήθηκε ως το μοναδικό επίπεδο για την παραγωγή των ΜΥΑ, αφού εξασφαλίστηκε ότι το πεδίο PERM_ID κατέχει την πρώτη θέση του πίνακα χαρακτηριστικών τιμών.

Οι τέσσερις ΜΥΑ που σχηματίστηκαν φαίνονται στην Εικόνα 1.4, ενώ η έκταση που καταλαμβάνουν ανά υπολεκάνη δίνεται στον Πίνακα 1.3. Η περιοχή μελέτης κυριαρχείται από σχηματισμούς μέτριας περατότητας (αλλούβια, προσχώσεις, κροκαλοπαγή), ενώ οι σχηματισμοί υψηλής και χαμηλής περατότητας καταλαμβάνουν ποσοστό 8.1% και 18.3%, αντίστοιχα.

1.2.3 Υδρογεωλογικές ενότητες

Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε εννέα υδρογεωλογικές ενότητες (Εικόνα 1.5), που τροφοδοτούνται από την κατείσδυση διαμέσου κάθε συνδυασμού υπολεκανών και μονάδων υδρολογικής απόκρισης. Η μέση ετήσια κατείσδυση θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει τα ρυθμιστικά αποθέματα των αντίστοιχων υδροφόρων στρωμάτων.

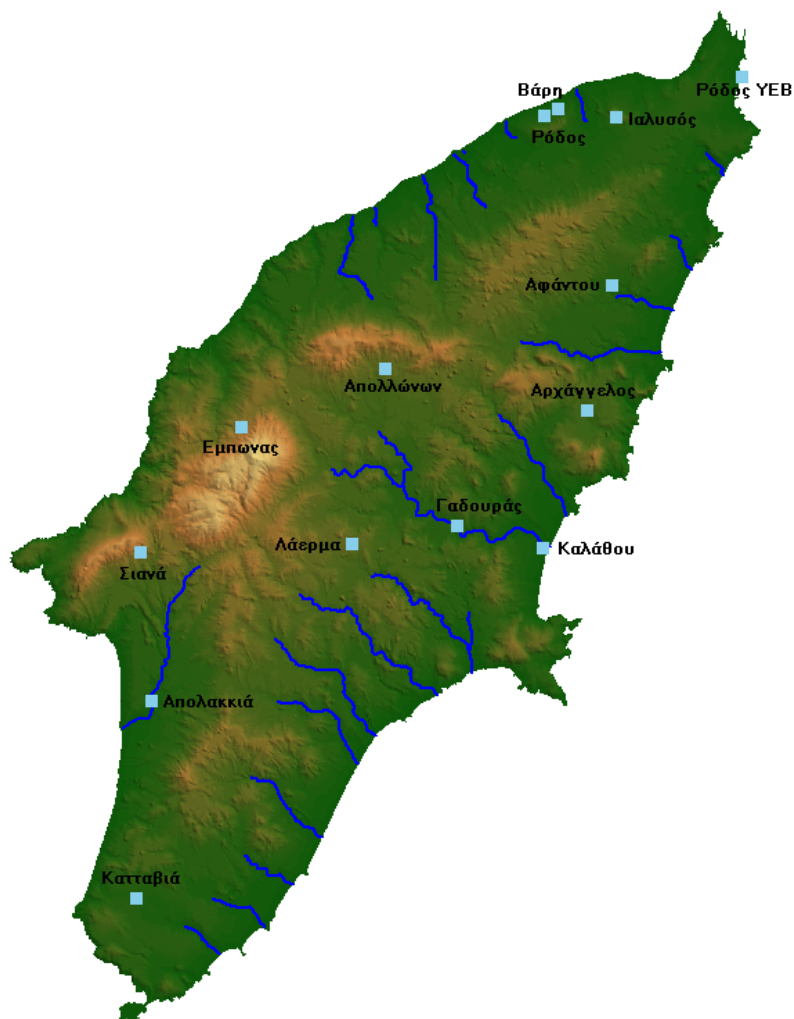


Εικόνα 1.5: Αρίθμηση κυττάρων, τα οποία αντιπροσωπεύουν διαφορετικές υδρογεωλογικές ενότητες (αριστερά), και τομή τους με τις υπολεκάνες και τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης (δεξιά).

1.3 Βροχομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες

1.3.1 Βροχομετρικοί σταθμοί

Για την εκτίμηση της βροχόπτωσης συλλέχθηκαν τα βροχομετρικά δεδομένα (σε μηνιαία κλίμακα) από 13 σταθμούς, που απεικονίζονται στο χάρτη της Εικόνας 1.6. Τα χαρακτηριστικά των σταθμών φαίνονται στον Πίνακα 1.4. Τα δείγματα αυτά καλύπτουν διάφορες περιόδους, με κοινή λήξη τον Δεκέμβριο του 2002, και ελήφθησαν από τη Διαχειριστική Μελέτη Αιγαίου.



Εικόνα 1.6: Βροχομετρικοί σταθμοί περιοχής μελέτης.

Πίνακας 1.4: Βροχομετρικά δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης.

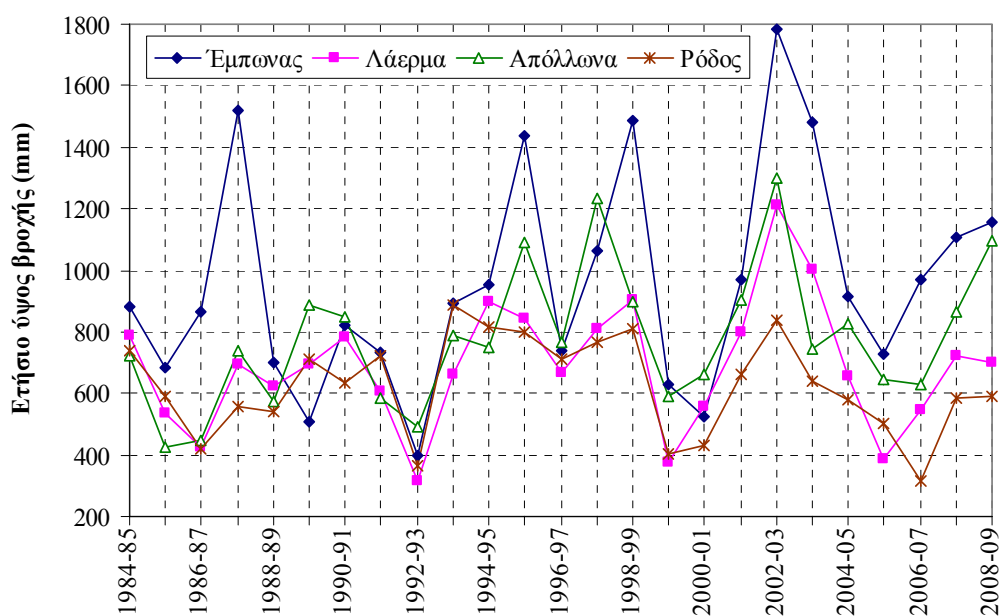
| Όνομασία | Υπηρεσία | Υψόμετρο σταθμού (m) | Αρχή δείγματος | Λήξη δείγματος | Μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm) |
|------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|------------------------------|
| Απολακκιά | ΥΠΑΑΤ | 64.0 | Μαρ-65 | Δεκ-02 | 535.7 |
| Απόλλωνα | ΥΠΑΑΤ | 317.6 | Νοε-84 | Δεκ-09 | 766.0 |
| Αρχάγγελος | ΝΑ Δωδεκανήσου | 185.0 | Φεβ-87 | Δεκ-02 | 697.4 |
| Αφάντου | ΥΠΑΑΤ | 48.0 | Ιαν-93 | Δεκ-02 | 852.4 |
| Βάρη | ΕΘΙΑΓΕ | 28.0 | Ιαν-64 | Σεπ-04 | 699.0 |
| Γαδουράς | ΥΠΕΧΩΔΕ | 117.0 | Οκτ-00 | Απρ-10 | 754.2 |
| Έμπωνας | ΥΠΑΑΤ | 446.7 | Νοε-84 | Δεκ-09 | 926.1 |
| Καλάθου | ΝΑ Δωδεκανήσου | 5.0 | Μαρ-89 | Δεκ-02 | 891.2 |
| Κατταβιά | ΥΠΑΑΤ | 78.0 | Δεκ-66 | Μαρ-02 | 515.8 |
| Λάερμα | ΥΠΑΑΤ | 320.2 | Δεκ-84 | Δεκ-09 | 629.1 |
| Ρόδος | ΕΜΥ | 8.4 | Ιαν-55 | Απρ-10 | 677.9 |
| Ρόδος | ΥΕΒ | 4.0 | Σεπ-89 | Δεκ-03 | 814.0 |
| Σιάννα | ΥΠΑΑΤ | 453.8 | Νοε-84 | Δεκ-02 | 531.6 |

Σημείωση: Τα μέσα ετήσια ύψη βροχής έχουν υπολογιστεί με βάση τα πρωτογενή δείγματα.

Πίνακας 1.5: Μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης στους σταθμούς της περιοχής μελέτης (mm).

| Σταθμός | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
| Απολακκιά | 41.1 | 83.9 | 112.4 | 109.1 | 79.7 | 63.2 | 25.0 | 13.7 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 5.0 |
| Απόλλωνα | 76.9 | 102.1 | 163.6 | 163.5 | 119.8 | 89.3 | 46.6 | 26.3 | 0.3 | 0.5 | 0.6 | 6.7 |
| Αρχάγγελος | 71.4 | 112.1 | 161.7 | 127.6 | 92.8 | 59.7 | 39.8 | 10.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4.6 |
| Αφάντου | 49.0 | 134.7 | 206.1 | 145.3 | 113.3 | 78.1 | 58.0 | 14.9 | 0.1 | 0.2 | 2.2 | 11.4 |
| Βάρη | 56.1 | 90.4 | 146.9 | 157.9 | 107.7 | 86.8 | 30.3 | 17.7 | 1.7 | 0.0 | 0.1 | 2.9 |
| Γαδουράς | 52.5 | 93.5 | 175.8 | 161.5 | 104.0 | 57.4 | 54.5 | 30.5 | 0.8 | 0.2 | 1.5 | 15.4 |
| Έμπωνας | 73.8 | 115.8 | 216.5 | 204.1 | 163.3 | 105.8 | 56.9 | 19.0 | 1.3 | 0.1 | 0.0 | 9.2 |
| Καλάθου | 133.7 | 96.6 | 153.0 | 194.3 | 157.1 | 109.1 | 44.0 | 9.5 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 2.7 |
| Κατταβιά | 53.2 | 68.6 | 105.3 | 113.9 | 74.4 | 56.3 | 34.9 | 12.1 | 2.1 | 0.0 | 0.0 | 1.5 |
| Λαέρμα | 79.2 | 97.2 | 150.5 | 137.2 | 98.2 | 67.5 | 32.4 | 18.6 | 0.0 | 0.2 | 0.5 | 12.6 |
| Ρόδος EMY | 57.0 | 90.7 | 152.5 | 149.9 | 103.4 | 71.0 | 28.8 | 16.6 | 1.8 | 0.3 | 0.2 | 6.6 |
| Ρόδος YEB | 85.4 | 135.7 | 189.2 | 139.2 | 113.4 | 79.2 | 38.9 | 22.8 | 0.0 | 0.2 | 3.4 | 2.5 |
| Σιάννα | 47.2 | 86.1 | 125.7 | 97.6 | 85.4 | 68.0 | 33.4 | 15.4 | 0.3 | 0.2 | 0.0 | 4.8 |

Σημείωση: Τα μέσα μηνιαία ύψη βροχής έχουν υπολογιστεί με βάση τα πρωτογενή δείγματα.



Εικόνα 1.7: Ετήσιες χρονοσειρές βροχόπτωσης υδρολογικών ετών 1984-85 έως 2008-09 σε χαρακτηριστικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης.

Στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης επικαιροποιήθηκαν οι χρονοσειρές των σταθμών Ρόδου (EMY), Λαέρμα (ΥΠΑΑΤ), Έμπωνας (ΥΠΑΑΤ), Απόλλωνα (ΥΠΑΑΤ) και φράγματος Γαδουρά (ΥΠΕΧΩΔΕ). Η επιλογή των συγκεκριμένων σταθμών έγινε για τις ανάγκες της υδρολογικής προσομοίωσης του λεκάνης του Γαδουρά, η οποία αφορά μόνο στην τελευταία δεκαετία, οπότε διατίθενται εκτιμήσεις απορροής σε τρεις θέσεις της (υδρομετρικός σταθμός γέφυρας Λαέρμα, φράγμα, έξοδος). Για όλους τους σταθμούς πλην του Γαδουρά ψηφιοποιήθηκαν τα αντίστοιχα μηνιαία δελτία παρατηρήσεων, ενώ για τον τηλεμετρικό σταθμό του φράγματος συναθροίστηκαν οι λεπτής (από 3 έως 5 min) χρονικής κλίμακας καταγραφές του βροχογράφου, η συνέπεια των οποίων ελέγχθηκε με βάση τα αντίστοιχα ημερήσια δεδομένα, που παράγονται αυτόματα από το τηλεμετρικό σύστημα.

Στον Πίνακα 1.5 δίνονται οι μέσες τιμές των πρωτογενών δειγμάτων, σε μηνιαία κλίμακα. Ακόμη, στα διαγράμματα της Εικόνας 1.7 απεικονίζεται η εξέλιξη των ετήσιων υψών βροχής (μετά από συμπλήρωση των κενών τους) την τελευταία 25ετία, στους σταθμούς Έμπωνα, Λαέρμα, Απόλλων και Ρόδου (ΕΜΥ). Είναι εμφανές ότι η βροχόπτωση παρουσιάζει πολύ έντονη χρονική μεταβλητότητα. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η ελάχιστη ετήσια τιμή στον Έμπωνα (353.2 mm, το 1992-93) σε σχέση με την αντίστοιχη μέγιστη (1781.3 mm, το 2002-03) διαφέρουν μισή τάξη μεγέθους.

1.3.2 Συμπλήρωση και επέκταση δειγμάτων

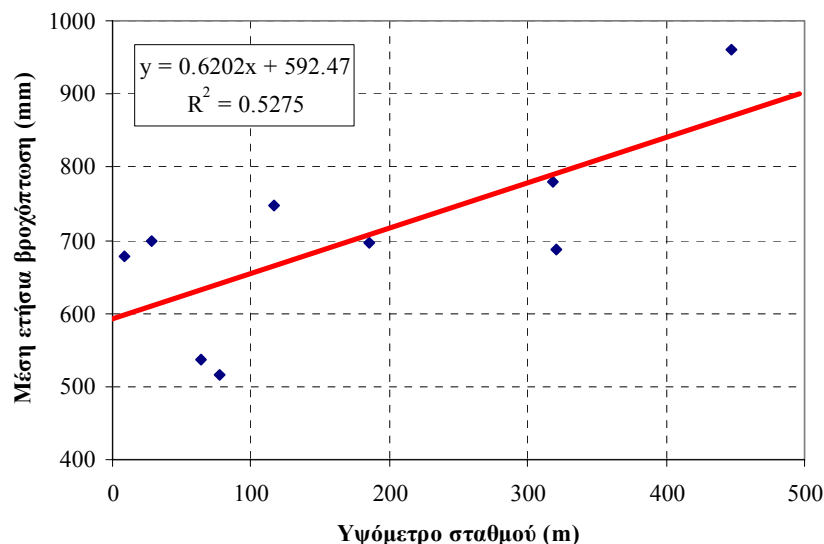
Για τη χρονική περίοδο βαθμονόμησης του υδρολογικού μοντέλου (Οκτ. 2000 έως Απρ. 2010), και προκειμένου να παραχθούν οι επιφανειακές βροχοπτώσεις των υπολεκανών του υδροσυστήματος Γαδουρά, απαιτήθηκε συμπλήρωση των ελλειπουσών τιμών όλων των βροχομετρικών σταθμών της λεκάνης (Λαέρμα, Έμπωνα, Απόλλωνα, φράγματος Γαδουρά, Καλάθου). Η συμπλήρωση των κενών (καθώς και η επέκταση της χρονοσειράς της Καλάθου) έγινε με τη μέθοδο γραμμικής παλινδρόμησης, ελέγχοντας τις ετεροσυσχετίσεις όλων των σταθμών μεταξύ τους. Για κάθε μήνα και για κάθε σταθμό προς συμπλήρωση, εντοπίστηκε ο σταθμός για τον οποίο μεγιστοποιείται ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης, ήτοι προσαρμόζεται η βέλτιστη ευθεία ελαχίστων τετραγώνων. Αν για το συγκεκριμένο μήνα η τιμή του εν λόγω σταθμού ήταν κενή, τότε χρησιμοποιήθηκε ο αμέσως καλύτερος σταθμός κοκ. Στους ελέγχους χρησιμοποιήθηκαν, εκτός από τους σταθμούς της λεκάνης του Γαδουρά, και ο βροχομετρικός σταθμός της ΕΜΥ στο αεροδρόμιο της Ρόδου.

1.3.3 Γεωγραφική μεταβλητότητα βροχόπτωσης

Η διαίτα της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης παρουσιάζει πολλαπλές ιδιαιτερότητες. Σε γενικές γραμμές, παρατηρείται μείωση των βροχοπτώσεων από βορά προς νότο, π.χ. η ετήσια βροχόπτωση στους νοτιότερους σταθμούς (Σιάννα, Απολακκιά, Κατταβιά) κυμαίνεται λίγο πάνω από τα επίπεδα των 500 mm, κατά μέσο όρο, ενώ σε όλους τους υπόλοιπους σταθμούς καταγράφονται ύψη βροχής της τάξης των 700-900 mm.

Επιπλέον, παρατηρούνται τοπικές ιδιαιτερότητες, που έχουν σχέση με την υψομετρική κατανομή των βροχοπτώσεων. Συγκεκριμένα, στο παραθαλάσσιο βροχομετρικό σταθμό της Καλάθου, η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 891.2 mm, τιμή που είναι η δεύτερη υψηλότερη στο νησί, πολύ κοντά στα επίπεδα του Έμπωνα (926.1 mm), που βρίσκεται σε υψόμετρο +446.7 m. Από την άλλη πλευρά, το δεύτερο χαμηλότερο μέσο ετήσιο ύψος βροχής (531.6 mm) καταγράφεται στη Σιάννα, που είναι ωστόσο ο μεγαλύτερος υψομετρικά σταθμός του νησιού (+553.8 m), και βρίσκεται σε σχετικά μικρή απόσταση από τον Έμπωνα.

Η παραπάνω μη τυπική συμπεριφορά καθιστά εξαιρετικά δύσκολη τη διατύπωση μιας γενικής σχέσης μεταβολής του ύψους βροχής συναρτήσει του υψόμετρου, για την εκτίμηση της βροχοβαθμίδας στην περιοχή της Ρόδου. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι μέσες ετήσιες τιμές όλων των βροχομετρικών δειγμάτων (συμπληρωμένες με τις παραδοχές του εδαφίου 1.3.2) παρουσιάζουν μηδενική συσχέτιση με το αντίστοιχο υψόμετρο των σταθμών ($r = 0.014$). Αν, ωστόσο, αφαιρεθούν από το δείγμα οι σταθμοί Καλάθου και Σιάννα, λόγω των τοπικών τους ιδιαιτεροτήτων, καθώς και οι σταθμοί Αφάντου και Ρόδος ΥΕΒ, λόγω του μικρού μήκους δεδομένων, προκύπτει μια εύλογη τιμή βροχοβαθμίδας, ίση με 0.6 mm/m. Στην περίπτωση αυτή, ο συντελεστής συσχέτισης της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης συναρτήσει του υψόμετρου ανέρχεται σε $r = 0.726$, τιμή που κρίνεται ικανοποιητική. Το αντίστοιχο διάγραμμα διασποράς απεικονίζεται στην Εικόνα 1.8.



Εικόνα 1.8: Διάγραμμα διασποράς μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και υψόμετρου βροχομετρικών σταθμών, για τον υπολογισμό της βροχοβαθμίδας στην περιοχή μελέτης.

1.3.4 Εκτίμηση επιφανειακών βροχοπτώσεων

Η μηνιαία επιφανειακή βροχόπτωση κάθε υπολεκάνης αποτελεί είσοδο (φόρτιση) του υδρολογικού μοντέλου. Στην παρούσα μελέτη, απαιτήθηκε η εκτίμηση δύο συνόλων επιφανειακών χρονοσειρών βροχόπτωσης:

- (α) η βροχόπτωση της περιόδου 2000-2010 στις υπολεκάνες του υδροσυστήματος Γαδουρά, για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, με χρήση των αντίστοιχων σημειακών ιστορικών δειγμάτων, και
- (β) η συνθετική βροχόπτωση, μήκους 1000 ετών, σε όλες τις υπολεκάνες της Ρόδου, με χρήση των αντίστοιχων σημειακών συνθετικών δειγμάτων.

Η εκτίμηση των επιφανειακών χρονοσειρών έγινε με χωρική ολοκλήρωση των σημειακών υψών βροχής των βροχομετρικών σταθμών της αντίστοιχης περιοχής μελέτης. Εφαρμόστηκε η γνωστή μέθοδος των πολυγώνων Thiessen, με υψομετρική αναγωγή στο αντίστοιχο μέσο υψόμετρο κάθε υπολεκάνης. Στη στοχαστική προσομοίωση, από τα σημειακά βροχομετρικά δείγματα του Πίνακα 1.4, δεν χρησιμοποιήθηκαν αυτά της Αφάντου, του φράγματος Γαδουρά και της Ρόδου ΥΕΒ, εξαιτίας του μικρού (και συνεπώς μη αντιπροσωπευτικού για την εκτίμηση στατιστικών μεγεθών) τους μήκους.

Αρχικά, υπολογίστηκαν (με τη χρήση ΣΓΠ) τα εμβαδά επιρροής των 10 βροχομετρικών σταθμών, τα οποία απεικονίζονται στο χάρτη της Εικόνας 1.9. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν τα ποσοστά επιρροής κάθε σταθμού για κάθε υπολεκάνη, που δίνονται στον Πίνακα 1.6. Η επιφανειακή ολοκλήρωση έγινε σταθμίζοντας τα επιμέρους σημειακά δείγματα, με βάση τα εν λόγω ποσοστά (συντελεστές Thiessen). Τέλος, έγινε υψομετρική διόρθωση των αρχικών επιφανειακών χρονοσειρών με τη μέθοδο του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής, που υπολογίζεται από την σχέση:

$$\lambda = 1 + \beta \frac{z_s - z_\sigma}{h_s} \quad (1.1)$$

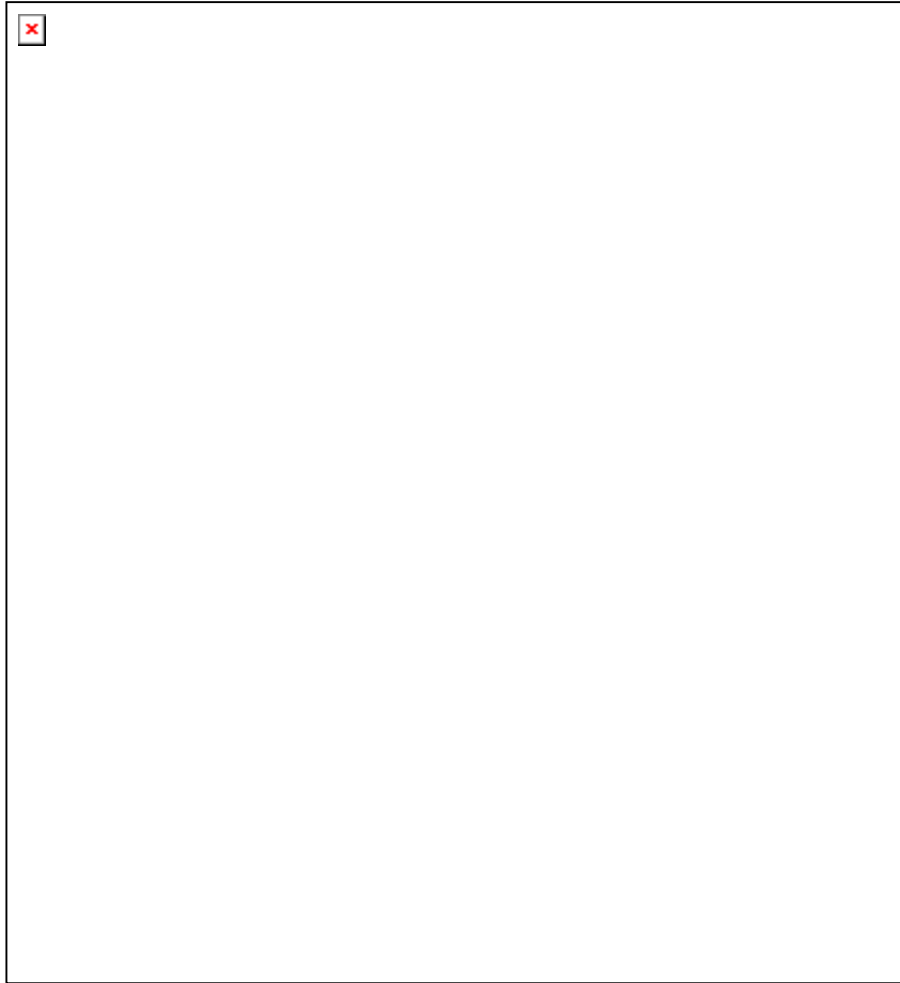
όπου z_s είναι το μέσο υψόμετρο της κάθε υπολεκάνης σε m, z_σ το μέσο υψόμετρο των σταθμών σε m (που υπολογίζεται ως σταθμισμένος, με βάση τους συντελεστές Thiessen, μέσος όρος των υψομέτρων των σταθμών), h_s το επιφανειακό μέσο ετήσιο ύψος βροχής (όπως υπολογίζεται πριν την αναγωγή), και β η βροχοβαθμίδα, σε mm/m, η οποία θεωρήθηκε κοινή για όλες τις υπολεκάνες ($\beta = 0.6$ mm/m). Τα βασικά μεγέθη για τον υπολογισμό του συντελεστή λ δίνονται στον Πίνακα 1.7.

Πίνακας 1.6: Συντελεστές Thiessen βροχομετρικών σταθμών ανά υπολεκάνη.

| Υπολεκάνη | Απολαικιά | Απόλλωνα | Έμπωνος | Κατταβιά | Λαέριμα | Σιανά | Ρόδος | Αρχάγγελος | Καλάθου | Βάρη |
|-----------|-----------|----------|---------|----------|---------|-------|-------|------------|---------|------|
| 0 | | | | | | | 0.10 | | | 0.90 |
| 1 | | | | | | | | | | 1.00 |
| 2 | | | | | | | 1.00 | | | |
| 3 | | 0.82 | | | | | 0.18 | | | |
| 4 | | | | | | | 0.11 | | | 0.89 |
| 5 | | 1.00 | | | | | | | | |
| 6 | | 1.00 | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | 0.59 | 0.41 | | |
| 8 | | 0.20 | | | | | | 0.80 | | |
| 9 | | | | | 1.00 | | | | | |
| 10 | | | 0.06 | | 0.91 | 0.03 | | | | |
| 11 | 0.88 | | | | 0.12 | | | | | |
| 12 | 0.16 | | | 0.84 | | | | | | |
| 13 | | | | 1.00 | | | | | | |
| 14 | | | | 1.00 | | | | | | |
| 15 | | 0.03 | 0.70 | | 0.27 | | | | | |
| 16 | | 0.86 | 0.08 | | 0.06 | | | | | |
| 17 | | | | | 0.96 | | | | 0.04 | |
| 18 | | 0.04 | | | 0.12 | | | | 0.84 | |
| 19 | 0.04 | | | | | 0.96 | | | | |
| 20 | 0.85 | | | | | 0.15 | | | | |
| 21 | | 0.39 | | | | | | 0.50 | 0.11 | |
| 22 | | | | | | | 1.00 | | | |
| 23 | 0.18 | | | | 0.66 | 0.16 | | | | |
| 24 | | | | | 1.00 | | | | | |
| 25 | 1.00 | | | | | | | | | |
| 26 | 0.30 | | | 0.70 | | | | | | |
| 27 | | | | | 0.89 | | | | 0.11 | |
| 28 | | | | | 0.31 | | | | 0.69 | |
| 29 | | | | | | | | | 1.00 | |
| 30 | | | | | | | | | 1.00 | |
| 31 | | | | | | | 1.00 | | | |
| 32 | | | | | | | 1.00 | | | |

Πίνακας 1.7: Δεδομένα για τον υπολογισμό του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής στις υπολεκάνες της Ρόδου, για τιμή βροχοβαθμίδας $\beta = 0.6 \text{ mm/m}$.

| Υπολεκάνη | Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m) | Μέσο υψόμετρο σταθμών (m) | Επιφανειακό ετήσιο ύψος βροχής, χωρίς αναγωγή (mm) | Συντελεστής υψομετρικής αναγωγής, λ |
|-----------|---------------------------|---------------------------|--|---|
| 0 | 186.2 | 26.0 | 696.9 | 1.138 |
| 1 | 90.9 | 28.0 | 699.0 | 1.054 |
| 2 | 186.7 | 8.4 | 677.9 | 1.158 |
| 3 | 284.3 | 261.9 | 750.1 | 1.018 |
| 4 | 202.2 | 25.8 | 696.7 | 1.152 |
| 5 | 134.4 | 317.6 | 766.0 | 0.857 |
| 6 | 371.2 | 317.6 | 766.0 | 1.042 |
| 7 | 246.7 | 80.8 | 685.9 | 1.145 |
| 8 | 315.0 | 211.5 | 711.1 | 1.087 |
| 9 | 173.4 | 320.2 | 629.1 | 0.860 |
| 10 | 373.8 | 331.8 | 644.0 | 1.039 |
| 11 | 273.4 | 94.7 | 546.9 | 1.196 |
| 12 | 236.1 | 75.8 | 514.1 | 1.187 |
| 13 | 166.3 | 78.0 | 510.0 | 1.104 |
| 14 | 146.0 | 78.0 | 510.0 | 1.080 |
| 15 | 527.3 | 408.7 | 841.1 | 1.085 |
| 16 | 354.3 | 328.1 | 770.6 | 1.020 |
| 17 | 252.6 | 307.6 | 639.6 | 0.948 |
| 18 | 209.1 | 55.3 | 854.7 | 1.108 |
| 19 | 488.1 | 438.2 | 531.8 | 1.056 |
| 20 | 286.9 | 122.5 | 535.1 | 1.184 |
| 21 | 315.9 | 216.9 | 745.5 | 1.080 |
| 22 | 188.9 | 8.4 | 677.9 | 1.160 |
| 23 | 346.8 | 295.5 | 596.7 | 1.052 |
| 24 | 168.5 | 320.2 | 629.1 | 0.855 |
| 25 | 318.2 | 64.0 | 535.7 | 1.285 |
| 26 | 177.7 | 73.8 | 517.7 | 1.120 |
| 27 | 261.7 | 285.5 | 657.9 | 0.978 |
| 28 | 198.7 | 102.7 | 809.9 | 1.071 |
| 29 | 206.7 | 5.0 | 891.2 | 1.136 |
| 30 | 144.1 | 5.0 | 891.2 | 1.094 |
| 31 | 150.0 | 8.4 | 677.9 | 1.125 |
| 32 | 268.9 | 8.4 | 677.9 | 1.231 |



Εικόνα 1.9: Χάραξη πολυγώνων Thiessen για τον υπολογισμό της επιφανειακής βροχόπτωσης.

1.4 Εκτίμηση εξάτμισης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής

1.4.1 Μετεωρολογικοί σταθμοί και δεδομένα

Στα πλαίσια των υδρολογικών αναλύσεων, απαιτήθηκε η εκτίμηση δύο μεταβλητών που σχετίζονται με τις διεργασίες της εξάτμισης:

(α) η μηνιαία χρονοσειρά εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια, και συγκεκριμένα από τον ταμιευτήρα του Γαδουρά, που αποτελεί συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου του, με βάση το οποίο υπολογίστηκαν οι ιστορικές εισροές στο φράγμα, και

(β) οι μηνιαίες χρονοσειρές δυνητικής εξατμοδιαπνοής των υπολεκανών της Ρόδου, που αποτελούν είσοδο του υδρολογικού μοντέλου, τόσο στη βαθμονόμηση όσο στη στοχαστική προσομοίωση.

Για την εκτίμηση των παραπάνω, σε μηνιαία βάση, απαιτούνται μετεωρολογικά δείγματα (κατ' ελάχιστο η μέση μηνιαία θερμοκρασία), γεωγραφικά δεδομένα (γεωγραφικό πλάτος, υψόμετρο) και χαρακτηριστικά μεγέθη που σχετίζονται με το ενεργειακό πλαίσιο της εξάτμισης (ανακλαστικότητα).

Τα μετεωρολογικά δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης δίνονται στον Πίνακα 1.8. Όσον αφορά στη μέση μηνιαία θερμοκρασία, ελήφθησαν τα δεδομένα πέντε σταθμών, τα στατιστικά χαρακτηριστικά των οποίων δίνονται στον Πίνακα 1.9. Η διαχείριση και επεξεργασία των χρονοσειρών έγινε στα πλαίσια της Διαχειριστικής Μελέτης Αιγαίου, με εξαίρεση τον τηλεμετρικό σταθμό Γαδουρά, του οποίου τα δεδομένα συλλέχτηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Εκτός

της θερμοκρασίας, για τον σταθμό της Ρόδου (EMY) διατίθενται δείγματα μέσης μηνιαίας σχετικής υγρασίας, ωρών ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου, με τις δύο τελευταίες μεταβλητές να μην έχουν, ωστόσο, καμία χρονική επικάλυψη. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους δίνονται στον Πίνακα 1.10.

Πίνακας 1.8: Μηνιαία μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης.

| Σταθμός | Μέση θερμοκρασία | Μέση σχετική υγρασία | Ώρες ηλιοφάνειας | Μέση ταχύτητα ανέμου |
|----------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Απόλλωνα | Νοέ. 1985-Δεκ. 2002 | – | – | – |
| Γαδουράς | Οκτ. 2000-Ιούν. 2009 | – | – | – |
| Έμπωνας | Οκτ. 1985-Δεκ. 2002 | – | – | – |
| Λάερμα | Οκτ. 1985-Δεκ. 2002 | – | – | – |
| Ρόδος | Ιαν. 1955-Δεκ. 2001 | Ιαν. 1955-Δεκ. 1998 | Ιαν. 1977-Φεβ. 1998 | Μάρ. 1998-Ιάν. 2004 |

Πίνακας 1.9: Μέσες τιμές θερμοκρασίας στους σταθμούς της περιοχής μελέτης (°C).

| Σταθμός | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| Απόλλωνα | 18.8 | 14.2 | 10.8 | 9.7 | 10.2 | 11.5 | 14.0 | 18.4 | 23.3 | 25.8 | 26.1 | 22.8 | 17.1 |
| Γαδουράς | 18.0 | 12.6 | 9.1 | 8.2 | 8.5 | 11.5 | 14.5 | 19.8 | 26.0 | 28.7 | 27.9 | 23.1 | 17.3 |
| Έμπωνας | 18.7 | 13.5 | 9.8 | 8.7 | 9.0 | 10.6 | 14.8 | 19.2 | 24.7 | 26.6 | 26.6 | 22.7 | 17.1 |
| Λάερμα | 21.1 | 15.3 | 11.5 | 10.6 | 10.9 | 12.4 | 15.7 | 21.0 | 26.1 | 28.3 | 28.3 | 25.0 | 18.9 |
| Ρόδος | 20.9 | 16.7 | 13.5 | 12.0 | 12.2 | 13.7 | 16.6 | 20.6 | 24.8 | 26.9 | 27.1 | 24.7 | 19.1 |

Πίνακας 1.10: Μέσες μηνιαίες τιμές λοιπών μετεωρολογικών μεταβλητών στο σταθμό Ρόδου (EMY).

| Μεταβλητή | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Σχετική υγρασία (%) | 67.5 | 71.4 | 72.4 | 70.1 | 69.1 | 68.7 | 66.5 | 64.4 | 58.5 | 57.6 | 59.9 | 61.4 |
| Ώρες ηλιοφάνειας (h) | 244.9 | 174.5 | 135.8 | 143.1 | 157.5 | 214.7 | 244.9 | 308.8 | 355.0 | 369.6 | 341.8 | 294.1 |
| Ταχύτητα ανέμου στα 2.0 m (m/s) | 1.17 | 1.31 | 1.77 | 1.46 | 1.87 | 1.74 | 1.80 | 1.43 | 1.31 | 1.41 | 1.35 | 1.40 |

1.4.2 Μεθοδολογία υπολογισμού εξάτμισης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής

Για τη συνεπή εκτίμηση της εξάτμισης και της δυνητικής εξατμοδιαπνοής (ήτοι της θεωρητικής κατανάλωσης νερού από επιφάνεια καλυμμένη με γρασίδι, σε συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας υγρασίας) έχουν προταθεί πλήθος μοντέλων στην διεθνή βιβλιογραφία. Οι αναλυτικές μέθοδοι Penman (εξάτμιση από υδάτινη επιφάνεια) και Penman-Monteith (δυνητική εξατμοδιαπνοή), οι οποίες βασίζονται στην υδροδυναμική και ενεργειακή ερμηνεία των φαινομένων, θεωρούνται οι πλέον επαρκείς και εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων εμπειρικών, κατά κανόνα, σχέσεων (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σσ. 165-232). Για παράδειγμα, η ευρέως διαδεδομένη μέθοδος Thornthwaite, η οποία χρησιμοποιεί μόνο θερμοκρασιακά δεδομένα, όταν εφαρμόζεται σε γεωγραφικά πλάτη όπως της Ελλάδας, υποεκτιμά την εξάτμιση τους εαρινούς μήνες, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη της την μεγαλύτερη, σε σχέση με την φθινοπωρινή περίοδο, προσφορά ενέργειας μέσω της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι αναλυτικές μέθοδοι απαιτούν πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα μέσης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου. Στην περιοχή μελέτης, μόνο στο σταθμό Ρόδου (EMY)

πραγματοποιούνται τέτοιες μετρήσεις, και μάλιστα μόνο για τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία διατίθενται δείγματα μεγάλου μήκους. Έστω και με τα ελλιπή αυτά δεδομένα, παρήχθησαν οι δύο χρονοσειρές (σε μηνιαία κλίμακα) για την περίοδο 1/1955-9/2002, συμπληρώνοντας τους κενούς μήνες με τις μέσες τιμές των αντίστοιχων μετεωρολογικών μεταβλητών εισόδου (Πίνακας 1.10). Για λόγους σύγκρισης, υπολογίστηκε και η δυνητική εξατμοδιαπνοή με τη μέθοδο Thornthwaite, με είσοδο μόνο τη μέση μηνιαία θερμοκρασία. Οι μέσες τιμές, σε μηνιαία και ετήσια κλίμακα, δίνονται στον Πίνακα 1.11.

Πίνακας 1.11: Μέσες τιμές (σε mm) εξάτμισης (κατά Penman) και δυνητικής εξατμοδιαπνοής (κατά Penman-Monteith και Thornthwaite), με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα του σταθμού Ρόδου.

| Μήνας | Μέθοδος Penman | Μέθοδος Penman-Monteith | Μέθοδος Thornthwaite |
|-------|----------------|-------------------------|----------------------|
| Οκτ. | 86.1 | 77.2 | 76.2 |
| Νοέ. | 46.4 | 45.9 | 42.7 |
| Δεκ. | 35.7 | 38.9 | 27.7 |
| Ιάν. | 36.8 | 38.6 | 22.5 |
| Φεβ. | 51.5 | 49.4 | 22.9 |
| Μαρ. | 85.3 | 74.5 | 34.9 |
| Απρ. | 120.5 | 101.1 | 54.7 |
| Μάι. | 164.1 | 135.7 | 93.2 |
| Ιούν. | 196.8 | 163.7 | 135.1 |
| Ιούλ. | 213.3 | 178.2 | 162.5 |
| Αύγ. | 191.3 | 160.2 | 155.1 |
| Σεπ. | 140.0 | 121.1 | 113.8 |
| Έτος | 1367.1 | 1184.1 | 939.9 |

1.4.3 Αναγωγή στη λεκάνη του Γαδουρά

Η αναγωγή της χρονοσειράς δυνητικής εξατμοδιαπνοής στη λεκάνη του Γαδουρά γίνεται με εφαρμογή του ημιεμπειρικού μοντέλου που ανέπτυξαν οι Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999, σσ. 222-224), το οποίο βασίζεται στη διατύπωση της παραμετρικής σχέσης (βλ. και Tegos *et al.*, 2008):

$$E = \frac{aS_0 - b}{1 - cT} \quad (1.2)$$

όπου T η μέση θερμοκρασία σε °C, S_0 η εξωγήινη ακτινοβολία σε KJ/m²/d, η οποία είναι αστρονομικό μέγεθος που εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος φ , και a , b και c παράμετροι. Οι τελευταίες μπορούν να εκτιμηθούν μέσω βελτιστοποίησης, ελαχιστοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των τιμών δυνητικής εξατμοδιαπνοής που υπολογίζονται αναλυτικά και αυτών που προκύπτουν με εφαρμογή της (1.2).

Στην προκειμένη περίπτωση, οι παράμετροι εκτιμήθηκαν με βάση τη χρονοσειρά του σταθμού Ρόδου, με βάση την οποία προέκυψαν οι τιμές $a = 7.25 \times 10^{-5}$, $b = 0.296$ και $c = 0.02$. Για τη θερμοκρασία χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά του τηλεμετρικού σταθμού του φράγματος Γαδουρά, που βρίσκεται κοντά στο κέντρο βάρους καθώς και το μέσο υψόμετρο της λεκάνης. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς, για την περίοδο 10/2000-7/2009 δίνονται στον Πίνακα 1.12.

Πίνακας 1.12: Μέσες τιμές δυνητικής εξατμοδιαπνοής στη λεκάνη του Γαδουρά (mm).

| Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 71.1 | 42.1 | 32.7 | 35.5 | 44.1 | 72.2 | 95.6 | 132.9 | 169.9 | 192.9 | 168.2 | 110.9 | 1168.9 |

1.5 Υδρομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες

1.5.1 Υδρομετρικοί σταθμοί

Στη νήσο Ρόδο υπάρχουν συνολικά 11 υδρομετρικοί σταθμοί, εκ των οποίων 10 ανήκουν στην ΥΕΒ της ΝΑ Δωδεκανήσου. Πρόκειται, στην πραγματικότητα, για θέσεις όπου έχουν πραγματοποιηθεί σποραδικές μετρήσεις παροχής, χωρίς να διατίθενται συστηματικές παρατηρήσεις στάθμης, με βάση τις οποίες θα μπορούσαν να κατασκευαστούν αξιόπιστες χρονοσειρές απορροής. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί ο αυτόματος υδρομετρικός σταθμός του Γαδουρά, που ανήκει στο ΥΠΕΧΩΔΕ και είναι εγκατεστημένος κοντά στη θέση του ομώνυμου φράγματος. Ο σταθμός αυτός λειτουργεί από τον Οκτώβριο του 2000 και διαθέτει συστηματικές μετρήσεις στάθμης σε δεκάλεπτο βήμα, ενώ τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του πραγματοποιήθηκαν και ορισμένες μετρήσεις στάθμης-παροχής.

Η ανάλυση των υδρομετρικών δεδομένων του σταθμού Γαδουρά περιγράφεται στο επόμενο εδάφιο, ενώ τα χαρακτηριστικά των υπόλοιπων θέσεων υδρομέτρησης δίνονται στον Πίνακα 1.13. Στον πίνακα δίνονται ακόμη οι μέσες τιμές των υδρομετρικών δειγμάτων, που αποτελούν μια χονδρική (κατά κανόνα υποεκτιμημένη, καθώς δεν περιλαμβάνουν τα πλημμυρικά φαινόμενα) ένδειξη του υδατικού δυναμικού των αντίστοιχων λεκανών απορροής. Τα πρωτογενή δεδομένα ελήφθησαν από τη Διαχειριστική Μελέτη Αιγαίου.

Πίνακας 1.13: Υδρομετρικοί σταθμοί ΥΕΒ.

| Όνομασία | Υψόμετρο σταθμού (m) | Αρχή δείγματος | Λήξη δείγματος | Αριθμός υδρομετρήσεων | Μέση δειγματική παροχή (m ³ /s) |
|----------------------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------------|--|
| Απολακιώτης | 64 | Ιαν-78 | Φεβ-86 | 54 | 0.236 |
| Αργυρός-Μυρτώνας | 1 | Φεβ-86 | Μάι-03 | 212 | 0.154 |
| Γαδουράς (έξοδος) | 4 | Απρ-92 | Απρ-03 | 86 | 0.730 |
| Καραβάς | 12 | Ιαν-87 | Απρ-01 | 190 | 0.050 |
| Κρεμαστινός ⁽¹⁾ | 9 | Φεβ-86 | Μάι-03 | 251 | 0.097 |
| Λίνερος-Λίρος | 59 | Μαρ-92 | Μάι-03 | 85 | 0.070 |
| Λουτάνης | 74 | Μαρ-88 | Απρ-03 | 253 | 0.315 |
| Πελεμόνης | 38 | Μαρ-89 | Απρ-03 | 169 | 0.083 |
| Πλατύς ⁽²⁾ | 68 | Ιαν-90 | Μάι-03 | 71 | 0.081 |
| Ποτός ⁽³⁾ | 61 | Οκτ-89 | Απρ-03 | 60 | 0.195 |

(1) Αλλαγή θέσης υδρομέτρησης τον Μάρτιο 1989.

(2) Αλλαγή θέσης υδρομέτρησης τον Ιανουάριο 1990.

(3) Αλλαγή θέσης υδρομέτρησης τον Νοέμβριο 1994.

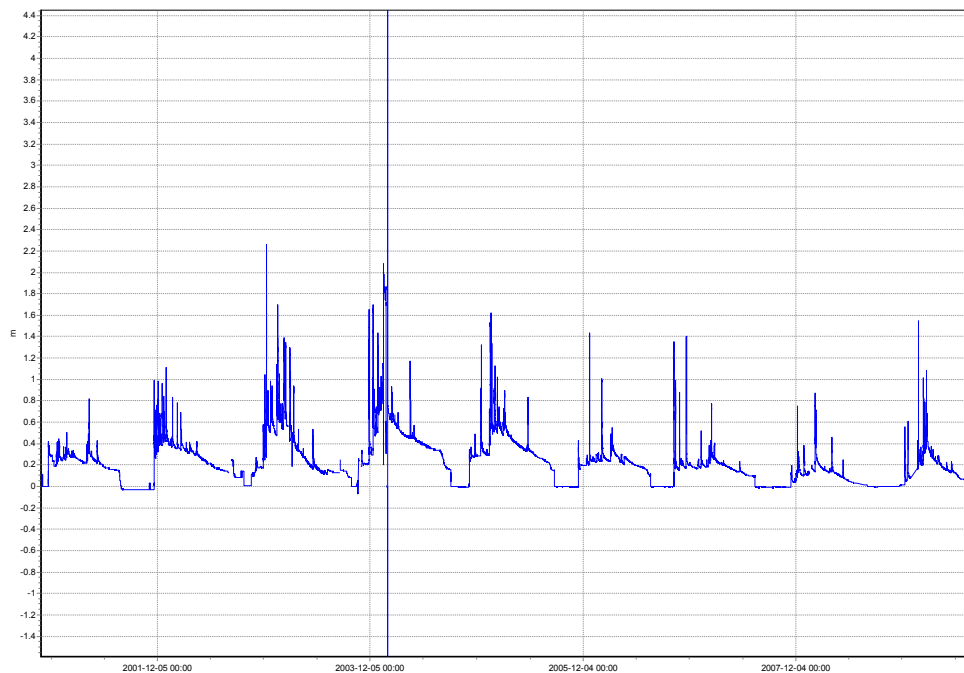
1.5.2 Επεξεργασία δεδομένων υδρομετρικού σταθμού Γαδουρά

Ο υδρομετρικός σταθμός (Εικόνα 1.10) βρίσκεται στη γέφυρα Λαέρμων και ελέγχει την παροχή του νότιου κλάδου του ρέματος Γαδουρά, έκτασης λεκάνης απορροής 51.6 km². Ο σταθμός λειτουργεί από το Νοέμβριο του 2000, καταγράφοντας τη στάθμη ανά 10 min. Στο διάγραμμα της Εικόνας 1.11 απεικονίζεται το πρωτογενές δείγμα στάθμης, για την περίοδο 1/11/2000-1/8/2009.

Προκειμένου να υπολογιστεί η παροχή συναρτήσει της στάθμης, είναι απαραίτητη η κατάρτιση μιας σχέσης που συνδέει τα δύο μεγέθη. Δεδομένου ότι ο αγωγός δεν είναι πρισματικός (ώστε να μπορεί να εντοπιστεί μια αναλυτική σχέση, συναρτήσει των υδραυλικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής), η εν λόγω σχέση προκύπτει με προσαρμογή καμπυλών στάθμης-παροχής σε δείγματα υδρομετρήσεων. Στο σταθμό έχουν πραγματοποιηθεί 14 τέτοιες μετρήσεις, από τον Φεβρουάριο του 2002 έως τον Ιανουάριο του 2003 (Πίνακας 1.14).



Εικόνα 1.10: Γέφυρα Λαέρμων, όπου είναι εγκατεστημένος ο σταθμηγράφος.



Εικόνα 1.11: Πρωτογενής (δεκάλεπτη) καταγραφή σταθμηγράφου στον υδρομετρικό σταθμό Γαδουρά (τιμές στάθμης σε m).

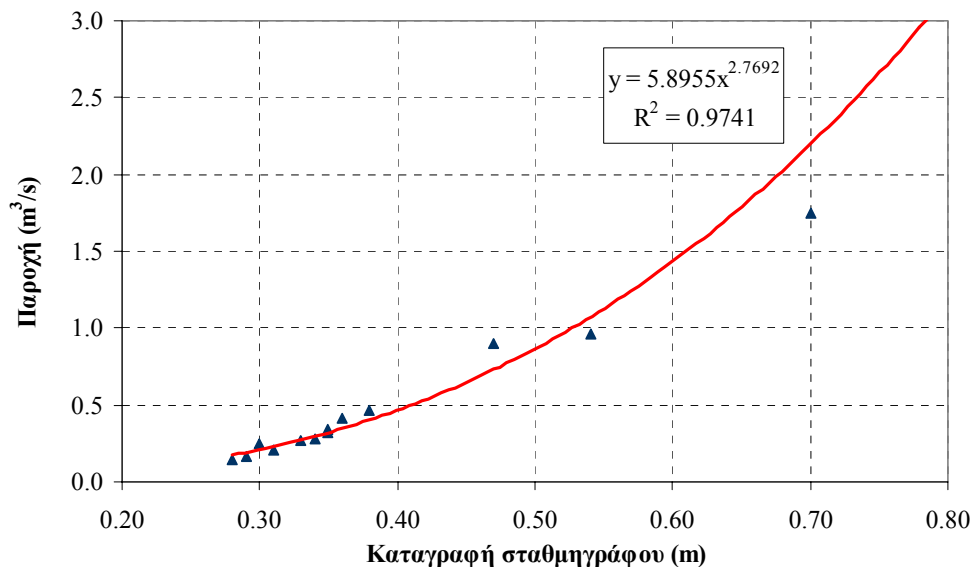
Δυστυχώς, οι υδρομετρήσεις καλύπτουν μια μικρή περίοδο λειτουργίας του σταθμού, το οποίο περιορίζει την αξιοπιστία των εκτιμήσεων διαχρονικά, δεδομένου ότι η διαίτα της ροής ενδέχεται να έχει μεταβληθεί τοπικά λόγω π.χ. απόθεσης φερτών στην περιοχή της διατομής. Επιπλέον, οι εν λόγω μετρήσεις καλύπτουν ένα μικρό εύρος τιμών στάθμης (μέχρι 0.70 m), γεγονός που καθιστά αρκετά επισφαλής την εκτίμηση της παροχής κατά τη διάρκεια των πλημμυρικών επεισοδίων, όταν και η μετρημένη στάθμη ανέρχεται στα επίπεδα των 1.0-2.0 m.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προσαρμόστηκε στο δείγμα στάθμης-παροχών του Πίνακα 1.14 η εξίσωση δύναμης $q = 5.90 h^{2.77}$, όπου q η παροχή σε m^3/s και h η τιμή, σε m, που έχει καταγράψει ο σταθμηγράφος την ώρα της υδρομέτρησης (Εικόνα 1.12). Η τιμή του εκθέτη κρίνεται εύλογη για

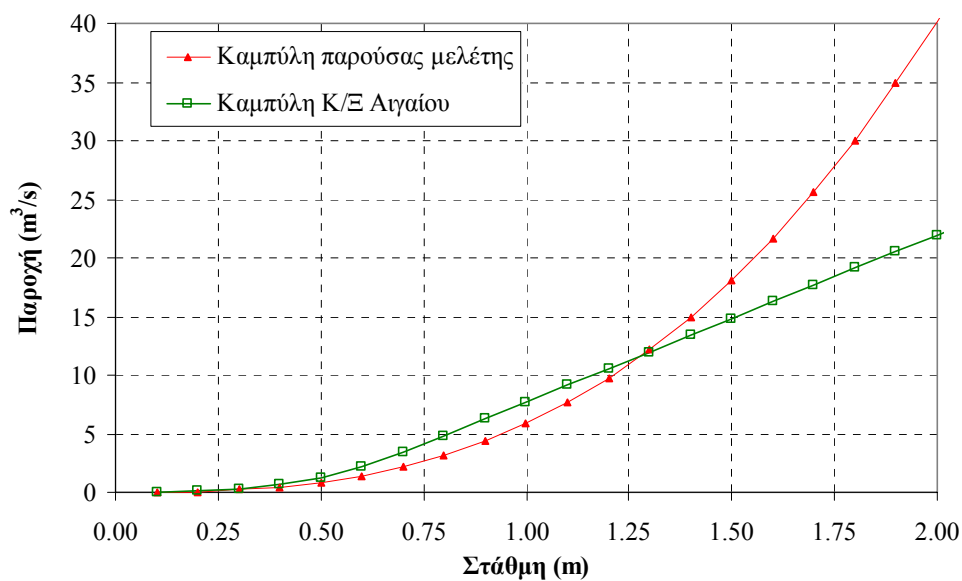
διατομή ποταμού. Επισημαίνεται ότι η καμπύλη που είχε δοθεί στα πλαίσια της Διαχειριστικής Μελέτης Αιγαίου βασιζόταν σε προσαρμογή των μετρημένων τιμών παροχής στις παρατηρήσεις του σταθμημέτρου και όχι του σταθμηγράφου, οι οποίες εμφανίζουν μη αμελητέες αποκλίσεις. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα της Εικόνας 1.13, με εξαίρεση τις χαμηλές τιμές στάθμης, οι δύο καμπύλες διαφέρουν σημαντικά, καθώς αυτή που προτάθηκε από την Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου θεωρεί γραμμική μεταβολή της παροχής για τιμές στάθμης μεγαλύτερες από 0.70 m, υπόθεση που δεν είναι ρεαλιστική.

Πίνακας 1.14: Μετρήσεις στάθμης και παροχής στον υδρομετρικό σταθμό Γαδουρά.

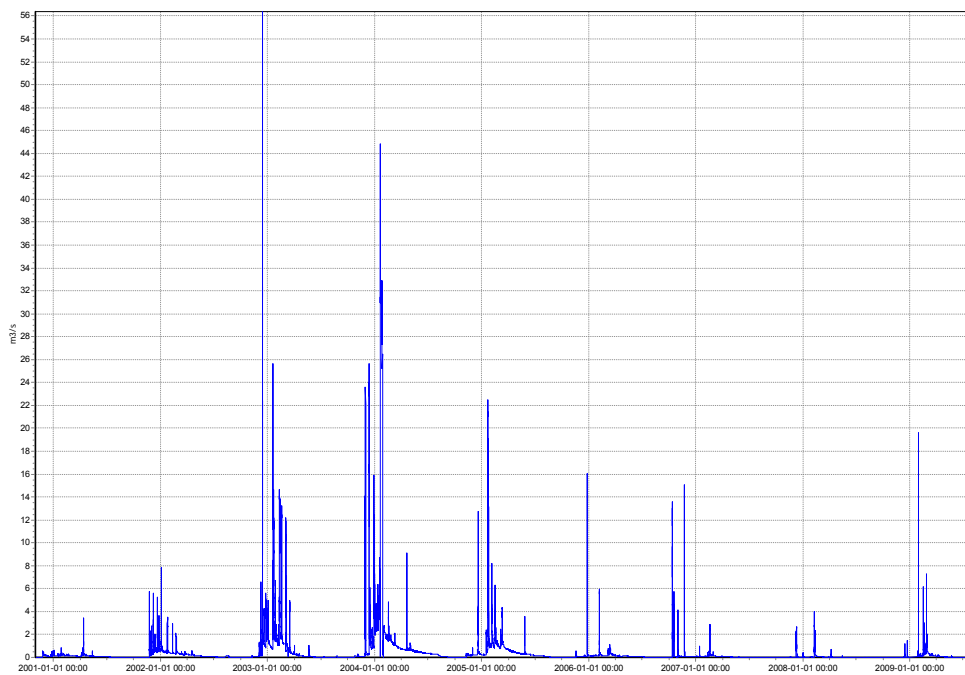
| Ημερομηνία | Ένδειξη σταθμημέτρου (m) | Ένδειξη σταθμηγράφου (m) | Παροχή (m ³ /s) |
|------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 5/2/2002 | 0.29 | 0.36 | 0.41 |
| 11/2/2002 | 0.44 | 0.47 | 0.90 |
| 21/2/2002 | 0.29 | 0.35 | 0.32 |
| 28/2/2002 | 0.35 | 0.38 | 0.47 |
| 6/3/2002 | 0.30 | 0.35 | 0.34 |
| 12/3/2002 | 0.27 | 0.33 | 0.27 |
| 22/3/2002 | 0.29 | 0.31 | 0.21 |
| 2/4/2002 | 0.31 | 0.34 | 0.28 |
| 11/4/2002 | 0.30 | 0.30 | 0.25 |
| 26/4/2002 | 0.27 | 0.28 | 0.14 |
| 5/12/2002 | 0.26 | 0.29 | 0.17 |
| 16/12/2002 | 0.60 | 0.70 | 1.75 |
| 9/1/2003 | 0.45 | 0.54 | 0.96 |
| 23/1/2003 | 0.70 | 0.76 | 3.01 |



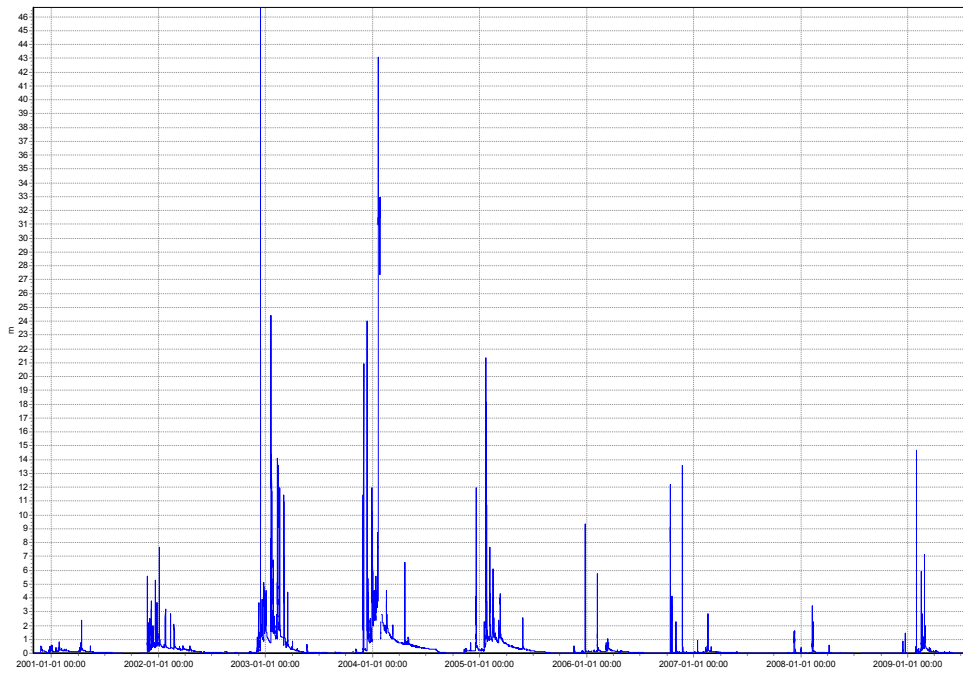
Εικόνα 1.12: Προσαρμογή σχέσης στάθμης-παροχής στις υδρομετρικές παρατηρήσεις του σταθμού Γαδουρά.



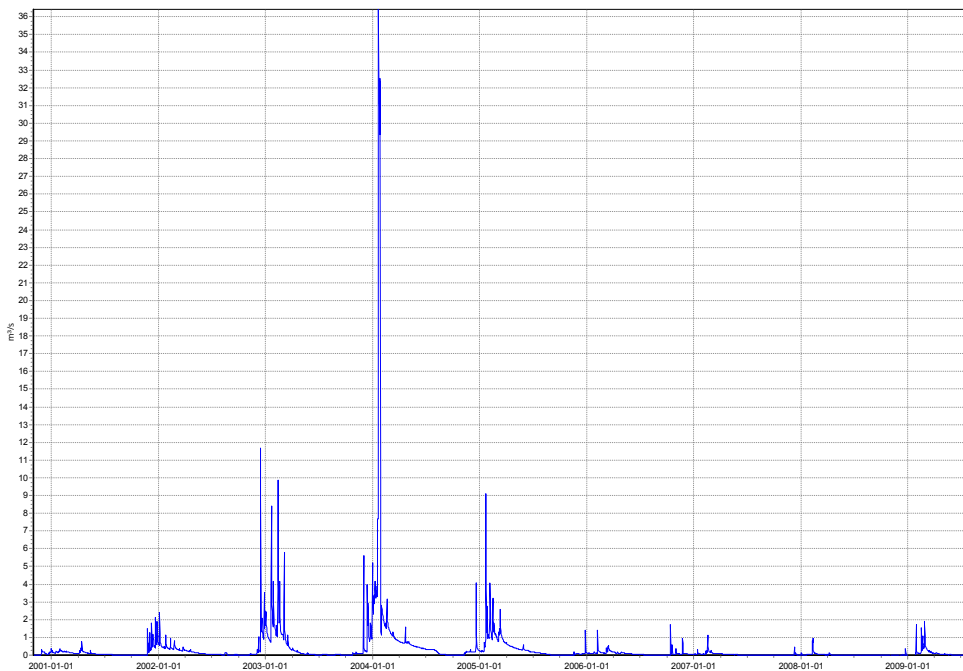
Εικόνα 1.13: Καμπύλες στάθμης-παροχής παρούσας μελέτης και Διαχειριστικής Μελέτης Αιγαίου.



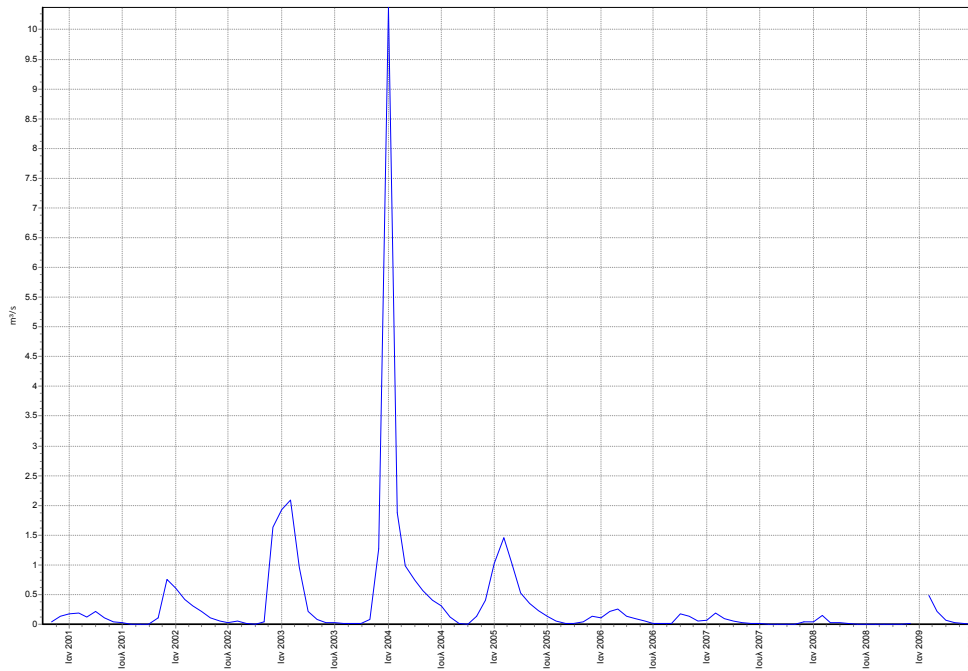
Εικόνα 1.14: Δεκάλεπτη χρονοσειρά παροχής (σε m^3/s) στον υδρομετρικό σταθμό Γαδουρά, με εφαρμογή της σχέσης στάθμης-παροχής στο διορθωμένο δείγμα παρατηρήσεων του σταθμηγράφου.



Εικόνα 1.15: Μέση ωριαία χρονοσειρά παροχής (σε m^3/s) στον υδρομετρικό σταθμό Γαδουρά, με συνάθροιση της αντίστοιχης δεκάλεπτης.



Εικόνα 1.16: Μέση ημερήσια χρονοσειρά παροχής (σε m^3/s) στον υδρομετρικό σταθμό Γαδουρά, με συνάθροιση της αντίστοιχης μέσης ωριαίας και συμπλήρωση ορισμένων κενών τιμών.



Εικόνα 1.17: Μέση μηνιαία χρονοσειρά παροχής (σε m^3/s) στον υδρομετρικό σταθμό Γαδουρά, με συνάθροιση της αντίστοιχης μέσης ημερήσιας.

Πίνακας 1.15: Μηνιαία απορροή υδρομετρικού σταθμού Γαδουρά (hm^3).

| Υδρ. έτος | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|-----------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| 2000-01 | | 0.10 | 0.36 | 0.47 | 0.49 | 0.31 | 0.54 | 0.29 | 0.10 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 2.75 |
| 2001-02 | 0.00 | 0.29 | 1.97 | 1.58 | 1.09 | 0.80 | 0.57 | 0.29 | 0.16 | 0.08 | 0.13 | 0.03 | 6.97 |
| 2002-03 | 0.00 | 0.10 | 4.22 | 5.00 | 5.42 | 2.49 | 0.57 | 0.21 | 0.08 | 0.08 | 0.05 | 0.05 | 18.27 |
| 2003-04 | 0.05 | 0.21 | 3.29 | 26.88 | 4.87 | 2.57 | 1.92 | 1.45 | 1.04 | 0.80 | 0.31 | 0.03 | 43.42 |
| 2004-05 | 0.00 | 0.34 | 1.04 | 2.67 | 3.76 | 2.64 | 1.35 | 0.91 | 0.60 | 0.36 | 0.16 | 0.03 | 13.84 |
| 2005-06 | 0.03 | 0.10 | 0.34 | 0.29 | 0.54 | 0.65 | 0.34 | 0.26 | 0.16 | 0.05 | 0.03 | 0.03 | 2.80 |
| 2006-07 | 0.47 | 0.34 | 0.16 | 0.18 | 0.49 | 0.26 | 0.13 | 0.08 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 2.15 |
| 2007-08 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.10 | 0.39 | 0.08 | 0.08 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.78 |
| 2008-09 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | | 1.24 | 0.54 | 0.18 | 0.08 | 0.03 | 0.00 | | | |

Για την εκτίμηση της παροχής με βάση το δεκάλεπτο δείγμα καταγραφών στάθμης έγινε, σε πρώτη φάση, έλεγχος ακραίων τιμών, με τον οποίο εντοπίστηκαν (και απομακρύνθηκαν) οι αρνητικές θερινές τιμές καθώς και η εναλλαγή υπερβολικά υψηλών και αρνητικών τιμών στάθμης των τελευταίων ημερών του Ιανουαρίου 2004, ως συνέπεια της απορρύθμισης του οργάνου εξαιτίας ενός εξαιρετικά ισχυρού πλημμυρικού επεισοδίου. Έχοντας ως βάση το «συνεπές» δείγμα δεκάλεπτης στάθμης, υπολογίστηκε, με εφαρμογή της εμπειρικής σχέσης στάθμης-παροχής, η δεκάλεπτη παροχή του ποταμού (Σχήμα 1.14). Στη συνέχεια, με χρήση του λογισμικού Υδρογνώμων και με διαδοχικές συναθροίσεις, υπολογίστηκαν οι χρονοσειρές μέσης ωριαίας, μέσης ημερήσιας και μέσης μηνιαίας παροχής, που απεικονίζονται στα διαγράμματα των Εικόνων 1.15, 1.16 και 1.17, αντίστοιχα. Η συμπλήρωση των κενών τιμών έγινε σε ημερήσια κλίμακα, είτε υποθέτοντας σταθερή ροή ή, εφόσον υπήρχαν ενδιάμεσες ωριαίες τιμές, θεωρώντας γραμμική μεταβολή της ροής.

Οι τιμές της μηνιαίας χρονοσειράς απορροής δίνονται στον Πίνακα 1.15. Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει ότι, τα τελευταία έτη, οι εκτιμώμενες παροχές είναι ιδιαίτερα χαμηλές, π.χ. μόλις 0.78 hm^3

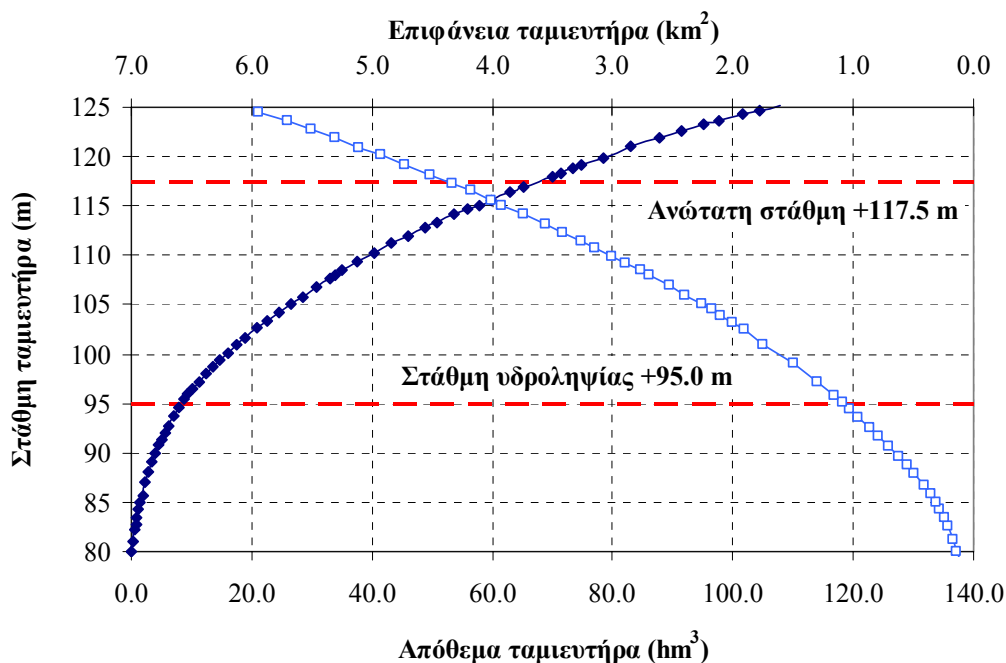
το 2007-08. Την ίδια περίοδο, η απορροή στον ταμιευτήρα, η οποία, με βάση τις εκτάσεις των αντίστοιχων υπολεκανών, κατά το 1/3 προέρχεται από την λεκάνη ανάντη του υδρομετρικού σταθμού, υπολογίστηκε σε 9.87 hm^3 . Το σφάλμα πιθανόν οφείλεται σε συστηματική μετατόπιση προς τα κάτω των καταγραφών του σταθμογράφου, γεγονός που υποδηλώνει αλλαγή των χαρακτηριστικών της κοίτης. Ωστόσο, λόγω της έλλειψης υδρομετρήσεων, δεν είναι δυνατή η επικαιροποίηση της σχέσης στάθμης-παροχής. Συνεπώς, οι εκτιμήσεις των τελευταίων ετών κρίνονται εντελώς αναξιόπιστες για την εκτίμηση του υδατικού δυναμικού του Γαδουρά, και για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιήθηκαν στη βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου.

1.5.3 Εκτίμηση ιστορικών εισροών φράγματος Γαδουρά

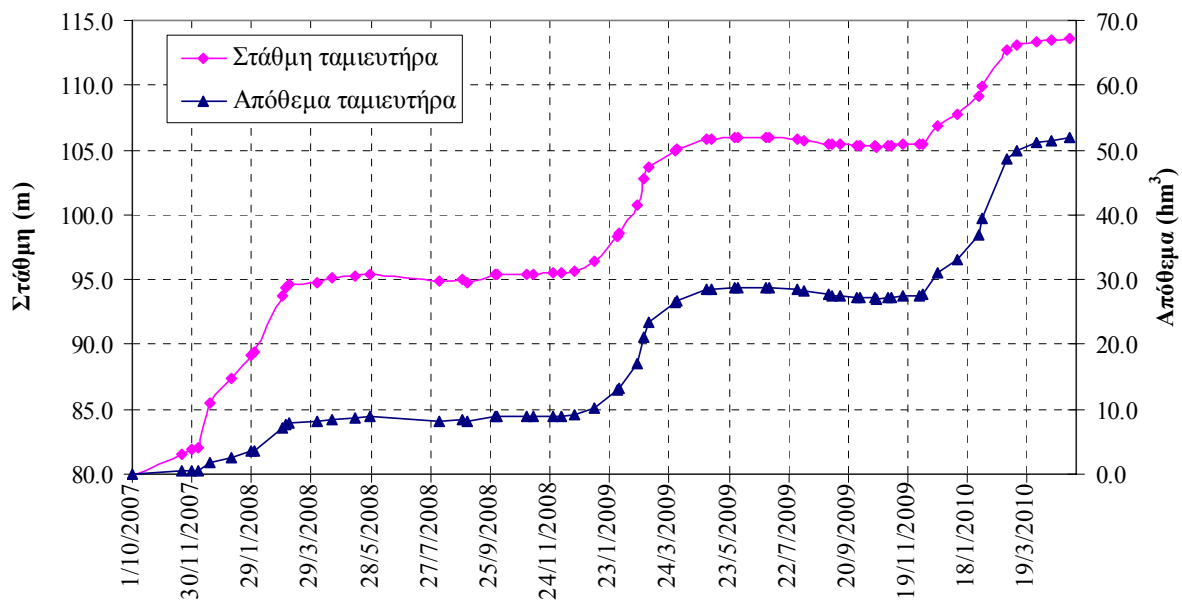
Το φράγμα Γαδουρά είναι το σημαντικότερο έργο αξιοποίησης των υδατικών πόρων του νησιού και προβλέπεται να εξασφαλίσει 18.0 hm^3 ετησίως για την ύδρευση της πόλης της Ρόδου και των παράκτιων οικισμών, μέσω υδραγωγείου μήκους 43.5 km (το υδραγωγείο είναι ακόμη σε φάση κατασκευής). Η κατασκευή του φράγματος και των συναφών έργων (σήραγγα εκτροπής, σήραγγες προσπέλασης και αποστράγγισης, υπερχειλιστής, εκκενωτής πυθμένα) ξεκίνησε τα τέλη του 2001 και ολοκληρώθηκε το καλοκαίρι του 2007. Η πλήρωση του ταμιευτήρα ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2007, και συνεχίζεται έως σήμερα (Ιούνιος 2010).

Η ανώτατη στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι $+117.5 \text{ m}$, ενώ η κατώτατη στάθμη υδροληψίας είναι $+95.0 \text{ m}$. Το μέγιστο απόθεμά του ανέρχεται στα 68.0 hm^3 και ο νεκρός του όγκος στα 8.4 hm^3 . Τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται με βάση την καμπύλη στάθμης-αποθέματος της Εικόνας 1.18. Συνεπώς, η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα είναι 59.6 hm^3 , ενώ η έκταση της λίμνης στην ανώτατη στάθμη ανέρχεται σε 4.4 km^2 . Η έκταση της λεκάνης απορροής ανέρχεται σε 151.5 km^2 .

Από τον Οκτώβριο του 2007, οπότε ξεκίνησε η πλήρωση του ταμιευτήρα, είναι δυνατή η εκτίμηση των μηνιαίων εισροών στη θέση του φράγματος, με βάση του υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα. Για το σκοπό αυτό, συλλέχθηκε η ακανόνιστη χρονοσειρά διακύμανσης της στάθμης (2-3 καταγραφές ανά μήνα), η οποία απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 1.19.



Εικόνα 1.18: Καμπύλες στάθμης-αποθέματος και στάθμης-επιφάνειας ταμιευτήρα Γαδουρά.



Εικόνα 1.19: Διακύμανση στάθμης (πρωτογενής μέτρηση) και αποθέματος ταμιευτήρα Γαδουρά το διάστημα 1/10/2007-30/4/2010.

Το μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα βασίζεται στην σχέση:

$$S_{t+1} = S_t + I_t + P_t - E_t - R_t - Y_t - L_t \quad (1.3)$$

όπου S_t το απόθεμα του ταμιευτήρα στην αρχή του μήνα, I_t οι υδρολογικές εισροές στον ταμιευτήρα, P_t η βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, E_t οι απώλειες λόγω εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα, R_t η εκροή κατάντη του φράγματος, Y_t η υπερχειλίση και L_t οι υπόγειες διαφυγές. Όλα τα μεγέθη δίνονται σε μονάδες όγκου. Το απόθεμα υπολογίστηκε μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης του ταμιευτήρα (Εικόνα 1.18), με είσοδο την αντίστοιχη τιμή στάθμης και με χρήση λογαριθμικής παρεμβολής μεταξύ των γνωστών ζευγών στάθμης-αποθέματος. Στις περιπτώσεις που δεν ήταν διαθέσιμη η στάθμη την πρώτη ημέρα του μήνα, αυτή εκτιμήθηκε με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δύο χρονικά εγγύτερων τιμών. Οι εισροές λόγω βροχόπτωσης και οι απώλειες λόγω εξάτμισης υπολογίστηκαν πολλαπλασιάζοντας τα αντίστοιχα ισοδύναμα ύψη νερού με τη μέση επιφάνεια του ταμιευτήρα στη διάρκεια του αντίστοιχου μήνα (ήτοι το μέσο όρο την πρώτης ημέρας του τρέχοντος μήνα και την πρώτης μέρας του επόμενου). Η χρονοσειρά μηνιαίων υψών βροχής ελήφθη από τον τηλεμετρικό σταθμό του φράγματος, ενώ για τη χρονοσειρά εξάτμισης θεωρήθηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές που υπολογίστηκαν για τον σταθμό της Ρόδου, με τη μέθοδο Penman (βλ. 1.4.2). Οι λοιπές μεταβλητές του ισοζυγίου (εκροή, υπερχειλίση, διαφυγές) είναι μηδενικές.

Στους Πίνακες 1.16 έως 1.22 δίνονται όλες οι χρονοσειρές υδατικού ισοζυγίου που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των εισροών του φράγματος (Εικόνα 1.20). Επισημαίνεται ότι με εφαρμογή της εξίσωσης ισοζυγίου, σε τρεις περιπτώσεις προέκυψαν αρνητικές τιμές εισροών, που προφανώς δεν έχουν φυσικό νόημα και για το λόγο αυτό θεωρήθηκαν μηδενικές. Η μεγαλύτερη απόκλιση (-0.17 hm^3) παρατηρήθηκε τον Αύγουστο του 2009, στη διάρκεια του οποίου καταγράφηκε πτώση στάθμης 0.30 m . Ωστόσο, αυτό δεν είναι ρεαλιστικό (προϋποθέτει απώλειες λόγω εξάτμισης 300 mm και μηδενική απορροή), ενώ από επίσκεψη στην περιοχή τη συγκεκριμένη περίοδο, ο ανάντης κλάδος του Γαδουρά (στη θέση του υδρομετρικού σταθμού) διατηρούσε μια βασική ροή της τάξης του 1.0 L/s . Γενικά, τόσο η ακρίβεια όσο και η συχνότητα μέτρησης της στάθμης αποτελούν παράγοντες αβεβαιότητας στην εκτίμηση των εισροών.

Επιπρόσθετο παράγοντα αβεβαιότητας αποτελεί η σχέση στάθμης-αποθέματος, η οποία έχει προκύψει με βάση εμβαδομετρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί πριν την κατασκευή των έργων. Στην πραγματικότητα, το απόθεμα του ταμιευτήρα στην ανώτατη στάθμη είναι υποεκτιμημένο κατά 2.5 hm³ περίπου, τα οποία αντιστοιχούν στον όγκο των δανειοθαλάμων (Λ. Λαζαρίδης, Απρίλιος 2010, προσωπική επικοινωνία). Με την υπόθεση αυτή, το απόθεμα του ταμιευτήρα της 1/5/2010 θα πρέπει να είναι κοντά στα 53.5 hm³, έναντι των 51.8 hm³ που προκύπτουν με βάση την αντίστοιχη στάθμη των +113.60 m.

Πίνακας 1.16: Στάθμη ταμιευτήρα Γαδουρά την πρώτη κάθε μήνα (m).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2007-08 | 79.90 | 80.89 | 81.96 | 85.50 | 89.40 | 93.96 | 94.69 | 95.22 | 95.41 | 95.17 | 94.92 | 94.70 |
| 2008-09 | 95.45 | 95.43 | 95.49 | 96.18 | 98.52 | 103.25 | 105.10 | 105.81 | 106.00 | 105.95 | 105.80 | 105.50 |
| 2009-10 | 105.35 | 105.30 | 105.45 | 107.70 | 109.90 | 112.80 | 113.40 | 113.60 | | | | |

Πίνακας 1.17: Απόθεμα ταμιευτήρα Γαδουρά την πρώτη κάθε μήνα (hm³).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2007-08 | 0.12 | 0.28 | 0.49 | 1.74 | 3.59 | 7.36 | 8.04 | 8.62 | 8.83 | 8.56 | 8.29 | 8.06 |
| 2008-09 | 8.88 | 8.85 | 8.93 | 9.79 | 13.13 | 22.23 | 26.73 | 28.42 | 28.84 | 28.73 | 28.39 | 27.67 |
| 2009-10 | 27.31 | 27.19 | 27.55 | 33.08 | 39.37 | 48.89 | 51.11 | 51.80 | | | | |

Πίνακας 1.18: Επιφάνεια ταμιευτήρα Γαδουρά την πρώτη κάθε μήνα (km²).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 2007-08 | 0.13 | 0.16 | 0.20 | 0.34 | 0.60 | 0.98 | 1.04 | 1.09 | 1.11 | 1.09 | 1.06 | 1.05 |
| 2008-09 | 1.12 | 1.11 | 1.12 | 1.19 | 1.44 | 2.01 | 2.27 | 2.37 | 2.40 | 2.39 | 2.37 | 2.33 |
| 2009-10 | 2.31 | 2.30 | 2.32 | 2.64 | 3.01 | 3.50 | 3.61 | 3.64 | | | | |

Πίνακας 1.19: Μηνιαία μεταβολή αποθέματος ταμιευτήρα Γαδουρά (hm³).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|---------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2007-08 | 0.16 | 0.20 | 1.25 | 1.85 | 3.77 | 0.69 | 0.57 | 0.22 | -0.27 | -0.27 | -0.24 | 0.82 | 8.76 |
| 2008-09 | -0.03 | 0.07 | 0.86 | 3.35 | 9.10 | 4.49 | 1.69 | 0.42 | -0.11 | -0.34 | -0.72 | -0.36 | 18.43 |
| 2009-10 | -0.12 | 0.35 | 5.53 | 6.29 | 9.53 | 2.22 | 0.69 | | | | | | 24.49 |

Πίνακας 1.20: Εισροές στον ταμιευτήρα Γαδουρά λόγω επιφανειακής βροχόπτωσης (hm³).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 2007-08 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.08 | 0.05 | 0.07 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.41 |
| 2008-09 | 0.01 | 0.06 | 0.14 | 0.16 | 0.39 | 0.10 | 0.07 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 1.14 |
| 2009-10 | 0.09 | 0.19 | 0.57 | 0.47 | 0.36 | 0.10 | 0.52 | | | | | | 2.30 |

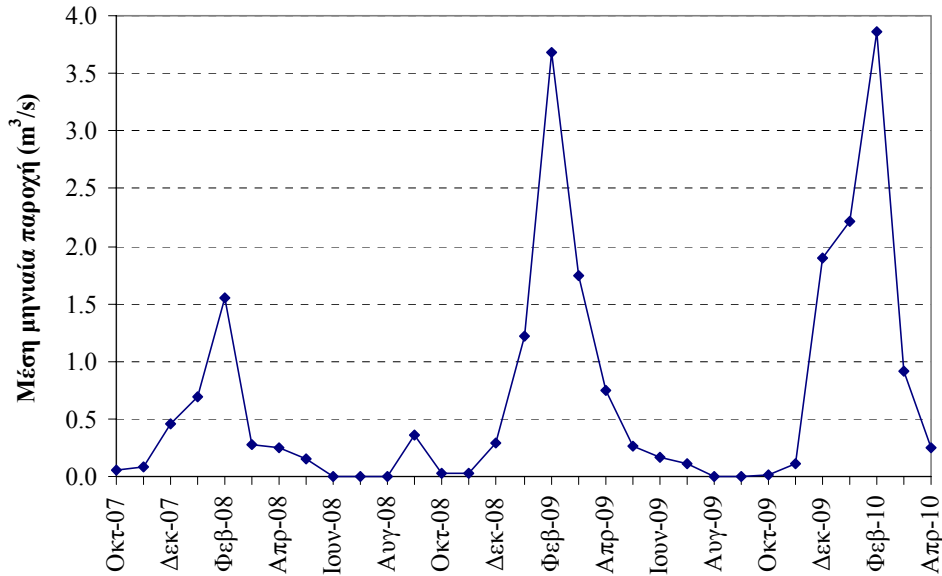
Πίνακας 1.21: Απώλειες από τον ταμιευτήρα Γαδουρά λόγω εξάτμισης (hm³).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 2007-08 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.09 | 0.14 | 0.20 | 0.25 | 0.28 | 0.25 | 0.18 | 1.50 |
| 2008-09 | 0.11 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.10 | 0.20 | 0.31 | 0.43 | 0.55 | 0.62 | 0.55 | 0.39 | 3.43 |
| 2009-10 | 0.23 | 0.12 | 0.10 | 0.13 | 0.19 | 0.33 | 0.48 | | | | | | 1.57 |

Πίνακας 1.22: Απορροή υπολεκάνης Γαδουρά με βάση το υδατικό ισοζύγιο (hm^3).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| 2007-08 | 0.17 | 0.20 | 1.23 | 1.83 | 3.73 | 0.73 | 0.64 | 0.40 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.92 | 9.87 |
| 2008-09 | 0.07 | 0.07 | 0.76 | 3.24 | 8.81 | 4.59 | 1.92 | 0.71 | 0.44 | 0.28 | 0.00 | 0.00 | 20.91 |
| 2009-10 | 0.02 | 0.28 | 5.06 | 5.94 | 9.35 | 2.46 | 0.65 | | | | | | 23.76 |

Με πλάγια γράμματα απεικονίζονται οι αρνητικές τιμές που μηδενίστηκαν.



Εικόνα 1.20: Χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής υπολεκάνης ανάντη ταμιευτήρα Γαδουρά.

1.6 Μεθοδολογία υδρολογικής προσομοίωσης με το λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

1.6.1 Ιστορικό

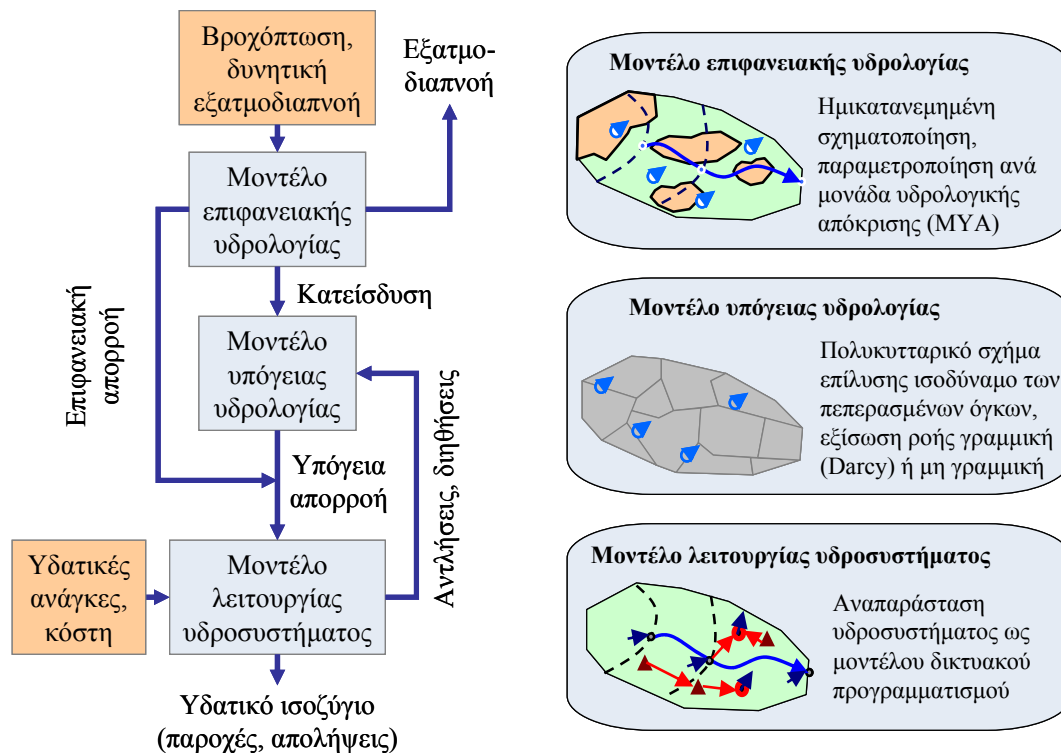
Η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών της περιοχής μελέτης έγινε με το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, το οποίο έχει αναπτυχθεί από το ΕΜΠ, αρχικά ως ερευνητικό προϊόν (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006) και στη συνέχεια για επιχειρησιακή χρήση (Ευστρατιάδης κ.ά., 2009α, β). Το μεθοδολογικό υπόβαθρο αναπτύχθηκε, μεταξύ άλλων, στα πλαίσια δύο διδακτορικών διατριβών (Ευστρατιάδης, 2008· Ρόζος, 2010), και έχει παρουσιαστεί – τμηματικά ή συνολικά – σε διεθνή περιοδικά και συνέδρια (Efstratiadis *et al.*, 2006· Rozos and Koutsoyiannis, 2006· Nalbantis *et al.*, 2007· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2008· Efstratiadis *et al.*, 2008· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2009· Efstratiadis *et al.*, 2009· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2010· Efstratiadis *et al.*, 2010). Το μοντέλο έχει εφαρμοστεί σε πολύπλοκα υδροσυστήματα του ελληνικού χώρου (Βοιωτικός Κηφισός, Δυτική Θεσσαλία, Σμόκοβο). Η έκδοση 2.0 του λογισμικού είναι ελεύθερα διαθέσιμη μέσω της διαδικτυακής εφαρμογής της Εθνικής Τράπεζας Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (Υδροσκόπιο) του ΥΠΕΚΑ (<http://www.hydroscope.gr/software/hydrogeios.html>).

1.6.2 Φιλοσοφία μοντέλου και συνοπτική περιγραφή

Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο σχήμα προσομοίωσης, που υλοποιεί ένα συνδυαστικό (επιφανειακό και υπόγειο) υδρολογικό μοντέλο που αναπαριστά τις διεργασίες στο έδαφος και το υπέδαφος, σε συνδυασμό με ένα σχήμα διαχείρισης συστημικού προσανατολισμού, το οποίο εκτιμά τις ροές κατά

μήκος του φυσικού (υδρογραφικού) και τεχνητού (έργα μεταφοράς) δικτύου και τις πραγματικές απολήψεις του υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των τεχνικών έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων. Στην Εικόνα 1.21 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του πλαισίου σύζευξης των τριών αυτών μοντέλων.

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



Εικόνα 1.21: Διάγραμμα ροής και συνοπτική περιγραφή συνιστωσών λογισμικού ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

Ως προς τη χρονική κλίμακα, το μοντέλο υποστηρίζει μηνιαίο ή ημερήσιο βήμα προσομοίωσης, το οποίο επιλέγεται με βάση το σκοπό της μελέτης καθώς και τη διαθεσιμότητα των υδρολογικών δεδομένων εισόδου. Το μηνιαίο βήμα ενδείκνυται για μελέτες διαχειριστικού ενδιαφέροντος, ενώ το ημερήσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την περιγραφή πλημμυρικών φαινομένων σε μεγάλες λεκάνες, για τη συνήθη περίπτωση που δεν διατίθενται επαρκή χωρικά δεδομένα βροχόπτωσης σε λεπτές χρονικές κλίμακες. Στη δεύτερη περίπτωση, για την πιστότερη αναπαράσταση των χρονισμών των πλημμυρικών παροχών, υλοποιείται ένα εμπειρικό σχήμα επιμερισμού των ημερήσιων απορροών κάθε υπολεκάνης σε υδρογραφήματα λεπτής χρονικής κλίμακας (ωριαίας), τα οποία στη συνέχεια

διοδεύονται κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, εφαρμόζοντας μοντέλα μίας (κινηματικό κύμα) ή δύο (μέθοδος Muskingum) παραμέτρων.

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

1.6.3 Δεδομένα εισόδου

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

- το *επιφανειακό σύστημα*, που περιλαμβάνει το υδρογραφικό δίκτυο, τις υπολεκάνες ανάντη κάθε κόμβου του δικτύου και τις πηγές·
- τις *μονάδες υδρολογικής απόκρισης*, που είναι χωρικές ενότητες με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά και αναπαριστούν διαφορετικούς τύπους εδαφών·
- το *υπόγειο σύστημα* (υδροφορέας) που αναπαρίσταται ως ένα σύστημα πολυγωνικών κυττάρων, στα οποία αντιστοιχούν εννοιολογικές δεξαμενές αποθήκευσης του υπόγειου νερού που συνδέονται μεταξύ τους με εννοιολογικά στοιχεία μεταφοράς και εκφορτίζονται είτε επιφανειακά, μέσω των πηγών, ή υπόγεια, προς γειτονικές λεκάνες και τη θάλασσα·
- το *σύστημα διαχείρισης υδατικών πόρων* (υδροσύστημα), δηλαδή μια σχηματική απεικόνιση των θέσεων προσφοράς και ζήτησης νερού, των έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων της λεκάνης (υδραγωγεία, έργα εκτροπής, γεωτρήσεις) και των χρήσεων νερού.

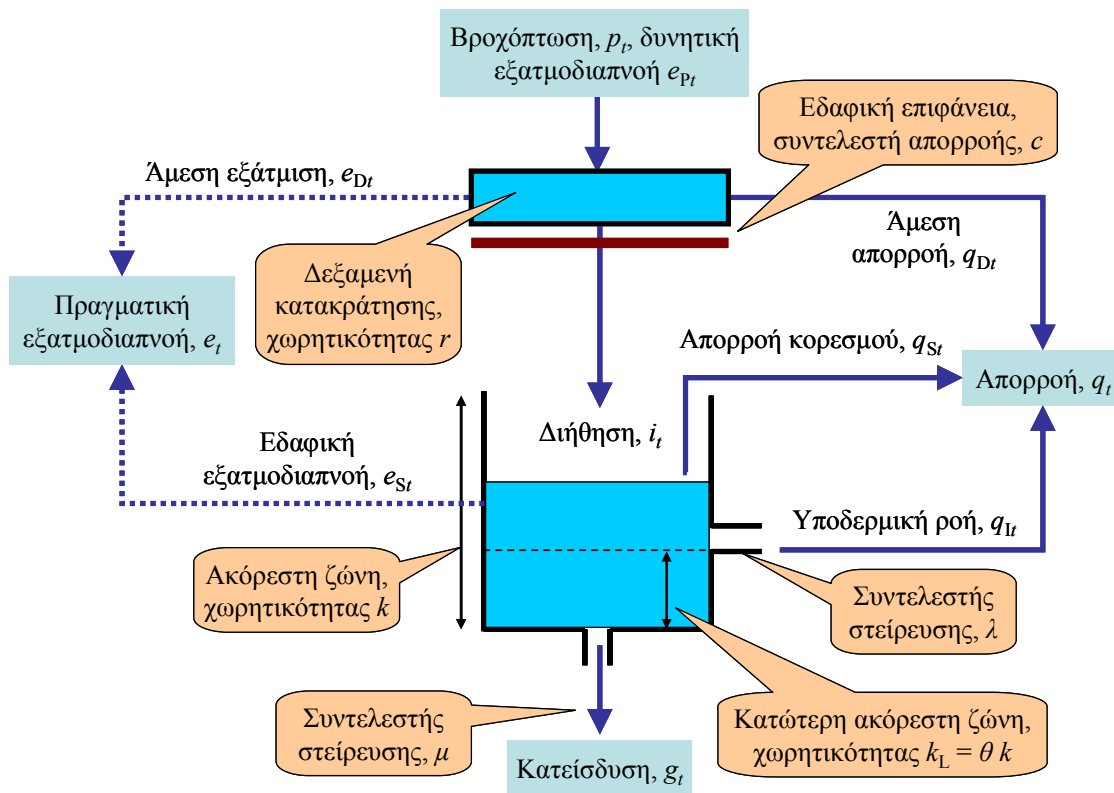
Τα επιμέρους θεματικά επίπεδα (δίκτυα) συνδέονται μέσω των πηγών (επιφανειακό σύστημα – υπόγειο σύστημα), των γεωτρήσεων (υδροσύστημα – υπόγειο σύστημα) και των υδραγωγείων (επιφανειακό σύστημα – υδροσύστημα). Όλες οι συνιστώσες με γεωαναφορά, καθώς και τα δευτερογενή γεωγραφικά επίπεδα (ενώσεις και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

1.6.4 Μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών

Για τη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών στην επιφάνεια του εδάφους και την ακόρεστη ζώνη, υιοθετείται μια ημικατανεμημένη διακριτοποίηση της λεκάνης, που προϋποθέτει τη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου, τον ορισμό των σημείων ελέγχου πάνω στο δίκτυο (κόμβοι) και τη χάραξη των υπολεκάνων ανάντη κάθε κόμβου. Ως υδρογραφικό δίκτυο νοείται το κύριο υδατόρευμα της λεκάνης καθώς και συμβάλλοντες κλάδοι σε αυτό. Η διαμόρφωση του δικτύου γίνεται με την υποστήριξη του ΣΓΠ, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης και ορίζοντας κατάλληλο όριο στη συνάρτηση συγκέντρωσης της απορροής. Συνήθως απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία, μέχρι να σχηματιστεί το επιθυμητό δίκτυο. Ειδικότερα, το

ΣΓΠ παράγει κόμβους μόνο στην έξοδο της λεκάνης και στις θέσεις συμβολής, ενώ ο χρήστης τοποθετεί επιπλέον κόμβους σε ενδιάμεσα σημεία, όπου ζητείται ο υπολογισμός της παροχής, π.χ. υδρομετρικοί σταθμοί, σημεία απολήψεων, σταθμοί ελέγχου της ποιότητας του νερού καθώς και σημεία εισροής νερού από εξωτερικές πηγές. Στη τελευταία περίπτωση, οι χρονοσειρές εξωτερικών εισροών αποτελούν είσοδο του μοντέλου. Ανάντη κάθε κόμβου μπορούν να συμβάλλουν ένας ή περισσότεροι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου, ενώ κατάντη επιτρέπεται να ξεκινά ένας και μόνο κλάδος. Οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να συνδέονται με απεριόριστο αριθμό υδραγωγείων.

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



Εικόνα 1.22: Σχηματική παράσταση της δομής του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου για την αναπαράσταση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών (Πηγή: Ευστρατιάδης κ.ά., 2009).

Στην Εικόνα 1.22 απεικονίζεται η μηνιαία υδρολογική λειτουργία κάθε εδαφικού στοιχείου, η οποία βασίζεται σε ένα υδραυλικό ανάλογο που περιλαμβάνει δύο διασυνδεδεμένες δεξαμενές. Η ανώτερη δεξαμενή αναπαριστά τις διεργασίες στην επιφάνεια του εδάφους, και συγκεκριμένα την κατακράτηση της βροχής, την επιφανειακή εξάτμιση και την διήθηση. Η διήθηση τροφοδοτεί την ακόρεστη ζώνη (υπέδαφος), οι διεργασίες της οποίας αναπαρίστανται από μια δεξαμενή συγκέντρωσης υγρασίας, πεπερασμένης χωρητικότητας (στο ημερήσιο χρονικό βήμα, θεωρούνται δύο διακριτές δεξαμενές, όπου στην ανώτερη δεξαμενή κατακρατείται μια ποσότητα εδαφικής υγρασίας που είναι πλήρως διαθέσιμη για την πραγματοποίηση της εξατμοδιαπνοής). Η διάταξη αυτή παρέχει τη δυνατότητα εκροής προς την ατμόσφαιρα (εδαφική εξατμοδιαπνοή), εκροής προς το έδαφος λόγω υπερχειλίσης, πλευρικής εκροής διαμέσου του υπεδάφους και κατακόρυφης εκροής. Η πλευρική

εκροή πραγματοποιείται από την οπή που βρίσκεται στο όριο μεταξύ της ανώτερης και κατώτερης ζώνης, ενώ η κατακόρυφη από την οπή που βρίσκεται στον πυθμένα. Ο ρυθμός πραγματοποίησης της πλευρικής και κατακόρυφης εκροής ελέγχεται μέσω δύο συντελεστών στείρευσης. Οι παραπάνω ροές αναπαριστούν, αντίστοιχα, την εδαφική εξατμοδιαπνοή, την πλημμυρική απορροή λόγω κορεσμού του εδάφους, την υποδερμική ροή και την κατείσδυση προς τα βαθύτερα στρώματα (υδροφορέας).

Πίνακας 1.23: Παράμετροι μοντέλου μηνιαίας προσομοίωσης επιφανειακών διεργασιών.

| Σύμβολο | Περιγραφή | Διαστάσεις |
|-----------|--|--------------------|
| r | Χωρητικότητα κατακράτησης βροχής | [L] |
| c | Ποσοστό της περίσσειας της βροχόπτωσης που εμφανίζεται ως άμεση απορροή | Αδιάστατο |
| k | Χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας | [L] |
| θ | Κατώφλι αποθέματος δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για παραγωγή υποδερμικής ροής | Αδιάστατο |
| λ | Ρυθμός εκφόρτισης δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για παραγωγή υποδερμικής ροής | [T ⁻¹] |
| μ | Ρυθμός εκφόρτισης δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για παραγωγή κατείσδυσης | [T ⁻¹] |

Το μοντέλο έχει έξι παραμέτρους, που φαίνονται στον Πίνακα 1.23 (οι παράμετροι αυξάνουν σε επτά, αν το μοντέλο λειτουργεί σε ημερήσια κλίμακα). Οι παράμετροι συνδέονται έμμεσα με τα φυσικά χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος, και συνεπώς διαφοροποιούνται για κάθε ΜΥΑ. Συγκεκριμένα:

- Η χωρητικότητα κατακράτησης της βροχής, r , έχει διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού. Η σχετική διεργασία περιλαμβάνει δύο συνιστώσες, την παρεμπόδιση τμήματος της βροχής από τη χλωρίδα και την επιφανειακή παγίδευση, δηλαδή την ανακοπή της προσπίπτουσας βροχής λόγω εγκλωβισμού του στο επιφανειακό εδαφικό στρώμα (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 251-253). Στην πράξη, η παράμετρος αυτή εξαρτάται σημαντικά από ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως η ανάπτυξη έργων αντιπλημμυρικής προστασίας για συγκράτηση της απορροής, που είναι προφανές ότι επηρεάζουν την υδρολογική συμπεριφορά μιας λεκάνης, καθώς αποθηκεύουν νερό στην επιφάνεια, το οποίο στη συνέχεια εξατμίζεται, προτού να διηθηθεί στο έδαφος.
- Το ποσοστό της περίσσειας βροχόπτωσης που εμφανίζεται ως άμεση (εντός του χρονικού βήματος) απορροή, c , είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, που εξαρτάται από την κλίση του εδάφους, τη φυτοκάλυψη και την έκταση των αδιαπέρατων σχηματισμών της λεκάνης.
- Η χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, k , με διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού, εξαρτάται, κυρίως, από τον τύπο του εδάφους και την κλίση. Ειδικότερα, η τιμή της αυξάνει όσο μεταβαίνουμε από αμμώδη σε αργιλικά εδάφη και όσο αυξάνει η κλίση. Σε τυπικά εδαφικά δοκίμια, η εν λόγω χωρητικότητα κυμαίνεται ανάμεσα στα 100-200 mm (Brutsaert, 1982, σ. 243). Ωστόσο, στα μηνιαία εννοιολογικά μοντέλα, η τιμή αυτή είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη.
- Το αδιάστατο κατώφλι του αποθέματος της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για την παραγωγή υποδερμικής ροής, θ , ορίζεται ως ποσοστό της χωρητικότητας k , και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Το εν λόγω κατώφλι οριοθετεί τις δύο ζώνες εδαφικής υγρασίας, και είναι προφανές ότι επηρεάζει σημαντικά όχι μόνο τον μηχανισμό παραγωγής υποδερμικής ροής αλλά και τον μηχανισμό παραγωγής της εδαφικής εξατμοδιαπνοής.
- Ο συντελεστής στείρευσης λ εκφράζει τον ρυθμό εκφόρτισης της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για παραγωγή πλευρικής (υποδερμικής) ροής, έχει μονάδες αντίστροφου χρόνου, και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους.
- Ο συντελεστής στείρευσης μ εκφράζει τον ρυθμό εκφόρτισης της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για παραγωγή κατείσδυσης, έχει επίσης μονάδες αντίστροφου χρόνου, και εξαρτάται από τα

χαρακτηριστικά τόσο του εδάφους όσο και του υπεδάφους. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι η διαπερατότητα τόσο του εδαφικού υλικού όσο και των υποκείμενων γεωλογικών σχηματισμών, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της παραμέτρου.

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

1.6.5 Μοντέλο υπόγειας ροής

Η προσομοίωση της υπόγειας κίνησης του νερού (κορεσμένη ροή) βασίζεται στην τεχνική των πολυκυτταρικών μοντέλων. Τα σχήματα αυτά προτιμώνται σε σχέση με λεπτομερέστερα μοντέλα ορθογωνικού κανάβου (μοντέλα πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων) όταν υπάρχει έλλειψη υδρογεωλογικών δεδομένων, σε συνδυασμό με την ανάγκη ελαχιστοποίησης του υπολογιστικού φόρτου. Τα μοντέλα αυτά είναι ισοδύναμα με των πεπερασμένων όγκων, εφόσον στη χάραξη των κυττάρων ικανοποιούνται οι ακόλουθοι δύο περιορισμοί (Rozos and Koutsoyiannis, 2006-Ρόζος, 2010):

- οι ακμές των κυττάρων είναι παράλληλες προς τις ισοδυναμικές γραμμές·
- τα κέντρα βάρη γειτονικών κυττάρων ορίζουν ευθεία κάθετη στην κοινή ακμή.

Με αυτό τον τρόπο χάραξης, είναι δυνατή η εκμετάλλευση της διαθέσιμης πληροφορίας σχετικά με τη μέση πιεζομετρία της περιοχής μελέτης. Επιπλέον, το πολυγωνικό σχήμα των κυττάρων παρέχει ιδιαίτερη ευελιξία, καθώς επιτρέπει την περιγραφή υδροφορέων τυχαίας γεωμετρίας, με φειδωλό μάλιστα αριθμό κυττάρων. Αυτό περιορίζει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο αλλά και συμβάλλει στην καλύτερη εποπτεία του συστήματος, αφού η χάραξη των κυττάρων, και συνακόλουθα η παραμετροποίηση του συστήματος, μπορεί να γίνει με βάση τα μείζονα χαρακτηριστικά του υπεδάφους, που είναι προφανές ότι επηρεάζουν τις υπόγειες υδρολογικές διεργασίες. Ειδικότερα, στο μοντέλο επιτρέπεται η εφαρμογή κοινών παραμέτρων για ευρύτερες ομάδες κυττάρων, με στόχο τη διατύπωση ενός κατά το δυνατόν πιο φειδωλού προβλήματος βαθμονόμησης, προς όφελος του περιορισμού της πολυπλοκότητάς του.

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

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

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

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

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

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

1.6.6 Μοντέλο κατανομής υδατικών πόρων

Η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ παρέχει τη δυνατότητα αναπαράστασης και των ανθρωπογενών επεμβάσεων σε μια λεκάνη, υιοθετώντας μια σχηματική διάταξη δικτύου, που περιλαμβάνει τις εξής συνιστώσες:

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

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

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

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

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

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

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

Τα παραπάνω ανάγονται σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, μετασχηματίζοντας τις συνιστώσες του πραγματικού συστήματος σε συνιστώσες ενός μοντέλου διγράφου, στο οποίο ζητείται η ελαχιστοποίηση του κόστους κατανομής των ροών κατά μήκος ενός εννοιολογικού δικτύου (Koutsoyiannis *et al.*, 2003· Efstratiadis *et al.*, 2004· Ευστρατιάδης *κ.ά.*, 2007· Efstratiadis *et al.*, 2010). Το πρόβλημα επιλύεται ρητά σε κάθε χρονικό βήμα, ενώ τα αποτελέσματα του εκάστοτε βήματος χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου του επόμενου. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διατύπωσης είναι η ύπαρξη αναλυτικών αλγορίθμων επίλυσης (ειδικές παραλλαγές της μεθόδου simplex για αραιά μητρώα), που εγγυώνται πλήρη ακρίβεια, με σχετικά μικρό υπολογιστικό φόρτο.

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

1.7 Προσαρμογή μοντέλου στη λεκάνη του Γαδουρά

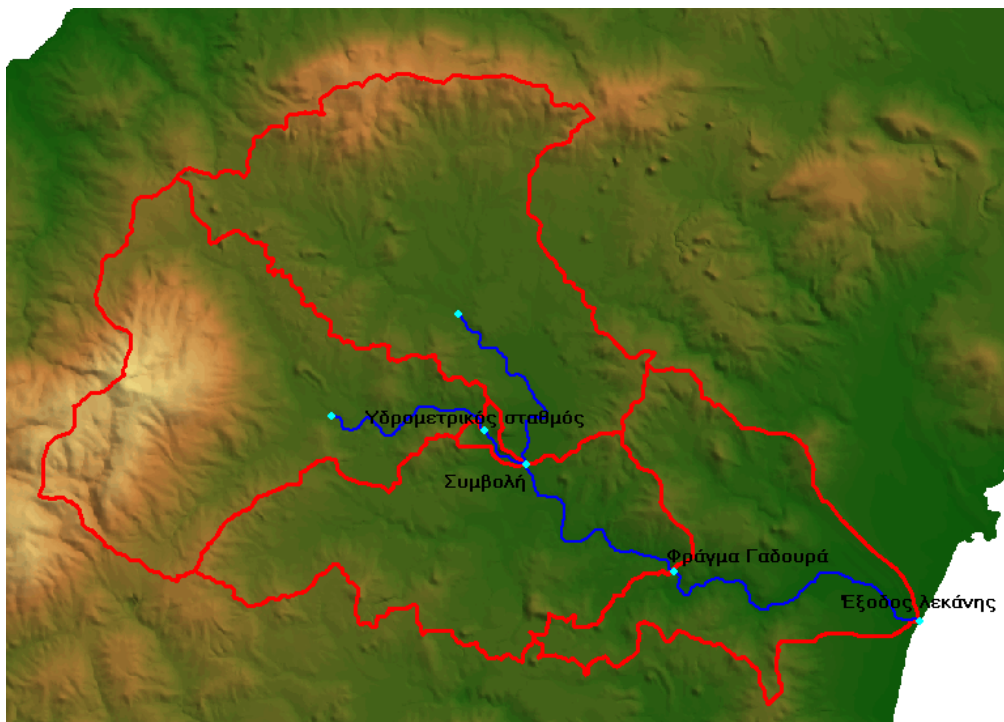
1.7.1 Μεθοδολογία και παραδοχές

Η λεκάνη απορροής του Γαδουρά, συνολικής έκτασης 183.3 km² (Εικόνα 1.23), είναι από τις πλέον αξιόλογες, από πλευράς υδατικού δυναμικού, της Ρόδου, αλλά και η σημαντικότερη από διαχειριστική σκοπιά, καθώς εκεί βρίσκεται το ομώνυμο φράγμα, που αποτελεί το μείζον έργο ταμίευσης του νησιού. Ακόμη, είναι η μοναδική περιοχή όπου διατίθενται συστηματικά δεδομένα (βροχομετρικά, μετεωρολογικά και, κυρίως, υδρομετρικά), με βάση τα οποία μπορεί να γίνει μια σχετικά ασφαλής εκτίμηση των επιφανειακών υδατικών πόρων. Τέλος, μπορεί να θεωρηθεί αρκετά αντιπροσωπευτική των φυσιογραφικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών του νησιού, καθώς περιλαμβάνει περιοχές με όλους τους κυρίαρχους εδαφικούς τύπους (μονάδες υδρολογικής απόκρισης).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, επιχειρήθηκε η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης, με προσαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ σε μηνιαία κλίμακα. Στόχος είναι η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη:

- τη διαθέσιμη υδρομετρική πληροφορία, άμεση (μετρήσεις παροχής) ή έμμεση, στις τρεις θέσεις ελέγχου (υδρομετρικός σταθμός, φράγμα, έξοδος λεκάνης)
- τα χαρακτηριστικά των μονάδων υδρολογικής απόκρισης
- την υδρολογική εμπειρία, όσον αφορά στα μέσα μεγέθη του υδατικού ισοζυγίου.

Η περίοδος προσομοίωσης είναι από τον Οκτώβριο του 2000 έως τον Απρίλιο του 2010. Μέχρι την έναρξη πλήρωσης του φράγματος Γαδουρά, η βαθμονόμηση του μοντέλου βασίστηκε στα δεδομένα του υδρομετρικού σταθμού (και, δευτερευόντως, στις μεμονωμένες μετρήσεις παροχής στην έξοδο της λεκάνης), ενώ στη συνέχεια βασίστηκε στις εκτιμήσεις εισροών από το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα. Οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων εφαρμόστηκαν, στο τελικό στάδιο της παρούσας διερεύνησης, για τη στοχαστική υδρολογική προσομοίωση του συνόλου του νησιού, όπως εξηγείται στην ενότητα 1.8.



Εικόνα 1.23: Λεκάνη απορροής Γαδουρά και σχηματοποίηση υδρογραφικού δικτύου.

1.7.2 Σχηματοποίηση υδροσυστήματος

Για τη σχηματοποίηση των επιφανειακών διεργασιών χρησιμοποιούνται τα επίπεδα πληροφορίας που παρήχθησαν στα πλαίσια των γεωγραφικών επεξεργασιών για το σύνολο του νησιού, όσον αφορά στις υπολεκάνες (βλ. 1.2.1) και τις μονάδες υδρολογικής απόκρισης (βλ. 1.2.2). Η τομή των δύο θεματικών επιπέδων απεικονίζεται στην Εικόνα 1.24, ενώ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους (εκτάσεις και αντίστοιχα ποσοστά) δίνονται στον Πίνακα 1.24. Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του πίνακα, στο 62.5% της λεκάνης του Γαδουρά αναπτύσσονται προσχωματικοί σχηματισμοί (κατηγορίες 1Α και 1Β). Το 24.8% περιλαμβάνει σχηματισμούς χαμηλής περατότητας (κατηγορία 3), που αναπτύσσονται κυρίως στις ΝΑ περιοχές της λεκάνης. Τέλος, οι υψηλής περατότητας σχηματισμοί (κατηγορία 2) αναπτύσσονται κυρίως στο δυτικό και δευτερευόντως στο ΒΔ όριο της λεκάνης.

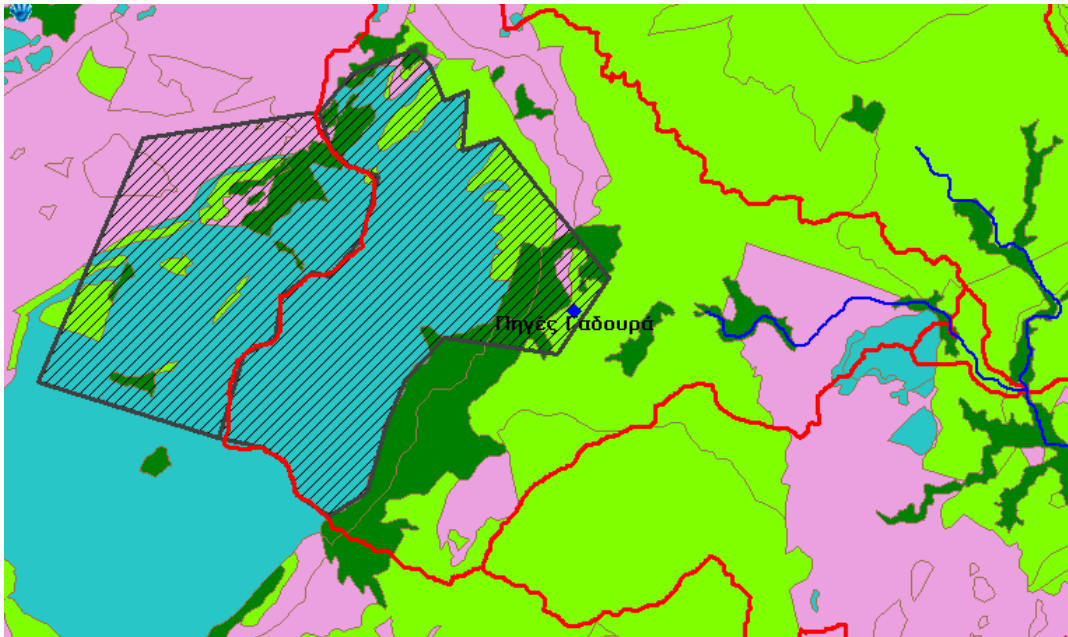
Όσον αφορά στη μοντελοποίηση των υπόγειων διεργασιών, διαμορφώνεται ένα στοιχειώδες σύστημα δύο κυττάρων στο υψηλής περατότητας Δ-ΝΔ τμήμα (Εικόνα 1.25). Το πρώτο κύτταρο, με υψόμετρο βάσης +370 m, συγκεντρώνει την κατείσδυση μέσω του ασβεστολιθικού όγκου του Ατταβύρου, μέρος της οποίας εκφορτίζεται σε πηγή, σε υψόμετρο +384 m. Η υπόλοιπη ποσότητα νερού διαφεύγει εκτός λεκάνης, σε σταθερό υψόμετρο +350 m, το οποίο υλοποιείται μέσω ενός δεύτερου, εικονικού, κυττάρου, άπειρης βάσης. Με τη διαμόρφωση αυτή, είναι δυνατή η παραγωγή βασικής ροής στην υπολεκάνη 15, που τροφοδοτεί το νότιο κλάδο του Γαδουρά. Η ύπαρξη βασικής ροής, και μάλιστα διαλείπουσας, τεκμηριώνεται από τα στοιχεία του υδρομετρικού σταθμού, όπου διατηρείται μια φθίνουσα παροχή στο τέλος της εαρινής ή ακόμα και στη διάρκεια της θερινής, άνυδρης, περιόδου.



Εικόνα 1.24: Τομή υπολεκανών και μονάδων υδρολογικής απόκρισης λεκάνης Γαδουρά.

Πίνακας 1.24: Εκτάσεις υπολεκανών και μονάδων υδρολογικής απόκρισης λεκάνης Γαδουρά.

| Λεκάνη | Έκταση (km ²) | Έκταση ΜΥΑ (km ²) | | | | Ποσοστό (%) | | | |
|--------|---------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------------|------|------|------|
| | | 1A | 1B | 2 | 3 | 1A | 1B | 2 | 3 |
| 9 | 0.99 | 0.10 | 0.72 | 0.17 | 0.00 | 10.1 | 72.6 | 17.3 | 0.0 |
| 15 | 51.63 | 7.69 | 19.93 | 13.65 | 10.36 | 14.9 | 38.6 | 26.4 | 20.1 |
| 16 | 57.57 | 2.02 | 44.37 | 8.27 | 2.92 | 3.5 | 77.1 | 14.4 | 5.1 |
| 17 | 40.60 | 2.19 | 20.12 | 0.97 | 17.32 | 5.4 | 49.6 | 2.4 | 42.7 |
| 18 | 32.49 | 6.89 | 10.56 | 0.19 | 14.86 | 21.2 | 32.5 | 0.6 | 45.7 |
| Σύνολο | 183.29 | 16.88 | 95.70 | 23.26 | 45.46 | 10.3 | 52.2 | 12.7 | 24.8 |

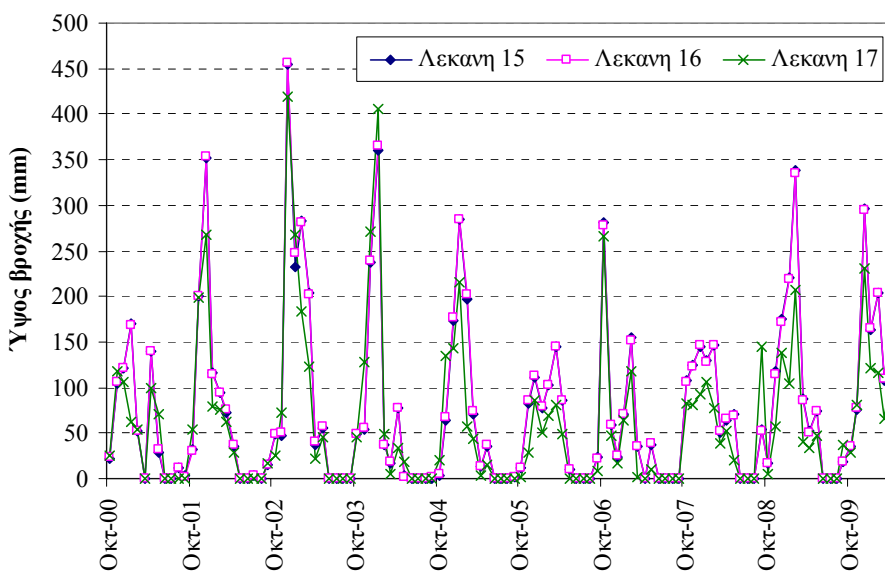


Εικόνα 1.25: Ανάντη τμήμα λεκάνης, όπου διαμορφώνεται το σύστημα των δύο υπόγειων κυττάρων και της πηγής για την προσομοίωση της βασικής ροής του νότιου κλάδου του Γαδούρα.

1.7.3 Υδρολογικές χρονοσειρές εισόδου

Οι υδρολογικές χρονοσειρές που απαιτεί το μοντέλο είναι η επιφανειακή βροχόπτωση και η δυνητική εξατμοδιαπνοή των υπολεκανών. Τα επιφανειακά ύψη βροχής της περιόδου προσομοίωσης (10/2000-4/2010) κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen και υψομετρική αναγωγή στα αντίστοιχα μέσα υψόμετρα των υπολεκανών, για βροχοβαθμίδα 0.6 mm/m (βλ. 1.3.4). Οι χρονοσειρές για τρεις χαρακτηριστικές υπολεκάνες απεικονίζονται στα διαγράμματα της Εικόνας 1.26.

Όσον αφορά στη μηνιαία δυνητική εξατμοδιαπνοή, εκτιμήθηκε με τη διαδικασία που περιγράφεται στο εδάφιο 1.4.3. Στην υδρολογική προσομοίωση, χρησιμοποιήθηκε η ίδια τυπική χρονοσειρά για όλες τις υπολεκάνες του συστήματος.



Εικόνα 1.26: Χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης περιόδου 10/2000-4/2010 σε τρεις χαρακτηριστικές υπολεκάνες του υδrosυστήματος.

1.7.4 Αρχικές συνθήκες προσομοίωσης

Οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου αναφέρονται στις μεταβλητές κατάστασης του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος στην αρχή της προσομοίωσης, δηλαδή τον Οκτώβριο του 2000. Συγκεκριμένα:

- στο ύψος υγρασίας της δεξαμενής υγρασίας κάθε εδαφικού στοιχείου, που δημιουργείται από την τομή των πέντε υπολεκανών και των τεσσάρων μονάδων υδρολογικής απόκρισης·
- στη στάθμη νερού στη (μοναδική) υπόγεια δεξαμενή του μοντέλου.

Οι αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης προσδιορίστηκαν εμπειρικά. Επειδή η προσομοίωση ξεκινά στην αρχή του υδρολογικού έτους, μετά μάλιστα από ένα εντελώς άνυδρο καλοκαίρι και, γενικά, μια περίοδο χαμηλής υδροφορίας, θεωρήθηκε μηδενική υγρασία στις εδαφικές δεξαμενές. Επιπλέον, η στάθμη υπόγειου νερού τοποθετήθηκε ακριβώς στο υψόμετρο εκφόρτισης της πηγής (+384 m), που εξασφαλίζει ότι, έστω και οριακά, δεν θα παραχθεί βασική ροή τον πρώτο μήνα της προσομοίωσης.

1.7.5 Διατύπωση του προβλήματος βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση του μοντέλου, ήτοι η εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων του, βασίστηκε σε μια πολυκριτηριακή προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία επιδιώκεται η βέλτιστη προσαρμογή του σε τρεις θέσεις ελέγχου, όπου διατίθενται συστηματικές (υδρομετρικός σταθμός, φράγμα) και σποραδικές μετρήσεις παροχής (έξοδος λεκάνης).

Οι παράμετροι (βαθμοί ελευθερίας) του μοντέλου αναφέρονται στις συνιστώσες του επιφανειακού και υπόγειου συστήματος. Με την υπόθεση μηδενικών απωλειών λόγω διήθησης σε όλο το μήκος του υδρογραφικού δικτύου του Γαδουρά, και με ενοποίηση των μονάδων υδρολογικής απόκρισης που αναφέρονται στις κατηγορίες περατότητας 1Α και 1Β, οι προς βελτιστοποίηση παράμετροι είναι:

- οι έξι παράμετροι ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης ($6 \times 3 = 18$ παράμετροι)·
- η υδραυλική αγωγιμότητα και ειδική απόδοση του κύτταρου που συγκεντρώνει την κατείσδυση των περατών σχηματισμών της υπολεκάνης 15·
- η υδραυλική αγωγιμότητα των πηγών του νότιου κλάδου του Γαδουρά·
- υδραυλική αγωγιμότητα του εικονικού κυττάρου που συγκεντρώνει τις υπόγειες διαφυγές.

Επειδή προκύπτει ένας σχετικά μεγάλος αριθμός μεταβλητών ελέγχου (18 για το επιφανειακό και 4 για το υπόγειο σύστημα), είναι αναγκαία η διατύπωση ενός ικανού αριθμού κριτηρίων προσαρμογής, ώστε να τηρείται η αρχή της φειδωλής παραμετροποίησης (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2010). Τα κριτήρια ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- μέτρα προσαρμογής των προσομοιωμένων στις παρατηρημένες αποκρίσεις·
- μέτρα ποινής για την αναπαραγωγή της στείρευσης της ροής (σφάλμα μηδενικών παροχών).

Συγκεκριμένα, για τον έλεγχο της προσαρμογής του μοντέλου στα ιστορικά δείγματα μέσω μηνιαίων παροχών χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης *αποτελεσματικότητας* (efficiency), που διατυπώνεται ως εξής:

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (y_t - y_t')^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (1.4)$$

Ο παραπάνω δείκτης ελέγχει κατά πόσο η προσομοιωμένη χρονοσειρά, y_t' , είναι καλύτερη εκτιμήτρια σε σχέση με τη μέση τιμή, \bar{y} , των παρατηρήσεων, y_t . Η θεωρητικά μέγιστη τιμή του είναι μονάδα, που υποδηλώνει τέλεια προσαρμογή του μοντέλου, ενώ δεν υπάρχει κάτω όριο ως προς την ελάχιστη τιμή τους. Για την αναπαράσταση της απορροής εξόδου μιας λεκάνης, τιμές της τάξης του 0.80-0.90 θεωρούνται πολύ ικανοποιητικές, ενώ τιμές της τάξης του 0.30 θεωρούνται οριακές για την αποδοχή

ενός μοντέλου ως αντιπροσωπευτικού του φυσικού συστήματος. Η μηδενική τιμή υποδηλώνει ότι το μοντέλο αποτελεί ισοδύναμη εκτιμήτρια με την παρατηρημένη μέση τιμή, ενώ σε περίπτωση αρνητικής τιμής το μοντέλο θεωρείται εντελώς αναξιόπιστο για προγνώσεις (Ευστρατιάδης, 2008).

Το σφάλμα των μηδενικών παροχών είναι ένα εμπειρικό μέτρο, με το οποίο ελέγχεται αν το μοντέλο αναπαράγει φαινόμενα διακοπής της ροής ή, αντίστροφα, μηδενίζει αδικαιολόγητα την απορροή ενός ποταμού ή μιας πηγής. Πρόκειται για μια σημαντική πληροφορία, που μάλιστα δεν υπόκειται σε κανενός είδους σφάλμα μέτρησης, όπως συμβαίνει με την παροχή, ειδικά όταν η τελευταία εκτιμάται με βάση αραιές υδρομετρήσεις.

Για την μαθηματική διατύπωση του μέτρου μηδενικών τιμών εισάγεται η ακόλουθη μεταβλητή:

$$z_t = \begin{cases} y_t & \text{αν } y_t' = 0 \\ y_t' & \text{αν } y_t = 0 \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (1.5)$$

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα αναπαραγωγής των μηδενικών τιμών υπολογίζεται ως:

$$e_0 = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{t=1}^T z_t^2} \quad (1.6)$$

όπου T_0 ο αριθμός των χρονικών βημάτων κατά τα οποία το μοντέλο είτε δεν αναπαράγει την παρατηρημένη μηδενική τιμή ($y_t' > 0, y_t = 0$) είτε μηδενίζει την παροχή, ενώ κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα ($y_t' = 0, y_t > 0$).

Ως καθολικό κριτήριο επίδοσης του μοντέλου (ή, ισοδύναμα, στοχική συνάρτηση του προβλήματος βαθμονόμησης) θεωρήθηκε το σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους κριτηρίων για τις τρεις θέσεις ελέγχου. Οι σχετικοί συντελεστές βάρους δίνονται στον Πίνακα 1.25. Η επιλογή των βαρών έγινε μετά από δοκιμές, με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαραγωγή της παρατηρημένης απορροής στο φράγμα και, δευτερευόντως, στον υδρομετρικό σταθμό. Στην έξοδο της λεκάνης δόθηκε μια πολύ μικρή τιμή βάρους, αφού διατίθενται σποραδικές, μόνο, μετρήσεις παροχής, που δεν επιτρέπουν την κατάρτιση ενός αξιόπιστου δείγματος ελέγχου.

Επισημαίνεται ότι λόγω του περιορισμένου μήκους των δειγμάτων παροχής (κατά μείζονα λόγο στη θέση του φράγματος, όπου διαθέτουμε λιγότερο από τρία υδρολογικά έτη μετρήσεων), δεν κρίθηκε σκόπιμος ο καθορισμός μιας ανεξάρτητης χρονικής περιόδου για την επαλήθευση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου. Αντί αυτού, προτιμήθηκε η αξιοποίηση του συνόλου των δειγμάτων απορροής για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, ώστε να εξασφαλιστεί η προσαρμογή του σε όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτικές καταστάσεις υδροφορίας. Συνεπώς, η περίοδος βαθμονόμησης ήτοι ο χρονικός ορίζοντας της βελτιστοποίησης, ταυτίζεται με την περίοδο προσομοίωσης, με εξαίρεση του δύο τελευταίους μήνες (Μάρτιος-Απρίλιος 2010), για τους οποίους δεν κατέστη δυνατό να βρεθούν επίκαιρα βροχομετρικά στοιχεία, για τον ασφαλή εκτίμηση των φορτίσεων του μοντέλου.

Πίνακας 1.25: Θέσεις ελέγχου, χρονική περίοδος και μέγεθος δειγμάτων και συντελεστές βάρους στοχικής συνάρτησης.

| Θέση ελέγχου | Περίοδος βαθμονόμησης | Μέγεθος δείγματος | Συντελεστές βάρους κριτηρίων | |
|----------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| | | | Αποτελεσματικότητα | Μηδενικές παροχές |
| Φράγμα Γαδουρά | 10/07 – 2/10 | 31 | 4.0 | 5.0 |
| Υδρομετρικός σταθμός | 11/00 – 9/06 | 68 | 1.0 | 5.0 |
| Έξοδος λεκάνης | 12/00 – 4/03 | 12 | 0.1 | 0.0 |

1.7.6 Περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης

Ο σχετικά μεγάλος αριθμός παραμέτρων, σε συνδυασμό με το μικρό μήκος δείγματος για τον έλεγχο των αποκρίσεων του μοντέλου, είχε ως συνέπεια τον εντοπισμό πληθώρας συνδυασμών παραμέτρων, με τις οποίες προκύπτει εξίσου καλή αναπαραγωγή των ιστορικών εισροών του φράγματος (όπου και δίνεται η μεγαλύτερη έμφαση). Πρόκειται για ένα σύνηθες πρόβλημα των υδρολογικών μοντέλων, για τα οποία μπορούν να εντοπιστούν ισοδύναμα αποδεκτές λύσεις. Στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο όρος *equifinality*, που εισήγαγαν οι Beven and Binley (1992). Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την προγνωστική ικανότητα των μοντέλων, που γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνει ο αριθμός των παραμέτρων.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί μια κατά το δυνατό πιο ρεαλιστική βαθμονόμηση, πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές επιλύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης, δοκιμάζοντας διαφορετικά όρια αναζήτησης των παραμέτρων καθώς και διαφορετικούς συντελεστές βάρους των κριτηρίων. Για το σκοπό αυτό, πέρα από τα ποσοτικά κριτήρια του εδαφίου 1.7.5, ελήφθησαν υπόψη τα «ποιοτικά» χαρακτηριστικά της προσομοίωσης, που αφορούν στην ευλογοφάνεια τόσο των παραμέτρων όσο και των μη ελεγχόμενων (από μετρήσεις) μεταβλητών εξόδου του μοντέλου. Για παράδειγμα, όσον αφορά στους συντελεστές στείρευσης για παραγωγή κατεϊσδυσής, οι οποίοι σχετίζονται άμεσα με την περατότητα των σχηματισμών που αναπτύσσονται στις αντίστοιχες μονάδες υδρολογικής απόκρισης, τέθηκαν κατάλληλα όρια, που εξασφαλίζουν το υψηλότερο ποσοστό κατεϊσδυσής στην κατηγορία πετρωμάτων 2 (ασβεστόλιθοι) και το χαμηλότερο στην κατηγορία 3 (φλύσχης). Εκτός από τις βελτιστοποιημένες τιμές των κριτηρίων και των παραμέτρων, κάθε δοκιμή συνοδεύτηκε από έλεγχο του υδατικού ισοζυγίου, τόσο στο σύνολο της λεκάνης όσο και στις επιμέρους υπολεκάνες, ώστε να εξασφαλιστεί αν η κατανομή της βροχόπτωσης σε εξαμηνιαία, κατεϊσδυσή και απορροή είναι συνεπής με την υδρολογική εμπειρία.

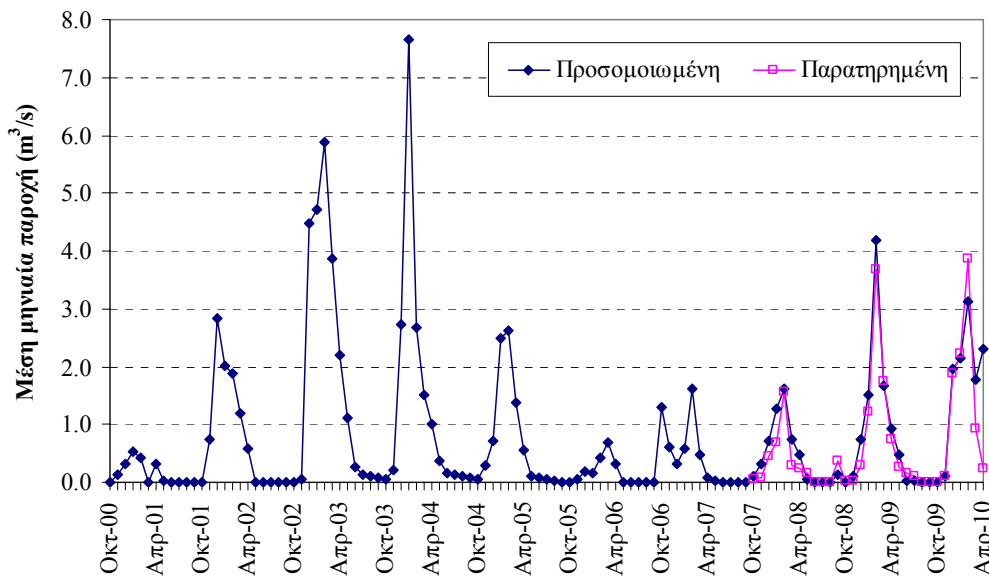
1.7.7 Αποτελέσματα μοντέλου και σχολιασμός

Στις Εικόνες 1.27 έως 1.29 απεικονίζονται οι προσομοιωμένες χρονοσειρές μηνιαίας παροχής στις τρεις θέσεις ελέγχου, οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες παρατηρημένες. Από τη σύγκριση των υδρογραφημάτων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

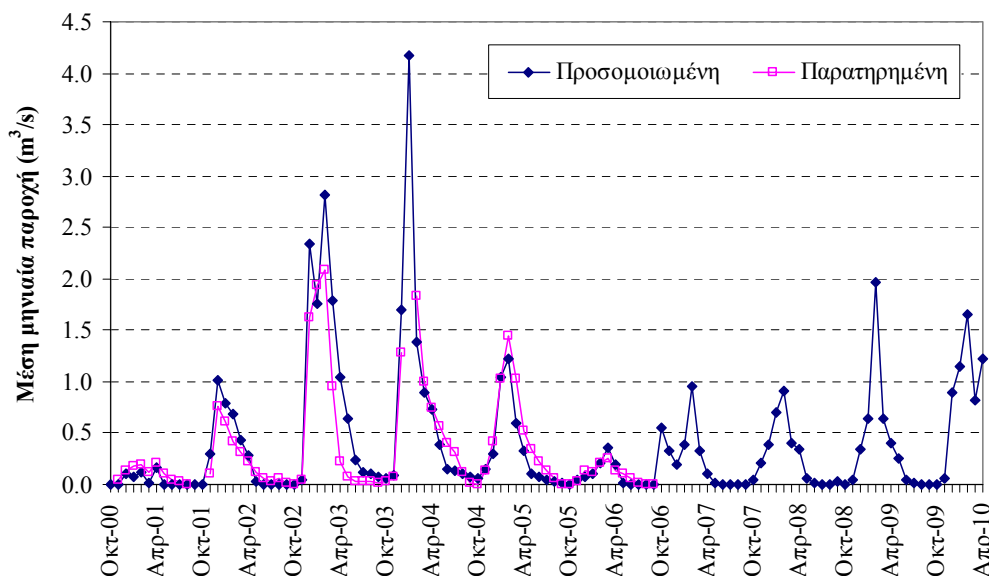
- Στη θέση του φράγματος, που είναι και η πλέον κρίσιμη από διαχειριστική σκοπιά, αναπαράγεται με πολύ καλή ακρίβεια (EFF = 91.6%) το σύνολο, σχεδόν, την παρατηρήσεων (Εικόνα 1.27). Η μέση μηνιαία παροχή της περιόδου προσομοίωσης (10/2000-4/2010) ανέρχεται σε $0.80 \text{ m}^3/\text{s}$, που αντιστοιχεί σε μια μέση ετήσια εισροή 25.3 hm^3 . Επισημαίνεται ότι η δεκαετία εφαρμογής του μοντέλου είναι αρκετά αντιπροσωπευτική της υδρολογικής διαίτας της λεκάνης, καθώς περιλαμβάνει εναλλαγές ξηρών και υγρών περιόδων. Ωστόσο, οι μέσες τιμές βροχόπτωσης στους βασικούς σταθμούς της λεκάνης (Εμπωνας, Λαέρμα, Απόλλωνα) είναι κατά 10-15% αυξημένη σε σχέση με τις μέσες τιμές των πλήρων δειγμάτων, μήκους ~25 ετών. Συνεπώς, η μέση απορροή των 25.3 hm^3 που προκύπτει από την προσομοίωση της περιόδου 2000-2010 ενδέχεται να είναι ελαφρά υπερεκτιμημένη, σε σχέση με την πραγματική μέση τιμή των τελευταίων π.χ. 30 ετών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι με βάση το ρυθμό πλήρωσης του ταμιευτήρα, η μέση παροχή των τριών τελευταίων υδρολογικών ετών (με βροχοπτώσεις πάνω από το μέσο όρο) κυμαίνεται στα επίπεδα των $0.69 \text{ m}^3/\text{s}$, ή 21.8 hm^3 . Οι εν λόγω τιμές είναι χαμηλότερες από εκτιμήσεις παλαιότερων μελετών σχετικά με το υδατικό δυναμικό της λεκάνης, π.χ. 28-35 hm^3 κατά τον Κουτσογιάννη (1998). Βεβαίως, καμία από τις εν λόγω υδρολογικές μελέτες δεν είχε βασιστεί σε στοιχεία μετρήσεων, παρά μόνο σε εμπειρικά μοντέλα.
- Το μοντέλο προσαρμόζεται πολύ ικανοποιητικά στο δείγμα παροχών του υδρομετρικού σταθμού, επιτυγχάνοντας αποτελεσματικότητα 76.6% (Εικόνα 1.28). Γενικά, αναπαράγει με καλή ακρίβεια την ιδιαίτερη υδρολογική διαίτα της λεκάνης, που χαρακτηρίζεται από έντονες εναλλαγές ξηρών

και υγρών μηνών, με εξαιρετικά απότομους ανοδικούς και καθοδικούς κλάδους. Η μέση παροχή της περιόδου προσομοίωσης ανέρχεται σε $0.40 \text{ m}^3/\text{s}$ (12.6 hm^3), εκ των οποίων τα $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ προέρχονται από την εκφόρτιση πηγών, η οποία περιορίζεται στα έτη υψηλής υδροφορίας (Εικόνα 1.30). Συνεπώς, ο νότιος κλάδος του Γαδουρά συνεισφέρει το ήμισυ των εισροών του φράγματος, ενώ η λεκάνη απορροής του καταλαμβάνει το 1/3 της συνολικής λεκάνης του ταμιευτήρα.

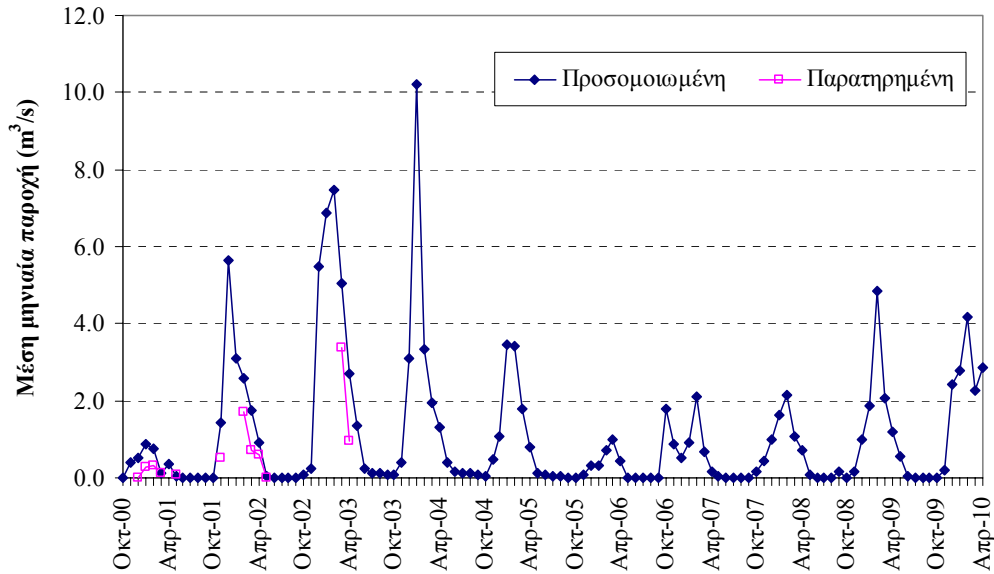
- Τέλος, όσον αφορά στην έξοδο της λεκάνης, το προσομοιωμένο δείγμα είναι γενικά συνεπές με τις σποραδικές μετρήσεις παροχής (Εικόνα 1.29). Η μέση παροχή της δεκαετίας ανέρχεται σε $1.09 \text{ m}^3/\text{s}$ (34.2 hm^3). Η τιμή κρίνεται λογική, σε σύγκριση με το μέσο όρο των $0.73 \text{ m}^3/\text{s}$ του πλήρους δείγματος υδρομετρήσεων (Πίνακας 1.13) που, όπως εξηγήθηκε, δίνει μια υποεκτιμημένη εικόνα της μέσης απορροής, καθώς δεν πραγματοποιούνται υδρομετρήσεις σε περιόδους πλημμυρών.



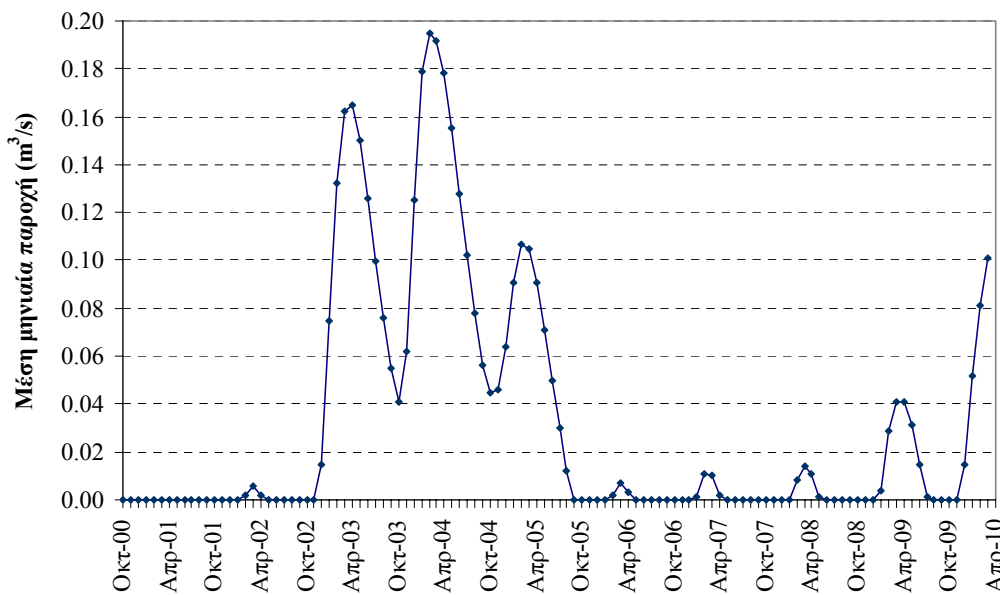
Εικόνα 1.27: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής στη θέση του φράγματος Γαδουρά.



Εικόνα 1.28: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Γαδουρά.



Εικόνα 1.29: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής στην έξοδο της λεκάνης του Γαδουρά.



Εικόνα 1.30: Προσομοιωμένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής πηγών Γαδουρά.

Στον Πίνακα 1.26 δίνονται οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης. Παρατηρείται ότι στις περιοχές όπου κυριαρχούν προσχωματικοί σχηματισμοί (1A και 1B), υπάρχει πολύ μεγάλη δυνατότητα κατακράτησης υγρασίας στην επιφάνεια του εδάφους και την ακόρεστη ζώνη, η οποία κυρίως καταναλώνεται σε υδρολογικές απώλειες (εξατμοδιαπνοή). Αντίθετα, στις περιοχές υψηλής περατότητας (κατηγορία 2) μεγιστοποιείται η παραγωγή κατείδυσης, με τον σχετικό συντελεστή στέρειυσης να ανέρχεται σε 34.1%. Τέλος, στις περιοχές χαμηλής περατότητας (κατηγορία 3) ελαχιστοποιείται η κατείδυση (συντελεστής στέρειυσης 3.4%) και μεγιστοποιείται η παραγωγή απορροής, σε όλες τις μορφές της (άμεση, λόγω κορεσμού και υποδερμική). Συγκεκριμένα, το ποσοστό της περίσσειας (άνω των 40.6 mm) βροχής που εμφανίζεται ως άμεση απορροή ανέρχεται σε 11.3%, η χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας είναι πολύ μικρή (322 mm), ευνοώντας έτσι την παραγωγή απορροής λόγω κορεσμού, ενώ ευνοείται και η παραγωγή υποδερμικής ροής,

καθώς αυτή πραγματοποιείται πάνω από ένα πολύ μικρό κατώφλι (7.5% της χωρητικότητας υγρασίας, ήτοι 24 mm), με ρυθμό (συντελεστή στείρευσης) 12.0%. Η ευλογοφάνεια των τιμών των παραμέτρων, με βάση τα χαρακτηριστικά των μονάδων υδρολογικής απόκρισης, αποτελεί επιπλέον τεκμήριο καλής προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου.

Στους Πίνακες 1.27 και 1.28 δίνονται τα μέσα ετήσια υδατικά ισοζύγια ανά υπολεκάνη και συνολικά, εκφρασμένα σε ισοδύναμα ύψη νερού και ως ποσοστά της βροχόπτωσης, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η κατανομή του ισοζυγίου διαφοροποιείται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της υπολεκάνης. Για παράδειγμα, η ΝΔ υπολεκάνη 15, όπου αναπτύσσεται το μεγαλύτερο ποσοστό περατών σχηματισμών, εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό κατείσδυσης. Η υπολεκάνη ανάντη του φράγματος δέχεται, κατά μέσο όρο, 948 mm βροχής, από τα οποία 542 mm (57.2%) μετασχηματίζονται σε εξατμοδιαπνοή, 213 mm (22.5%) τροφοδοτούν τον υπόγειο υδροφόρο και 161 mm (17.0%) απορρέουν επιφανειακά. Η ίδια σχεδόν κατανομή ισχύει για το σύνολο της λεκάνης, με μια μικρή αύξηση του ποσοστού της απορροής (18.7%) έναντι της κατείσδυσης (20.8%), λόγω της αυξημένης παρουσίας αδιαπέρατων πετρωμάτων στο κατάντη τμήμα της λεκάνης.

Πίνακας 1.26: Βελτιστοποιημένες παράμετροι μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

| Κατηγορία σχηματισμών | 1A | 2 | 1B | 3 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Ποσοστό περίσσειας βροχής που εμφανίζεται ως άμεση απορροή (%) | 4.4 | 0.8 | 4.4 | 11.3 |
| Χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας (mm) | 779.0 | 449.0 | 779.0 | 322.0 |
| Κατώφλι αποθέματος υγρασίας για παραγωγή υποδερμικής ροής (%) | 18.3 | 47.7 | 18.3 | 7.5 |
| Ρυθμός εκφόρτισης υγρασίας για παραγωγή υποδερμικής ροής (%) | 12.0 | 7.7 | 12.0 | 12.0 |
| Ρυθμός εκφόρτισης υγρασίας για παραγωγή κατείσδυσης (%) | 9.8 | 34.1 | 9.8 | 3.4 |
| Χωρητικότητα κατακράτησης της βροχής (mm) | 79.9 | 0.0 | 79.9 | 40.6 |

Πίνακας 1.27: Μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο λεκάνης Γαδουρά περιόδου 10/2000-4/2010.

| Υπολεκάνη | Έκταση (km ²) | Βροχόπτωση (mm) | Εξατμοδιαπνοή (mm) | Κατείσδυση (mm) | Απορροή (mm) |
|------------------|---------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------|
| 9 | 1.0 | 674.9 | 443.1 | 158.2 | 55.8 |
| 15 | 51.6 | 1126.5 | 564.7 | 301.1 | 221.8 |
| 16 | 57.6 | 938.0 | 558.1 | 217.3 | 128.0 |
| 17 | 40.6 | 741.7 | 492.5 | 96.0 | 131.9 |
| 18 | 32.5 | 1009.6 | 575.2 | 137.1 | 266.5 |
| Ανάντη φράγματος | 150.8 | 948.0 | 541.9 | 213.0 | 160.7 |
| Σύνολο | 183.3 | 958.9 | 547.8 | 199.5 | 179.5 |

Πίνακας 1.28: Ποσοστιαίο υδατικό ισοζύγιο (%) λεκάνης Γαδουρά περιόδου 10/2000-4/2010.

| Υπολεκάνη | Εξατμοδιαπνοή | Κατείσδυση | Απορροή |
|------------------|---------------|------------|---------|
| 9 | 65.7 | 23.4 | 8.3 |
| 15 | 50.1 | 26.7 | 19.7 |
| 16 | 59.5 | 23.2 | 13.7 |
| 17 | 66.4 | 12.9 | 17.8 |
| 18 | 57.0 | 13.6 | 26.4 |
| Ανάντη φράγματος | 57.2 | 22.5 | 17.0 |
| Σύνολο | 57.1 | 20.8 | 18.7 |

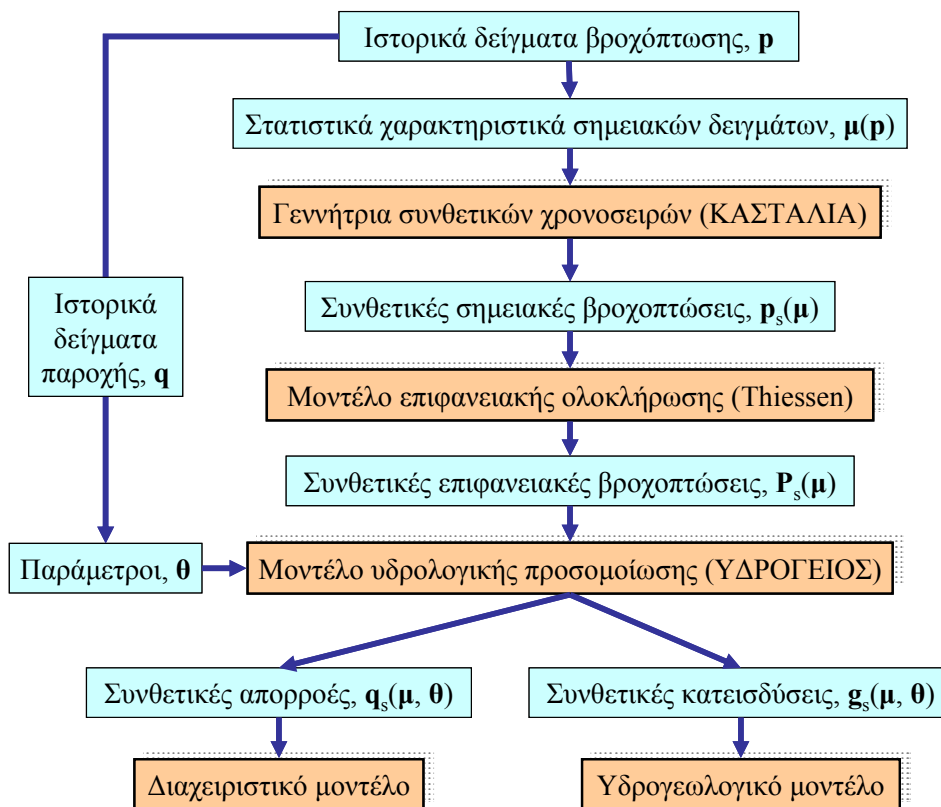
Η απόκλιση της τάξης του 3% στο άθροισμα των ποσοστών από το 100% οφείλεται στο ότι η προσομοίωση δεν ολοκληρώνεται σε ένα πλήρες υδρολογικό έτος, με συνέπεια να υπάρχει διαφορά λόγω αποθήκευσης υγρασίας.

1.8 Στοχαστική υδρολογική προσομοίωση Ρόδου

1.8.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης

Από την πληθώρα των πηγών αβεβαιότητας που διέπει την λειτουργία ενός συστήματος έργων αξιοποίησης υδατικών πόρων, σημαντικότερη ασφαλώς είναι η υδρολογική. Αυτή οφείλεται στην αδυναμία πρόβλεψης της εξέλιξης των υδρομετεωρολογικών διεργασιών, η χαοτική συμπεριφορά των οποίων καθιστά ανέφικτη την πραγματοποίηση ασφαλών προγνώσεων για χρονικό ορίζοντα πέρα των λίγων ημερών. Ωστόσο, η χρονική αυτή κλίμακα είναι απολύτως ανεπαρκής, δεδομένου ότι η ανάγκη υπερετήσιας ρύθμισης ενός υδροσυστήματος προϋποθέτει την προσομοίωση της λειτουργίας του για χρονικό ορίζοντα πολλών ετών.

Η αδυναμία πρόγνωσης των διεργασιών με την χρήση προσδιοριστικών μοντέλων οδήγησε στην εναλλακτική θεώρησή τους ως τυχαίων μεταβλητών και την αντιμετώπισή τους με τη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων. Στις αρχές αυτές βασίζονται τα λεγόμενα *στοχαστικά υδρολογικά μοντέλα* που περιγράφουν, στατιστικά, τις χρονικές και χωρικές συσχετίσεις των υδρολογικών διεργασιών, ποσοτικοποιώντας την αβεβαιότητα γύρω από την εξέλιξή τους. Τα μοντέλα αυτά εφαρμόζονται για τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών, οι οποίες αναπαράγουν τη στατιστική εξάρτηση και τα στατιστικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων ιστορικών. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους είναι η απουσία περιορισμού ως προς μέγεθος του δείγματος, κάτι που καθιστά δυνατή την χρήση τους για την εμπειρική εκτίμηση οσοδήποτε μεγάλων επιπέδων αξιοπιστίας και άλλων πιθανοτικών μεγεθών.



Εικόνα 1.31: Μεθοδολογικό πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης.

Το γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο της παρούσας μελέτης απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 1.31. Η στοχαστική προσομοίωση υλοποιείται ταυτόχρονα για το επιφανειακό και το υπόγειο σύστημα, για τα οποία προσαρμόζονται ένα διαχειριστικό (WEAP) και ένα υδρογεωλογικό μοντέλο, αντίστοιχα. Τα δύο μοντέλα δέχονται ως υδρολογικές εισόδους την απορροή των κύριων έργων

ταμίευσης (φράγματα, λιμνοδεξαμενές) και την κατανεμημένη φόρτιση των υπόγειων κυττάρων, λόγω της κατείσδυσης. Η απορροή και η κατείσδυση παράγονται από το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, με χρήση των βελτιστοποιημένων (από τη βαθμονόμηση) παραμέτρων και είσοδο τις συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης των υπολεκανών. Οι τελευταίες έχουν προκύψει με επιφανειακή ολοκλήρωση των αντίστοιχων σημειακών, οι οποίες παράγονται από μια γεννήτρια συνθετικών χρονοσειρών (μοντέλο ΚΑΣΤΑΛΙΑ). Οι σημειακές συνθετικές χρονοσειρές διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της πρωτογενούς πληροφορίας, που είναι τα ιστορικά δείγματα βροχοπτώσεων.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής, το στοχαστικό πλαίσιο περιλαμβάνει δύο ομάδες παραμέτρων:

- τις παραμέτρους του στοχαστικού μοντέλου, οι οποίες υπολογίζονται αναλυτικά, με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών χρονοσειρών σημειακής βροχόπτωσης, και
- τις παραμέτρους του υδρολογικού μοντέλου, οι οποίες εκτιμώνται ημιεμπειρικά, μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης, με είσοδο τα ιστορικά δείγματα βροχοπτώσεων και παροχών.

Στη συνέχεια, εισάγονται και άλλες παράμετροι, που αναφέρονται στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του διαχειριστικού μοντέλου (π.χ. χαρακτηριστικά μεγέθη έργων, υδατικές ανάγκες, περιορισμοί) και στις παραμέτρους του μοντέλου υδρογεωλογικής προσομοίωσης.

1.8.2 Συνοπτική περιγραφή του λογισμικού ΚΑΣΤΑΛΙΑ

Η παραγωγή των σημειακών συνθετικών βροχοπτώσεων έγινε με το λογισμικό ΚΑΣΤΑΛΙΑ, το οποίο αναπτύχθηκε στο ΕΜΠ (Ευστρατιάδης κ.ά., 2005) και ενσωματώνει εξελιγμένες τεχνικές στοχαστικής προσομοίωσης και πρόγνωσης (Koutsoyiannis and Manetas, 1996· Koutsoyiannis, 1999, 2000, 2001). Το πρόγραμμα είναι ελεύθερα διαθέσιμο στη διεύθυνση <http://www.itia.ntua.gr/el/softinfo/2/>.

Η ΚΑΣΤΑΛΙΑ υλοποιεί ένα στοχαστικό σχήμα ταυτόχρονης γέννησης πολλών μεταβλητών και δύο χρονικών επιπέδων, ετήσιου και μηνιαίου. Ως μεταβλητή νοείται μια υδρολογική διεργασία (π.χ. βροχόπτωση), που πραγματοποιείται σε συγκεκριμένη γεωγραφική θέση. Η πολυμεταβλητή ανάλυση επιτρέπει την ταυτόχρονη προσομοίωση διεργασιών που πραγματοποιούνται σε γειτονικές θέσεις ή έχουν σχέση αίτιου-αποτελέσματος, και ως εκ τούτου εμφανίζουν στατιστική εξάρτηση. Επιπλέον, η ανάλυση δύο χρονικών επιπέδων επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών μοντέλων προσομοίωσης των ετήσιων και μηνιαίων υδρολογικών διεργασιών, με στόχο την ακριβέστερη περιγραφή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, όπως η εμμονή και η περιοδικότητα αντίστοιχα.

Οι παράμετροι των δύο μοντέλων εκτιμώνται βάσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των ιστορικών δειγμάτων, τα οποία αναπαράγονται στις συνθετικές χρονοσειρές. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά που διατηρούνται εντάσσονται σε δύο κατηγορίες παραμέτρων και είναι:

- οι παράμετροι των περιθώριων συναρτήσεων κατανομής, και συγκεκριμένα οι μέσες τιμές, οι τυπικές αποκλίσεις και οι συντελεστές ασυμμετρίας·
- οι παράμετροι των από κοινού συναρτήσεων κατανομής, και συγκεκριμένα οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης και οι συντελεστές ετεροσυσχέτισης μηδενικής τάξης.

Οι παραπάνω συνιστούν το ελάχιστο σύνολο ουσιωδών στατιστικών παραμέτρων που, κατά κανόνα, απαιτούνται για την αναπαραγωγή της διαίτας των υδρολογικών μεταβλητών στα πλαίσια της στοχαστικής προσομοίωσης ενός υδροσυστήματος. Για την εκτίμηση των δειγματικών τιμών των παραμέτρων εφαρμόζονται τυπικές στατιστικές επεξεργασίες πάνω στις ιστορικές χρονοσειρές.

Η γέννηση των χρονοσειρών γίνεται από την υψηλότερη (ετήσια) στη χαμηλότερη (μηνιαία) χρονική κλίμακα. Αρχικά, εισάγεται μια θεωρητική συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς των ετήσιων διεργασιών, που δίνεται από τη σχέση (Koutsoyiannis, 2000):

$$\gamma_j = \gamma_0 [1 + \kappa \beta j]^{-1/\beta} \quad (1.7)$$

όπου γ_j ο συντελεστής αυτοσυνδιασποράς για βήμα υστέρησης j , γ_0 η διασπορά της μεταβλητής και κ , β παράμετροι που χαρακτηρίζουν την εμμονή της χρονοσειράς. Το φαινόμενο της εμμονής (γνωστό και ως φαινόμενο Hurst, απ' όπου λαμβάνει την ονομασία του ο φερώνυμος συντελεστής που εκφράζει ποσοτικά την εμμονή) αναφέρεται στην φυσική τάση ομαδοποίησης των περιόδων χαμηλής και υψηλής υδροφορίας, αντίστοιχα. Με την εμμονή σχετίζονται οι παρατεταμένες ξηρασίες και η κλιματική μεταβλητότητα, η οποία εμφανίζεται με τη μορφή τυχαίων διαταραχών μεγάλης χρονικής κλίμακας. Με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων κ και β , είναι δυνατή η αναπαραγωγή της εμμονής στη συνθετική χρονοσειρά, κάτι ιδιαίτερα κρίσιμο για την ορθολογική διαχείριση των έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων. Για $\beta = 0$, που ισοδυναμεί με συντελεστή Hurst ίσο με 0.50, πραγματοποιείται προσομοίωση χωρίς εμμονή.

Η γέννηση των ετήσιων τιμών γίνεται με το ακόλουθο σχήμα συμμετρικών κινούμενων μέσων όρων:

$$Z_i = \sum_{j=-s}^s \alpha_{|j|} V_{i+j} = \alpha_s V_{i-s} + \dots + \alpha_1 V_{i-1} + \alpha_0 V_i + \alpha_1 V_{i+1} + \dots + \alpha_s V_{i+s} \quad (1.8)$$

όπου α_i συντελεστές βάρους που εκτιμώνται συναρτήσει των αυτοσυνδιασπορών γ_j και V_i τυχαίες μεταβλητές, η μέση τιμή και ασυμμετρία των οποίων εκτιμάται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ιστορικού δείγματος. Σε πρώτη φάση, παράγονται οι τυχαίες μεταβλητές $V_i^{(k)}$ (όπου ο δείκτης k αναφέρεται στην αντίστοιχη διεργασία), μέσω ενός πολυμεταβλητού σχήματος της μορφής:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{b} \mathbf{W}_i \quad (1.9)$$

όπου $W_i^{(k)}$ ακολουθία τυχαίων αριθμών, οι οποίοι παράγονται από την ίδια κατανομή που ακολουθεί και η αντίστοιχη μεταβλητή k , και \mathbf{b} μητρώο παραμέτρων, το οποίο περιέχει τις διασπορές και συνδιασπορές (ετεροσυσχετίσεις) του ετήσιου δείγματος. Ελλείψει αναλυτικής λύσης, ο υπολογισμός του μητρώου \mathbf{b} πραγματοποιείται μέσω μιας ειδικής μαθηματικής διαδικασίας, που έχει αναπτυχθεί από τον Koutsoyiannis (1999). Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η αναδρομική σχέση (1.8) για τη γέννηση των ετήσιων μεταβλητών Z_i , για όλο το μήκος της περιόδου προσομοίωσης.

Η παραγωγή των μηνιαίων τιμών γίνεται έτος προς έτος, με εφαρμογή μιας διαδικασίας επιμερισμού δύο σταδίων. Αρχικά, γεννώνται 12 μηνιαίες τιμές $\{\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_{12}\}$ από ένα περιοδικό μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης PAR(1), η μητρική έκφραση του οποίου είναι:

$$\mathbf{X}_\tau = \mathbf{a}_\tau \mathbf{X}_{\tau-1} + \mathbf{b}_\tau \mathbf{V}_\tau \quad (1.10)$$

όπου \mathbf{X}_τ διάνυσμα μεταβλητών που αναφέρονται στο μήνα τ , \mathbf{a}_τ και \mathbf{b}_τ μητρώα παραμέτρων που περιέχουν τις διασπορές και τα από κοινού στατιστικά χαρακτηριστικά του μηνιαίου δείγματος, και \mathbf{V}_τ διάνυσμα στοχαστικά ανεξάρτητων μεταβλητών, μοναδιαίας διασποράς.

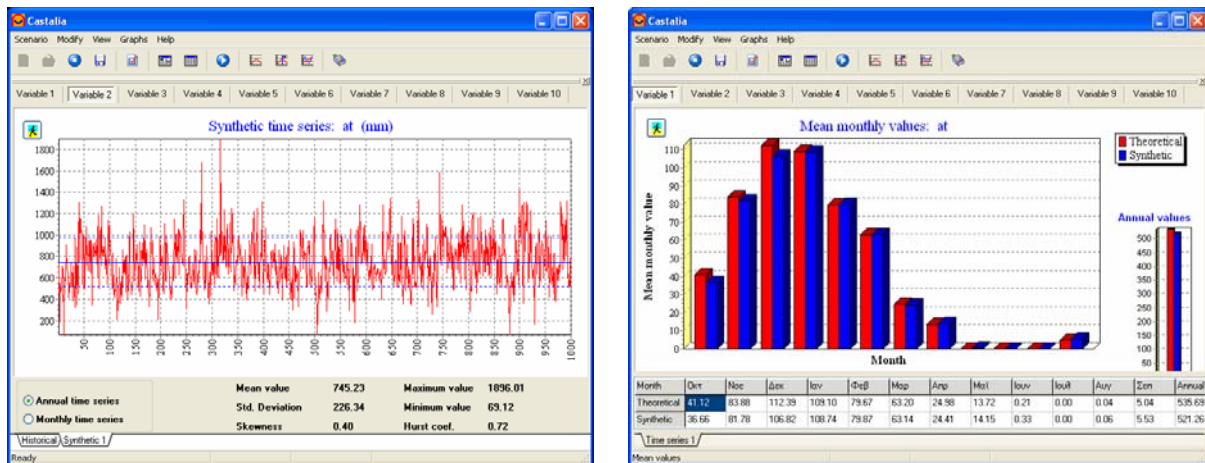
Αρχικά, για κάθε έτος i παράγονται οι μηνιαίες τιμές χωρίς αναφορά στο ετήσιο διάνυσμα \mathbf{Z}_i . Αυτό έχει ως συνέπεια να μην ταυτίζεται το επιμέρους άθροισμα με τη γνωστή ετήσια τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής. Για την αποκατάσταση της συνέπειας, υιοθετείται μια επαναληπτική διαδικασία Monte Carlo, παράγοντας διαδοχικές δωδεκάδες τιμών μέχρι να ελαχιστοποιηθεί η εν λόγω απόκλιση. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ένας γραμμικός μετασχηματισμός των μηνιαίων τιμών, μέσω της οποίας εξασφαλίζεται η συμβατότητα μεταξύ των χρονοσειρών των δύο χρονικών επιπέδων (Koutsoyiannis and Manetas, 1996· Koutsoyiannis, 2001).

Όταν οι χρονοσειρές γεννώνται με τη μορφή σεναρίων πρόγνωσης (ήτοι με δεδομένες και όχι τυχαίες αρχικές συνθήκες), εφαρμόζεται μια ενδιάμεση διαδικασία συνόρθωσης των αρχικών ετήσιων τιμών, με την οποία αποκαθίσταται η στατιστική συνέπεια με τις γνωστές παρελθούσες τιμές (Koutsoyiannis, 2000).

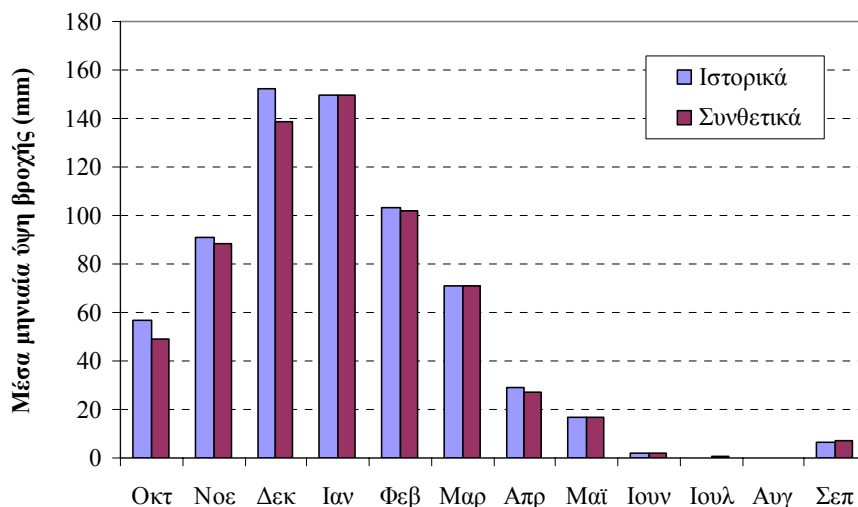
1.8.3 Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών σημειακών βροχοπτώσεων

Για τη γέννηση των συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης εφαρμόστηκε το μοντέλο ΚΑΣΤΑΛΙΑ, για μήκος προσομοίωσης 1000 ετών (Εικόνα 1.32). Διαμορφώθηκε ένα πολυμεταβλητό μοντέλο 10 θέσεων, οι οποίες αντιστοιχούν στους κυριότερους βροχομετρικούς σταθμούς (Απολακκιά, Απόλλωνα, Αρχάγγελος, Έμπωνας, Καλάθου, Καταβιά, Λαέρμα, Ρόδος ΕΜΥ, Σιάννα, Βάρη). Επισημαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν τα πρωτογενή δείγματα, παρόλο που καλύπτουν διαφορετικές χρονικές περιόδους και περιέχουν κενά. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, καθώς το στοχαστικό μοντέλο δεν απαιτεί μια πλήρη ακολουθία τιμών των μεταβλητών αλλά μόνο τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους.

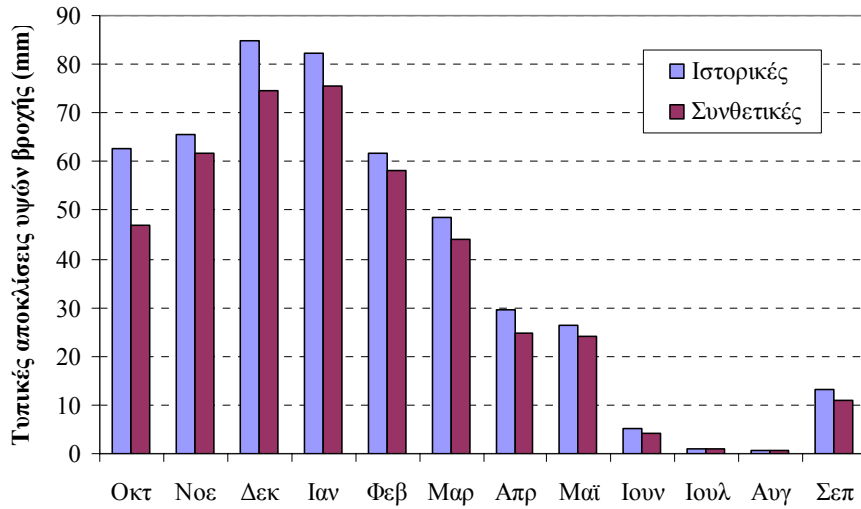
Στα διαγράμματα των Εικόνων 1.33 έως 1.36 συγκρίνονται τα μηνιαία στατιστικά χαρακτηριστικά (μέσες τιμές, τυπικές αποκλίσεις, συντελεστές ασυμμετρίας, συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης) των ιστορικών και συνθετικών δειγμάτων για τον σταθμό της Ρόδου (ΕΜΥ). Είναι εμφανές ότι το μοντέλο αναπαράγει με πολύ καλή ακρίβεια τα στατιστικά μεγέθη των ιστορικών βροχοπτώσεων. Επιπλέον, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.37, δημιουργεί συνθετικά δείγματα με μακροπρόθεσμη υδρολογική εμμονή (φαινόμενο Hurst), το οποίο είναι εξαιρετικά κρίσιμο για την αποτίμηση της αβεβαιότητας στη διαχείριση των υδατικών πόρων (Koutsoyiannis, 2003).



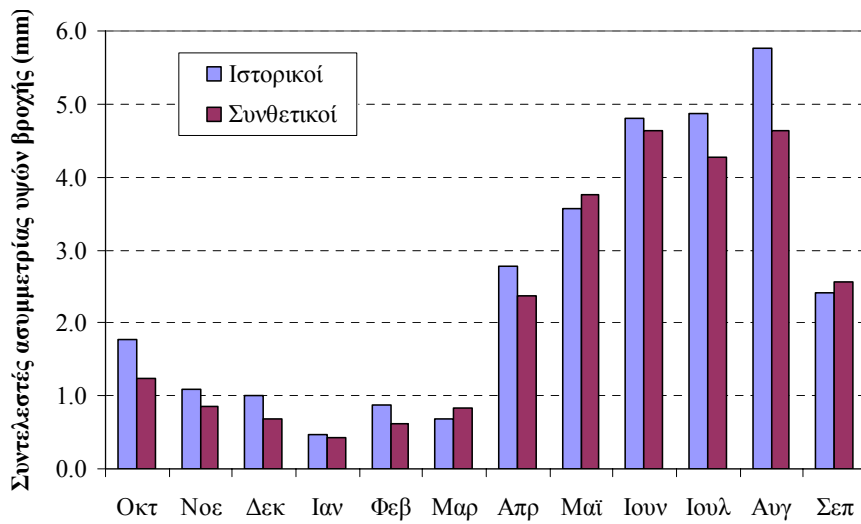
Εικόνα 1.32: Χαρακτηριστικές οθόνες του λογισμικού ΚΑΣΤΑΛΙΑ (αριστερά: απεικόνιση ετήσιας συνθετικής χρονοσειράς, δεξιά: σύγκριση ιστορικών και συνθετικών μέσων μηνιαίων τιμών).



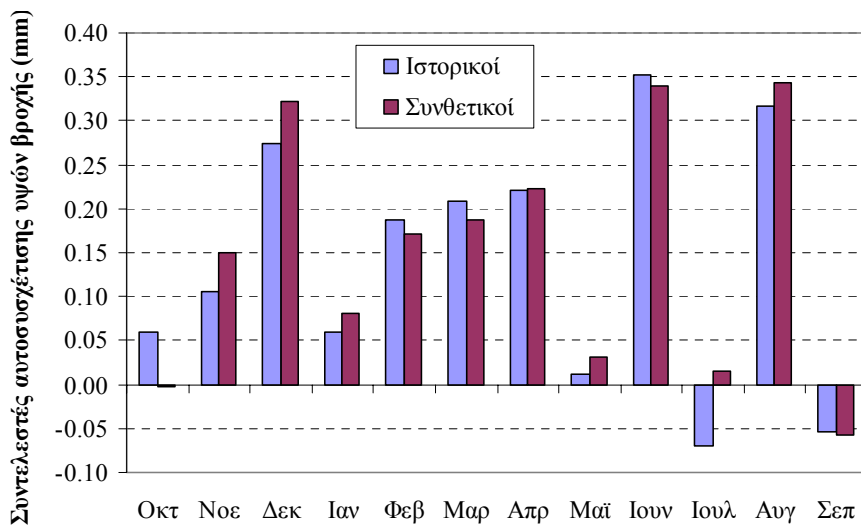
Εικόνα 1.33: Σύγκριση ιστορικών και συνθετικών μέσων τιμών ύψους βροχόπτωσης Ρόδου.



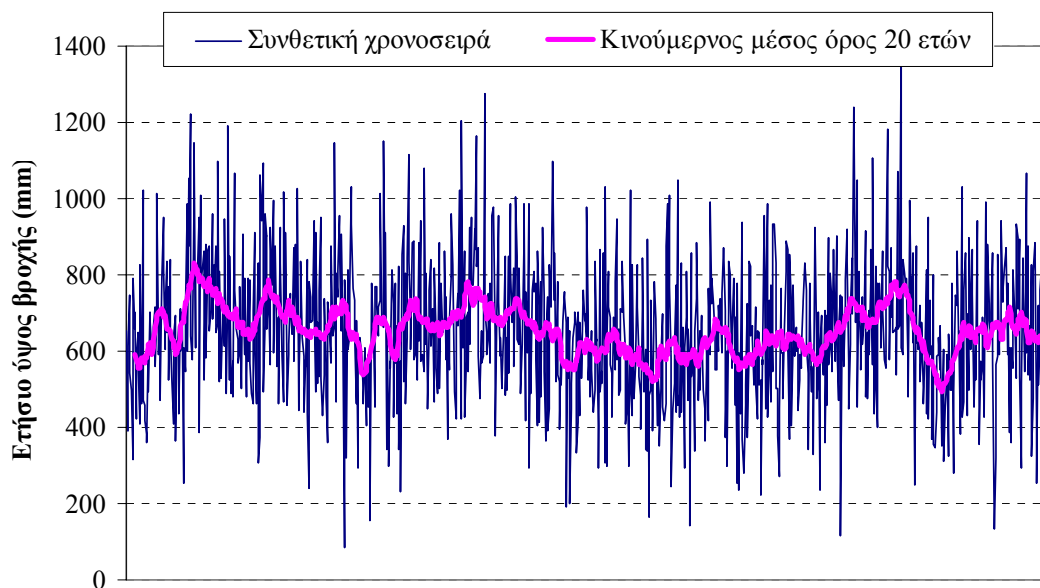
Εικόνα 1.34: Σύγκριση ιστορικών και συνθετικών τυπικών αποκλίσεων βροχόπτωσης Ρόδου.



Εικόνα 1.35: Σύγκριση ιστορικών και συνθετικών συντελεστών ασυμμετρίας βροχόπτωσης Ρόδου.



Εικόνα 1.36: Σύγκριση ιστορικών και συνθετικών συντελεστών αυτοσυσχέτισης βροχόπτωσης Ρόδου.



Εικόνα 1.37: Συνθετική χρονοσειρά ετήσιων υψών βροχής Ρόδου και κινούμενοι μέσοι όροι 20 ετών.

1.8.4 Εφαρμογή μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ για στοχαστική προσομοίωση

Οι συνθετικές χρονοσειρές των σημειακών βροχοπτώσεων ολοκληρώθηκαν στην επιφάνεια των 33 υπολεκανών στις οποίες χωρίστηκε το νησί της Ρόδου, εφαρμόζοντας του συντελεστές Thiessen του Πίνακα 1.6 και, ακολούθως, τους συντελεστές υψομετρικής διόρθωσης του Πίνακα 1.7. Με τον τρόπο αυτό, προέκυψαν οι συνθετικές επιφανειακές βροχοπτώσεις, που αποτελούν την κύρια υδρολογική συνιστώσα εισόδου του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

Ειδικότερα, στο υδροσύστημα του φράγματος Γαδουρά διαμορφώθηκαν δύο σενάρια επιφανειακών βροχοπτώσεων των υπολεκανών, με χωρική ολοκλήρωση των αντίστοιχων συνθετικών σημειακών. Στο πρώτο σενάριο (Α) έγινε απευθείας χρήση των συνθετικών σημειακών χρονοσειρών που παρήχθησαν από το μοντέλο ΚΑΣΤΑΛΙΑ, με είσοδο τα στατιστικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων ιστορικών δειγμάτων, τα οποία καλύπτουν κυρίως την περίοδο 1985-2010. Το δεύτερο σενάριο (Β) διαμορφώθηκε με αναγωγή των σημειακών συνθετικών χρονοσειρών, με τρόπο ώστε οι μέσες τιμές τους να ταυτίζονται με τις μέσες ιστορικές τιμές των ετών 2000-2010. Πρόκειται για την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου, κατά την οποία παρατηρήθηκαν υψηλότεροι μέσοι όροι βροχοπτώσεων σε σύγκριση με τα πλήρη δείγματα των βροχομετρικών σταθμούς της περιοχής.

Επιπλέον, στην υπολεκάνη ανάντη του φράγματος Απολακκιάς (κωδικός 19), τα συνθετικά ύψη βροχής αυξήθηκαν κατά 20%. Η προσαύξηση αυτή κρίθηκε αναγκαία επειδή η συγκεκριμένη υπολεκάνη επηρεάζεται σε ποσοστό 96% από το σταθμό Σιάννα, που παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα να είναι ο μεγαλύτερος υψομετρικά του νησιού και να καταγράφει το δεύτερο χαμηλότερο μέσο ετήσιο ύψος βροχής (βλ. 1.3.3). Θεωρούμε εύλογο ένα τμήμα τουλάχιστον της λεκάνης να δέχεται μεγαλύτερες βροχοπτώσεις (αντίστοιχες π.χ. του Έμπωνα, που βρίσκεται σε πολύ κοντινή απόσταση), ενώ χωρίς τη συγκεκριμένη αναγωγή η προσομοιωμένη απορροή στο φράγμα ήταν παράλογα χαμηλή.

Τέλος, για το παραλιακό τμήμα του νησιού (εικονική υπολεκάνη 33, έκτασης 466.5 km²), θεωρήθηκε η σταθμισμένη επιφανειακή βροχόπτωση όλων των υπόλοιπων υπολεκανών.

Όσον αφορά στη δυνητική εξατμοδιαπνοή, δεν κρίθηκε αναγκαία η χρήση συνθετικών χρονοσειρών, δεδομένου ότι η διακύμανσή της από έτος σε έτος είναι περιορισμένη. Για απλούστευση, θεωρήθηκαν για όλες τις υπολεκάνες του υδροσυστήματος οι μέσες μηνιαίες τιμές της λεκάνης του Γαδουρά.

Με τα παραπάνω δεδομένα, και με χρήση των βελτιστοποιημένων τιμών παραμέτρων, εφαρμόστηκε το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ για τη στοχαστική υδρολογική προσομοίωση του νησιού (34 υπολεκάνες).

1.8.5 Μέσα ετήσια ισοζύγια υπολεκανών και υδρογεωλογικών ενοτήτων

Στον Πίνακα 1.29 δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα υδατικού ισοζυγίου των υπολεκανών, ενώ στον Πίνακα 1.30 δίνεται η αντίστοιχη μέση ποσοστιαία κατανομή της βροχόπτωσης.

Πίνακας 1.29: Μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο υπολεκανών Ρόδου (αποτελέσματα στοχαστικής προσομοίωσης 1000 συνθετικών ετών).

| Κωδικός | Έκταση (km ²) | Έκταση (%) | Βροχόπτωση (mm) | Εξατμοδιαπνοή (mm) | Κατείδυση (mm) | Απορροή (mm) |
|-------------------|---------------------------|------------|-----------------|--------------------|----------------|--------------|
| 0 | 25.21 | 1.79 | 792.5 | 532.7 | 161.4 | 98.4 |
| 1 | 17.24 | 1.23 | 736.1 | 512.7 | 135.5 | 87.8 |
| 2 | 18.03 | 1.28 | 785.9 | 529.5 | 154.9 | 101.4 |
| 3 | 34.21 | 2.43 | 789.1 | 542.1 | 150.9 | 96.1 |
| 4 | 20.50 | 1.46 | 802.0 | 526.3 | 177.9 | 97.8 |
| 5 | 15.22 | 1.08 | 682.4 | 497.2 | 113.3 | 72.0 |
| 6 | 37.79 | 2.69 | 829.7 | 518.5 | 197.5 | 113.8 |
| 7 | 34.09 | 2.42 | 777.9 | 531.9 | 148.9 | 97.1 |
| 8 | 61.43 | 4.37 | 764.8 | 496.5 | 180.6 | 87.6 |
| 9 | 0.99 | 0.07 | 624.4 | 434.3 | 145.6 | 44.4 |
| 10 | 45.65 | 3.24 | 734.0 | 494.7 | 97.0 | 142.3 |
| 11 | 38.16 | 2.71 | 661.0 | 483.5 | 113.6 | 63.8 |
| 12 | 21.19 | 1.51 | 622.2 | 469.1 | 100.2 | 52.9 |
| 13 | 29.56 | 2.10 | 576.8 | 440.7 | 60.8 | 75.3 |
| 14 | 20.90 | 1.49 | 564.3 | 433.3 | 53.2 | 77.7 |
| 15 | 51.63 | 3.67 | 1022.6 | 557.9 | 274.2 | 190.4 |
| 16 | 57.57 | 4.09 | 864.0 | 548.3 | 201.3 | 114.4 |
| 17 | 40.60 | 2.89 | 702.1 | 495.4 | 91.5 | 115.2 |
| 18 | 32.49 | 2.31 | 899.8 | 564.2 | 119.7 | 216.0 |
| 19 | 46.62 | 3.31 | 713.2 | 460.5 | 169.3 | 83.4 |
| 20 | 56.60 | 4.02 | 636.9 | 472.9 | 104.2 | 59.9 |
| 21 | 70.24 | 4.99 | 809.7 | 510.4 | 209.9 | 89.4 |
| 22 | 12.02 | 0.85 | 787.2 | 530.1 | 156.8 | 100.3 |
| 23 | 26.14 | 1.86 | 677.8 | 494.7 | 117.7 | 65.5 |
| 24 | 15.81 | 1.12 | 593.4 | 447.8 | 78.8 | 66.8 |
| 25 | 19.82 | 1.41 | 685.4 | 492.8 | 121.4 | 71.2 |
| 26 | 9.23 | 0.66 | 936.4 | 595.9 | 180.3 | 160.2 |
| 27 | 38.80 | 2.76 | 701.0 | 492.7 | 62.1 | 146.2 |
| 28 | 14.89 | 1.06 | 895.7 | 539.7 | 48.3 | 307.8 |
| 29 | 6.34 | 0.45 | 1022.7 | 531.5 | 284.2 | 207.0 |
| 30 | 3.10 | 0.22 | 984.9 | 578.5 | 215.0 | 191.5 |
| 31 | 7.58 | 0.54 | 658.3 | 481.2 | 113.2 | 63.9 |
| 32 | 10.53 | 0.75 | 727.5 | 511.8 | 130.5 | 85.2 |
| 33 ⁽¹⁾ | 466.50 | 33.16 | 760.3 | 499.3 | 153.9 | 104.8 |
| Σύνολο | 1406.71 | 100.00 | 760.3 | 504.2 | 148.6 | 106.7 |

(1) Εικονική υπολεκάνη, που περιλαμβάνει όλες τις παραλιακές περιοχές του νησιού (βλ. 1.2.1).

Πίνακας 1.30: Μέσο ετήσιο ποσοστιαίο υδατικό ισοζύγιο (%) υπολεκανών Ρόδου (αποτελέσματα στοχαστικής προσομοίωσης 1000 συνθετικών ετών).

| Κωδικός | Εξατμοδιαπνοή | Κατείδυση | Απορροή |
|---------|---------------|-----------|---------|
| 0 | 67.2 | 20.4 | 12.4 |
| 1 | 69.7 | 18.4 | 11.9 |
| 2 | 67.4 | 19.7 | 12.9 |
| 3 | 68.7 | 19.1 | 12.2 |
| 4 | 65.6 | 22.2 | 12.2 |
| 5 | 72.9 | 16.6 | 10.6 |
| 6 | 62.5 | 23.8 | 13.7 |
| 7 | 68.4 | 19.1 | 12.5 |
| 8 | 64.9 | 23.6 | 11.5 |
| 9 | 69.6 | 23.3 | 7.1 |
| 10 | 67.4 | 13.2 | 19.4 |
| 11 | 73.2 | 17.2 | 9.7 |
| 12 | 75.4 | 16.1 | 8.5 |
| 13 | 76.4 | 10.5 | 13.0 |
| 14 | 76.8 | 9.4 | 13.8 |
| 15 | 54.6 | 26.8 | 18.6 |
| 16 | 63.5 | 23.3 | 13.2 |
| 17 | 70.6 | 13.0 | 16.4 |
| 18 | 62.7 | 13.3 | 24.0 |
| 19 | 64.6 | 23.7 | 11.7 |
| 20 | 74.2 | 16.4 | 9.4 |
| 21 | 63.0 | 25.9 | 11.0 |
| 22 | 67.3 | 19.9 | 12.7 |
| 23 | 73.0 | 17.4 | 9.7 |
| 24 | 75.5 | 13.3 | 11.3 |
| 25 | 71.9 | 17.7 | 10.4 |
| 26 | 63.6 | 19.3 | 17.1 |
| 27 | 70.3 | 8.9 | 20.9 |
| 28 | 60.3 | 5.4 | 34.4 |
| 29 | 52.0 | 27.8 | 20.2 |
| 30 | 58.7 | 21.8 | 19.4 |
| 31 | 73.1 | 17.2 | 9.7 |
| 32 | 70.4 | 17.9 | 11.7 |
| 33 | 65.7 | 20.2 | 13.8 |
| Σύνολο | 66.3 | 19.6 | 14.0 |

Επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα αναφέρονται στο πρώτο σενάριο επιφανειακών βροχοπτώσεων των πέντε υπολεκανών του υδροσυστήματος Γαδουρά (κωδικοί 9, 15, 16, 17, 18).

Με βάση τη στοχαστική προσομοίωση για το σύνολο του νησιού και σε μέση ετήσια κλίμακα, το ύψος βροχής στη Ρόδο φτάνει τα 760 mm, από τα οποία 504 mm (66.3%) αποτελούν τις απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής, 149 mm (19.6%) κατεισδύουν στον υπόγειο υδροφόρα και 107 mm (14.0%) απορρέουν επιφανειακά. Από την ποσότητα νερού που κατεισδύει, ένα μικρό τμήμα της εκφορτίζεται επιφανειακά, μέσω πηγών, ένα τμήμα χρησιμοποιείται από τις γεωτρήσεις, ενώ η υπόλοιπη ποσότητα απορρέει υπόγεια στη θάλασσα.

Στη συνέχεια, οι μηνιαίες χρονοσειρές κατείδυσης από κάθε συνδυασμό υπολεκάνης και μονάδας υδρολογικής απόκρισης ολοκληρώθηκαν στην επιφάνεια των εννέα υδρογεωλογικών ενοτήτων (βλ. 1.2.3). Τα μέσα ετήσια μεγέθη των προσομοιωμένων χρονοσειρών κατείδυσης (όγκοι και ισοδύναμα ύψη) δίνονται στον Πίνακα 1.31, όπου φαίνεται η διαφοροποίηση των σχετικών μεγεθών, ανάλογα με τις συνθήκες περατότητας κάθε ενότητας.

Πίνακας 1.31: Μέσες τιμές ετήσιας κατείδυσης υδρογεωλογικών ενοτήτων Ρόδου (αποτελέσματα στοχαστικής προσομοίωσης 1000 συνθετικών ετών).

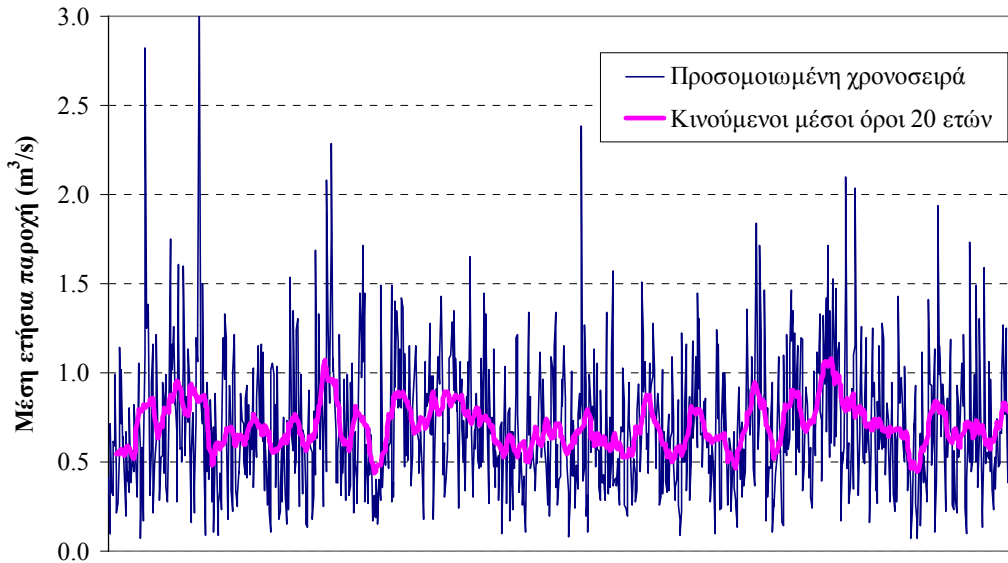
| Κωδικός | Έκταση (km ²) | Ύψος κατείδυσης (mm) | Όγκος κατείδυσης (hm ³) |
|---------|---------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 0 | 425.9 | 101.7 | 43.3 |
| 1 | 115.0 | 283.9 | 32.6 |
| 2 | 255.4 | 111.6 | 28.5 |
| 3 | 97.3 | 136.5 | 13.3 |
| 4 | 25.9 | 314.1 | 8.1 |
| 5 | 117.9 | 154.0 | 18.1 |
| 6 | 66.0 | 274.2 | 18.1 |
| 7 | 114.0 | 142.6 | 16.3 |
| 8 | 185.6 | 153.3 | 28.5 |
| 9 | 4.6 | 142.3 | 0.7 |
| Σύνολο | 1407.5 | 147.4 | 207.5 |

1.8.6 Εισροές φραγμάτων και λιμνοδεξαμενών

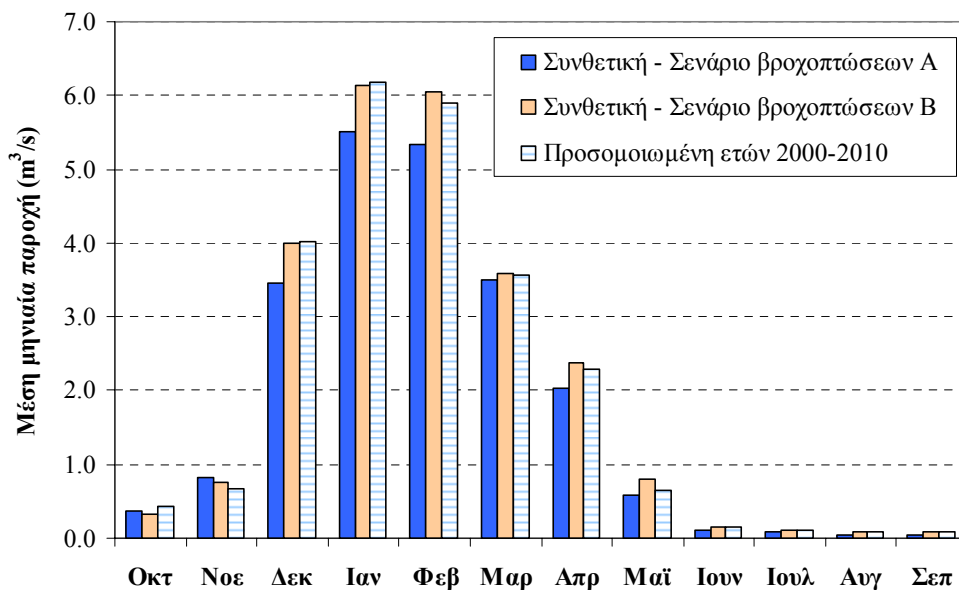
Στον Πίνακα 1.32 δίνονται οι μέσες τιμές απορροής, σε μηνιαία και ετήσια κλίμακα, ανάντη των κύριων έργων αξιοποίησης των επιφανειακών υδατικών πόρων (υφιστάμενων και υπό κατασκευή) που φαίνονται στο χάρτη της Εικόνας 1.1. Οι πλήρεις μηνιαίες συνθετικές χρονοσειρές, μήκους 1000 ετών, αποτελούν είσοδο του διαχειριστικού μοντέλου WEAP. Χαρακτηριστικό των προσομοιωμένων χρονοσειρών είναι η αναπαραγωγή του φαινομένου της εμμονής (βλ. παράδειγμα Εικόνας 1.38), με συνέπεια την «ομαδοποίηση» των ετών χαμηλής και υψηλής υδροφορίας.

Πίνακας 1.32: Μέσες τιμές απορροής (hm³) στις διάφορες θέσεις ενδιαφέροντος.

| | Φράγμα Λαρδού | Φράγμα Απολακκιάς | Φράγμα Γαδουρά (Σενάριο Α) | Φράγμα Γαδουρά (Σενάριο Β) | Φράγμα Σορωνής | Λ/Δ Ασκληπιού | Λ/Δ Σκολωνίτη |
|-------|---------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------------|
| Οκτ. | 0.295 | 0.080 | 0.375 | 0.321 | 0.000 | 0.054 | 0.027 |
| Νοέ. | 0.285 | 0.259 | 0.829 | 0.752 | 0.026 | 0.078 | 0.052 |
| Δεκ. | 0.696 | 0.723 | 3.455 | 3.991 | 0.134 | 0.268 | 0.187 |
| Ιάν. | 1.125 | 0.857 | 5.518 | 6.134 | 0.241 | 0.455 | 0.375 |
| Φεβ. | 1.064 | 0.919 | 5.346 | 6.048 | 0.242 | 0.460 | 0.363 |
| Μαρ. | 0.723 | 0.696 | 3.509 | 3.589 | 0.161 | 0.321 | 0.295 |
| Απρ. | 0.311 | 0.311 | 2.022 | 2.385 | 0.052 | 0.078 | 0.104 |
| Μάι. | 0.080 | 0.027 | 0.589 | 0.804 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Ιούν. | 0.000 | 0.000 | 0.104 | 0.156 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Ιούλ. | 0.000 | 0.000 | 0.080 | 0.107 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Αυγ. | 0.000 | 0.000 | 0.054 | 0.080 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Σεπ. | 0.000 | 0.000 | 0.052 | 0.078 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Έτος | 4.580 | 3.873 | 21.933 | 24.443 | 0.855 | 1.713 | 1.402 |



Εικόνα 1.38: Προσομοιωμένη χρονοσειρά μέσης ετήσιας παροχής φράγματος Γαδουρά και κινούμενοι μέσοι όροι 20 ετών (σενάριο βροχοπτώσεων Α).



Εικόνα 1.39: Σύγκριση σεναρίων μέσης μηνιαίας παροχής φράγματος Γαδουρά και προσομοιωμένης παροχής περιόδου 2000-2010.

Υπενθυμίζεται ότι για το φράγμα Γαδουρά εξετάστηκαν δύο σενάρια συνθετικών βροχοπτώσεων, τα οποία αναπαράγουν τις μέσες σημειακές τιμές των τελευταίων 25 και 10 ετών (σενάρια Α και Β, αντίστοιχα). Σε μέση ετήσια βάση, η διαφορά στην προσομοιωμένη απορροή είναι της τάξης των 2.5 hm³, ήτοι 21.9 έναντι 24.4 hm³. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα της Εικόνας 1.39, οι μέσες μηνιαίες τιμές του σεναρίου Β αναπαράγουν με πολύ καλή ακρίβεια τις αντίστοιχες ιστορικές της περιόδου 2000-2010, όπως αυτές εκτιμήθηκαν στα πλαίσια της βαθμονόμησης του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

Αναφορές

- Beven, K. J., and A. M. Binley, The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Hydrological Processes*, 6, 279-298, 1992.
- Brutsaert, W., *Evaporation into the Atmosphere*, Reidel, Dordrecht, 1982.
- Efstratiadis, A., A. Mazi, A. D. Koussis, and D. Koutsoyiannis, Flood modelling in complex hydrologic systems with sparsely resolved data, *European Geosciences Union General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11*, Vienna, 4157, European Geosciences Union, 2009.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, Fitting hydrological models on multiple responses using the multiobjective evolutionary annealing simplex approach, *Practical hydroinformatics: Computational intelligence and technological developments in water applications*, edited by R.J. Abraham, L. M. See, and D. P. Solomatine, 259–273, Springer, 2008.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, On the practical use of multiobjective optimisation in hydrological model calibration, *European Geosciences Union General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11*, Vienna, 2326, European Geosciences Union, 2009.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, One decade of multiobjective calibration approaches in hydrological modelling: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 55 (1), 58–78, 2010.
- Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, and D. Xenos, Minimising water cost in the water resource management of Athens, *Urban Water Journal*, 1(1), 3-15, 2004.
- Efstratiadis, A., E. Rozos, A. Koukouvinos, I. Nalbantis, G. Karavokiros, and D. Koutsoyiannis, An integrated model for conjunctive simulation of hydrological processes and water resources management in river basins, *European Geosciences Union General Assembly 2005, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7*, Vienna, 03560, European Geosciences Union, 2005.
- Efstratiadis, A., I. Nalbantis, A. Koukouvinos, E. Rozos, and D. Koutsoyiannis, HYDROGEIOS: A semi-distributed GIS-based hydrological model for modified river basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 989-1006, 2008.
- Efstratiadis, A., I. Nalbantis, E. Rozos, and D. Koutsoyiannis, Accounting for water management issues within hydrological simulation: Alternative modelling options and a network optimization approach, *European Geosciences Union General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12*, Vienna, 10085, European Geosciences Union, 2010.
- Koutsoyiannis, D., A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series, *Water Resources Research*, 36(6), 1519-1533, 2000.
- Koutsoyiannis, D., and A. Manetas, Simple disaggregation by accurate adjusting procedures, *Water Resources Research*, 32(7), 2105-2117, 1996.
- Koutsoyiannis, D., Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics, *Hydrological Sciences Journal*, 48 (1), 3–24, 2003.
- Koutsoyiannis, D., Coupling stochastic models of different time scales, *Water Resources Research*, 37(2), 379-392, 2001.

- Koutsoyiannis, D., G. Karavokiros, A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Koukouvinos, and A. Christofides, A decision support system for the management of the water resource system of Athens, *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(14-15), 599-609, 2003.
- Koutsoyiannis, D., Optimal decomposition of covariance matrices for multivariate stochastic models in hydrology, *Water Resources Research*, 35(4), 1219-1229, 1999.
- Nalbantis, I., A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, On the use and misuse of semi-distributed rainfall-runoff models, *XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics*, Perugia, International Union of Geodesy and Geophysics, International Association of Hydrological Sciences, 2007.
- Rozos, E., and D. Koutsoyiannis, A multicell karstic aquifer model with alternative flow equations, *Journal of Hydrology*, 325(1-4), 340-355, 2006.
- Tegos, A., N. Mamassis, and D. Koutsoyiannis, Estimation of potential evapotranspiration with minimal data dependence, *European Geosciences Union General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11*, Vienna, 1937, European Geosciences Union, 2009.
- Beven, K. J., and A. M. Binley, The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Hydrological Processes*, 6, 279-298, 1992.
- Brutsaert, W., *Evaporation into the Atmosphere*, Reidel, Dordrecht, 1982.
- Efstratiadis, A., A. Mazi, A. D. Koussis, and D. Koutsoyiannis, Flood modelling in complex hydrologic systems with sparsely resolved data, *European Geosciences Union General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11*, Vienna, 4157, European Geosciences Union, 2009.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, Fitting hydrological models on multiple responses using the multiobjective evolutionary annealing simplex approach, *Practical hydroinformatics: Computational intelligence and technological developments in water applications*, edited by R.J. Abraham, L. M. See, and D. P. Solomatine, 259-273, Springer, 2008.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, On the practical use of multiobjective optimisation in hydrological model calibration, *European Geosciences Union General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11*, Vienna, 2326, European Geosciences Union, 2009.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, One decade of multiobjective calibration approaches in hydrological modelling: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 55 (1), 58-78, 2010.
- Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, and D. Xenos, Minimising water cost in the water resource management of Athens, *Urban Water Journal*, 1(1), 3-15, 2004.
- Efstratiadis, A., E. Rozos, A. Koukouvinos, I. Nalbantis, G. Karavokiros, and D. Koutsoyiannis, An integrated model for conjunctive simulation of hydrological processes and water resources management in river basins, *European Geosciences Union General Assembly 2005, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7*, Vienna, 03560, European Geosciences Union, 2005.
- Efstratiadis, A., I. Nalbantis, A. Koukouvinos, E. Rozos, and D. Koutsoyiannis, HYDROGEIOS: A semi-distributed GIS-based hydrological model for modified river basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 989-1006, 2008.
- Efstratiadis, A., I. Nalbantis, E. Rozos, and D. Koutsoyiannis, Accounting for water management issues within hydrological simulation: Alternative modelling options and a network optimization

- approach, *European Geosciences Union General Assembly 2010, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12*, Vienna, 10085, European Geosciences Union, 2010.
- Koutsoyiannis, D., A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series, *Water Resources Research*, 36(6), 1519-1533, 2000.
- Koutsoyiannis, D., and A. Manetas, Simple disaggregation by accurate adjusting procedures, *Water Resources Research*, 32(7), 2105-2117, 1996.
- Koutsoyiannis, D., Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics, *Hydrological Sciences Journal*, 48 (1), 3-24, 2003.
- Koutsoyiannis, D., Coupling stochastic models of different time scales, *Water Resources Research*, 37(2), 379-392, 2001.
- Koutsoyiannis, D., G. Karavokiros, A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Koukouvinos, and A. Christofides, A decision support system for the management of the water resource system of Athens, *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(14-15), 599-609, 2003.
- Koutsoyiannis, D., Optimal decomposition of covariance matrices for multivariate stochastic models in hydrology, *Water Resources Research*, 35(4), 1219-1229, 1999.
- Nalbantis, I., A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, On the use and misuse of semi-distributed rainfall-runoff models, *XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics*, Perugia, International Union of Geodesy and Geophysics, International Association of Hydrological Sciences, 2007.
- Rozos, E., and D. Koutsoyiannis, A multicell karstic aquifer model with alternative flow equations, *Journal of Hydrology*, 325(1-4), 340-355, 2006.
- Tegos, A., N. Mamassis, and D. Koutsoyiannis, Estimation of potential evapotranspiration with minimal data dependence, *European Geosciences Union General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11*, Vienna, 1937, European Geosciences Union, 2009.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Ρόζος, Α. Τέγος, και Ι. Ναλμπάντης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης απορροής «Υδρόγειος», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 4α, 103 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2006.
- Ευστρατιάδης, Α., Γ. Καραβοκυρός, και Δ. Κουτσογιάννης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 9, 91 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2007.
- Ευστρατιάδης, Α., Δ. Κουτσογιάννης, και Σ. Κοζάνης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών «Κασταλία», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 3, 61 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005.

- Ευστρατιάδης, Α., Ε. Ρόζος, και Α. Κουκουβίνος, *Υδρόγειος: Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης - Θεωρητική τεκμηρίωση*, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2009α.
- Ευστρατιάδης, Α., *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*, Διδακτορική διατριβή, 391 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβρουάριος 2008.
- Ευστρατιάδης, Α., Σ. Μπακή, Ε. Ρόζος, και Α. Κουκουβίνος, *Αναλυτική περιγραφή μοντέλων, Ανάπτυξη νέας βάσης δεδομένων για τη διαχείριση και λειτουργία της Εθνικής Τράπεζας Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (ΕΤΥΜΠ) – Γ' Φάση σε περιβάλλον ΣΓΠ (GIS) και δημοσιοποίηση του έργου της ΕΤΥΜΠ*, Τεύχος 13, Κ/Ξ Συστημάτων Υδροσκοπίου, Νοέμβριος 2009β.
- Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου, Νήσος Ρόδος: συλλογή, επεξεργασία και διαχείριση δεδομένων, *Ανάπτυξη Συστημάτων και Εργαλείων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων Υδατικού Διαμερίσματος Νήσων Αιγαίου*, Α' Φάση, Τεύχος 11, Υπουργείο Ανάπτυξης, Δεκέμβριος 2005.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., Προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα Γαδουρά, Κεφ. 4 της Υδρολογικής Μελέτης Υδατικού Ισοζυγίου, *Μελέτη ύδρευσης ευρύτερης περιοχής Ρόδου, υδραγωγείου και εγκαταστάσεων καθαρισμού νερού από το φράγμα Γαδουρά*, Εργοδότης: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, Ανάδοχοι: Γραφείο Μαχαίρα, Γ. Καφετζόπουλος - Δ. Μπενάκης - Ι. Πριντάτκο, Υδροεξυγιαντική, Π. Κέρχουλας, 18 σελίδες, 1998.
- Ρόζος, Ε., *Υδρολογική προσομοίωση της ροής σε υδροφορείς υψηλής αβεβαιότητας*, Διδακτορική διατριβή, 250 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Απρίλιος 2010.