



Επιστημονικός
υπεύθυνος:
Δ. Κουτσογιάννης,
Αναπληρωτής
Καθηγητής ΕΜΠ

Σύνταξη:
Α. Ευστρατιάδης
Α. Κουκουβίνος
Ν. Μαμάσης
Δ. Κουτσογιάννης

ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Ειδική Υπηρεσία Διαχείρισης Επιχειρησιακών
Προγραμμάτων Θεσσαλίας

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ ΣΜΟΚΟΒΟΥ

Τεύχος 3

**Εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης και βέλτιστης
λειτουργίας ταμιευτήρα Σμοκόβου και συναφών
έργων**



Αθήνα, Ιούλιος 2008

Περίληψη

Εξετάζονται σενάρια διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου και των συναφών έργων, λαμβάνοντας υπόψη τις εισροές στον ταμιευτήρα, την ανάπτυξη των έργων και τις διάφορες χρήσεις νερού. Για την εκτίμηση των εισροών πραγματοποιείται ολοκληρωμένη υδρολογική διερεύνηση που βασίζεται στην επεξεργασία των βροχομετρικών, μετεωρολογικών, υδρομετρικών και γεωγραφικών δεδομένων του υδροσυστήματος και την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών με χρήση ημικαταναμημένου υδρολογικού μοντέλου. Η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου γίνεται με βάση ιστορικά δείγματα απορροής σε τρεις θέσεις του συστήματος, τα οποία αναπαράγονται με ικανοποιητική ακρίβεια. Το δείγμα εισροών που προκύπτει χρησιμοποιείται για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών στη θέση του φράγματος, που αποτελούν είσοδο του μοντέλου διαχείρισης. Με εφαρμογή του τελευταίου, διερευνώνται διάφορα σενάρια ασφαλούς απόληξης για τις διάφορες χρήσεις νερού, ανάλογα με την εξέλιξη των έργων (αρδευτικών, υδρευτικών, υδροηλεκτρικών) και προτείνονται πρόσφορες διαχειριστικές πολιτικές, για βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα. Οι αναλύσεις γίνονται με τη βοήθεια υπολογιστικού συστήματος που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες του έργου, και περιλαμβάνει βάσεις δεδομένων και εργαλεία λογισμικού.

Abstract

A range of scenarios for the management of the Smokovo reservoir and the related works are studied, taking into account the reservoir inflows, the development of works and the various water uses. In order to estimate inflows, a comprehensive hydrological investigation is carried out, based on the process of pluvial, meteorological, hydrometric and geographical data for the hydrosystem, and the representation of the natural processes using a semi-distributed hydrological model. The model parameters are calibrated on the basis of historical runoff records in three system locations, which are reproduced with satisfactory accuracy. The resulted inflow sample is used for the generation of synthetic time series upstream of the dam, which are input to the water management model. Through the latter, various safe release scenarios are investigated for different water uses (irrigation, water supply, hydropower), depending on the works progress, and appropriate management policies are proposed, for short and long term horizon. The analyzes are implemented by means of a computer-based system that was developed for the project purposes, comprising databases and software tools.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Εισαγωγή | 6 |
| 1.1 | Ιστορικό - Αντικείμενο της μελέτης..... | 6 |
| 1.2 | Διάρθρωση του τεύχους..... | 6 |
| 2 | Περιγραφή του υδροσυστήματος | 8 |
| 2.1 | Περιοχή μελέτης..... | 8 |
| 2.2 | Φυσικό υδατικό σύστημα..... | 8 |
| 2.3 | Σύστημα τεχνικών έργων..... | 9 |
| 3 | Υδρολογικές επεξεργασίες | 12 |
| 3.1 | Επεξεργασίες βροχομετρικών δεδομένων..... | 12 |
| 3.1.1 | Πρωτογενή δείγματα..... | 12 |
| 3.1.2 | Συμπλήρωση και επέκταση δειγμάτων..... | 13 |
| 3.1.3 | Διερεύνηση σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου..... | 15 |
| 3.1.4 | Επιφανειακή ολοκλήρωση βροχοπτώσεων..... | 16 |
| 3.2 | Εκτίμηση εξατμοδιαπνοής..... | 19 |
| 3.2.1 | Μεθοδολογία..... | 19 |
| 3.2.2 | Εκτίμηση δυνητικής εξατμοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς..... | 20 |
| 3.2.3 | Εκτίμηση δυνητικής εξατμοδιαπνοής υπολεκανών..... | 21 |
| 3.3 | Ανάλυση υδρομετρικών δεδομένων..... | 21 |
| 3.3.1 | Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα..... | 21 |
| 3.3.2 | Εκτίμηση απορροής υπολεκάνης Σμοκόβου με βάση το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα..... | 22 |
| 3.3.3 | Υδρολογική διερεύνηση..... | 26 |
| 4 | Εκτίμηση εισροών ταμιευτήρα με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ | 28 |
| 4.1 | Σκοπός και μεθοδολογία..... | 28 |
| 4.2 | Περιγραφή του μοντέλου..... | 28 |
| 4.2.1 | Γενικές αρχές..... | 28 |
| 4.2.2 | Υπομοντέλο επιφανειακής υδρολογίας..... | 30 |
| 4.2.3 | Παραμετροποίηση επιφανειακών διεργασιών - Μονάδες υδρολογικής απόκρισης..... | 33 |
| 4.2.4 | Υπομοντέλο υπόγειας υδρολογίας..... | 34 |
| 4.2.5 | Υπομοντέλο κατανομής υδατικών πόρων..... | 35 |
| 4.3 | Σχηματοποίηση φυσικού συστήματος..... | 35 |
| 4.3.1 | Υδρογραφικό δίκτυο – Υπολεκάνες απορροής..... | 35 |
| 4.3.2 | Μονάδες υδρολογικής απόκρισης..... | 36 |
| 4.3.3 | Μοντελοποίηση αρδευτικών απολήψεων Ξυνιάδας..... | 38 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.4 | Βαθμονόμηση μοντέλου..... | 39 |
| 4.4.1 | Περίοδος ελέγχου και χρονοσειρές εισόδου..... | 39 |
| 4.4.2 | Διατύπωση προβλήματος βαθμονόμησης..... | 39 |
| 4.4.3 | Αποτελέσματα βαθμονόμησης..... | 41 |
| 4.4.4 | Επαλήθευση μοντέλου..... | 43 |
| 4.4.5 | Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων..... | 44 |
| 4.5 | Διερεύνηση αποτελεσμάτων μοντέλου..... | 44 |
| 4.5.1 | Ιστορικό δείγμα απορροής υπολεκάνης Σμοκόβου..... | 44 |
| 4.5.2 | Υδρολογική δίαιτα υπολεκανών ενδιαφέροντος..... | 45 |
| 5 | Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης ταμιευτήρα με εφαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ | 48 |
| 5.1 | Το μοντέλο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ..... | 48 |
| 5.1.1 | Γενικά..... | 48 |
| 5.1.2 | Αναπαράσταση υδροσυστήματος και δεδομένα εισόδου..... | 49 |
| 5.1.3 | Στόχοι και περιορισμοί..... | 49 |
| 5.1.4 | Διαδικασίες προσομοίωσης και βελτιστοποίησης..... | 50 |
| 5.1.5 | Μοντέλο βέλτιστης κατανομής υδατικών πόρων..... | 50 |
| 5.1.6 | Τύποι προσομοίωσης..... | 54 |
| 5.1.7 | Γέννηση σεναρίων στοχαστικής προσομοίωσης..... | 54 |
| 5.2 | Σχηματοποίηση υδροσυστήματος Σμοκόβου..... | 56 |
| 5.2.1 | Υποθετικά σενάρια πλήρους ανάπτυξης έργων..... | 56 |
| 5.2.2 | Υφιστάμενο σενάριο μερικής ανάπτυξης έργων..... | 57 |
| 5.3 | Δεδομένα εισόδου..... | 58 |
| 5.3.1 | Χαρακτηριστικά μεγέθη έργων..... | 58 |
| 5.3.2 | Συνθετικές χρονοσειρές εισροών..... | 59 |
| 5.3.3 | Χρήσεις νερού και περιορισμοί..... | 63 |
| 5.4 | Θεωρητικές αναλύσεις για διάφορα επίπεδα ανάπτυξης των έργων..... | 65 |
| 5.4.1 | Τοποθέτηση διαχειριστικού προβλήματος..... | 65 |
| 5.4.2 | Σενάριο Α: Αρδευτικό δίκτυο ζωνών Σ1-Σ2..... | 66 |
| 5.4.3 | Σενάριο Β: Ένταξη υδροηλεκτρικού σταθμού Λεονταρίου..... | 68 |
| 5.4.4 | Σενάριο Γ: Ένταξη υδρευτικών έργων και αρδευτικής ζώνης Σ3..... | 70 |
| 5.4.5 | Σενάριο Δ: Ένταξη αρδευτικής ζώνης Σ4..... | 72 |
| 5.4.6 | Σενάριο Ε: Πλήρης ανάπτυξη αρδευτικού δικτύου..... | 73 |
| 5.5 | Σενάριο διαχείρισης υφιστάμενων έργων..... | 73 |
| 5.5.1 | Διατύπωση διαχειριστικού προβλήματος..... | 73 |
| 5.5.2 | Αποτελέσματα..... | 74 |
| 5.6 | Συμπεράσματα..... | 76 |
| 5.6.1 | Υποθετικά σενάρια μερικής ανάπτυξης αρδευτικών δικτύων..... | 76 |
| 5.6.2 | Υποθετικά σενάρια μερικής ανάπτυξης δικτύων και χειμερινής λειτουργίας ΥΗΣ Λεονταρίου..... | 78 |
| 5.6.3 | Υποθετικά σενάρια πλήρους ανάπτυξης έργων..... | 78 |
| 5.6.4 | Σενάριο υφιστάμενη κατάσταση..... | 79 |
| 6 | Πληροφοριακό σύστημα | 82 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.1 | Βάσεις δεδομένων | 82 |
| 6.1.1 | Βάση γεωγραφικών δεδομένων..... | 82 |
| 6.1.2 | Βάση υδρολογικών δεδομένων | 82 |
| 6.2 | Πακέτα λογισμικού..... | 83 |
| 6.2.1 | Το λογισμικό ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ | 83 |
| 6.2.2 | Το λογισμικό ΚΑΣΤΑΛΙΑ..... | 85 |
| 6.2.3 | Το λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ | 86 |
| 6.2.4 | Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ..... | 88 |
| 6.3 | Επιχειρησιακή λειτουργία συστήματος | 88 |
| 6.3.1 | Τοποθέτηση του προβλήματος - Η έννοια της στοχαστικής πρόγνωσης..... | 88 |
| 6.3.2 | Επανεκτίμηση ιστορικών υδρολογικών εισροών | 89 |
| 7 | Συμπεράσματα – Προτάσεις | 90 |
| 7.1 | Συμπεράσματα..... | 90 |
| 7.2 | Προτάσεις | 91 |
| | Αναφορές | 92 |
| | Παράρτημα: Πίνακες βάσης γεωγραφικών δεδομένων | 94 |

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό - Αντικείμενο της μελέτης

Στα πλαίσια της πράξης «*Επιχειρησιακά Σχέδια Διαχείρισης Δικτύων Σμοκόβου*», η Ειδική Υπηρεσία Επιχειρησιακού Προγράμματος Θεσσαλίας ανέθεσε στον Τομέα Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων του ΕΜΠ το ερευνητικό έργο «*Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα του Σμοκόβου*», με επιστημονικό υπεύθυνο τον Αναπληρωτή Καθηγητή Δ. Κουτσογιάννη.

Το αντικείμενο του έργου, σύμφωνα με τη σύμβαση, είναι συνοπτικά:

- (α) η συλλογή υδρολογικών δεδομένων, δεδομένων χρήσεων νερού και τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος·
- (β) η διερεύνηση του νομικού, οικονομικού και κοινωνικού πλαισίου που θα διέπει τη λειτουργία και διαχείριση του ταμιευτήρα·
- (γ) η διερεύνηση του νομικού και οικονομικού πλαισίου λειτουργίας άλλων ταμιευτήρων·
- (δ) η διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων οργάνωσης και λειτουργίας του Φορέα Διαχείρισης·
- (ε) η κατάρτιση επιχειρησιακού Σχεδίου Διαχείρισης των υδατικών αποθεμάτων του ταμιευτήρα·
- (στ) η σύνταξη εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης βέλτιστης λειτουργίας του ταμιευτήρα για διάφορα επίπεδα ολοκλήρωσης των έργων·
- (ζ) η ολοκλήρωση δεδομένων και επεξεργασιών σε πληροφοριακό σύστημα.

Από τα παραπάνω σημεία, τα (α), (β), (γ) και (δ) έχουν ήδη ολοκληρωθεί και παραδοθεί στα πλαίσια των τευχών «*Εκθεση Δεδομένων*», (Κουκουβίνος κ.ά., 2006) και «*Διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων οργάνωσης και λειτουργίας Φορέα Διαχείρισης έργων Σμοκόβου*», (Μαμάσης κ.ά., 2006). Τα περιεχόμενα του τεύχους αυτού καλύπτουν τα σημεία (ε), (ζ) και (στ).

1.2 Διάρθρωση του τεύχους

Το παρόν τεύχος αποτελείται από επτά κεφάλαια.

Το **πρώτο** κεφάλαιο είναι η παρούσα εισαγωγή.

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο περιγράφονται, συνοπτικά, οι συνιστώσες του υδροσυστήματος, δηλαδή το φυσικό υδατικό σύστημα, τα υφιστάμενα και προγραμματισμένα έργα της περιοχής μελέτης, καθώς και η κατάσταση των χρήσεων των υδατικών πόρων και τα σχετικά τους μεγέθη.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επεξεργασίες που έγιναν στα διάφορα υδρολογικά δεδομένα που είχαν ήδη συλλεγεί στην Α' φάση του έργου και επικαιροποιήθηκαν στα πλαίσια της Β' φάσης (υδρολογικά, μετεωρολογικά, υδρομετρικά) και τα αποτελέσματά τους (εκτίμηση επιφανειακής βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής, υδατικό ισοζύγιο ταμιευτήρα).

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ώστε να παραχθεί το ιστορικό δείγμα των εισροών στον ταμιευτήρα. Η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών και η

σχηματοποίηση του φυσικού συστήματος έγινε με εφαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, το οποίο βαθμονομήθηκε με βάση τα ιστορικά υδρομετρικά δεδομένα σε τρεις θέσεις.

Στο **πέμπτο** κεφάλαιο επιχειρείται η διερεύνηση διαφόρων σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα με εφαρμογή του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, με σχηματοποίηση της λειτουργίας του υδροσυστήματος, και δεδομένα εισόδου τη ζήτηση νερού για διάφορες χρήσεις, τους λειτουργικούς περιορισμούς και τις υδρολογικές χρονοσειρές, που γεννώνται συνθετικά.

Στο **έκτο** κεφάλαιο παρουσιάζεται το πληροφοριακό σύστημα που αναπτύχθηκε και παραδίδεται στα πλαίσια του έργου, καθώς και η επιχειρησιακή χρήση των λογισμικών.

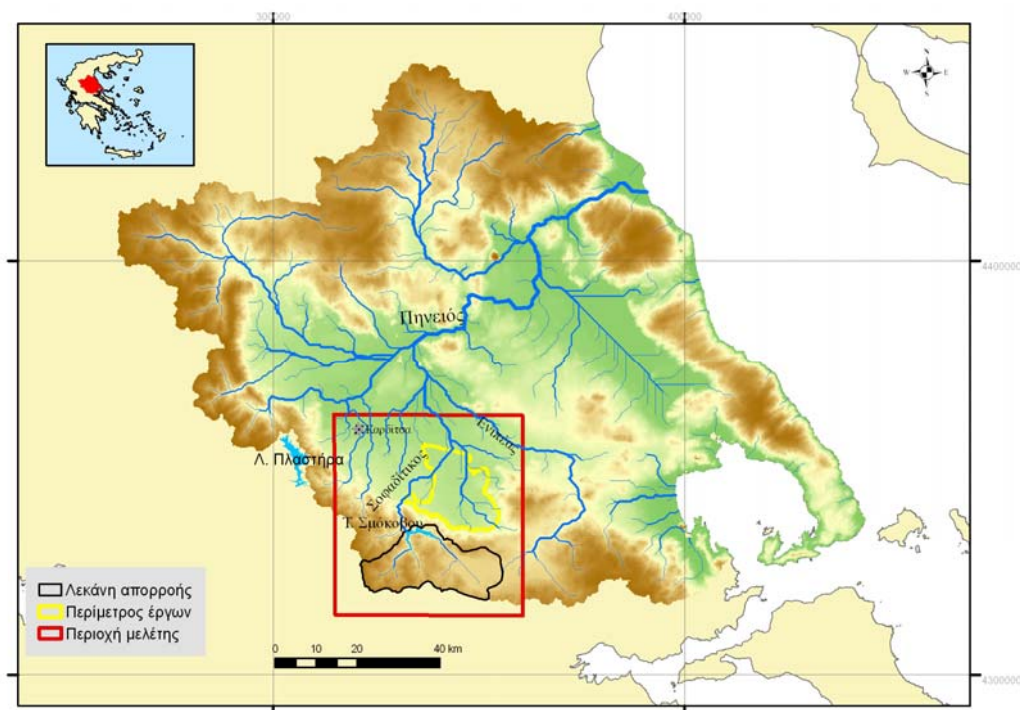
Τέλος, στο **έβδομο** κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τα διάφορα διαχειριστικά σενάρια που εξετάστηκαν και δίνονται προτάσεις για τη βέλτιστη διαχείριση λειτουργίας του ταμιευτήρα και των συναφών έργων.

2 Περιγραφή του υδροσυστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή τόσο του φυσικού συστήματος που αφορά τη διαχείριση του ταμιευτήρα (λεκάνες απορροής, υδρογραφικό δίκτυο κλπ.) όπως και των συναφών έργων (φράγμα, ΥΗΣ, αρδευτικό δίκτυο κλπ.). Αναλυτική καταγραφή όλων των παρακάτω γίνεται στην Έκθεση Δεδομένων (Κουκουβίνος κ.ά., 2006).

2.1 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή των έργων Σμοκόβου βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τη λεκάνη απορροής ανάντη του φράγματος, έκτασης 376.6 km², την περιοχή που προβλέπεται να αρδευτεί μέσω μόνιμων κλειστών δικτύων και προσωρινών έργων, έκτασης 258.2 km², την παραποτάμια ζώνη κατάντη του φράγματος, όπου διοχετεύεται η οικολογική παροχή κατά μήκος του Σοφαδίτη, εξυπηρετώντας, σε μεταβατικό στάδιο, και αρδευτικές χρήσεις, καθώς και την περιοχή των οικισμών που θα υδρεύονται από τον ταμιευτήρα.



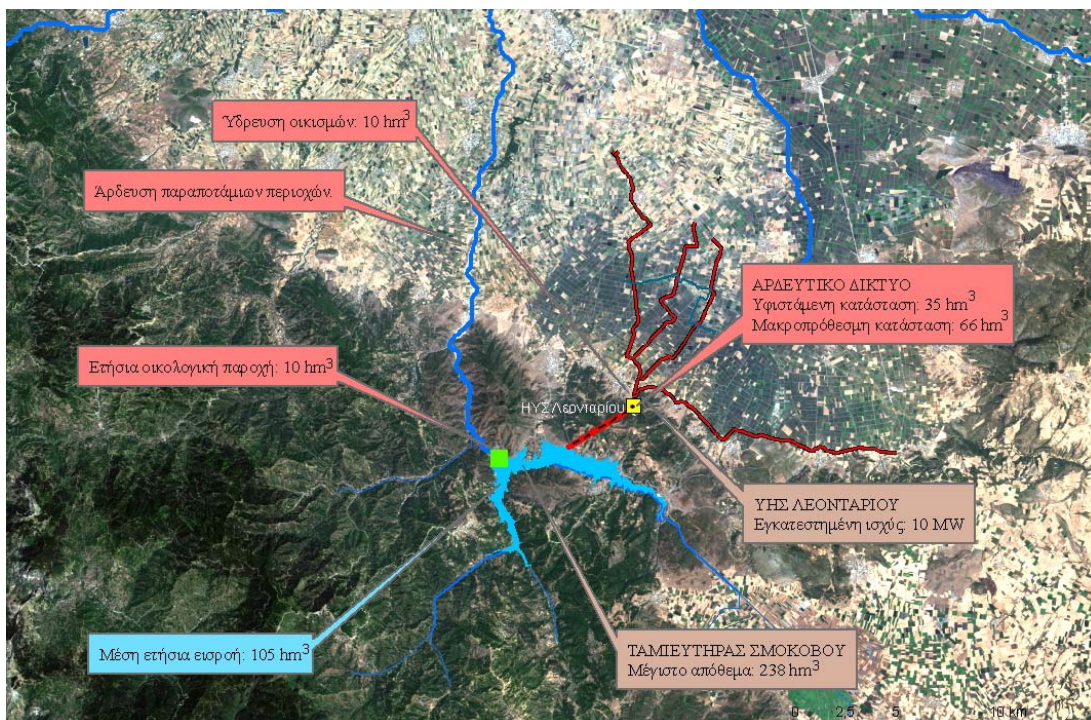
Σχήμα 2.1: Θέση περιοχής μελέτης στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας.

2.2 Φυσικό υδατικό σύστημα

Ο ταμιευτήρας Σμοκόβου βρίσκεται στη συμβολή δύο υδατορευμάτων, του Ρεντινιώτικου, στα νότια, και του Ονόχωνου, στα ανατολικά, από τα οποία σχηματίζεται ο Σοφαδίτης, που μέσω του Ελιπέα καταλήγει στον Πηνειό. Η συνολική λεκάνη τροφοδοσίας του ταμιευτήρα έχει έκταση 376.6 km² και μέσο υψόμετρο 619 m.

2.3 Σύστημα τεχνικών έργων

Η κατασκευή του φράγματος το 1996, ενώ η πλήρωση του ταμιευτήρα ολοκληρώθηκε το 2003. Τα έργα κατασκευάστηκαν με σκοπό την εξασφάλιση νερού για άρδευση 250 000 περίπου στρεμμάτων στους νομούς Καρδίτσας, Φθιώτιδας και Λάρισας, την ύδρευση οικισμών και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται η γενική διάταξη του υδροσυστήματος Σμοκόβου στην πλήρη ανάπτυξή του, που θα περιλαμβάνει τον ταμιευτήρα και τη λεκάνη απορροής του, τη σήραγγα εκτροπής (σήραγγα Λεονταρίου) και τον υδροηλεκτρικό σταθμό, την περιοχή ανάπτυξης των αρδευτικών δικτύων, την ενδιάμεση λεκάνη μεταξύ του φράγματος και του υδρομετρικού σταθμού στον Κέδρο, καθώς και την παραποτάμια ζώνη κατά μήκος του Σοφαδίτη. Στο Σχήμα δίνονται ακόμη τα βασικά μεγέθη του υδροσυστήματος, που αφορούν στα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων και σε ποσοτικές εκτιμήσεις σχετικά με τις ετήσιες εισροές και τις απολήψεις νερού, για την εξυπηρέτηση των διαφόρων χρήσεων, όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις της παρούσας μελέτης.



Σχήμα 2.2: Υδροσύστημα Σμοκόβου.

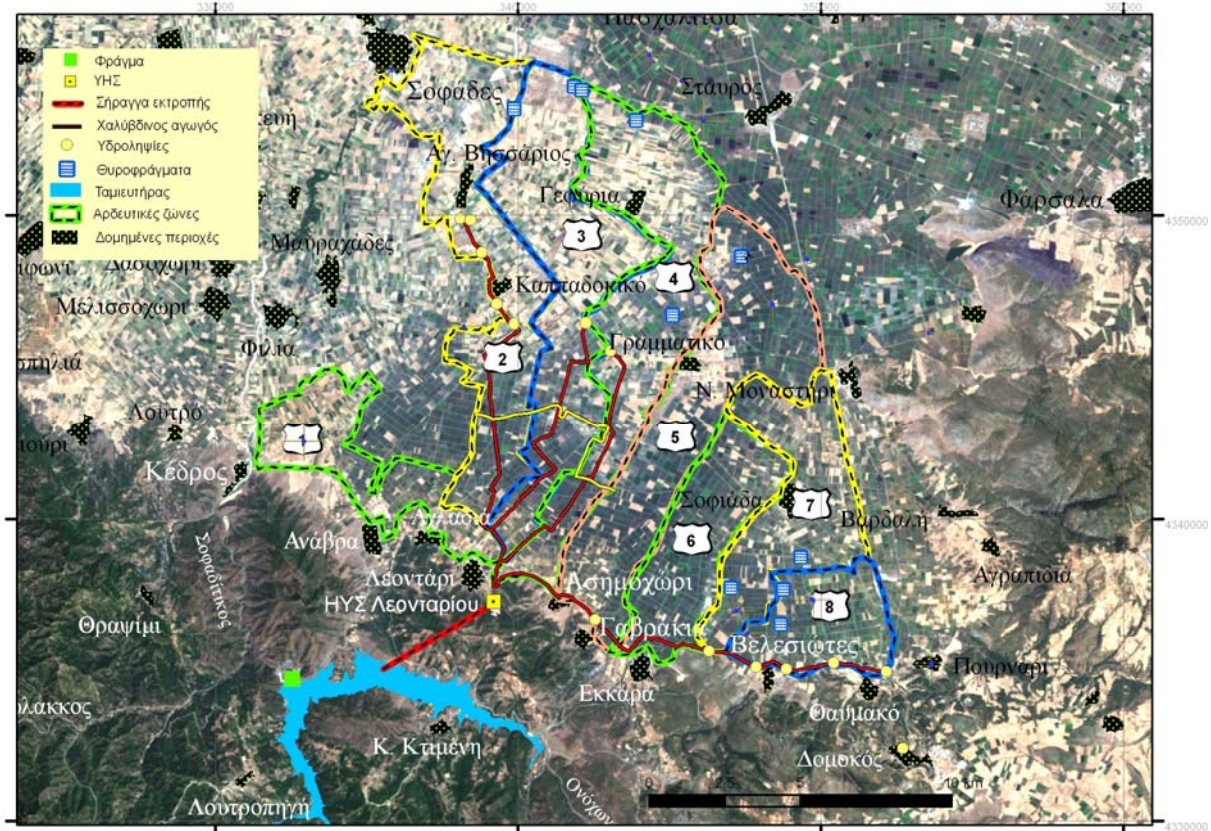
Το φράγμα είναι λιθόρριπτο και έχει ύψος 104 m. Ο υπερχειλιστής του είναι ελεύθερος (χωρίς θυροφράγματα) και έχει σχεδιαστεί για παροχή αιχμής 2 071 m³/s. Ο εκκενωτής πυθμένα χρησιμοποιείται για τη διατήρηση περιβαλλοντικής παροχής στον Σοφαδίτη. Ο ταμιευτήρας έχει ολική χωρητικότητα 237.6 hm³, και ωφέλιμο όγκο 209.2 hm³.

Η τροφοδοσία των αρδευτικών εκτάσεων πραγματοποιείται μέσω της σήραγγας Λεονταρίου και των συναφών έργων (Σχήμα 2.3). Η εισροή του νερού γίνεται στον πύργο υδροληψίας που βρίσκεται 3 km νοτιοανατολικά του φράγματος. Το κατώφλι υδροληψίας είναι στα +330.0 m. Η κυρίως σήραγγα έχει μήκος 4 120 m και περιλαμβάνει δύο τμήματα, ανάντη και κατάντη του φρέατος ανάπαλσης, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 207 m ανάντη του μετώπου εξόδου της σήραγγας. Από την έξοδο της σήραγγας ξεκινά μεταλλικός αγωγός υπό πίεση, εγκλιβωτισμένος σε σκυρόδεμα, μήκους 54 m, ο οποίος καταλήγει στον υδροηλεκτρικό σταθμό και το έργο καταστροφής ενέργειας (ΕΚΕ). Στη συνέχεια, ο αγωγός εκβάλλει στη λεκάνη ηρεμίας, η οποία είναι εφοδιασμένη με υπερχειλιστή ασφαλείας, και στη συνέχεια η παροχή διοχετεύεται στο σωληνωτό αρδευτικό δίκτυο. Η μέγιστη παροχή λειτουργίας της σήραγγας και των συναφών έργων φτάνει τα 25 m³/s.

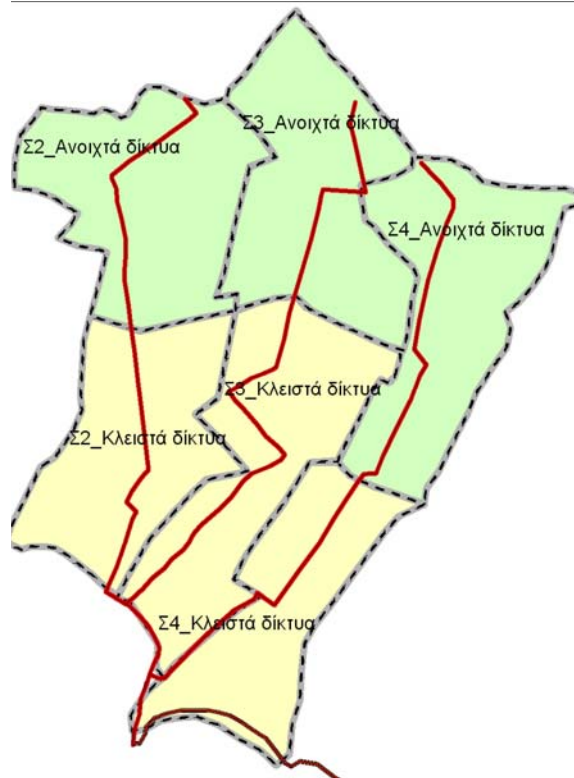
Ο υδροηλεκτρικός σταθμός (ΥΗΣ) Λεονταρίου, που θα λειτουργεί υπό την εποπτεία της ΔΕΗ, βρίσκεται στην έξοδο της σήραγγας και σε απόσταση περίπου 1.5 km από τον ομώνυμο οικισμό. Ο σταθμός περιλαμβάνει τρεις στροβίλους τύπου Francis, με παροχές λειτουργίας 2-5 m³/s, 5-10 m³/s, και 5-10 m³/s αντίστοιχα. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των στροβίλων είναι 10 MW.

Το αρδευτικό δίκτυο της περιοχής, στην πλήρη ανάπτυξή του, φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Έχει συνολική δεσποζόμενη έκταση 252 600 στρέμματα, περίπου, ενώ η καθαρή γεωργική γη εκτιμάται σε περίπου 224 700 στρέμματα. Αρχικά, προβλεπόταν ο χωρισμός του δικτύου σε δύο Περιοχές και οχτώ Ζώνες (Σ1 έως Σ8), με τις πρώτες τέσσερις Ζώνες να υπάγονται στην Περιοχή 1, ενώ τις υπόλοιπες στην Περιοχή 2. Από την παροχή εξόδου της σήραγγας Λεονταρίου, ένα μέρος θα τροφοδοτούσε απ' ευθείας το σύστημα των κυρίων σωληνώσεων (Ζώνες Σ1, Σ2, Σ3, Σ4), που θα προοριζόταν για τα δίκτυα μεταξύ Λεονταρίου και Κέδρου, ενώ ένα άλλο μέρος θα διοχετευόταν στον Ανατολικό Αγωγό, προκειμένου να τροφοδοτήσει τις υπόλοιπες κύριες σωληνώσεις που έχουν αφετηρία στη διάφυρα (Ζώνες Σ5, Σ6, Σ7, Σ8).

Στην παρούσα φάση κατασκευάζονται κλειστά αρδευτικά δίκτυα μόνο σε τμήματα των Ζωνών Σ2-Σ3-Σ4, και σε συνολική έκταση 19 200 στρεμμάτων (εκ των οποίων 6 000 στρέμματα στη Ζώνη Σ2), ενώ όλη η υπόλοιπη περιοχή μελέτης θα αρδεύεται από στραγγιστικά δίκτυα (Σχήμα 2.4). Για το σκοπό αυτό, βρίσκονται υπό κατασκευή αγωγός τροφοδοσίας στην Ζώνη Σ2 που θα παροχετεύει νερό στις τάφρους Τ7 (Ιτόλη) και Τ6 (Βέρνικο), αγωγός τροφοδοσίας στην Ζώνη Σ3 που θα παροχετεύει νερό στην τάφρο Τ9.6 (Τσαμασόρεμα), αγωγός τροφοδοσίας στην Ζώνη Σ4 που θα παροχετεύει νερό στην περιοχή Οθωμανικού, καθώς και ο ανατολικός αγωγός, που θα τροφοδοτεί τις ζώνες Σ5 έως Σ8. Τέλος, σε αντίθεση με τον αρχικό σχεδιασμό, δεν θα προσάγεται νερό από τη σήραγγα Λεονταρίου στη Ζώνη Σ1 (περιοχή Κέδρου), η άρδευση της οποίας εξετάζεται να γίνεται μέσω αντλιοστασίων που θα τροφοδοτούνται από τον Σοφαδίτη (Καρακώστας, 2008, προσωπική επικοινωνία).



Σχήμα 2.3: Όρια αρδευτικού δικτύου.



Σχήμα 2.4: Υπό κατασκευή αρδευτικό δίκτυο σε τμήματα των Ζωνών Σ2, Σ3 και Σ4, όπου απεικονίζονται οι εκτάσεις που αρδεύονται από κλειστά δίκτυα και αποστραγγιστικά κανάλια, καθώς και οι αγωγοί τροφοδοσίας.

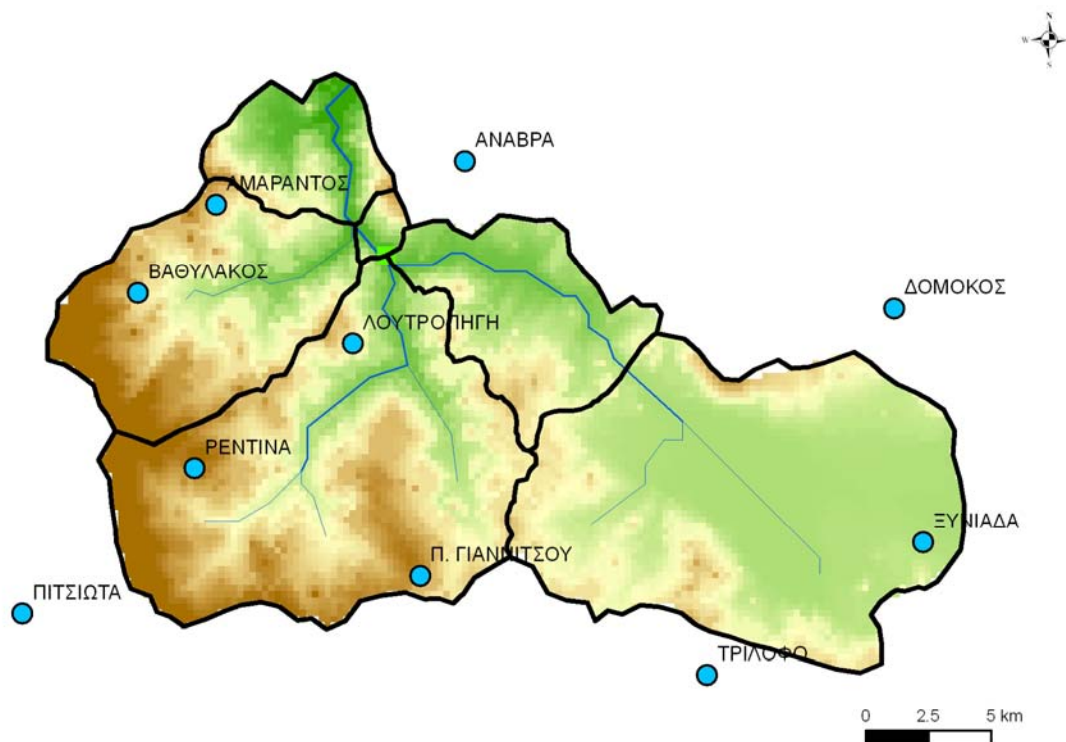
3 Υδρολογικές επεξεργασίες

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι επεξεργασίες των υδρολογικών δεδομένων, με σκοπό την κατάρτιση μηνιαίων ιστορικών δειγμάτων επιφανειακής βροχόπτωσης (στον ταμιευτήρα Σμοκόβου και τις διάφορες υπολεκάνες ενδιαφέροντος), απορροής και εξάτμισης, τα οποία χρησιμοποιούνται από το υδρολογικό μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (βλ. Κεφ. 4) και το διαχειριστικό μοντέλο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ (βλ. Κεφ. 5).

3.1 Επεξεργασίες βροχομετρικών δεδομένων

3.1.1 Πρωτογενή δείγματα

Στα πλαίσια της Α΄ φάσης του έργου συλλέχθηκαν τα δείγματα σημειακών βροχοπτώσεων από 11 σταθμούς της ευρύτερης περιοχής, τα οποία έχουν δημοσιευτεί σε ερευνητικές εκθέσεις ή μελέτες (Σχήμα 3.1). Ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των σταθμών δίνονται στον Πίνακα 3.1. Τα δεδομένα των περισσότερων σταθμών επικαιροποιήθηκαν μέχρι πρόσφατα (ειδικά για τους σταθμούς Ανάβρας, Λουτροπηγής και Ρεντίνας μέχρι τον Απρίλιο του 2007). Οι πλήρεις χρονοσειρές, με τα κύρια στατιστικά τους χαρακτηριστικά, δίνονται στο Παράρτημα Α της έκθεσης δεδομένων (Κουκουβίνος κ.ά., 2006). Επισημαίνεται ότι το δείγμα του σταθμού Σκοπιάς δεν χρησιμοποιήθηκε, τελικά, στις επεξεργασίες (συμπληρώσεις και επιφανειακές ολοκληρώσεις), καθώς βρίσκεται εκτός των ορίων της περιοχής μελέτης (ανήκει στη λεκάνη του Ενιπέα).



Σχήμα 3.1: Όρια υπολεκανών και θέσεις βροχομετρικών σταθμών περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά βροχομετρικών σταθμών ευρύτερης περιοχής μελέτης.

| Όνομασία | Υπηρεσία | Υψόμετρο (m) | Λεκάνη απορροής | Διαθέσιμο δείγμα | Μέση ετήσια τιμή ⁽¹⁾ (mm) |
|---------------|----------|--------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Αμάραντος | ΥΠΓΕ | 800 | Καλέντζη | 9/1972-10/1994, 10/2003-10/2005 | 1240.5 |
| Ανάβρα | ΥΠΕΧΩΔΕ | 208 | Σοφαδίτη | 8/1950-4/2007 | 736.0 |
| Βαθύλακος | ΔΕΗ | 800 | Σμοκοβίτικου | 10/1960-9/1985 | 1075.1 |
| Δομοκός | ΕΜΥ | 615 | Ενιπέα | 11/1954-11/1996 | 615.0 |
| Λουτροπηγή | ΥΠΕΧΩΔΕ | 730 | Ρεντινιώτικου | 1/1971-4/2007 | 843.5 |
| Ξυνιάδα | ΥΠΓΕ | 456 | Ονόχωρου | 1/1964-10/2005 | 458.5 |
| Π. Γιαννιτσού | ΥΠΓΕ | 960 | Ρεντινιώτικου | 3/1973-9/1994 | 648.4 |
| Πιτσιωτά | ΔΕΗ | 800 | Σπερχειού | 2/1960-9/1992 | 1264.7 |
| Ρεντίνα | ΥΠΕΧΩΔΕ | 903 | Ρεντινιώτικου | 7/1950-9/1985, 10/2002-4/2007 | 1523.0 |
| Σκοπιά | ΥΠΕΧΩΔΕ | 450 | Ενιπέα | 2/1971-12/2004 | 596.7 |
| Τρίλοφο | ΥΠΕΧΩΔΕ | 580 | Σπερχειού | 6/1951-12/2004 | 612.1 |

(1). Η μέση τιμή έχει υπολογιστεί από το αντίστοιχο πρωτογενές δείγμα.

3.1.2 Συμπλήρωση και επέκταση δειγμάτων

Τα περισσότερα βροχομετρικά δείγματα παρουσιάζουν αρκετές ελλείψεις (είτε σε μεμονωμένους μήνες είτε σε ευρύτερα χρονικά διαστήματα), και καλύπτουν διαφορετικές χρονικές περιόδους. Επιπλέον, για ορισμένους σταθμούς, υπήρχε ασυμβατότητα μεταξύ των δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές, όπως επισημάνθηκε στους προκαταρκτικούς ελέγχους της Α' φάσης, και χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν συνδυασμοί δειγμάτων (Κουκουβίνος κ.ά., 2006).

Η βροχομετρική πληροφορία χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τις ανάγκες του υδρολογικού μοντέλου που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4, με σκοπό την παραγωγή χρονοσειρών επιφανειακής βροχόπτωσης στις υπολεκάνες τις οποίες χωρίστηκε το υδροσύστημα. Προκειμένου να αποκτηθεί ένα όσο το δυνατό μεγαλύτερο δείγμα εισροών στη θέση του φράγματος, τα δείγματα συμπληρώθηκαν και επεκτάθηκαν ώστε να καλύπτουν την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1960 μέχρι τον Απρίλιο του 2007.

Για τη συμπλήρωση και επέκταση των δειγμάτων εφαρμόστηκε η τυπική μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης (Κουτσογιάννης, 1997, σ. 180-184). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η κενή τιμή μιας προς συμπλήρωση μεταβλητής y_i συναρτήσει μιας γνωστής τιμής x_i , η οποία αναφέρεται σε έναν κοντινό σταθμό αναφοράς, εκτιμάται μέσω ενός γραμμικού μοντέλου της μορφής:

$$y_i = a + b x_i \quad (3.1)$$

όπου a και b παράμετροι, τέτοιες ώστε να ελαχιστοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της εκτίμησης. Η παράμετρος b , ήτοι η κλίση της ευθείας παλινδρόμησης, δίνεται από την σχέση:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

όπου \bar{x} , \bar{y} οι δειγματικές μέσες τιμές των χρονοσειρών και n το πλήθος των ταυτόχρονων μετρήσεων. Η παράμετρος a , ήτοι η τομή της ευθείας παλινδρόμησης, δίνεται από την σχέση:

$$a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (3.3)$$

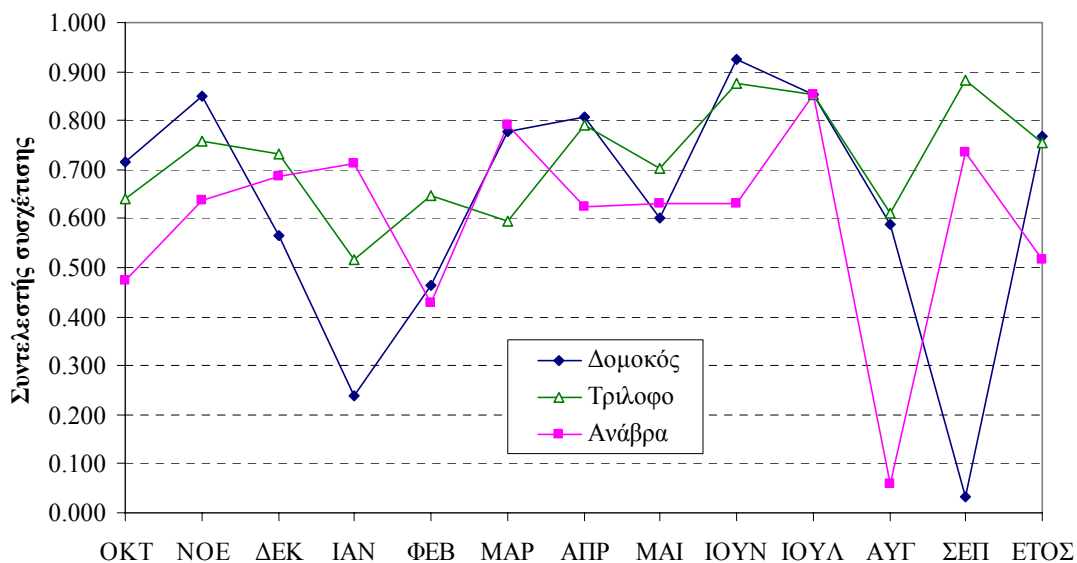
Κατά την εφαρμογή της μεθόδου θα πρέπει να δίνεται προσοχή, ώστε να μηδενίζονται οι αρνητικές τιμές που μπορεί να εμφανιστούν στην περίπτωση που προκύπτουν αρνητικοί συντελεστές.

Βαθμός καταλληλότητας ενός μοντέλου παλινδρόμησης είναι ο λεγόμενος *συντελεστής προσδιορισμού* (coefficient of determination), που συμβολίζεται με d και ορίζεται ως:

$$d = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.4)$$

Στην περίπτωση της παλινδρόμησης, η τετραγωνική ρίζα του συντελεστή προσδιορισμού, ήτοι η ποσότητα r , είναι γνωστή στην στατιστική ως *συντελεστής γραμμικής συσχέτισης*, και λαμβάνει τιμές από -1 έως 1 . Όσο πιο κοντά στα όρια του διαστήματος αυτού βρίσκεται η τιμή του εν λόγω δείκτη, τόσο ισχυρότερη είναι η συσχέτιση, ενώ μηδενική τιμή του r συνεπάγεται ανυπαρξία γραμμικής συσχέτισης. Ειδικά για την ανάλυση βροχομετρικών δεδομένων, θεωρείται επιθυμητή η ύπαρξη ισχυρής θετικής συσχέτισης, ήτοι η συσχέτιση δειγμάτων με τιμή του συντελεστή r όσο το δυνατό πιο κοντά στην μονάδα. Η εμφάνιση τυχόν αρνητικής συσχέτισης, έστω και σημαντικής, αποτελεί ισχυρή ένδειξη αναξιοπιστίας των δεδομένων, καθώς κάτι τέτοιο δεν ερμηνεύεται φυσικά.

Για τη συμπλήρωση των κενών των δειγμάτων ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Σε πρώτη φάση, εντοπίστηκαν τα πιο κοντινά δείγματα για κάθε σταθμό, και υπολογίστηκαν οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης για τις χρονοσειρές κάθε ξεχωριστού μήνα. Με τον τρόπο αυτό, εντοπίστηκαν οι σταθμοί με τη βέλτιστη συσχέτιση σε κάθε χρονικό βήμα, και συμπληρώθηκαν οι αντίστοιχες κενές τιμές με τη μέθοδο γραμμικής παλινδρόμησης. Στην περίπτωση που για κάποια υδρολογικά έτη υπήρχαν κενές τιμές και στο σταθμό αναφοράς, τότε χρησιμοποιήθηκαν για συμπλήρωση τα δεδομένα του δεύτερου καλύτερου σταθμού. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε τους μήνες με μηδενικές τιμές στο σταθμό αναφοράς (κατά κανόνα θερινούς), κατά τους οποίους θεωρήθηκε μηδενική και η τιμή του σταθμού προς συμπλήρωση, σε αντίθεση με το υπόδειγμα γραμμικής παλινδρόμησης που θα θεωρούσε την τομή της ευθείας παλινδρόμησης.



Σχήμα 3.2: Συντελεστές συσχέτισης (ανά μήνα και ετήσιος) χρονοσειράς βροχόπτωσης σταθμού Ξυνιάδας με τις χρονοσειρές αναφοράς των σταθμών Δομοκού, Τρίλοφου και Ανάβρας.

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται οι συντελεστές συσχέτισης της χρονοσειράς μηνιαίας βροχόπτωσης στο σταθμό Ξυνιάδας με τις χρονοσειρές αναφοράς των σταθμών Δομοκού, Τρίλοφου και Ανάβρας. Είναι φανερό ότι τα δεδομένα του προς συμπλήρωση σταθμού συσχετίζονται καλύτερα με τα δείγματα διαφορετικών σταθμών, σε διαφορετικούς μήνες του έτους. Συνεπώς, τα κενά των μηνών Οκτωβρίου, Νοεμβρίου, Απριλίου και Ιουνίου συμπληρώθηκαν με βάση το δείγμα του σταθμού Δομοκού, τα κενά των μηνών Δεκεμβρίου, Φεβρουαρίου και Σεπτεμβρίου συμπληρώθηκαν με βάση το δείγμα του σταθμού Τρίλοφου, ενώ και τα κενά των υπόλοιπων μηνών με βάση το δείγμα του σταθμού Ανάβρας. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε για το σύνολο των σταθμών, με εξαίρεση την Ανάβρα, για την οποία διατίθεται πλήρες βροχομετρικό δείγμα από τον Ιούλιο του 1950.

Στον Πίνακα 3.2 δίνονται τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων που συμπληρώθηκαν, οι αντίστοιχοι σταθμοί αναφοράς και η μέση ετήσια τιμή της περιόδου 1960-07. Από τις αναλύσεις εξαιρέθηκαν τα δείγματα των σταθμών Πιτσιωτών και Σκοπιάς, που ανήκουν σε διαφορετικές λεκάνες και δεν θα είχαν, σε κάθε περίπτωση, συμμετοχή στην εκτίμηση των επιφανειακών βροχοπτώσεων.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά συμπληρωμένων βροχομετρικών δειγμάτων (Οκτ. 1960-Απρ. 2007).

| Σταθμός | Σταθμοί αναφοράς | Μέση ετήσια τιμή (mm) |
|---------------|--|-----------------------|
| Αμάραντος | Ανάβρα | 1203.4 |
| Ανάβρα | | 743.6 |
| Βαθύλακος | Λουτροπηγή, Ανάβρα, Ρεντίνα | 1041.9 |
| Δομοκός | Ανάβρα | 592.1 |
| Λουτροπηγή | Ανάβρα, Ρεντίνα | 854.1 |
| Ξυνιάδα | Δομοκός, Τρίλοφο, Ανάβρα | 513.0 |
| Π. Γιαννιτσού | Πιτσιωτά, Λουτροπηγή, Ρεντίνα, Τρίλοφο | 627.6 |
| Ρεντίνα | Πιτσιωτά, Λουτροπηγή | 1531.8 |
| Τρίλοφο | Δομοκός, Ανάβρα | 627.6 |

3.1.3 Διερεύνηση σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου

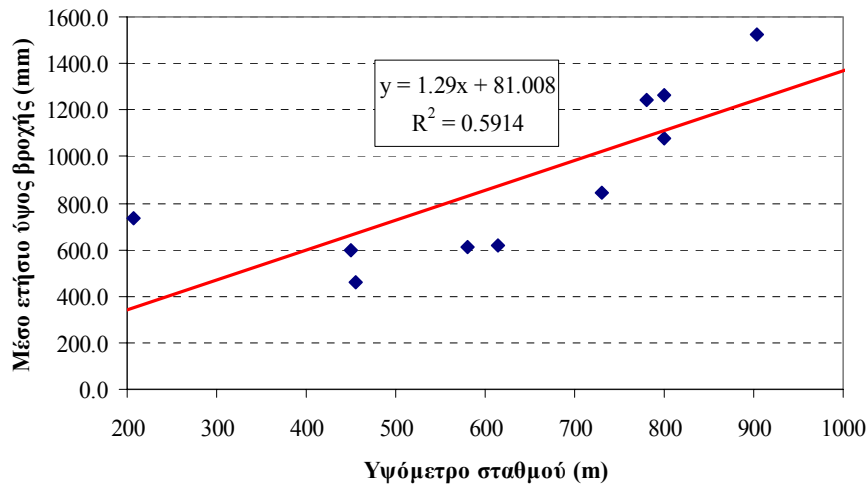
Για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης, με βάση σημειακά δείγματα από βροχομετρικούς σταθμούς, είναι αναγκαία η διερεύνηση της σχέσης μεταβολής του ύψους βροχής συναρτήσει του υψομέτρου, που στις ελληνικές λεκάνες κυμαίνεται από 0.5 ως 2.0 mm/m (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 131).

Στον Πίνακα 3.1 απεικονίζονται οι τιμές της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης (που προέρχονται από τα πρωτογενή δείγματα) συναρτήσει του υψομέτρου των σταθμών. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται το σχετικό διάγραμμα διασποράς, από το οποίο έχει εξαιρεθεί ο σταθμός Παλιάς Γιαννιτσούς, καθώς το δείγμα που διατίθεται είναι μικρό, ενώ τα ύψη βροχής που καταγράφονται είναι πολύ χαμηλά σε σχέση με το υψόμετρό του. Πράγματι, το υψόμετρο του σταθμού είναι 960 m (υψηλότερο όλων των σταθμών της περιοχής), ενώ σε μέση ετήσια κλίμακα, το ύψος βροχής του υπολογίζεται σε μόλις 648.4 mm. Η αντίστοιχη τιμή στο γειτονικό σταθμό της Ρεντίνας, που βρίσκεται σε παραπλήσιο υψόμετρο (903 m) φτάνει τα 1523.0 mm.

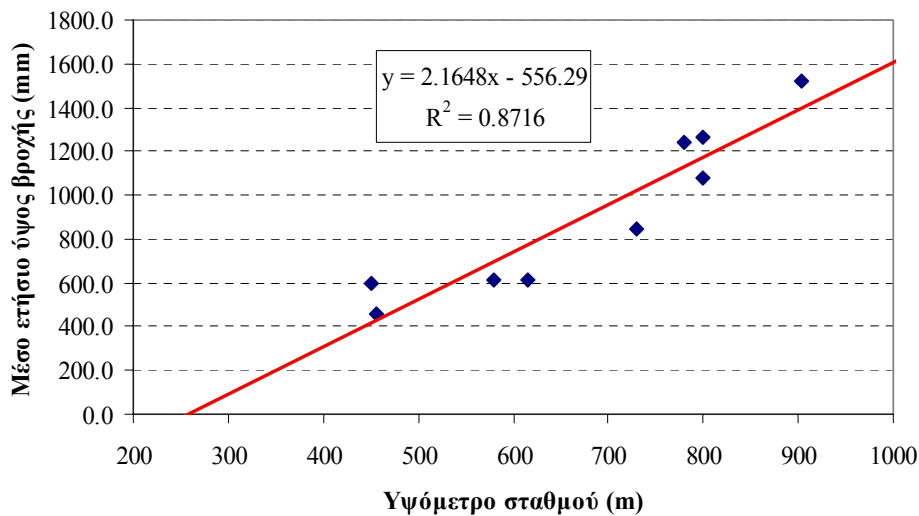
Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα των υπόλοιπων 10 σταθμών του Πίνακα 3.1, προκύπτει μια σχετικά ικανοποιητική συσχέτιση των δύο μεταβλητών (y = μέση ετήσια βροχόπτωση, x = υψόμετρο), αφού ο συντελεστής προσδιορισμού ισούται με $r^2 = 0.594$. Η αντίστοιχη βροχομετρική βαθμίδα, δηλαδή η κλίση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης, ισούται με $\beta = 1.29$ mm/m, τιμή που θεωρείται εύλογη.

Επισημαίνεται ότι αν από το δείγμα εξαιρεθεί ο βροχομετρικός σταθμός Ανάβρας, ο οποίος βρίσκεται στο χαμηλότερο υψόμετρο (208 m), τότε η τιμή της βροχοβαθμίδας αυξάνει στα επίπεδα των 2.16

mm/m, ενώ και ο συντελεστής προσδιορισμού βελτιώνεται σημαντικά, φτάνοντας σε 0.872. Ωστόσο, μια τέτοια τιμή βροχοβαθμίδας κρίνεται υπερβολική, ενώ η εφαρμογή της σχέσης που προκύπτει από την ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης οδηγεί σε μηδενισμό του ύψους βροχής για υψόμετρα μικρότερα των 250 m (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.3: Γραφική απεικόνιση σχέσης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης-υψομέτρου και της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης.



Σχήμα 3.4: Γραφική απεικόνιση σχέσης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης-υψομέτρου και της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης, χωρίς το σταθμό Ανάβρας.

3.1.4 Επιφανειακή ολοκλήρωση βροχοπτώσεων

Για την εκτίμηση των ιστορικών εισροών του ταμιευτήρα Σμοκόβου, η λεκάνη απορροής ανάντη του υδρομετρικού σταθμού στον Κέδρο χωρίστηκε σε 5 υπολεκάνες, η υδρολογική προσομοίωση των οποίων έγινε με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Χρονοσειρές εισόδου του μοντέλου είναι, μεταξύ άλλων, οι επιφανειακές βροχοπτώσεις των υπολεκανών, οι οποίες υπολογίστηκαν, σε μηνιαία βάση, για την περίοδο 1960-2007 (βλ. 4.4.1).

Ο υπολογισμός της επιφανειακής βροχόπτωσης των υπολεκανών βασίστηκε στα σημειακά δείγματα οκτώ βροχομετρικών σταθμών της περιοχής (Ανάβρα, Αμάραντος, Βαθύλακος, Λουτροπηγή, Ρεντίνα,

Δομοκός, Τρίλοφο, Ξυνιάδα), οι θέσεις των οποίων φαίνονται στον χάρτη του Σχήματος 3.1. Η χωρική ολοκλήρωση των σημειακών δειγμάτων στην επιφάνεια των έξι υπολεκάνων έγινε με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen. Με τη χρήση Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας, για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκαν τα εμβαδά επιρροής κάθε σταθμού και τα αντίστοιχα ποσοστά, τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 3.3. Η επιφανειακή ολοκλήρωση έγινε σταθμίζοντας τα επιμέρους δείγματα βροχής, με βάση τα εν λόγω ποσοστά (συντελεστές Thiessen).

Πίνακας 3.3: Εμβαδά επιρροής και συντελεστές Thiessen βροχομετρικών σταθμών.

| α/α | Υπολεκάνη | Σταθμός | Εμβαδό επιρροής (km ²) | Συντελεστής Thiessen |
|-----|-------------------|------------|------------------------------------|----------------------|
| 1 | Ανάτη Κέδρου | Ανάβρα | 8.7 | 0.29 |
| | | Αμάραντος | 21.2 | 0.71 |
| 2 | Σμοκοβίτικου | Βαθύλακος | 34.5 | 0.43 |
| | | Λουτροπηγή | 16.1 | 0.20 |
| | | Αμάραντος | 19.3 | 0.24 |
| | | Ρεντίνα | 10.4 | 0.13 |
| 3 | Κατάντη φράγματος | Ανάβρα | 2.7 | 0.63 |
| | | Λουτροπηγή | 1.6 | 0.37 |
| 4 | Ονόχωνου | Ανάβρα | 29.2 | 0.57 |
| | | Λουτροπηγή | 22.1 | 0.43 |
| 5 | Ρεντινιώτικου | Λουτροπηγή | 80.8 | 0.52 |
| | | Ρεντίνα | 229.8 | 1.48 |
| 6 | Ξυνιάδας | Δομοκός | 34.1 | 0.20 |
| | | Τρίλοφο | 71.7 | 0.42 |
| | | Λουτροπηγή | 8.5 | 0.05 |
| | | Ξυνιάδα | 56.3 | 0.33 |

Πίνακας 3.4: Στοιχεία για τον υπολογισμό του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής στις υπολεκάνες.

| Υπολεκάνη | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|--------|--------|-------|-------|--------|-------|
| Εμβαδό υπολεκάνης (km ²) | 28.9 | 80.3 | 4.3 | 51.3 | 155.3 | 170.7 |
| Μέσο υψόμετρο υπολεκάνης (m) | 455.0 | 756.0 | 509.0 | 500.0 | 737.0 | 544.0 |
| Μέσο υψόμετρο σταθμών (m) | 628.3 | 799.4 | 401.1 | 432.5 | 813.0 | 553.6 |
| Επιφανειακό ετήσιο ύψος βροχής, χωρίς υψομετρική αναγωγή (mm) | 1060.6 | 1120.2 | 791.4 | 804.4 | 1220.3 | 583.1 |
| Βροχοβαθμίδα (mm/m) | 1.29 | 1.29 | 1.29 | 1.29 | 1.29 | 1.29 |
| Συντελεστής υψομετρικής αναγωγής | 0.789 | 0.950 | 1.176 | 1.108 | 0.920 | 0.979 |
| Ανηγμένο επιφανειακό ετήσιο ύψος βροχής (mm) | 837.1 | 1064.2 | 930.5 | 891.5 | 1122.2 | 570.7 |

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

$$\lambda = 1 + \beta \frac{z_s - z_\sigma}{h_s} \quad (3.5)$$

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. Στις επεξεργασίες, τα αποτελέσματα των οποίων δίνονται στον Πίνακα 3.4, θεωρήθηκε κοινή τιμή βροχοβαθμίδας, ίση με $\beta = 1.29$ mm/m. Τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά των βροχομετρικών δειγμάτων των υπολεκανών, σε μηνιαία και ετήσια κλίμακα, συνοψίζονται στους Πίνακες 3.5 έως 3.10. Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζονται οι ετήσιες χρονοσειρές σε τρεις χαρακτηριστικές υπολεκάνες (ανάτη Κέδρου, Ρεντινιώτικου και Ξυριάδας).

Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι η χωρική μεταβλητότητα της βροχόπτωσης στην περιοχή είναι πολύ σημαντική, μεταβαίνοντας από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Χαρακτηριστικά επισημαίνεται ότι το ετήσιο μέσος ύψος βροχής στην υπολεκάνη του Ρεντινιώτικου, που είναι και η πλέον ορεινή, είναι σχεδόν διπλάσιος σε σχέση με την υπολεκάνη Ξυριάδας, παρόλο που η διαφορά υψομέτρων δεν δικαιολογεί κάτι τέτοιο.

Πίνακας 3.5: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς επιφανειακής βροχόπτωσης υπολεκάνης 1 (ανάτη Κέδρου) για την περίοδο 1960-2007 (mm).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|--------|
| Μέση τιμή | 115.9 | 99.7 | 111.0 | 96.4 | 100.7 | 88.4 | 74.7 | 52.5 | 25.8 | 16.9 | 16.9 | 34.2 | 837.1 |
| Τυπ. απόκ. | 86.0 | 36.2 | 49.3 | 53.0 | 39.1 | 39.6 | 36.6 | 25.5 | 25.5 | 14.8 | 17.1 | 34.1 | 155.0 |
| Ελάχιστη | 10.1 | 40.0 | 3.9 | 4.5 | 49.7 | 15.1 | 12.6 | 10.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 572.5 |
| Μέγιστη | 394.1 | 211.0 | 218.8 | 246.1 | 211.6 | 213.7 | 179.5 | 113.8 | 103.6 | 59.1 | 83.7 | 163.3 | 1172.7 |

Πίνακας 3.6: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς επιφανειακής βροχόπτωσης υπολεκάνης 2 (Σμοκοβίτικου) για την περίοδο 1960-2007 (mm).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Μέση τιμή | 127.8 | 139.4 | 147.3 | 123.6 | 122.1 | 107.2 | 93.1 | 64.5 | 37.2 | 23.9 | 24.5 | 46.6 | 1064.2 |
| Τυπ. απόκ. | 85.6 | 53.8 | 59.5 | 59.1 | 40.0 | 43.6 | 40.1 | 27.3 | 27.0 | 21.2 | 20.6 | 43.2 | 185.5 |
| Ελάχιστη | 9.0 | 72.2 | 47.4 | 27.6 | 57.2 | 25.1 | 26.2 | 16.1 | 2.1 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 730.8 |
| Μέγιστη | 458.9 | 283.4 | 296.1 | 296.8 | 223.9 | 205.9 | 199.1 | 134.0 | 136.9 | 79.8 | 109.7 | 174.1 | 1657.1 |

Πίνακας 3.7: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς επιφανειακής βροχόπτωσης υπολεκάνης 3 (κατάτη φράγματος) για την περίοδο 1960-2007 (mm).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Μέση τιμή | 106.8 | 116.3 | 122.7 | 113.5 | 106.2 | 101.8 | 75.4 | 60.5 | 32.2 | 23.0 | 23.2 | 41.1 | 930.5 |
| Τυπ. απόκ. | 80.9 | 70.1 | 65.1 | 73.9 | 49.4 | 62.3 | 43.9 | 37.8 | 32.1 | 23.4 | 27.1 | 37.9 | 221.5 |
| Ελάχιστη | 12.1 | 25.7 | 15.4 | 5.2 | 19.4 | 21.1 | 15.1 | 2.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 528.3 |
| Μέγιστη | 420.6 | 318.1 | 277.3 | 306.3 | 240.4 | 288.0 | 194.7 | 162.5 | 164.2 | 109.5 | 153.6 | 157.1 | 1394.3 |

Πίνακας 3.8: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς επιφανειακής βροχόπτωσης υπολεκάνης 4 (Ονόχωνου) για την περίοδο 1960-2007 (mm).

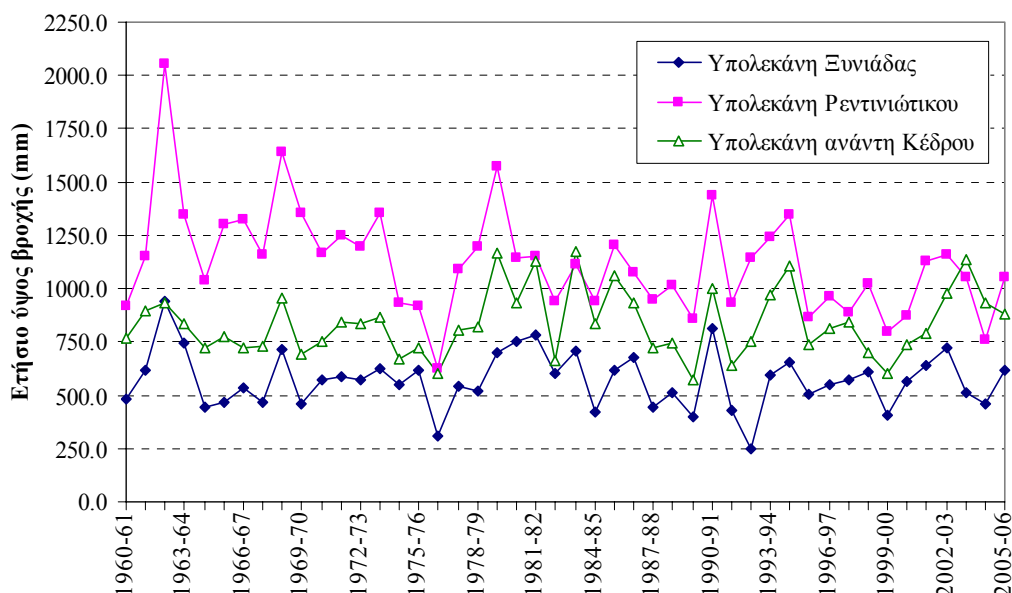
| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Μέση τιμή | 102.2 | 111.5 | 117.9 | 109.3 | 101.6 | 96.6 | 72.7 | 57.7 | 30.7 | 21.9 | 22.5 | 39.6 | 891.5 |
| Τυπ. απόκ. | 76.2 | 65.2 | 61.3 | 70.2 | 46.3 | 58.4 | 40.8 | 35.3 | 30.1 | 21.7 | 25.4 | 36.4 | 208.6 |
| Ελάχιστη | 11.6 | 27.8 | 16.9 | 5.7 | 18.9 | 20.8 | 14.7 | 2.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 511.8 |
| Μέγιστη | 401.2 | 292.7 | 260.2 | 294.7 | 225.3 | 265.9 | 183.9 | 155.7 | 155.9 | 101.1 | 143.9 | 144.6 | 1319.7 |

Πίνακας 3.9: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς επιφανειακής βροχόπτωσης υπολεκάνης 5 (Ρεντινιώτικου) για την περίοδο 1960-2007 (mm).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Μέση τιμή | 124.6 | 138.6 | 139.6 | 129.3 | 132.3 | 110.4 | 107.3 | 75.4 | 46.0 | 28.0 | 31.2 | 49.9 | 1122.2 |
| Τυπ. απόκ. | 77.4 | 69.4 | 66.3 | 65.5 | 53.3 | 56.9 | 47.1 | 33.2 | 29.2 | 27.9 | 25.2 | 49.5 | 250.3 |
| Ελάχιστη | 13.0 | 49.6 | 36.0 | 22.8 | 24.7 | 12.4 | 32.1 | 16.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 622.1 |
| Μέγιστη | 431.3 | 391.4 | 348.3 | 287.4 | 321.9 | 283.7 | 219.1 | 139.3 | 152.0 | 109.9 | 100.4 | 276.1 | 2052.9 |

Πίνακας 3.10: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς επιφανειακής βροχόπτωσης υπολεκάνης 6 (Ξυνιάδα) για την περίοδο 1960-2007 (mm).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| Μέση τιμή | 60.6 | 79.7 | 74.2 | 61.6 | 55.0 | 60.8 | 47.1 | 41.3 | 22.9 | 20.3 | 17.9 | 26.0 | 570.7 |
| Τυπ. απόκ. | 42.9 | 50.0 | 45.4 | 40.8 | 29.0 | 37.3 | 30.9 | 26.4 | 29.5 | 21.2 | 16.7 | 27.0 | 133.0 |
| Ελάχιστη | 6.9 | 19.8 | 13.8 | 3.5 | 10.0 | 13.9 | 5.7 | 5.9 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 248.4 |
| Μέγιστη | 177.4 | 259.8 | 222.1 | 192.5 | 130.3 | 173.1 | 140.6 | 110.0 | 158.3 | 76.2 | 61.9 | 115.9 | 940.3 |



Σχήμα 3.5: Χρονοσειρές ετήσιας επιφανειακής βροχόπτωσης σε χαρακτηριστικές υπολεκάνες του υδροσυστήματος.

3.2 Εκτίμηση εξατμοδιαπνοής

3.2.1 Μεθοδολογία

Η εξατμοδιαπνοή είναι μία από τις κύριες υδρολογικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου και για την συνεπή εκτίμηση της έχουν προταθεί πλήθος μοντέλων στην διεθνή βιβλιογραφία. Η εργασία των Penman-Monteith είναι ευρέως διαδομένη για την επαρκή υδροδυναμική και ενεργειακή ερμηνεία του φαινομένου και εμφανίζει σημαντική πλεονεκτήματα έναντι άλλων εμπειρικών κυρίως σχέσεων (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 165-232). Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι απαιτήσεις της σε πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα, που είναι η μέση θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα ανέμου και η ηλιοφάνεια.

Οι Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999, σ. 222-224) ανέπτυξαν ένα ημιεμπειρικό μοντέλο, το οποίο βασίζεται στη διατύπωση μιας παραμετρικής μαθηματικής έκφρασης της μορφής:

$$E = \frac{aS_0 - b}{1 - cT} \quad (3.6)$$

όπου E η δυνητική εξατμοδιαπνοή σε mm/d, T η μέση θερμοκρασία σε °C, S_0 η εξωγήινη ακτινοβολία σε KJ/m²/d, που είναι αστρονομικό μέγεθος και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος, και a , b και c παράμετροι.

Στην περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμο δείγμα εξάτμισης κατά Penman, οι παράμετροι μπορούν να εκτιμηθούν μέσω βελτιστοποίησης, ελαχιστοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των τιμών εξάτμισης που υπολογίζονται αναλυτικά και αυτών που προκύπτουν με εφαρμογή της (3.6). Πρόσφατα, ο Τέγος (2007) εφάρμοσε το παραπάνω μοντέλο σε 37 μετεωρολογικούς σταθμούς της Ελλάδας για τις περιόδους 1968-1989 σε μηνιαίο χρονικό βήμα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε γεωγραφική παρεμβολή των παραμέτρων με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικής Πληροφορίας, για την εξαγωγή τους σε όλο τον ελλαδικό χώρο. Το μοντέλο εξετάστηκε στην απλούστερη δυνατή δομή του, με απαλοιφή της παραμέτρου b .

3.2.2 Εκτίμηση δυνητικής εξατμοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς

Για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμοδιαπνοής στις έξι υπολεκάνες της περιοχής μελέτης (βλ. 4.3.1), η οποία αποτελεί είσοδο του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, χρησιμοποιήθηκαν τα πρωτογενή δεδομένα θερμοκρασίας του σταθμού Δομοκού της ΕΜΥ, που βρίσκεται σε υψόμετρο 615 m και καλύπτει την περίοδο 1969-1996, με κενά. Οι συμπληρώσεις των κενών και η επέκταση του δείγματος για το χρονικό ορίζοντα εφαρμογής του μοντέλου (1960-2007) έγινε με χρήση των μέσων τιμών. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του πρωτογενούς δείγματος συνοψίζονται στον Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στο σταθμό Δομοκού, για την περίοδο 1969-1996 (mm).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| Μέση τιμή | 14.8 | 9.5 | 6.1 | 4.7 | 5.3 | 8.1 | 12.5 | 17.4 | 22.4 | 24.3 | 23.8 | 20.4 | 14.1 |
| Τυπ. απόκ. | 2.0 | 2.0 | 1.5 | 1.4 | 2.1 | 2.2 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 0.7 |
| Ελάχιστη | 11.3 | 5.5 | 3.6 | 1.9 | 2.1 | 3.7 | 9.1 | 15.0 | 19.2 | 21.5 | 20.9 | 18.1 | 12.9 |
| Μέγιστη | 18.6 | 13.0 | 8.3 | 7.3 | 11.0 | 11.5 | 15.3 | 20.4 | 24.8 | 26.6 | 26.2 | 24.4 | 15.8 |

Ο υπολογισμός της δυνητικής εξατμοδιαπνοής έγινε με εφαρμογή της σχέσης:

$$E = \frac{0.000059 S_0}{1 - 0.0229T} \quad (3.7)$$

όπου οι τιμές των συντελεστών αναφέρονται στην περιοχή του Δομοκού, και εκτιμήθηκαν μέσω παρεμβολής σε ΣΓΠ. Οι μηνιαίες τιμές της εξωγήινης ακτινοβολίας S_0 υπολογίστηκαν για γεωγραφικό πλάτος 39.1° (αντιστοιχεί στο σταθμό Δομοκού και θεωρήθηκε κοινό για όλες τις υπολεκάνες), ενώ χρησιμοποιήθηκε διαφορετικές τιμές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας T ανά υπολεκάνη, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της τελευταίας με το υψόμετρο. Για την αναγωγή των θερμοκρασιών από το υψόμετρο μέτρησης στο Δομοκό (+615 m) στο μέσο υψόμετρο κάθε υπολεκάνης (Πίνακας 3.4) χρησιμοποιήθηκε η απλή μέθοδος θερμοβαθμίδας κατά Giandotti, η οποία χρησιμοποιεί έναν τυπικό ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας με το υψόμετρο (θερμοβαθμίδα) ανά μήνα (Πίνακας 3.12). Οι μέσες τιμές ανά υπολεκάνη, οι οποίες αφορούν στις θεωρητικές ανάγκες της καλλιέργειας αναφοράς, δίνονται στον Πίνακα 3.13.

Πίνακας 3.12: Τυπικές τιμές θερμοβαθμίδας για μεσογειακές λεκάνες, κατά Giandotti (°C/100 m).

| Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. |
|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 0.59 | 0.53 | 0.43 | 0.34 | 0.31 | 0.38 | 0.56 | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 0.61 | 0.59 |

Πίνακας 3.13: Μέσες τιμές αρχικής δυνητικής εξατμοδιαπνοής υπολεκανών (mm).

| Λεκάνη | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 61.1 | 27.9 | 14.2 | 21.5 | 35.0 | 63.0 | 86.2 | 112.6 | 135.2 | 153.7 | 145.7 | 103.5 | 959.7 |
| 2 | 57.4 | 26.6 | 13.8 | 21.0 | 34.2 | 61.0 | 81.6 | 104.7 | 123.6 | 139.2 | 132.7 | 95.9 | 891.7 |
| 3 | 60.4 | 27.7 | 14.1 | 21.4 | 34.9 | 62.6 | 85.3 | 111.1 | 133.0 | 150.9 | 143.2 | 102.1 | 946.7 |
| 4 | 60.5 | 27.7 | 14.2 | 21.4 | 34.9 | 62.7 | 85.5 | 111.3 | 133.4 | 151.4 | 143.6 | 102.3 | 948.8 |
| 5 | 57.7 | 26.7 | 13.8 | 21.0 | 34.2 | 61.1 | 81.9 | 105.1 | 124.3 | 140.1 | 133.5 | 96.3 | 895.7 |
| 6 | 60.0 | 27.5 | 14.1 | 21.3 | 34.8 | 62.4 | 84.8 | 110.1 | 131.6 | 149.1 | 141.6 | 101.1 | 938.4 |

3.2.3 Εκτίμηση δυνητικής εξατμοδιαπνοής υπολεκανών

Για την αναγωγή της δυνητικής εξατμοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς στις συνθήκες φυτοκάλυψης κάθε υπολεκάνης, θεωρήθηκε ότι οι ανάγκες σε εξατμοδιαπνοή των δασωδών εκτάσεων ταυτίζονται με αυτές της καλλιέργειας αναφοράς, ενώ στη περίπτωση χαμηλής βλάστησης ή αρδευόμενης επιφάνειας (Ξυριάδα) οι εν λόγω ανάγκες αποτελούν το 70% της θεωρητικής ζήτησης της καλλιέργειας αναφοράς. Λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά των εκτάσεων που καταλαμβάνει κάθε τύπος φυτοκάλυψης σε κάθε υπολεκάνης (Πίνακας 4.4), προέκυψε ένας συντελεστής αναγωγής, με τον οποίο πολλαπλασιάστηκαν οι τιμές που υπολογίστηκαν στα πλαίσια του εδαφίου 3.2.2. Οι μέσες μηνιαίες τιμές που προέκυψαν, ανά υπολεκάνη, δίνονται στον Πίνακα 3.14.

Πίνακας 3.14: Μέσες τιμές ανηγμένης δυνητικής εξατμοδιαπνοής υπολεκανών (mm).

| Λεκάνη | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 1 | 42.8 | 19.6 | 10.0 | 15.1 | 24.5 | 44.1 | 60.3 | 78.8 | 94.7 | 107.6 | 102.0 | 72.5 | 671.8 |
| 2 | 54.6 | 25.3 | 13.0 | 19.9 | 32.5 | 58.0 | 77.5 | 99.4 | 117.4 | 132.3 | 126.1 | 91.1 | 847.1 |
| 3 | 42.3 | 19.4 | 9.9 | 15.0 | 24.4 | 43.8 | 59.7 | 77.8 | 93.1 | 105.6 | 100.2 | 71.4 | 662.7 |
| 4 | 47.8 | 21.9 | 11.2 | 16.9 | 27.6 | 49.5 | 67.5 | 87.9 | 105.3 | 119.6 | 113.4 | 80.8 | 749.5 |
| 5 | 56.5 | 26.2 | 13.5 | 20.6 | 33.6 | 59.9 | 80.3 | 103.1 | 121.8 | 137.3 | 130.8 | 94.4 | 877.9 |
| 6 | 42.6 | 19.6 | 10.0 | 15.1 | 24.7 | 44.3 | 60.2 | 78.2 | 93.4 | 105.9 | 100.5 | 71.8 | 666.3 |

3.3 Ανάλυση υδρομετρικών δεδομένων

3.3.1 Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα

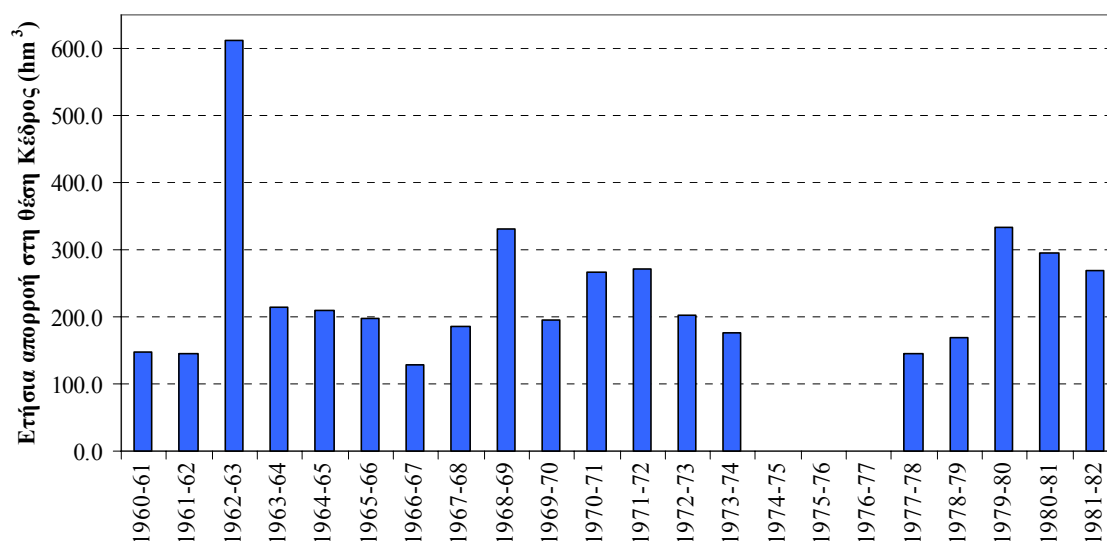
Ο σημαντικότερος υδρομετρικός σταθμός είναι αυτός του Κέδρου, που λειτούργησε υπό την εποπτεία του τότε Υπουργείου Δημοσίων Έργων (ΥΠΔΕ) από το 1960 μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980, οπότε ξεκίνησαν οι εργασίες κατασκευής του φράγματος. Στον σταθμό λαμβάνονταν καθημερινές παρατηρήσεις στάθμης από συμβατικό σταθμήμετρο, και μόνο σε λίγες περιπτώσεις υπάρχουν πυκνότερες παρατηρήσεις. Επιπλέον, πραγματοποιούνταν τακτικές υδρομετρήσεις, με εξαίρεση την περίοδο από τον Δεκέμβριο του 1974 έως τον Μάρτιο του 1978. Η επεξεργασία των παρατηρήσεων στάθμης και παροχής και η κατασκευή των σχετικών καμπυλών, με σκοπό την παραγωγή ενός μηνιαίου δείγματος απορροής στον Κέδρο έγιναν στα πλαίσια των μελετών της ELECTROWATT

(1970) και των ΥΔΡΟΜΕΤ κ.ά. (1983). Τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά του εν λόγω δείγματος δίνονται στον Πίνακα 3.15, ενώ η χρονοσειρά ετήσιας απορροής απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6.

Πίνακας 3.15: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής στη θέση Κέδρος του Σοφαδίτη, για την περίοδο 1960-1982 (hm^3).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------------|------|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| Μέση τιμή | 9.1 | 14.6 | 33.9 | 36.2 | 42.1 | 56.1 | 22.3 | 11.0 | 4.7 | 2.4 | 1.8 | 1.9 | 236.6 |
| Τυπ. απόκ. | 10.1 | 22.2 | 32.4 | 21.4 | 21.4 | 31.0 | 12.6 | 9.6 | 5.9 | 4.3 | 3.6 | 1.7 | 109.9 |
| Ελάχιστη | 1.0 | 1.0 | 3.0 | 7.0 | 11.0 | 16.0 | 7.0 | 2.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 128.7 |
| Μέγιστη | 34.5 | 96.1 | 148.2 | 89.6 | 109.7 | 133.2 | 48.1 | 37.1 | 21.5 | 19.5 | 16.0 | 7.0 | 610.9 |

Εκτός από τον Κέδρο, εντοπίστηκαν υδρομετρικά δεδομένα σε δύο ακόμη σημεία ενδιαφέροντος: (α) στην τωρινή θέση του φράγματος, γνωστή ως θέση Λουτροπηγής, και (β) στη θέση Πεντομούτη, λίγο πριν την έξοδο της Ξυνιάδας, κοντά στον σιδηροδρομικό σταθμό Αγγειών. Συγκεκριμένα, ο υδρομετρικός σταθμός Λουτροπηγής λειτούργησε από το 1972 έως το 1982, και ήταν εξοπλισμένος με αυτόματο καταγραφικό όργανο (σταθμηγράφο). Σύμφωνα με την μελέτη των ΥΔΡΟΜΕΤ κ.ά. (1983), οι ενδείξεις του σταθμηγράφου ήταν μη αξιοποιήσιμες, δεδομένου ότι η κίνηση της στάθμης του ποταμού που καταγραφόταν ήταν εμφανώς λανθασμένη, λόγω προβλήματος επικοινωνίας του νερού του ποταμού με το νερό του πλωτήρα. Συνεπώς, μόνο αξιόπιστο στοιχείο είναι οι μετρήσεις παροχής, που πραγματοποιούνταν με συχνότητα μία φορά τον μήνα, και προφανώς δεν μπορούν να δώσουν παρά μόνο χονδρικές πληροφορίες σχετικά με την υδρολογική δίαιτα της λεκάνης. Ομοίως, στην έξοδο της Ξυνιάδας, δεν διατίθεται τακτικές παρατηρήσεις στάθμης, παρά μόνο σποραδικές μετρήσεις παροχής, για την περίοδο 1972-1982. Τα πλήρη υδρομετρικά δείγματα δημοσιεύονται στο Παράρτημα Α της έκθεσης δεδομένων (Κουκουβίνος κ.ά., 2006).



Σχήμα 3.6: Χρονοσειρά ετήσιας απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Κέδρου.

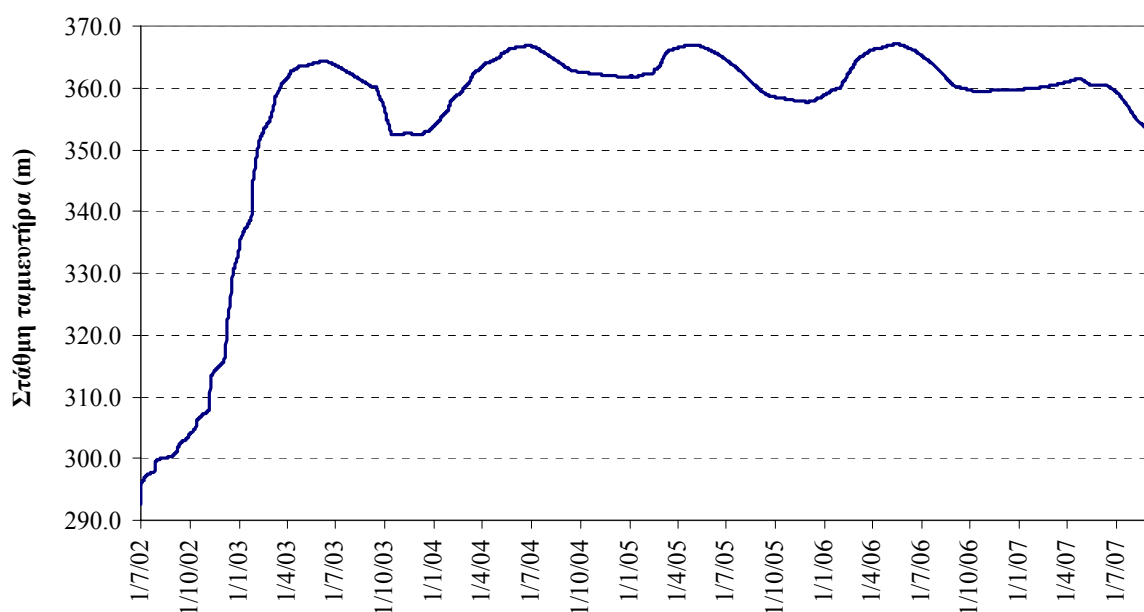
3.3.2 Εκτίμηση απορροής υπολεκάνης Σμοκόβου με βάση το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα

Για το διάστημα λειτουργίας των έργων Σμοκόβου, ξεκινώντας από τον Ιούλιο του 2002, εκτιμήθηκε η μηνιαία απορροή της υπολεκάνης ανάντη του φράγματος, με βάση του ισοζύγιο εισροών-εκροών του ταμιευτήρα. Για το σκοπό αυτό, συλλέχθηκαν από την ΕΥΔΕ Σμοκόβου, για το διάστημα από

30/6/2002 έως τις 11/9/2007, οι καταγραφές στάθμης του ταμιευτήρα (βλ. Σχήμα 3.7) και εκροών, μέσω της βαλβίδας οικολογικής παροχής και της σήραγγας Λεονταρίου. Τα στοιχεία, τα οποία μέχρι τον Δεκέμβριο του 2005 δημοσιεύονται στο Παράρτημα Β της έκθεσης δεδομένων (Κουκουβίνος κ.ά., 2006), επικαιροποιήθηκαν μέχρι τον Σεπτέμβριο του τρέχοντος έτους.

Για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα επισημαίνονται τα εξής:

- Τα στοιχεία της περιόδου 2002-2004 προέρχονται από τον εργολάβο, και είναι ελλιπή όσον αφορά στις εκροές.
- Το έτος 2004 δεν υπάρχουν στοιχεία σχετικά με την ρύθμιση της περιβαλλοντικής παροχής. Η ΕΥΔΕ Σμοκόβου εκτιμά ότι αφέθηκε σταθερή εκροή της τάξης των 2.0 m³/s από τις αρχές του καλοκαιριού (Ιούνιος) μέχρι τα τέλη Δεκεμβρίου, ενώ στην αιχμή της αρδευτικής περιόδου (Ιούλιος, Αύγουστος) η παροχή αυτή αυξήθηκε στα 3.5 m³/s, εξυπηρετώντας του καλλιεργητές κατά μήκος του Σοφαδίτη.
- Ο σταθμηγράφος του ταμιευτήρα (όπως και τα υπόλοιπα όργανα του τηλεμετρικού σταθμού του φράγματος), δεν θεωρείται αξιόπιστος. Μέχρι την πλήρωση του ταμιευτήρα, πραγματοποιούνταν καθημερινές παρατηρήσεις στάθμης με χρήση συμβατικών τοπογραφικών οργάνων. Έκτοτε, η στάθμη μετράται από την ΕΥΔΕ Σμοκόβου με συχνότητα μίας έως δύο (το πολύ) παρατηρήσεων ανά μήνα. Οι ενδιάμεσες τιμές εκτιμώνται με γραμμική παρεμβολή (Παράσχης, 2007, προσωπική επικοινωνία).



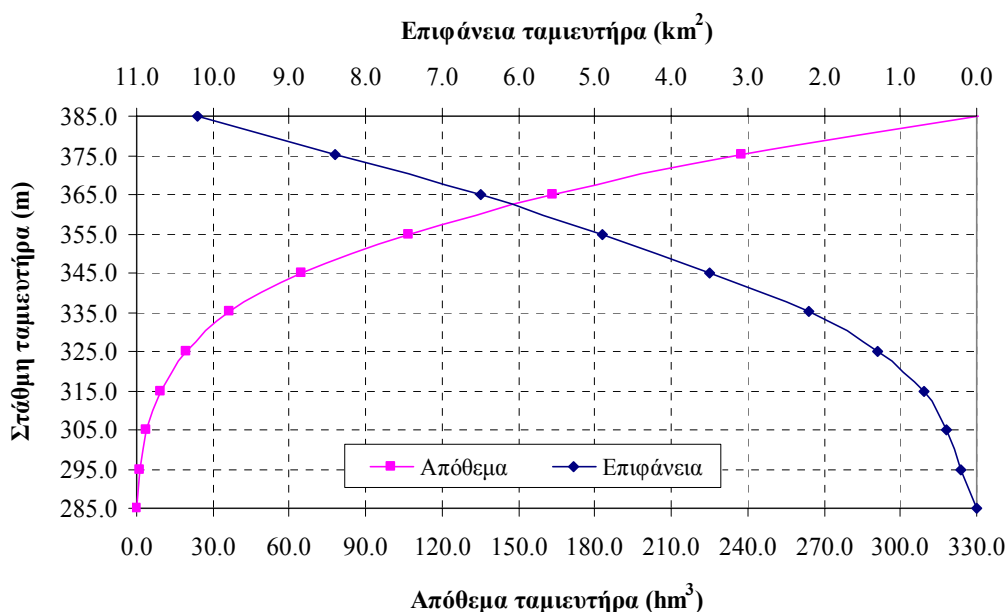
Σχήμα 3.7: Διακύμανση στάθμης ταμιευτήρα Σμοκόβου το διάστημα 30/6/2002-13/12/2005.

Με γνωστά την ημερήσια τιμή της στάθμης (πραγματική ή εκτιμώμενη από γραμμική παρεμβολή) και τα, κατά κανόνα, προσεγγιστικά δεδομένα απολήψεων, κατασκευάστηκαν το ημερήσιο κα μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα Σμοκόβου, που βασίζεται στην σχέση:

$$S_{t+1} = S_t + I_t + P_t - E_t - R_t - W_t \quad (3.8)$$

όπου S_t και S_{t+1} το απόθεμα του ταμιευτήρα στην αρχή και το πέρας του χρονικού βήματος (ημέρα ή μήνας), I_t οι υδρολογικές εισροές στον ταμιευτήρα, P_t η βροχοπτώση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, E_t οι απώλειες λόγω εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα, R_t η εκροή κατάντη του φράγματος και W_t η απόληψη μέσω της σήραγγας Λεονταρίου. Όλα τα μεγέθη δίνονται σε μονάδες όγκου. Το

τρέχον απόθεμα υπολογίστηκε μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης του ταμιευτήρα (Σχήμα 3.8), με είσοδο την επίκαιρη στάθμη και με χρήση λογαριθμικής παρεμβολής μεταξύ των γνωστών ζευγών στάθμης-αποθέματος. Οι εισροές λόγω βροχόπτωσης και οι απώλειες λόγω εξάτμισης υπολογίστηκαν πολλαπλασιάζοντας τα αντίστοιχα ισοδύναμα ύψη νερού με τη μέση επιφάνεια του ταμιευτήρα μεταξύ δύο διαδοχικών ημερών. Η χρονοσειρά υψών βροχής προέρχεται από το αντίστοιχο ημερήσιο δείγμα στη Λουτροπηγή, ενώ για τη χρονοσειρά εξάτμισης θεωρήθηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές ημερήσιας δυνητικής εξατμοδιαπνοής της υπολεκάνης 3, αυξημένες κατά 20%¹ (Πίνακας 3.16). Με βάση τα παραπάνω, μοναδικός άγνωστος της εξίσωσης υδατικού ισοζυγίου είναι η απορροή των ανάντη λεκανών, ήτοι του Ονόχωρου (στην οποία περιλαμβάνονται οι απορροές της Ξυνιάδας) και Ρεντινιώτικου.



Σχήμα 3.8: Καμπύλες στάθμης-αποθέματος και στάθμης-επιφάνειας ταμιευτήρα Σμοκόβου.

Πίνακας 3.16: Μηνιαίες τιμές ύψους εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα Σμοκόβου.

| Μήνας | Ύψος εξάτμισης (mm) | Μήνας | Ύψος εξάτμισης (mm) |
|-------------|---------------------|-------------|---------------------|
| Οκτώβριος | 72.3 | Απρίλιος | 102.2 |
| Νοέμβριος | 33.2 | Μάιος | 133.0 |
| Δεκέμβριος | 17.0 | Ιούνιος | 159.2 |
| Ιανουάριος | 25.7 | Ιούλιος | 180.6 |
| Φεβρουάριος | 41.8 | Αύγουστος | 171.4 |
| Μάρτιος | 75.0 | Σεπτέμβριος | 122.2 |

Η μηνιαία διακύμανση των εισροών λόγω απορροής απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9, και σε ετήσια βάση στο Σχήμα 3.10. Με εξαίρεση το υδρολογικό έτος 2002-03, το οποίο ήταν πλούσιο σε υδροφορία (και είχε ως αποτέλεσμα τη γρήγορη πλήρωση του ταμιευτήρα), όλα τα επόμενα έτη χαρακτηρίζονται από μέτρια ως χαμηλή υδροφορία. Ειδικότερα, το περασμένο υδρολογικό έτος (χωρίς τις απορροές του Σεπτεμβρίου), οι ετήσιες εισροές ανήλθαν σε μόλις 13.7 hm³, τιμή σχεδόν υποδεκαπενταπλάσια της

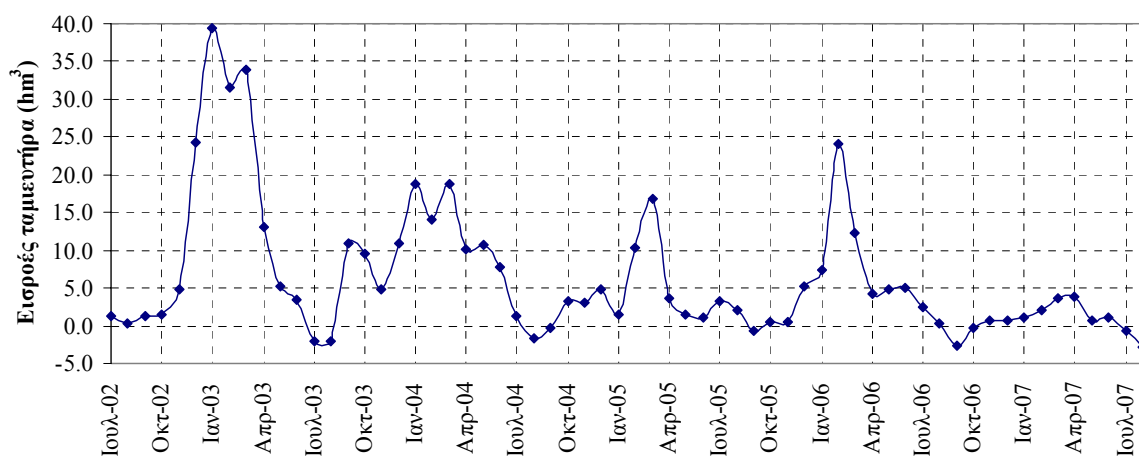
¹ Η αύξηση έγινε γιατί οι υπολογισθείσες τιμές αναφέρονται στην καλλιέργεια αναφοράς και όχι στην εξάτμιση από υδάτινη επιφάνεια, που είναι προφανώς μεγαλύτερη.

μέσης εκτίμησης της υδρολογικής μελέτης του φράγματος (ΥΔΡΟΜΕΤ κ.ά., 1983). Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της εν λόγω χρονοσειράς εισροών δίνονται στον Πίνακα 3.17.

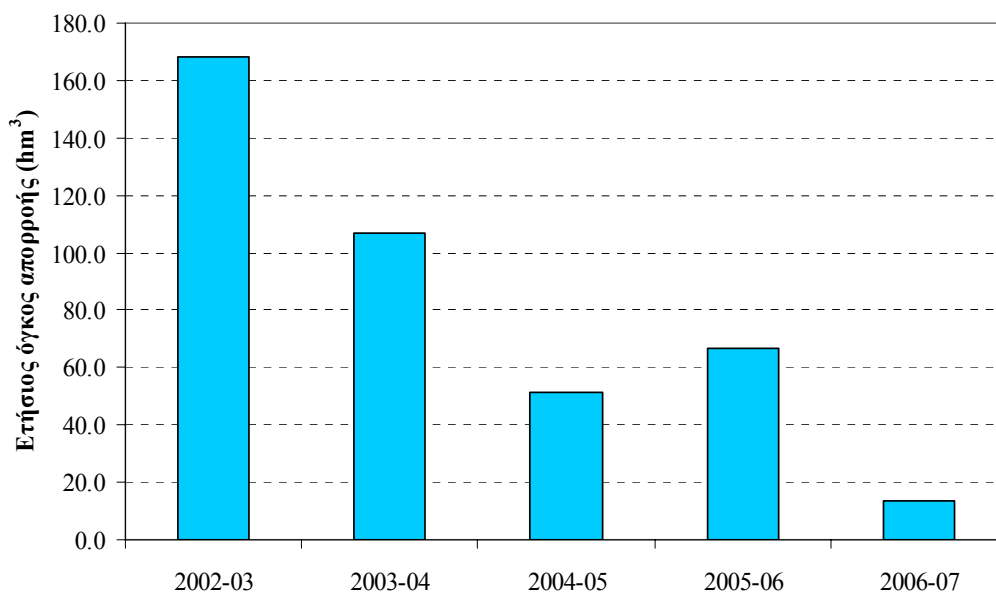
Πίνακας 3.17: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής στη θέση του φράγματος για την περίοδο λειτουργίας του (Ιούλιος 2002-Σεπτέμβριος 2007), με μηδενισμό των αρνητικών τιμών που προκύπτουν από το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα (hm^3).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| Μέση τιμή | 3.0 | 2.7 | 9.2 | 13.6 | 16.4 | 17.1 | 7.0 | 4.6 | 3.7 | 1.4 | 0.4 | 2.5 | 81.4 |
| Τυπ. απόκ. | 3.9 | 2.1 | 9.2 | 16.1 | 11.6 | 11.1 | 4.4 | 3.9 | 2.8 | 1.3 | 0.8 | 4.8 | 59.0 |
| Ελάχιστη | 0.0 | 0.4 | 0.7 | 1.1 | 2.0 | 3.6 | 3.6 | 0.7 | 1.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 13.7 |
| Μέγιστη | 9.6 | 4.8 | 24.2 | 39.4 | 31.5 | 34.0 | 13.1 | 10.7 | 7.8 | 3.3 | 2.0 | 11.0 | 168.2 |

Από την ανάλυση των μηνιαίων δεδομένων ισοζυγίου προκύπτουν αρνητικές τιμές απορροής σε όλες τις θερινές περιόδους. Αυτό μπορεί να αποδοθεί είτε σε υποεκτίμηση των απολήψεων είτε σε υπόγειες διαφυγές νερού. Το ζήτημα των διαφυγών έχει θιγεί ήδη από τη μελέτη της ELECTROWATT (1970), που δέχεται συνολικές απώλειες αρδευτικού νερού της τάξης των $5.0 \text{ hm}^3/\text{έτος}$, λόγω διαρροών από το φράγμα, την σήραγγα εκτροπής και τα τοιχώματα της δεξαμενής. Ωστόσο, αν δεχθούμε ως αληθή τα στοιχεία των εκροών, οι απώλειες λόγω διαφυγών φαίνεται να είναι αρκετά μεγαλύτερες, της τάξης των $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, ήτοι $30.0 \text{ hm}^3/\text{έτος}$ περίπου. Μια τέτοια ποσότητα θα δικαιολογούσε και την εξαιρετικά χαμηλή τιμή της απορροής του τελευταίου έτους. Βεβαίως, το έργο ελέγχεται συστηματικά και δεν έχουν αναφερθεί παρά ήσσονος σημασίας απώλειες νερού μέσω του φράγματος, οπότε μόνη λογική ερμηνεία είναι οι διαφυγές να πραγματοποιούνται σε περατά τμήματα του πυθμένα (κάτι που θα ήταν αδύνατο να μη διαπιστωθεί από τις γεωλογικές έρευνες) ή/και κατά μήκος της σήραγγας Λεονταρίου. Σε κάθε περίπτωση, το ζήτημα των απωλειών νερού κρίνεται επιτακτικό να διερευνηθεί ενδελεχώς, καθώς αν επιβεβαιωθούν τα μεγέθη που προκύπτουν από τις παραπάνω αναλύσεις, και σε συνδυασμό με την προφανή υπερεκτίμηση των απορροών από τις προηγούμενες υδρολογικές μελέτες, αναμένεται σημαντική τροποποίηση προς τα κάτω των έως τώρα προβλεπόμενων μεγεθών ασφαλούς απόληψης.



Σχήμα 3.9: Χρονοσειρά μηνιαίας απορροής υπολεκάνης ανάντη ταμιευτήρα Σμοκόβου.



Σχήμα 3.10: Ετήσιοι όγκοι απορροής υπολεκάνης ανάντη ταμιευτήρα Σμοκόβου.

3.3.3 Υδρολογική διερεύνηση

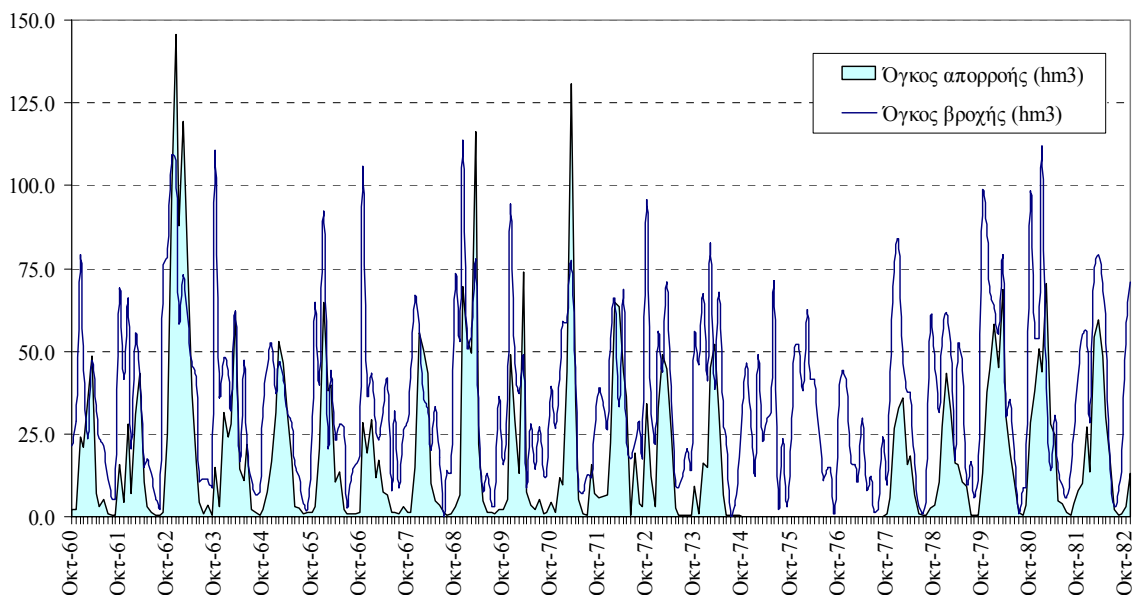
Σύμφωνα με την αποδελτίωση που έγινε στα πλαίσια της Α' φάσης του έργου (Κουκουβίνος κ.ά., 2006), οι εκτιμήσεις διαφόρων μελετών σχετικά με τη μέση ετήσια εισροή στη θέση του φράγματος κυμαίνονται από 130 έως 175 hm³ περίπου. Ωστόσο, από τα στοιχεία εισροών με βάση το ισοζύγιο λειτουργίας του ταμιευτήρα, προκύπτει ότι η μέση τιμή της τελευταία πενταετίας ανέρχεται σε 81.4 hm³, που είναι σημαντικά χαμηλότερη όλων των προηγούμενων προβλέψεων. Οι εκτιμήσεις όλων των μελετών προέρχονται από αναγωγή της χρονοσειρά απορροής του Κέδρου στη θέση του φράγματος. Ωστόσο, τόσο η ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν όσο και η μεθοδολογία αναγωγής που υιοθετήθηκε φαίνεται ότι υπόκεινται σε σοβαρά σφάλματα. Αναλυτικότερα:

Όσον αφορά στα υδρομετρικά δεδομένα, υπάρχει έντονη αβεβαιότητα ως προς την αξιοπιστία των μηνιαίων παροχών στον Κέδρο που δημοσιεύονται στη μελέτη των ΥΔΡΟΜΕΤ κ.ά. (1983), και προέρχονται από την επεξεργασία πρωτογενών μετρήσεων στάθμης και παροχής. Ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1960, ο σταθμός φαίνεται πως παρουσίαζε σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία του, με αποτέλεσμα οι εν λόγω μετρήσεις να μην είναι αξιόπιστες. Η μελέτη της ELECTROWATT (1970) αναφέρει χαρακτηριστικά: «Το σταθμήμετρον είναι κακώς τοποθετημένον εις το ανώμαλον τμήμα του ποταμού Σοφαδίτου, όπου η κοίτη αλλάζει συνεχώς λόγω των φερτών υλών. Αι μετρήσεις δύνανται να θεωρηθούν μόνον ως κατά προσέγγισιν και παροχαί μικρότεροι των 5 μ3/δλ ουδόλως μετρώνται εφ' όσον η στάθμη του ύδατος είναι τότε κάτωθι του μηδενός της κλίμακος». Η πλημμελής καταγραφή των χαμηλών παροχών έχει ως προφανή συνέπεια την υποεκτίμηση της απορροής τις περιόδους χαμηλής υδροφορίας.

Από την άλλη πλευρά, φαίνεται ότι γίνεται υπερεκτίμηση των υψηλών παροχών, όπως προκύπτει από τη σύγκριση των χρονοσειρών βροχόπτωσης¹ και απορροής της λεκάνης ανάντη του Κέδρου, έκτασης 491.8 km². Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11, σε αρκετούς χειμερινούς και εαρινούς μήνες ο συντελεστής απορροής που υπολογίζεται είναι ιδιαίτερα υψηλός (της τάξης του 70-80%), και σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα ξεπερνά κατά πολύ τη μονάδα. Σε υπερετήσια βάση, η τιμή του εν λόγω

¹ Η χρονοσειρά βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής ανάντη του Κέδρου προέκυψε με ολοκλήρωση των αντίστοιχων επιφανειακών δειγμάτων των επιμέρους υπολεκάνων, που υπολογίστηκαν στο εδάφιο 3.1.4.

συντελεστή ανέρχεται σε 54%. Όπως επισημαίνεται και σε πρόσφατη μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ (2006), τέτοιες τιμές, τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια βάση, δεν μπορούν να ερμηνευτούν από τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Πράγματι, ένα μεγάλο τμήμα της, έκτασης 170.7 km², καταλαμβάνεται από τη πεδιάδα της Ξυνιάδας, η οποία έχει πολύ μικρές κλίσεις και, γενικά κακό στραγγιστικό δίκτυο, και συνεπώς δεν αιτιολογείται η παραγωγή σημαντικής απορροής. Επιπλέον, η έξοδος της υπολεκάνης της Ξυνιάδας φράσσεται τους θερινούς μήνες με πρόχειρα αναχώματα για την πραγματοποίηση αρδευτικών απολήψεων, με συνέπεια τη διακοπή της ροής προς κατάντη. Αλλά ακόμη και τα τμήματα της λεκάνης που ευνοούν την πραγματοποίηση σημαντικής απορροής, ήτοι αυτά που εδράζονται σε γεωλογικούς σχηματισμούς χαμηλής περατότητας (φλύσχης), καλύπτονται από πυκνή βλάστηση (δάση), με συνέπεια την αύξηση των υδρολογικών απωλειών λόγω της εξατμοδιαπνοής. Συνεπώς, η ερμηνεία που μπορεί να δοθεί στις τιμές των συντελεστών απορροής είναι η υποεκτίμηση των κατακρημνισμάτων, ιδιαίτερα στα ορεινά τμήματα της λεκάνης όπου είναι σημαντική η συνεισφορά της χιονόπτωσης. Μια άλλη συνιστώσα που δεν έχει διερευνηθεί είναι η πηγαία απορροή της υπολεκάνης του Σμοκοβίτικου, η οποία φαίνεται να είναι αρκετά σημαντική και ενδεχομένως προέρχεται από την εκφόρτιση γειτονικών υδροφορέων. Η υποψία αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι η εν λόγω υπολεκάνη εδράζεται σε φλύσχη, που σε καμία περίπτωση δεν δικαιολογεί την ανάπτυξη αξιόλογων πηγών, που τροφοδοτούνται από κατεισδύσεις της ίδιας λεκάνης.



Σχήμα 3.11: Χρονοσειρές μηνιαίων όγκων βροχόπτωσης και απορροής υπολεκάνης ανάτη υδρομετρικού σταθμού Κέδρου.

Με βάση τη χρονοσειρά μηνιαίας απορροής στον Κέδρο, εκτιμήθηκαν οι εισροές στον ταμειωτήρα υιοθετώντας διάφορες προσεγγίσεις, από τυπικές ημιεμπειρικές τεχνικές (π.χ. μεταφορά δείγματος απορροής με βάση το λόγο των εμβαδών των λεκανών ανάτη Κέδρου και ανάτη φράγματος και το λόγο των αντίστοιχων επιφανειακών βροχοπτώσεων, με εξίσωση των συντελεστών απορροής) μέχρι στατιστικές μεθόδους, όπως φίλτρα Kalman (ΥΔΡΟΜΕΤ κ.ά., 1983). Ωστόσο, τέτοιες προσεγγίσεις, οι οποίες δεν λαμβάνουν υπόψη τα φυσιογραφικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών, είναι πιθανό να οδηγήσουν σε σημαντικά σφάλματα, και ιδιαίτερα σε μια περίπτωση όπως η συγκεκριμένη, όπου η προσθήκη των εισροών της Ξυνιάδας εισάγει έντονη ετερογένεια στους υδρολογικούς μηχανισμούς του υδροσυστήματος. Για το, λόγω αυτό, στην παρούσα διερεύνηση υιοθετήθηκε για πρώτη φορά μια προσέγγιση που βασίζεται στη χρήση υδρολογικού μοντέλου, η οποία περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

4 Εκτίμηση εισροών ταμιευτήρα με το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

4.1 Σκοπός και μεθοδολογία

Μια από τις κύριες συνιστώσες της διαχείρισης των υδατικών πόρων μιας λεκάνης αποτελεί η φυσική προσφορά νερού στο υδροσύστημα, που προέρχεται από την επιφανειακή και υπόγεια απορροή. Στο υδροσύστημα Σμοκόβου, η προσφορά νερού αφορά στις εισροές του ταμιευτήρα, για τις οποίες διατίθεται ένα περιορισμένο δείγμα που αναφέρεται στην τελευταία μόλις πενταετία, ήτοι την περίοδο λειτουργίας του φράγματος. Επιπλέον, όπως προκύπτει από την υδρολογική διερεύνηση του εδαφίου 3.3.3, παλαιότερες προσεγγίσεις που βασίζονται σε εμπειρικές ή στατιστικές τεχνικές «μεταφοράς» της αντίστοιχης υδρομετρικής πληροφορίας της κατάντη λεκάνης του Κέδρου φαίνεται ότι υπόκεινται σε σοβαρά σφάλματα, έχοντας πιθανόν υπερεκτιμήσει την απορροή που πραγματοποιείται στη θέση του φράγματος.

Για την ορθότερη προσέγγιση του προβλήματος, προσαρμόστηκε το ημικατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ στη λεκάνη ανάντη του υδρομετρικού σταθμού στον Κέδρο, με σκοπό την εκτίμηση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της, σε διάφορες θέσεις ελέγχου. Κύριο ζητούμενο ήταν η εκτίμηση των εισροών στον ταμιευτήρα Σμοκόβου, με επιμερισμό των απορροών που προέρχονται από τις υπολεκάνες τροφοδοσίας του (Ρεντινιώτικου, Ονόχωνου, Ξυνιάδας), και λαμβάνοντας υπόψη το καθεστώς απολήψεων στο οροπέδιο της Ξυνιάδας. Οι σχετικές παράμετροι ορίστηκαν με τρόπο ώστε να αντιπροσωπεύουν φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, αξιοποιώντας την κατανεμημένη γεωγραφική πληροφορία της περιοχής. Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε με βάση το μηνιαίο δείγμα απορροής στον Κέδρο των ετών 1960-1982, το πρόσφατο δείγμα απορροής στη θέση του φράγματος, καθώς και στοιχεία υδρομετρήσεων στην Λουτροπηγή και την έξοδο της λεκάνης της Ξυνιάδας. Με βάση τα παραπάνω, προέκυψε μια πλήρης ιστορική χρονοσειρά μηνιαίων εισροών στη θέση του φράγματος, για την περίοδο 1960-2007.

4.2 Περιγραφή του μοντέλου

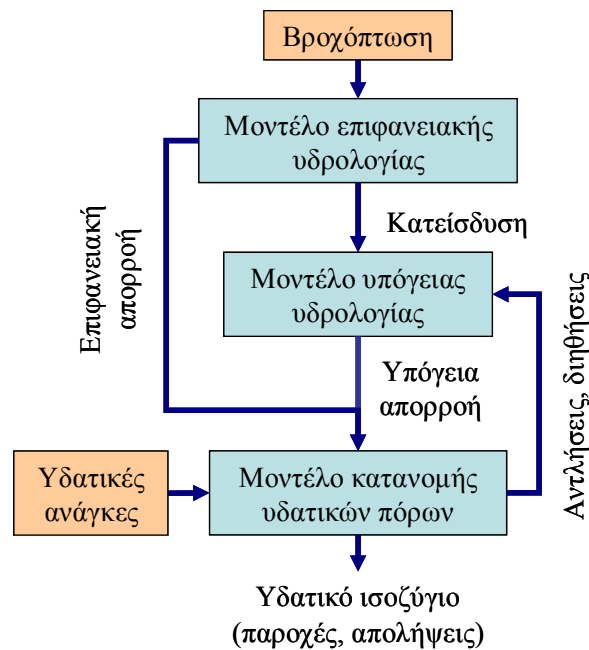
4.2.1 Γενικές αρχές

Το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, που έχει πρόσφατα αναπτυχθεί στο ΕΜΠ (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006· Efstratiadis *et al.*, 2007), είναι ένα ολοκληρωμένο σχήμα προσομοίωσης, το οποίο 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 πραγματικές απολήψεις του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων.

Ως προς τη χωρική κλίμακα αναπαράστασης των διεργασιών, βασίζεται σε μια ημικατανεμημένη προσέγγιση, εκτιμώντας το μηνιαίο ισοζύγιο των υδατικών πόρων σε πολλαπλά σημεία ελέγχου.

Τα τελευταία αναφέρονται στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, στις εξόδους των πηγών, σε άλλες θέσεις ενδιαφέροντος της λεκάνης, καθώς και στις χωρικές ενότητες (κύτταρα) στις οποίες χωρίζεται ο υδροφορέας. Το μοντέλο χαρακτηρίζεται ως φυσικής βάσης, καθώς τόσο στη

σηματοποίηση του υδροσυστήματος όσο και η παραμετροποίηση των διεργασιών του χρησιμοποιείται καταμετρημένη γεωγραφική πληροφορία. Πάντως, ανεξαρτήτως της χωρικής λεπτομέρειας της σηματοποίησης, είναι πάντοτε εφικτή η διατήρηση μιας μαθηματικής δομής φειδωλής σε παραμέτρους, που επιτυγχάνεται με την εννοιολογική συσχέτιση των διεργασιών που αναπαριστά το μοντέλο με τα γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Έτσι αξιοποιείται το σύνολο της πληροφορίας που αφορά στα γεωγραφικά δεδομένα, εξασφαλίζοντας, ταυτόχρονα, συνέπεια των παραμέτρων με τη φυσική του συστήματος, γεγονός που εγγυάται υψηλή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου προσομοίωσης του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

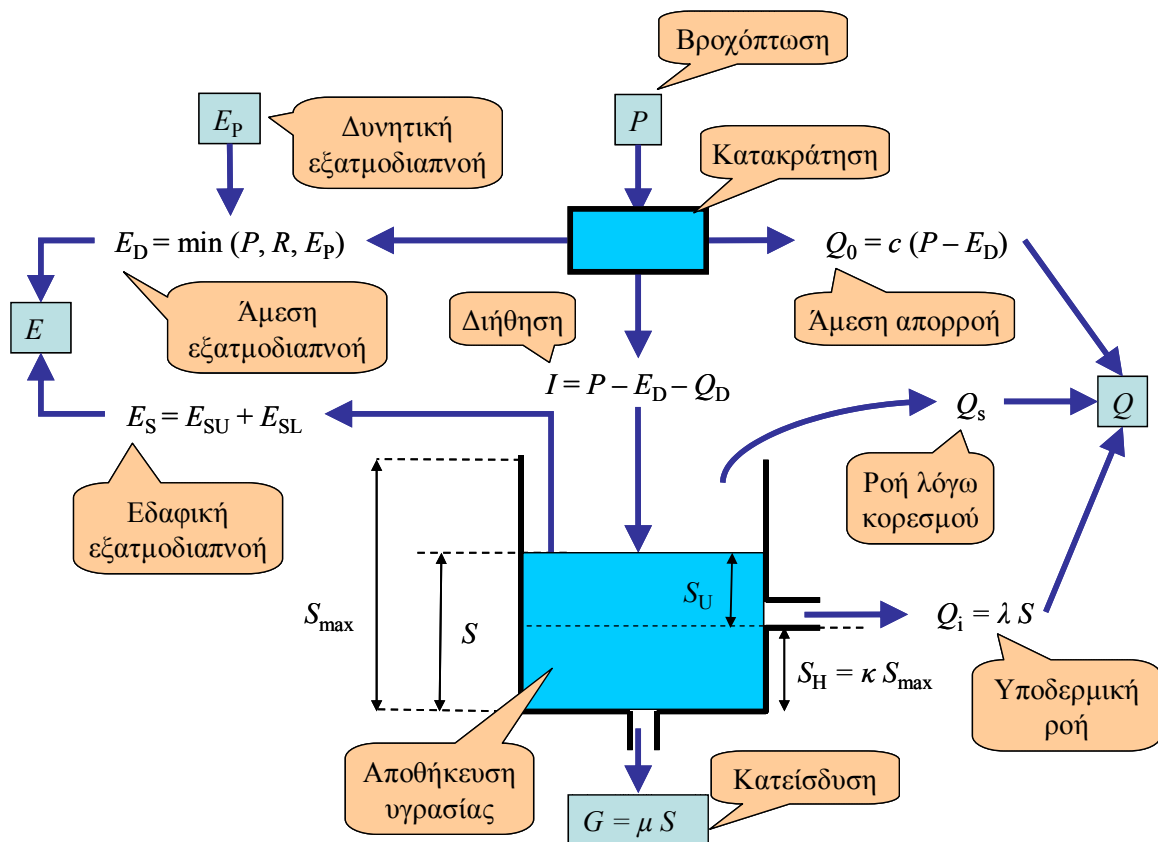
Η προσομοίωση βασίζεται στη συνδυαστική λειτουργία τριών υπομοντέλων, όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.1. Σε κάθε χρονικό βήμα θεωρούνται γνωστά οι φορτίσεις των υπολεκανών (βροχόπτωση, δυνητική εξατμοδιαπνοή) και οι υδατικές ανάγκες στους κόμβους του υδροσυστήματος. Το υπομοντέλο επιφανειακής υδρολογίας εκτιμά τον επιμερισμό της βροχόπτωσης σε πραγματική εξατμοδιαπνοή, επιφανειακή απορροή, κατείσδυση στον υπόγειο υδροφορέα και μεταβολή της αποθήκευσης υγρασίας στο εδαφικό στρώμα. Στη συνέχεια, το υπομοντέλο υπόγειας υδρολογίας εκτιμά τις ανταλλαγές νερού μεταξύ των κυττάρων στα οποία διαμερίζεται ο υδροφορέας, τις εκροές των πηγών (βασική απορροή) και τις υπόγειες διαφυγές εκτός της λεκάνης. Οι φορτίσεις των κυττάρων περιλαμβάνουν τρεις συνιστώσες, την καταμετρημένη κατείσδυση από τις υπολεκάνες, τις διηθήσεις κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου και τις αντλήσεις από τις γεωτρήσεις. Οι δύο τελευταίες είναι άγνωστες, και εκτιμώνται από το υπομοντέλο κατανομής των υδατικών πόρων του υδροσυστήματος. Συγκεκριμένα, με δεδομένη της φυσική προσφορά νερού (συνολική απορροή υπολεκανών), τα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων (παροχεταιυτικότητα υδραγωγείων, αντλητική ικανότητα γεωτρήσεων, μοναδιαία κόστη μεταφοράς και άντλησης) και τα διαχειριστικά μεγέθη του υδροσυστήματος (υδατικές ανάγκες, περιορισμοί ελάχιστης και μέγιστης παροχής), διατυπώνεται, σε κάθε χρονικό βήμα, ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, από την επίλυση του οποίου προκύπτουν τα άγνωστα μεγέθη του υδατικού ισοζυγίου, δηλαδή οι παροχές των υδατορευμάτων και των υδραγωγείων, οι διηθήσεις κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου και οι απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά (αντλήσεις). Τα υπομοντέλα υπόγειας υδρολογίας και κατανομής των

υδατικών πόρων εκτελούνται σε μια επαναληπτική διαδικασία, καθώς ορισμένες από τις εισόδους του καθενός είναι έξοδοι του άλλου.

Το πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ συνεργάζεται με σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας για την παραγωγή των απαραίτητων γεωγραφικών δεδομένων, με τη μορφή θεματικών επιπέδων (υδρογραφικό δίκτυο, υπολεκάνες, μονάδες υδρολογικής απόκρισης, κύτταρα υδροφορέα, δίκτυο υδραγωγείων, κλπ.). Επιπλέον, χρησιμοποιεί υδρολογικά και διαχειριστικά δεδομένα εισόδου για την προσαρμογή του μοντέλου στις παρατηρημένες συνθήκες του παρελθόντος, δηλαδή τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του. Για τον σκοπό αυτό, έχει υλοποιηθεί μια αυτόματη διαδικασία, που βασίζεται σε πολλαπλά κριτήρια επίδοσης και εξελιγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης.

4.2.2 Υπομοντέλο επιφανειακής υδρολογίας

Η προσομοίωση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών σε ένα εδαφικό στοιχείο μοναδιαίας επιφάνειας γίνεται μέσω ενός εννοιολογικού μοντέλου συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας, που αναπαριστά το μηχανισμό μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή, εξατμοδιαπνοή και κατείσδυση προς τον υπόγειο υδροφορέα. Το μοντέλο εντάσσεται στην κατηγορία των αδιαμέριστων εννοιολογικών σχημάτων υδατικού ισοζυγίου, που έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής διεθνώς, καθώς χρησιμοποιώντας απλές υποθέσεις σχετικά με τη λειτουργία των φυσικών μηχανισμών και μικρό πλήθος παραμέτρων, επιτυγχάνουν καλή προσαρμογή ακόμη και στην περίπτωση εξαιρετικά πολύπλοκων συστημάτων. Υπενθυμίζεται ότι οι παράμετροι των εννοιολογικών μοντέλων, αν και δεν έχουν απόλυτη φυσική ερμηνεία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές κάποιων μέσων χαρακτηριστικών του εδάφους, καθώς εξαρτώνται από παράγοντες όπως η κλίση, η διαπερατότητα των πετρωμάτων, η φυτοκάλυψη, κλπ.



Σχήμα 4.2: Σχηματική παράσταση των διεργασιών του μοντέλου εδαφικής υγρασίας.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2, η υδρολογική λειτουργία στην επιφάνεια του εδαφικού στοιχείου εξομοιώνεται με τη λειτουργία μιας εννοιολογικής δεξαμενής χωρητικότητας R , ενώ οι διεργασίες του υπεδάφους αναπαρίστανται μέσω μιας δεξαμενής συγκέντρωσης εδαφικής υγρασίας, χωρητικότητας S_{\max} . Η δεξαμενή εδαφικής υγρασίας, η οποία είναι ανοιχτή από πάνω, χωρίζεται σε μια ανώτερη και μια κατώτερη ζώνη. Το όριο μεταξύ των δύο ζωνών, S_H , εκφράζεται ως ποσοστό της χωρητικότητας και περιγράφεται από την αδιάστατη παράμετρο κ , δηλαδή $S_H = \kappa S_{\max}$. Η εν λόγω διάταξη παρέχει τη δυνατότητα πλευρικής και κατακόρυφης εκροής νερού, καθώς και εκροής λόγω υπερχειλίσης. Η πλευρική εκροή πραγματοποιείται μέσω οριζόντιας οπής που βρίσκεται στη στάθμη S_H , ενώ η κατακόρυφη μέσω οπής που βρίσκεται στον πυθμένα. Ο ρυθμός πραγματοποίησης της πλευρικής και κατακόρυφης εκροής ελέγχεται μέσω των συντελεστών στείρευσης λ και μ , αντίστοιχα.

Η φυσική ερμηνεία του παραπάνω υδραυλικού αναλόγου είναι η εξής: Στην επιφάνεια του εδαφικού στοιχείου πραγματοποιείται ο διαχωρισμός της βροχόπτωσης σε εξάτμιση, άμεση απορροή και διήθηση. Η πρώτη δεξαμενή αναπαριστά τη διεργασία της κατακράτησης μέρους της βροχόπτωσης, που οφείλεται στην παγίδευση νερού στις μικροκοιλότητες του εδάφους και τα φυλλώματα. Το νερό που έχει κατακρατηθεί επιφανειακά είναι διαθέσιμο για εξάτμιση, διαφορετικά διηθείται μαζί με την περίσσεια βροχής. Η διήθηση τροφοδοτεί τη δεύτερη δεξαμενή, το απόθεμά της οποίας αναπαριστά την αποθήκευση εδαφικής υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους. Η πλευρική εκροή και η υπερχειλίση αποτελούν επιπλέον συνιστώσες της επιφανειακής απορροής, ενώ η εκροή μέσω του πυθμένα αναπαριστά την κατείσδυση, δηλαδή την κατακόρυφη μεταφορά νερού από τα ανώτερα (ακόρεστη ζώνη) προς τα κατώτερα (κορεσμένη ζώνη) στρώματα του εδάφους, η οποία αποτελεί μεταβλητή εισόδου (φόρτιση) του υπομοντέλου υπόγειας υδρολογίας. Εκτός των παραπάνω εκροών, το απόθεμα της δεξαμενής μεταβάλλεται (μειώνεται) και εξαιτίας της εξατμοδιαπνοής. Η εν λόγω διεργασία διαφοροποιείται στην ανώτερη και κατώτερη ζώνη. Η πρώτη αντιπροσωπεύει το μέσο βάθος του ριζοστρώματος στη λεκάνη, ήτοι το ύψος νερού μέχρι το οποίο μπορούν να καλυφθούν οι απαιτήσεις της χλωρίδας σε νερό. Η κατώτερη ζώνη (που εννοιολογικά αντιπροσωπεύει τη λεγόμενη ζώνη Vadose) αποτελεί ένα μεταβατικό στρώμα υγρασίας, από το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί εξάτμιση, με μικρότερο ωστόσο ρυθμό, μέσω των τριχοειδών φαινομένων.

Η μαθηματική περιγραφή των παραπάνω διεργασιών γίνεται σε διακριτά (μηνιαία) χρονικά βήματα ως εξής: Έστω t ο δείκτης που αναφέρεται στο χρονικό διάστημα $[t, t + \Delta t]$, όπου Δt το βήμα της προσομοίωσης. Στο διάστημα αυτό θεωρούνται γνωστά η συνολική κατακρήμνιση, P_t , η δυναμική εξατμοδιαπνοή, $E_{p,t}$, και η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας στην αρχή του χρονικού διαστήματος, S_t . Ζητούμενο είναι η εκτίμηση της απορροής Q_t , της πραγματικής εξατμοδιαπνοής E_t , της κατείσδυσης G_t , και της εδαφικής υγρασίας στο πέρας του χρονικού διαστήματος, S_{t+1} . Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου γράφεται:

$$S_{t+1} = S_t + P_t - Q_t - E_t - G_t \quad (4.1)$$

Όπως αναλύεται στη συνέχεια, η παραπάνω σχέση επιλύεται με βάση ορισμένες εύλογες παραδοχές ως προς τα άγνωστα μεγέθη Q_t , E_t , και G_t . Η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας, S_t , που είναι μεταβλητή κατάστασης του μοντέλου, προϋποθέτει γνώση της αρχικής συνθήκης, S_0 , στο χρόνο $t = 0$. Εφόσον η προσομοίωση ξεκινά στην αρχή του υδρολογικού έτους, η αρχική τιμή της εδαφικής υγρασίας μπορεί να θεωρηθεί ίση με μηδέν.

Η απορροή Q_t επιμερίζεται σε τρεις συνιστώσες:

- την άμεση απορροή, $Q_{0,t}$, που εκφράζει την ποσότητα της βροχής που μετασχηματίζεται σε απορροή εντός του χρονικού βήματος, χωρίς να τροφοδοτήσει τη δεξαμενή·
- τη ροή λόγω κορεσμού (ταχεία απορροή), $Q_{S,t}$, που εκφράζει την απορροή που πραγματοποιείται λόγω κορεσμού του εδάφους σε υγρασία, και αναπαρίσταται ως υπερχειλίση της δεξαμενής·

- την υποδερμική ροή, Q_{it} , που εκφράζει την πλευρική αποστράγγιση του εδάφους, η οποία πραγματοποιείται με χρονική υστέρηση, και αναπαρίσταται ως εκροή από την οριζόντια οπή της δεξαμενής.

Η πραγματική εξατμοδιαπνοή, που είναι εξ ορισμού μικρότερη ή ίση με τη δυνητική και θεωρείται υδρολογική απώλεια, περιλαμβάνει δύο συνιστώσες:

- την άμεση εξατμοδιαπνοή, E_{dt} , που αναφέρεται στον ταχύ μετασχηματισμό μέρους της βροχής σε απώλειες λόγω εξάτμισης, από νερό που κατακρατείται επιφανειακά και δεν προλαβαίνει να διηθηθεί στο έδαφος, και
- την εδαφική εξατμοδιαπνοή, E_{st} , που αναφέρεται στην ικανοποίηση του ελλείμματος της δυνητικής εξατμοδιαπνοής μέσω της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας.

Αρχικά, υπολογίζεται η εισροή λόγω διήθησης, η οποία προκύπτει αφαιρώντας από την βροχόπτωση την άμεση εξατμοδιαπνοή, E_{dt} , και την άμεση απορροή, Q_{Dt} . Υπενθυμίζεται ότι η πρώτη υποδηλώνει την ποσότητα βροχής που κατακρατείται επιφανειακά και εξατμίζεται, μην προλαβαίνοντας να διηθηθεί στο έδαφος, και δεν μπορεί να ξεπεράσει την ποσότητα R , δηλαδή τη χωρητικότητα της δεξαμενής κατακράτησης. Η εν λόγω χωρητικότητα αποτελεί παράμετρο του μοντέλου, με διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού. Με την παραπάνω παραδοχή, η άμεση εξατμοδιαπνοή εκτιμάται από τη σχέση:

$$E_{dt} = \min (P_t, R, E_{Pt}) \quad (4.2)$$

Η άμεση απορροή εκφράζει το ποσοστό της περίσσειας βροχής που μετασχηματίζεται σε απορροή εντός του χρονικού βήματος, χωρίς να τροφοδοτήσει τη δεξαμενή, και δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{Dt} = c (P_t - E_{Dt}) \quad (4.3)$$

όπου c αδιάστατη παράμετρος του μοντέλου.

Η διήθηση στο έδαφος, δηλαδή η τροφοδοσία της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, υπολογίζεται από την σχέση:

$$I_t = P_t - E_{Dt} - Q_{Dt} \quad (4.4)$$

Λόγω της διήθησης, το απόθεμα εδαφικής υγρασίας της δεξαμενής αυξάνει σε:

$$S_t^* = S_t + I_t \quad (4.5)$$

Επισημαίνεται ότι το τρέχον απόθεμα S_t^* ενδέχεται να ξεπερνά τη χωρητικότητα της δεξαμενής, S_{\max} . Πρακτικά, η περίσσεια εδαφικής υγρασίας πάνω από το όριο υπερχειλίσης αντιπροσωπεύει την ποσότητα νερού που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το κορεσμένο έδαφος, οπότε αφήνεται να λιμνάσει και, ακολούθως, μέρος του να εξατμιστεί και μέρος του να κατεισδύσει. Η υπόθεση αυτή επιτρέπει την παραγωγή πιο ρεαλιστικών αποκρίσεων, οι οποίες είναι συνεπείς με την μεταβλητότητα της βροχόπτωσης. Το απόθεμα S_t^* κατανέμεται στις δύο ζώνες της δεξαμενής ως εξής:

$$S_{Ut} = \min (0, S_t^* - S_H), S_{Lt} = S_t^* - S_{Ut} \quad (4.6)$$

όπου S_{Ut} το απόθεμα της ανώτερης και S_{Lt} το απόθεμα της κατώτερης ζώνης.

Οι εκροές από τη δεξαμενή οφείλονται στην εδαφική εξατμοδιαπνοή από την ανώτερη και κατώτερη ζώνη, την πλευρική αποστράγγιση και την κατεισδύση. Η εδαφική εξατμοδιαπνοή, E_{st} , αναφέρεται στην ικανοποίηση του ελλείμματος της δυνητικής εξατμοδιαπνοής μέσω της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας, και πραγματοποιείται κατά προτεραιότητα από την ανώτερη ζώνη, με βάση τη σχέση:

$$E_{S_{Ut}} = \min (S_{Ut}, E_{Pt} - E_{Dt}) \quad (4.7)$$

Στη συνέχεια, ποσοστό λ της περίσσειας υγρασίας της ανώτερης ζώνης διαφεύγει πλευρικά μέσω της οριζόντιας οπής, παράγοντας υποδερμική ροή με βάση τη σχέση:

$$Q_{it} = \lambda (S_{Ut} - E_{SUt}) \quad (4.8)$$

Εφόσον το απόθεμα της ανώτερης ζώνης είναι μηδενικό ή δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση για εξατμοδιαπνοή, τότε μέρος του ελλείμματος που προκύπτει καλύπτεται από την αποθήκευση υγρασίας στην κατώτερη ζώνη. Ο σχετικός μηχανισμός βασίζεται στην υπόθεση του Thornthwaite (1948), σύμφωνα με την οποία ο ρυθμός εξάτμισης είναι ανάλογος του βαθμού κορεσμού του εδάφους. Στην προκειμένη περίπτωση, προκύπτει η ακόλουθη ημιεμπειρική σχέση υπολογισμού της επιπλέον εξάτμισης από την κατώτερη ζώνη:

$$E_{SLt} = (E_{Pt} - E_{Dt} - E_{SUt}) [1 - \exp(-S_{Lt} / S_H)] \quad (4.9)$$

Τέλος, η κατείδυση προς τον υπόγειο υδροφόρα πραγματοποιείται μέσω της οπής στον πυθμένα, και είναι ανάλογη της συνολικής διαθέσιμης υγρασίας (μετά την αφαίρεση των εκροών λόγω εδαφικής εξάτμισης και υποδερμικής ροής) και του συντελεστή στείρευσης μ , δηλαδή: $G_t = \mu S_t^*$.

$$G_t = \mu (S_t^* - E_{SUt} - E_{SLt} - Q_{it}) \quad (4.10)$$

Μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών, εκτιμάται η ροή λόγω κορεσμού του εδάφους σε υγρασία, εφόσον πραγματοποιείται υπερχειλίση της δεξαμενής, από την σχέση:

$$Q_{St} = \max(0, S_t^* - E_{SUt} - E_{SLt} - Q_{it} - G_t - S_{\max}) \quad (4.11)$$

Προφανώς, εφόσον πραγματοποιηθεί υπερχειλίση, το απόθεμα υγρασίας στο πέρας του χρονικού βήματος είναι ίσο με τη χωρητικότητα της δεξαμενής, S_{\max} .

Τέλος, η συνολική εξατμοδιαπνοή και απορροή προκύπτουν ως:

$$E_t = E_{Dt} + E_{St} \quad (4.12)$$

$$Q_t = Q_{Dt} + Q_{it} + Q_{St} \quad (4.13)$$

Με γνωστή τη χρονοσειρά βροχόπτωσης και δυναμικής εξατμοδιαπνοής και γνωστή την αρχική συνθήκη S_0 , είναι δυνατή η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών στο μοναδιαίο εδαφικό στοιχείο, με βήμα-προς-βήμα επίλυση του προβλήματος.

4.2.3 Παραμετροποίηση επιφανειακών διεργασιών - Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

Το μοντέλο που περιγράφηκε προηγουμένως έχει έξι παραμέτρους, που φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Οι τιμές των παραμέτρων δεν είναι ενιαίες για κάθε λεκάνη (ή υπολεκάνη) αλλά διαφοροποιούνται χωρικά, με βάση την έννοια της μονάδας υδρολογικής απόκρισης (hydrological response unit· συντμ. ΜΥΑ). Οι ΜΥΑ αναφέρονται σε χωρικές ενότητες της λεκάνης απορροής, με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Ο όρος χρησιμοποιείται σε κατανεμεμένα μοντέλα φυσικής βάσης, για να περιγράψει τυποποιημένες ιδιότητες διακριτών εδαφικών στοιχείων, που αντιπροσωπεύουν αυστηρά οριοθετημένες περιοχές δεδομένης γεωμετρίας (π.χ. ορθογωνικά κύτταρα). Αντίθετα, στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, μια μονάδα περιλαμβάνει ένα σύνολο από πολλά μικρά ανεξάρτητα τμήματα, τυχαίας γεωμετρίας, με κοινά χαρακτηριστικά, που ορίζουν ένα συγκεκριμένο τύπο εδάφους. Σε κάθε μονάδα ο μηχανισμός γέννησης της απορροής θεωρείται ενιαίος, κάτι που εκφράζεται με τη χρήση κοινών παραμέτρων στην αντίστοιχη έκταση. Συνεπώς, η παραμετροποίηση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών γίνεται με βάση τις ΜΥΑ, ακολουθώντας μια προσέγγιση φυσικής βάσης,

στην οποία οι παράμετροι συνδέονται, έστω και αδρομερώς, με χαρακτηριστικά μεγέθη του φυσικού συστήματος, τα οποία αναμένεται να επηρεάζουν τις κυρίαρχες υδρολογικές διεργασίες.

Λόγω του καταναμημένου χαρακτήρα της προσέγγισης, η σχηματοποίηση γίνεται με κατάλληλα υπολογιστικά εργαλεία, που έχουν αναπτυχθεί σε περιβάλλον ArcGIS. Οι ΜΥΑ ορίζονται ως ενώσεις (unions) μεταξύ θεματικών επιπέδων, που απεικονίζουν καταναμημένη πληροφορία ταξινομημένη σε κατηγορίες, όπως η γεωλογία, η φυτοκάλυψη του εδάφους, οι κλίσεις που αναπτύσσονται, κτλ. Πρόκειται για χαρακτηριστικά που προφανώς σχετίζονται με τους μηχανισμούς γέννησης της απορροής. Για παράδειγμα, αν διατίθεται χάρτες με n_A κατηγορίες από το χαρακτηριστικό Α και n_B κατηγορίες από το χαρακτηριστικό Β, τότε με την ένωση των δύο υποβάθρων προκύπτουν $n_A \times n_B$ συνδυασμοί των δύο χαρακτηριστικών της λεκάνης, σε κάθε έναν από τους οποίους αντιστοιχεί διαφορετική ΜΥΑ.

Πίνακας 4.1: Παράμετροι μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας.

| Συμβολισμός | Περιγραφή | Διαστάσεις |
|-------------|--|--------------------|
| R | Χωρητικότητα κατακράτησης της βροχής | [L] |
| c | Ποσοστό της περίσσειας της βροχόπτωσης που εμφανίζεται ως άμεση απορροή | Αδιάστατο |
| S_{max} | Χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας | [L] |
| κ | Κατώφλι αποθέματος δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για την παραγωγή υποδερμικής ροής | Αδιάστατο |
| λ | Ρυθμός εκφόρτισης δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για την παραγωγή υποδερμικής ροής | [T ⁻¹] |
| μ | Ρυθμός εκφόρτισης δεξαμενής εδαφικής υγρασίας για την παραγωγή κατεΐσδυσης | [T ⁻¹] |

Επειδή οι υδρολογικές μεταβλητές εισόδου του υπομοντέλου επιφανειακής υδρολογίας, δηλαδή τα ύψη βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής, διαφοροποιούνται ανά υπολεκάνη, ενώ οι παράμετροί του διαφοροποιούνται ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης, η προσομοίωση των επιφανειακών διεργασιών γίνεται θεωρώντας μια σύνθετη γεωγραφική οντότητα, που προκύπτει από την ένωση των δύο θεματικών επιπέδων. Πρόκειται για τον συνδυασμό υπολεκάνης – μονάδας υδρολογικής απόκρισης, που αποτελεί την ελάχιστη χωρική μονάδα του επιφανειακού συστήματος. Σε κάθε χρονικό βήμα, και για κάθε τέτοιο συνδυασμό, εφαρμόζεται το μοντέλο εδαφικής υγρασίας, το οποίο εκτιμά τον επιμερισμό του ύψους βροχόπτωσης (κοινό για όλα τα τμήματα των ΜΥΑ που ανήκουν στην υπολεκάνη) σε ισοδύναμα ύψη επιφανειακής απορροής, πραγματικής εξατμοδιαπνοής, κατεΐσδυσης και αποθήκευσης υγρασίας. Στη συνέχεια, τα παραπάνω μεγέθη ολοκληρώνονται στην επιφάνεια κάθε υπολεκάνης, με βάση τα ποσοστά την επιφάνειας που καλύπτει κάθε ΜΥΑ, οπότε προκύπτουν οι τελικές τιμές των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου για όλες τις υπολεκάνες του επιφανειακού συστήματος.

4.2.4 Υπομοντέλο υπόγειας υδρολογίας

Η αναπαράσταση της υπόγειας ροής γίνεται θεωρώντας μια διαμέριση του υδροφορέα σε κύτταρα τυχαίας γεωμετρίας, σε κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί μια εννοιολογική δεξαμενή υπόγειου νερού. Το σχήμα που έχει ενσωματωθεί στην ΥΔΡΟΓΕΙΟ αποτελεί απλοποίηση του μοντέλου που ανέπτυξαν οι Rozos and Koutsoyiannis (2005, 2006), το οποίο έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για την αναπαράσταση υδροφορέων υψηλής αβεβαιότητας. Είσοδος του μοντέλου είναι η προσφορά νερού από την ακόρεστη ζώνη (κατεΐσδυση) και το υδρογραφικό δίκτυο (διήθηση), καθώς και η απόληψη νερού από τις γεωτρήσεις (άντληση). Για δεδομένες αρχικές συνθήκες (στάθμες δεξαμενών), το

μοντέλο υπολογίζει τη μεταβολή αποθέματος στις δεξαμενές, τις εκροές των πηγών (βασική ροή) και τις διαφυγές εκτός λεκάνης. Επισημαίνεται ότι, σε κάθε χρονικό βήμα, η κατείσδυση υπολογίζεται από το υπομοντέλο επιφανειακής υδρολογίας, ενώ η διήθηση και η άντληση από το υπομοντέλο κατανομής των υδατικών πόρων, που περιγράφεται στο επόμενο εδάφιο.

Στη συγκεκριμένη λεκάνη, επειδή η συνεισφορά αλλά και η αξιοποίηση των υπόγειων νερών είναι περιορισμένη, δεν έγινε πλήρης μοντελοποίηση του υδροφορέα, με εξαίρεση το οροπέδιο της Ξυνιάδας που αναπαραστάθηκε ως ενιαίο κύτταρο (βλ. 4.3.3).

4.2.5 Υπομοντέλο κατανομής υδατικών πόρων

Το υπομοντέλο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατανομής των ροών του υδροσυστήματος, οι οποίες αναφέρονται στις φυσικές αλλά και τις ανθρωπογενείς διεργασίες. Βασίζεται σε μια δικτυακή περιγραφή των συνιστωσών της λεκάνης, όπου οι θέσεις προσφοράς και ζήτησης νερού (κόμβοι υδρογραφικού δικτύου, γεωτρήσεις, αρδευόμενες περιοχές, κτλ.) αναπαρίστανται ως κόμβοι, ενώ τα στοιχεία μεταφοράς (υδατορεύματα, υδραγωγεία) αναπαρίστανται ως κλάδοι. Με γνωστές τις εισροές στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, οι οποίες προέρχονται από την επιφανειακή και υπόγεια απορροή (που αποτελούν έξοδο των υπομοντέλων επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας, αντίστοιχα), καθώς και την προσφορά νερού στις γεωτρήσεις, το μοντέλο εκτιμά τη βέλτιστη κατανομή των υδατικών πόρων, λαμβάνοντας υπόψη τις προτεραιότητες των χρήσεων νερού και τα κόστη χρήσης των υδραγωγείων και γεωτρήσεων. Η βελτιστοποίηση βασίζεται σε ένα σχήμα γραμμικού προγραμματισμού, που είναι κοινό με αυτό που χρησιμοποιεί το διαχειριστικό μοντέλο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ (βλ. 5.1.5).

4.3 Σχηματοποίηση φυσικού συστήματος

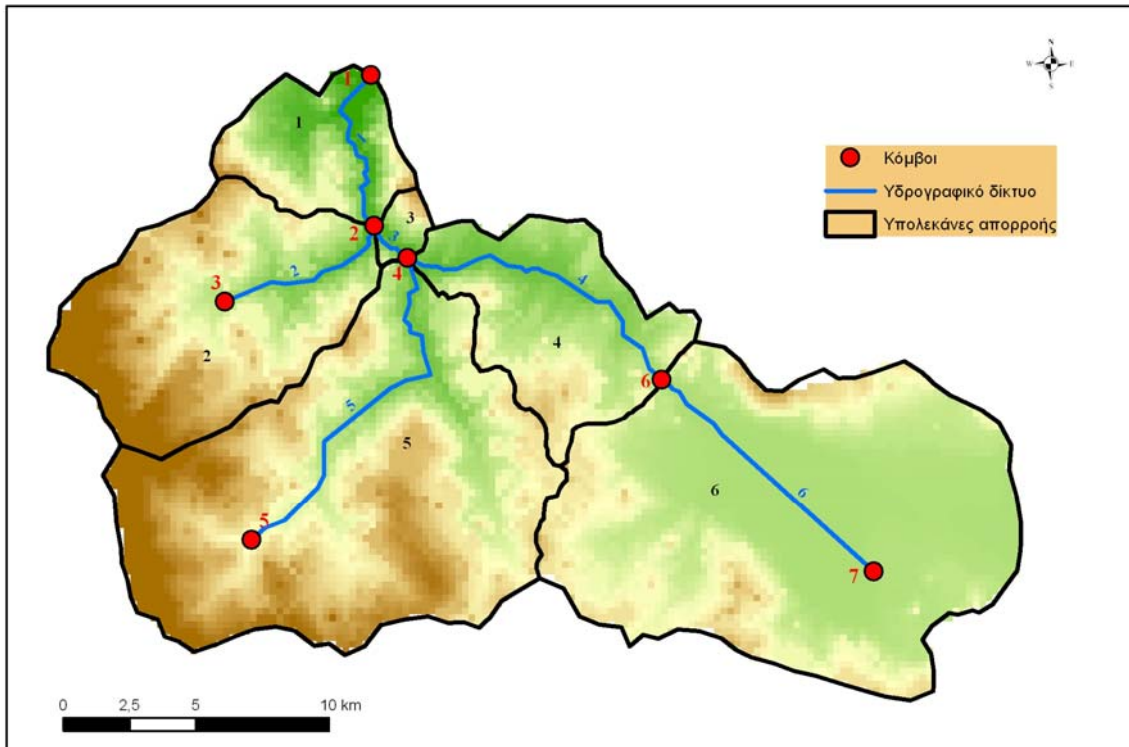
Το φυσικό σύστημα σχηματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων (ΨΜΥ) που κατασκευάστηκε ειδικά για τις ανάγκες της εφαρμογής. Το ΨΜΥ έχει διάσταση κυττάρου 250 m και προέκυψε από την πληροφορία υψομέτρου (ισοϋψείς καμπύλες, σημεία με γνωστό υψόμετρο) και υδρογραφικού δικτύου που είχε συλλεγεί στην πρώτη φάση του έργου. Όλα τα δεδομένα, πρωτογενή και παραγόμενα, έχουν αποθηκευτεί σε βάση δεδομένων, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6.

4.3.1 Υδρογραφικό δίκτυο – Υπολεκάνες απορροής

Το υδρογραφικό δίκτυο ορίστηκε έτσι ώστε να αποδοθούν οι κύριοι κλάδοι που συνδέουν τους κόμβους, δηλαδή τα σημεία όπου υπάρχει υδρολογικό ενδιαφέρον (υδρομετρικός σταθμός Κέδρου, φράγμα, έξοδος Ξυνιάδας, κλπ.). Οι υπολεκάνες απορροής χαραχτηκαν ανάντη των κόμβων και τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον Πίνακα 4.2. Το υδρογραφικό δίκτυο, οι κόμβοι του και οι υπολεκάνες απορροής (με τους κωδικούς που τους αποδόθηκαν), φαίνονται στο Σχήμα 4.3.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά υπολεκανών απορροής.

| Κωδικός | Περιγραφή | Κατάντη κόμβος | Έκταση (km ²) | Μέσο υψόμετρο (m) | Μήκος κύριου υδατορεύματος (km) |
|---------|-------------------|----------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1 | Ανάντη Κέδρου | 1 | 29.9 | 455 | 7.1 |
| 2 | Σμοκοβίτικου | 2 | 80.3 | 756 | 6.8 |
| 3 | Κατάντη φράγματος | 2 | 4.3 | 509 | 2.0 |
| 4 | Ονόχωνου | 4 | 51.3 | 500 | 12.1 |
| 5 | Ρεντινιώτικου | 4 | 155.3 | 737 | 15.0 |
| 6 | Ξυνιάδα | 6 | 170.7 | 544 | 10.9 |



Σχήμα 4.3: Υδρογραφικό δίκτυο και υπολεκάνες απορροής.

4.3.2 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

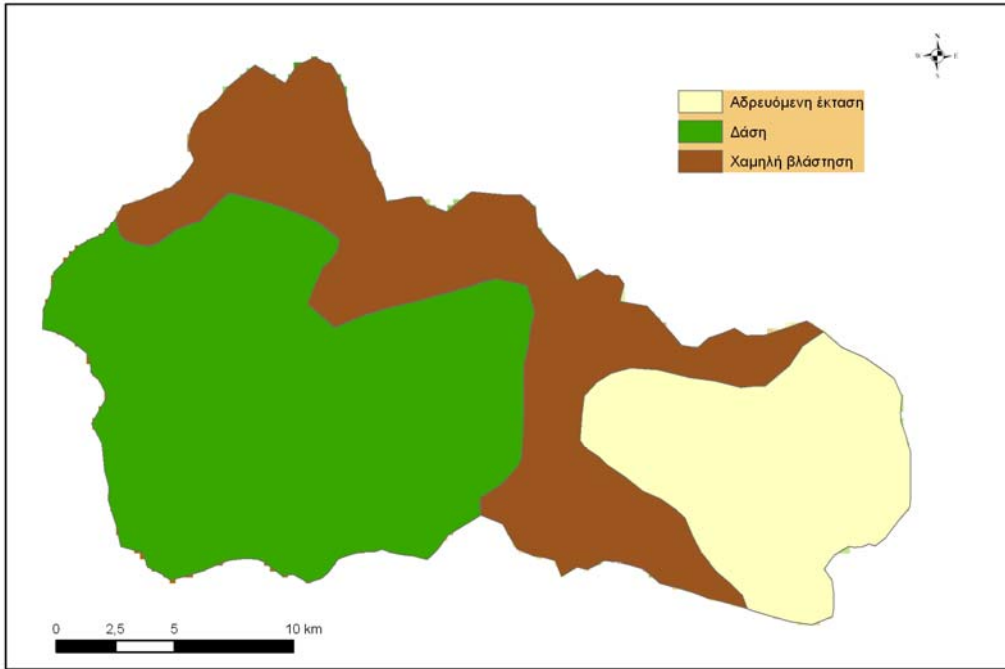
Η μονάδα υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ) αποτελεί θεμελιώδη έννοια του μοντέλου, καθώς συνιστά την παραμετροποίηση του επιφανειακού συστήματος. Στόχος είναι να περιγραφούν ρεαλιστικά οι τύποι εδάφους που χαρακτηρίζουν τις μείζονες υδρολογικές διεργασίες, δηλαδή τους μηχανισμούς παραγωγής της εξατμοδιαπνοής, της απορροής και της κατείσδυσης. Ωστόσο, η ακρίβεια στην περιγραφή των διεργασιών έρχεται σε αντίφαση με την ανάγκη διαμόρφωσης σχημάτων φειδωλών σε παραμέτρους, ειδικά όταν δεν υπάρχουν επαρκείς μετρήσεις επιφανειακών υδατικών πόρων για την εκτίμησή τους μέσω βαθμονόμησης. Στην προκειμένη περίπτωση, η έλλειψη αξιόπιστης υδρομετρικής πληροφορίας επέβαλε την ελαχιστοποίηση του αριθμού των ΜΥΑ, και συγκεκριμένα τη διαμόρφωσή τους με βάση τρεις τύπους κάλυψης γης (αρδευόμενη, χαμηλή βλάστηση, δασώδης). Με τον τρόπο αυτό, προέκυψαν τρεις ΜΥΑ, που απεικονίζονται στον χάρτη του Σχήματος 4.4. Τα χαρακτηριστικά τους δίνονται στον Πίνακα 4.3, ενώ οι εκτάσεις που καταλαμβάνονται ανά υπολεκάνη δίνονται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

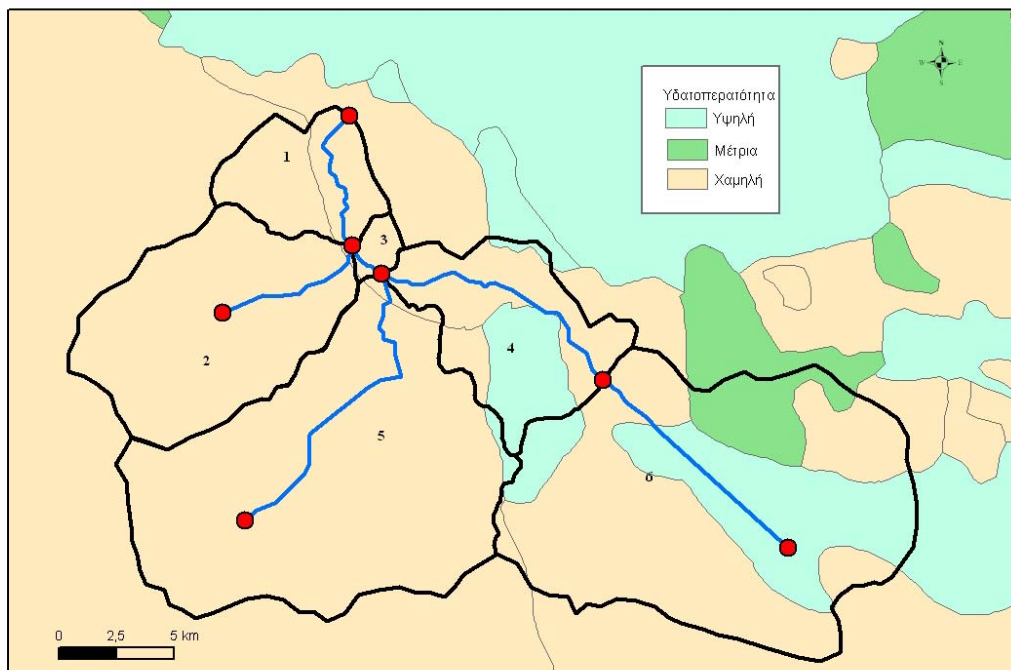
| α/α | Κάλυψη γης | Έκταση (km ²) |
|-----|-----------------|---------------------------|
| 1 | Αρδευόμενη | 102.5 |
| 2 | Χαμηλή βλάστηση | 159.3 |
| 3 | Δασώδης | 229.3 |

Εκτός της κάλυψης γης, μια σημαντική ιδιότητα του εδάφους, η οποία σαφώς επηρεάζει τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, είναι η περατότητα των πετρωμάτων, όπως προκύπτει με βάση την τυπική υδρολιθολογική κατάταξη του ΙΓΜΕ (Σχήμα 4.5). Στην περιοχή μελέτης, παρατηρείται ότι οι εκτάσεις που καλύπτονται από δασώδη βλάστηση, ήτοι αυτές που αντιστοιχούν στη ΜΥΑ 1, ταυτίζονται, πρακτικά, με τις εκτάσεις όπου αναπτύσσεται ο φλύσχης (κατηγορία Α1), ενώ στις περιοχές χαμηλής

βλάστησης, που αντιστοιχούν στη ΜΥΑ 2, κυριαρχούν σχηματισμοί χαμηλής, επίσης, περατότητας (κατηγορία Α3). Τέλος, στο οροπέδιο της Ξυνιάδας, ήτοι στις αρδευόμενες εκτάσεις της περιοχής (ΜΥΑ 3), αναπτύσσονται διάφορες κατηγορίες πετρωμάτων, μεταξύ των οποίων και ασβεστόλιθοι. Με βάση τους παραπάνω τύπους υδατοπερατότητας, έγινε η παραδοχή ότι ο συντελεστής στείρευσης για παραγωγή κατείδυσης των ΜΥΑ 1 και 2 είναι μηδενικός, ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής της ΜΥΑ 3 είναι μη μηδενικός. Με τον τρόπο αυτό, περιορίστηκε ο αριθμός των προς βελτιστοποίηση μεταβλητών ελέγχου, καθώς σε δύο από τις τρεις ΜΥΑ εκτιμήθηκαν 5 αντί 6 παράμετροι.



Σχήμα 4.4: Διαμόρφωση μονάδων υδρολογικής απόκρισης, με βάση τρεις κατηγορίες κάλυψης γης.



Σχήμα 4.5: Κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών, με βάση την υδατοπερατότητα.

Πίνακας 4.4: Τύπος φυτοκάλυψης ανά υπολεκάνη απορροής (εκτάσεις σε km²).

| Υπολεκάνη | Δασώδης | Χαμηλή βλάστηση | Αρδευόμενη |
|-------------------|---------|-----------------|------------|
| Ανάντη Κέδρου | - | 29.9 | - |
| Σμοκοβίτικου | 66.7 | 13.4 | - |
| Κατάντη φράγματος | - | 4.3 | - |
| Ονόχωνου | 14.7 | 36.6 | - |
| Ρεντινιώτικου | 142.9 | 12.0 | - |
| Ξυριάδα | 4.9 | 63.1 | 102.5 |

4.3.3 Μοντελοποίηση αρδευτικών απολήψεων Ξυριάδας

Η μοναδική χρήση νερού στην περιοχή μελέτης είναι η άρδευση του οροπεδίου της Ξυριάδας, η οποία πραγματοποιείται από επιφανειακά και υπόγεια νερά. Οι επιφανειακές απολήψεις πραγματοποιούνται κατά μήκος του αποστραγγιστικού δικτύου, έχοντας προηγουμένως φράξει με πρόχειρα αναχώματα την έξοδο της κεντρικής αποστραγγιστικής τάφρου, ενώ οι απολήψεις από τα υπόγεια νερά γίνονται μέσω γεωτρήσεων.

Για την αναπαράσταση των παραπάνω διεργασιών, κάτω από την έκταση της υπολεκάνης της Ξυριάδας (που ταυτίζεται με τη ΜΥΑ 3), θεωρήθηκε μια δεξαμενή υπόγειου νερού, η οποία εκρέει σε μια εικονική δεξαμενή πολύ μεγάλης επιφάνειας. Η εν λόγω δεξαμενή αναπαριστά διάφορες πηγές που αναπτύσσονται στην Ξυριάδα, κυρίως στην περιοχή του Αγίου Στεφάνου, και, σύμφωνα με μαρτυρίες των κατοίκων, φαίνεται ότι διέθεταν αξιόλογο δυναμικό, τουλάχιστον μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980. Στην υπολεκάνη, θεωρήθηκε ένας εικονικός κόμβος, ο οποίος συγκεντρώνει τις αρδευτικές απολήψεις. Ο κόμβος συνδέεται με μια εικονική γεώτρηση, που αντλεί νερό από τη δεξαμενή, και με ένα εικονικό υδραγωγείο, μέσω του οποίου εκτρέπονται τα νερά που καταλήγουν στην έξοδο της υπολεκάνης, και τα οποία προέρχονται από την επιφανειακή και την πηγαία απορροή.

Οι σημερινές αρδευτικές ανάγκες της περιοχής εκτιμώντας, σε ετήσια βάση σε περίπου 23.5 hm³. Η μηνιαία κατανομή τους φαίνεται στον Πίνακα 4.5. Στις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ότι η εν λόγω ζήτηση αντιστοιχεί στο έτος 2006, και μειώνεται με σταθερό ρυθμό 1% τα προηγούμενα έτη. Με την υπόθεση αυτή, η ζήτηση του έτους 1960 (αρχή προσομοίωσης) φτάνει τα 14.9 hm³.

Πίνακας 4.5: Υφιστάμενες αρδευτικές ανάγκες οροπεδίου Ξυριάδας, σε μηνιαία και ετήσια βάση.

| Μήνας | Αρδευτική ζήτηση (hm ³) | Ποσοστό |
|-------------|-------------------------------------|---------|
| Απρίλιος | 1.551 | 0.066 |
| Μάιος | 2.954 | 0.126 |
| Ιούνιος | 4.764 | 0.203 |
| Ιούλιος | 5.672 | 0.242 |
| Αύγουστος | 5.098 | 0.217 |
| Σεπτέμβριος | 3.434 | 0.146 |
| Σύνολο | 23.472 | 1.000 |

Οι αρδευτικές ανάγκες της Ξυριάδας καλύπτονται από επιφανειακά και υπόγεια νερά (αντλήσεις), ωστόσο η κατανομή τους είναι άγνωστη. Στις προσομοιώσεις υποθέσαμε ότι μέχρι το έτος 1980, ο εννοιολογικός αγωγός που αναπαριστά τις εκτροπές νερού από την έξοδο του οροπεδίου δύναται να μεταφέρει έως 0.5 m³/s κατά την αρδευτική περίοδο, που σημαίνει ότι δεν κατακρατείται το σύνολο των επιφανειακών πόρων της υπολεκάνης, όπως εξάλλου επιβεβαιώνεται από τις θερινές μετρήσεις παροχής κατά τη δεκαετία του 1970 στη θέση Αγγειές (βλ. 3.3.1). Μετά το 1980, θεωρήθηκε ότι την

περίοδο αιχμής (Ιούνιος-Αύγουστος) το σύνολο της θερινής παροχής της Ξυνιάδας εκτρέπεται για αρδευτική χρήση, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να τροφοδοτήσει το υδρογραφικό δίκτυο κατάντη, άρα και τον ταμιευτήρα Σμοκόβου.

4.4 Βαθμονόμηση μοντέλου

4.4.1 Περίοδος ελέγχου και χρονοσειρές εισόδου

Με βάση τη σχηματοποίηση που περιγράφεται παραπάνω, ο έλεγχος του μοντέλου έγινε για την περίοδο Οκτωβρίου 1960-Απριλίου 2007, κατά την οποία διατίθενται πλήρη δείγματα επιφανειακής βροχόπτωσης και δυναμικής εξατμοδιαπνοής στις έξι υπολεκάνες του υδροσυστήματος. Η εκτίμηση των τελευταίων, που αποτελούν τις χρονοσειρές «φόρτισης» του μοντέλου, περιγράφεται στα σχετικά εδάφια 3.1.4 και 3.2.3, αντίστοιχα. Η περίοδος ελέγχου χωρίστηκε σε δύο υποπεριόδους. Η πρώτη περιλαμβάνει τα έτη 1960-1982, κατά τα οποία πραγματοποιήθηκε η προσαρμογή (βαθμονόμηση) του μοντέλου, ενώ η λοιπή περίοδος (στην πραγματικότητα, η περίοδος Ιουλίου 2002-Απριλίου 2007) χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευσή του.

Οι χρονοσειρές ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου στις ιστορικές αποκρίσεις του συστήματος αναφέρονται στην παροχή που μετράται στις τρεις θέσεις ελέγχου, ήτοι στον υδρομετρικό σταθμό Κέδρου, στη θέση του φράγματος (όπου παλαιότερα είχε λειτουργήσει ο υδρομετρικός σταθμός Λουτροπηγής) και στην έξοδο της Ξυνιάδας, όπου παλαιότερα είχε λειτουργήσει ο υδρομετρικός σταθμός Αγγειών. Αναλυτικότερα:

- Στον υδρομετρικό σταθμό του Κέδρου, όπου και η έξοδος του υδροσυστήματος, η προσαρμογή του μοντέλου έγινε με βάση το δείγμα μέσων μηνιαίων παροχών που δημοσιεύεται στη μελέτη των ΥΔΡΟΜΕΤ κ.ά. (1983). Από το αρχικό δείγμα αφαιρέθηκαν οι, ως επί το πλείστον, χειμερινοί και εαρινοί μήνες με τιμές παροχής $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$ και, ταυτόχρονα, συντελεστή απορροής μεγαλύτερο του 0.80, η αξιοπιστία των οποίων είναι αμφισβητούμενη (βλ. 3.3.3) και, σε κάθε περίπτωση, δεν θα μπορούσαν να αναπαραχθούν από το μοντέλο. Το τελικό δείγμα που προέκυψε καλύπτει (με κενά) την περίοδο Οκτωβρίου 1960-Νοεμβρίου 1982, ενώ δεν έχουν ληφθεί υπόψη τα υδρολογικά έτη 1974-75 έως 1976-77, που χαρακτηρίζονται ως μη αξιόπιστα στη μελέτη.
- Στη θέση του φράγματος η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε με βάση το δείγμα παροχών στον υδρομετρικό σταθμό Λουτροπηγής, ενώ η επαλήθευσή του με βάση τις πρόσφατες εκτιμήσεις που προέρχονται από την ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα (βλ. 3.3.2). Επισημαίνεται ότι οι παροχές που μετρούνταν στη Λουτροπηγή κατά τη δεκαετία του 1970 είναι εν μέρει μόνο αντιπροσωπευτικές της πραγματικής δίαιτας της λεκάνης, καθώς πραγματοποιούνταν με συχνότητα μία έως δύο ανά μήνα.
- Στην έξοδο της Ξυνιάδας χρησιμοποιήθηκε, σε αντιστοιχία με την περίπτωση της Λουτροπηγής, το δείγμα υδρομετρήσεων στον υδρομετρικού σταθμού Αγγειών.

Οι λοιπές χρονοσειρές εισόδου του μοντέλου αφορούν στην αρδευτική ζήτηση της Ξυνιάδας και τη μέγιστη παροχή που μπορεί να δοθεί από επιφανειακά έργα, μέσω του εικονικού αγωγού εκτροπής. Οι εν λόγω χρονοσειρές κατασκευάστηκαν με βάση τις παραδοχές που συζητώνται στο εδάφιο 4.3.3.

4.4.2 Διατύπωση προβλήματος βαθμονόμησης

Οι άγνωστες παράμετροι του μοντέλου, που αντιστοιχούν στις μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος βαθμονόμησης, αναφέρονται στις παραμέτρους των τριών μονάδων υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ), που ορίστηκαν με βάση την κάλυψη γης της περιοχής μελέτης (βλ. 4.3.2), και στις παραμέτρους της εννοιολογικής δεξαμενής υπόγειου νερού που αναπαριστά τον υδροφορέα της Ξυνιάδας. Με δεδομένο ότι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των ΜΥΑ 1 και 2 χαρακτηρίζονται

από χαμηλή διαπερατότητα, ο συντελεστής στείρευσης για την παραγωγή κατείδυσης θεωρήθηκε μηδενικός. Επιπλέον, θεωρήθηκαν μηδενικοί οι συντελεστές διήθησης των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, ο αριθμός των μεταβλητών ελέγχου, ήτοι των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων, είναι 18, εκ των οποίων οι 16 αφορούν στις επιφανειακές διεργασίες (5 για τις ΜΥΑ 1 και 2, 6 για τη ΜΥΑ 3) και 2 για τις υπόγειες διεργασίες της υπολεκάνης Ξυνιάδας.

Ως κριτήρια καλής προσαρμογής του μοντέλου τέθηκαν τα μέτρα αποτελεσματικότητας (efficiency) των μηνιαίων υδρογραφημάτων στις αντίστοιχες θέσεις ελέγχου (γνωστοί και ως δείκτες Nash-Sutcliffe), σε συνδυασμό με τη μεροληψία αναπαραγωγής της παρατηρημένης μέσης τιμής.

Η αποτελεσματικότητα δίνεται από τη σχέση:

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (y_t - y'_t)^2}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2} \quad (4.14)$$

όπου y_t η παρατηρημένη τιμή κατά το χρονικό βήμα t , y'_t η αντίστοιχη τιμή που παράγει το μοντέλο, \bar{y} η μέση τιμή των παρατηρήσεων και T ο χρονικός ορίζοντας ελέγχου. Η θεωρητικά μέγιστη τιμή του παραπάνω μέτρου είναι μονάδα, που υποδηλώνει τέλεια προσαρμογή του μοντέλου, ενώ δεν υπάρχει κάτω όριο ως προς την ελάχιστη τιμή. Για την αναπαραγωγή της απορροής εξόδου μιας λεκάνης, τιμές αποτελεσματικότητας 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.

Η μεροληψία δίνεται από τη σχέση:

$$BIAS = \bar{y}' / \bar{y} - 1 \quad (4.15)$$

όπου \bar{y}' η μέση τιμή της προσομοιωμένης χρονοσειράς απόκρισης του μοντέλου (στην προκειμένη περίπτωση της απορροής). Θετική τιμή της μεροληψίας υποδηλώνει ότι το μοντέλο υπερεκτιμά την απορροή, ενώ αρνητική τιμή ότι την υποεκτιμά.

Το κριτήριο αποτελεσματικότητας εξασφαλίζει την προσαρμογή των τιμών της προσομοιωμένης στην παρατηρημένη χρονοσειρά, με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η διασπορά των σφαλμάτων σε σχέση με τη διασπορά των παρατηρήσεων, ενώ το δεύτερο κριτήριο εξασφαλίζει τη διατήρηση της μέσης τιμής, και συνακόλουθα του ιστορικού υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης.

Πίνακας 4.6: Συντελεστές βάρους κριτηρίων καλής προσαρμογής.

| Θέση ελέγχου | Κωδικός κόμβου | Αποτελεσματικότητα | Μεροληψία |
|-----------------|----------------|--------------------|-----------|
| Κέδρος | 1 | 2.0 | 0.1 |
| Φράγμα | 4 | 4.0 | 0.1 |
| Έξοδος Ξυνιάδας | 6 | 1.0 | 0.1 |

Τα έξι κριτήρια ελέγχου σταθμίστηκαν σε μια σύνθετη μαθηματική έκφραση, που αποτελεί το μέτρο επίδοσης του μοντέλου, ήτοι τη στοχική συνάρτηση του προβλήματος βαθμονόμησης. Οι συντελεστές βάρους, οι οποίοι δίνονται στον Πίνακα 4.6, επιλέχθηκαν με βάση τη σημασία αναπαραγωγής των παρατηρημένων υδρογραφημάτων, που είναι προφανώς μεγαλύτερη για τη θέση του φράγματος. Σε δεύτερη προτεραιότητα τέθηκε η αναπαραγωγή των μέσων μηνιαίων παροχών στον Κέδρο, ενώ η

χαμηλότερη προτεραιότητα δόθηκε στην αναπαραγωγή των μετρήσεων παροχής στην έξοδο της Ξυνιάδας. Για τη διατήρηση της παρατηρημένης μέσης τιμής θεωρήθηκε ένας μικρός συντελεστής βάρους για όλα τα υδρογραφήματα, ίσος με 0.1, ώστε να μην επηρεαστεί η διαδικασία προσαρμογής, αλλοιώνοντας τη διακύμανση της απορροής προκειμένου να αναπαραχθεί η αντίστοιχη μέση τιμή.

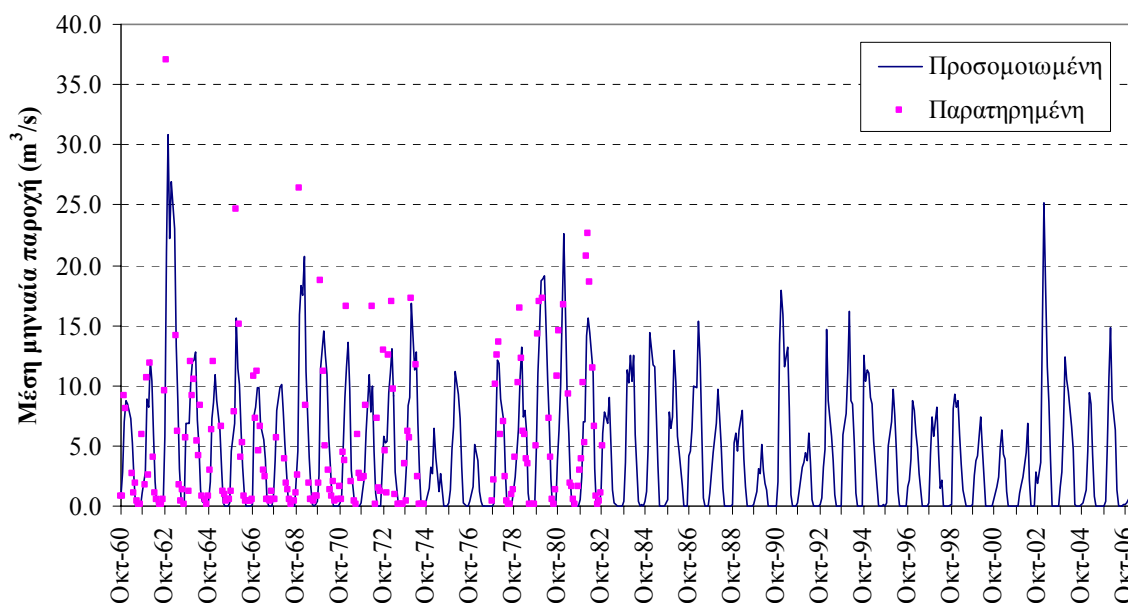
4.4.3 Αποτελέσματα βαθμονόμησης

Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου έγινε κατά στάδια, βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους ανά ομάδες και αναπροσαρμόζοντας τους συντελεστές βάρους, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι της μελέτης. Για τη βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκε ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου, που είναι κατάλληλος για πολύπλοκα, μη γραμμικά προβλήματα υδατικών πόρων με πολλαπλά ακρότατα, και είναι ενσωματωμένος στο λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2002· Rozos *et al.*, 2004).

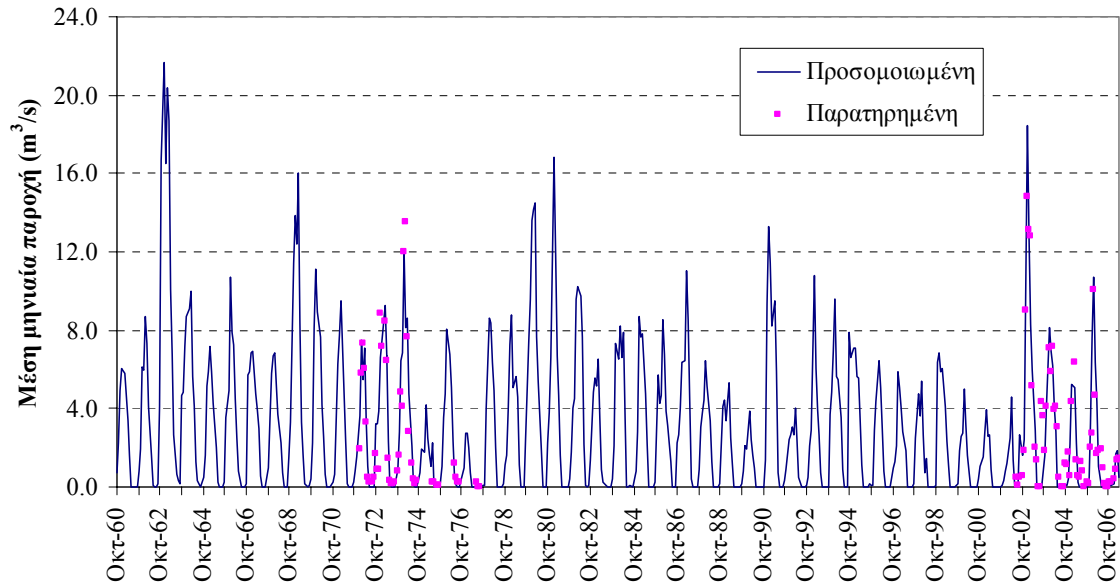
Στον Πίνακα 4.7 δίνονται οι βελτιστοποιημένες τιμές των κριτηρίων καλής προσαρμογής, για τις τρεις θέσεις ελέγχου. Η σύγκριση των παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων γίνεται στα Σχήματα 4.6 έως 4.8. Επισημαίνεται ότι η παροχή που υπολογίζεται από το μοντέλο στη θέση Κέδρος μετά το 1982, όταν και ξεκίνησε η κατασκευή των έργων Σμοκόβου, είναι φυσικοποιημένη, δηλαδή αναπαριστά τη θεωρητική παροχή που θα έφτανε στην έξοδο του συστήματος αν δεν παρεμβαλλόταν το φράγμα. Επιπλέον, από την παροχή που υπολογίζεται στην έξοδο της Ξυνιάδας, έχουν αφαιρεθεί οι αρδευτικές απολήψεις της θερινής περιόδου.

Πίνακας 4.7: Βελτιστοποιημένες τιμές κριτηρίων καλής προσαρμογής για την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου (1960-1982).

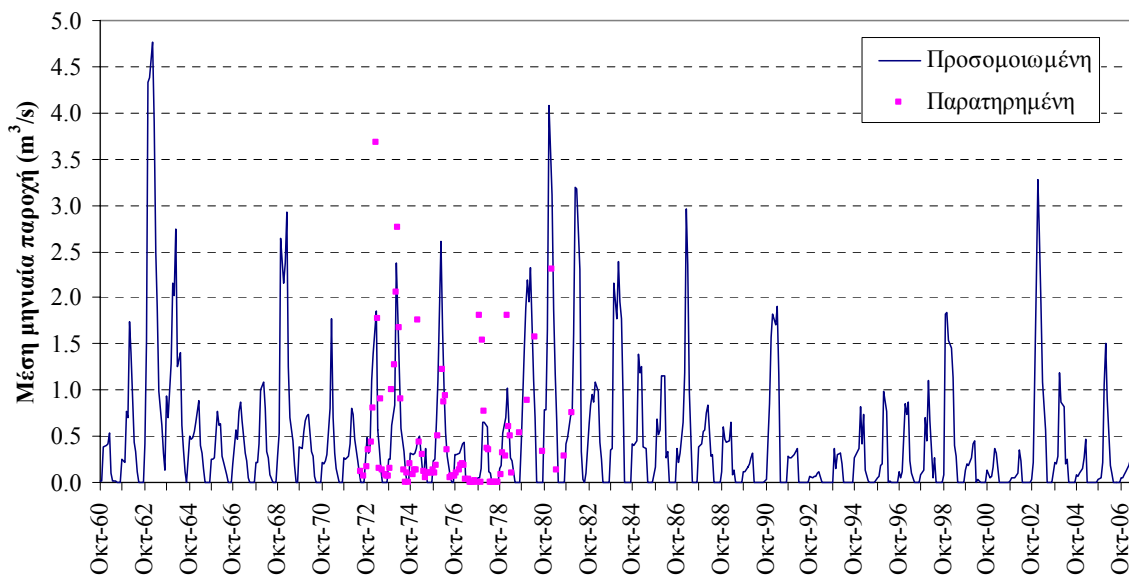
| Θέση ελέγχου | Κωδικός κόμβου | Αποτελεσματικότητα | Μεροληψία |
|-----------------|----------------|--------------------|-----------|
| Κέδρος | 1 | 0.754 | -0.111 |
| Φράγμα | 4 | 0.838 | 0.096 |
| Έξοδος Ξυνιάδας | 6 | 0.527 | -0.102 |



Σχήμα 4.6: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής στη θέση Κέδρος.



Σχήμα 4.7: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής στη θέση του φράγματος Συμοκόβου.



Σχήμα 4.8: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής στην έξοδο της Ξυνιάδας.

Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των κριτηρίων (Πίνακας 4.7), αλλά και από την «οπτική» σύγκριση των προσομοιωμένων και αντίστοιχων παρατηρημένων υδρογραφημάτων, προκύπτει ότι η προσαρμογή του μοντέλου είναι ικανοποιητική. Συγκεκριμένα:

Στη θέση Κέδρος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6, το μοντέλο αναπαριστά με αρκετά καλή ακρίβεια τις περιόδους μέσης και χαμηλής υδροφορίας, αδυνατεί ωστόσο να αναπαράξει τις ιδιαίτερα υψηλές τιμές της παροχής. Η τιμή του δείκτη αποτελεσματικότητας στη συγκεκριμένη θέση ανέρχεται σε 75.4%, ενώ η μεροληψία της μέσης τιμής υπολογίζεται σε -11.1%, που σημαίνει ότι το μοντέλο υποεκτιμά ελαφρά την απορροή. Στην πραγματικότητα, αυτό οφείλεται στην αδυναμία αναπαραγωγής των υψηλών παροχών, για τις οποίες ωστόσο υπάρχει ισχυρή αβεβαιότητα ως προς την εκτίμησή τους, που οφείλεται στην περιορισμένη αξιοπιστία του υδρομετρικού σταθμού (βλ. 3.3.1). Στην αναπαράσταση

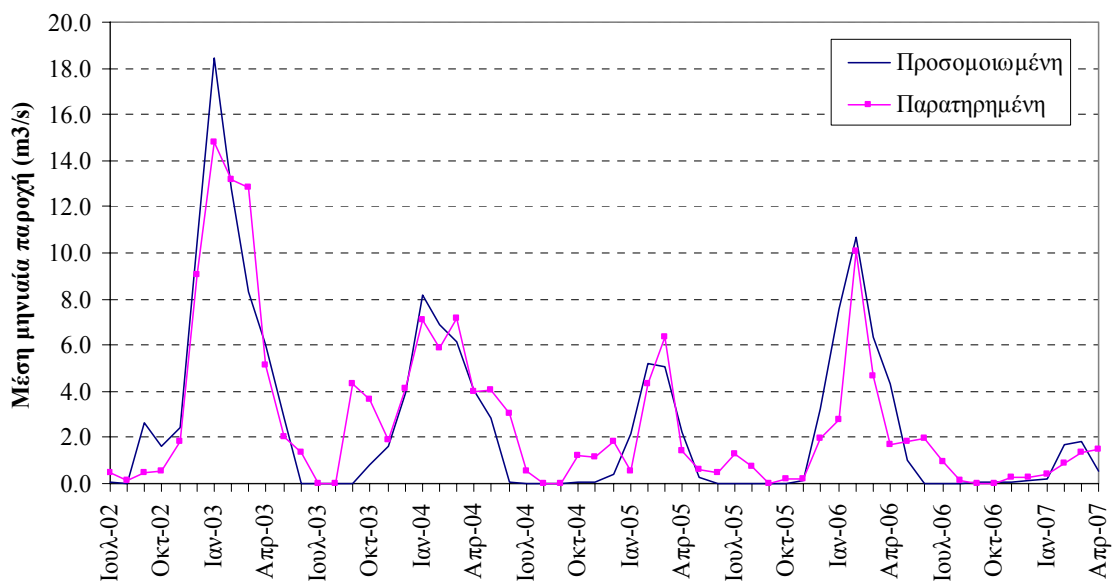
του εν λόγω συστήματος, επιπλέον παράγοντες αβεβαιότητας αποτελούν το καθεστώς υδροφορίας της υπολεκάνης του Σμοκοβίτικου, λόγω της ύπαρξης σημαντικών πηγών που δεν προσομοιώνονται στο μοντέλο, ελλείπει σχετικής υδρογεωλογικής πληροφορίας, αλλά και η πιθανή υποεκτίμηση των κατακρημνισμάτων, κάτι που επιβεβαιώνεται από τους ασυνήθιστα υψηλούς συντελεστές απορροής που έχουν υπολογιστεί για τη συνολική λεκάνη ανάντη του Κέδρου, με βάση το δημοσιευμένο δείγμα παροχών της μελέτης του φράγματος (βλ. 3.3.3).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, στη θέση του φράγματος επιτυγχάνεται η βέλτιστη προσαρμογή του μοντέλου. Η προσαρμογή αυτή είναι καλή τόσο στις υδρομετρήσεις της περιόδου 1972-1977 στον υδρομετρικό σταθμό Λουτροπηγής, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της βαθμονόμησης, όσο και στα πρόσφατα δεδομένα που προέρχονται από την ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου για την περίοδο βαθμονόμησης φτάνει στο 83.8%, ενώ με βάση τα υψηλότερης αξιοπιστίας δεδομένα της περιόδου 2002-2007, φτάνει στο 79.7%.

Τέλος, στην έξοδο της Ξυνιάδας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, επιτυγχάνεται σχετικά ικανοποιητική προσαρμογή του μοντέλου στις μετρήσεις παροχής στον σταθμό Αγγειών, την περίοδο 1972-1982. Ο σχετικός δείκτης αποτελεσματικότητας φτάνει στο 52.7% και κρίνεται ικανοποιητικός, με βάση την ποιότητα των διαθέσιμων στοιχείων.

4.4.4 Επαλήθευση μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμήθηκαν βελτιστοποιώντας το μέτρο επίδοσης που αφορά αποκλειστικά στα δείγματα παροχής των ετών 1960-1982. Για την επιβεβαίωση της προσαρμογής του μοντέλου ελέγχθηκε η επίδοσή του με βάση το πρόσφατο δείγμα μέσης μηνιαίας παροχής στη θέση του φράγματος, η οποία κρίνεται ικανοποιητική, καθώς ο δείκτης αποτελεσματικότητας φτάνει στο 79.7%, ενώ η μεροληψία της μέσης τιμής μόλις το -2.5%. Η σύγκριση των σχετικών χρονοσειρών παροχής, προσομοιωμένων και ιστορικών, γίνεται στο Σχήμα 4.9. Το μοντέλο επιβεβαιώνει με καλή ακρίβεια την εικόνα της τελευταίας πενταετίας, όταν τις σημαντικές εισροές της περιόδου 2002-03 ακολούθησε μια περίοδος μέτριας έως εξαιρετικά χαμηλής υδροφορίας.



Σχήμα 4.9: Προσομοιωμένη και παρατηρημένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής στη θέση του φράγματος Σμοκόβου, για την περίοδο επαλήθευσης (Ιούλιος 2002-Απρίλιος 2007).

4.4.5 Βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων

Στον Πίνακα 4.8 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων των τριών μονάδων υδρολογικής απόκρισης του συστήματος που προέκυψαν από τη διαδικασία βαθμονόμησης. Οι τιμές αυτές είναι εύλογες, με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά που αντιπροσωπεύουν οι εν λόγω μονάδες. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη ποσότητα της απορροής (άμεσης και υποδερμικής) παράγεται από τις ΜΥΑ 1 και 2, στην πρώτη εξαιτίας του πρακτικά αδιαπέρατου υποβάθρου (φλύσχης), σε συνδυασμό με τις ισχυρές κλίσεις, ενώ στη δεύτερη εξαιτίας της χαμηλής βλάστησης, η οποία δεν ευνοεί την κατακράτηση του νερού της βροχής στο έδαφος. Οι δύο ΜΥΑ διαφέρουν ως προς τα χαρακτηριστικά της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας. Η χωρητικότητα της δεξαμενής της ΜΥΑ 1 είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τη ΜΥΑ 2 (336 έναντι 525 mm), γεγονός που ευνοεί την παραγωγή πλημμυρικής απορροής λόγω κορεσμού αλλά και την εξατμοδιαπνοή, χαρακτηριστικό που αιτιολογείται από την ύπαρξη δασικής βλάστησης. Επιπλέον, στη ΜΥΑ 1, η χωρητικότητα του κατώτερου τμήματος (κατώτερη ακόρεστη ζώνη) είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τη ΜΥΑ 2 (84 έναντι 316 mm), καθώς το ριζόστρωμα είναι πολύ πιο βαθύ στις δασικές εκτάσεις σε σχέση με τις περιοχές χαμηλής βλάστησης. Τέλος, και στις δύο ΜΥΑ διατίθεται σημαντική χωρητικότητα κατακράτησης της βροχόπτωσης, προτού αυτή είναι διαθέσιμη για άμεση απορροή, με τη μεγαλύτερη τιμή να αναφέρεται στη ΜΥΑ 1 (130 mm), γεγονός που επίσης αιτιολογείται από τον τύπο της βλάστησης.

Όσον αφορά στη ΜΥΑ 3, που αντιπροσωπεύει τις αρδευόμενες εκτάσεις του οροπεδίου της Ξυνιάδας, το ποσοστό άμεσης απορροής είναι πολύ μικρό, εξαιτίας των πολύ ήπιων κλίσεων που επικρατούν στην εν λόγω περιοχή. Επιπλέον, η χρονική αναρρύθμιση της απορροής γίνεται κυρίως μέσω της βασικής ροής, όπως καταδεικνύει η τιμή του συντελεστή κατείσδυσης (0.317) σε σχέση με την τιμή του συντελεστή παραγωγής υποδερμικής ροής (0.074).

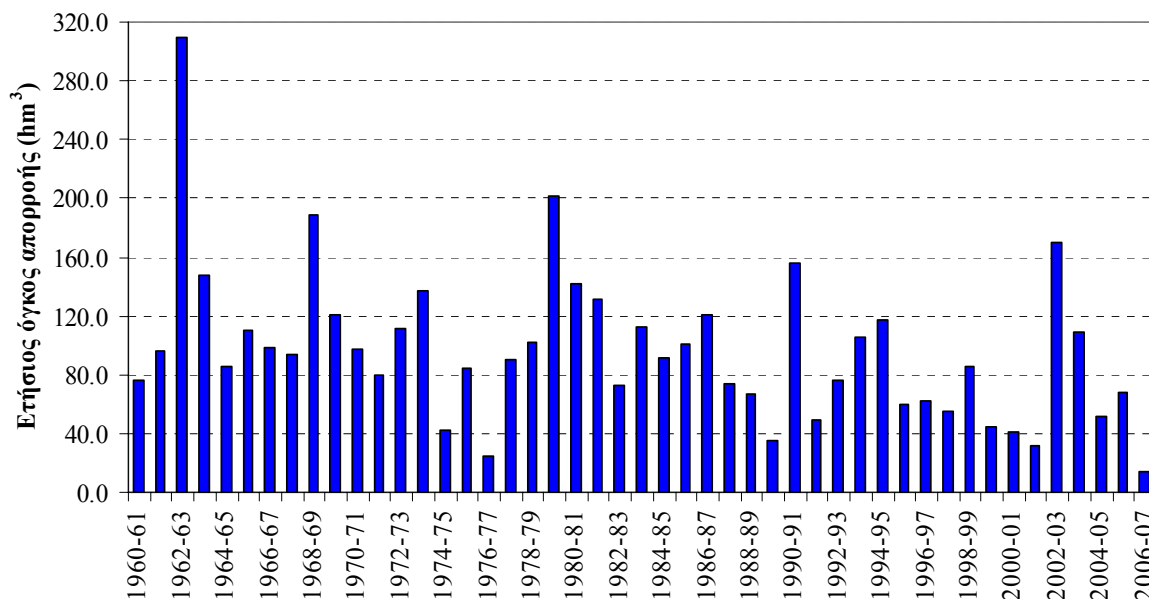
Πίνακας 4.8: Βελτιστοποιημένες παράμετροι μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

| Παράμετρος | ΜΥΑ 1 | ΜΥΑ 2 | ΜΥΑ 3 |
|--|-------|-------|-------|
| Χωρητικότητα κατακράτησης βροχόπτωσης (mm) | 130.5 | 80.8 | 0.8 |
| Ποσοστό περίσσειας βροχόπτωσης που παράγει άμεση απορροή (%) | 7.0 | 12.1 | 1.5 |
| Χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας (mm) | 335.6 | 525.3 | 338.1 |
| Χωρητικότητα κατώτερης ζώνης (mm) | 84.1 | 316.1 | 114.4 |
| Ρυθμός εκφόρτισης για την παραγωγή υποδερμικής ροής | 0.298 | 0.399 | 0.074 |
| Ρυθμός εκφόρτισης για την παραγωγή κατείσδυσης | 0.000 | 0.000 | 0.317 |

4.5 Διερεύνηση αποτελεσμάτων μοντέλου

4.5.1 Ιστορικό δείγμα απορροής υπολεκάνης Σμοκόβου

Κύριο ζητούμενο της προσομοίωσης ήταν η ανακατασκευή του μηνιαίου δείγματος απορροής της υπολεκάνης ανάντη του ταμιευτήρα Σμοκόβου, κατά την περίοδο ελέγχου του μοντέλου (1960-2007). Από την περίοδο αυτή, θεωρείται μειωμένης αξιοπιστίας το δείγμα των υδρολογικών ετών 1995-96 έως 2001-02, επειδή τα σημειακά δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης είναι, ως επί το πλείστον, συμπληρωμένα. Ακόμη, για την τελευταία πενταετία, ελήφθη το δείγμα απορροής που προέρχεται από την ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα, και όχι η προσομοιωμένη απορροή του μοντέλου. Με βάση τα παραπάνω, προέκυψε το τελικό δείγμα απορροής της υπολεκάνης, που σε ετήσια βάση απεικονίζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.10, ενώ τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά του δίνονται στον Πίνακα 4.9. Η μέση ετήσια τιμή του ανέρχεται σε 104.1 hm³, είναι δηλαδή πολύ χαμηλότερη όλων των προηγούμενων εκτιμήσεων.



Σχήμα 4.10: Ετήσια χρονοσειρά απορροής στη θέση του φράγματος Σμοκόβου.

Πίνακας 4.9: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής στη θέση του φράγματος, για την περίοδο 1960-1995 (αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου) και 2002-2007 (εκτίμηση από υδατικό ισοζύγιο ταμιευτήρα) (hm³).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| Μέση τιμή | 3.1 | 7.3 | 14.1 | 18.4 | 19.7 | 18.9 | 12.6 | 7.3 | 2.0 | 0.3 | 0.1 | 0.3 | 104.1 |
| Τυπ. απόκ. | 4.3 | 7.5 | 9.7 | 11.2 | 8.7 | 10.0 | 6.6 | 4.7 | 2.2 | 0.7 | 0.4 | 1.8 | 52.8 |
| Ελάχιστη | 0.0 | 0.2 | 0.7 | 1.1 | 2.1 | 1.9 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 13.9 |
| Μέγιστη | 21.2 | 43.3 | 58.0 | 45.2 | 49.3 | 50.1 | 26.1 | 20.5 | 7.9 | 3.4 | 2.1 | 11.2 | 309.9 |

4.5.2 Υδρολογική διαίτα υπολεκανών ενδιαφέροντος

Στον Πίνακα 4.10 δίνονται, σε μέση ετήσια βάση, τα ύψη βροχόπτωσης, πραγματικής εξατμοδιαπνοής και απορροής των έξι υπολεκανών του συστήματος, καθώς και ο υπερετήσιος συντελεστής απορροής. Οι υπολογισμοί γίνονται με ανάλυση των υδατικών ισοζυγίων κάθε υπολεκάνης, που δίνονται από το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και αφορούν στο σύνολο των υδρολογικών ετών 1960-61 έως 2005-06.

Πίνακας 4.10: Χαρακτηριστικά υδρολογικά μεγέθη υπολεκανών, σε μέση ετήσια κλίμακα.

| Υπολεκάνη | Ύψος βροχής (mm) | Ύψος εξατμοδιαπνοής (mm) | Ύψος απορροής (mm) | Συντελεστής απορροής |
|------------------|------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| Ανάτη Κέδρου | 837.1 | 547.4 | 287.6 | 0.344 |
| Σμοκοβίτικου | 1067.7 | 651.5 | 414.3 | 0.388 |
| Κατάτη φράγματος | 930.5 | 557.2 | 370.6 | 0.398 |
| Ονόχωνου | 891.5 | 591.1 | 297.8 | 0.334 |
| Ρεντινώτικου | 1122.2 | 685.9 | 435.8 | 0.388 |
| Ξυριάδα | 570.7 | 369.9 | 127.1 ^(*) | 0.223 |

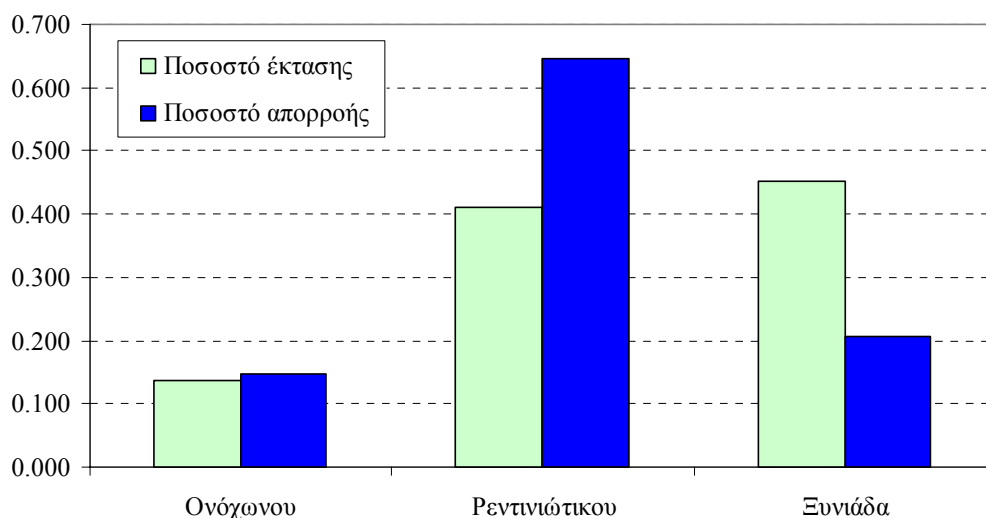
(*) Περιλαμβάνεται η επιφανειακή απορροή και η εκροή των πηγών. Η διαφορά στο υδατικό ισοζύγιο οφείλεται στις αντλήσεις για άρδευση.

Από τα στοιχεία του Πίνακα 4.10 είναι εμφανής η ετερογένεια της υδρολογικής δίαιτας στην περιοχή μελέτης, κυρίως μεταξύ της Ξυνιάδας και των άλλων υπολεκανών του συστήματος. Η πλουσιότερη υδροφορία εμφανίζεται στις υπολεκάνες Σμοκοβίτικου και Ρεντινιώτικου, όπου το μέσο ετήσιο ύψος απορροής ξεπερνά τα 400 mm και ο υπερετήσιος συντελεστής απορροής φτάνει στα επίπεδα του 40%. Οι εν λόγω λεκάνες δέχονται τα μεγαλύτερα ύψη βροχής (πάνω από 1000 mm, σε μέση ετήσια βάση), ενώ οι σχετικά υψηλές, της τάξης του 60%, απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής αιτιολογούνται από την κυριαρχία της δασώδους βλάστησης. Αντίθετα, η υπολεκάνη της Ξυνιάδας χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλότερα ύψη βροχής (570 mm, σε μέση ετήσια βάση) αλλά και πολύ χαμηλότερο συντελεστή απορροής, μόλις 22%, σε μέση ετήσια βάση. Η διαφορά αυτή εξηγεί τη λανθασμένη προσέγγιση των προηγούμενων μελετών, που εξίσωσαν τους συντελεστές απορροής της συνολικής λεκάνης και της υπολεκάνης ανάντη του φράγματος Σμοκόβου, για την αναγωγή του μετρημένου δείγματος απορροής στον υδρομετρικό σταθμό Κέδρου.

Σε σχέση με τη συνολική λεκάνη, ενώ η Ξυνιάδα καλύπτει το 34.7% της έκτασης, συνεισφέρει μόλις το 14.6% της μέσης ετήσιας απορροής του Σοφαδίτη στη θέση Κέδρος. Αντίθετα, η υπολεκάνη του Ρεντινιώτικου, ενώ καταλαμβάνει μόνο το 31.6% της έκτασης, συνεισφέρει το 45.7% της απορροής (Πίνακας 4.11). Θεωρώντας μόνο τη λεκάνη ανάντη του φράγματος, τότε οι υπολεκάνες Ονόχωνου, Ρεντινιώτικου και Ξυνιάδας καλύπτουν το 13.6, 41.2 και 45.2% της έκτασής της, συμμετέχοντας σε ποσοστό 14.6, 64.7 και 20.7% επί των μέσων εισροών του ταμειυτήρα, αντίστοιχα (Σχήμα 4.11).

Πίνακας 4.11: Λόγοι εμβαδών και μέσων ετήσιων όγκων απορροής υπολεκανών.

| Υπολεκάνη | Έκταση (km ²) | Ετήσια απορροή (hm ³) | Ποσοστό έκτασης | Ποσοστό απορροής |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------|------------------|
| Ανάντη Κέδρου | 29.9 | 8.6 | 0.061 | 0.058 |
| Σμοκοβίτικου | 80.3 | 33.3 | 0.163 | 0.225 |
| Κατάντη φράγματος | 4.3 | 1.6 | 0.009 | 0.011 |
| Ονόχωνου | 51.3 | 15.3 | 0.104 | 0.103 |
| Ρεντινιώτικου | 155.3 | 67.7 | 0.316 | 0.457 |
| Ξυνιάδα | 170.7 | 21.7 | 0.347 | 0.146 |
| Σύνολο | 491.8 | 148.1 | 1.000 | 1.000 |



Σχήμα 4.11: Σύγκριση ποσοστών έκτασης και μέσης ετήσιας απορροής υπολεκανών τροφοδοσίας ταμειυτήρα Σμοκόβου.

5 Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης ταμιευτήρα με εφαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται εναλλακτικές πολιτικές διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου, με βάση διάφορα σενάρια ανάπτυξης των αρδευτικών και υδρευτικών έργων. Αρχικά, περιγράφεται, συνοπτικά, το μεθοδολογικό υπόβαθρο του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα και των συναφών έργων. Στη συνέχεια εξηγούνται οι παραδοχές και η διαδικασία σχηματοποίησης του μαθηματικού μοντέλου του υδροσυστήματος και η εκτίμηση των δεδομένων εισόδου του, μεταξύ των οποίων οι συνθετικές χρονοσειρές εισροών· οι τελευταίες παρήχθησαν με εφαρμογή του λογισμικού ΚΑΣΤΑΛΙΑ, με τρόπο ώστε να αναπαράγουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων ιστορικών δειγμάτων. Ειδικότερα, όσον αφορά στην απορροή του ταμιευτήρα, που αποτελεί και τη μείζονα συνιστώσα εισροών, αξιοποιούνται τα στοιχεία που προέκυψαν από τις υδρολογικές αναλύσεις του Κεφαλαίου 4, οι οποίες οδήγησαν σε σημαντικά μειωμένες εκτιμήσεις εισροών, σε σύγκριση με προηγούμενες μελέτες. Τέλος, περιγράφονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν στα πλαίσια των διαφόρων σεναρίων ανάπτυξης του υδροσυστήματος, και προτείνονται αντίστοιχες διαχειριστικές πολιτικές.

5.1 Το μοντέλο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ

5.1.1 Γενικά

Ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ είναι ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, που ενσωματώνει ένα εξελιγμένο μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης συστημάτων υδατικών πόρων, που έχει αναπτυχθεί στο ΕΜΠ σε διάφορες εκδοχές. Η τελευταία έκδοση του λογισμικού, το θεωρητικό υπόβαθρο του οποίου παρουσιάζεται από τους Ευστρατιάδη κ.ά. (2007· βλ. και Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997· Koutsoyiannis *et al.*, 2002· Koutsoyiannis and Economou, 2003· Koutsoyiannis *et al.*, 2003· Efstratiadis *et al.*, 2004), αποτελεί το κεντρικό διαχειριστικό εργαλείο του υπολογιστικού συστήματος που παραδίδεται στα πλαίσια του έργου.

Το μαθηματικό μοντέλο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ αποσκοπεί σε μια ρεαλιστική αναπαράσταση τόσο των φυσικών (υδρολογικών και υδραυλικών) διεργασιών των υδροσυστημάτων όσο και των πρακτικών διαχείρισης σε αυτά. Το μοντέλο προσομοίωσης εξασφαλίζει την αυστηρή τήρηση των φυσικών περιορισμών και την ιεραρχική τήρηση των στόχων και λειτουργικών περιορισμών, σε αρμονία με τη διαχειριστική πολιτική που επιλέγεται και τη σειρά προτεραιότητας που ορίζει ο χρήστης. Επιπλέον, η κατανομή των απολήψεων στο δίκτυο ακολουθεί την οικονομικότερη διαδρομή, ελαχιστοποιώντας τα πάγια και μεταβλητά κόστη των έργων σύλληψης και μεταφοράς (υδραγωγεία, αντλιοστάσια, γεωτρήσεις), όπως εξάλλου συμβαίνει στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Τα παραπάνω επιτυγχάνονται χωρίς υπερσύνθετη περιγραφή των διεργασιών, χωρίς υπερπληθείς και ασαφείς παραμέτρους και χωρίς υπερβολικές απαιτήσεις σε δεδομένα.

Η κεντρική ιδέα του μοντέλου βασίζεται στο μεθοδολογικό σχήμα -προσομοίωση-βελτιστοποίηση. Η παραμετροποίηση αφορά στη μαθηματική διατύπωση των κανόνων λειτουργίας των συνιστωσών του υδροσυστήματος, μέσω των οποίων ελέγχεται η πολιτική διαχείρισης των υδατικών του πόρων, επιφανειακών και υπόγειων. Στην προσομοίωση υιοθετείται μια στοχαστική προσέγγιση, με χρήση

συνθετικών σεναρίων εισροών, που επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας και του ρίσκου στη λήψη των αποφάσεων. Τέλος, η βελτιστοποίηση αφορά στην επιλογή της πλέον πρόσφορης διαχειριστικής πολιτικής, με βάση κριτήρια αξιοπιστίας και οικονομικότητας. Ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, στην παρούσα ή προηγούμενες εκδοχές του, έχει εφαρμοστεί σε σημαντικά υδροσυστήματα του ελληνικού χώρου, μεταξύ άλλων το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας.

5.1.2 Αναπαράσταση υδροσυστήματος και δεδομένα εισόδου

Στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ παρέχεται η δυνατότητα περιγραφής των σημαντικών φυσικών και τεχνητών συνιστωσών ενός υδροσυστήματος, χωρίς περιορισμούς στην κλίμακα των έργων και τη γενική τους διάταξη. Οι συνιστώσες που υποστηρίζει το μοντέλο είναι:

- κόμβοι, που είναι στοιχεία χωρίς αποθηκευτική ικανότητα και αντιστοιχούν σε σημεία ζήτησης νερού ή αλλαγής της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών μεγεθών του δικτύου·
- κόμβοι εισροής, που είναι ειδικοί τύποι κόμβων με δεδομένη προσφορά νερού·
- ταμιευτήρες, που είναι ειδικοί τύποι κόμβων, με δυνατότητα αποθήκευσης επιφανειακών υδατικών πόρων·
- γεωτρήσεις, που είναι ειδικοί τύποι κόμβων, με δυνατότητα άντλησης νερού από υπόγειους υδροφορείς·
- υδατορεύματα, που είναι φυσικοί αγωγοί, χωρίς περιορισμό παροχαρακτηριστικότητας·
- υδραγωγεία, που είναι τεχνητοί αγωγοί νερού, πεπερασμένης παροχαρακτηριστικότητας·
- στρόβιλοι, που είναι ειδικοί τύποι υδραγωγείων, κατά μήκος των οποίων παράγεται ενέργεια·
- αντλιοστάσια, που είναι ειδικοί τύποι υδραγωγείων, κατά μήκος των οποίων καταναλώνεται ενέργεια.

Τα δεδομένα εισόδου ενός διαχειριστικού σεναρίου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στατικά και δυναμικά. Έχοντας καταλήξει σε μια σχηματοποίηση του υδροσυστήματος, τα πρώτα αναφέρονται στα χαρακτηριστικά μεγέθη των τεχνικών έργων, τους στόχους και λειτουργικούς περιορισμούς και ορισμένες οικονομικές παραμέτρους της διαχείρισης. Πρόκειται για πραγματικές πληροφορίες, τις οποίες διαχειρίζεται και το λογισμικό ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ, οπότε είναι δυνατό να ανακτηθούν από την κεντρική βάση δεδομένων ΥΔΡΙΑ.

Όσον αφορά στα δυναμικά δεδομένα, αυτά αναφέρονται σε χρονοσειρές εισροών και απωλειών σε ταμιευτήρες ή κόμβους του υδρογραφικού δικτύου. Οι εν λόγω χρονοσειρές μπορεί να είναι ιστορικές ή συνθετικές, με τη δεύτερη κατηγορία να ενδείκνυται όταν είναι επιθυμητή η ακριβής αποτίμηση των πιθανοτικών μεγεθών του συστήματος, ιδιαίτερα όταν τα τελευταία αναφέρονται σε ακραία επίπεδα αξιοπιστίας. Επιπλέον, όταν το σύστημα λειτουργεί ως εργαλείο πρόγνωσης, πρέπει αναγκαστικά να χρησιμοποιήσει σενάρια υδρολογικών εισροών που διατηρούν την ίδια στατιστική δομή. Τα εν λόγω σενάρια παράγονται από το λογισμικό ΚΑΣΤΑΛΙΑ, το μαθηματικό υπόβαθρο της οποίας εξηγείται συνοπτικά στο εδάφιο 5.1.7.

5.1.3 Στόχοι και περιορισμοί

Στην κατεύθυνση της ολιστικής προσέγγισης παρέχεται μια πληθώρα επιλογών σχετικά με χρήσεις νερού και λειτουργικούς περιορισμούς, που εισάγονται στις συνιστώσες του υδροσυστήματος με τη μορφή επιθυμητών ορίων σε μεταβλητές, από τις ακόλουθες κατηγορίες:

- επιθυμητή απόληψη νερού για άρδευση, ύδρευση ή άλλη χρήση, που αναφέρεται σε κόμβο ή ταμιευτήρα·
- αποφυγή απωλειών νερού λόγω υπερχειλίσεως, που αναφέρεται σε ταμιευτήρα·
- διατήρηση του αποθέματος ταμιευτήρα μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης επιθυμητής τιμής·

- διατήρηση παροχής μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης επιθυμητής τιμής, που αναφέρονται σε υδραγωγείο ή υδατόρευμα·
- παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας σε στρόβιλο.

Οι στόχοι (και περιορισμοί) που ορίζει ο χρήστης ενδέχεται να είναι ανταγωνιστικοί μεταξύ τους και για το λόγο αυτό εντάσσονται σε ένα ιεραρχικό σύστημα προτεραιοτήτων, αποτελούμενο από διάφορα επίπεδα. Το μαθηματικό μοντέλο επιδιώκει την ικανοποίηση των στόχων ακολουθώντας την προκαθορισμένη σειρά προτεραιότητας. Δύο ή περισσότεροι στόχοι μπορούν να ενταχθούν στο ίδιο επίπεδο, οπότε αντιμετωπίζονται από το μοντέλο κατανομής με την ίδια ιεραρχία.

5.1.4 Διαδικασίες προσομοίωσης και βελτιστοποίησης

Το μοντέλο προσομοίωσης αποσκοπεί σε μια ρεαλιστική αναπαράσταση των φυσικών (υδρολογικών και υδραυλικών) διεργασιών των υδροσυστημάτων καθώς και των πρακτικών διαχείρισης σε αυτά. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα εισαγωγής βαθμών ελευθερίας, με τη θεώρηση μιας πληθώρας πτυχών της διαχείρισης ως άγνωστες παραμέτρους, που εκτιμώνται μέσω βελτιστοποίησης. Οι πτυχές αυτές αναφέρονται σε γενικούς κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων και γεωτρήσεων, που έχουν καθορισμένη δομή, καθώς και σε λειτουργικούς περιορισμούς με άγνωστες τιμές ορίων, που εισάγονται ως επιπλέον συνιστώσες της διαχειριστικής πολιτικής.

Στον ΥΔΡΟΝΟΝΕΑ διαμορφώνεται ένα σχήμα δύο επιπέδων βελτιστοποίησης, μιας εξωτερικής, που είναι μη γραμμική ως προς τις παραμέτρους των κανόνων λειτουργίας, και μιας εσωτερικής, που είναι γραμμική ως προς τις βήμα-προς-βήμα αποφάσεις που αφορούν στην κατανομή των εκροών στο υδροσύστημα. Στη χρονική κλίμακα της προσομοίωσης (μήνας), το μοντέλο βελτιστοποιεί το κόστος μεταφοράς νερού στο δίκτυο (κόστος λειτουργίας υδραγωγείων, γεωτρήσεων και αντλιοστασίων), τηρώντας αυστηρά του φυσικούς περιορισμούς (εξισώσεις συνέχειας, περιορισμοί χωρητικότητας, κλπ.), επιδιώκοντας να ικανοποιήσει τους επίκαιρους στόχους και λειτουργικούς περιορισμούς, με την προκαθορισμένη σειρά προτεραιότητας, και ταυτόχρονα να αποκλίνει όσο το δυνατό λιγότερο από τα επιθυμητά μεγέθη εκροών που επιβάλλουν οι δεδομένοι κανόνες λειτουργίας. Οι παραπάνω απαιτήσεις διατυπώνονται ως πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, που με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων εξασφαλίζει πλήρη ακρίβεια αλλά και μεγάλη ταχύτητα στους υπολογισμούς. Συνοπτική περιγραφή της υπολογιστικής διαδικασίας δίνεται στο εδάφιο 5.1.5.

Τέλος, οι παράμετροι των κανόνων λειτουργίας του υδροσυστήματος εκτιμώνται, για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα μελέτης, μέσω μιας διαδικασίας μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ως προς ένα καθολικό μέτρο επίδοσης που ορίζει ο χρήστης. Το μέτρο αυτό περιλαμβάνει κριτήρια όπως η μέση ετήσια κατανάλωση νερού σε επιλεγμένους κόμβους και ταμιευτήρες, η μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας επιλεγμένων στόχων και περιορισμών, η μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας, κτλ.

5.1.5 Μοντέλο βέλτιστης κατανομής υδατικών πόρων

Αφού η διαχείριση του υδροσυστήματος πραγματοποιείται βάσει γνωστών κανόνων λειτουργίας και προτεραιοτήτων των χρήσεων νερού, οι αποφάσεις κάθε χρονικού βήματος μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητες από τις αποφάσεις των προηγούμενων και επόμενων βημάτων. Συνεπώς, η προσομοίωση υλοποιείται ως μια σειριακή διαδικασία λήψης αποφάσεων, όσον αφορά στις εκροές από επιφανειακά και υπόγεια νερά και την κατανομή τους στο δίκτυο των υδραγωγείων.

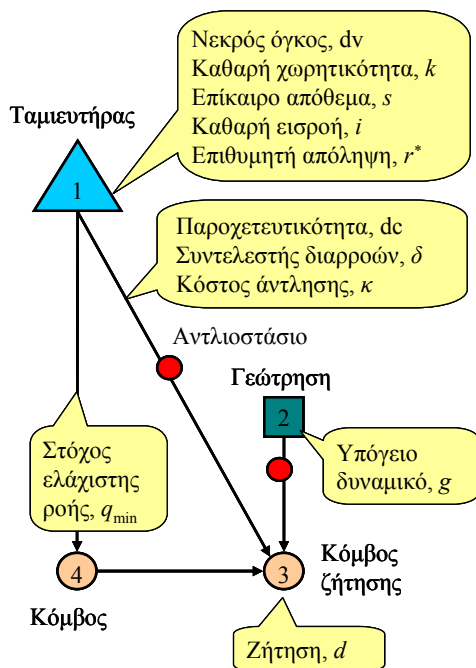
Υποθέτοντας ότι οι εισροές είναι γνωστές (π.χ. μέσω στοχαστικής πρόγνωσης), τότε μπορούν να υπολογιστούν, συναρτήσει των κανόνων λειτουργίας, οι επιθυμητές απολήψεις από τους ταμιευτήρες και τις γεωτρήσεις. Ωστόσο, σε ένα σχετικά σύνθετο σύστημα, εξαιτίας της ύπαρξης πληθώρας βαθμών ελευθερίας, η γνώση των επιθυμητών μεγεθών, δεν επαρκεί για τον προσδιορισμό όλων των

μεταβλητών απόφασης του συστήματος, δηλαδή των πραγματικών απολήψεων και της κατανομής τους στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει όταν ισχύει μία τουλάχιστον από τις ακόλουθες συνθήκες

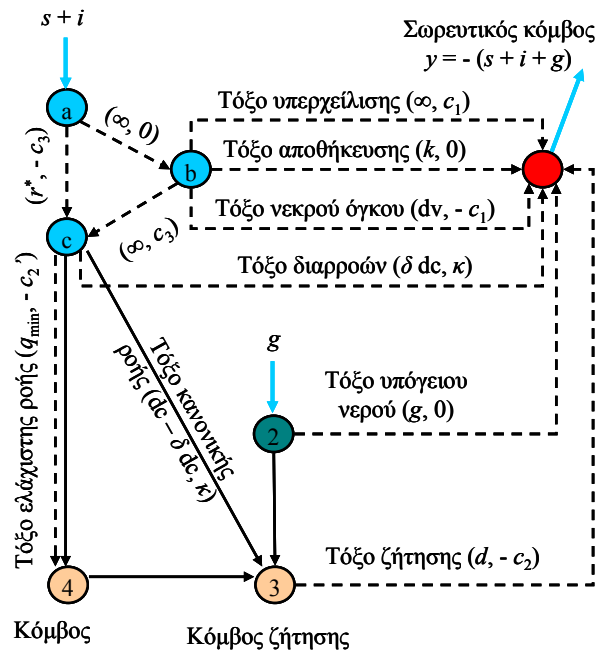
- οι επιθυμητές απολήψεις δεν μπορούν να διοχετευτούν κατάντη εξαιτίας της περιορισμένης παροχτευτικότητας του δικτύου·
- ο τρόπος μεταφοράς των απολήψεων από τις πηγές στην κατανάλωση δεν είναι μονοσήμαντος, αλλά προκύπτουν εναλλακτικές διαδρομές νερού και, μάλιστα, με διαφορετικό κόστος·
- πολλαπλοί και αντικρουόμενοι στόχοι πρέπει να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα·
- η συνολική ζήτηση νερού είναι μεγαλύτερη από την συνολική προσφορά του συστήματος.

Συνεπώς, προκύπτει ένα σύνθετο πρόβλημα κατανομής, για το οποίο τίθενται οι εξής απαιτήσεις:

- αυστηρή ικανοποίηση το συνόλου των φυσικών περιορισμών του υδροσυστήματος·
- ικανοποίηση των λειτουργικών περιορισμών σύμφωνα με την σειρά προτεραιότητας που έχει οριστεί, εφόσον βεβαίως δεν παραβιάζονται οι φυσικοί περιορισμοί·
- ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ πραγματικών και επιθυμητών απολήψεων, ώστε να τηρείται όσο το δυνατόν πιστότερα η πολιτική διαχείρισης που επιβάλλουν οι κανόνες λειτουργίας·
- ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των υδατικών πόρων κατά μήκος του δικτύου των υδραγωγείων, γεωτρήσεων και αντλιοστασίων.



Συνιστώσες πραγματικού συστήματος



Συνιστώσες μοντέλου διγράφου

Σχήμα 5.1: Παράδειγμα μετασχηματισμού των συνιστωσών ενός υδροσυστήματος σε συνιστώσες του μοντέλου διγράφου. Ο κόμβος 0 είναι ο σωρευτικός, ενώ οι κόμβοι a, b, c προσομοιάζουν την λειτουργία του ταμιευτήρα. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν πραγματικά υδραγωγεία, ενώ οι διακεκομμένες αντιπροσωπεύουν εικονικούς κλάδους που αναφέρονται στους σχετικούς περιορισμούς. Στην παρένθεση ορίζονται η παροχτευτικότητα και το μοναδιαίο κόστος κάθε κλάδου.

Οι παραπάνω απαιτήσεις ανάγονται σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, με μεταβλητές ελέγχου το σύνολο των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου, για το σύνολο των συνιστωσών του υδροσυστήματος. Κάθε μεταβλητή αντιστοιχεί σε μια πραγματική ή εικονική ροή που μεταφέρεται μέσω ενός, αντίστοιχα, πραγματικού ή εικονικού κλάδου. Οι κλάδοι αναφέρονται σε ένα εννοιολογικό μοντέλο δικτύου, που διαμορφώνεται με μετασχηματισμό του πραγματικού υδροσυστήματος σε ένα

μοντέλο κόμβων και κλάδων (διγράφος). Στο Σχήμα 5.1 δίνεται ένα τέτοιο παράδειγμα, που αφορά σε ένα υποθετικό σύστημα τεσσάρων κόμβων και τεσσάρων υδραγωγείων. Ο κόμβος 1 αντιστοιχεί σε ταμιευτήρα, ο κόμβος 2 σε γεώτρηση, ο κόμβος 3 σε θέση ζήτησης και ο κόμβος 4 σε θέση αλλαγής της γεωμετρίας. Κατάντη του ταμιευτήρα επιβάλλεται, με τη μορφή λειτουργικού περιορισμού, η διατήρησης μιας ελάχιστης παροχής στο αντίστοιχο υδραγωγείο. Στο παράδειγμα, οι πραγματικές διαδρομές νερού απεικονίζονται με συνεχή γραμμή, και οι εικονικές με διακεκομμένη.

Η σχηματοποίηση κάθε συνιστώσας του υδροσυστήματος έχει ως εξής:

Οι κόμβοι του δικτύου των υδατορευμάτων και υδραγωγείων θεωρούνται χωριστές οντότητες, καθώς στους πρώτους υπάρχει η δυνατότητα εισόδου απορροής, ενώ στους δεύτερους όχι. Οι κατάντη κόμβοι των υδατορευμάτων, καθώς και οι κατάντη κόμβοι των υδραγωγείων για τους οποίους επιτρέπεται η μεταφορά νερού εκτός του υδροσυστήματος, συνδέονται με τον σωρευτικό κόμβο με έναν εικονικό κλάδο, που αναπαριστά την εκροή του πλεονάζοντος νερού από το υδροσύστημα.

Οι ταμιευτήρες αποτελούν την πλέον σύνθετη συνιστώσα, καθώς η λειτουργία τους αναπαρίσταται από τρεις κόμβους και, στη γενική περίπτωση, οκτώ κλάδους. Οι τρεις κόμβοι υλοποιούν την προσφορά, αποθήκευση και απόληψη νερού. Στο παράδειγμα του Σχήματος 5.1, οι εν λόγω κόμβοι συμβολίζονται με a, b και c, αντίστοιχα. Ως προσφορά νερού νοείται το διαθέσιμο επιφανειακό υδατικό δυναμικό για αποθήκευση και απόληψη, που εκτιμάται προσθέτοντας στο τρέχον απόθεμα τις καθαρές υδρολογικές εισροές. Η διαδρομή a-c αναπαριστά την απόληψη με σκοπό την ικανοποίηση του κανόνα λειτουργίας, οπότε η χωρητικότητα του κλάδου τίθεται ίση με την επιθυμητή απόληψη που ορίζει ο κανόνας, ενώ το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς είναι αρνητικό, ώστε να «αναγκαστεί» το μοντέλο να υλοποιήσει τη συγκεκριμένη απόληψη. Η διαδρομή a-b αναπαριστά τη δυνητική αποθήκευση νερού, και έχει απεριόριστη παροχεταιυτικότητα και μηδενικό μοναδιαίο κόστος. Τέλος, η διαδρομή b-c αναπαριστά τη μεταφορά πλεονάζουσας απόληψης, πέραν της τιμής-στόχου του κανόνα λειτουργίας. Αυτή είναι αναγκαία όταν οι φυσικοί και λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου δεν επιτρέπουν την ικανοποίηση των στόχων, με την πραγματοποίηση απολήψεων ακριβώς ίσων με τις επιθυμητές. Για το λόγο αυτό, στον σχετικό κλάδο τίθεται ένα θετικό μοναδιαίο κόστος μεταφοράς, που εμποδίζει την παραβίαση του κανόνα λειτουργίας, όταν αυτό δεν είναι αναγκαίο. Οι υπόλοιποι κλάδοι συνδέουν τον κόμβο b με τον σωρευτικό κόμβο και αναπαριστούν μεταβλητές αποθήκευσης μεταξύ διαφόρων ορίων αποθέματος. Συγκεκριμένα::

- αποθήκευση μέχρι τη στάθμη του νεκρού όγκου·
- επιθυμητή αποθήκευση μεταξύ του νεκρού όγκου και της ελάχιστης τιμής που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός αποθέματος·
- επιτρεπόμενη αποθήκευση μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που επιβάλλουν οι σχετικοί περιορισμοί αποθέματος·
- πλεονάζουσα αποθήκευση μεταξύ της μέγιστης τιμής που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός αποθέματος και της μικτής χωρητικότητας του ταμιευτήρα·
- υπερχειλίση.

Τα κόστη των κλάδων νεκρού όγκου και επιθυμητής αποθήκευσης είναι αρνητικά, με το πρώτο να είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερο, αφού αναφέρεται σε φυσικό περιορισμό. Το κόστος του κλάδου επιτρεπόμενης αποθήκευσης είναι μηδενικό, καθώς θεωρείται αδιάφορο αν οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι αποθηκευτούν ή όχι στον ταμιευτήρα. Το κόστος του κλάδου πλεονάζουσας αποθήκευσης είναι θετικό, ώστε να εμποδίσει την παραβίαση του σχετικού περιορισμού αποθέματος. Τέλος, το κόστος του κλάδου υπερχειλίσης είναι θετικό και ίσο, κατ' απόλυτη τιμή, με αυτό του κλάδου νεκρού όγκου, ώστε η υπερχειλίση να πραγματοποιείται μόνο στην περίπτωση εξάντλησης της χωρητικότητας τόσο του συγκεκριμένου ταμιευτήρα όσο και του κατάντη συστήματος.

Οι γεωτρήσεις αναπαρίστανται ως κόμβοι προσφοράς νερού, των οποίων η εισροή είναι ίση με την αντίστοιχη δυναμικότητα. Κάθε γεώτρηση συνδέεται, μέσω δύο εικονικών κλάδων, με τον κόμβο του δικτύου που τροφοδοτεί και τον σωρευτικό κόμβο. Οι δύο κλάδοι έχουν κοινή παροχετευτικότητα, ίση με την εισροή. Η παροχή του πρώτου αντιστοιχεί στην ποσότητα νερού που αντλείται, ενώ του δεύτερου αντιστοιχεί την περίσσεια της προσφοράς υπόγειου νερού που αποθηκεύεται στον υδροφορέα. Το μοναδιαίο κόστος του κλάδου άντλησης εξαρτάται από τις τιμές των παραμετρικών ορίων λειτουργίας της γεώτρησης και των επίκαιρων αποθεμάτων των ταμιευτήρων σε σχέση με την ολική τους χωρητικότητα. Αν το ποσοστό πλήρωσης των ταμιευτήρων είναι μικρότερο από το κάτω όριο, τότε η γεώτρηση ενεργοποιείται κατά προτεραιότητα, και συνεπώς το κόστος είναι αρνητικό. Αν το ποσοστό πλήρωσης ξεπερνά το άνω όριο, τότε τίθεται ένα μεγάλο θετικό κόστος, ώστε να εμποδιστεί η χρήση της γεώτρησης. Τέλος, σε ενδιάμεσες τιμές του ποσοστού πλήρωσης το κόστος τίθεται ίσο με το πραγματικό μοναδιαίο κόστος άντλησης, όπως εκτιμάται με βάση την τιμή μονάδας καταναλισκόμενης ενέργειας. Όσον αφορά στο κόστος του κλάδου υπόγειας αποθήκευσης, αυτό είναι μηδενικό, καθώς θεωρείται αδιάφορο αν οι διαθέσιμοι πόροι παραμείνουν ή όχι στον υδροφορέα.

Τα υδατορεύματα και υδραγωγεία αναπαρίστανται από τους κλάδους που συνδέουν τους αντίστοιχους ανάντη και κατόντη κόμβους. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των εν λόγω κλάδων (παροχετευτικότητα, μοναδιαίο κόστος) ταυτίζονται με τα πραγματικά. Επισημαίνεται ότι στα υδατορεύματα, όπου δεν υπάρχει η έννοια της παροχετευτικότητας, θεωρείται η συμβατική τιμή παροχής που είναι μαθηματικά ισοδύναμη της άπειρης. Επιπλέον, το μοναδιαίο κόστος λαμβάνει μια πολύ μικρή αρνητική τιμή, καθώς οι επιφανειακές απορροές μεταφέρονται κατά προτεραιότητα στο υδρογραφικό δίκτυο παρά στο δίκτυο των υδραγωγείων.

Στη γενικότερη περίπτωση ύπαρξης απωλειών λόγω διηθήσεων ή διαρροών, καθώς και περιορισμών ελάχιστης και μέγιστης ροής, δημιουργούνται τέσσερις κλάδοι. Συγκεκριμένα::

- κλάδοι που συνδέουν τον ανάντη κόμβο με τον σωρευτικό κόμβο, και αναπαριστούν τη μεταφορά των διηθήσεων και διαρροών από υδατορεύματα και υδραγωγεία, αντίστοιχα·
- κλάδοι που αναπαριστούν την πραγματική διαδρομή, μεταφέροντας την επιτρεπόμενη παροχή μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που επιβάλλουν οι περιορισμοί ελέγχου της ροής·
- κλάδοι που δημιουργούνται παράλληλα στην πραγματική διαδρομή και μεταφέρουν την επιθυμητή παροχή μέχρι την τιμή που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός ελάχιστης ροής, με αρνητικό μοναδιαίο κόστος·
- κλάδοι που δημιουργούνται παράλληλα στην πραγματική διαδρομή και μεταφέρουν την πλεονάζουσα παροχή μεταξύ της τιμής που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός μέγιστης ροής και της παροχετευτικότητας, με θετικό μοναδιαίο κόστος.

Οι στρόβιλοι στους οποίους έχει οριστεί στόχος παραγωγής ενέργειας, αναπαρίστανται από δύο παράλληλους κλάδους. Ο πρώτος έχει αρνητικό κόστος, ώστε να μεταφέρει την απαιτούμενη παροχή για την ικανοποίηση του στόχου, ενώ ο δεύτερος μεταφέρει χωρίς κόστος την πλεονάζουσα παροχή, μέχρι εξάντλησης της παροχετευτικότητας του στρόβιλου.

Τα αντλιοστάσια αναπαρίστανται ως κλάδοι, παροχετευτικότητας ίσης με αυτή του αντλιοστασίου, για το επίκαιρο ύψος πτώσης, και κόστους ίσου με το μοναδιαίο κόστος άντλησης. Το τελευταίο είναι συνάρτηση του ύψους πτώσης, της ειδικής ενέργειας και της τιμής της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Σε κόμβους και ταμιευτήρες όπου ορίζονται στόχοι κατανάλωσης δημιουργούνται εικονικοί κλάδοι που συνδέουν τις θέσεις ζήτησης με τον σωρευτικό κόμβο του διγράφου. Η παροχετευτικότητα κάθε τέτοιου κλάδου είναι ίση με την επίκαιρη ζήτηση, ενώ το μοναδιαίο κόστος του είναι αρνητικό, ώστε να επιβάλει την πραγματοποίηση απολήψεων για την ικανοποίηση του εν λόγω στόχου. Τέλος, στην περίπτωση που μέρος της κατανάλωσης επιστρέφει στο δίκτυο, τότε δημιουργείται μία ακόμη διαδρομή, που συνδέει τη θέση ζήτησης με τον κόμβο επιστροφής.

Στην αρχή της προσομοίωσης, δημιουργείται αυτόματα το μετασχηματισμένο δίκτυο, ήτοι το μοντέλο διγράφου, και ορίζονται οι σταθερές του ιδιότητες, ήτοι τα μοναδιαία κόστη των κλάδων. Αντίθετα, οι χωρητικότητες των κλάδων μεταβάλλονται δυναμικά, καθώς οι περισσότερες εξαρτώνται από τις τρέχουσες συνθήκες του συστήματος (π.χ. επιθυμητές απολήψεις, παροχτευτικότητα, τιμές στόχων και περιορισμών). Ο υπολογισμός των τιμών μοναδιαίου κόστους βασίζεται σε μια ειδική αναδρομική διαδικασία, μέσω της οποίας εξασφαλίζεται η τήρηση των απαιτήσεων που αναφέρθηκαν στην αρχή του εδαφίου.

5.1.6 Τύποι προσομοίωσης

Οι υδρολογικές εισροές στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ δίνονται με τη μορφή υδρολογικών σεναρίων, που γεννώνται μέσω στοχαστικής προσομοίωσης. Το μοντέλο υποστηρίζει δύο τύπους προσομοίωσης, ήτοι της *μόνιμης κατάστασης* και την *καταληκτική*. Η πρώτη αναφέρεται σε προβλήματα εκτίμησης των μακροχρόνιων μεγεθών ενός υδροσυστήματος (π.χ. ασφαλές απολήψιμο δυναμικό), υποθέτοντας αμετάβλητες συνθήκες, όσον αφορά στα χαρακτηριστικά των έργων και τη ζήτηση. Στην περίπτωση αυτή, αναπαρίσταται η λειτουργία του συστήματος με είσοδο συνθετικές υδρολογικές χρονοσειρές πολύ μεγάλου μήκους (της τάξης των χιλιάδων ετών), ενώ από την επεξεργασία των χρονοσειρών εξόδου (π.χ. απολήψεις) εκτιμάται η μακροχρόνια αξιοπιστία ως προς την ικανοποίηση των διαφόρων στόχων και περιορισμών.

Από την άλλη πλευρά, η καταληκτική προσομοίωση εφαρμόζεται με γνωστές τις αρχικές συνθήκες (π.χ. αποθέματα ταμιευτήρων) του υδροσυστήματος, του οποίου αποτιμάται η βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη επίδοση συναρτήσει των εν λόγω συνθηκών. Στην περίπτωση αυτή, οι συνθήκες του υδροσυστήματος μπορούν να μεταβάλλονται διαχρονικά, ενώ η αναπαράσταση της λειτουργίας του γίνεται θεωρώντας πολλαπλά σενάρια στοχαστικής πρόγνωσης των εισροών, μικρού σχετικά μήκους (π.χ. της τάξης των λίγων ετών), που είναι στατιστικά εξαρτώμενα από τις τρέχουσες και παρελθούσες τιμές των εισροών.

5.1.7 Γέννηση σεναρίων στοχαστικής προσομοίωσης

Για την παραγωγή των συνθετικών εισροών, είτε με τη μορφή μεμονωμένων χρονοσειρών μεγάλου μήκους είτε με τη μορφή σεναρίων πρόγνωσης, χρησιμοποιείται το μοντέλο ΚΑΣΤΑΛΙΑ, που έχει επίσης αναπτυχθεί στο ΕΜΠ, σε διάφορες εκδόσεις. Η τελευταία είναι ενσωματωμένη στο λογισμικό ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ, ως πρόσθετο των εξειδικευμένων υδρολογικών επεξεργασιών (Ευστρατιάδης κ.ά., 2005).

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 αιτίου-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 στη χαμηλότερη χρονική κλίμακα. Αρχικά, εισάγεται μια θεωρητική συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς των ετήσιων διεργασιών, που δίνεται από τη σχέση (Koutsoyiannis, 2000):

$$\gamma_j = \gamma_0 [1 + \kappa \beta j]^{-1/\beta} \quad (5.1)$$

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:

$$Z_i = \sum_{j=-s}^s \alpha_{|j|} V_{i+j} = \alpha_s V_{i-s} + \dots + \alpha_1 V_{i-1} + \alpha_0 V_i + \alpha_1 V_{i+1} + \dots + \alpha_s V_{i+s} \quad (5.2)$$

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 αντίστοιχα στατιστικά χαρακτηριστικά του ιστορικού δείγματος (Koutsoyiannis, 2000). Σε πρώτη φάση, παράγονται οι τυχαίες μεταβλητές $V_i^{(k)}$ (όπου ο δείκτης k αναφέρεται στην αντίστοιχη στοχαστική διεργασία) βάσει ενός πολυμεταβλητού σχήματος της μορφής:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{b} \mathbf{W}_i \quad (5.3)$$

Για την περίπτωση δύο μεταβλητών, η παραπάνω μητρική σχέση γράφεται:

$$\begin{bmatrix} V_i^{(1)} \\ V_i^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b^{(1,1)} & b^{(1,2)} \\ b^{(2,1)} & b^{(2,2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_i^{(1)} \\ W_i^{(2)} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

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 το μοντέλο (5.2) 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:

$$\mathbf{X}_\tau = \mathbf{a}_\tau \mathbf{X}_{\tau-1} + \mathbf{b}_\tau \mathbf{V}_\tau \quad (5.5)$$

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. Για την περίπτωση δύο μεταβλητών, η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\begin{bmatrix} X_\tau^{(1)} \\ X_\tau^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_\tau^{(1)} & 0 \\ 0 & a_\tau^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\tau-1}^{(1)} \\ X_{\tau-1}^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_\tau^{(1,1)} & b_\tau^{(1,2)} \\ b_\tau^{(2,1)} & b_\tau^{(2,2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\tau^{(1)} \\ V_\tau^{(2)} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

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 κάθε μεταβλητής, οπότε υιοθετείται μια επαναληπτική διαδικασία Monte Carlo προκειμένου 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, εφαρμόζεται μια ενδιάμεση διαδικασία συνόρθωσης των αρχικών ετήσιων τιμών, ώστε να αποκαθίσταται η στατιστική συνέπεια με τις γνωστές παρελθούσες τιμές (Koutsoyiannis, 2000).

5.2 Σχηματοποίηση υδροσυστήματος Σμοκόβου

5.2.1 Υποθετικά σενάρια πλήρους ανάπτυξης έργων

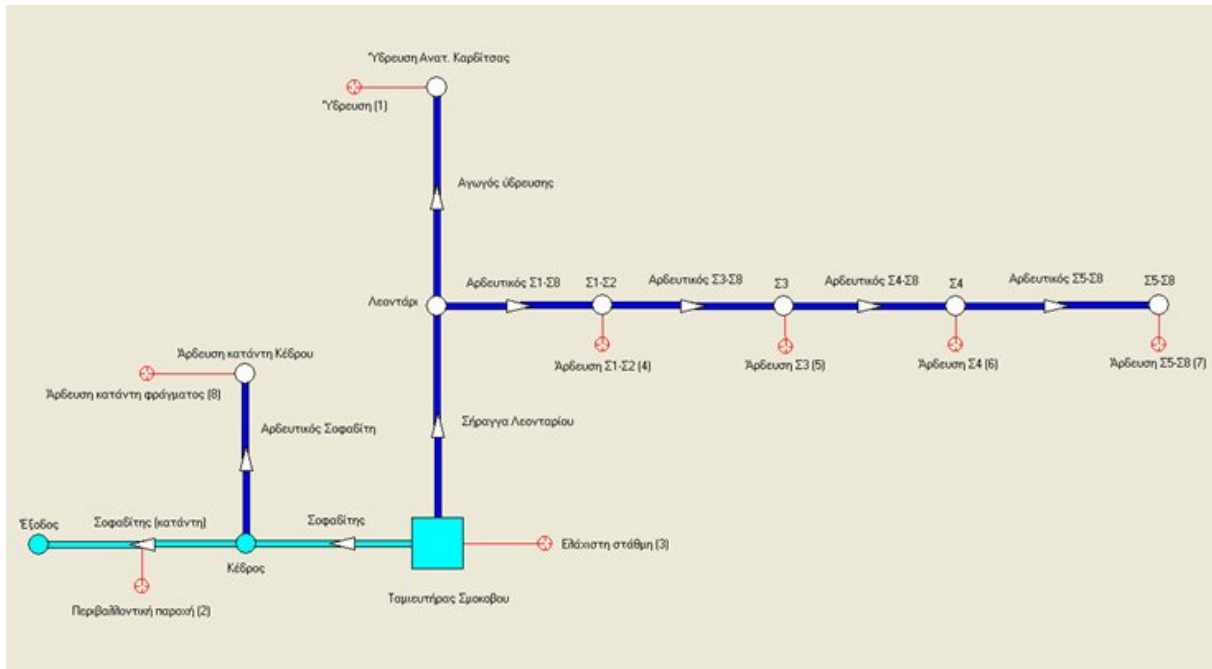
Το υδροσύστημα Σμοκόβου, στην υποτιθέμενη πλήρη ανάπτυξή του και με βάση τον αρχικό σχεδιασμό, περιλαμβάνει τον ταμιευτήρα και το σύνολο των έργων που εξυπηρετούνται μέσω της σήραγγας Λεονταρίου, δηλαδή τους οικισμούς που πρόκειται να τροφοδοτηθούν με υδρευτικό νερό και τις αρδευόμενες ζώνες Σ1-Σ8, καθώς και τους καταναλωτές που δύνανται να εξυπηρετηθούν από τις εκροές κατάντη του φράγματος, που δίνονται επιπλέον της οικολογικής παροχής. Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, διαμορφώθηκε το θεωρητικό δίκτυο του Σχήματος 5.2, όπου απεικονίζονται οι κύριες διαδρομές νερού προς τους διάφορους καταναλωτές. Συγκεκριμένα:

- Οι ζώνες Σ1-Σ2, Σ3, Σ4 και Σ5-Σ8 απεικονίζονται ως τέσσερις κόμβοι ζήτησης αρδευτικού νερού, που συνδέονται μέσω ενός εικονικού υδραγωγείου που ξεκινά από έργο κεφαλής στο Λεοντάρι και εκτείνεται ανατολικά·
- Οι οικισμοί που προβλέπεται να υδρεύονται μέσω του ταμιευτήρα Σμοκόβου ομαδοποιούνται σε έναν εικονικό κόμβο, που συνδέεται με το έργο κεφαλής μέσω ενός εικονικού υδραγωγείου·
- Ο Σοφαδίτης απεικονίζεται ως δύο κλάδοι υδατορεύματος στη σειρά, ενδιάμεσα των οποίων πραγματοποιούνται οι απολήψεις για άρδευση των παραποτάμιων περιοχών κατάντη του Κέδρου, ενώ η ελάχιστη διατηρητέα παροχή που αφήνεται κατάντη του φράγματος τίθεται ως σχετικός περιορισμός στον κατάντη κλάδο, ώστε η εν λόγω παροχή να μην εξαρτάται από τις αρδευτικές απολήψεις.

Στοιχεία εισόδου του δικτύου είναι:

- τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ταμιευτήρα και των υδραγωγείων·
- οι υδρολογικές εισροές (χρονοσειρές), που αφορούν αποκλειστικά στον ταμιευτήρα Σμοκόβου, και παράγονται συνθετικά·
- οι λειτουργικοί στόχοι, που αναφέρονται στις διάφορες χρήσεις νερού και τους διαχειριστικούς περιορισμούς του υδροσυστήματος, και επισημαίνονται στο Σχήμα 5.2 (σε παρένθεση δίνονται οι προτεραιότητες των εν λόγω στόχων).

Η διαμόρφωση των δεδομένων εισόδου εξηγείται αναλυτικά στην ενότητα 5.3. Η προσομοίωση του συστήματος εκτελείται σε 1000 υποθετικά υδρολογικά έτη, ώστε το προκύπτον δείγμα εκροών να εξασφαλίζει αρκετά ακριβείς εκτιμήσεις των μεγεθών αξιοπιστίας του υδροσυστήματος.



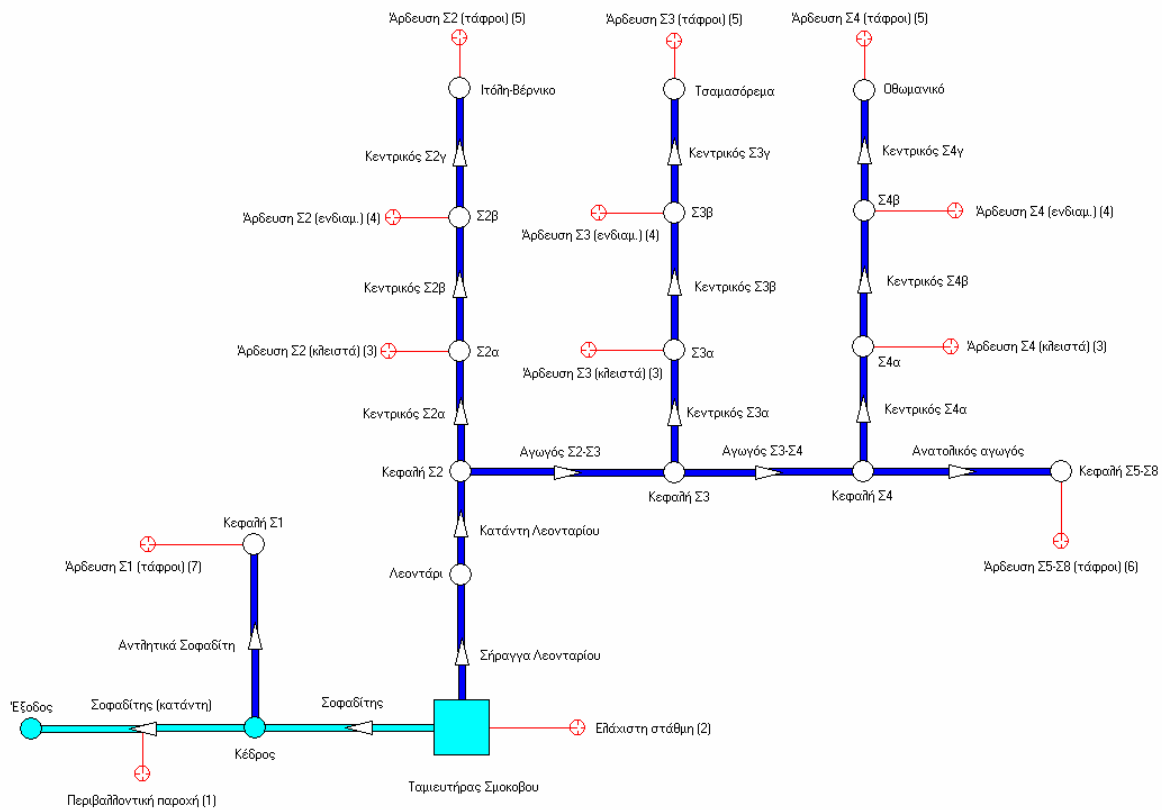
Σχήμα 5.2: Απεικόνιση υδροσυστήματος Σμοκόβου (σενάριο πλήρους ανάπτυξης έργων), στο γραφικό περιβάλλον του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.

5.2.2 Υφιστάμενο σενάριο μερικής ανάπτυξης έργων

Το σενάριο υφιστάμενης κατάστασης του υδροσυστήματος, όπως έχει σχηματιστεί στο γραφικό περιβάλλον του μοντέλου, το οποίο εστιάζει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις ζώνες Σ2, Σ3 και Σ4, περιλαμβάνει, εκτός από τον ταμιευτήρα και τον Σοφαδίτη, τους κύριους κλάδους του υπάρχοντος και υπό κατασκευή αρδευτικού δικτύου (Σχήμα 5.3). Συγκεκριμένα:

- Κατάντη του Λεονταρίου ξεκινά ο βασικός αρδευτικός αγωγός του συστήματος (ανατολικός κλάδος) που παροχετεύει νερό στις κεφαλές των ζωνών Σ2, Σ3 και Σ4, προτού καταλήξει στην κεφαλή του ανατολικού τμήματος (ζώνες Σ5 έως Σ8, που απεικονίζονται ως ενιαίος κόμβος).
- Από την κεφαλή της ζώνης Σ2 ξεκινά ο κύριος τροφοδοτικός αγωγός που διατρέχει την περιοχή των κλειστών δικτύων, έκτασης 6000 στρεμμάτων περίπου, και στη συνέχεια την περιοχή των ανοιχτών καναλιών, έκτασης 7800 στρεμμάτων περίπου, για να καταλήξει στις αποστραγγιστικές τάφρους Τ7 (Ιτόλη) και Τ6 (Βέρνικο), από όπου θεωρείται ότι θα πραγματοποιείται η άρδευση της υπόλοιπης έκτασης της ζώνης Σ2 (περίπου 22 900 στρέμματα).
- Από την κεφαλή της ζώνης Σ3 ξεκινά ο κύριος τροφοδοτικός αγωγός που διατρέχει την περιοχή των κλειστών δικτύων, έκτασης 7500 στρεμμάτων περίπου, και στη συνέχεια την περιοχή των ανοιχτών καναλιών, έκτασης 7400 στρεμμάτων περίπου, για να καταλήξει στην αποστραγγιστική τάφρο Τ9.6 (Τσαμασόρεμα), από όπου θεωρείται ότι θα πραγματοποιείται η άρδευση της υπόλοιπης έκτασης της ζώνης Σ3 (περίπου 22 900 στρέμματα).
- Από την κεφαλή της ζώνης Σ4 ξεκινά ο κύριος τροφοδοτικός αγωγός που διατρέχει την περιοχή των κλειστών δικτύων, έκτασης 5700 στρεμμάτων περίπου, και στη συνέχεια την περιοχή των ανοιχτών καναλιών, έκτασης 7300 στρεμμάτων περίπου, για να καταλήξει στην περιοχή των Οθωμανικών, από όπου θεωρείται ότι θα πραγματοποιείται η άρδευση της υπόλοιπης έκτασης της ζώνης Σ4 (περίπου 27 000 στρέμματα).

- Κατάντη του φράγματος θεωρείται ένας εικονικός αγωγός που αναπαριστά τα αρδευτικά αντλιοστάσια κατά μήκος του Σοφαδίτη, μέσω των οποίων θα διοχετεύεται νερό προς τη ζώνη Σ1, έκτασης 17 600 στρεμμάτων.
- Όπως και στα υποθετικά σενάρια, στο υδrosυστήμα απεικονίζεται ο κλάδος του Σαφαδίτη κατάντη του Κέδρου, όπου διοχετεύεται η οικολογική παροχή του, η οποία είναι επιπρόσθετη εκείνης που δίνεται για άρδευση της ζώνης Σ1.



Σχήμα 5.3: Απεικόνιση υδrosυστήματος Σμοκόβου (υφιστάμενο σενάριο μερικής ανάπτυξης έργων), στο γραφικό περιβάλλον του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.

5.3 Δεδομένα εισόδου

5.3.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη έργων

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των έργων αφορούν στον ταμιευτήρα Σμοκόβου και τα υδραγωγεία του δικτύου. Συγκεκριμένα:

Τα μεγέθη του ταμιευτήρα (χαρακτηριστικές στάθμες και αποθέματα) προσδιορίστηκαν στα πλαίσια της Α' φάσης του έργου, μετά από ανάλυση των δεδομένων στάθμης και επιφάνειας (Κουκουβίνος κ.ά., 2006). Η τελική σημειοσειρά στάθμης-επιφάνειας-αποθέματος, με βάση την οποία γίνονται οι υπολογισμοί του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα κατά την προσομοίωση, δίνονται στον Πίνακα 5.1. Με γνωστό ότι η ανώτατη στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι +375.0 m, ενώ η κατώτατη στάθμη υδροληψίας είναι +331.0 m, προκύπτει ότι το μέγιστο απόθεμά του ανέρχεται στα 237.6 hm³, ο νεκρός του όγκος στα 28.4 hm³ και η ωφέλιμη χωρητικότητά του στα 237.6 hm³. Τέλος, η έκταση της λίμνης στην ανώτατη στάθμη της ανέρχεται σε 8.4 km².

Όσον αφορά στα υδραγωγεία, επειδή, με εξαίρεση τη σήραγγα Λεονταρίου, αναπαριστούν εικονικές διαδρομές νερού, δεν έχει νόημα ο προσδιορισμός κάποιας πραγματικής τιμής παροχευτικότητας.

Συνεπώς, σε όλα τα υδραγωγεία τέθηκε μια σχετικά μεγάλη παροχτευτικότητα, ίση με 10.0 m³/s, ώστε να μην επιβάλλονται περιορισμοί στις αρδευτικές και υδρευτικές απολήψεις λόγω μειωμένης μεταφορικής ικανότητας του δικτύου. Επισημαίνεται ότι η σημερινή παροχτευτικότητα της σήραγγας Λεονταρίου είναι περίπου 3.0 m³/s, που αντιστοιχεί σε δυνατότητα εκροής περίπου 7.9 hm³/μήνα.

Πίνακας 5.1: Σημειοσειρά στάθμης-επιφάνειας-αποθέματος ταμιευτήρα Σμοκόβου.

| Στάθμη (m) | Επιφάνεια (km ²) | Απόθεμα (hm ³) |
|------------|------------------------------|----------------------------|
| 285.0 | 0.0 | 0.0 |
| 295.0 | 0.2 | 1.0 |
| 305.0 | 0.4 | 4.0 |
| 315.0 | 0.7 | 9.5 |
| 325.0 | 1.3 | 19.3 |
| 335.0 | 2.2 | 36.6 |
| 345.0 | 3.5 | 64.8 |
| 355.0 | 4.9 | 106.6 |
| 365.0 | 6.5 | 163.4 |
| 375.0 | 8.4 | 237.6 |
| 385.0 | 10.2 | 330.5 |

5.3.2 Συνθετικές χρονοσειρές εισροών

Οι συνθετικές χρονοσειρές εισροών, οι οποίες αποτελούν είσοδο του μοντέλου προσομοίωσης του ταμιευτήρα Σμοκόβου, αναφέρονται στην απορροή της ανάντη του φράγματος λεκάνης, καθώς και στη βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα. Ως προς τη χρονοσειρά εξάτμισης, δεν κρίθηκε αναγκαία η κατασκευή συνθετικού δείγματος, δεδομένου ότι η διακύμανσή της από έτος σε έτος είναι περιορισμένη. Συνεπώς, στα πλαίσια της στοχαστικής προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμιευτήρα, οι μηνιαίες τιμές της εξάτμισης θεωρήθηκαν σταθερές και ίσες με τις τιμές του Πίνακα 3.16.

Για τη γέννηση των συνθετικών χρονοσειρών απορροής και βροχόπτωσης του ταμιευτήρα Σμοκόβου εφαρμόστηκε το μοντέλο ΚΑΣΤΑΛΙΑ, για μήκος προσομοίωσης 1000 ετών. Για την εκτίμηση των στατιστικών χαρακτηριστικών των μεταβλητών, χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα ιστορικά δείγματα:

- το δείγμα απορροής ανάντη του φράγματος, τμήμα του οποίου κατασκευάστηκε με προσαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, ενώ το πλέον πρόσφατο τμήμα του εκτιμήθηκε από το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα (βλ. 4.5.1)·
- το πρωτογενές δείγμα βροχόπτωσης στο σταθμό Λουτροπηγής, που θεωρείται αντιπροσωπευτικό της βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα.

Πίνακας 5.2: Στατιστικά μεγέθη ιστορικού δείγματος ύψους απορροής ανάντη φράγματος Σμοκόβου – Υδρολογικά έτη 1960-61 έως 2006-07, χωρίς την περίοδο 1995-96 έως 2001-02 (mm).

| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Μέση τιμή | 8.1 | 19.4 | 37.4 | 48.9 | 52.3 | 50.1 | 33.5 | 19.3 | 5.4 | 0.7 | 0.3 | 0.9 | 276.3 |
| Τυπ. απόκ. | 11.4 | 20.0 | 25.8 | 29.8 | 23.0 | 26.5 | 17.6 | 12.4 | 5.8 | 1.9 | 0.9 | 4.7 | 140.1 |
| Ασυμμετρ. | 2.525 | 3.026 | 2.507 | 0.824 | 0.861 | 1.161 | 0.318 | 0.924 | 1.059 | 3.156 | 4.859 | 6.282 | 1.570 |
| Αυτοσυσχ. | 0.271 | 0.556 | 0.807 | 0.795 | 0.777 | 0.820 | 0.759 | 0.866 | 0.611 | 0.392 | 0.837 | -0.04 | 0.156 |
| Ετεροσυσχ. ¹ | 0.920 | 0.593 | 0.638 | 0.723 | 0.431 | 0.736 | 0.614 | 0.676 | 0.334 | -0.10 | -0.04 | -0.04 | 0.778 |

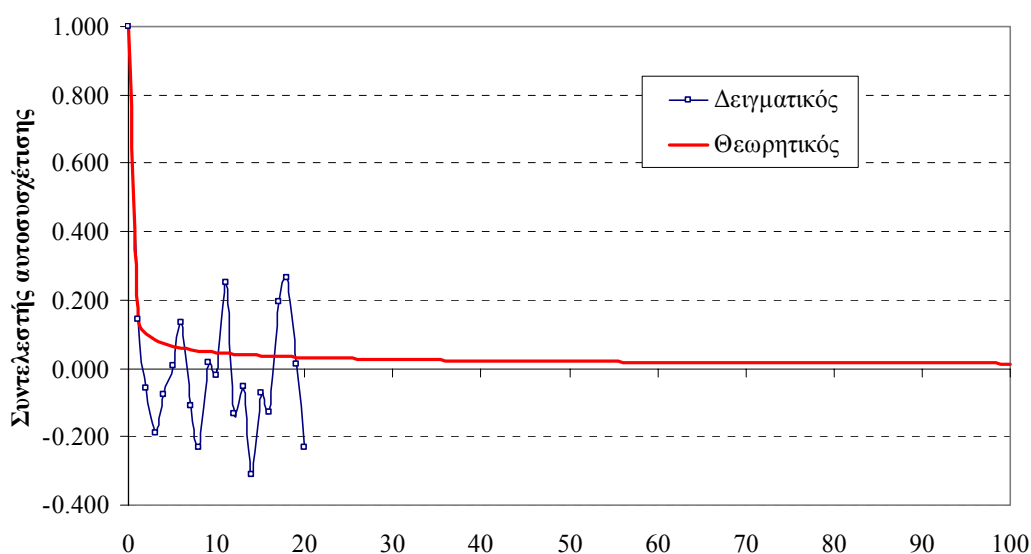
¹ Συντελεστής ετεροσυσχέτισης μηδενικής τάξης με τη χρονοσειρά βροχόπτωσης στη Λουτροπηγή.

Πίνακας 5.3: Στατιστικά μεγέθη ιστορικού δείγματος ύψους βροχόπτωσης στο σταθμό Λουτροπηγής – Υδρολογικά έτη 1970-61 έως 2006-07, με κενά (mm).

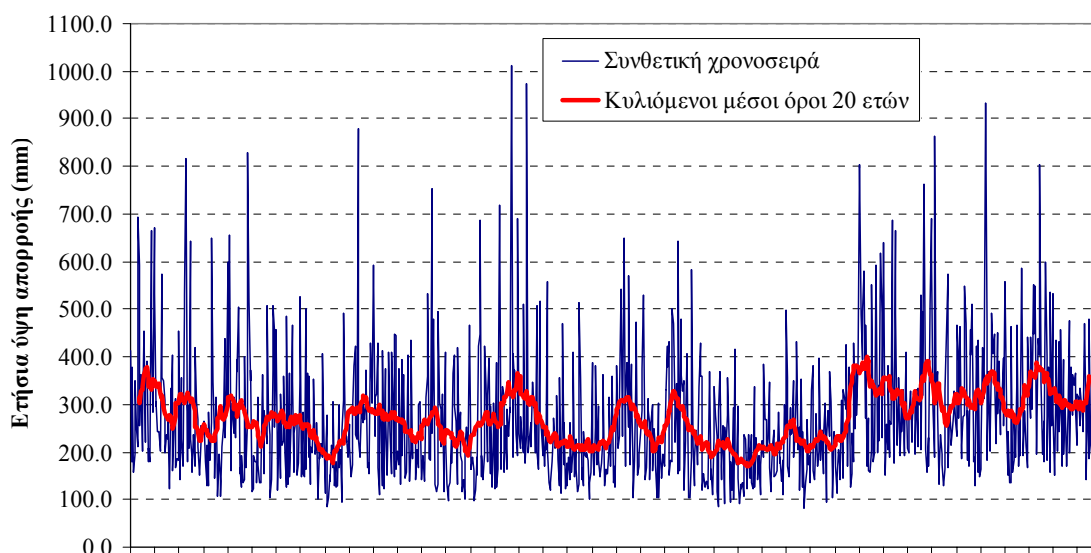
| | Οκτ. | Νοέ. | Δεκ. | Ιαν. | Φεβ. | Μάρ. | Απρ. | Μάι. | Ιούν. | Ιούλ. | Αύγ. | Σεπ. | Έτος |
|------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|
| Μέση τιμή | 100.0 | 113.9 | 113.5 | 110.4 | 105.3 | 83.9 | 74.5 | 57.3 | 27.2 | 20.5 | 27.3 | 43.5 | 867.6 |
| Τυπ. απόκ. | 77.0 | 57.4 | 60.8 | 82.1 | 50.8 | 56.6 | 39.4 | 37.5 | 32.7 | 19.5 | 25.9 | 45.3 | 201.1 |
| Ασυμμετρ. | 2.025 | 1.236 | 0.777 | 1.054 | 0.051 | 1.343 | 0.906 | 0.849 | 2.300 | 1.476 | 1.800 | 1.657 | 0.379 |
| Αυτοσυσχ. | -0.280 | -0.071 | 0.121 | 0.470 | 0.147 | 0.172 | 0.187 | 0.149 | -0.028 | -0.178 | 0.006 | -0.225 | 0.140 |

Οι χρονοσειρές απορροής εκφράστηκαν σε μονάδες ισοδύναμου ύψους, ανάγοντας τους επιμέρους όγκους στην επιφάνεια της ανάντη λεκάνης, έκτασης 376.6 km². Στους Πίνακες 5.2 και 5.3 δίνονται τα περιθώρια στατιστικά χαρακτηριστικά (μέσες τιμές, τυπικές αποκλίσεις, συντελεστές ασυμμετρίας) και οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης των παραπάνω δειγμάτων, σε μηνιαία και ετήσια κλίμακα, τα οποία αναπαράχθηκαν στις στοχαστικές αναλύσεις.

Στις αναλύσεις, η τιμή της παραμέτρου β της θεωρητικής συνάρτησης αυτοσυνδιασποράς ορίστηκε ίση με 2.00, ώστε να αναπαράγει σχετικά υψηλή εμμογή. Η τιμή της παραμέτρου κ , για την οποία το θεωρητικό αυτοσυσχετόγραμμα επαληθεύει ακριβώς τον συντελεστή αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης, υπολογίστηκε σε 24.7 για την απορροή και 24.3 για τη βροχόπτωση. Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται το θεωρητικό αυτοσυσχετόγραμμα της ετήσιας απορροής και οι αντίστοιχοι εμπειρικοί (δειγματικοί) συντελεστές, για υστέρηση μέχρι 20 έτη. Το γεγονός ότι το αυτοσυσχετόγραμμα φθίνει πολύ αργά προς το μηδέν αποτελεί ένδειξη έντονης εμμογής της εν λόγω διεργασίας.



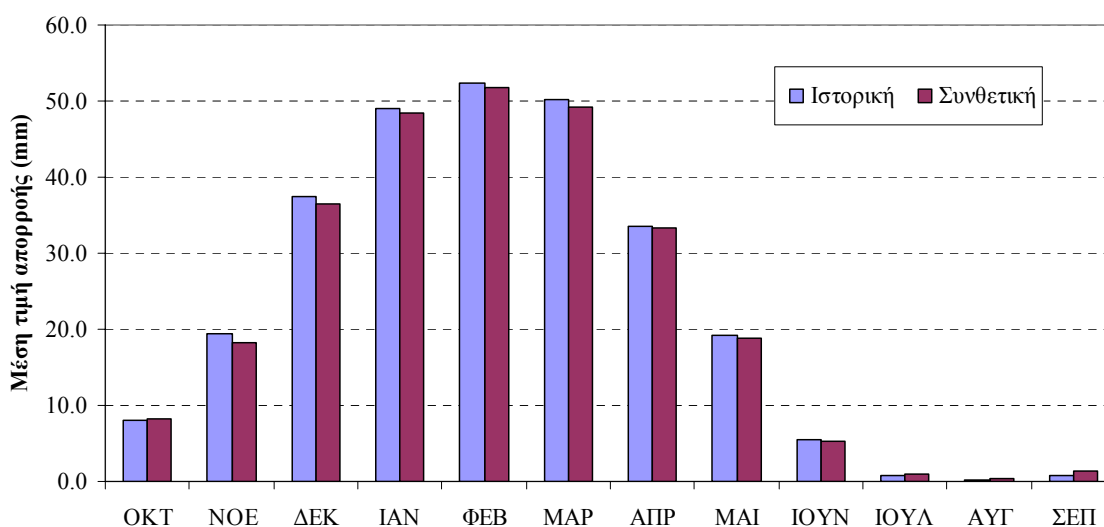
Σχήμα 5.4: Γραφική παράσταση δειγματικών συντελεστών αυτοσυσχέτισης ετήσιας απορροής (για υστέρηση έως 20 βημάτων) και προσαρμογή θεωρητικής συνάρτησης αυτοσυσχέτισης.



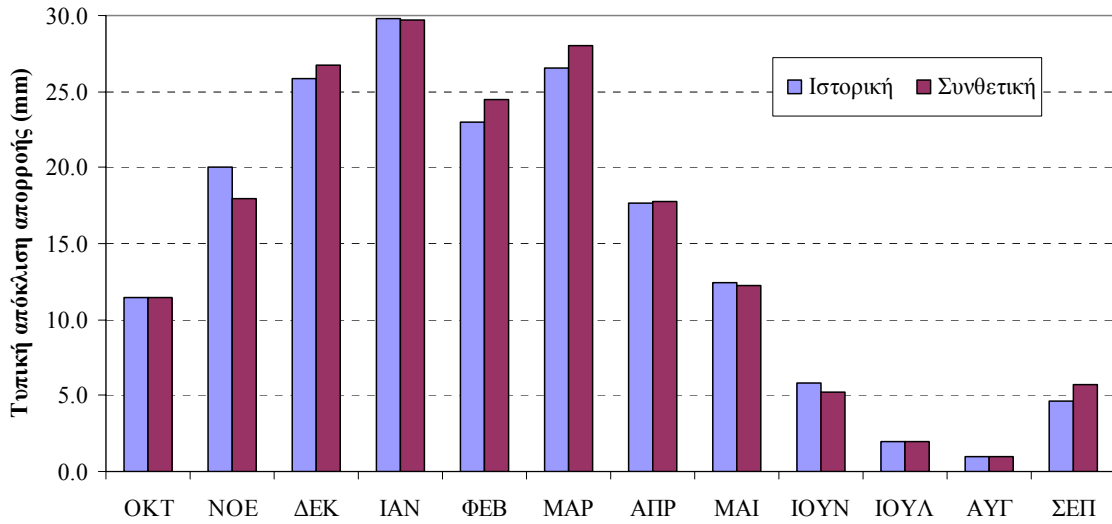
Σχήμα 5.5: Απεικόνιση ετήσιας συνθετικής χρονοσειράς απορροής υπολεκάνης Σμοκόβου, μήκους 1000 ετών, και κινούμενων μέσων όρων εικοσαετίας.

Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζεται η ετήσια συνθετική χρονοσειρά απορροής καθώς και οι κινούμενοι μέσοι όροι εικοσαετίας, οι οποίοι παρουσιάζουν έντονη τυχαία διακύμανση γύρω από την ιστορική μέση τιμή των 279.0 mm. Στην εν λόγω χρονοσειρά διαμορφώνονται χαρακτηριστικές περιόδους εναλλαγών υψηλής και χαμηλής υδροφορίας, που είναι συνεπείς με την παρατηρημένη υδρολογική δίαιτα της απορροής των ελληνικών λεκανών.

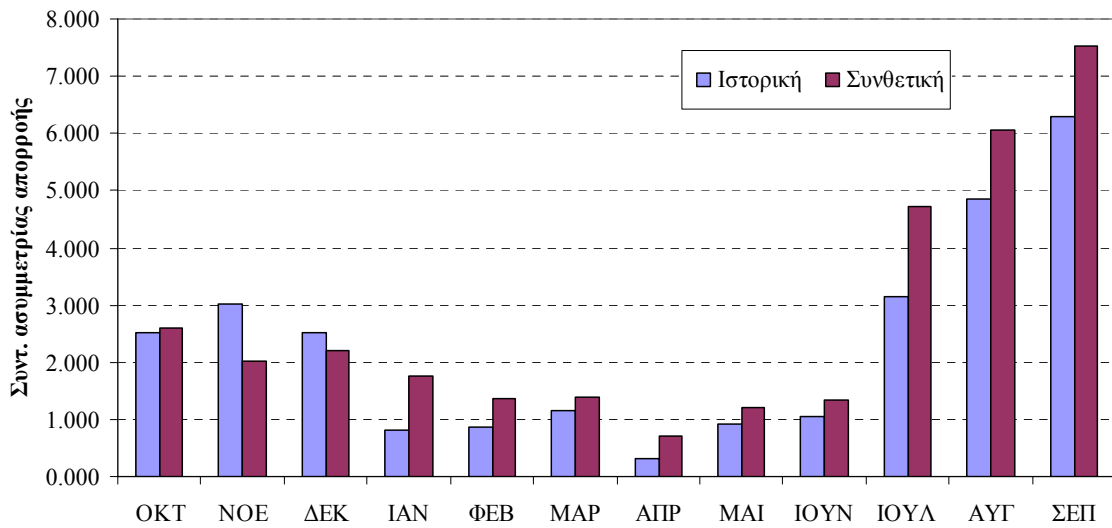
Το μοντέλο αναπαράγει, σε μηνιαία και ετήσια κλίμακα, τα ουσιώδη στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων στις αντίστοιχες συνθετικές χρονοσειρές. Αυτό τεκμηριώνεται στα Σχήματα 5.6, 5.7, 5.8, και 5.9, στα οποία συγκρίνονται τα περιθώρια στατιστικά χαρακτηριστικά (μέσες τιμές, τυπικές αποκλίσεις, συντελεστές ασυμμετρίας) και οι αυτοσυσχετίσεις πρώτης τάξης της συνθετικής και της ιστορικής χρονοσειράς απορροής, καθώς και στο Σχήμα 5.10, στο οποίο συγκρίνονται οι δειγματικές και συνθετικές ετεροσυσχετίσεις μηδενικής τάξης μεταξύ απορροής και βροχόπτωσης.



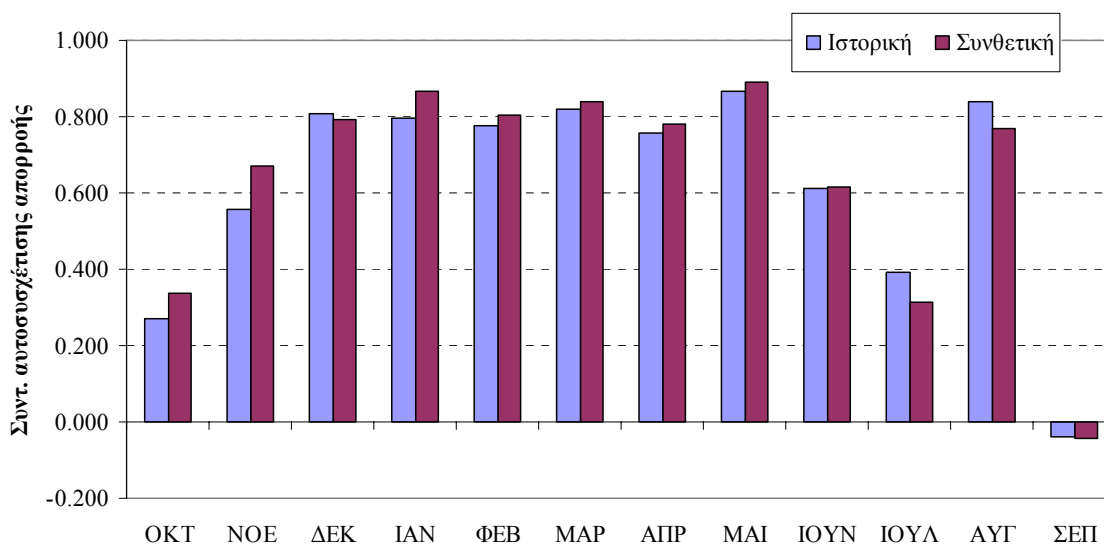
Σχήμα 5.6: Σύγκριση συνθετικών και δειγματικών μέσων τιμών μηνιαίας απορροής υπολεκάνης Σμοκόβου ανάτη του φράγματος.



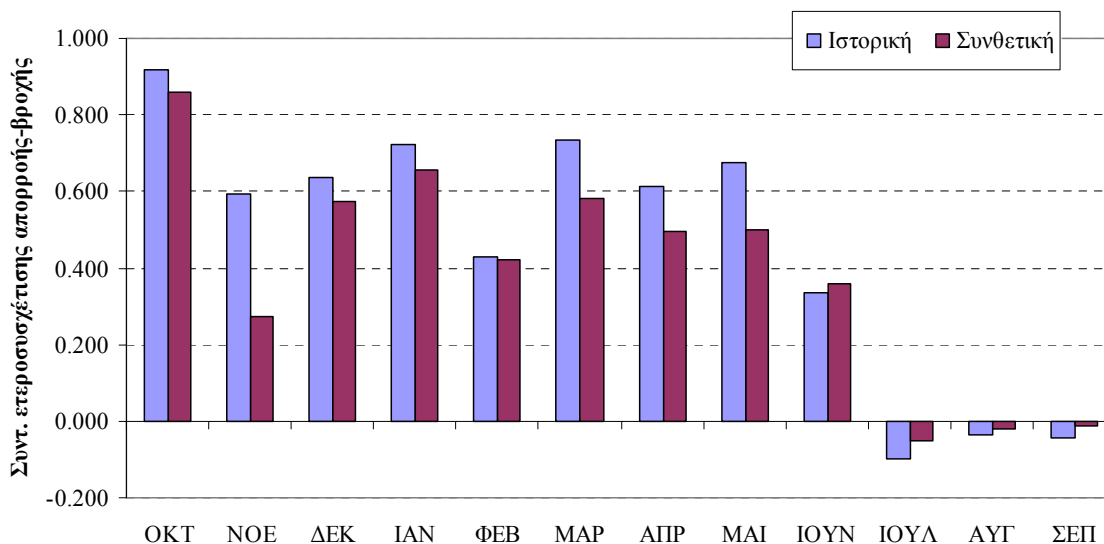
Σχήμα 5.7: Σύγκριση συνθετικών και δειγματικών τυπικών αποκλίσεων μηνιαίας απορροής υπολεκάνης Σμοκόβου ανάτη του φράγματος.



Σχήμα 5.8: Σύγκριση συνθετικών και δειγματικών συντελεστών ασυμμετρίας μηνιαίας απορροής υπολεκάνης Σμοκόβου ανάτη του φράγματος.



Σχήμα 5.9: Σύγκριση συνθετικών και δειγματικών συντελεστών αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης μηνιαίας απορροής υπολεκάνης Σμοκόβου ανάντη του φράγματος.



Σχήμα 5.10: Σύγκριση συνθετικών και δειγματικών συντελεστών ετεροσυσχέτισης μηδενικής τάξης μεταξύ μηνιαίας απορροής υπολεκάνης Σμοκόβου και μηνιαίας βροχόπτωσης στον ταμιευτήρα.

5.3.3 Χρήσεις νερού και περιορισμοί

Στο υδροσύστημα Σμοκόβου, στο υποθετικό σενάριο της πλήρους ανάπτυξης των σχετικών έργων, θεωρούνται οι ακόλουθες χρήσεις νερού, κατά σειρά προτεραιότητας:

- απόληψη νερού για ύδρευση οικισμών Ανατολικής Καρδίτσας,
- εκροή νερού για διατήρηση ελάχιστης παροχής κατόντη φράγματος, για εμπλουτισμό του κώνου του Σοφαδίτη και προστασία των οικοσυστημάτων
- διατήρηση ελάχιστου αποθέματος νερού στον ταμιευτήρα Σμοκόβου
- παραγωγή ενέργειας μέσω του ΥΗΣ Λεονταρίου
- απόληψη νερού για άρδευση των ζωνών Σ1-Σ2, Σ3, Σ4 και Σ5-Σ8
- απόληψη νερού για άρδευση των παραποτάμιων περιοχών, κατόντη του Κέδρου.

Οι ζήτηση κάθε στόχου εκτιμήθηκε ως εξής:

Οι ετήσιες υδρευτικές ανάγκες τέθηκαν ίσες με 10.0 hm³, και θεωρήθηκαν ισοκατανεμημένες στο έτος, ήτοι 0.83 hm³/μήνα. Η ποσότητα αυτή μπορεί να εξυπηρετήσει ισοδύναμο πληθυσμό 110 000 κατοίκων, θεωρώντας μέση κατά κεφαλή κατανάλωση (μαζί με τις απώλειες) 250 L/d.

Η ελάχιστη διατηρητέα παροχή στο Σοφαδίτη είναι ίση με 10.0 hm³/έτος, ενώ η μηνιαία κατανομή της, που δίνεται στον Πίνακα 5.4, ορίστηκε με βάση τη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων του έργου (Βαβίζος κ.ά., 1995).

Στον ταμιευτήρα Σμοκόβου επιβάλλεται η διατήρηση ενός ελάχιστου αποθέματος της τάξης των 65 hm³, που αντιστοιχεί σε στάθμη +345 m, και εξασφαλίζει καλή οικολογική κατάσταση της λίμνης και καλή ποιότητα νερού (Ρόπης, 2005). Το όριο αυτό τίθεται σε υψηλότερη προτεραιότητα σε σχέση με τους αρδευτικούς στόχους, αλλά σε χαμηλότερη σε σχέση με τους υδρευτικούς και περιβαλλοντικούς στόχους. Κατά συνέπεια, επιτρέπεται η παραβίαση του εν λόγω ορίου, δηλαδή η πραγματοποίηση απολήψεων κάτω από την επιτρεπόμενη στάθμη των +345 m, αποκλειστικά για την ύδρευση των οικισμών και τη διατήρηση της οικολογικής παροχής του Σοφαδίτη. Αντίθετα, δεν επιτρέπεται η εκροή νερού για άρδευση, τόσο μέσω της σήραγγα Λεονταρίου όσο και κατάντη του φράγματος.

Η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας τίθεται με τη μορφή στόχου ελάχιστης επιθυμητής παροχής στο υδραγωγείο που αναπαριστά τη σήραγγα Λεονταρίου. Η εν λόγω παροχή θεωρείται σταθερή κατά την υγρή περίοδο (Οκτώβριος-Μάρτιος) και αποτελεί ζητούμενο των διαχειριστικών αναλύσεων. Στις αναλύσεις γίνεται η παραδοχή ότι η εν λόγω παροχή, με όριο την υφιστάμενη παροχετευτικότητα της σήραγγας (3.0 m³/s), μπορεί να διοχετευτεί με ασφάλεια κατάντη, μέσω του αποστραγγιστικού δικτύου. Τους υπόλοιπους μήνες του έτους, θεωρείται ότι η διερχόμενη παροχή από τη σήραγγα Λεονταρίου, και συνακόλουθα η παραγωγή ενέργειας, καθορίζεται από τις υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες των κατάντη καταναλωτών.

Πίνακας 5.4: Μηνιαία κατανομή οικολογικής παροχής, με βάση τη ΜΠΕ του έργου.

| Μήνας | Όγκος εκροής (hm ³) |
|-------------|---------------------------------|
| Απρίλιος | 0.36 |
| Μάιος | 1.76 |
| Ιούνιος | 2.43 |
| Ιούλιος | 2.93 |
| Αύγουστος | 1.84 |
| Σεπτέμβριος | 0.71 |
| Σύνολο | 10.00 |

Πίνακας 5.5: Αρδευτική ζήτηση δικτύου Σμοκόβου για ετήσιες ανάγκες 650 m³/στρέμμα (σε hm³).

| Μήνας | Ζώνες Σ1-Σ2 | Ζώνη Σ3 | Ζώνη Σ4 | Ζώνες Σ5-Σ8 |
|-------------|-------------|---------|---------|-------------|
| Απρίλιος | 2.3 | 1.6 | 1.7 | 4.2 |
| Μάιος | 4.4 | 3.1 | 3.3 | 8.0 |
| Ιούνιος | 7.2 | 5.0 | 5.3 | 12.9 |
| Ιούλιος | 8.5 | 5.9 | 6.3 | 15.3 |
| Αύγουστος | 7.7 | 5.3 | 5.6 | 13.8 |
| Σεπτέμβριος | 5.2 | 3.6 | 3.8 | 9.3 |
| Σύνολο | 35.3 | 24.6 | 26.0 | 63.4 |

Πίνακας 5.6: Αρδευτική ζήτηση δικτύου Σμοκόβου για ετήσιες ανάγκες 500 m³/στρέμμα (σε hm³).

| Μήνας | Ζώνες Σ1-Σ2 | Ζώνη Σ3 | Ζώνη Σ4 | Ζώνες Σ5-Σ8 |
|-------------|-------------|---------|---------|-------------|
| Απρίλιος | 1.8 | 1.2 | 1.3 | 3.2 |
| Μάιος | 3.4 | 2.4 | 2.5 | 6.1 |
| Ιούνιος | 5.5 | 3.8 | 4.1 | 9.9 |
| Ιούλιος | 6.6 | 4.6 | 4.8 | 11.8 |
| Αύγουστος | 5.9 | 4.1 | 4.3 | 10.6 |
| Σεπτέμβριος | 4.0 | 2.8 | 2.9 | 7.1 |
| Σύνολο | 27.2 | 18.9 | 20.0 | 48.8 |

Οι αρδευτικές ανάγκες των ζωνών Σ1-Σ2, Σ3, Σ4 και Σ5-Σ8 εκτιμώνται με βάση τις αντίστοιχες αρδευόμενες εκτάσεις, που είναι 54.3, 37.8, 40.0 και 97.5 km², και συναρτήσει δύο τυπικών σεναρίων κατανάλωσης ανά μονάδα επιφάνειας. Το πρώτο (σενάριο υψηλής κατανάλωσης) αντιστοιχεί σε ετήσιο όγκο 650 m³/στρέμμα και υποθέτει διατήρηση των υφιστάμενων μεθόδων άρδευσης, ήτοι μέσω ρουφρακτών και χωμάτινων τάφρων, που έχουν ως συνέπεια σημαντικές απώλειες νερού λόγω διαφυγών και εξάτμισης. Το δεύτερο (σενάριο χαμηλής κατανάλωσης) αντιστοιχεί σε ετήσιο όγκο 500 m³/στρέμμα και υποθέτει την ανάπτυξη δικτύων κλειστών αγωγών. Οι τιμές αυτές είναι συμβατές με τις αναλυτικότερες εκτιμήσεις πρόσφατης μελέτης του ΥΠΕΧΩΔΕ (2006). Σε όλες τις περιπτώσεις, η ετήσια αρδευτική ζήτηση κατανέμεται με βάση τα ποσοστά του Πίνακα 4.5. Οι τιμές της αρδευτικής ζήτησης ανά ζώνη, με βάση τα δύο σεναρία κατανάλωσης, δίνονται στους Πίνακες 5.5 και 5.6, αντίστοιχα.

Τέλος, η ετήσια αρδευτική ζήτηση κατάντη του Κέδρου είτε θεωρείται δεδομένη είτε αποτελεί ζητούμενο των διαχειριστικών αναλύσεων.

5.4 Θεωρητικές αναλύσεις για διάφορα επίπεδα ανάπτυξης των έργων

5.4.1 Τοποθέτηση διαχειριστικού προβλήματος

Σκοπός των θεωρητικών αναλύσεων είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων του υδροσυστήματος για διάφορα σεναρία ανάπτυξης των αρδευτικών και υδρευτικών έργων Σμοκόβου, σε συνδυασμό με τα δύο σεναρία ετήσιων αρδευτικών αναγκών. Συγκεκριμένα, θεωρώντας δεδομένες τις τιμές όλων των στόχων και περιορισμών, εκτός από την αρδευτική κατανάλωση κατάντη του Κέδρου μέσω απολήψεων από τον ταμιευτήρα, προκύπτουν τα ακόλουθα ερωτήματα:

- Με ποια αξιοπιστία ικανοποιούνται οι στόχοι και περιορισμοί του υδροσυστήματος, για δεδομένη χειμερινή εκροή μέσω της σήραγγας Λεονταρίου για παραγωγή ενέργειας και δεδομένη αρδευτική ζήτηση κατάντη του Κέδρου;
- Ποια είναι η επιτρεπόμενη εκροή νερού μέσω της σήραγγας Λεονταρίου κατά την υγρή περίοδο του έτους, ώστε να εξασφαλίζεται συγκεκριμένο επίπεδο αξιοπιστίας στην ικανοποίηση των στόχων και περιορισμών του υδροσυστήματος;
- Ποια είναι η επιτρεπόμενη εκροή νερού για την ικανοποίηση της αρδευτικής ζήτησης κατάντη του Κέδρου, ώστε να εξασφαλίζεται συγκεκριμένο επίπεδο αξιοπιστίας στην ικανοποίηση των στόχων και περιορισμών του υδροσυστήματος;

Οι απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα, σε συνδυασμό με τις υδατικές ανάγκες και προτεραιότητες των επιμέρους στόχων, καθορίζουν πλήρως την αντίστοιχη μακροχρόνια διαχειριστική πολιτική του ταμιευτήρα. Ως επίπεδο αξιοπιστίας για τους αρδευτικούς στόχους τίθεται το 90%, που χαρακτηρίζεται επιθυμητό, ή 80%, το οποίο χαρακτηρίζεται ανεκτό. Βεβαίως, ένα τέτοιο επίπεδο

αξιοπιστίας, που συνεπάγεται έλλειμμα νερού κατά μέσο όρο μία φορά στα πέντε έτη (χωρίς να αποκλείεται να παρουσιαστεί επί σειρά ετών, σε περίπτωση έμμονης ξηρασίας), είναι αποδεκτό με σχετική επιφύλαξη, και με την προϋπόθεση ύπαρξης εναλλακτικών τρόπων κάλυψης των αρδευτικών αναγκών (π.χ. από υπόγεια νερά). Τέλος, για τις υδρευτικές, ενεργειακές και περιβαλλοντικές χρήσεις τίθεται επίπεδο αξιοπιστίας 90%.

Η αξιοπιστία (ή το αντίθετό της, που είναι η πιθανότητα αστοχίας) εκτιμάται εμπειρικά, ως ποσοστό των υδρολογικών ετών κατά τα οποία καλύπτεται πλήρως η ζήτηση ενός καταναλωτικού στόχου (ή ο αντίστοιχος περιορισμός, εφόσον αναφερόμαστε σε μη καταναλωτικό στόχο). Συνεπώς, ακόμα και η ελάχιστη παρέκκλιση από την επιθυμητή τιμή, έστω και για ένα μήνα, καταγράφεται ως αστοχία όλου του υδρολογικού έτους.

5.4.2 Σενάριο Α: Αρδευτικό δίκτυο ζωνών Σ1-Σ2

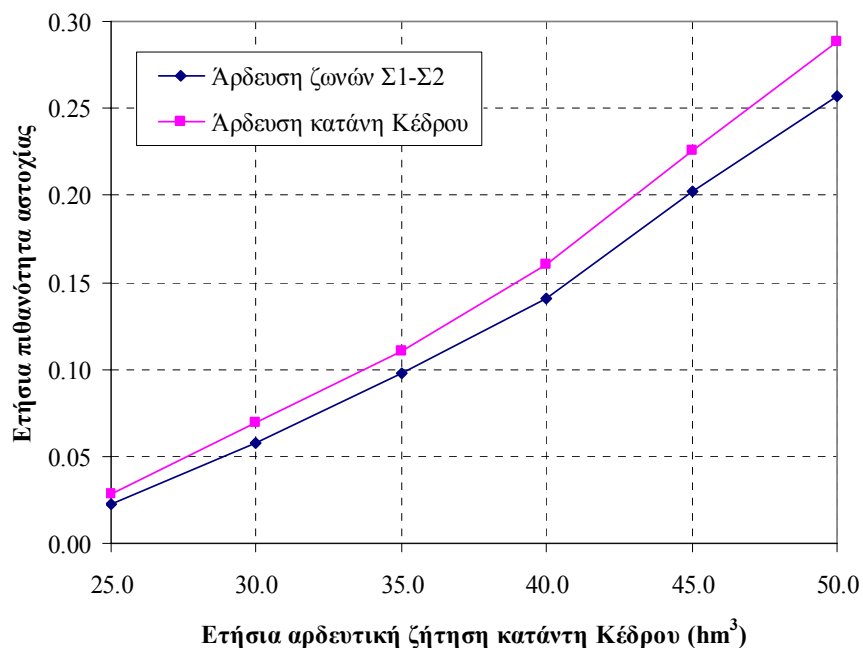
Η πρώτη διάταξη που εξετάζεται περιλαμβάνει το αρδευτικό δίκτυο που καλύπτει τις ζώνες Σ1 και Σ2, έκτασης 54.3 km². Η ετήσια αρδευτική ζήτηση της περιοχής ανέρχεται σε 35.3 και 27.2 hm³, για το σενάριο υψηλής (Α1) και χαμηλής (Α2) κατανάλωσης, αντίστοιχα. Για τα εν λόγω σενάρια πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της λειτουργίας του υδροσυστήματος, μεταβάλλοντας την ετήσια αρδευτική ζήτηση κατάντη του Κέδρου. Στους Πίνακες 5.7 και 5.8 δίνονται οι πιθανότητες αστοχίας κάθε στόχου, για τα σενάρια Α1 και Α2, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που αφορούν στους αρδευτικούς στόχους δίνονται και σε μορφή διαγραμμάτων, στα Σχήματα 5.11 και 5.12, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.7: Πιθανότητες αστοχίας ομάδας σεναρίων Α1 (υψηλή αρδευτική κατανάλωση).

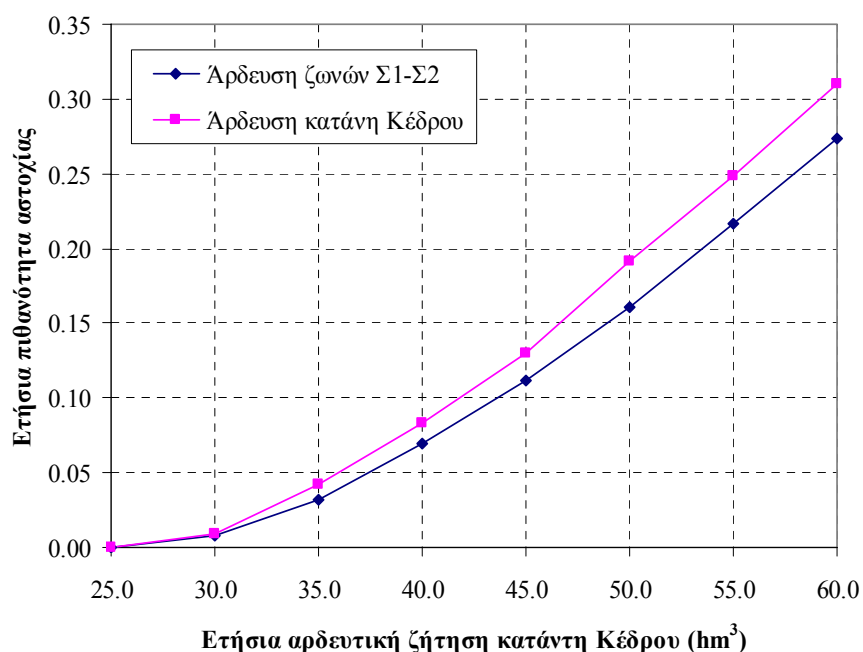
| Αρδευτική ζήτηση Κέδρου (hm ³ /έτος) | Ετήσια πιθανότητα αστοχίας | | | |
|---|----------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|
| | Ελάχιστη παροχή Σοφαδίτη | Ελάχιστη στάθμη ταμιευτήρα | Άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 | Άρδευση κατάντη Κέδρου |
| 25.0 | 0.000 | 0.017 | 0.022 | 0.028 |
| 30.0 | 0.000 | 0.052 | 0.058 | 0.069 |
| 35.0 | 0.000 | 0.090 | 0.098 | 0.110 |
| 40.0 | 0.000 | 0.130 | 0.141 | 0.160 |
| 45.0 | 0.000 | 0.187 | 0.202 | 0.226 |
| 50.0 | 0.000 | 0.239 | 0.257 | 0.288 |

Πίνακας 5.8: Πιθανότητες αστοχίας ομάδας σεναρίων Α2 (χαμηλή αρδευτική κατανάλωση).

| Αρδευτική ζήτηση Κέδρου (hm ³ /έτος) | Ετήσια πιθανότητα αστοχίας | | | |
|---|----------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|
| | Ελάχιστη παροχή Σοφαδίτη | Ελάχιστη στάθμη ταμιευτήρα | Άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 | Άρδευση κατάντη Κέδρου |
| 25.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 30.0 | 0.000 | 0.007 | 0.008 | 0.009 |
| 35.0 | 0.000 | 0.032 | 0.032 | 0.042 |
| 40.0 | 0.000 | 0.065 | 0.069 | 0.083 |
| 45.0 | 0.000 | 0.140 | 0.112 | 0.130 |
| 50.0 | 0.000 | 0.148 | 0.161 | 0.191 |
| 55.0 | 0.000 | 0.199 | 0.217 | 0.248 |
| 60.0 | 0.000 | 0.259 | 0.274 | 0.310 |



Σχήμα 5.11: Πιθανότητα αστοχίας αρδευτικών στόχων, συναρτήσει της ετήσιας αρδευτικής ζήτησης κατάνη του Κέδρου, με βάση τα σενάρια υψηλής αρδευτικής κατανάλωσης (A1).



Σχήμα 5.12: Πιθανότητα αστοχίας αρδευτικών στόχων, συναρτήσει της ετήσιας αρδευτικής ζήτησης κατάνη του Κέδρου, με βάση τα σενάρια χαμηλής αρδευτικής κατανάλωσης (A2).

Δεχόμενοι επίπεδο αξιοπιστίας της λειτουργίας του αρδευτικού δικτύου Σμοκόβου της τάξης του 90%, και με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, εκτιμάται ότι η ονομαστική ετήσια απόληψη για άρδευση των περιοχών κατάνη του φράγματος (η οποία δίνεται επιπλέον της οικολογικής παροχής των 10.0 hm³/έτος), ανέρχεται σε περίπου 35.0 hm³ για το σενάριο υψηλής κατανάλωσης, που είναι και το πλέον ρεαλιστικό, αν ληφθεί υπόψη ότι το συντριπτικά μεγαλύτερο τμήμα των ζωνών Σ1 και

Σ2 εξυπηρετείται από προσωρινά έργα (τάφροι και ρουφράκτες). Ωστόσο, αν θεωρηθεί το σενάριο χαμηλής κατανάλωσης, που υποθέτει πλήρη ανάπτυξη του δικτύου αγωγών υπό πίεση, θα μπορούν να δοθούν κατάντη μέχρι και 45.0 hm³ ετησίως. Και στις δύο περιπτώσεις, η ζήτηση καλύπτεται με ελαφρά μικρότερη αξιοπιστία σε σχέση με αυτή του αρδευτικού δικτύου Σμοκόβου, καθώς ο σχετικός στόχος βρίσκεται σε χαμηλότερη ιεραρχία. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση μη επαρκών αποθεμάτων, και μέχρι το επιτρεπόμενο όριο των 65 hm³, ικανοποιείται κατά προτεραιότητα η ζήτηση μέσω της σήραγγας Λεονταρίου, εις βάρος της ζήτησης κατάντη του Κέδρου. Όσον αφορά στον περιορισμό της ελάχιστης διατηρητέας παροχής του Σοφαδίτη (που αντιστοιχεί σε ετήσια εκροή 10.0 hm³), αυτός ικανοποιείται με 100% αξιοπιστία, καθώς τίθεται σε απόλυτη προτεραιότητα.

5.4.3 Σενάριο Β: Ένταξη υδροηλεκτρικού σταθμού Λεονταρίου

Με την ένταξη του ΗΥΣ Λεονταρίου, που προβλέπεται να ολοκληρωθεί βραχυπρόθεσμα, εισάγεται στο υδροσύστημα μια επιπλέον χρήση νερού, που αφορά στην παραγωγή ενέργειας. Η χρήση αυτή διαφοροποιεί την διαχειριστική πολιτική του ταμιευτήρα, καθώς καθιστά οικονομικά πρόσφορη την πραγματοποίηση εκροών όχι μόνο την αρδευτική περίοδο αλλά και κατά την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου, μέσω της σήραγγας Λεονταρίου. Στις αναλύσεις, η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας τίθεται σε υψηλότερη προτεραιότητα σε σχέση με την άρδευση των καταναλωτών κατάντη του Κέδρου, με την οποία είναι ανταγωνιστική. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμη η μείωση των αρδευτικών απολήψεων κατάντη του φράγματος στα επίπεδα των 20.0 hm³/έτος, τιμή που ισούται με το διπλάσιο της ετήσιας οικολογικής παροχής. Οι υδατικοί πόροι που εξοικονομούνται είναι διαθέσιμοι τους υπόλοιπους μήνες του έτους για την παραγωγή ενέργειας. Θεωρώντας την τυπική μηνιαία κατανομή της αρδευτικής ζήτησης των 20.0 hm³/έτος και λαμβάνοντας σταθερή την παροχή που δίνεται την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου (εισάγοντας περιορισμό ελάχιστης ροής στη σήραγγα Λεονταρίου), εκτιμήθηκαν, μέσω προσομοίωσης, οι πιθανότητες αστοχίας των στόχων και περιορισμών του συστήματος, για εύρος τιμών ελάχιστης ροής από 0.5 έως 3.0 m³/s, ήτοι μέχρι την παροχευτικότητα της σήραγγας. Κατά την αρδευτική περίοδο δεν τέθηκε σχετικός περιορισμός ελάχιστης ροής για παραγωγή ενέργειας, υποθέτοντας ότι η διαχείριση του ταμιευτήρα καθορίζεται αποκλειστικά από τις αρδευτικές και περιβαλλοντικές χρήσεις, ενώ η παραγωγή ενέργειας ακολουθεί την κατανομή των απολήψεων για άρδευση των ζωνών Σ1 και Σ2. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα σενάρια υψηλής και χαμηλής κατανάλωσης δίνονται τους Πίνακες 5.9 και 5.10 **Error! Reference source not found.**, αντίστοιχα, ενώ οι πιθανότητες αστοχίας των αρδευτικών στόχων (άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 και άρδευση κατάντη Κέδρου) δίνονται και σε μορφή διαγραμμάτων, στα Σχήματα 5.13 και 5.14, αντίστοιχα.

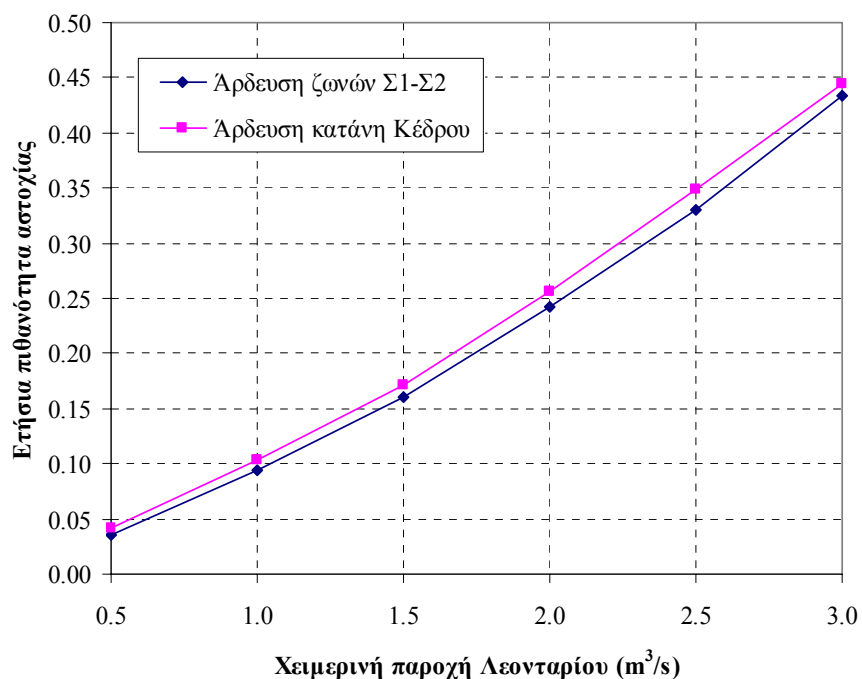
Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι, προκειμένου να εξασφαλιστεί επίπεδο αξιοπιστίας 10% τόσο στη χημερινή παραγωγή ενέργειας όσο και στην άρδευση των ζωνών Σ1-Σ2, η χημερινή εκροή από τη σήραγγα Λεονταρίου εκτιμάται σε 1.0 m³/s, για το σενάριο υψηλής κατανάλωσης, ενώ μπορεί να αυξηθεί στα επίπεδα των 1.6 m³/s, για το σενάριο χαμηλής κατανάλωσης.

Πίνακας 5.9: Πιθανότητες αστοχίας ομάδας σεναρίων B1 (υψηλή αρδευτική κατανάλωση).

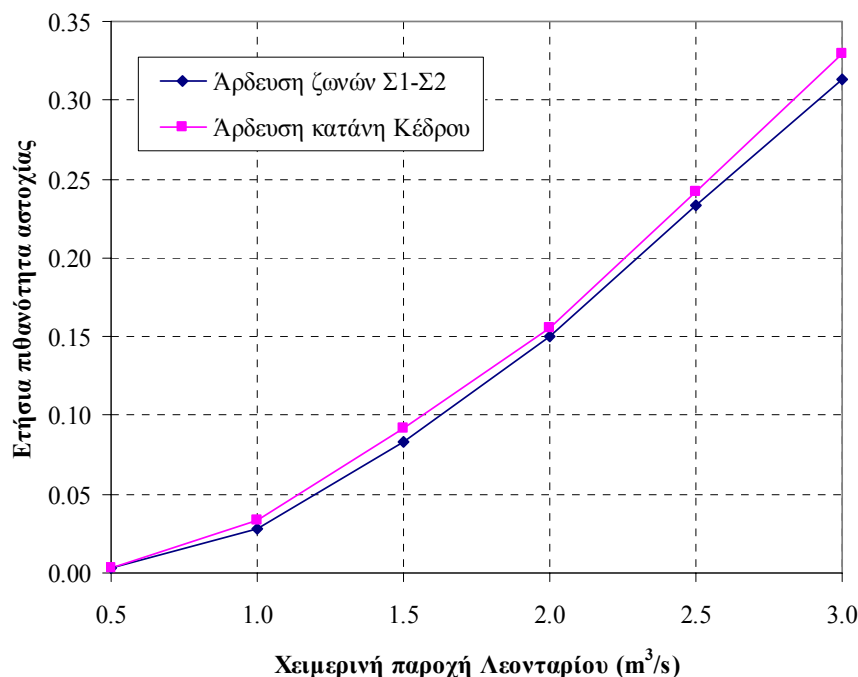
| Χειμερινή παροχή Λεονταρίου (m^3/s) | Ετήσια πιθανότητα αστοχίας | | | | |
|--|--------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| | Ελάχιστη παροχή Σοφαδίτη | Ελάχιστη στάθμη ταμειυτήρα | Άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 | Χειμερινή παραγωγή ενέργειας | Άρδευση κατάντη Κέδρου |
| 0.5 | 0.000 | 0.033 | 0.036 | 0.030 | 0.041 |
| 1.0 | 0.000 | 0.090 | 0.094 | 0.089 | 0.103 |
| 1.5 | 0.000 | 0.148 | 0.161 | 0.165 | 0.172 |
| 2.0 | 0.000 | 0.224 | 0.243 | 0.265 | 0.256 |
| 2.5 | 0.000 | 0.310 | 0.331 | 0.363 | 0.348 |
| 3.0 | 0.000 | 0.399 | 0.433 | 0.478 | 0.445 |

Πίνακας 5.10: Πιθανότητες αστοχίας ομάδας σεναρίων B2 (χαμηλή αρδευτική κατανάλωση).

| Χειμερινή παροχή Λεονταρίου (m^3/s) | Ετήσια πιθανότητα αστοχίας | | | | |
|--|--------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| | Ελάχιστη παροχή Σοφαδίτη | Ελάχιστη στάθμη ταμειυτήρα | Άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 | Χειμερινή παραγωγή ενέργειας | Άρδευση κατάντη Κέδρου |
| 0.5 | 0.000 | 0.001 | 0.003 | 0.002 | 0.003 |
| 1.0 | 0.000 | 0.026 | 0.028 | 0.029 | 0.034 |
| 1.5 | 0.000 | 0.080 | 0.083 | 0.095 | 0.092 |
| 2.0 | 0.000 | 0.135 | 0.150 | 0.169 | 0.156 |
| 2.5 | 0.000 | 0.212 | 0.233 | 0.270 | 0.242 |
| 3.0 | 0.000 | 0.297 | 0.313 | 0.368 | 0.329 |



Σχήμα 5.13: Πιθανότητα αστοχίας αρδευτικών στόχων, συναρτήσει της χειμερινής παροχής του ΥΗΣ Λεονταρίου, με βάση τα σεναρία υψηλής αρδευτικής κατανάλωσης (B1).



Σχήμα 5.14: Πιθανότητα αστοχίας αρδευτικών στόχων, συναρτήσει της χειμερινής παροχής του ΥΗΣ Λεονταρίου, με βάση τα σενάρια χαμηλής αρδευτικής κατανάλωσης (B2).

5.4.4 Σενάριο Γ: Ένταξη υδρευτικών έργων και αρδευτικής ζώνης Σ3

Στο Σενάριο Γ, που μπορεί να υλοποιηθεί σε μεσοπρόθεσμο ή μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα, προστίθενται ο στόχος ύδρευσης των οικισμών της Ανατολικής Καρδίτσας, ο οποίος τίθεται στην υψηλότερη προτεραιότητα, και ο στόχος άρδευσης της ζώνης Σ3, έκτασης 37.8 km². Η προσθήκη των καταναλωτικών αυτών χρήσεων, σε συνδυασμό με τις χειμερινές απολήψεις για παραγωγή ενέργειας, δεν επιτρέπει την πραγματοποίηση αρδευτικών απολήψεων κατάντη του Κέδρου, με διατήρηση του επιθυμητού επιπέδου αξιοπιστίας των διαφόρων στόχων. Κατά συνέπεια, οι προσομοιώσεις γίνονται θεωρώντας ως μοναδική εκροή κατάντη του φράγματος αυτή που δίνεται για την περιβαλλοντική προστασία του Σοφαδίτη. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων, με τη μορφή πιθανοτήτων αστοχίας, για τα σενάρια υψηλής και χαμηλής αρδευτικής κατανάλωσης, συνοψίζονται στους Πίνακες 5.11 και 5.10, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα που αφορούν στους αρδευτικούς στόχους των ζωνών Σ1-Σ2 και Σ3 δίνονται σε μορφή διαγραμμάτων, στα Σχήματα 5.15 και 5.16, αντίστοιχα.

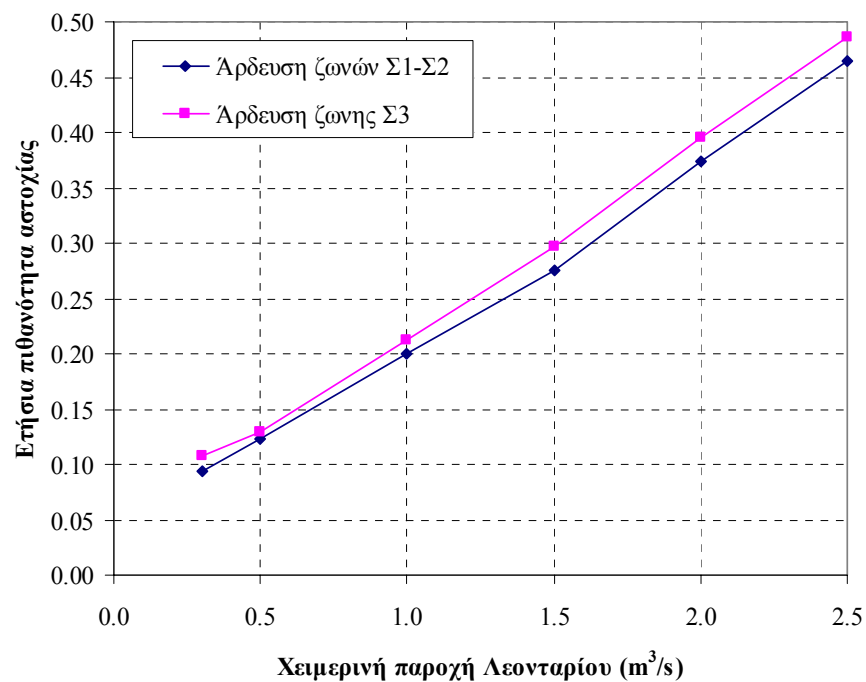
Πίνακας 5.11: Πιθανότητες αστοχίας ομάδας σεναρίων Γ1 (υψηλή αρδευτική κατανάλωση).

| Χειμερινή παροχή Λεονταρίου (m³/s) | Ετήσια πιθανότητα αστοχίας | | | | | |
|------------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|------------------|------------------------------|
| | Ύδρευση Ανατ. Καρδίτσας | Ελάχιστη παροχή Σοφαδίτη | Ελάχιστη στάθμη ταμιευτήρα | Άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 | Άρδευση ζώνης Σ3 | Χειμερινή παραγωγή ενέργειας |
| 0.3 | 0.000 | 0.000 | 0.098 | 0.094 | 0.108 | 0.000 |
| 0.5 | 0.000 | 0.000 | 0.116 | 0.123 | 0.130 | 0.103 |
| 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.193 | 0.200 | 0.212 | 0.187 |
| 1.5 | 0.000 | 0.000 | 0.273 | 0.276 | 0.297 | 0.281 |
| 2.0 | 0.000 | 0.000 | 0.364 | 0.374 | 0.396 | 0.389 |
| 2.5 | 0.000 | 0.000 | 0.459 | 0.464 | 0.486 | 0.495 |

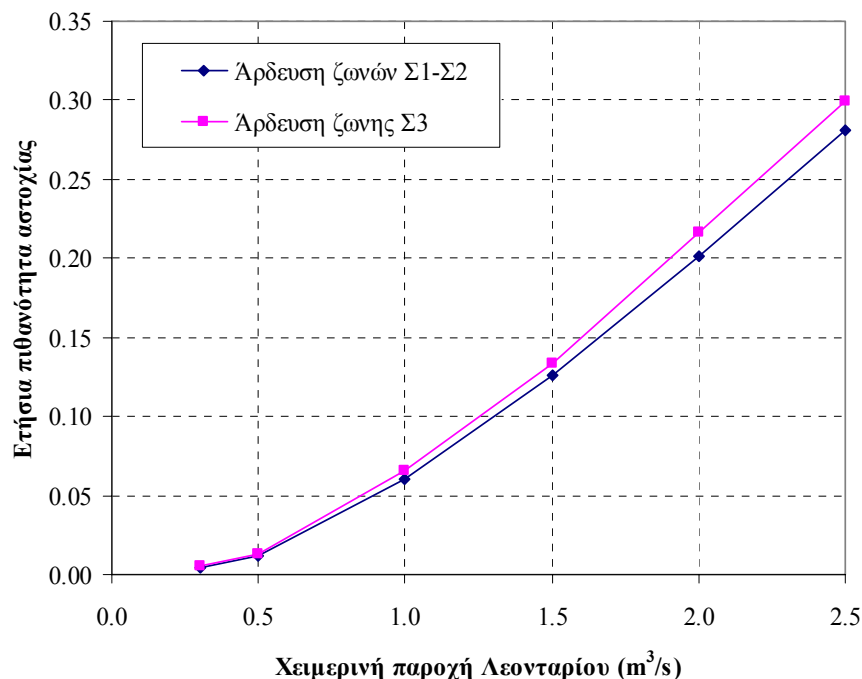
Πίνακας 5.12: Πιθανότητες αστοχίας ομάδας σεναρίων Γ2 (χαμηλή αρδευτική κατανάλωση).

| Χειμερινή παροχή Λεονταρίου (m^3/s) | Ετήσια πιθανότητα αστοχίας | | | | | |
|---|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|------------------|------------------------------|
| | Ύδρευση Ανατ. Καρδίτσας | Ελάχιστη παροχή Σοφαδίτη | Ελάχιστη στάθμη ταμειυτήρα | Άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 | Άρδευση ζώνης Σ3 | Χειμερινή παραγωγή ενέργειας |
| 0.3 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.004 | 0.005 | 0.000 |
| 0.5 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.012 | 0.013 | 0.011 |
| 1.0 | 0.000 | 0.000 | 0.057 | 0.060 | 0.066 | 0.061 |
| 1.5 | 0.000 | 0.000 | 0.119 | 0.126 | 0.134 | 0.134 |
| 2.0 | 0.000 | 0.000 | 0.199 | 0.201 | 0.217 | 0.216 |
| 2.5 | 0.000 | 0.000 | 0.275 | 0.281 | 0.299 | 0.324 |

Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι, προκειμένου να τηρηθεί το επιθυμητό όριο αξιοπιστίας 90%, για το σενάριο διαμόρφωσης των προσωρινών έργων (που συνεπάγεται υψηλή αρδευτική κατανάλωση), δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί επιπλέον απόληψη, μέσω της σήραγγας Λεονταρίου, για παραγωγή ενέργειας πέραν αυτής που προορίζεται για ύδρευση των οικισμών της Ανατολικής Καρδίτσας, ήτοι $0.83 \text{ hm}^3/\text{μήνα}$ ή περίπου $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Αντίθετα, αν θεωρηθεί το σενάριο χαμηλής κατανάλωσης στις αρδευόμενες ζώνες Σμοκόβου, τότε θα μπορούν να δοθούν $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, ήτοι $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ παραπάνω από την υδρευτική ζήτηση, για την παραγωγή ενέργειας κατά την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου.



Σχήμα 5.15: Πιθανότητα αστοχίας αρδευτικών στόχων, συναρτήσει της χειμερινής παροχής του ΥΗΣ Λεονταρίου, με βάση τα σενάρια υψηλής αρδευτικής κατανάλωσης (Γ1).



Σχήμα 5.16: Πιθανότητα αστοχίας αρδευτικών στόχων, συναρτήσεως της χειμερινής παροχής του ΥΗΣ Λεονταρίου, με βάση τα σενάρια χαμηλής αρδευτικής κατανάλωσης (Γ2).

5.4.5 Σενάριο Δ: Ένταξη αρδευτικής ζώνης Σ4

Στο Σενάριο Δ προστίθενται ο στόχος άρδευσης της ζώνης Σ4¹, έκτασης 40.0 km², με τον οποίο η συνολική ζήτηση των αρδευτικών δικτύων Σμοκόβου ανέρχεται στα 85.9 hm³ για το σενάριο υψηλής κατανάλωσης και στα 66.1 hm³ για το σενάριο χαμηλής κατανάλωσης (ανάπτυξη δικτύων κλειστών αγωγών). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων, με τη μορφή πιθανοτήτων αστοχίας, για τα σενάρια υψηλής και χαμηλής κατανάλωσης, συνοψίζονται στον Πίνακα 5.13.

Πίνακας 5.13: Πιθανότητες αστοχίας ομάδας σεναρίων Δ.

| Στόχος | Υψηλή κατανάλωση | Χαμηλή κατανάλωση |
|----------------------------|------------------|-------------------|
| Υδρευση Ανατ. Καρδίτσας | 0.000 | 0.000 |
| Ελάχιστη παροχή Σοφαδίτη | 0.000 | 0.000 |
| Ελάχιστη στάθμη ταμειυτήρα | 0.391 | 0.149 |
| Άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 | 0.397 | 0.149 |
| Άρδευση ζώνης Σ3 | 0.422 | 0.158 |
| Άρδευση ζώνης Σ4 | 0.446 | 0.165 |

Με την προσθήκη της ζώνης Σ4, και με θεώρηση του σεναρίου υψηλής κατανάλωσης, προκύπτουν απαράδεκτα χαμηλά επίπεδα αξιοπιστίας, της τάξης του 55-60%. Αντίθετα, με το σενάριο χαμηλής κατανάλωσης είναι εφικτή η ικανοποίηση της αρδευτικής ζήτησης σε όλη την έκταση των ζωνών Σ1-Σ4, με την προϋπόθεση ότι κατά την αρδευτική περίοδο δεν πραγματοποιείται εκροή από τον ταμειυτήρα επιπλέον της περιβαλλοντικής παροχής, και ομοίως κατά τη χειμερινή περίοδο δεν πραγματοποιείται απόληψη μέσω της σήραγγας Λεονταρίου επιπλέον της υδρευτικής ζήτησης.

¹ Η ζώνη Σ4 επιλέχθηκε ενδεικτικά, λόγω της εγγύτητάς της με τις προηγούμενες ζώνες. Προφανώς, η χωρική κατανομή της ζήτησης θα εξαρτηθεί από την εξέλιξη των έργων και τη διαχειριστική πολιτική του Φορέα.

5.4.6 Σενάριο Ε: Πλήρης ανάπτυξη αρδευτικού δικτύου

Στο Σενάριο Ε θεωρείται ότι το δίκτυο αναπτύσσεται στο σύνολό του, δηλαδή σε όλη της έκταση των 250 000 στρεμμάτων που προβλέπονται από τις προηγούμενες μελέτες του έργου. Στην περίπτωση αυτή, η συνολική ζήτηση των αρδευτικών δικτύων ανέρχεται στα 149.3 hm³ για το σενάριο υψηλής κατανάλωσης και στα 114.9 hm³ για το σενάριο χαμηλής κατανάλωσης, ποσότητες που είναι αδύνατο να καλυφθούν από το διαθέσιμο υδατικό δυναμικό του ταμιευτήρα, καθώς ξεπερνούν κατά πολύ (ιδιαίτερη η πρώτη) τη μέση εισροή των 105.1 hm³. Στον Πίνακα 5.14 δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα δύο σενάρια κατανάλωσης, από τα οποία προκύπτει απaráδεκτα υψηλή πιθανότητα αστοχίας για την κάλυψη των αρδευτικών στόχων του υδροσυστήματος. Ωστόσο, τόσο η ύδρευση των οικισμών της Ανατολικής Καρδίτσας όσο και η περιβαλλοντική εκροή στο Σοφαδίτη καλύπτονται με πλήρη αξιοπιστία, γεγονός που αποδίδεται στον περιορισμό ελάχιστης στάθμης, που δεν επιτρέπει την πραγματοποίηση αρδευτικών απολήψεων όταν αυτή φτάσει στα +345.0 m.

Πίνακας 5.14: Πιθανότητες αστοχίας ομάδας σεναρίων Ε.

| Στόχος | Υψηλή κατανάλωση | Χαμηλή κατανάλωση |
|----------------------------|------------------|-------------------|
| Ύδρευση Ανατ. Καρδίτσας | 0.000 | 0.000 |
| Ελάχιστη παροχή Σοφαδίτη | 0.000 | 0.000 |
| Ελάχιστη στάθμη ταμιευτήρα | 0.768 | 0.675 |
| Άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 | 0.775 | 0.674 |
| Άρδευση ζώνης Σ3 | 0.792 | 0.688 |
| Άρδευση ζώνης Σ4 | 0.808 | 0.705 |
| Άρδευση ζωνών Σ5-Σ8 | 1.000 | 1.000 |

5.5 Σενάριο διαχείρισης υφιστάμενων έργων

5.5.1 Διατύπωση διαχειριστικού προβλήματος

Στο υφιστάμενο σχήμα έργων, όπως απεικονίζεται στο δικτυακό μοντέλο του Σχήματος 5.3, διατηρούνται οι περιορισμοί της ελάχιστης περιβαλλοντικής εκροής κατάντη του φράγματος και της ελάχιστης επιθυμητής στάθμης απολήψεων (σε πρώτη και δεύτερη προτεραιότητα, αντίστοιχα), ενώ ορίζονται τρεις κατηγορίες αρδευτικών καταναλωτών:

- οι καταναλωτές που εξυπηρετούνται από τα κλειστά αρδευτικά δίκτυα των ζωνών Σ2, Σ3 και Σ4, με ετήσια ζήτηση 500 m³/στρέμμα·
- οι καταναλωτές που εξυπηρετούνται στις ενδιάμεσες περιοχές των ζωνών Σ2, Σ3 και Σ4, οι οποίες διατρέχονται από τον αντίστοιχο κεντρικό αγωγό υπό πίεση, από όπου πραγματοποιείται εκροή προς τις χωμάτινες τάφρους, με ετήσια ζήτηση 600 m³/στρέμμα (ενδιάμεση τιμή, που προκύπτει με βάση την υπόθεση ότι μέρος της διανομής του νερού γίνεται από κλειστό δίκτυο)·
- οι καταναλωτές που εξυπηρετούνται από τα προσωρινά έργα και αποστραγγιστικά δίκτυα όλων των ζωνών, με ετήσια ζήτηση 650 m³/στρέμμα.

Στις προσομοιώσεις θεωρείται ότι εξυπηρετούνται σε ποσοστό 100% οι εκτάσεις που αντιστοιχούν στις πρώτες δύο κατηγορίες αρδευτικών καταναλωτών, ενώ η ζήτηση της τρίτης κατηγορίας ορίζεται ως ποσοστό της μέγιστης (ήτοι αυτής που αντιστοιχεί στην πλήρη αρδευόμενη έκταση κάθε ζώνης). Το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 100% έως 30%, με διαβάθμιση 10%, ενώ τα σχετικά ελλείμματα που προκύπτουν ισοκατανέμονται με βάση τις αντίστοιχες εκτάσεις. Συνεπώς, προκύπτουν 8 σενάρια κάλυψης της ζήτησης των περιοχών που εξυπηρετούνται αποκλειστικά από προσωρινά έργα και αποστραγγιστικά δίκτυα, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια. Στον Πίνακα 5.15 συνοψίζονται τα

χαρακτηριστικά μεγέθη όλων των αρδευτικών χρήσεων του υφιστάμενου υδροσυστήματος, ενώ στον Πίνακα 5.16 παρατίθενται οι τιμές της ονομαστικής ετήσιας ζήτησης (σταθερή ή μεταβλητή, με βάση το αντίστοιχο ποσοστό κατανάλωσης) για κάθε αρδευτική χρήση.

Πίνακας 5.15: Χαρακτηριστικά μεγέθη αρδευτικών στόχων υφιστάμενου σχήματος έργων (η ετήσια ζήτηση αντιστοιχεί σε άρδευση του 100% της θεωρητικής έκτασης).

| Διαχειριστικός στόχος | Έκταση (km ²) | Ετήσιες ανάγκες (m ³ /στρέμμα) | Ετήσια ζήτηση (hm ³) |
|------------------------|---------------------------|---|----------------------------------|
| Άρδευση Σ2 (κλειστά) | 6.0 | 500 | 3.0 |
| Άρδευση Σ3 (κλειστά) | 7.5 | 500 | 3.8 |
| Άρδευση Σ4 (κλειστά) | 5.7 | 500 | 2.9 |
| Άρδευση Σ2 (ενδιάμεση) | 7.8 | 600 | 4.7 |
| Άρδευση Σ3 (ενδιάμεση) | 7.4 | 600 | 4.4 |
| Άρδευση Σ4 (ενδιάμεση) | 7.3 | 600 | 4.4 |
| Άρδευση Σ1 (τάφροι) | 17.6 | 650 | 11.4 |
| Άρδευση Σ2 (τάφροι) | 22.9 | 650 | 14.9 |
| Άρδευση Σ3 (τάφροι) | 22.9 | 650 | 14.9 |
| Άρδευση Σ4 (τάφροι) | 27.0 | 650 | 17.6 |
| Άρδευση Σ5-Σ8 (τάφροι) | 97.5 | 650 | 63.4 |
| Σύνολο | 229.6 | | 145.2 |

Πίνακας 5.16: Ονομαστική ετήσια ζήτηση αρδευτικών καταναλωτών (σε hm³) για διάφορα ποσοστά ζήτησης νερού στις ζώνες που εξυπηρετούνται από προσωρινά έργα και τάφρους.

| Στόχος / ποσοστό | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% | 40% | 30% |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Άρδευση Σ2 (κλειστά) | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 |
| Άρδευση Σ3 (κλειστά) | 3.750 | 3.750 | 3.750 | 3.750 | 3.750 | 3.750 | 3.750 | 3.750 |
| Άρδευση Σ4 (κλειστά) | 2.850 | 2.850 | 2.850 | 2.850 | 2.850 | 2.850 | 2.850 | 2.850 |
| Άρδευση Σ2 (ενδιάμεση) | 4.680 | 4.680 | 4.680 | 4.680 | 4.680 | 4.680 | 4.680 | 4.680 |
| Άρδευση Σ3 (ενδιάμεση) | 4.440 | 4.440 | 4.440 | 4.440 | 4.440 | 4.440 | 4.440 | 4.440 |
| Άρδευση Σ4 (ενδιάμεση) | 4.380 | 4.380 | 4.380 | 4.380 | 4.380 | 4.380 | 4.380 | 4.380 |
| Άρδευση Σ1 (τάφροι) | 14.885 | 13.397 | 11.908 | 10.420 | 8.931 | 7.443 | 5.954 | 4.466 |
| Άρδευση Σ2 (τάφροι) | 14.885 | 13.397 | 11.908 | 10.420 | 8.931 | 7.443 | 5.954 | 4.466 |
| Άρδευση Σ3 (τάφροι) | 17.550 | 15.795 | 14.040 | 12.285 | 10.530 | 8.775 | 7.020 | 5.265 |
| Άρδευση Σ4 (τάφροι) | 63.375 | 57.038 | 50.700 | 44.363 | 38.025 | 31.688 | 25.350 | 19.013 |
| Άρδευση Σ5-Σ8 (τάφροι) | 11.440 | 10.296 | 9.152 | 8.008 | 6.864 | 5.720 | 4.576 | 3.432 |

5.5.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συνοψίζονται στους Πίνακες 5.17, 5.18 και 5.19, όπου δίνονται οι τιμές της ετήσιας πιθανότητας αστοχίας, του μέσου ετήσιου ελλείμματος και του μέσου ποσοστιαίου ελλείμματος, για τα διάφορα ποσοστά ζήτησης νερού στις ζώνες που εξυπηρετούνται από προσωρινά έργα και τάφρους (από 100 έως 30%). Ακόμη, οι πιθανότητες αστοχίας όλων των στόχων του υδροσυστήματος συναρτήσει του ποσοστού αρδευτικής ζήτησης (πλην της οικολογικής παροχής του Σοφαδίτη, η οποία ικανοποιείται με μηδενική αστοχία, δεδομένου ότι έχει τεθεί σε απόλυτη προτεραιότητα) απεικονίζονται στο Σχήμα 5.17.

Από τις αναλύσεις είναι φανερό ότι η πιθανότητα αστοχίας όλων των στόχων του συστήματος, καθώς και τα αντίστοιχα ελλείμματα, μειώνονται σημαντικά με τη μείωση των εκτάσεων που αρδεύονται

από προσωρινά έργα και τάφρους. Ειδικότερα, αν θεωρηθεί 100% ονομαστική ζήτηση σε σχέση με τη θεωρητική, τότε η εν λόγω πιθανότητα κυμαίνεται από 77-78%, στις περιοχές που εξυπηρετούνται από κλειστά δίκτυα (ήτοι τέσσερα κατά μέσο όρο ελλειμματικά έτη ανά πενταετία) έως 100% στις ζώνες Σ5-Σ8. Αντίθετα, αν η ονομαστική ζήτηση τεθεί ίση με το 50% της θεωρητικής (κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με συνδυασμό περιορισμού των αρδευόμενων εκτάσεων και των ανά στρέμμα αρδευτικών αναγκών, με τη λήψη μέτρων διαχείρισης της ζήτησης) τότε η πιθανότητα αστοχίας των αρδευτικών στόχων πέφτει στα ανεκτά επίπεδα του 22-25%, με το σχετικό έλλειμμα να κυμαίνεται από 5.2 έως 11.4%. Η εν λόγω πιθανότητα αστοχίας δεν ξεπερνά το 13%, όταν το ποσοστό της ζήτησης μειωθεί περαιτέρω, στα επίπεδα του 40%.

Πίνακας 5.17: Ετήσια πιθανότητα αστοχίας στόχων υφιστάμενου σχήματος έργων για διάφορα ποσοστά ζήτησης νερού στις ζώνες που εξυπηρετούνται από προσωρινά έργα και τάφρους.

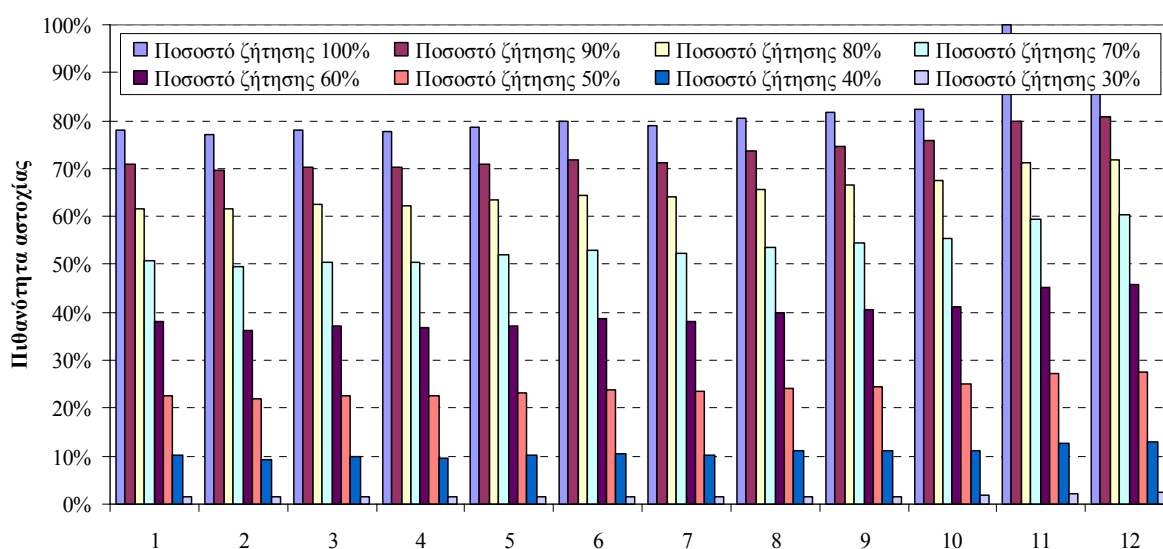
| Στόχος / ποσοστό | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% | 40% | 30% |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ελάχιστη παροχή Σοφαδίτη | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Ελάχιστη στάθμη ταμιευτήρα | 0.781 | 0.709 | 0.616 | 0.509 | 0.381 | 0.227 | 0.103 | 0.016 |
| Άρδευση Σ2 (κλειστά) | 0.771 | 0.698 | 0.617 | 0.495 | 0.361 | 0.220 | 0.093 | 0.014 |
| Άρδευση Σ3 (κλειστά) | 0.780 | 0.703 | 0.624 | 0.506 | 0.370 | 0.227 | 0.099 | 0.015 |
| Άρδευση Σ4 (κλειστά) | 0.777 | 0.702 | 0.622 | 0.504 | 0.368 | 0.225 | 0.095 | 0.015 |
| Άρδευση Σ2 (ενδιάμεση) | 0.786 | 0.709 | 0.636 | 0.520 | 0.373 | 0.233 | 0.102 | 0.016 |
| Άρδευση Σ3 (ενδιάμεση) | 0.798 | 0.717 | 0.645 | 0.530 | 0.388 | 0.238 | 0.106 | 0.016 |
| Άρδευση Σ4 (ενδιάμεση) | 0.789 | 0.713 | 0.642 | 0.522 | 0.381 | 0.234 | 0.103 | 0.016 |
| Άρδευση Σ1 (τάφροι) | 0.805 | 0.737 | 0.656 | 0.537 | 0.400 | 0.242 | 0.111 | 0.016 |
| Άρδευση Σ2 (τάφροι) | 0.816 | 0.745 | 0.666 | 0.545 | 0.407 | 0.246 | 0.113 | 0.017 |
| Άρδευση Σ3 (τάφροι) | 0.822 | 0.759 | 0.675 | 0.554 | 0.412 | 0.250 | 0.113 | 0.019 |
| Άρδευση Σ4 (τάφροι) | 1.000 | 0.800 | 0.713 | 0.595 | 0.451 | 0.273 | 0.128 | 0.023 |
| Άρδευση Σ5-Σ8 (τάφροι) | 0.863 | 0.807 | 0.719 | 0.603 | 0.459 | 0.276 | 0.130 | 0.024 |

Πίνακας 5.18: Μέσο ετήσιο έλλειμμα αρδευτικών καταναλωτών (σε hm³) για διάφορα ποσοστά ζήτησης νερού στις ζώνες που εξυπηρετούνται από προσωρινά έργα και τάφρους.

| Στόχος / ποσοστό | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% | 40% | 30% |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Άρδευση Σ2 (κλειστά) | 0.955 | 0.819 | 0.677 | 0.512 | 0.355 | 0.196 | 0.077 | 0.011 |
| Άρδευση Σ3 (κλειστά) | 0.915 | 0.790 | 0.655 | 0.496 | 0.349 | 0.194 | 0.079 | 0.010 |
| Άρδευση Σ4 (κλειστά) | 1.170 | 1.007 | 0.836 | 0.632 | 0.441 | 0.245 | 0.098 | 0.013 |
| Άρδευση Σ2 (ενδιάμεση) | 1.551 | 1.342 | 1.120 | 0.855 | 0.603 | 0.342 | 0.139 | 0.019 |
| Άρδευση Σ3 (ενδιάμεση) | 1.526 | 1.324 | 1.117 | 0.846 | 0.597 | 0.342 | 0.145 | 0.019 |
| Άρδευση Σ4 (ενδιάμεση) | 1.499 | 1.297 | 1.085 | 0.829 | 0.580 | 0.332 | 0.138 | 0.019 |
| Άρδευση Σ1 (τάφροι) | 5.304 | 4.177 | 3.104 | 2.090 | 1.256 | 0.609 | 0.215 | 0.021 |
| Άρδευση Σ2 (τάφροι) | 5.569 | 4.422 | 3.261 | 2.213 | 1.316 | 0.657 | 0.226 | 0.021 |
| Άρδευση Σ3 (τάφροι) | 6.928 | 5.433 | 4.019 | 2.802 | 1.631 | 0.819 | 0.267 | 0.026 |
| Άρδευση Σ4 (τάφροι) | 28.141 | 22.296 | 16.748 | 11.454 | 6.945 | 3.337 | 1.148 | 0.118 |
| Άρδευση Σ5-Σ8 (τάφροι) | 5.632 | 4.408 | 3.331 | 2.302 | 1.415 | 0.653 | 0.236 | 0.025 |

Πίνακας 5.19: Μέσο ετήσιο ποσοστιαίο έλλειμμα (%) αρδευτικών καταναλωτών για διάφορα ποσοστά ζήτησης νερού στις ζώνες που εξυπηρετούνται από προσωρινά έργα και τάφρους.

| Στόχος / ποσοστό | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% | 40% | 30% |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| Άρδευση Σ2 (κλειστά) | 31.8 | 27.3 | 22.6 | 17.1 | 11.8 | 6.5 | 2.6 | 0.4 |
| Άρδευση Σ3 (κλειστά) | 24.4 | 21.1 | 17.5 | 13.2 | 9.3 | 5.2 | 2.1 | 0.3 |
| Άρδευση Σ4 (κλειστά) | 41.1 | 35.3 | 29.3 | 22.2 | 15.5 | 8.6 | 3.4 | 0.5 |
| Άρδευση Σ2 (ενδιάμεση) | 33.1 | 28.7 | 23.9 | 18.3 | 12.9 | 7.3 | 3.0 | 0.4 |
| Άρδευση Σ3 (ενδιάμεση) | 34.4 | 29.8 | 25.2 | 19.1 | 13.4 | 7.7 | 3.3 | 0.4 |
| Άρδευση Σ4 (ενδιάμεση) | 34.2 | 29.6 | 24.8 | 18.9 | 13.2 | 7.6 | 3.2 | 0.4 |
| Άρδευση Σ1 (τάφροι) | 35.6 | 31.2 | 26.1 | 20.1 | 14.1 | 8.2 | 3.6 | 0.5 |
| Άρδευση Σ2 (τάφροι) | 37.4 | 33.0 | 27.4 | 21.2 | 14.7 | 8.8 | 3.8 | 0.5 |
| Άρδευση Σ3 (τάφροι) | 39.5 | 34.4 | 28.6 | 22.8 | 15.5 | 9.3 | 3.8 | 0.5 |
| Άρδευση Σ4 (τάφροι) | 44.4 | 39.1 | 33.0 | 25.8 | 18.3 | 10.5 | 4.5 | 0.6 |
| Άρδευση Σ5-Σ8 (τάφροι) | 49.2 | 42.8 | 36.4 | 28.7 | 20.6 | 11.4 | 5.2 | 0.7 |



Σχήμα 5.17: Πιθανότητα αστοχίας στόχων υφιστάμενου σχήματος έργων (πλην της οικολογικής παροχής) για διάφορα ποσοστά ζήτησης νερού στις ζώνες που εξυπηρετούνται από προσωρινά έργα και τάφρους (η αρίθμηση των στόχων ακολουθεί την σειρά με την οποία παρατίθενται στους προηγούμενους πίνακες).

5.6 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα των διαχειριστικών αναλύσεων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά στα θεωρητικά σενάρια της ενότητας 5.4 και σχετίζονται με υποθετικές, κατά κανόνα, διαχειριστικές πολιτικές που πρέπει να υιοθετηθούν ανάλογα με τα διάφορα στάδια ανάπτυξης των έργων, ενώ η δεύτερη αφορά στα σενάρια υφιστάμενης κατάστασης του υδροσυστήματος, που εξετάστηκαν στην ενότητα 5.5.

5.6.1 Υποθετικά σενάρια μερικής ανάπτυξης αρδευτικών δικτύων

Η απλούστερη διαμόρφωση του υδροσυστήματος που εξετάστηκε στα πλαίσια των υποθετικών διερευνήσεων αφορά στο διαχειριστικό σενάριο A1, στο οποίο θεωρείται ανάπτυξη των προσωρινών αρδευτικών έργων, για την εξυπηρέτηση των ζωνών Σ1 και Σ2, συνολικής έκτασης 54.3 km², χωρίς

δυνατότητα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Με την εν λόγω διάταξη, θεωρείται ρεαλιστική η θεώρηση αρδευτικής κατανάλωσης $650 \text{ m}^3/\text{στρέμμα}$, που μπορεί, βραχυπρόθεσμα, να μειωθεί σε $500 \text{ m}^3/\text{στρέμμα}$, εφόσον ολοκληρωθεί η κατασκευή του δικτύου κλειστών αγωγών υπό πίεση. Με βάση την πρώτη εκδοχή, η ετήσια ζήτηση των αρδευτικών ζωνών εκτιμάται σε 35.30 hm^3 , ενώ η μέγιστη μηνιαία τιμή είναι 8.54 hm^3 τον Ιούλιο. Η παραπάνω ποσότητα, που αντιστοιχεί σε παροχή $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$, είναι οριακά εφικτό να διοχετευτεί από τη σήραγγα Λεονταρίου, με βάση την υφιστάμενη παροχευτικότητα των σχετικών έργων.

Πίνακας 5.20: Προτεινόμενη απόληψη από τον ταμιευτήρα Σμοκόβου, για διάφορες χρήσεις νερού, με επίπεδο αξιοπιστίας 90% στην κάλυψη των αρδευτικής ζήτησης των ζωνών Σ1-Σ2 (εκροές σε hm^3).

| Μήνας | Περιβαλλοντική παροχή | Άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 | Άρδευση κατάντη Κέδρου |
|-------------|-----------------------|---------------------|------------------------|
| Απρίλιος | 0.36 | 2.33 | 2.31 |
| Μάιος | 1.76 | 4.45 | 4.41 |
| Ιούνιος | 2.43 | 7.16 | 7.11 |
| Ιούλιος | 2.93 | 8.54 | 8.47 |
| Αύγουστος | 1.84 | 7.66 | 7.60 |
| Σεπτέμβριος | 0.71 | 5.15 | 5.11 |
| Σύνολο | 10.00 | 35.30 | 35.00 |

Πίνακας 5.21: Προτεινόμενη απόληψη από τον ταμιευτήρα Σμοκόβου, για διάφορες χρήσεις νερού, με επίπεδο αξιοπιστίας 80% στην κάλυψη των αρδευτικής ζήτησης των ζωνών Σ1-Σ2 (εκροές σε hm^3).

| Μήνας | Περιβαλλοντική παροχή | Άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 | Άρδευση κατάντη Κέδρου |
|-------------|-----------------------|---------------------|------------------------|
| Απρίλιος | 0.36 | 2.33 | 2.97 |
| Μάιος | 1.76 | 4.45 | 5.67 |
| Ιούνιος | 2.43 | 7.16 | 9.14 |
| Ιούλιος | 2.93 | 8.54 | 10.89 |
| Αύγουστος | 1.84 | 7.66 | 9.77 |
| Σεπτέμβριος | 0.71 | 5.15 | 6.57 |
| Σύνολο | 10.00 | 35.30 | 45.00 |

Για το σενάριο αυτό, η διαχειριστική πολιτική του ταμιευτήρα, με βάση τις αναλύσεις του εδαφίου 5.4.2, συνοψίζεται ως εξής:

- Κατά την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου δεν πραγματοποιούνται εκροές από τον ταμιευτήρα, πέρα από τις υπερχειλίσεις.
- Κατά την αρδευτική περίοδο (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) πραγματοποιούνται, κατά προτεραιότητα, εκροές από το φράγμα για τη διατήρηση της προτεινόμενης από τη ΜΠΕ περιβαλλοντικής παροχής του Σοφαδίτη (συνολικά $10.0 \text{ hm}^3/\text{έτος}$).
- Την αρδευτική περίοδο πραγματοποιούνται εκροές από τη σήραγγα Λεονταρίου και το φράγμα, για την κάλυψη της ζήτησης των ζωνών Σ1-Σ2 (συνολικά $35.30 \text{ hm}^3/\text{έτος}$) και των αρδευόμενων εκτάσεων κατά μήκος του Σοφαδίτη, αντίστοιχα, ακολουθώντας τη μηνιαία κατανομή του Πίνακα 4.5. Σε περίπτωση χαμηλών αποθεμάτων, εξυπηρετείται κατά προτεραιότητα η αρδευτική ζήτηση των ζωνών Σ1-Σ2.
- Η αρδευτική απόληψη κατάντη του φράγματος δίνεται επιπλέον της περιβαλλοντικής εκροής (η οποία οφείλεται να διατηρείται καθ' όλο το μήκος του Σοφαδίτη), και κυμαίνεται από 35.00 έως $45.00 \text{ hm}^3/\text{έτος}$. Με τις παραπάνω ποσότητες εξασφαλίζεται αξιοπιστία 90 και 80%, αντίστοιχα,

για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών των ζωνών Σ1 και Σ2, με τα αντίστοιχα ποσοστά για την κάλυψη των αναγκών της ζώνης κατάντη Κέδρου να είναι ελαφρά μειωμένα (89% και 77%).

- Οι αρδευτικές απολήψεις πραγματοποιούνται μόνο εφόσον η στάθμη του ταμιευτήρα υπερβαίνει το επιθυμητό όριο των +345.0 m, διαφορετικά επιτρέπεται η εκροή νερού μόνο για την κάλυψη του περιβαλλοντικού περιορισμού κατάντη του φράγματος.

Οι μηνιαίες κατανομές των απολήψεων για τις προαναφερθείσες χρήσεις νερού, για τα δύο επίπεδα αξιοπιστίας (90% επιθυμητό, 80% ανεκτό) δίνονται στους Πίνακες 5.20 και 5.21, αντίστοιχα. Το μέσο ετήσιο έλλειμμα, με βάση το σενάριο εκροών που εξασφαλίζει υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας, ανέρχεται σε 0.95 και 1.29 hm³, για τον αρδευτική ζήτηση των ζωνών Σ1-Σ2 και της παραποτάμιας αρδευόμενης ζώνης κατάντη Κέδρου, αντίστοιχα. Τα μεγέθη αυτά αυξάνονται σε 2.09 και 3.73 hm³, αντίστοιχα, αν θεωρηθεί το σενάριο χαμηλής αξιοπιστίας.

5.6.2 Υποθετικά σενάρια μερικής ανάπτυξης δικτύων και χειμερινής λειτουργίας ΥΗΣ Λεονταρίου

Η διάταξη αυτή εξετάζεται στο διαχειριστικό σενάριο Β1, που είναι όπως το Α1 με την προσθήκη του υδροηλεκτρικού σταθμού Λεονταρίου. Στην περίπτωση αυτή, κρίνεται πρόσφορη η απόληψη μικρότερης ποσότητας νερού για άρδευση των παρακείμενων του Σοφαδίτη εκτάσεων, συγκεκριμένα 20.0 hm³/έτος, προς όφελος της παραγωγής ενέργειας, κατά την υγρή περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου. Η προτεινόμενη παροχή μέσω της σήραγγας Λεονταρίου κυμαίνεται από 1.0 m³/s, για το σενάριο υψηλής αρδευτικής κατανάλωσης, έως 1.6 m³/s, για το σενάριο χαμηλής κατανάλωσης, και διατηρείται σταθερή για την εν λόγω περίοδο. Τους υπόλοιπους μήνες του έτους, η παραγόμενη ενέργεια καθορίζεται από τις αρδευτικές απολήψεις για την εξυπηρέτηση των ζωνών Σ1 και Σ2. Η προτεινόμενη χρονική κατανομή των απολήψεων για κάθε χρήση νερού, με βάση το σενάριο υψηλής κατανάλωσης, συνοψίζεται στον Πίνακα 5.22.

Πίνακας 5.22: Προτεινόμενη απόληψη από τον ταμιευτήρα Σμοκόβου, για διάφορες χρήσεις νερού, με βάση τη βραχυπρόθεσμη κατάσταση του υδροσυστήματος (εκροές σε hm³).

| Μήνας | Περιβαλλοντική παροχή | Χειμερινή παροχή Λεονταρίου | Άρδευση ζωνών Σ1-Σ2 | Άρδευση κατάντη Κέδρου |
|-------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------|
| Οκτώβριος | – | 2.68 | – | – |
| Νοέμβριος | – | 2.59 | – | – |
| Δεκέμβριος | – | 2.68 | – | – |
| Ιανουάριος | – | 2.68 | – | – |
| Φεβρουάριος | – | 2.42 | – | – |
| Μάρτιος | – | 2.68 | – | – |
| Απρίλιος | 0.36 | – | 2.33 | 1.32 |
| Μάιος | 1.76 | – | 4.45 | 2.52 |
| Ιούνιος | 2.43 | – | 7.16 | 4.06 |
| Ιούλιος | 2.93 | – | 8.54 | 4.84 |
| Αύγουστος | 1.84 | – | 7.66 | 4.34 |
| Σεπτέμβριος | 0.71 | – | 5.15 | 2.92 |
| Σύνολο | 10.00 | 15.70 | 35.30 | 20.00 |

5.6.3 Υποθετικά σενάρια πλήρους ανάπτυξης έργων

Η οριστική διαμόρφωση του υδροσυστήματος μελλοντικά, σύμφωνα και με τον αρχικό σχεδιασμό, εξαρτάται από τη χωρική επέκταση των αρδευτικών έργων Σμοκόβου, την ανάπτυξη ή όχι κλειστών

αρδευτικών δικτύων και την κατασκευή των έργων ύδρευσης της περιοχής Ανατολικής Καρδίτσας. Με δεδομένο ότι το δυναμικό του ταμιευτήρα δεν επαρκεί για την ικανοποίηση των υφιστάμενων αρδευτικών αναγκών στο σύνολο της περιοχής μελέτης που προέβλεπε ο σχεδιασμός, και με βάση τις αναλύσεις των εδαφίων 5.4.2 ως 5.4.6, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Εφόσον δημιουργηθεί κλειστό αρδευτικό δίκτυο, που να καλύπτει όλη την έκταση των ζωνών Σ1-Σ2, η πλεονάζουσα ποσότητα που θα προκύψει από την μείωση των αρδευτικών καταναλώσεων, από 35.3 hm³/έτος που εκτιμάται σήμερα, σε 27.2 hm³/έτος, θα μπορεί να δοθεί για άρδευση των περιοχών κατάντη του Κέδρου, με την προϋπόθεση μη κατασκευής των υδροηλεκτρικών έργων. Συνολικά, η ετήσια απόληψη για άρδευση των εν λόγω περιοχών κυμαίνεται από 45.0 έως 55.0 hm³/έτος, με βάση το επιθυμητό (90%) και αποδεκτό (80%) επίπεδο αξιοπιστίας, αντίστοιχα.
- Εφόσον ολοκληρωθούν ο ΗΥΣ Λεονταρίου, τα υδρευτικά έργα και τα αρδευτικά έργα της ζώνης Σ3, χωρίς ωστόσο ανάπτυξη κλειστού δικτύου, θα μπορεί να καλυφθεί η αρδευτική ζήτηση των ζωνών Σ1-Σ3 με το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας 90%, μόνο εφόσον οι απολήψεις της περιόδου Οκτωβρίου-Μαρτίου μέσω της σήραγγας Λεονταρίου περιοριστούν στην κάλυψη της υδρευτικής ζήτησης, και παράλληλα οι εκροές κατάντη του ταμιευτήρα περιοριστούν αποκλειστικά στις ποσότητες που προβλέπονται για τη διατήρηση της ελάχιστης οικολογικής παροχής του Σοφαδίτη. Εφόσον η αρδευτική ζήτηση μειωθεί στα επίπεδα των 500 m³/στρέμμα, θα μπορεί να δοθεί 1.0 m³/s επιπλέον της υδρευτικής ζήτησης κατά τη χειμερινή περίοδο (ήτοι 1.3 m³/s, στο σύνολο), για την παραγωγή ενέργειας.
- Η ένταξη ζωνών πέρα από τη Σ3 είναι εφικτή υπό την προϋπόθεση ταυτόχρονης ανάπτυξης του κλειστού αρδευτικού δικτύου, σε όλη την έκταση των αρδευτικών έργων Σμοκόβου. Στην περίπτωση αυτή, προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα αποδεκτό επίπεδο αξιοπιστίας, δεν θα είναι δυνατή η εκροή από το φράγμα ποσότητας πέρα από την προβλεπόμενη οικολογική παροχή ούτε η παραγωγή επιπλέον χειμερινής ενέργειας πέραν αυτής που θα προέρχεται από τις υδρευτικές εκροές.

5.6.4 Σενάριο υφιστάμενη κατάσταση

Η υφιστάμενη κατάσταση του υδροσυστήματος διαφέρει αρκετά από τον αρχικό σχεδιασμό, καθώς μικρό μόνο ποσοστό της περιοχής μελέτης θα αρδεύεται από κλειστά δίκτυα, ενώ το μεγαλύτερο τμήμα θα εξυπηρετείται από προσωρινά έργα και χωμάτινες τάφρους, όπου και θα διοχετεύονται οι εκροές των κεντρικών αγωγών των ζωνών Σ2, Σ3 και Σ4, καθώς και αυτές του ανατολικού αγωγού που θα καταλήγει στην κεφαλή της ζώνης Σ5. Επιπλέον, η ζώνη Σ1 δεν εντάσσεται στο δίκτυο που θα εξυπηρετείται άμεσα από τον ταμιευτήρα, αλλά εξετάζεται η τροφοδοσία της από αντλιοστάσια συγκροτήματα κατά μήκος του Σοφαδίτη, που θα τοποθετηθούν στο ύψος του Κέδρου. Αντίθετα, δεν εξετάζονται υδρευτικές χρήσεις νερού καθώς και παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας εκτός της αρδευτικής περιόδου.

Με βάση τις αναλύσεις της ενότητας 5.5, προτείνεται η ακόλουθη διαχειριστική πολιτική:

- Σε απόλυτη προτεραιότητα θα εξυπηρετείται ο περιβαλλοντικός περιορισμός διατήρησης μιας ελάχιστης ροής κατάντη του φράγματος (συνολικά 10.0 hm³/έτος), χωρίς να χρησιμοποιείται για άρδευση των παρόχθιων περιοχών του Σοφαδίτη.
- Η στάθμη του ταμιευτήρα θα διατηρείται πάνω από την επιθυμητή τιμή των +345.0 m, η οποία θα αποτελεί όριο των αρδευτικών απολήψεων και θα επιτρέπεται να παραβιαστεί μόνο αν απαιτείται εκροή νερού για διατήρηση της οικολογικής παροχής.
- Θα εξυπηρετείται το 100% των περιοχών που διατρέχονται από τους κεντρικούς αρδευτικούς αγωγούς των ζωνών Σ2, Σ3 και Σ4, δηλαδή μια έκταση 41.7 km², το ανάντη τμήμα των οποίων καλύπτεται από κλειστά δίκτυα.

- Όσον αφορά στην υπόλοιπη περιοχή μελέτης, η οποία θα εξυπηρετείται από προσωρινά έργα και τάφρους, κρίνεται εφικτή η εξυπηρέτηση ποσοστού των θεωρητικών αναγκών της. Οι τελευταίες έχουν υπολογιστεί με εκτιμώμενη κατανάλωση 650 m³/στρέμμα. Με βάση τις αναλύσεις, και υπό τις παρούσες συνθήκες έλλειψης υποδομών, θα μπορεί να αρδευτεί με ασφάλεια το 50% των παραπάνω εκτάσεων, εξασφαλίζοντας επίπεδο αξιοπιστίας της τάξης του 80% για το σύνολο των αρδευτικών στόχων.
- Το έλλειμμα που αναγκαστικά θα προκύπτει από την ικανοποίηση μέρους των θεωρητικών αναγκών προτείνεται να ισοκατανέμεται ανά περιοχή, ώστε να μην υπάρχει αποκλεισμός ζωνών.
- Γενικά, θα απαιτηθεί από τον Φορέα η ανάπτυξη μιας πολιτικής ορθολογικής διαχείρισης των ελλειμμάτων, η διερεύνηση της οποίας αποτελεί αντικείμενο μεταγενέστερης μελέτης. Σε κάθε περίπτωση, τα ελλείμματα θα μπορούν να περιοριστούν σημαντικά, εφόσον προωθηθεί η κατασκευή νέων έργων, η αναδιάρθρωση των καλλιεργειών και η λήψη μέτρων διαχείρισης της ζήτησης και εξοικονόμησης νερού.

6 Πληροφοριακό σύστημα

Στα πλαίσια του έργου σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο πληροφοριακό σύστημα για να υποστηρίξει τη διαχείριση του ταμιευτήρα και των συναφών έργων. Το σύστημα περιλαμβάνει δύο συνιστώσες:

- βάσεις δεδομένων για την αποθήκευση των πρωτογενών και επεξεργασμένων πληροφοριών του υδροσυστήματος, γεωγραφικών και υδρολογικών-διαχειριστικών·
- εφαρμογές επεξεργασίας και διαχείρισης των δεδομένων της βάσης (λογισμικό ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ) και μαθηματικά μοντέλα για την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών στη λεκάνη απορροής (λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ), τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών (λογισμικό ΚΑΣΤΑΛΙΑ) και τη διαχείριση του ταμιευτήρα (λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ).

Τα συστήματα που παραδίδονται, καθώς και η επιχειρησιακή τους αξιοποίηση, περιγράφονται στις ενότητες που ακολουθούν.

6.1 Βάσεις δεδομένων

6.1.1 Βάση γεωγραφικών δεδομένων

Σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε η βάση γεωγραφικών δεδομένων geodata.mdb. Η βάση αυτή περιέχει όλα τα γεωγραφικά δεδομένα που έχουν συλλεγεί στην πρώτη φάση του έργου, αλλά και τα παράγωγα τους, που προέκυψαν από τις επεξεργασίες του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (υπολεκάνες, υδρογραφικό δίκτυο, μονάδες υδρολογικής απόκρισης, κτλ.).

Στη γεωγραφική βάση περιέχονται οι κλάσεις δεδομένων και τα πεδία που παρουσιάζονται στους πίνακες του Παραρτήματος. Σε όλους τους πίνακες υπάρχουν τα πεδία OBJECTID και Shape, τα οποία δεν καταγράφονται για να μην επαναλαμβάνονται.

Το σύστημα αναφοράς είναι το ΕΓΣΑ '87. Όλα τα μήκη και υψόμετρα δίνονται σε μέτρα (m), ενώ τα εμβαδά σε τετραγωνικά μέτρα (m²).

6.1.2 Βάση υδρολογικών δεδομένων

Πρόκειται για την κεντρική βάση δεδομένων, που αποτελεί το θεμέλιο του συνολικού πληροφοριακού συστήματος του ερευνητικού έργου. Αποθηκεύει τα περισσότερα από τα απαιτούμενα δεδομένα (πλην των γεωγραφικών) και είναι το μέσο ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των επιμέρους μοντέλων.

Στην κεντρική βάση που παραδίδεται έχουν αποθηκευτεί:

- οι πρωτογενείς και επεξεργασμένες χρονοσειρές βροχόπτωσης όλων των βροχομετρικών σταθμών της περιοχής μελέτης·
- οι χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής των υπολεκάνων του υδροσυστήματος, που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ·
- οι χρονοσειρές παροχής στις θέσεις ελέγχου του υδροσυστήματος, που επίσης χρησιμοποιούνται από το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ·
- οι χρονοσειρές, ημερήσιες και μηνιαίες, που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα Σμοκόβου (στάθμη, απόθεμα, επιφάνεια, απολήψεις μέσω βαλβίδας οικολογικής παροχής και μέσω σήραγγας Λεονταρίου, βροχόπτωση, εξάτμιση, απορροή)·

- τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ταμιευτήρα Σμοκόβου (ανώτερη και κατώτερη στάθμη, νεκρός όγκος, συνολικό και ωφέλιμο απόθεμα, καμπύλες στάθμης-αποθέματος και στάθμης-επιφάνειας).

Η πρόσβαση στη βάση και η διαχείριση των δεδομένων της γίνεται με το λογισμικό ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ, όπως περιγράφεται στο εδάφιο 6.2.1.

6.2 Πακέτα λογισμικού

6.2.1 Το λογισμικό ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ

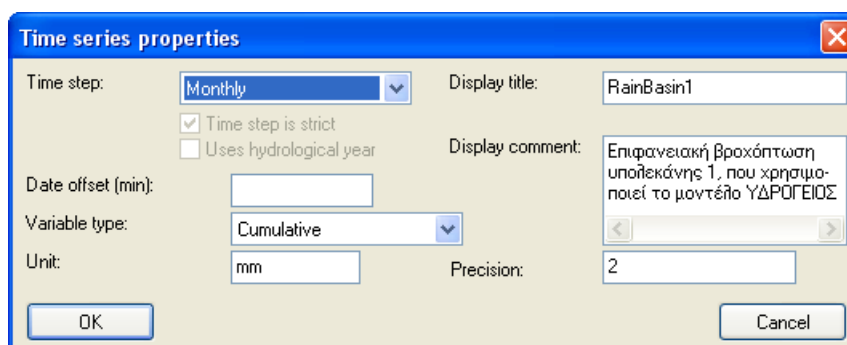
Ο ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ είναι εργαλείο οργάνωσης και ανάλυσης του συνόλου, σχεδόν, των πληροφοριών που απαιτούνται σε μελέτες διαχείρισης υδατικών πόρων. Η διαχείριση των δεδομένων βασίζεται στη γεωγραφική οργάνωση των οντοτήτων (λεκάνες απορροής, μετρητικοί σταθμοί, ταμιευτήρες, κτλ.), στις οποίες αντιστοιχούν φυσικές ιδιότητες, τεχνικά χαρακτηριστικά και χρονοσειρές μετρήσεων. Το λογισμικό υποστηρίζει τυπικές επεξεργασίες χρονοσειρών και εξειδικευμένες υδρολογικές εφαρμογές, όπως μοντέλα εκτίμησης εξατμοδιαπνοής και ανάλυση υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρων. Επιπλέον, παρέχει δυνατότητες οπτικοποίησης των δεδομένων και αμφίδρομης επικοινωνίας με το σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας.

Η κύρια λειτουργία του λογισμικού ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ, στα πλαίσια του έργου, αφορά στη διαχείριση των χρονοσειρών. Στην πράξη, δεν θα χρειαστεί άμεσα η δημιουργία νέων πρωτογενών χρονοσειρών, παρά η επικαιροποίηση των υφιστάμενων, εργασία που είναι πολύ εύκολο να υλοποιηθεί μέσω των γραφικών εργαλείων του προγράμματος. Όσον αφορά στις δευτερογενείς χρονοσειρές, η επεξεργασία τους μπορεί επίσης να γίνει μέσω του προγράμματος, χρησιμοποιώντας τα ακόλουθα εργαλεία:

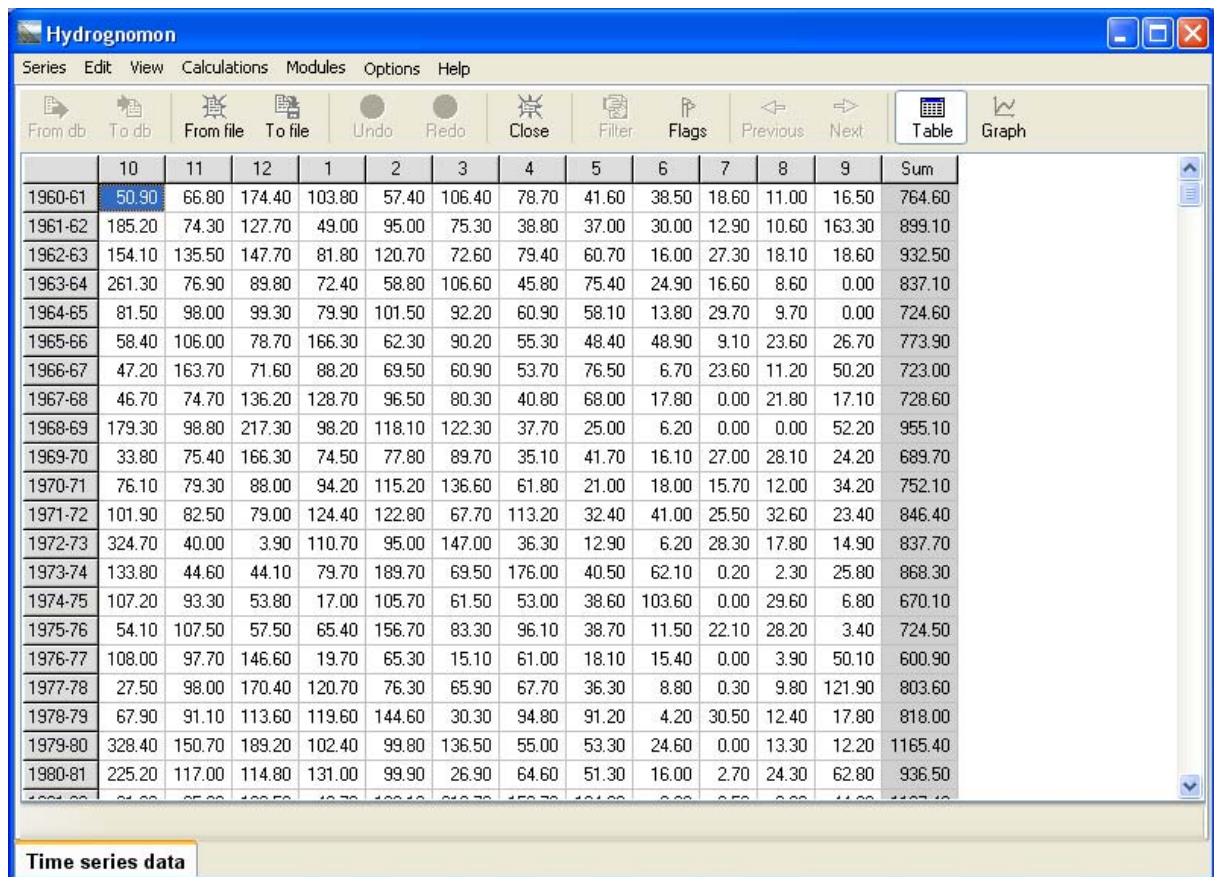
- για τη συμπλήρωση ή επέκταση δειγμάτων, με τη μέθοδο γραμμικής παλινδρόμησης, τη φόρμα που καλείται από το μενού Calculations → Hydrology → Regression·
- για τις γραμμικές πράξεις, που απαιτούνται στην ολοκλήρωση κατά Thiessen και, εν συνεχεία, υψομετρική αναγωγή των σημειακών χρονοσειρών βροχόπτωσης, τη φόρμα που καλείται από το μενού Calculations → Time series operations → Linear combinations·
- για την εκτίμηση των εισροών του ταμιευτήρα Σμοκόβου, με ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου, καλείται από τη σχετική οθόνη ιδιοτήτων το μενού Reservoir Balance.

Η λειτουργία των παραπάνω εργαλείων εξηγείται, αναλυτικά, στο εγχειρίδιο του προγράμματος.

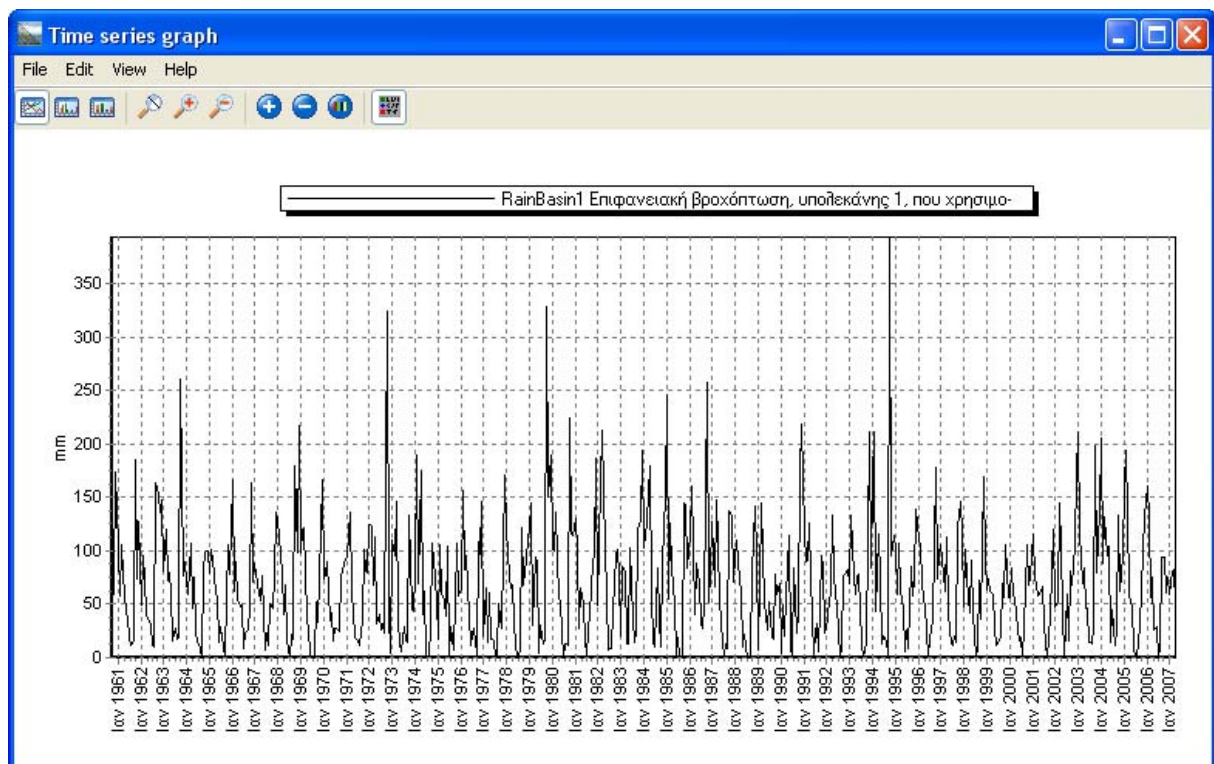
Στα Σχήματα 6.1 έως 6.3 απεικονίζονται χαρακτηριστικές οθόνες του λογισμικού, που αφορούν στις ιδιότητες μιας μηνιαίας χρονοσειράς (συγκεκριμένα, της επιφανειακής βροχόπτωσης της υπολεκάνης 1) και την απεικόνιση των τιμών της σε μορφή πίνακα και γραφήματος, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.1: Οθόνη ιδιοτήτων χρονοσειράς, στο περιβάλλον του λογισμικού ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ.



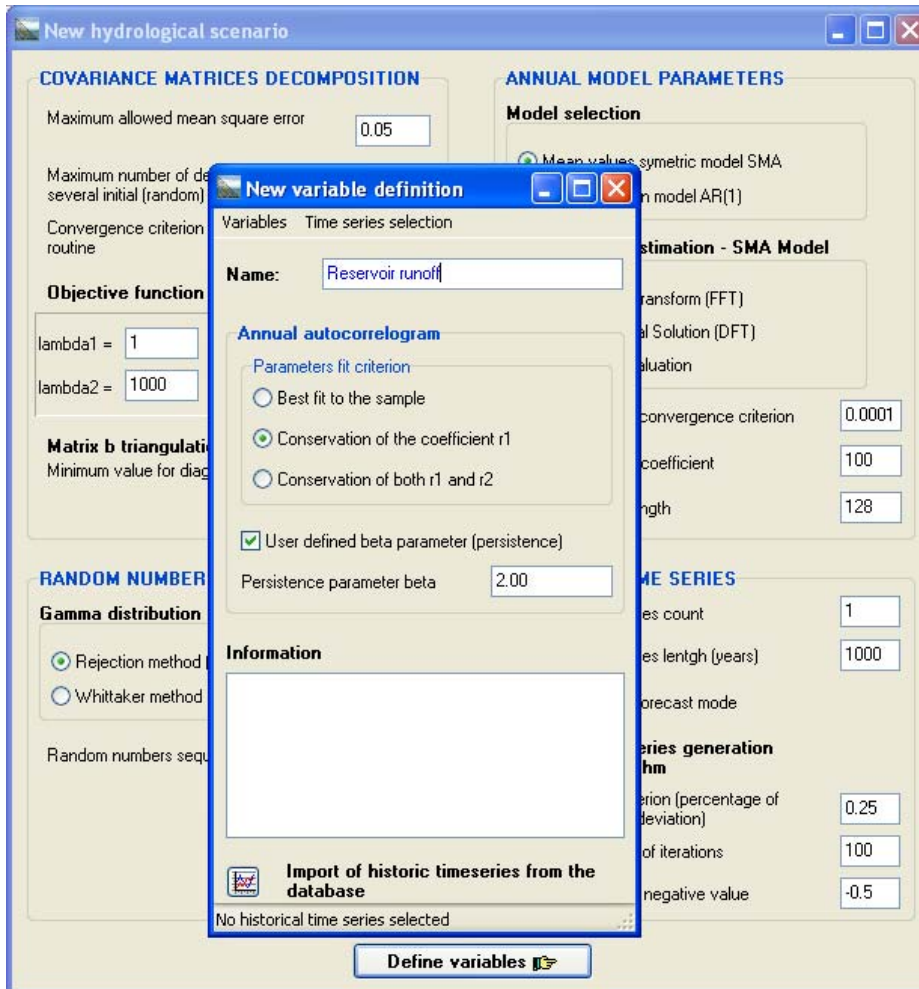
Σχήμα 6.2: Πίνακας τιμών χρονοσειράς, στο περιβάλλον του λογισμικού ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ.



Σχήμα 6.3: Γράφημα χρονοσειράς, στο περιβάλλον του λογισμικού ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ.

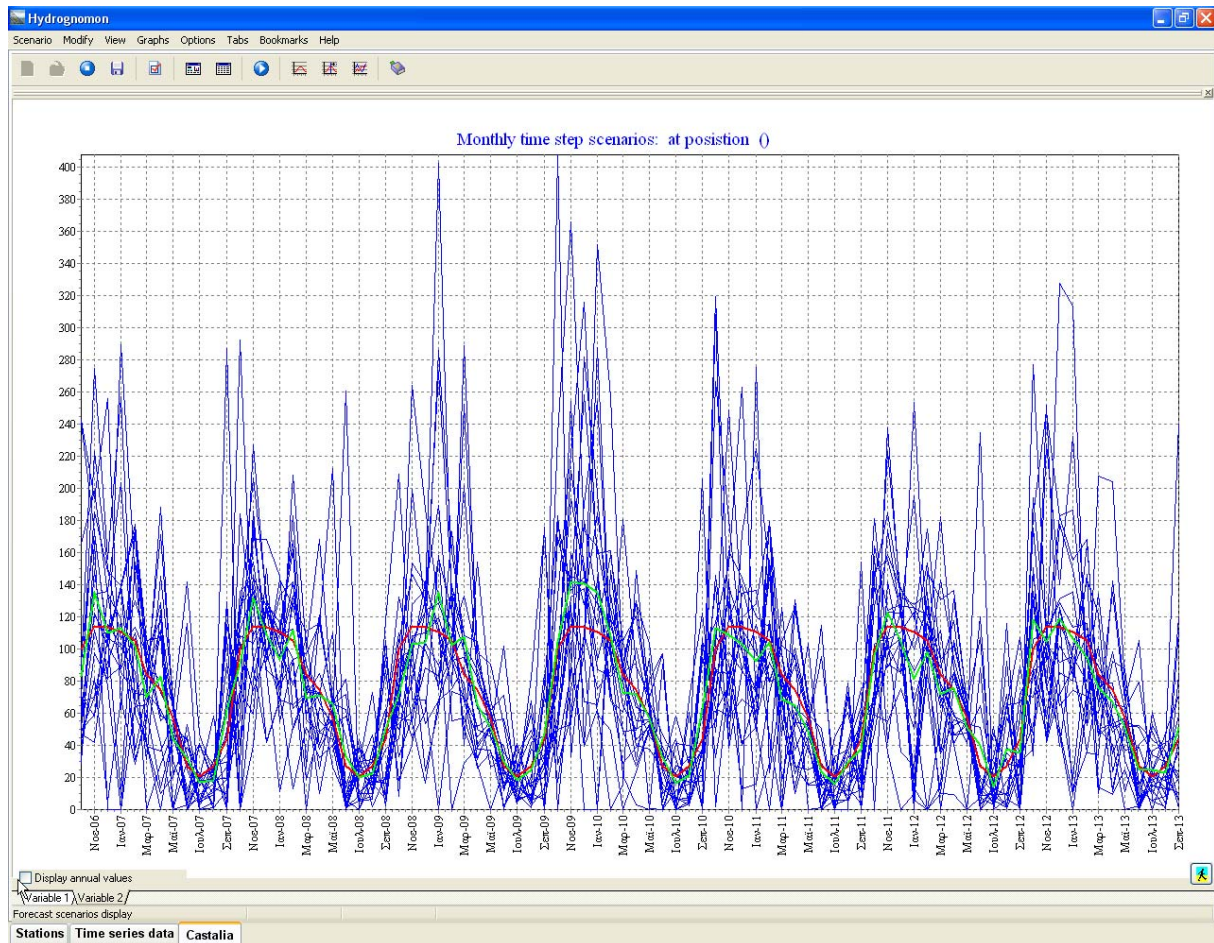
6.2.2 Το λογισμικό ΚΑΣΤΑΛΙΑ

Η ΚΑΣΤΑΛΙΑ αποτελεί πρόσθετο εργαλείο του λογισμικού ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ, και καλείται από το μενού Modules → Castalia – Synthetic time series. Στο συγκεκριμένο έργο, χρησιμοποιείται για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών εισροών του ταμειυτήρα Σμοκόβου, ήτοι των υψών απορροής και βροχόπτωσης, όπως περιγράφεται στο εδάφιο 5.3.2. Πρώτα ορίζεται το υδρολογικό σενάριο, με την εντολή Scenario → New και στη συνέχεια οι μεταβλητές του σεναρίου, με την εντολή Define variables (Σχήμα 6.4). Η επιλογή του ιστορικού δείγματος που αντιστοιχεί σε κάθε μεταβλητή γίνεται με την εντολή Time series selection, από την οποία ζητείται η εισαγωγή των χρονοσειρών που είναι αποθηκευμένες στη βάση.



Σχήμα 6.4: Ορισμός υδρολογικού σεναρίου και μεταβλητών, στο περιβάλλον του λογισμικού ΚΑΣΤΑΛΙΑ.

Ανάλογα με τον τύπο της προσομοίωσης, μόνιμης κατάστασης ή καταληκτική (βλ. 5.1.6), επιλέγεται η παραγωγή μιας χρονοσειράς μεγάλου μήκους (π.χ. 1000 ετών, όπως στις αναλύσεις της ενότητας **Error! Reference source not found.**) ή η παραγωγή πολλών σεναρίων πρόγνωσης, μεσοπρόθεσμου χρονικού ορίζοντα. Αυτό γίνεται ορίζοντας ανάλογα τις τιμές των παραμέτρων «Synthetic time series count» (πλήθος χρονοσειρών) και «Synthetic time series length» (μήκος προσομοίωσης), που βρίσκονται στο σχετικό μενού της φόρμας υδρολογικού σεναρίου (Σχήμα 6.4, πίσω). Στην περίπτωση πρόγνωσης, ενεργοποιείται η επιλογή «Use model to forecast mode», οπότε τα σεναρία που γεννώνται ξεκινούν από τις ίδιες αρχικές συνθήκες και είναι στοχαστικά εξαρτώμενα από τις παρελθούσες τιμές των μεταβλητών (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5: Γραφική απεικόνιση σεναρίων πρόγνωσης, στο περιβάλλον του λογισμικού ΚΑΣΤΑΛΙΑ.

6.2.3 Το λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

Το λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ αποτελεί το εργαλείο προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών της περιοχής μελέτης, και χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της απορροής της υπολεκάνης ανάντη του ταμιευτήρα Σμοκόβου, καθώς το διαθέσιμο δείγμα εισροών, με βάση το ιστορικό υδατικό ισοζύγιο, είναι ανεπαρκές. Το λογισμικό υποστηρίζεται από μια τοπική βάση δεδομένων, με την ονομασία SmokonoModel.mdb, όπου είναι αποθηκευμένα τα γεωγραφικά και υδρολογικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου, καθώς και οι βελτιστοποιημένες παράμετροί του.

Σε βάθος χρόνου, καθώς θα αυξάνει το δείγμα των εισροών στον ταμιευτήρα ή ακόμα θα προστίθεται υδρομετρική πληροφορία στις χαρακτηριστικές θέσεις του συστήματος, σύμφωνα με τις προτάσεις της μελέτης, θα απαιτηθεί επαναπροσδιορισμός των τιμών των παραμέτρων του μοντέλου, ώστε να υπάρξει ακριβέστερη εκτίμηση της υδρολογικής διάταξης των λεκανών (βλ. 6.3.2). Για το σκοπό αυτό, θα χρειαστεί η επικαιροποίηση των χρονοσειρών εισόδου του μοντέλου, και συγκεκριμένα:

- της επιφανειακής βροχόπτωσης των υπολεκανών·
- της δυνητικής εξατμοδιαπνοής των υπολεκανών·
- της αρδευτικής ζήτησης της Ξυνιάδας.

Η επικαιροποίηση μπορεί να γίνει από τη σχετική συγκεντρωτική φόρμα του προγράμματος (Σχήμα 6.6), χρησιμοποιώντας εργαλεία του λογισμικού ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ.

Στη συνέχεια, για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων, που γίνεται μέσω της φόρμας του Σχήματος 6.7, το λογισμικό διαθέτει ένα εύρος επιλογών που αφορούν:

- στον ορισμό των προς βελτιστοποίηση μεταβλητών ελέγχου και των επιθυμητών ορίων τους;
- στον ορισμό των κριτηρίων προσαρμογής και των συντελεστών βάρους στη στοχική συνάρτηση;
- στον ορισμό των χαρακτηριστικών παραμέτρων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Λεπτομέρειες σχετικά με τις παραπάνω επιλογές δίνονται στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος. Οι αλλαγές στα δεδομένα του μοντέλου και τις παραμέτρους μπορούν να αποθηκευτούν στη βάση.

| id | Component | Description | Variable | Time step | Start | End |
|----|---------------------------------|-------------|---------------|-----------|-----------|-------|
| 12 | River node (0): Κέδρος | | Discharge | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 13 | River node (3): Φράγμα | | Discharge | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 14 | River node (5): Έξοδος Ξυριάδας | | Discharge | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 1 | Basin (0): Ανάντη Κέδρου | | Rainfall | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 17 | Basin (0): Ανάντη Κέδρου | | Potential eva | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 2 | Basin (1): Σμοκοβίτικου | | Rainfall | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 18 | Basin (1): Σμοκοβίτικου | | Potential eva | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 3 | Basin (2): Κατάντη φράγματος | | Rainfall | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 19 | Basin (2): Κατάντη φράγματος | | Potential eva | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 4 | Basin (3): Ονόωνου | | Rainfall | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 20 | Basin (3): Ονόωνου | | Potential eva | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 5 | Basin (4): Ρεντινιώτικου | | Rainfall | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 21 | Basin (4): Ρεντινιώτικου | | Potential eva | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 6 | Basin (5): Ξυριάδα | | Rainfall | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 22 | Basin (5): Ξυριάδα | | Potential eva | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 11 | Target (0): ΤΟΕΒ Ξυριάδας | | Demand | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 23 | Target (0): Αρδευτικά Ξυριάδας | | Discharge | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 15 | | | Rainfall | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 16 | | | Discharge | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 7 | | | Potential eva | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |
| 10 | | | Discharge | Monthly | 1/10/1960 | 1/4/2 |

Σχήμα 6.6: Χρονοσειρές εισόδου του υδροσυστήματος Σμοκόβου, στο λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

| Group | Parameter type | Assigned objects | Initial value | Min desirable | Max desirable | Actual value | Optimal value |
|-------|------------------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 1 | Infiltration coefficient | 0, | 0.000000 | 0.000000 | 0.000000 | 0.000000 | 0.000000 |
| 2 | Direct runoff coefficient | 0, | 0.069844 | 0.000000 | 0.400000 | 0.086612 | 0.086612 |
| 3 | Soil moisture capacity (m) | 0, | 0.335609 | 0.100000 | 0.500000 | 0.308133 | 0.308133 |
| 4 | Interflow threshold | 0, | 0.250722 | 0.000000 | 0.400000 | 0.247580 | 0.247580 |
| 5 | Recession rate for interflow | 0, | 0.297550 | 0.100000 | 0.400000 | 0.303187 | 0.303187 |
| 6 | Max rainfall perc. for evaporation | 0, | 0.130549 | 0.000000 | 0.150000 | 0.123613 | 0.123613 |

Ready Obj. function value = 1.653 Optimal value = 1.653

Σχήμα 6.7: Οθόνη βαθμονόμησης παραμέτρων, στο λογισμικό ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

6.2.4 Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ

Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ αποτελεί το κεντρικό εργαλείο του υπολογιστικού συστήματος, και χρησιμοποιείται για την ανάλυση διαχειριστικών σεναρίων του υδροσυστήματος.

Τα σενάρια που διερευνήθηκαν στα πλαίσια του Κεφαλαίου 5 είναι αποθηκευμένα στην κεντρική βάση δεδομένων, κάτω από το βασικό έργο (project) με την ονομασία «Smokono». Κάθε νέο σενάριο μπορεί να δημιουργηθεί αποθηκεύοντας ένα από τα υφιστάμενα, με διαφορετική ονομασία. Υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής νέων οντοτήτων ή διαγραφής υφιστάμενων (κόμβοι, υδραγωγεία, κτλ.) και η εισαγωγή/τροποποίηση στόχων και περιορισμών (targets). Συγκεκριμένα, από το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος, επιλέγεται κάποιος στόχος και μεταβάλλονται οι μηνιαίες τιμές του, από τη σχετική φόρμα. Αν η προσομοίωση του υδροσυστήματος είναι καταληκτική (δηλαδή αφορά σε πολλαπλά υδρολογικά σενάρια μήκους λίγων ετών), τότε είναι δυνατή η διαχρονική μεταβολή των τιμών των στόχων, ώστε να αποτυπωθεί η εξέλιξη της ζήτησης. Ακόμη, είναι δυνατή η μεταβολή των χαρακτηριστικών των έργων, με διαχρονική αλλαγή στις τιμές της παροχρητευτικότητας.

Στα σενάρια που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 δεν ελήφθησαν υπόψη οικονομικά και ενεργειακά δεδομένα του συστήματος (π.χ. παραγωγή ενέργειας στον ΥΗΣ Λεονταρίου), ούτε πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση των παραμέτρων λειτουργίας του. Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ παρέχει σημαντικές δυνατότητες ως προς τα παραπάνω σημεία, για τα οποία δίνονται πληροφορίες στο σχετικό εγχειρίδιο.

6.3 Επιχειρησιακή λειτουργία συστήματος

6.3.1 Τοποθέτηση του προβλήματος - Η έννοια της στοχαστικής πρόγνωσης

Η επιχειρησιακή χρήση των υπολογιστικού συστήματος που αναπτύχθηκε συνίσταται στη χρήση του ως εργαλείου πρόγνωσης, για χρονική περίοδο που ξεκινά από τον παρόντα χρόνο και επεκτείνεται σε ένα χρονικό ορίζοντα στο μέλλον. Η συμπεριφορά του υδροσυστήματος Σμοκόβου (που περιλαμβάνει τη λεκάνη απορροής ανάντη του φράγματος και τα σχετικά έργα αξιοποίησης), για ανεξέλεγκτη – και ουσιαστικά άγνωστη – εξωτερική διέγερση, που είναι η βροχόπτωση στη λεκάνη, είναι, βέβαια, και αυτή ανεξέλεγκτη και άγνωστη. Μπορεί να ελεγχθεί μόνον μερικά, ελέγχοντας τις απολήψεις από τον ταμιευτήρα. Ωστόσο, είναι αδύνατη η ασφαλής διαχείριση των απολήψεων με αποκλειστική χρήση ιστορικών δεδομένων, καθώς:

- η ιστορική χρονοσειρά βροχόπτωσης έχει πρακτικά μηδενική πιθανότητα ακριβούς επανάληψής της στο μέλλον·
- αυτή η ιστορική χρονοσειρά είναι μοναδική και δεν επιτρέπει πιθανοτικές εκτιμήσεις για κάθε έτος ξεχωριστά στο μέλλον.

Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με στοχαστική προσέγγιση, ήτοι με τη χρήση συνθετικών χρονοσειρών εισροών του ταμιευτήρα (απορροή ανάντη υπολεκάνης και επιφανειακή βροχόπτωση), επιτρέποντας τη μελέτη του υδροσυστήματος για οσοδήποτε μεγάλο χρονικό ορίζοντα. Οι συνθετικές χρονοσειρές έχουν τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά με τις ιστορικές, και παράγονται με το πρόγραμμα ΚΑΣΤΑΛΙΑ, όπως εξηγείται στο εδάφιο 6.2.2.

Η παρούσα μελέτη επικεντρώθηκε στην εκτίμηση της ασφαλούς απόληψης από τον ταμιευτήρα, για τις διάφορες χρήσεις νερού, ανάλογα με την εξέλιξη των αρδευτικών και υδρευτικών έργων. Σε επιχειρησιακό πλαίσιο, τα μεγέθη αυτά πρέπει να αποσαφηνιστούν, ανάλογα με το τρέχον καθεστώς του υδροσυστήματος (εξέλιξη έργων, ζήτηση) αλλά και τις τρέχουσες συνθήκες αποθέματος και υδροφορίας. Στην περίπτωση αυτή, ο ελάχιστος χρονικός ορίζοντας της διαχειριστικής πολιτικής είναι το υδρολογικό έτος, ενώ οι επιπτώσεις της, προκειμένου να εξασφαλιστεί βιωσιμότητα των υδατικών πόρων, πρέπει να είναι τα 5 έως 10 έτη. Με τον τρόπο αυτό θα εξασφαλίζεται ότι τα αποτελέσματα

της διαχειριστικής πολιτικής (οι απολήψεις από τον ταμιευτήρα) δεν θα έχουν αρνητικές επιπτώσεις μακροπρόθεσμα, δηλαδή δεν θα διατηρείται το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας των λειτουργικών στόχων και περιορισμών του συστήματος, για όλο τον χρονικό ορίζοντα ελέγχου.

Η διαχειριστική πολιτική του υδροσυστήματος θα καθορίζεται ένα εύλογο χρονικό διάστημα πριν την έναρξη της αρδευτικής περιόδου, με βάση το ακόλουθο πλαίσιο επιχειρησιακής αξιοποίησης του υπολογιστικού συστήματος:

Βήμα 1: Χρήση λογισμικού ΚΑΣΤΑΛΙΑ για τη γέννηση ενός ικανού πλήθους (π.χ. 100) συνθετικών χρονοσειρών πρόγνωσης της απορροής και βροχόπτωσης στον ταμιευτήρα Σμοκόβου, μήκους 10 ετών, με αναφορά στα επίκαιρα υδρολογικά δεδομένα.

Βήμα 2: Εκτίμηση ζήτησης νερού για τις διάφορες χρήσεις, για τον χρονικό ορίζοντα των 10 ετών, και εκτίμηση της εξέλιξης των έργων.

Βήμα 3: Προσομοίωση λειτουργίας υδροσυστήματος με το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, εισάγοντας τα σενάρια υδρολογικών εισροών, τις αντίστοιχες τιμές της ζήτησης και τις οριακές συνθήκες του συστήματος, ήτοι την επίκαιρη στάθμη του ταμιευτήρα, στην αρχή της προσομοίωσης.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, εφόσον δεν τηρούνται τα επιθυμητά επίπεδα αξιοπιστίας σε όλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα ελέγχου, θα επανεκτιμώνται οι απολήψιμες ποσότητες νερού για τις διάφορες χρήσεις. Με βάση τα τελικά μεγέθη των αναλύσεων, θα καθορίζεται η πολιτική των αρδεύσεων του τρέχοντος έτους, και θα εκτιμώνται τα σχετικά οικονομικά μεγέθη.

6.3.2 Επανεκτίμηση ιστορικών υδρολογικών εισροών

Οι διαχειριστικές αναλύσεις βασίστηκαν στο πρόσφατο ιστορικό δείγμα εισροών από το ισοζύγιο του ταμιευτήρα, που επεκτάθηκε μέχρι το 1960 με εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Οι παράμετροι του μοντέλου βαθμονομήθηκαν με βάση το, μέτριας αξιοπιστίας, δείγμα μέσης μηνιαίας παροχής του υδρομετρικού σταθμού Κέδρου, καθώς και ένα περιορισμένο αριθμό μεμονωμένων μετρήσεων παροχής στη θέση του φράγματος και στην έξοδο της Ξυνιάδας, ενώ η επαλήθευση του μοντέλου έγινε με βάση το δείγμα εισροών του ταμιευτήρα της τελευταίας πενταετίας. Η μέση ετήσια εκτίμηση του μοντέλου, που αφορά στις εισροές του φράγματος, ανέρχεται σε 104 hm^3 , τιμή πολύ χαμηλότερη σε σχέση με τους υπολογισμούς όλων των προηγούμενων υδρολογικών μελετών, που έχει ως συνέπεια τον χαρακτηρισμό του έργου ως υπερδιαστασιοποιημένου.

Αν και η προσαρμογή του μοντέλου κρίνεται ικανοποιητική, υπάρχουν αρκετές αβεβαιότητες στα ιστορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, κάτι που καθιστά αναγκαίο τον επανέλεγχό του, με βάση νέα στοιχεία, που θα συλλεχθούν σε ένα χρονικό ορίζοντα πέντε ετών. Για το σκοπό αυτό, προτείνεται η διεξαγωγή συστηματικών υδρομετρήσεων στις ακόλουθες θέσεις του υδροσυστήματος:

- στη θέση Κέδρος, όπου και ο προηγούμενος υδρομετρικός σταθμός·
- στην έξοδο της λεκάνης Σμοκοβίτικου·
- στην έξοδο της Ξυνιάδας.

Σε συνδυασμό με το δείγμα απορροής που θα κατασκευαστεί με βάση το ισοζύγιο του ταμιευτήρα, θα υπάρχει η αναγκαία κατανομημένη πληροφορία στην περιοχή για μια πολύ πιο αξιόπιστη εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Αναγκαία προϋπόθεση είναι η συστηματική παρακολούθηση των δεδομένων ισοζυγίου του ταμιευτήρα (στάθμη, εκροές), η παρακολούθηση της χωρικής δίαιτας των κατακρημνίσεων, καθώς και η ακριβέστερη εκτίμηση του καθεστώτος διαχείρισης των υδατικών πόρων στην Ξυνιάδα. Επισημαίνεται ότι, στα πλαίσια της υδρολογικής ανάλυσης του Κεφαλαίου 4, για το σύνολο των παραπάνω δεδομένων υπάρχουν αρκετές αβεβαιότητες, που αναγκαστικά έχουν μεταφερθεί, μέσω των βελτιστοποιημένων παραμέτρων του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, στις εκτιμήσεις της απορροής του ταμιευτήρα.

7 Συμπεράσματα – Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Από τις υδρολογικές και διαχειριστικές αναλύσεις προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η υδρολογική πληροφορία στην περιοχή μελέτης, βροχομετρική και υδρομετρική, χαρακτηρίζεται μέτριας αξιοπιστίας. Ειδικότερα, οι περισσότερες χρονοσειρές βροχόπτωσης εμφανίζουν μεγάλα χρονικά διαστήματα με κενά, η συμπλήρωση των οποίων με τυπικές στατιστικές μεθόδους είναι επισφαλής, δεδομένης της σημαντικής χωρικής μεταβλητότητας των κατακρημνισμάτων. Από την άλλη πλευρά, από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, δεν πραγματοποιούνται μετρήσεις παροχής στα υδατορεύματα, ενώ και οι παλαιότερες μετρήσεις, κυρίως στο σταθμό του Κέδρου, χαρακτηρίζονται από σημαντικές αβεβαιότητες.
- Από τον Ιούλιο του 2002, οπότε και ξεκίνησε η λειτουργία του ταμιευτήρα Σμοκόβου, γίνεται πλημμελής καταγραφή των δεδομένων ισοζυγίου του (στάθμες και εκροές). Ειδικότερα, μετά την πρώτη πλήρωση, η παρακολούθηση της στάθμης γίνεται με συχνότητα μόλις μία φορά το μήνα, ενώ είναι πολύ πιθανό ότι οι εκροές που καταγράφονται είναι μικρότερες των πραγματικών, με συνέπεια να εμφανίζονται αρνητικές εισροές στο θερινό ισοζύγιο του ταμιευτήρα, που δεν έχουν φυσικό νόημα (εκτός και αν οφείλονται σε σημαντικές απώλειες νερού).
- Από τη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών του υδροσυστήματος, με σκοπό την ανακατασκευή των ιστορικών εισροών του ταμιευτήρα, προέκυψε ότι οι εισροές που είχαν υπολογιστεί στο παρελθόν είναι υπερεκτιμημένες. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις πρόσφατες εκτιμήσεις εισροών, που προέκυψαν από την ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα της περιόδου 2002-2007. Σε μέση ετήσια βάση, η προσέγγιση καταλήγει σε εισροές της τάξης των 104 hm^3 , σε αντίθεση με τις εκπονηθείσες μελέτες που εκτιμούν εισροές από 130 έως 175 hm^3 .
- Η διαφορά στις εκτιμήσεις των εισροών οφείλεται εν μέρει και στη μεθοδολογία. Η παρούσα μελέτη λαμβάνει υπόψη τα φυσικά χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος, χωρίς να ακολουθεί υπεραπλουστευμένες πρακτικές αναγωγής της χρονοσειράς απορροής στον υδρομετρικό σταθμό του Κέδρου. Οι προηγούμενες προσεγγίσεις αγνοούν το γεγονός ότι η υπολεκάνη της Ξυνιάδας, που καταλαμβάνει το 34% της συνολικής λεκάνης ανάντη του Κέδρου και το 45% της αντίστοιχης λεκάνης ανάντη του φράγματος, χαρακτηρίζεται από χαμηλά ύψη βροχής και σημαντικά χαμηλότερο συντελεστή απορροής σε σχέση με το υπόλοιπο σύστημα.
- Λαμβάνοντας υπόψη τις αναθεωρημένες εκτιμήσεις των υδρολογικών εισροών του φράγματος, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια εξέλιξης των έργων και χρήσεων νερού στην περιοχή μελέτης. Αυτές αναφέρονται σε υποθετικές διαμορφώσεις του υδροσυστήματος, με βάση τον αρχικό σχεδιασμό του έργου, καθώς και στην υφιστάμενη κατάσταση, σύμφωνα με την οποία καθορίστηκε η τρέχουσα πολιτική διαχείρισης του ταμιευτήρα και των συναφών έργων.
- Στο σενάριο υφιστάμενης κατάστασης προβλέπεται η άρδευση του ανάντη τμήματος των ζωνών Σ2, Σ3 και Σ4 αποκλειστικά μέσω κλειστών αρδευτικών δικτύων και ενός ενδιάμεσου τμήματος μέσω κεντρικών αρδευτικών αγωγών και εκροών προς το αποστραγγιστικό δίκτυο. Η υπόλοιπη περιοχή μελέτης, συμπεριλαμβανομένης της ζώνης Σ1, θα εξυπηρετείται από προσωρινά έργα και χωμάτινες τάφρους.

- Στην προτεινόμενη διαχειριστική πολιτική, τίθεται σε απόλυτη προτεραιότητα ο περιβαλλοντικός περιορισμός διατήρησης μιας ελάχιστης ροής κατάντη του φράγματος (συνολικά 10.0 hm³/έτος), χωρίς να χρησιμοποιείται για άρδευση των παρόχθιων περιοχών του Σοφαδίτη.
- Η στάθμη του ταμιευτήρα θα διατηρείται πάνω από την επιθυμητή τιμή των +345.0 m, η οποία θα αποτελεί όριο των αρδευτικών απολήψεων και θα επιτρέπεται να παραβιαστεί μόνο αν απαιτείται εκροή νερού για διατήρηση της οικολογικής παροχής.
- Υπό τις παρούσες συνθήκες περιορισμένων υποδομών, είναι εφικτό να εξυπηρετείται το 100% των περιοχών που διατρέχονται από τους κεντρικούς αρδευτικούς αγωγούς των ζωνών Σ2, Σ3 και Σ4, και το 50% της υπόλοιπης περιοχής μελέτης, εξασφαλίζοντας επίπεδο αξιοπιστίας της τάξης του 80% για το σύνολο των αρδευτικών στόχων.
- Το έλλειμμα που αναγκαστικά θα προκύπτει από την ικανοποίηση μέρους των θεωρητικών αρδευτικών αναγκών προτείνεται να ισοκατανέμεται ανά περιοχή, ώστε να μην υπάρχει αποκλεισμός ζωνών.

Γενικά, θα απαιτηθεί από τον Φορέα η ανάπτυξη μιας πολιτικής ορθολογικής διαχείρισης των ελλειμμάτων, σε συνδυασμό με την κατασκευή νέων έργων, την αναδιάρθρωση των καλλιεργειών και τη λήψη μέτρων διαχείρισης της ζήτησης και εξοικονόμησης νερού.

7.2 Προτάσεις

Επειδή οι αναλύσεις που έγιναν βασίστηκαν σε σχετικά επισφαλής δεδομένα, προτείνεται ένα πλαίσιο δράσεων για τη συστηματική παρακολούθηση των υδρολογικών και διαχειριστικών μεγεθών του υδροσυστήματος. Συγκεκριμένα:

- Κρίνεται απαραίτητη η άμεση λειτουργία του τηλεμετρικού σταθμού του φράγματος, ώστε να υπάρχει συνεχής και αξιόπιστη καταγραφή της στάθμης και των υδρομετεωρολογικών συνθηκών του ταμιευτήρα.
- Ομοίως, κρίνεται απαραίτητη η παρακολούθηση των απολήψεων από το φράγμα και τη σήραγγα Λεονταρίου, και η καταγραφή των σχετικών μεγεθών σε ημερήσια βάση.
- Θα πρέπει να διερευνηθεί αν η ύπαρξη αρνητικών τιμών εισροών στο ισοζύγιο του ταμιευτήρα οφείλεται σε υποεκτίμηση των εκροών ή στην πιθανότητα ύπαρξης διαφυγών νερού από τη λεκάνη κατάκλυσης ή τη σήραγγα εκτροπής.
- Εκτός των παραπάνω, προκύπτει η ανάγκη συστηματικής παρακολούθησης των υδρολογικών και διαχειριστικών μεγεθών του υδροσυστήματος (βροχοπτώσεις, παροχές, μετεωρολογικά δεδομένα, αρδευτικές απολήψεις Ξυνιάδας), που θα εξασφαλίσει την αξιόπιστη εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής. Στο σημείο αυτό θεωρείται κομβικός ο ρόλος του υπό ίδρυση φορέα διαχείρισης, που θα είναι αρμόδιος και για τον έλεγχο των υδατικών πόρων της λεκάνης, την παρακολούθηση των ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων και του φυσικού περιβάλλοντος.

Στα πλαίσια του έργου, σχεδιάστηκε, υλοποιήθηκε και παραδόθηκε μια ολοκληρωμένη πληροφοριακή υποδομή, για την υποστήριξη της διαχείρισης των υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης. Θεωρείται πολύ σημαντική η αξιοποίηση της εν λόγω υποδομής, η συνεχής ενημέρωση της βάσης με τα επίκαιρα δεδομένα και η τακτική (τουλάχιστον μία φορά κάθε έτος, πριν την αρχή της αρδευτικής περιόδου) επικαιροποίηση των διαχειριστικών σεναρίων, που θα εξασφαλίζει τη βέλτιστη λειτουργία των έργων.

Αναφορές

- Βαβίζος, Γ., Κ. Ζαννάκη, Δ. Ζαφειρόπουλος & ΣΙΑ Α.Ε., και Ιωάννης Ζαχάρωφ ΣΥΝΘΕΣΗ & ΕΡΕΥΝΑ Ε.Π.Ε., *Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων και επανορθωτικών μέτρων από την κατασκευή και λειτουργία του φράγματος Σμοκόβου και συναφών έργων*, Ανάδοχος: ΥΠΕΧΩΔΕ, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων (Δ7), Αθήνα, 1995.
- ELECTROWATT, *Αξιοποιήσις πεδιάδος Θεσσαλίας, Προμελέτη φράγματος Σμοκόβου*, ΥΠΔΕ, 1970.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Ρόζος, Α. Τέγος, και Ι. Ναλμπάντης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης απορροής «Υδρόγειος», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: ΝΑΜΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 4α, 103 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2006.
- Ευστρατιάδης, Α., 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: ΝΑΜΑ 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: ΝΑΜΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 3, 61 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005.
- Κουκουβίνος, Α., Α. Ευστρατιάδης, Α. Λαζαρίδης, και Ν. Μαμάσης, Έκθεση δεδομένων, *Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου*, Τεύχος 1, 66 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2006.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., *Στατιστική Υδρολογία*, Έκδοση 4, 312 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.
- Μαμάσης, Ν., Ρ. Μαυροδήμου, Α. Ευστρατιάδης, Μ. Χαϊνταρλής, Α. Τέγος, Α. Κουκουβίνος, Π. Λαζαρίδου, Μ. Μαγαλιού, και Δ. Κουτσογιάννης, Διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων οργάνωσης και λειτουργίας Φορέα Διαχείρισης έργων Σμοκόβου, *Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου*, Τεύχος 2, 73 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούνιος 2006.
- Ρόπης, Κ., *Διερεύνηση της ποιότητας των υδάτων της λίμνης Σμοκόβου*, Μεταπτυχιακή εργασία, 94 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005.

- Τέγος, Α., *Απλοποίηση της εκτίμησης της εξατμοδιαπνοής στην Ελλάδα*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2007.
- ΥΔΡΟΜΕΤ – ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ – ΤΕΤΡΑΚΥΣ, *Οριστική μελέτη αρδευτικού έργου Σοφαδίτη (Σμοκόβου), Πρώτο τμήμα αρδευτικής περιμέτρου*, Υδρολογική μελέτη, ΥΠΔΕ, Απρίλιος 1983.
- ΥΠΕΧΩΔΕ, Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, *Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής των Ποταμών Αχελώου και Πηνειού Θεσσαλίας*, Αθήνα, 2006.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems, *Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, UK, 1423-1428, International Water Association, 2002.
- Efstratiadis, A., 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., I. Nalbantis, A. Koukouvinos, E. Rozos, and D. Koutsoyiannis, HYDROGEIOS: A semi-distributed GIS-based hydrological model for disturbed river basins, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(3), 1947-1997, 2007.
- 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., A. Efstratiadis, and G. Karavokiros, A decision support tool for the management of multi-reservoir systems, *Journal of the American Water Resources Association*, 38(4), 945-958, 2002.
- Koutsoyiannis, D., and A. Economou, Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems, *Water Resources Research*, 39(6), 1170, 1-17, 2003.
- Koutsoyiannis, D., and A. Manetas, Simple disaggregation by accurate adjusting procedures, *Water Resources Research*, 32(7), 2105-2117, 1996.
- 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., and D. Koutsoyiannis, A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems, *Water Resources Research*, 33(9), 2165-2177, 1997.
- Rozos, E., A. Efstratiadis, I. Nalbantis, and D. Koutsoyiannis, Calibration of a semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), 819-842, 2004.
- Rozos, E., and D. Koutsoyiannis, A multicell karstic aquifer model with alternative flow equations, *Journal of Hydrology*, 325(1-4), 340-355, 2006.
- Rozos, E., and D. Koutsoyiannis, Application of the Integrated Finite Difference Method in groundwater flow, *European Geosciences Union General Assembly 2005, Geophysical Research Abstracts, Vol. 7*, Vienna, 00579, European Geosciences Union, 2005.

Παράρτημα: Πίνακες βάσης γεωγραφικών δεδομένων

1. Σημεία ονοματολογίας

Όνομα : Annotation_Point

Γεωμετρία: Σημείο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-----------|-------|---------------------|
| TEXT | Text | Ονομασία |
| TEXT_CAPS | Text | Ονομασία (κεφαλαία) |

2. Όρια περιοχής μελέτης

Όνομα : Bnd

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|------------|
| Shape_Length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

3. Δομημένες περιοχές

Όνομα : BuiltUp_Area

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|------------|
| Name | Text | Όνομα |
| Shape_Length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

4. Ακτογραμμική

Όνομα : Coast

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|------------|
| Shape_Length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

5. Ισοϋψείς

Όνομα : Contour

Γεωμετρία: Γραμμή

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|---------|-----------|
| Shape_Length | Double | Μήκος |
| Z | Integer | Υψόμετρο |

6. Θέση φράγματος

Όνομα : Dam_Point

Γεωμετρία: Σημείο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-------|-------|-----------|
| Name | Text | Όνομα |

7. Σήραγγα

Όνομα : Dam_Tunnel

Γεωμετρία: Γραμμή

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|-----------|
| Shape_length | Double | Μήκος |
| Name | Text | Όνομα |

7. Λεκάνη απορροής ανάντη φράγματος

Όνομα : Dam_Watershed

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|-----------|
| Shape_length | Double | Μήκος |
| Shape_area | Double | Έκταση |
| Name | Text | Όνομα |

8. Σημεία γνωστού υψομέτρου

Όνομα : Elevation_Point

Γεωμετρία: Σημείο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-------|--------|-----------|
| Z | Single | Υψόμετρο |

9. Κύτταρα υδροφορέα

Όνομα : GWB_Cell

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|---------|------------|
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |
| GWB_Cell_Id | Integer | Κωδικός |

10. Κέντρα βάρους κυττάρων υδροφορέα

Όνομα : GWB_Cell_Center

Γεωμετρία: Σημείο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-------------|---------|----------------------------|
| GWB_Cell_Id | Integer | Κωδικός κυττάρου υδροφορέα |

11. Ακμές κυττάρων υδροφορέα

Όνομα : GWB_Cell_Edge

Γεωμετρία: Γραμμή

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------------|---------------------------|
| Shape_length | Double | Μήκος |
| Left_FID | Long Integer | Κωδικός κυττάρου αριστερά |
| Right_FID | Long Integer | Κωδικός κυττάρου δεξιά |

12. Αποστάσεις κέντρων κυττάρων υδροφορέα

Όνομα : GWB_Center_Distance

Γεωμετρία: Γραμμή

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-----------|--------------|----------------------------|
| INPUT_FID | Long Integer | Κωδικός σημείου |
| NEAR_FID | Long Integer | Κωδικός γειτονικού σημείου |
| DISTANCE | Double | Απόσταση |

13. Ένωση κυττάρων υδροφορέα, υπολεκανών απορροής και μονάδων υδρολογικής απόκρισης

Όνομα : GWB_Subbasin_HRU

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|---------|---------------------------------------|
| GWB_Cell_Id | Integer | Κωδικός κυττάρου υδροφορέα |
| Subbasin_Id | Integer | Κωδικός υπολεκάνης |
| HRU_Id | Integer | Κωδικός μονάδας υδρολογικής απόκρισης |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

14. Υδροηλεκτρικοί σταθμοί

Όνομα HE_Station

Γεωμετρία: Σημείο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-------|-------|-----------|
| Name | Text | Όνομα |

15. Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

Όνομα : HRU

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|---------|---------------------------------------|
| HRU_Id | Integer | Κωδικός μονάδας υδρολογικής απόκρισης |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

16. Τύποι γεωλογίας

Όνομα : Hydro_Geology

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|----------------------|
| Code | Text | Κατηγορία πετρωμάτων |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

17. Υδροληψία

Όνομα Intake

Γεωμετρία: Σημείο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-------|-------|-----------|
| Name | Text | Όνομα |

18. Αρδευόμενη περιοχή

Όνομα : IrrigationArea_Exist

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|------------|
| Name | Text | Όνομα |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

19. Διώρυγα

Όνομα : Irrigation_Channel

Γεωμετρία: Γραμμή

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|---------|----------------|
| Name | Text | Όνομα |
| Shape_length | Double | Μήκος |
| Type | Integer | Τύπος διώρυγας |

20. Αρδευτική ζώνη

Όνομα : Irrigation_Zone

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|-----------|
| Name | Text | Όνομα |
| Shape_length | Double | Μήκος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

21. Συνολική αρδευόμενη έκταση

Όνομα : IrrigationArea_Plan

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|-----------|
| Name | Text | Όνομα |
| Shape_length | Double | Μήκος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

22. Κάλυψη γης

Όνομα : Land_Cover

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|---------------|--------------|---------------|
| Land_Cover_ID | Long Integer | Τύπος κάλυψης |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

23. Όρια δημοτικών διαμερισμάτων

Όνομα : Municipality

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|------------|
| Name | Text | Όνομα |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

24. Σιδηροδρομικό δίκτυο

Όνομα : Rail

Γεωμετρία: Γραμμή

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|-----------|
| Shape_length | Double | Μήκος |

25. Ταμιευτήρας Σμοκόβου

Όνομα : Municipality

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|------------|
| Name | Text | Όνομα |
| Elevation | Double | Υψόμετρο |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

26. Οδικό δίκτυο

Όνομα : Road

Γεωμετρία: Γραμμή

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|---------|-----------|
| Shape_length | Double | Μήκος |
| Type | Integer | Τύπος |

27. Υδρογραφικό δίκτυο

Όνομα : RWB

Γεωμετρία: Γραμμή

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|---------|------------------------|
| Name | Text | Όνομα |
| RWB_Id | Integer | Κωδικός κλάδου |
| Shape_length | Double | Μήκος |
| From_Node | Integer | Κωδικός κόμβου ανάντη |
| To_Node | Integer | Κωδικός κόμβου κανάντη |
| Subbasin_Id | Integer | Κωδικός υπολεκάνης |

28. Τομή υδρογραφικού δικτύου, κυττάρων υδροφορέα

Όνομα : RWB_GWB_Cell_Intersect

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|---------|------------------------|
| GWB_Cell_Id | Integer | Κωδικός κυττάρου |
| RWB_Id | Integer | Κωδικός κλάδου δικτύου |
| Shape_length | Double | Μήκος |

29. Κόμβοι υδρογραφικού δικτύου

Όνομα : RWB_Node

Γεωμετρία: Σημείο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-------------|---------|----------------|
| Name | Text | Όνομα |
| RWB_Node_Id | Integer | Κωδικός κόμβου |

30. Όρια Νομών

Όνομα : State

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|------------|
| Name | Text | Όνομα |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

31. Πρωτεύουσες Νομών

Όνομα : State_Capital

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|------------|
| Name | Text | Όνομα |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

32. Υδατικά διαμερίσματα

Όνομα : Water_District

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|------------|
| Name | Text | Όνομα |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

33. Θέσεις υδρομέτρησης

Όνομα : Station_Discharge

Γεωμετρία: Σημείο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-------|-------|-----------|
| Name | Text | Όνομα |

34. Μετεωρολογικοί σταθμοί

Όνομα : Station_Meteo

Γεωμετρία: Σημείο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-------|-------|-----------|
| Name | Text | Όνομα |

35. Βροχομετρικοί σταθμοί

Όνομα : Station_Rain

Γεωμετρία: Σημείο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-------|-------|-----------|
| Name | Text | Όνομα |

36. Ποτάμια, ρέματα

Όνομα : Water_Course

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|-----------|
| Name | Text | Όνομα |
| Shape_length | Double | Μήκος |

37. Πηγές

Όνομα : Spring

Γεωμετρία: Σημείο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|-------|-------|-----------|
| Name | Text | Όνομα |

38. Υπολεκάνες απορροής

Όνομα : Subbasin

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|---------|--------------------|
| Name | Text | Όνομα |
| Subbasin_Id | Integer | Κωδικός υπολεκάνης |
| RWB_Id | Integer | Κωδικός κλάδου |
| RWB_Node_Id | Integer | Κωδικός κόμβου |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

39. Ένωση υπολεκανών, Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης

Όνομα : Subbasin_HRU

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|---------|--------------------|
| Subbasin_Id | Integer | Κωδικός υπολεκάνης |
| HRU_Id | Integer | Κωδικός ΜΥΑ |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

40. Πολύγωνα Thiessen

Όνομα : Thiessen

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|-----------------|
| Percent | Single | Ποσοστό έκτασης |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

41. Φύλλα χάρτη ΓΥΣ

Όνομα : Tile_50k

Γεωμετρία: Πολύγωνο

Πεδία:

| Όνομα | Τύπος | Περιγραφή |
|--------------|--------|------------|
| Όνομα | Text | Όνομα Φ.Χ. |
| Shape_length | Double | Περίμετρος |
| Shape_Area | Double | Έκταση |

