

Περίληψη

Παρουσιάζονται το αντικείμενο και οι στόχοι του ολοκληρωμένου συστήματος για τον εκσυγχρονισμό της εποπτείας και διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, οι υποδομές του, πληροφορική (σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας και κεντρική βάση δεδομένων), μετρητική (δίκτυο μέτρησης των υδρομετεωρολογικών και υδρολογικών μεταβλητών) και η οργάνωση, διαχείριση και επεξεργασία των απαραίτητων δεδομένων. Ακόμη, περιγράφονται τα εργαλεία λογισμικού που αναπτύχθηκαν (*Κασταλία*, *Υδρογνώμων*, *Υδρονόμεας*, και σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης) και τα διαχειριστικά σχέδια που εκπονήθηκαν, με εφαρμογή αυτών των εργαλείων, στα πλαίσια της δεύτερης φάσης του ερευνητικού έργου. Για όλες τις συνιστώσες γίνεται αναφορά στην επιχειρησιακή ολοκλήρωση του συστήματος.

Abstract

The subject and the objectives of the integrated system for the modernisation of the supervising and management of the water resource system of Athens is presented along with the developed infrastructure, computational (geographical information system and central database) and measuring, and the organisation, processing and management of the necessary data. In addition, the software tools developed (*Castalia*, *Hydrognomon*, *Hydronomeas* and system for simulation of the hydrological cycle of the Boeoticos Kephisos - Yliki Basin), and the master plans for the management of the water resource system, which were elaborated in the framework of the second phase of the research project using these software tools, are also described. For all subsystems, reference is made to the operational integration of the system as a whole.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	i
Abstract.....	i
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ιστορικό.....	1
1.2 Αντικείμενο και στόχοι του ερευνητικού έργου.....	1
1.3 Απαιτήσεις από το σύστημα	4
1.4 Συνεργασία ΕΜΠ-ΕΥΔΑΠ	4
1.5 Ερευνητική συνιστώσα του έργου.....	4
1.6 Ερευνητική ομάδα	5
1.7 Αναγνωρίσεις.....	6
1.8 Διάρθρωση του τεύχους	7
1.9 Παραδοτέα δεύτερης φάσης	8
2 Σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας	10
2.1 Εισαγωγή	10
2.2 Βάση γεωγραφικών δεδομένων	10
2.3 Εφαρμογή σε περιβάλλον ΣΓΠ	11
3 Βάση δεδομένων και λογισμικό διαχείρισής της	13
3.1 Κεντρική Βάση Δεδομένων	13
3.2 Σύστημα διαχείρισης και επεξεργασίας υδρολογικών δεδομένων (πρόγραμμα <i>Υδρογνώμων</i>).....	15
3.2.1 Γενικά.....	15
3.2.2 Υλοποίηση - Εμφάνιση	15
3.3 Γενική παρουσίαση του λογισμικού <i>Υδρογνώμων</i>	16
4 Δίκτυο μέτρησης υδρομετεωρολογικών και υδρολογικών μεταβλητών	27
4.1 Στόχοι του μετρητικού συστήματος	27
4.2 Εγκατάσταση των σταθμών.....	28
4.2.1 Μετεωρολογικοί σταθμοί.....	28
4.2.2 Σταθμοί μέτρησης στάθμης ταμιευτήρων	29
4.2.3 Σταθμοί μέτρησης στάθμης ποταμών	30
4.3 Διαχείριση δεδομένων	32
4.3.1 Ροή δεδομένων	32
4.3.2 Ονοματολογία χρονοσειρών	34
4.3.3 Επεξεργασία δεδομένων	34

4.3.4	Υδρομετρήσεις	35
4.4	Αξιολόγηση και ολοκλήρωση του δικτύου	35
4.4.1	Γενικές παρατηρήσεις από τη λειτουργία του δικτύου	35
4.4.2	Σύγκριση δεδομένων	36
4.4.3	Πρόσθετες εργασίες	36
4.4.4	Παρακολούθηση λειτουργίας και συντηρήσεων	37
5	Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες	38
5.1	Εισαγωγή	38
5.2	Βροχομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες	38
5.2.1	Βροχομετρικοί σταθμοί και έλεγχοι ομογένειας	38
5.2.2	Συμπλήρωση ελλείψεων και επέκταση δειγμάτων	38
5.2.3	Υψομετρική αναγωγή βροχοπτώσεων	38
5.2.4	Εκτίμηση επιφανειακής βροχόπτωσης ταμιευτήρων	40
5.3	Υδρομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες	41
5.3.1	Σκοπός	41
5.3.2	Μεθοδολογία	42
5.3.3	Απορροή λεκάνης Ευήνου	43
5.3.4	Απορροή λεκάνης Μόρνου	46
5.3.5	Απορροή λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού	47
5.3.6	Απορροή λεκάνης Υλίκης	49
5.3.7	Απορροή λεκανών Χάραδρου και Σταμάτας	49
5.3.8	Εκτίμηση επιφανειακού υδατικού δυναμικού του υδροσυστήματος	50
5.4	Εκτίμηση απωλειών ταμιευτήρων λόγω εξάτμισης	51
5.4.1	Γενικά - Μεθοδολογία υπολογισμού εξάτμισης	51
5.4.2	Χρονοσειρές εξάτμισης ταμιευτήρων	52
5.5	Υδατικά ισοζύγια ταμιευτήρων	58
5.5.1	Σκοπός	58
5.5.2	Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων	58
5.5.3	Ταμιευτήρας Ευήνου	59
5.5.4	Ταμιευτήρας Μόρνου	60
5.5.5	Λίμνη Υλίκη	61
5.5.6	Ταμιευτήρας Μαραθώνα	63
5.5.7	Πλαίσιο επικαιροποίησης υδατικών ισοζυγίων ταμιευτήρων	65
6	Θεωρητική τεκμηρίωση μεθοδολογιών	67
7	Πρόγραμμα «Κασταλία» για την στοχαστική προσομοίωση και πρόγνωση υδρολογικών χρονοσειρών	71
7.1	Εισαγωγή	71
7.2	Μαθηματικό υπόβαθρο	71
7.2.1	Η έννοια της στοχαστικής ανέλιξης	71
7.2.2	Η έννοια της στοχαστικής προσομοίωσης	72
7.2.3	Τύποι προσομοίωσης	72

7.3	Σχήμα γέννησης συνθετικών χρονοσειρών	73
7.3.1	Γενική περιγραφή.....	73
7.3.2	Μεθοδολογία αναπαραγωγής της εμμονής.....	74
7.3.3	Γέννηση ετήσιων χρονοσειρών.....	75
7.3.4	Γέννηση μηνιαίων χρονοσειρών.....	76
7.3.5	Αποκατάσταση συνέπειας μηνιαίων χρονοσειρών.....	76
7.3.6	Γέννηση χρονοσειρών υπό μορφή πρόγνωσης.....	77
7.3.7	Μεθοδολογία αποσύνθεσης μητρώων συνδιασπορών.....	77
7.3.8	Παραγωγή τυχαίων αριθμών.....	78
7.4	Σχεδιασμός υπολογιστικού συστήματος.....	78
7.5	Πλαίσιο επιχειρησιακής εφαρμογής συστήματος.....	79
7.5.1	Γέννηση χρονοσειρών για προσομοίωση μόνιμης κατάστασης.....	79
7.5.2	Γέννηση σεναρίων στοχαστικής πρόγνωσης.....	80
8	Υδρονομέας (έκδοση 3.2) - Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων	81
8.1	Στόχοι ανάπτυξης του Υδρονομέα	81
8.1.1	Περιγραφή του ερευνητικού αντικειμένου.....	81
8.1.2	Δεύτερη έκδοση	81
8.1.3	Τρίτη έκδοση.....	82
8.2	Λειτουργίες του υπολογιστικού συστήματος	83
8.3	Μαθηματικό υπόβαθρο.....	84
8.3.1	Μεθοδολογικό πλαίσιο βέλτιστης διαχείρισης υδροσυστημάτων	84
8.3.2	Σχηματοποίηση μοντέλου υδροσυστήματος.....	85
8.3.3	Παραμετροποίηση υδροσυστήματος.....	86
8.3.4	Μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης.....	88
8.3.5	Εύρεση βέλτιστης πολιτικής διαχείρισης.....	94
8.3.6	Μεθοδολογία βελτιστοποίησης.....	95
8.4	Σχεδιασμός του υπολογιστικού συστήματος.....	95
8.4.1	Υποσυστήματα του <i>Υδρονομέα</i>	95
8.4.2	Στοιχεία ενός έργου.....	97
9	Σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης	99
9.1	Εισαγωγή.....	99
9.2	Θεωρητικό υπόβαθρο	99
9.2.1	Προσομοίωση επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών	99
9.2.2	Προσομοίωση υπόγειων υδρολογικών διεργασιών.....	100
9.2.3	Σχήμα συνδυασμένης προσομοίωσης επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών	101
9.2.4	Μοντέλο κατανομής απολήψεων	102
9.2.5	Βαθμονόμηση μοντέλου.....	103
9.3	Δεδομένα λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού.....	103
9.3.1	Σκοπός.....	103

9.3.2	Βροχομετρικά δεδομένα.....	103
9.3.3	Δεδομένα χιονόπτωσης.....	104
9.3.4	Υδρομετρικά δεδομένα.....	104
9.3.5	Δεδομένα υπόγειας υδρολογίας.....	105
9.3.6	Δεδομένα αρδευτικών αναγκών.....	105
9.4	Ανάπτυξη λογισμικού προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών.....	105
9.5	Προσαρμογή μοντέλου προσομοίωσης στη λεκάνη του Β. Κηφισού.....	106
9.5.1	Σκοπός και περιορισμοί του μοντέλου.....	106
9.5.2	Σχηματοποίηση λεκάνης απορροής, υδροφορέα και υδροσυστήματος.....	107
9.5.3	Ιστορικές χρονοσειρές.....	109
9.5.4	Μεθοδολογία και κριτήρια βαθμονόμησης.....	109
9.5.5	Αποτελέσματα βέλτιστης λύσης.....	110
9.6	Προετοιμασία μοντέλου για επιχειρησιακή χρήση.....	112
9.6.1	Ένταξη του μοντέλου στο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων.....	112
9.7	Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών Υλίκης.....	114
10	Σχέδια Διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας και επικαιροποιήσεις	116
10.1	Το θεσμικό πλαίσιο της ΕΥΔΑΠ.....	116
10.1.1	Ο Νόμος 2744/1999.....	116
10.1.2	Άλλα νομοθετήματα γενικά για τη διαχείριση υδατικών πόρων.....	117
10.1.3	Η σύμβαση μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου και της ΕΥΔΑΠ.....	118
10.2	Σκοπός και αντικείμενο των σχεδίων διαχείρισης.....	119
10.3	Βασικές επισημάνσεις.....	120
10.4	Δομή των σχεδίων διαχείρισης.....	121
11	Συμπεράσματα	123
	Αναφορές	126

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό

Τον Δεκέμβριο του 1996, η ΕΥΔΑΠ, σε συνεργασία με το σύμβουλο Knight Piésold και με την οικονομική υποστήριξη του Ταμείου Συνοχής της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, εκπόνησε διαχειριστικό σχέδιο για την υποδομή ύδρευσης και σχέδιο δεκαπενταετούς αναπτυξιακού προγράμματος. Στα πλαίσια του σχεδίου αυτού, υπήρχε πρόβλεψη για τη δημιουργία μοντέλου υδατικών πόρων, καθώς και για τον καθορισμό λεπτομερών κανόνων λειτουργίας του συστήματος, με σκοπό τη βελτιστοποίηση των απολήψεων με παράλληλη διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος (ΕΥΔΑΠ, 1996, σ. Σ-5). Η σχετική πρόβλεψη βασίστηκε σε προγενέστερη πρόταση του Δ. Κουτσογιάννη και περιλήφθηκε στο έργο 1105 του Ταμείου Συνοχής ως έργο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) (ΕΥΔΑΠ 1996, σ. 22).

Για την υλοποίηση της εν λόγω πρόβλεψης, με την από 26/5/1999 απόφαση του Διοικητικού Συμβουλίου της, η ΕΥΔΑΠ ανέθεσε σε ερευνητική ομάδα του Τομέα Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων του ΕΜΠ με επιστημονικό υπεύθυνο τον Αναπληρωτή Καθηγητή Δ. Κουτσογιάννη το ερευνητικό έργο με τίτλο *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*. Το έργο εκπονήθηκε σε δύο φάσεις, η πρώτη από τις οποίες ολοκληρώθηκε στο τέλος του έτους 2000, ενώ η δεύτερη που άρχισε με το τέλος της πρώτης περατώθηκε τον Μάρτιο του 2004. Η δεύτερη φάση του έργου ανατέθηκε με την από 20-6-2001 συμπληρωματική σύμβαση μεταξύ ΕΥΔΑΠ και ΕΜΠ.

Η κεντρική ιδέα του ερευνητικού έργου είναι η κατασκευή ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων (ΣΥΑ) για τη διαχείριση του συστήματος υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, στηριγμένου σε σύγχρονα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης-βελτιστοποίησης και σε τεχνικές πληροφορικής. Στα πλαίσια του ΣΥΑ, αναπτύχθηκαν ακόμη σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας, σύστημα μέτρησης υδατικών πόρων και σύστημα εκτίμησης και πρόγνωσης υδατικών πόρων, ενώ δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην συνεργασία και τη μεταφορά τεχνογνωσίας μεταξύ ΕΜΠ και ΕΥΔΑΠ.

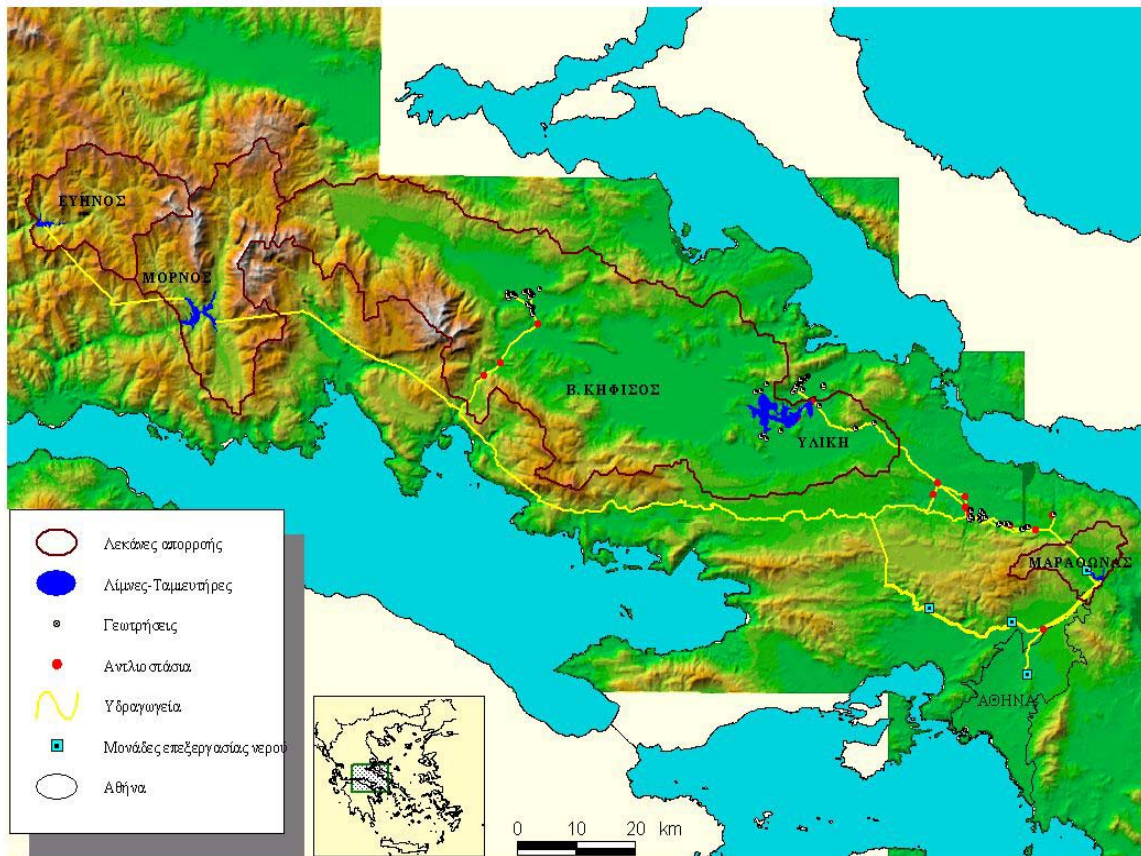
1.2 Αντικείμενο και στόχοι του ερευνητικού έργου

Κύριος στόχος του έργου είναι η ανάπτυξη και επιχειρησιακή λειτουργία ενός ολοκληρωμένου πληροφοριακού συστήματος, με τη χρήση του οποίου θα είναι δυνατή η ορθολογική διαχείριση του συστήματος υδατικών πόρων που αξιοποιεί η ΕΥΔΑΠ για την ύδρευση της Αθήνας.

Το αντικείμενο του ερευνητικού έργου (προσδιορίζεται αναλυτικά στη σχετική σύμβαση και ειδικότερα στο Παράρτημα Ι που τη συνοδεύει), συνίσταται από πέντε κύρια υποσυστήματα:

- ανάπτυξη συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας για την απεικόνιση και εποπτεία του εξωτερικού υδροδοτικού συστήματος της ΕΥΔΑΠ·
- υποστήριξη της ανάπτυξης συστήματος μέτρησης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας·
- ανάπτυξη συστήματος εκτίμησης και πρόγνωσης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας·
- ανάπτυξη συστήματος υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας·
- συνεργασία και μεταφορά τεχνογνωσίας στην ΕΥΔΑΠ για τα παραπάνω υποσυστήματα.

Το πρώτο υποσύστημα έχει στόχο την εποπτεία (αναγνώριση, προβολή ή εκτύπωση των διάφορων χαρακτηριστικών) του εξωτερικού υδροδοτικού συστήματος της ΕΥΔΑΠ (Σχήμα 1.1), τόσο στο επίπεδο μεταφοράς του νερού (εξωτερικά υδραγωγεία), όσο και σε επίπεδο προέλευσής του (ταμιευτήρες, ποτάμια, πηγές). Το υποσύστημα περιλαμβάνει σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας (ΣΓΠ) και σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων (ΣΔΒΔ). Το πρώτο χρησιμοποιείται για την καταγραφή των γεωγραφικών πληροφοριών (κυρίως πληροφορία θέσης) και το δεύτερο για την καταγραφή των πληροφοριών που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του συστήματος και τις χρονοσειρές. Ακόμη, περιλαμβάνει εφαρμογές ανάκτησης και επεξεργασίας των δεδομένων, ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των υποσυστημάτων και απεικόνισης των αποτελεσμάτων υπό μορφή χαρτών.



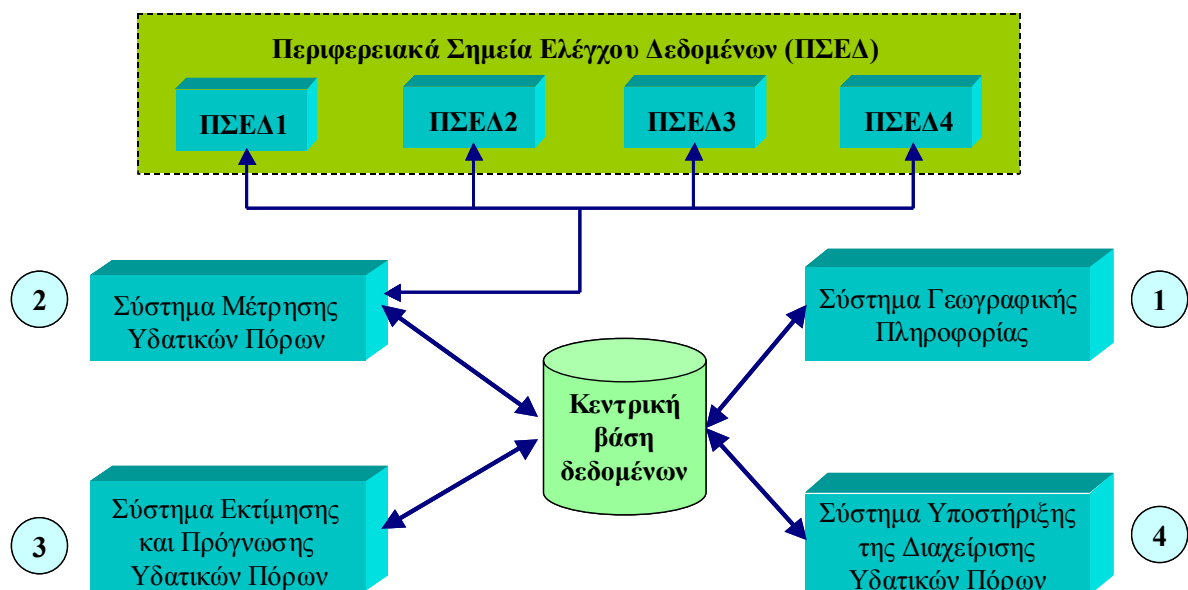
Σχήμα 1.1: Το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας.

Το δεύτερο υποσύστημα έχει στόχο τη μέτρηση των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών και την επιχειρησιακή αξιοποίηση των μετρήσεων στη διαχείριση των υδατικών πόρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Πρόκειται για μετρητικό δίκτυο, που αποτελείται από τους σταθμούς μέτρησης των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών, τα Περιφερειακά Σημεία Ελέγχου Δεδομένων (ΠΣΕΔ) ανά λεκάνη απορροής και το Κέντρο Διαχείρισης Δεδομένων (ΚΔΔ), το οποίο τελικά συλλέγει και διαχειρίζεται το σύνολο των δεδομένων. Οι σταθμοί μέτρησης περιλαμβάνουν αυτόματους τηλεμετρικούς, αλλά και συμβατικούς υδρομετρικούς σταθμούς. Οι αυτόματοι τηλεμετρικοί σταθμοί διακρίνονται σε μετεωρολογικούς και σταθμημετρικούς (ποταμών και ταμιευτήρων) και περιλαμβάνουν τους αισθητήρες μέτρησης και τα συστήματα αποθήκευσης, τηλεμετάδοσης και ενεργειακής τροφοδοσίας. Οι συμβατικοί σταθμοί περιλαμβάνουν αποκλειστικά εγκαταστάσεις υδρομέτρησης ποταμών (διατάξεις έδρασης, συρματόσχοινα, μυλίσκους, όργανα μέτρησης συγκέντρωσης διαλυμάτων).

Το *τρίτο υποσύστημα* αφορά στην ανάπτυξη συστήματος εκτίμησης και πρόγνωσης των εισροών και απωλειών των ταμιευτήρων Εύηνου, Μόρνου, Υλίκης και Μαραθώνα. Σε ότι αφορά στις εισροές, το σύστημα υλοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο με βάση ένα σχήμα πολλών θέσεων και δύο χρονικών βημάτων (μηνιαίο και ετήσιο). Το σύστημα χρησιμοποιεί τα ιστορικά δεδομένα για να παράγει συνθετικές χρονοσειρές απορροών, βροχοπτώσεων και εξατμίσεων στους ταμιευτήρες, οι οποίες διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων και επικαιροποιούνται με βάση τις πιο πρόσφατες μετρήσεις. Ακόμη, διαχειρίζεται κατάλληλα τις ιστορικές και τις συνθετικές χρονοσειρές, εξάγει τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους, εκτιμά τις παραμέτρους των μοντέλων, παράγει τις συνθετικές χρονοσειρές και παρουσιάζει τα αποτελέσματα υπό μορφή πινάκων και γραφημάτων. Στο ίδιο αντικείμενο περιλαμβάνεται και η εκτίμηση και πρόγνωση των υπόγειων υδατικών πόρων της περιοχής Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης με βάση τις μετρήσεις των κατακρημισμάτων και των μετεωρολογικών μεταβλητών της λεκάνης, των παροχών στη Διώρυγα Καρδίτσας και σε ενδιάμεσες θέσεις, καθώς και δεδομένα λειτουργίας των γεωτρήσεων στη λεκάνη. Το σύστημα αυτό επιτρέπει την πρόγνωση των απολήξιμων όγκων νερού τόσο από τα υπόγεια όσο και από τα επιφανειακά νερά των λεκανών Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης.

Το *τέταρτο υποσύστημα* περιλαμβάνει την υποστήριξη της διαχείρισης υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, που αποτελεί και το κύριο εργαλείο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος. Το σύστημα πραγματοποιεί προσομοίωση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας του υδροδοτικού συστήματος, υποδεικνύοντας αποδοτικούς διαχειριστικούς κανόνες για τη λειτουργία του. Το υπολογιστικό σύστημα λειτουργεί με πολλαπλούς ανταγωνιστικούς στόχους και χρήσεις υδατικών πόρων και εξάγει ως αποτελέσματα τους απολήξιμους όγκους νερού και τα αντίστοιχα οικονομικά μεγέθη. Ακόμη, το σύστημα υλοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο του φυσικού συστήματος με όλες τις κύριες συνιστώσες του (ταμιευτήρες, υδραγωγεία, αντλιοστάσια, υπόγειοι υδροφορείς, μονάδες παραγωγής ενέργειας).

Τέλος, το *πέμπτο υποσύστημα* περιλαμβάνει τη διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων ΕΥΔΑΠ - ΕΜΠ μέσω τηλεφωνικών γραμμών, την συνδιοργάνωση σεμιναρίων και ημερίδων εργασίας, την οργάνωση προγραμμάτων εκπαίδευσης του προσωπικού της ΕΥΔΑΠ στη χρήση του λογισμικού που αναπτύσσεται και την από κοινού εκπόνηση διαφόρων αντικειμένων, που αναφέρονται κυρίως στα διαχειριστικά σχέδια του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας.



Σχήμα 1.2: Διασύνδεση πληροφοριακών συστημάτων.

Τα υποσυστήματα 2 έως 4 τροφοδοτούνται από την ΚΒΔ με δεδομένα και επιστρέφουν στο σύστημα 1 αποτελέσματα για παρουσίαση υπό μορφή χαρτών, πινάκων ή διαγραμμάτων. Στο, παρουσιάζεται ο τρόπος διασύνδεσης των συστημάτων. Οι γραμμές με βέλος και στις δύο άκρες υποδηλώνουν την αμφίδρομη μεταφορά πληροφοριών (Σχήμα 1.2).

1.3 Απαιτήσεις από το σύστημα

Η πρώτη εργασία που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της πρώτης φάσης του ερευνητικού έργου είναι η ανάλυση των απαιτήσεων των προτεινόμενων συστημάτων για την εκτίμηση και πρόγνωση των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας. Η ανάλυση αυτή, που προβλέπονταν από τη σύμβαση του έργου, περιλαμβάνεται στο Τεύχος 1 (Α Φάση), όπου γίνεται λεπτομερής περιγραφή της λειτουργίας, της συμπεριφοράς και των περιορισμών του τελικού προϊόντος από την οπτική γωνία του χρήστη. Οι απαιτήσεις είναι γραμμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να επαληθεύονται εύκολα και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κείμενο αναφοράς τόσο από τους σχεδιαστές των υπολογιστικών συστημάτων όσο και από τους τελικούς χρήστες.

1.4 Συνεργασία ΕΜΠ-ΕΥΔΑΠ

Η συνεργασία μεταξύ των ομάδων ΕΜΠ και ΕΥΔΑΠ στη σε όλη τη διάρκεια του έργου ήταν απρόσκοπτη και από αυτήν προέκυψε η ανάλυση απαιτήσεων του συνολικού συστήματος (Τεύχος 1, Α Φάση), η υλοποίηση των μελετών υπολογιστικού και μετρητικού εξοπλισμού (Τεύχη 2, 4 και 16) και τα διαχειριστικά σχέδια (Τεύχη 5, 13 και 14). Ακόμη, πραγματοποιήθηκαν επιμέρους συνεργασίες μεταξύ των μελών των δύο ομάδων για την υλοποίηση επιμέρους αντικειμένων, μεγάλη σειρά συσκέψεων όπου συμμετείχε το σύνολο των στελεχών των ομάδων ΕΜΠ και ΕΥΔΑΠ, καθώς και επισκέψεις στις λεκάνες απορροής του υδροδοτικού συστήματος με συμμετοχή μελών και από τις δύο ομάδες.

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου οργανώθηκαν δύο ημερίδες με συνεργασία του ΕΜΠ και της ΕΥΔΑΠ. Στην πρώτη ημερίδα που πραγματοποιήθηκε στις 8/5/2000 έγινε παρουσίαση των επιμέρους αντικειμένων του έργου από την ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ και την επιτροπή παρακολούθησης της ΕΥΔΑΠ. Στην ημερίδα πήραν μέρος πολλά στελέχη της ΕΥΔΑΠ και καταγράφηκαν οι απόψεις και προτάσεις τους που σχετίζονταν με τους στόχους του έργου και τις απαιτήσεις από αυτό. Η δεύτερη ημερίδα, στη διοργάνωση της οποίας συμμετείχε και το Πανεπιστήμιο Αιγαίου, πραγματοποιήθηκε στις 28/11/2000 και είχε θέμα την παρουσίαση μεθόδων για την ολοκληρωμένη διαχείριση και βέλτιστη λειτουργία των υδρευτικών συστημάτων. Στην ημερίδα συμμετείχαν Έλληνες και ξένοι ομιλητές από Ευρωπαϊκούς και Αμερικανικούς φορείς, όπου μετέφεραν την εμπειρία τους σχετικά με τη διαχείριση του υδρευτικού νερού των πόλεων.

Στη διάρκεια της δεύτερης φάσης του έργου, ολοκληρώθηκε η μεταφορά τεχνογνωσίας και πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση των υπολογιστικών συστημάτων (υλικού και λογισμικού) σε χώρο της ΕΥΔΑΠ, καθώς και ολοκλήρωση της εγκατάστασης και της πιλοτικής λειτουργίας (σε επιχειρησιακές συνθήκες) του μετρητικού δικτύου.

1.5 Ερευνητική συνιστώσα του έργου

Ο χαρακτήρας του προκείμενου έργου είναι ερευνητικός, με σημαντικά αποτελέσματα. Υπάρχουν ερευνητικές δημοσιεύσεις και ανακοινώσεις που εκπονήθηκαν στα πλαίσια του έργου, που αφορούν:

- θεωρητικές εργασίες δημοσιευμένες σε επιστημονικά περιοδικά·
- δημοσιεύσεις σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων·

- ανακοινώσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια·
- προσκεκλημένες διαλέξεις·
- ανακοινώσεις σε ελληνικές επιστημονικές ημερίδες.

Λεπτομερής κατάλογος των δημοσιεύσεων δίνεται σε ξεχωριστό κεφάλαιο, ενώ οι περιλήψεις στην ελληνική και ορισμένα από τα πλήρη κείμενα δίνονται στο τεύχος 15.

1.6 Ερευνητική ομάδα

Επιστημονικός υπεύθυνος και συντονιστής του έργου είναι ο Αναπληρωτής Καθηγητής Δ. Κουτσογιάννης, ο οποίος παράλληλα συνέβαλε στις θεωρητικές αναλύσεις και την ανάπτυξη αλγορίθμων. Τα μέλη της ερευνητικής ομάδας και οι εργασίες στις οποίες συνέβαλαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1 (σε αλφαβητική σειρά).

Πίνακας 1.1: Μέλη της ερευνητικής ομάδας ΕΜΠ.

Όνοματεπώνυμο – Τίτλος σπουδών	Συνοπτική περιγραφή εργασιών
Κ. Αναγνώστου, Πτυχιούχος Παντείου	Γραμματειακή υποστήριξη. Συλλογή δεδομένων.
Ι. Γαβριηλίδης, Πολιτικός Μηχανικός	Συμμετοχή στη μελέτη εγκατάστασης του μετρητικού δικτύου.
Α. Ευστρατιάδης, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc Υδρολογίας, Υποψήφιος Διδάκτορας	Θεωρητικές αναλύσεις. Συλλογή και επεξεργασία υδρομετεωρολογικών δεδομένων. Ανάπτυξη συστημάτων στοχαστικής προσομοίωσης, υποστήριξης της διαχείρισης, και προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου των λεκανών Β. Κηφισού και Υλίκης. Συμμετοχή στην εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης.
Δ. Ζαρρής, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc Υδρολογίας, Υποψήφιος Διδάκτορας	Συμμετοχή στη μελέτη εγκατάστασης του μετρητικού δικτύου.
Ν. Ζερβός, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ	Συμμετοχή στο σχεδιασμό του συστήματος υποστήριξης της διαχείρισης.
Π. Καβαλαγιός, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΕΜΠ	Τεχνική υποστήριξη πληροφοριακών συστημάτων. Υλοποίηση βάσης δεδομένων.
Γ. Καραβοκυρός, Μηχανικός Πληροφορικής	Θεωρητικές αναλύσεις. Ανάπτυξη συστήματος υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων της Αθήνας. Ανάπτυξη λογισμικού σύνταξης εκθέσεων. Συμμετοχή στην εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης.
Θ. Κάργας, Διπλ. πληροφορικής ΕΚΠΑ	Ανάπτυξη εφαρμογών λογισμικού.
Ο. Κίτσου, BC Economics Deree, MSc Finance Reading UK	Γραμματειακή και λογιστική υποστήριξη.
Σ. Κοζάνης, Δρ. Αγρονόμος-Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ	Ανάπτυξη λογισμικού διαχείρισης δεδομένων. Ανάπτυξη λογισμικού σύνταξης εκθέσεων.
Α. Κουκουβίνος, Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ, DEA Γεωγραφίας	Σχεδιασμός και υλοποίηση γεωγραφικής βάσης δεδομένων. Συμμετοχή στην εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης.
Κ. Κωνσταντινίδης, Μηχανολόγος Μηχανικός	Συμμετοχή στη μελέτη εγκατάστασης του μετρητικού δικτύου.

Όνοματεπώνυμο – Τίτλος σπουδών	Συνοπτική περιγραφή εργασιών
Ν. Μαμάσης, Αγρονόμος-Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ, Δρ. Μηχανικός ΕΜΠ	Συλλογή και επεξεργασία υδρομετεωρολογικών δεδομένων. Συμμετοχή στη μελέτη εγκατάστασης του μετρητικού δικτύου. Ανάλυση ζήτησης νερού. Συμμετοχή στην εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης.
Α. Μαυροδήμου, Αρχιτέκτων Μηχανικός ΑΠΘ	Οικονομική διαχείριση του έργου.
Ι. Ναλμπάντης, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, Δρ. Μηχανικός	Θεωρητικές αναλύσεις. Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου των λεκανών Β. Κηφισού και Υλίκης. Επεξεργασία δεδομένων. Συμμετοχή στην εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης.
Μ. Οικονόμου, Πτυχιούχος Παντείου	Γραμματειακή και λογιστική υποστήριξη. Συλλογή δεδομένων.
Τ. Παπαθανασιάδης, Πολιτικός Μηχανικός	Συμμετοχή στη μελέτη εγκατάστασης του μετρητικού δικτύου.
Α. Παπακώστας, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΕΜΠ	Μελέτη εξοπλισμού. Σχεδιασμός βάσης δεδομένων.
Δ. Ρόζος, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, Υποψήφιος Διδάκτορας	Θεωρητικές αναλύσεις. Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου των λεκανών Β. Κηφισού και Υλίκης. Συμμετοχή στην εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης.
Α. Χριστοφίδης, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc Πληροφορικής	Μελέτη εξοπλισμού. Υλοποίηση βάσης δεδομένων. Ανάπτυξη λογισμικού διαχείρισης δεδομένων. Υποστήριξη σε θέματα πληροφορικής.

Από πλευράς ΕΥΔΑΠ, στις εργασίες του ερευνητικού έργου συνεργάστηκαν οι επιβλέποντες του έργου Α. Ξανθάκης (Α Φάση), Ε. Παρλής, και Α. Νασίκας (Β Φάση), οι Διευθυντές Υδροληψίας και Μεταφοράς Νερού Χ. Καρόπουλος και Α. Αυγερινός, και τα μέλη της επιτροπής παρακολούθησης Σ. Πολιτάκη, Ν. Δαμιανόγλου, Δ. Γκριντζιά, Β. Τσουκαλά, Σ. Ναλπαντίδου, Κ. Κωνσταντινίδου, Ε. Νεστορίδου, Δ. Νικολόπουλος, Κ. Παυλίδου, Μ. Ξανθάκη, καθώς και η Μ. Κούτρα.

Ως σύμβουλοι για τις εργασίες υδρογεωλογίας που σχετίζονται με το σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Β. Κηφισού-Υλίκης συνέβαλαν οι: Π. Μαρίνος, Καθηγητής ΕΜΠ, Π. Παπανικολάου, Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Β. Δένδρου, Δρ. Μηχανικός, Α. Παναγόπουλος, Δρ. Υδρογεωλόγος, ερευνητής στο ΕΘΙΑΓΕ, Β. Περγλέρος, Υδρογεωλόγος, και Σ. Δρακοπούλου, Υδρογεωλόγος.

Σε θέματα που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές όψεις της διαχείρισης, στα πλαίσια του διαχειριστικού σχεδίου που εκπονήθηκε, συνέβαλε ο Μ. Μποναζούντας, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ.

1.7 Αναγνωρίσεις

Η ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ επιθυμεί να ευχαριστήσει:

- τον τ. Διευθυντή Στρατηγικού Σχεδιασμού και Προγραμματισμού της ΕΥΔΑΠ Ι. Ναζλόπουλο, που είχε την πρωτοβουλία για το ξεκίνημα αυτού του ερευνητικού έργου, και τον τ. Γενικό Διευθυντή Κ. Κυριαζή για το έμπρακτο ενδιαφέρον του·
- τον τ. Διευθύνοντα Σύμβουλο της ΕΥΔΑΠ Δ. Ξένο, και τον τ. Πρόεδρο Γ. Παπαβασιλείου για την εμπιστοσύνη που μας έδειξαν, αναθέτοντάς μας το ερευνητικό έργο·

- το Διευθύνοντα Σύμβουλο της ΕΥΔΑΠ Ε. Τζέλλα, για το ενδιαφέρον του κατά την Β Φάση του ερευνητικού έργου·
- τους επιβλέποντες του έργου Α. Ξανθάκη (Α Φάση), Ε. Παρλή, και Α. Νασίκα (Β Φάση), τους Διευθυντές Υδροληψίας και Μεταφοράς Νερού Χ. Καρόπουλο και Α. Αυγερινό, και τα μέλη της επιτροπής παρακολούθησης Σ. Πολιτάκη, Ν. Δαμιανόγλου, Δ. Γκριντζιά, Β. Τσουκαλά, Σ. Ναλπαντίδου, Κ. Κωνσταντινίδου, Ε. Νεστορίδου, Δ. Νικολόπουλος, Κ. Παυλίδου, και Μ. Ξανθάκη, καθώς και την Μ. Κούτρα για τη συνεχή και ουσιαστική συνεργασία τους·
- τον Αναπληρωτή Διευθυντή του Δικτύου Ύδρευσης Σ. Γεωργιάδη, για τις υποδείξεις και παρατηρήσεις του·
- τον Προϊστάμενο της υπηρεσίας Η/Μ εγκαταστάσεων Κιούρκων Α. Νασίκα, ο οποίος αρχικά από τη θέση αυτή και, στη συνέχεια, ως επιβλέπων του έργου, για την καθοριστική για το έργο βοήθεια του στην κατανόηση του συστήματος αντλητικών γεωτρήσεων Μαυροσουβάλας·
- τα στελέχη της ΕΥΔΑΠ Κ. Ρίπη και Α. Αγγελόπουλο, για τη βοήθειά τους στην κατανόηση των υδρογεωλογικών συνθηκών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού·
- τον Προϊστάμενο της υπηρεσίας Η/Μ εγκαταστάσεων Υλίκης της ΕΥΔΑΠ Ν. Βλαγκούλη και τον υπάλληλο της ίδιας υπηρεσίας Θ. Βασιλείου για τη βοήθειά τους στον εντοπισμό των θέσεων υδρομετεωρολογικών σταθμών στην περιοχή της Υλίκης·
- τον υπάλληλο της υπηρεσίας Μόρνου-Ευήνου της ΕΥΔΑΠ, Ι. Μέρη για τη βοήθειά του στον εντοπισμό των θέσεων υδρομετεωρολογικών σταθμών στην περιοχή του Μόρνου·
- τον Τμηματάρχη του τμήματος Υδρολογίας της Διεύθυνσης Δ7 του ΥΠΕΧΩΔΕ Ε. Τηλιγάδα, για τη βοήθειά του στην πρόσβαση στο αρχείο μελετών του ΥΠΕΧΩΔΕ·
- το Διευθυντή της Διεύθυνσης Εναλλακτικών Μορφών Ενέργειας της ΔΕΗ Ν. Σταυρίδη και τον Πολιτικό Μηχανικό της ΔΑΥΕ/ΔΕΗ Χ. Μακρυγιώργο, για τις συμβουλές τους σε θέματα εγκατάστασης υδρομετρικών σταθμών·
- τον Διευθυντή της Υπηρεσίας Υδρογεωλογίας του ΙΓΜΕ Η. Δάνδολο, για τη βοήθειά του στην κατανόηση των υδρογεωλογικών συνθηκών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού·
- τον Διευθυντή του Οργανισμού Κωπαΐδας, Α. Τσούτσα·
- τον υδρομετρητή της ΔΕΗ Αγρινίου Χ. Αλβανό, για τις συμβουλές του σε θέματα υδρομετρήσεων·
- τον μελετητή Ι. Καραβοκύρη, για την παροχή δεδομένων σχετικών με τον ταμιευτήρα Ευήνου.

1.8 Διάρθρωση του τεύχους

Το παρόν τεύχος συνοψίζει τις εργασίες και τα αποτελέσματα της δεύτερης κυρίως φάσης του έργου, με αναφορά στις εργασίες της πρώτης φάσης του έργου όπου αυτό κρίθηκε σκόπιμο. Περιλαμβάνει πληροφορίες που οργανώθηκαν σε αυτόνομα κεφάλαια. Κατά κανόνα, αυτά αντιστοιχούν το καθένα σε ένα τεύχος της δεύτερης φάσης. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η υλοποίηση του συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας που αναπτύχθηκε για το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας. Το Κεφάλαιο 3 αναφέρεται στην περιγραφή της κεντρικής βάσης δεδομένων που υλοποιήθηκε για τις ανάγκες του έργου, καθώς και του λογισμικού *Υδρογνώμων* που αναπτύχθηκε για τη διαχείριση και επεξεργασία των δεδομένων. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται το δίκτυο μέτρησης των υδρομετεωρολογικών και υδρολογικών μεταβλητών. Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται αναφορά στα υδρομετεωρολογικά και υδρολογικά δεδομένα και τις επεξεργασίες τους, όπως τα δεδομένα αυτά συμπληρώθηκαν κατά τη δεύτερη φάση του έργου. Το Κεφάλαιο 6 αναφέρεται στη θεωρητική τεκμηρίωση μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν. Στα Κεφάλαια 7, 8, και 9 περιγράφονται, συνοπτικά, οι εφαρμογές λογισμικού και τα μαθηματικά μοντέλα που υποστηρίζουν, και τα οποία αποτελούν τον μεθοδολογικό πυρήνα του έργου (*Κασταλία*, *Υδρονομέας*, υδρολογικό μοντέλο Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης). Στο Κεφάλαιο 10 δίνονται ορισμένα

συνοπτικά στοιχεία για τα δύο διαχειριστικά σχέδια που εκπονήθηκαν για λογαριασμό της ΕΥΔΑΠ. Τέλος, στο Κεφάλαιο 11 συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα του έργου.

1.9 Παραδοτέα δεύτερης φάσης

Οι εργασίες και τα προϊόντα της δεύτερης φάσης του ερευνητικού έργου περιγράφονται σε 13 τεύχη (μαζί με την παρούσα τελική έκθεση). Τα τεύχη αριθμούνται από το 13 ως το 25, καθόσον στην πρώτη φάση τα αντίστοιχα τεύχη είχαν αριθμηθεί από το 1 ως το 12. Πλήρης κατάλογος των τευχών με τον αύξοντα αριθμό, τον τίτλο και τους συγγραφείς τους δίνεται στον Πίνακα 1.2. Τα τεύχη συνοδεύουν και CD που περιλαμβάνουν τα αρχεία εγκατάστασης των συστημάτων πληροφορικής που αναπτύχθηκαν, τα δεδομένα που αποθηκεύτηκαν στις βάσεις δεδομένων του έργου, καθώς και ψηφιακά βίντεο σχετικά με το μετρητικό δίκτυο και τις μετρήσεις υδρολογικών μεταβλητών. Κατάλογος του συνοδευτικού υλικού δίνεται στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.2: Παραδοτέα τεύχη της δεύτερης φάσης του ερευνητικού έργου.

α/α	Τίτλος	Συγγραφείς
13	Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας - Έτος 2001-2002 (αρχικό και επικαιροποιήσεις)	Δ. Κουτσογιάννης, Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Δ. Γκριντζιά, Ν. Δαμιανόγλου, Χ. Καρόπουλος, Σ. Ναλπαντίδου, Α. Νασίκας, Δ. Νικολόπουλος, Α. Ξανθάκης, Κ. Ρίτης
14	Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας - Έτος 2002-2003	Δ. Κουτσογιάννης, Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Ε. Ρόζος, Χ. Καρόπουλος, Α. Νασίκας, Ε. Νεστορίδου, Δ. Νικολόπουλος
15	Θεωρητικό υπόβαθρο μεθοδολογίας	Δ. Κουτσογιάννης, Ι. Ναλμπάντης, Γ. Καραβοκυρός, Α. Ευστρατιάδης, Ν. Μαμάσης, Α. Κουκουβίνος, Α. Χριστοφίδης, Ε. Ρόζος, Α. Οικονόμου
16	Μετρητικό σύστημα	Ν. Μαμάσης
17	Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες	Α. Ευστρατιάδης, Ν. Μαμάσης
18	Σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας	Α. Κουκουβίνος
19	Σχεδιασμός και υλοποίηση κεντρικής βάσης δεδομένων	Ν. Παπακώστας
20	Λογισμικό εργαλείο σύνταξης εκθέσεων	Γ. Καραβοκυρός, Σ. Κοζάνης
21	Μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης	Α. Ευστρατιάδης, Ι. Ναλμπάντης, Ε. Ρόζος
22	Υδρογνώμονας (έκδοση 1.0) - Λογισμικό διαχείρισης δεδομένων	Α. Χριστοφίδης, Σ. Κοζάνης
23	Κασταλία (έκδοση 2.0) - Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών	Α. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης

α/α	Τίτλος	Συγγραφείς
24	Υδρονομέας (έκδοση 3.2) - Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων	Γ. Καραβοκυρός, Α. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης
25	Τελική έκθεση	Επιμέλεια: Ι. Ναλμπάντης, Συγγραφή: Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Σ. Κοζάνης, Α. Κουκουβίνος, Δ. Κουτσογιάννης, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Ε. Ρόζος, Α. Χριστοφίδης

Πίνακας 1.3: Παραδοτέα cd της δεύτερης φάσης του ερευνητικού έργου.

α/α	Τίτλος	Υπεύθυνος
CD-1	Πληροφορικά συστήματα	Γ. Καραβοκυρός
CD-2	Δεδομένα ΒΔ	Α. Χριστοφίδης
CD-3	Πολυμέσα μετρητικού συστήματος	Ν. Μαμάσης

2 Σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας

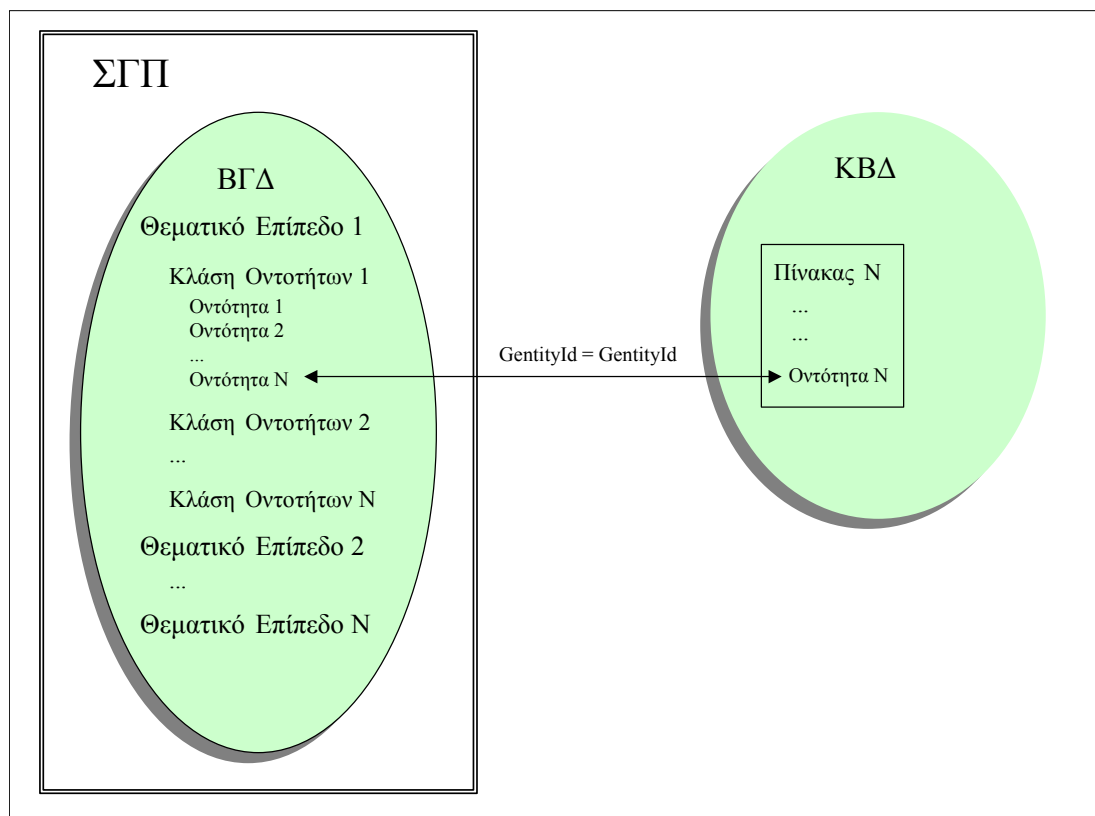
2.1 Εισαγωγή

Το Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ) είναι ένα υποσύστημα του πληροφοριακού συστήματος του έργου που χρησιμοποιείται στην αναγνώριση και εποπτεία των συνιστωσών του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1. Στο ΣΓΠ αποθηκεύονται τα γεωγραφικά δεδομένα και αναπτύσσονται εφαρμογές αναγνώρισης και εποπτείας τους.

2.2 Βάση γεωγραφικών δεδομένων

Για να αποθηκευτούν τα δεδομένα τα σχετικά με τη θέση των συνιστωσών του υδροδοτικού συστήματος σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε, στην πρώτη φάση του έργου, μία Βάση Γεωγραφικών Δεδομένων (ΒΓΔ) (Κουκουβίνος, 2000). Κάθε γεωγραφική οντότητα έχει ένα μοναδικό αριθμό αναγνώρισης που τη συνδέει με την ΚΒΔ (Παπακώστας, 2003).

Η ΒΓΔ σχεδιάστηκε ώστε να περιέχει πληροφορία θέσης και σχήματος, σε κλίμακα 1:50.000, για τις συνιστώσες του υδροδοτικού συστήματος (Σχήμα 1.1). Γενικά, ως μοντέλο δεδομένων ακολουθήθηκε το διανυσματικό, ενώ το μοντέλο ψηφιδωτής διαμέρισης χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση των ψηφιακών μοντέλων υψομέτρου. Κάθε οντότητα που ορίζεται στην ΒΓΔ έχει το σχήμα μιας από τις τρεις βασικές γεωμετρικές δομές που έχει αποδοθεί στην κλάση της (σημείο, γραμμή, πολύγωνο).



Σχήμα 2.1: Η δομή της ΒΓΔ.

Τα δεδομένα που αποθηκεύονται στη ΒΓΔ , περιλαμβάνουν τις παρακάτω κατηγορίες και κλάσεις οντοτήτων:

1. Υδροδοτικό σύστημα (ταμιευτήρες, φράγματα, γεωτρήσεις, υδραγωγεία, τεχνικά έργα στα υδραγωγεία, αντλιοστάσια, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, διυλιστήρια).
2. Δεδομένα επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας (υψομετρία, γενική τοπογραφική πληροφορία, λεκάνες απορροής, υπόγειοι υδροφορείς, πηγές, γεωτρήσεις, υδρομετρικοί-βροχομετρικοί και μετεωρολογικοί σταθμοί μέτρησης).
3. Άλλες, εκτός της ύδρευσης της Αθήνας, χρήσεις των υδατικών πόρων (άλλοι δήμοι που υδρεύονται, αρδευόμενες εκτάσεις).

Η υλοποίηση των κλάσεων και των οντοτήτων φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Υλοποίηση θεματικών επιπέδων και κλάσεων οντοτήτων της ΒΓΔ

Θεματικό επίπεδο	Όνομα φακέλου	Κλάση οντοτήτων	Όνομα κλάσης
Όρια	BOUNDARIES	Όρια περιοχής Όρια φύλλων χάρτη	FRB TILESA
Υψομετρία	ELEVATION	Υψομετρικά σημεία Ισοϋψείς γραμμές Ισοβαθείς γραμμές	ELEVP CONTOURL DEPTHL
Υδρογραφία	HYDROGRAPHY	Σταθμοί μέτρησης Υπολεκάνες απορροής Υδατορεύματα Λίμνες-Ταμιευτήρες Γεωτρήσεις Πηγάδια-Πηγές Φράγματα Υδραγωγεία Κόμβοι υδραγωγείων Θάλασσα	STATIONP WATRSHDA WATRCRSL LAKERESA BORHOLEP WELLSPRP DAML AQUEDCTL AQUEDCTC COASTA
Βιομηχανία	INDUSTRY	Σημεία επεξεργασίας Σημεία αποθήκευσης	PROCESSP STORAGEP
Υποδομές κοινής ωφέλειας	UTILITIES	Αντλιοστάσια Μονάδες παραγωγής ενέργειας Αγωγοί ύδρευσης δήμων	PUMPINGP POWERP PIPEL
Πληθυσμός	POPULATION	Δομημένες περιοχές	BUILTUPA
Μεταφορές	TRANSPORTATION	Οδικό δίκτυο Σιδηροδρομικό δίκτυο	ROADL RAILRDL
Βλάστηση	VEGETATION	Περιοχές βλάστησης Καλλιεργούμενες εκτάσεις	VEGA CROPA

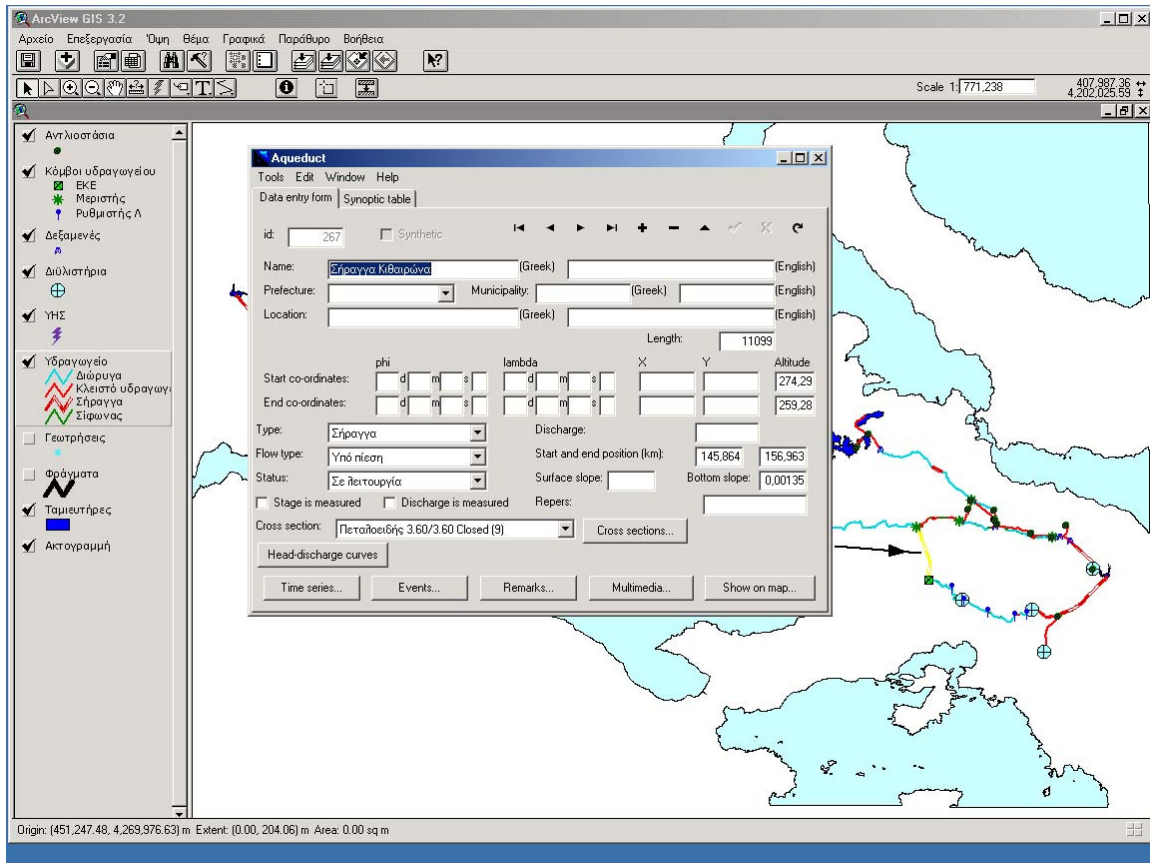
2.3 Εφαρμογή σε περιβάλλον ΣΓΠ

Για την εποπτεία και αναγνώριση των συνιστωσών του υδροδοτικού συστήματος αναπτύχθηκε μία εφαρμογή, στο περιβάλλον του λογισμικού ArcView, έκδοση 3.2 (ESRI, 1999). Η εφαρμογή, που περιγράφεται στο Τεύχος 18, περιλαμβάνει τα περιβάλλοντα: όψεις, πίνακες και εκτυπώσεις, με μία σειρά επιλογών και λειτουργιών σε κάθε περιβάλλον (Σχήμα 2.2). Συγκεκριμένα:

- Οι *Όψεις* είναι ένας συνδυασμός κλάσεων οντοτήτων ώστε να οπτικοποιούνται κάθε φορά αυτές που ενδιαφέρουν το χρήστη. Στο περιβάλλον αυτό χρησιμοποιείται και η εφαρμογή *Υδρογνώμων*

(βλ. 3.2), για την ανάκτηση, από την ΚΒΔ, των δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες των γεωγραφικών οντοτήτων.

- Οι Πίνακες είναι το περιβάλλον όπου γίνεται η διαχείριση των πινάκων της εφαρμογής. Οι πίνακες με πρόθεμα lut είναι αυτοί που συνδέονται με τους πίνακες ιδιοτήτων και προσδιορίζουν τύπους.
- Οι Εκτυπώσεις είναι το περιβάλλον από όπου εκτυπώνονται, σε εκτυπωτή ή σε αρχείο, τα περιεχόμενα των όψεων.



Σχήμα 2.2: Η εφαρμογή σε περιβάλλον ΣΓΠ.

3 Βάση δεδομένων και λογισμικό διαχείρισής της

3.1 Κεντρική Βάση Δεδομένων

Η Κεντρική Βάση Δεδομένων (ΚΒΔ) αποτελεί το θεμέλιο του συνολικού πληροφοριακού συστήματος που δημιουργήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου. Αποθηκεύει τα περισσότερα από τα απαιτούμενα δεδομένα, είναι το κύριο μέσο ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των διαφόρων επιμέρους συστημάτων και περιλαμβάνει τέσσερις κύριες λειτουργίες:

1. Αποθήκευση και διαχείριση ιστορικών και συνθετικών δεδομένων χρονοσειρών.
2. Αναπαράσταση – περιγραφή «πραγματικού κόσμου».
3. Υποστήριξη του συστήματος μετάδοσης των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών.
4. Υποστήριξη εφαρμογών και μοντέλων.

Στην ΚΒΔ δεν αποθηκεύονται τα γεωγραφικά δεδομένα θέσης, τα οποία βρίσκονται σε αντίστοιχη παράλληλη γεωγραφική βάση δεδομένων του συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας (ΣΓΠ).

Η λειτουργία *αποθήκευσης και διαχείρισης ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών* αποτελείται από τις ακόλουθες κύριες συνιστώσες:

- Μητρώο χρονοσειρών, που διατηρεί τις απαραίτητες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά όλων των χρονοσειρών που αποθηκεύονται στο σύστημα όπως: (α) χρονοσειρές πρωτογενών δεδομένων απευθείας από τα όργανα μετρήσεων, (β) επεξεργασμένες χρονοσειρές που προέρχονται από τα πρωτογενή δεδομένα και συνδέονται άμεσα με αυτά (σταθερού χρονικού βήματος, συναθροισμένες, μεγίστων - ελαχίστων κλπ), (γ) συνθετικές χρονοσειρές που δημιουργούνται με διάφορες μεθόδους και (δ) στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών.
- Βοηθητικές πληροφορίες του μητρώου χρονοσειρών (διαστήματα έλλειψης τιμών, εξάρτηση χρονοσειρών από άλλες, χρονοσειρές που προέρχονται από ταυτόχρονη μέτρηση του ίδιου οργάνου και άρα είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους, χρονοσειρές που συναποτελούν ομάδες, χρονοσειρές που σχετίζονται με το ίδιο υδρολογικό σενάριο, χρονοσειρές που σχετίζονται με την ίδια διαδικασία προσομοίωσης - βελτιστοποίησης, πληροφορίες γεγονότων που σχετίζονται με την εξέλιξη στο χρόνο των διαφόρων χρονοσειρών, δείκτης ποιότητας των τιμών των χρονοσειρών). Πάντως, τα λογισμικά που αναπτύχθηκαν, επί του παρόντος χρησιμοποιούν μόνο χρονοσειρές που σχετίζονται με το ίδιο σενάριο, χρονοσειρές που σχετίζονται με την ίδια διαδικασία προσομοίωσης - βελτιστοποίησης, και πληροφορίες γεγονότων.
- Τα δεδομένα χρονοσειρών (πρωτογενή, επεξεργασμένα και συνθετικά).

Η λειτουργία *αναπαράστασης-περιγραφής του «πραγματικού κόσμου»* είναι αυτή που συνδέει τις πληροφορίες της βάσης δεδομένων με τα αντικείμενα με πραγματική υπόσταση. Περιλαμβάνει τις ακόλουθες ομάδες πληροφοριών:

- Τις γεωγραφικές οντότητες που αναφέρονται στις διάφορες υπό μελέτη περιοχές και είναι τεσσάρων τύπων: (α) σημειακές οντότητες (π.χ. σταθμός μέτρησης), (β) ακμές (π.χ. τμήμα υδραγωγείου), (γ) επιφάνειες-περιοχές (π.χ. λεκάνη απορροής), και (δ) δίκτυα (π.χ. υδραγωγείο). Οι γεωγραφικές οντότητες αποτελούν το μέσο σύνδεσης των πληροφοριών της ΚΒΔ με τη γεωγραφική βάση (του ΣΓΠ). Οι κωδικοί των γεωγραφικών οντοτήτων ταυτίζονται με τους κωδικούς των αντίστοιχων οντοτήτων στη γεωγραφική βάση και έτσι δημιουργείται ο σύνδεσμος

μεταξύ των δύο. Μέσω των γεωγραφικών οντοτήτων είναι δυνατή η πρόσβαση και στις χρονοσειρές, εφόσον κάθε χρονοσειρά αντιστοιχεί σε μία μόνο γεωγραφική οντότητα. Με τον τρόπο αυτό οι γεωγραφικές οντότητες και γενικά η γεωγραφική διάσταση της βάσης δεδομένων αποκτούν κεφαλαιώδη σημασία στη διαδικασία ανάκτησης και διαχείρισης των μη γεωγραφικών πληροφοριών χρονοσειρών. Είναι έτσι εφικτό να χρησιμοποιηθεί το ΣΓΠ ως κοινός τρόπος επικοινωνίας με το χρήστη (user interface), ακόμα και για πρόσβαση στις πληροφορίες χρονοσειρών.

- Τα σταθερά περιγραφικά χαρακτηριστικά των γεωγραφικών οντοτήτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν συνοδευτικά δεδομένα που δίνουν σημαντικές επιπρόσθετες πληροφορίες για τις γεωγραφικές οντότητες, στις οποίες αναφέρονται, και είναι τα ακόλουθα: λιθολογική τομή γεώτρησης ή πηγής, υδρολιθολογία γεώτρησης ή πηγής, διάγραμμα – περιγραφή οπής γεώτρησης, διάγραμμα – περιγραφή σωλήνωσης γεώτρησης, χαρακτηριστικές στάθμες και λοιπές πληροφορίες (π.χ. καμπύλες στάθμης – επιφάνειας – όγκου) ταμιευτήρα, διάγραμμα στάθμης – παροχής υπερχειλιστή ταμιευτήρα, συντελεστές διαφυγής ταμιευτήρα, χαρακτηριστικά (διάγραμμα ύψους πτώσης – παροχεταιυτικότητας) αγωγού ύδρευσης, χαρακτηριστικά – παροχεταιυτικότητα διατάξεων μετασχηματισμού ενέργειας (αντλιοστασίων ή γεννητριών), διατομή υδατορεύματος, υδραυλικά χαρακτηριστικά υδατορεύματος, διάγραμμα στάθμης – παροχής υδατορεύματος και διάγραμμα παροχής – στερεοπαροχής υδατορεύματος.
- Τους μετρητικούς σταθμούς χρονοσειρών δεδομένων φυσικών μεγεθών. Κάθε μετρητικός σταθμός αντιστοιχεί σε μία γεωγραφική οντότητα και συγκεκριμένα σε ένα μόνο σημείο – θέση.
- Τα μετρητικά όργανα, τα οποία λειτουργούν στο πλαίσιο μετρητικών σταθμών και παράγουν τιμές φυσικών μεγεθών οι οποίες συνιστούν χρονοσειρές.

Η λειτουργία *μετάδοσης δεδομένων* (τηλεμετρία) από τους απομακρυσμένους μετρητικούς σταθμούς και τα Περιφερειακά Σημεία Ελέγχου Δεδομένων (ΠΣΕΔ) έχει ορισμένες ιδιαιτερότητες, οι οποίες επιβάλλουν την υιοθέτηση ορισμένων ξεχωριστών τεχνικών για την υποστήριξη της μετάδοσης. Συγκεκριμένα:

- Στη γενική περίπτωση μετάδοσης, όλες οι μετρούμενες τιμές των διαφόρων φυσικών μεγεθών για κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή φτάνουν και εισάγονται στο σύστημα ταυτόχρονα, δηλ. σε μία εγγραφή κάθε σταθμός στέλνει όλες τις τιμές για τις μεταβλητές τις οποίες μετρά. Κάθε εγγραφή που στέλνει ο σταθμός περιλαμβάνει τον χρονικό προσδιορισμό της εγγραφής, τις τιμές των μετρούμενων φυσικών μεγεθών και προαιρετικά, κάποια επισήμανση (με κατάλληλη «σημαία») των τιμών. Η εγγραφή που στέλνει ο σταθμός πρέπει να αποθηκεύεται αυτούσια στη βάση δεδομένων, ώστε να είναι αργότερα δυνατός, σε περίπτωση που χρειαστεί, ο έλεγχός της. Επίσης, είναι δυνατό η αποστολή των τιμών να γίνεται μαζικά, δηλ. ο σταθμός να συγκεντρώνει τις διάφορες εγγραφές και να τις αποστέλλει σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή (π.χ. το βράδυ που τα τηλεπικοινωνιακά τέλη είναι χαμηλότερα).
- Η απευθείας μετατροπή των αποστελλόμενων δεδομένων στη γενική μορφή αποθήκευσης δεν κρίνεται σκόπιμη, διότι η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων αυτών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ταχύτερη και να μην επηρεάζεται από άλλες επεξεργασίες της βάσης δεδομένων, όπως η μετατροπή στη γενική μορφή αποθήκευσης, η επισήμανση της λέξης κατάστασης κτλ.
- Απαιτείται ευέλικτη αντιστοιχία των κωδικών οργάνων του σταθμού στην ΚΒΔ με τις αποστελλόμενες από το σταθμό τιμές.
- Απαιτείται τήρηση αρχείου παρακολούθησης της επικοινωνίας ώστε να επισημαίνονται έγκαιρα τυχόν προβλήματα.

Οι κυριότερες συνιστώσες της λειτουργίας *υποστήριξης εφαρμογών και μοντέλων* είναι:

- Οι διαδικασίες προσομοίωσης – βελτιστοποίησης οι οποίες εκτελούνται σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή και αποτελούνται από συγκεκριμένα βήματα.
- Τα υδρολογικά σενάρια, κάθε ένα εκ των οποίων είναι μια συγκεκριμένη σειρά βημάτων που εκτελείται σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή και αποσκοπεί στη δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών για το σύστημα εκτίμησης και πρόγνωσης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας. Τα δεδομένα εξόδου των υδρολογικών σεναρίων είναι οι συνθετικές χρονοσειρές.
- Τα αποτελέσματα των διαδικασιών προσομοίωσης - βελτιστοποίησης.
- Οι στόχοι των διαδικασιών προσομοίωσης - βελτιστοποίησης οι οποίοι εκφράζονται κυρίως ως προς τις επιθυμητές τιμές των διάφορων φυσικών μεγεθών και την εξέλιξή τους στο χρόνο, ενώ ορισμένοι από αυτούς μπορούν επίσης να αποδοθούν ως καμπύλες.
- Οι τιμές αστοχίας των διαδικασιών προσομοίωσης – βελτιστοποίησης ως προς τους στόχους τους, που εκφράζονται είτε ως απλές τιμές μεγεθών (αδυναμία των τιμών να φτάσουν τα προκαθορισμένα από τους στόχους, ύψη), είτε ως καμπύλες.
- Οι παράμετροι των διαδικασιών προσομοίωσης – βελτιστοποίησης.
- Οι παράμετροι των υδρολογικών σεναρίων.
- Οι πίνακες αναφοράς της υπόλοιπης βάσης δεδομένων.
- Άλλα δεδομένα εφαρμογών.

3.2 Σύστημα διαχείρισης και επεξεργασίας υδρολογικών δεδομένων (πρόγραμμα *Υδρογνώμων*)

3.2.1 Γενικά

Ο *Υδρογνώμων* είναι μία εφαρμογή για την διαχείριση και την επεξεργασία των υδρολογικών δεδομένων που περιέχονται στην κεντρική βάση δεδομένων. Συγκεκριμένα ο *Υδρογνώμων* μπορεί να διαχειριστεί:

- Χρονοσειρές όπως βροχόπτωση, εξάτμιση, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, στάθμη ταμιευτήρα, απορροή λεκάνης, παροχή υδατορεύματος κ.ά.
- Γεωγραφικά δεδομένα ως «οντότητες πραγματικού κόσμου» ή απλούστερα «γεωγραφικές οντότητες» όπως πόλεις (cities), ταμιευτήρες (reservoirs), φράγματα (dams), μετεωρολογικούς (μετρητικούς εν γένει) σταθμούς (stations) κ.α.
- Σταθερές υπολογισμών που συσχετίζονται με οντότητες του πραγματικού κόσμου όπως καμπύλες στάθμης - παροχής υδατορεύματος, καμπύλες στάθμης - αποθέματος ταμιευτήρα κ.α.

Επιπλέον, ο *Υδρογνώμων* έχει την δυνατότητα εκτέλεσης απλών επεξεργασιών όπως στατιστική συσχέτιση χρονοσειρών (γραμμική παλινδρόμηση), συνάθροιση χρονοσειρών, υπολογισμός παροχής από στάθμη, υπολογισμός ύψους εξάτμισης, ισοζύγια ταμιευτήρων κ.α.

3.2.2 Υλοποίηση - Εμφάνιση

Ο *Υδρογνώμων* αποτελείται τρεις κύριους τομείς:

- το σύστημα επικοινωνίας με την βάση δεδομένων·
- το τμήμα επεξεργασίας των δεδομένων·
- το γραφικό περιβάλλον επικοινωνίας με τον χρήστη.

Το γραφικό περιβάλλον επικοινωνίας υλοποιείται με φόρμες (παράθυρα), με την βοήθεια των οποίων είναι δυνατή η άντληση δεδομένων από την βάση δεδομένων, η επεξεργασία των δεδομένων και η ενημέρωση της βάσης δεδομένων αποθηκεύοντας τυχόν αλλαγές ή εισαγωγή νέων δεδομένων.

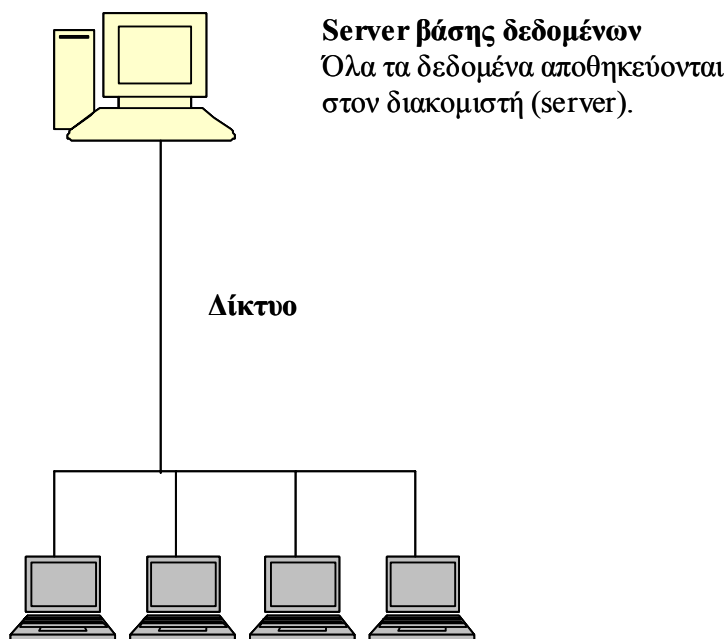
Οι κύριες φόρμες του προγράμματος είναι:

- φόρμες για την διαχείριση γεωγραφικών οντοτήτων, όπως ταμιευτήρες, μετρητικοί σταθμοί, πόλεις, λεκάνες απορροής, κ.α.
- φόρμες για την διαχείριση των χρονοσειρών και των δεδομένων τους.

Επιπλέον, ο *Υδρογνώμων* περιέχει βοηθητικές φόρμες υπολογισμών (π.χ. για τη συνάθροιση χρονοσειρών, για τον υπολογισμό στάθμης-παροχής, υπολογισμό ισοζυγίου ταμιευτήρα, κ.α.). Ακόμη περιέχει βοηθητικές φόρμες για τις ρυθμίσεις του, τη σύνδεση με την βάση δεδομένων κ.α.

3.3 Γενική παρουσίαση του λογισμικού *Υδρογνώμων*

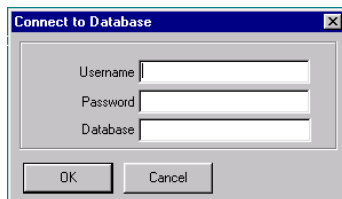
Αρχιτεκτονική Client-Server



Clients

Ο «Υδρογνώμων» τρέχει σε clients, που συνδέονται με τη βάση δεδομένων μέσω του δικτύου.

Αν ο server της βάσης δεδομένων τρέχει Windows, τότε ο Υδρογνώμων μπορεί να τρέξει και στον server.



Σύνδεση με τη βάση δεδομένων

Οι χρήστες συνδέονται με τη βάση δεδομένων χρησιμοποιώντας κωδικό και σύνθημα. Διαφορετικοί χρήστες έχουν διαφορετικά δικαιώματα στη βάση δεδομένων. Κάποιοι έχουν δικαίωμα ανάγνωσης μόνο· άλλοι μπορούν να προσθέσουν ή να τροποποιήσουν δεδομένα. Λογισμικό της Oracle, όπως το Oracle Enterprise Manager, που περιλαμβάνεται στο server, πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την προσθαφαίρεση χρηστών και την χορήγηση δικαιωμάτων πρόσβασης.

Μετρητικοί σταθμοί (Stations)

Τα δεδομένα που αποθηκεύονται για ένα μετρητικό σταθμό περιλαμβάνουν όνομα, τοποθεσία, συντεταγμένες, φορέα στον οποίο ανήκει ο σταθμός, τύπο (μετεωρολογικό, υδρομετρικό, κλπ.), περίοδο λειτουργίας, αν είναι ακόμα ενεργός, και αν είναι τηλεμετρικός.

Δίγλωσσα πεδία

Τα πεδία της βάσης δεδομένων διατίθενται σε δύο γλώσσες (όπως φαίνεται, για παράδειγμα, στο όνομα του σταθμού παραπάνω). Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο αν η βάση δεδομένων είναι προσπελάσιμη από δίγλωσσο web site. Όλα τα πεδία είναι σε δύο γλώσσες, ακόμα κι αν αυτό δεν φαίνεται παραπάνω· για παράδειγμα, ο νομός στην παραπάνω φόρμα φαίνεται μόνο στα ελληνικά, γιατί τα ονόματα των νομών ρυθμίζονται σε άλλη φόρμα:

id	Name (Greek)	Name (English)	Abbrev (Gr)	Abbrev (En)
1	Αιτωλοακαρνανίας	Aitolokarnanias	Αιτωλοακαρ	Aitolokarna
2	Αττικής	Attikis	Αττικής	Attikis
3	Βοιωτίας	Viotias	Βοιωτίας	Viotias
4	Εύβοιας	Evias	Εύβοιας	Evias
5	Ευρυτανίας	Evritanias	Ευρυτανίας	Evritanias
6	Φθιώτιδας	Fthiotidas	Φθιώτιδας	Fthiotidas

Πλοήγηση στη βάση δεδομένων

Τα κουμπιά στο πάνω μέρος χρησιμοποιούνται για μετάβαση στον προηγούμενο ή επόμενο σταθμό, και για πρόσθεση, αφαίρεση, και τροποποίηση σταθμών. Επίσης, το πεδίο «Μετάβαση» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετάβαση σε συγκεκριμένο σταθμό. Εναλλακτικά, διατίθεται συνοπτικός πίνακας που παρουσιάζει όλους τους σταθμούς σε αλφαβητική σειρά.

Stations

Tools Edit Window Help

Data entry form | Synoptic table

id: 334 Synthetic

Name: Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (Greek) NTUA University Campus of Zografou (English)

Prefecture: Αττικής Municipality: Ζωγράφου (Greek) Zografou (English)

Location: Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα (Greek) NTUA University Campus, Zografou, Athen (English)

Co-ordinates: phi 37 d 58 m 26 s N lambda 23 d 47 m 16 s E X 481360 Y 4202939 Altitude 219

Service: ΕΜΠ-ΤΥΠΥΘΕ

Type: Μετεωρολογικός Subtype:

Functioning period: 01/10/1993 Active Telemetric

Various codes: Service: Miet: Hydroscope: WMO: Other:

Instruments... Loggers... Time series... Events... Remarks... Multimedia... Show on map...

Stations

Data entry form | Synoptic table

id	Name	Prefecture
367	Μόρνος	Φωκίδας
183	Νέα Φιλαδέλφεια	Αττικής
8	Παύλος	Βοιωτίας
17	Πενταγιοί	Φωκίδας
334	Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου	Αττικής
18	Πυρά	Φωκίδας
32	Πόρος Ρηγαίου	
23	Συκέα	Φωκίδας

Κωδικοί σταθμών

Οι σταθμοί προσδιορίζονται από τον κωδικό τους, που χορηγείται αυτόματα από το λογισμικό όταν εισάγεται νέος σταθμός στο σύστημα. Διατίθενται πρόσθετα πεδία για την αποθήκευση εναλλακτικών κωδικών, π.χ. ήδη υπαρχόντων κωδικών που έχουν δοθεί από το φορέα ή από τον WMO.

Παρατηρήσεις (remarks) και πολυμέσα (multimedia)

Οποιαδήποτε πληροφορία δεν μπορεί να ενταχθεί στα υπόλοιπα πεδία, από μικρά σημειώματα (remarks) μέχρι κείμενα απεριόριστου μήκους, μπορεί να εισαχθεί στο πεδίο παρατηρήσεων. Επίσης, φωτογραφίες και βίντεο των σταθμών μπορούν να εισαχθούν ή να προσπελαστούν πατώντας το κουμπί «Πολυμέσα» (multimedia).

Stations: Remarks

Remarks (Greek): Δεν έχει εγκατασταθεί ακόμα.

Remarks (English): Not installed yet.

Genities multimedia

s/n	Type	Date	Name (Greek)	Name (English)
1	Φωτογραφία	05/01/1998	Ανατολική άποψη	East view
2	Φωτογραφία	05/01/1998	Ο ιστός με τα όργανα	The pole with the sensors
3	Φωτογραφία	05/01/1998	Η ομάδα του έργου	The project team
4	Φωτογραφία	05/01/1998	Δυτική άποψη	West view
5	Βίντεο mpeg			

Show... Load from file... Remarks...

The 'Stations' window displays the following information:

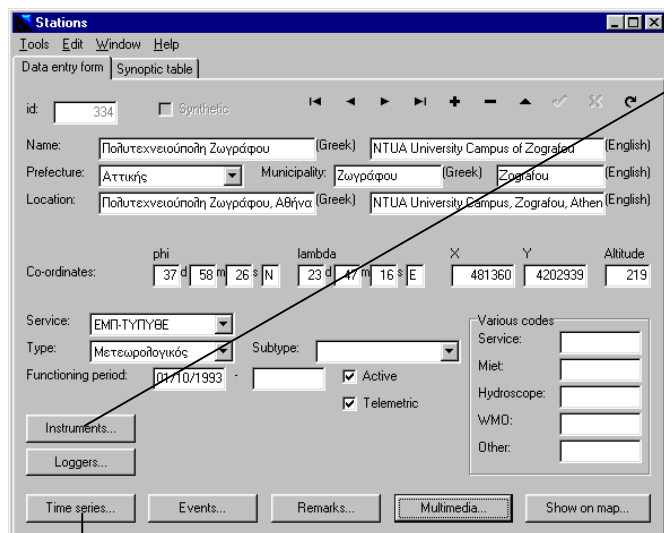
- id:** 334
- Name:** Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (Greek) / NTUA University Campus of Zografou (English)
- Prefecture:** Αττικής (Greek) / Municipality: Ζωγράφου (Greek) / Zografou (English)
- Location:** Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα (Greek) / NTUA University Campus, Zografou, Athen (English)
- Co-ordinates:** phi: 37 d 58 m 26 s N, lambda: 23 d 47 m 16 s E, X: 481360, Y: 4202939, Altitude: 219
- Service:** ΕΜΠ-ΤΥΠΥΘΕ
- Type:** Μετεωρολογικός
- Functioning period:** 01/10/1993
- Active:**
- Telemetric:**
- Various codes:** Service, Miet, Hydroscope, WMO, Other (all empty)

Γεγονότα (events)

Τα γεγονότα (events) είναι ένα είδος ηλεκτρονικού ημερολογίου. Οποιοδήποτε γεγονός, όπως βλάβη, επισκευή, ή παρατήρηση καιρού, μπορεί να εισαχθεί εδώ. Πατώντας πάνω σε ένα γεγονός, εμφανίζονται λεπτομέρειες στα πεδία παρατηρήσεων. Οι λεπτομέρειες αυτές είναι μικρά σχόλια ή και κείμενα απεριόριστου μήκους.

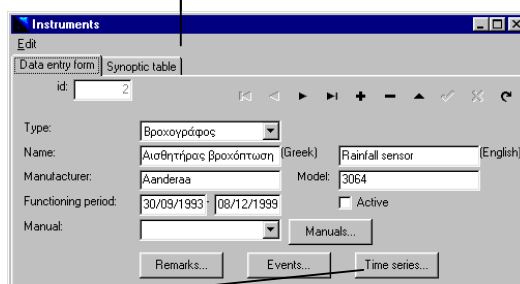
s/n	Date	Type
6	10/12/1998	Αλλαγή στο configura
3	18/03/1999	Παρατήρηση καιρού
4	01/05/1999	Βλάβη σταθμού
5	03/01/2000	Βλάβη σταθμού

Greek remarks:	Από 12:20 ως 14:00 EET δεν υπάρχουν δεδομένα, λόγω προβλήματος του λογισμικού. Στο διάστημα αυτό παρατηρήθηκε μικρή χιονόπτωση.
English remarks:	From 12:20 to 14:00 EET there is no data, due to software malfunction. During this period there was weak snowfall.



Όργανα (instruments)

Πατώντας πάνω στο κουμπί «Όργανα» (instruments) εμφανίζονται τα όργανα του σταθμού. Υπάρχει και πάλι συνοπτικός πίνακας με όλα τα όργανα σε αλφαβητική σειρά, και κάθε όργανο έχει τις δικές του παρατηρήσεις και γεγονότα.

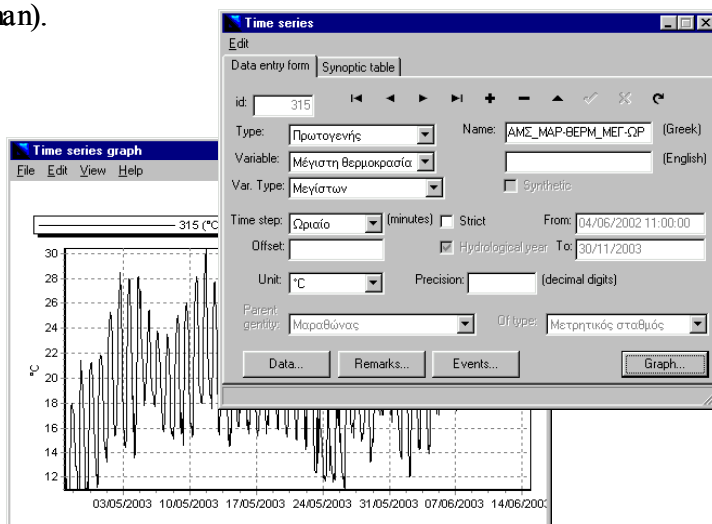


Χρονοσειρές (Time series)

Όταν πατηθεί το κουμπί «Χρονοσειρές» (Time series) στη φόρμα οργάνων εμφανίζονται οι χρονοσειρές του συγκεκριμένου οργάνου· όταν πατηθεί το «Χρονοσειρές» στη φόρμα σταθμών εμφανίζονται όλες οι χρονοσειρές του σταθμού, που περιλαμβάνουν και τις χρονοσειρές όλων των οργάνων και χρονοσειρές που δεν αντιστοιχίζονται σε κάποιο όργανο (για παράδειγμα, εξατμοδιαπνοή που έχει προκύψει με την μέθοδο Penman).

Για κάθε χρονοσειρά αποθηκεύονται γενικές πληροφορίες, όπως όνομα μεταβλητής, όνομα χρονοσειράς, χρονικό βήμα, παρατηρήσεις, και γεγονότα.

Μπορούν επίσης να αποθηκευτούν χρονοσειρές που δεν αντιστοιχίζονται σε σταθμούς, αλλά σε άλλες γεωγραφικές οντότητες, όπως λεκάνες απορροής· αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για επιφανειακές βροχοπτώσεις.



	315 (°C)
2002/06/04 11:00	24.69
2002/06/05 12:00	24.16
2002/06/05 13:00	23.73
2002/06/05 14:00	23.58
2002/06/05 15:00	23.71
2002/06/05 16:00	22.74
2002/06/05 17:00	22.93
2002/06/05 18:00	21.86
2002/06/05 19:00	20.75
2002/06/05 20:00	19.88

Δεδομένα χρονοσειράς
 Η φόρμα αυτή (Time series data) είναι ειδικά σχεδιασμένη για εύκολη και αποτελεσματική οπτικοποίηση και διαχείριση χρονοσειρών.

Σημαίες (flags)

Οι εγγραφές των χρονοσειρών έχουν σημαίες (flags) ώστε να σημαίνονται λάθη ή άλλες αξιοσημείωτες περιπτώσεις. Διάφορες σημαίες διατίθενται για τιμές εκτός ορίων, ύποπτες τιμές, χιόνι, τιμές που έλλειπαν αλλά συμπληρώθηκαν, κλπ. Υπάρχουν επίσης γενικές σημαίες, χωρίς συγκεκριμένη σημασία, για γενική χρήση. Συνολικά υπάρχουν 30 σημαίες, και κάθε εγγραφή μπορεί να έχει οποιονδήποτε συνδυασμό αυτών. Οι χρονοσειρές μπορούν να οπτικοποιούνται με ή χωρίς σημαίες, όπως φαίνεται δεξιά.

2003/01/12 1		
2003/01/12 1		
2003/01/12 1		
2003/01/12 1		
2003/01/12 15:30	32	
2003/01/12 15:40	30	
2003/01/12 15:50	26	
2003/01/12 16:00	30	
2003/01/12 16:10	50	LOGOVERRUN
2003/01/12 16:20	14	
2003/01/12 16:30	348	
2003/01/12 16:40	343	

Define filter

Only display records such that:

The value is greater than 360

or

The flag COMMENT is on

OK Cancel

Φίλτρα (Filters)

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν φίλτρα (filters) για απόκρυψη κάποιων από τις εγγραφές, ώστε να εμφανίζονται μόνο εγγραφές που περνούν από το φίλτρο.

	246 (deg)	
2001/04/30 17:20	2060	LOGOUTSIDE
2001/04/30 17:40	2064	LOGOUTSIDE
2001/04/30 17:50	1913	LOGOUTSIDE
2001/05/01 12:10	360	LOGNOISY
2001/05/01 16:10	2088	LOGNOISY
2001/05/01 18:50	2056	LOGOUTSIDE
2001/05/01 19:20	368	LOGNOISY
2001/05/01 21:40	1890	LOGOUTSIDE
2001/05/01 23:10	387	LOGNOISY
2001/05/02 10:10	387	LOGNOISY
2001/05/02 10:50	1898	LOGOUTSIDE
2001/05/02 14:30	1898	LOGOUTSIDE

Φίλτρα

Όταν έχει οριστεί ένα φίλτρο, μπορεί να ενεργοποιείται ή να απενεργοποιείται με το σχετικό κουμπί της γραμμής εργαλείων ή με το πλήκτρο F9.

Πολλαπλές χρονοσειρές

Περισσότερες από μία χρονοσειρές μπορούν να εμφανίζονται ταυτόχρονα. Εγγραφές με την ίδια ημερομηνία και ώρα εμφανίζονται στην ίδια γραμμή. Ημερομηνίες και ώρες που υπάρχουν σε μια χρονοσειρά αλλά δεν υπάρχουν σε άλλη προσδιορίζονται από διαγώνιες γραμμές.

	1 (mm)	2 (l)
1997/03	178.30	102.80
1997/04	107.60	
1997/05	20.40	8.00
1997/06	7.00	5.50
1997/07	0.60	
1997/08	17.40	7.40
1997/09	2.60	0.60
1997/10		
1997/11		44.10
1997/12		142.40
1998/01		22.70
1998/02		20.40

Μπορεί να εμφανίζεται απεριόριστος αριθμός χρονοσειρών, η μια δίπλα στην άλλη, με ή χωρίς τις σημαίες.

	1 (mm)	2 (l)	3 (mm)	4 (mm)	6 (mm)	7 (mm)
1994/02	274.80	204.50	81.80	374.40	184.20	183.30
1994/03	89.30	37.80	8.00	84.30	25.60	76.30
1994/04	45.70	33.30	83.00	78.10	139.70	39.70
1994/05	129.70	49.80	40.00	193.00	69.10	43.20
1994/06	2.60	0.50	5.40	6.30	26.30	43.40
1994/07	7.00	36.20	18.00	65.20	110.90	6.30
1994/08		1.50	2.10	21.00	33.20	20.00
1994/09	1.90		2.40		7.40	
1994/10	253.90	146.30	90.60	290.90		177.30
1994/11	179.40	83.60	120.00	151.20		137.10
1994/12	95.90	83.90	118.30	150.90		90.40
1995/01	255.60	117.50	68.00	464.80		106.70
1995/02	9.70	5.80	16.00			

Πινακοποίηση (view as table)

Ωριαίες, ημερήσιες και μηνιαίες χρονοσειρές μπορούν αυτόματα να προβάλλονται σε μορφή πίνακα. Για παράδειγμα, στις ωριαίες χρονοσειρές ο πίνακας περιέχει τις τιμές ενός μήνα, έτσι ώστε οι στήλες να αντιστοιχούν στις 24 ώρες και οι γραμμές στις μέρες του μήνα. Το άθροισμα ή η μέση τιμή κάθε γραμμής ή στήλης, καθώς και άλλα στατιστικά, εξάγονται αυτόματα.

Ευκολίες όπως ο αυτόματος χρωματισμός τιμών (Highlight) με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά διευκολύνουν τον εντοπισμό λαθών και ακραίων επεισοδίων.

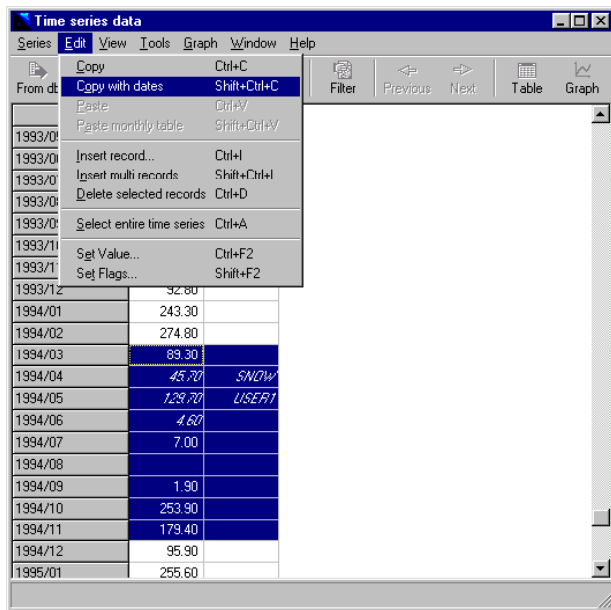
Date	mm (Modify)	Weather
1994/02	274.80	
1994/03	89.30	
1994/04	45.70	SNOW
1994/05	128.70	USEPAT
1994/06	4.60	
1994/07	7.00	
1994/08		
1994/09	1.90	
1994/10	253.90	
1994/11	179.40	
1994/12	95.90	
1995/01	255.60	
1995/02	9.70	

Τροποποίηση δεδομένων

Οι χρήστες μπορούν να τροποποιούν τις χρονοσειρές, τιμές και σημαίες. Οι τροποποιημένες τιμές εμφανίζονται με πλάγια γράμματα. Οι χρήστες μπορούν να γράψουν τις αλλαγές στη βάση δεδομένων, υπό τον όρο να έχουν τα κατάλληλα δικαιώματα πρόσβασης.

Αποθήκευση σε αρχεία

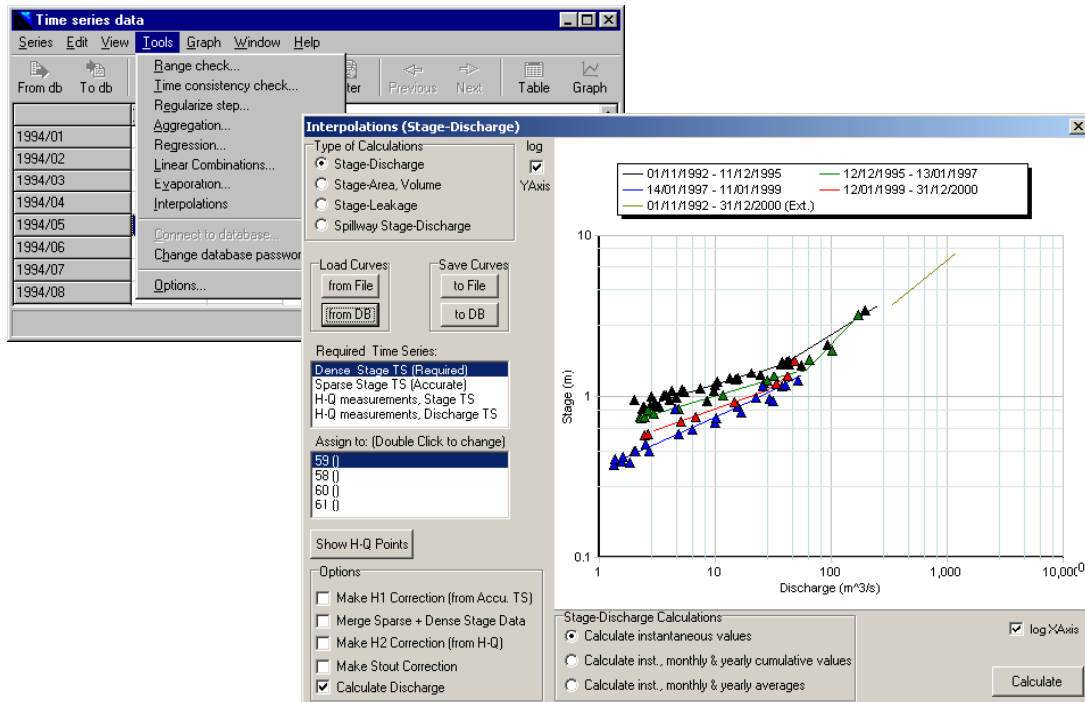
Οι χρονοσειρές μπορούν να γράφονται σε αρχεία. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για χρήστες που θέλουν να τροποποιήσουν χρονοσειρές και δεν θέλουν ή δεν έχουν δικαίωμα να τις αποθηκεύσουν στη βάση δεδομένων. Τα αρχεία είναι σε απλή μορφή ASCII ώστε να μπορεί κανείς να τα επεξεργαστεί με απλό διορθωτή κειμένου ή λογιστικό φύλλο (τύπου Excel).



Επικοινωνία με άλλες εφαρμογές
 Τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν προς και από άλλες εφαρμογές με αντιγραφή (Copy) και επικόλληση (Paste).

Επεξεργασία χρονοσειρών

Οι διαθέσιμες δυνατότητες επεξεργασίας χρονοσειρών περιλαμβάνουν έλεγχο ακραίων τιμών, διόρθωση ημερομηνίας και ώρας (εντοπισμό και αναίρεση διαταραχών στο χρονικό βήμα), συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών, εξαγωγή χρονοσειρών μεγαλύτερου χρονικού βήματος, γραμμικές πράξεις, υπολογισμός εξάτμισης, και παρεμβολή σε καμπύλες (υπολογισμός παροχών από στάθμες και καμπύλες στάθμης-παροχής, υπολογισμός αποθέματος από στάθμη και καμπύλη στάθμης-όγκου ταμιευτήρα, κ.ά.)



Ταμιευτήρες (Reservoirs)

Εκτός από σταθμούς, στη βάση αποθηκεύεται πληθώρα άλλων τύπων γεωγραφικών οντοτήτων, σε φόρμες παρόμοιες με αυτή των σταθμών. Για τους ταμιευτήρες, εκτός από τα γεωγραφικά στοιχεία, αποθηκεύονται καμπύλες στάθμης-επιφάνειας-όγκου (Stage-Area-Volume), και συντελεστές διαφυγών (Leakage).

Reservoirs

Data entry form Synoptic table

id: 30 Go to: Go there

Name: Εύηνος (Greek) (English)

Prefecture: Municipality: (Greek) (English)

Location: (Greek) (English)

Area:

Co-ordinates: phi d m s lambda d m s X Y Altitude

Stage-Area-Volume Leakage Coefficients

Time series... Events... Remarks... Multimedia...

Reservoir curves

id: 12

Name: Καμπύλη διαρθωμένη από Κουτσογιάννη

s/n	Type	Stage	Area	Volume
1	Άλλη	410	0	0
2	Άλλη	420	0.06	0.266
3	Άλλη	425	0.1	0.664
4	Άλλη	430	0.37	1.727
5	Άλλη	440	0.69	6.97
6	Άλλη	450	1.048	15.621
15	Κατώτατη στάθμη υέ	458.5	1.35	25.58
7	Άλλη	460	1.41	27.889
8	Άλλη	470	1.82	44.014
9	Άλλη	480	2.301	64.587
10	Άλλη	490	2.784	89.989
11	Άλλη	500	3.3120	386
12	Ανώτατη στάθμη λει	505	3.6	137.632
13	Άλλη	510	3.9156	379
14	Άλλη	520	4.477	198.243

Remarks...

Reservoir leakage coefficients

id: 1

Name: Συντελεστές διαφυγών Υίτης

Month	a	b	c	e	sigma	
1	0	0.013	-1.16	28.3	3.53	
2	0	0.013	-1.16	28.3	3.53	
3	0	0.013	-1.16	28.3	3.53	
4	0	0.013	-1.16	24.2	3.53	
5	0	0.013	-1.16	24.2	3.53	
6	0	0.013	-1.16	24.2	3.53	
7	0	0.013	-1.16	24.2	3.53	
8	0	0.013	-1.16	24.2	3.53	
9	0	0.013	-1.16	24.2	3.53	
10	0	0.013	-1.16	28.3	3.53	
11	0	0.013	-1.16	28.3	3.53	
12	0	0.013	-1.16	28.3	3.53	

Remarks...

Φράγματα (Dams)

Για τα φράγματα αποθηκεύονται τεχνικά χαρακτηριστικά του φράγματος, μεταξύ των οποίων και καμπύλες στάθμης-παροχής υπερχειλιστή.

Dams

Data entry form Synoptic table

id: 45 Go to: Go there

Name: Μόρνος (Greek) (Eng)

Prefecture: Municipality: (Greek) (Eng)

Location: (Greek) (Eng)

Co-ordinates: phi d m s lambda d m s X Y Altitude

Height: 139

Crest altitude: 446.5 Crest length: 815 Crest width: 10

Face slope upstream: 2.4 Downstream: 2

Spillway description: Μετωπικός χωρίς θυροφράγματα (Greek) (Eng)

Spillway discharge: 1135

Spillway stage-discharge curve

Time series... Events... Remarks... Multimedia...

Spillway stage-discharge curves

id: 8

Name:

s/n	Stage	Discharge
1	435	0
2	435.5	20.5
3	436	59.9
4	436.5	114.5
5	437	183.1
6	437.5	260.6
7	438	353.3

Remarks...

Υδραγωγεία (Aqueduct)

Για τα υδραγωγεία μεταξύ άλλων αποθηκεύονται σκαριφήματα διατομών και καμπύλες παροχευτικότητας.

The screenshot shows the 'Aqueduct' software interface. The main window is titled 'Data entry form' and 'Synoptic table'. It contains various input fields for aqueduct details:

- id:** 190
- Name:** Σήραγγα Γκιώνας (1 από 6)
- Length:** 1851
- Discharge:** 23
- Start and end position (km):** 0.181, 2.032
- Bottom slope:** 0.001343
- Cross section:** Πεταλοειδής 3.40/3.30 Closed (1)

Below the main form, there are buttons for 'Time series...', 'Events...', 'Remarks...', and 'Multimedia...'. To the right, a circular diagram shows the cross-section of the aqueduct with various parameters labeled. Below that, a 'duct head-discharge curves' window displays a table with the following data:

Head	Discharge
1	455
2	460
3	470
4	480
5	490
6	500

Γεωτρήσεις (Boreholes)

Για τις γεωτρήσεις μεταξύ άλλων αποθηκεύονται περιγραφή οπής (hole), περιγραφή σωλήνωσης (pipes), υδατοπερατά στρώματα (per. layers) και λιθολογική τομή (lith. section).

The screenshot shows the 'Boreholes' software interface. The main window is titled 'Data entry form' and 'Synoptic table'. It contains various input fields for borehole details:

- id:** 409
- Name:** ΕΑΡ 1
- Altitude:** 324.59
- Discharge:** 240
- Exploit.:** 200
- Draw down:** 21.45
- Water level:** 28.05
- Construction date:** 01/01/1990 - 31/12/1990
- Pressure meter:** Exists
- Diameter (in):** 1
- Length:** 86.5

Below the main form, there are buttons for 'Hole...', 'Pipe...', 'Permeable layers...', 'Lithological section...', 'Time series...', 'Events...', 'Remarks...', and 'Multimedia...'. To the right, a 'Borehole piping' window displays a table with the following data:

s/n	End depth	Diameter	Thickness	Material	Is filter	Filter opening
1	86.5	12.25			0	
2	196	10.75			0	

Below that, a 'Borehole description' window displays a table with the following data:

s/n	End depth	Diameter	Extension diameter
1	171	8.5	17.5

4 Δίκτυο μέτρησης υδρομετεωρολογικών και υδρολογικών μεταβλητών

4.1 Στόχοι του μετρητικού συστήματος

Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί στο τεύχος 3 του παρόντος ερευνητικού έργου (*Μαμάσης και Γαβριηλίδης, 2000*), η μέτρηση των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών στις λεκάνες απορροής που συνδέονται με το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας, γινόταν μέχρι σήμερα αποκλειστικά με τη χρήση συμβατικών οργάνων. Τα όργανα αυτά είναι εγκατεστημένα από διάφορες υπηρεσίες (ΔΕΗ, ΕΜΥ, ΥΠΕΧΩΔΕ, ΥΠΓΕ, ΕΥΔΑΠ), αλλά η λειτουργία τους παρουσιάζει τα παρακάτω σημαντικά μειονεκτήματα:

- σε πολλές περιπτώσεις οι μετρήσεις δεν έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια και αξιοπιστία, κυρίως λόγω της πλημμελούς συντήρησης των οργάνων και της κακής εκπαίδευσης των παρατηρητών·
- υπάρχει σημαντική χρονική καθυστέρηση μεταξύ μέτρησης και τελικής διάθεσης των δεδομένων, εφόσον τα ενδιάμεσα στάδια (μεταφορά, επαλήθευση και ηλεκτρονική αρχειοθέτηση) γίνονται με συμβατικούς τρόπους·
- το σύνολο των σταθμών δεν αποτελεί δίκτυο, αφού η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται ξεχωριστά σε κάθε υπηρεσία και με διαφορετικές προδιαγραφές·
- η χρονική κλίμακα μέτρησης δεν είναι πάντα η επιθυμητή·
- τα συμβατικά δίκτυα χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος λειτουργίας.

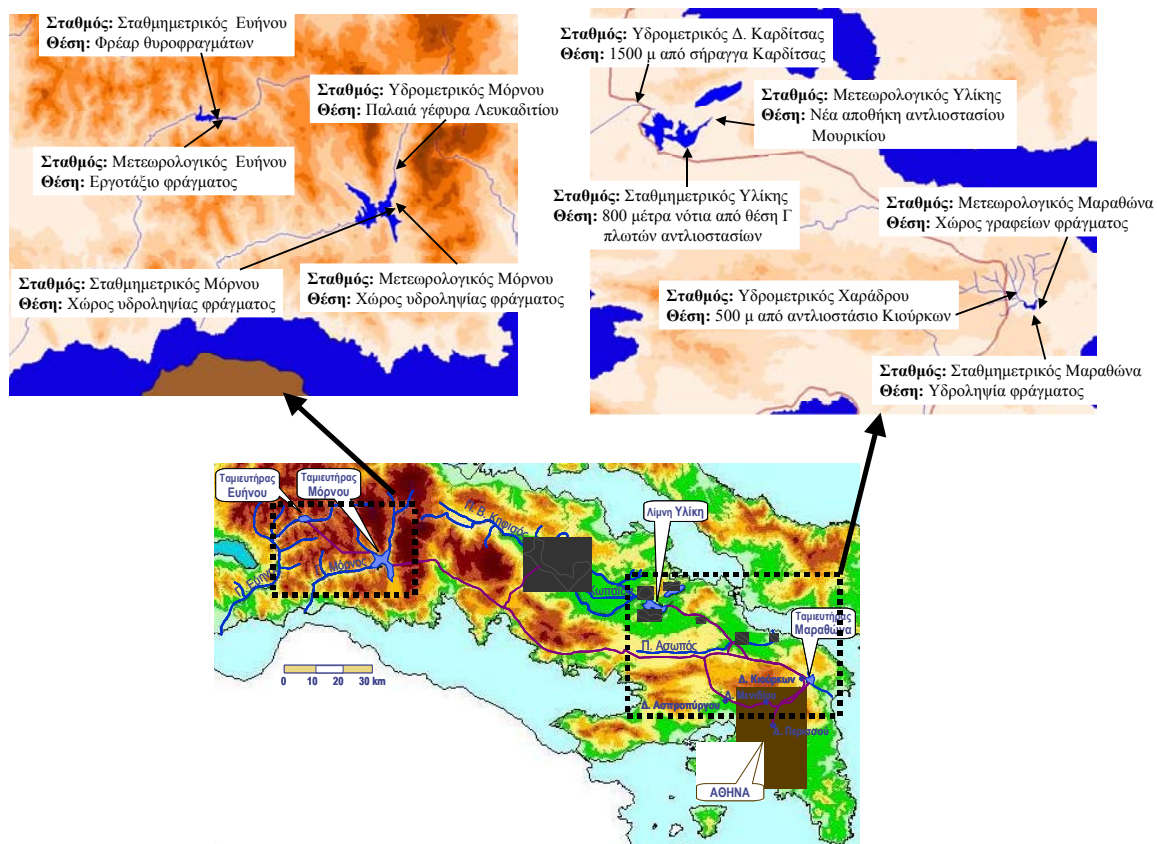
Έτσι, κρίθηκε απαραίτητο στα πλαίσια του συγκεκριμένου ερευνητικού προγράμματος, να συμπληρωθεί το υπάρχον μετρητικό δίκτυο από ένα τηλεμετρικό δίκτυο αυτόματων σταθμών, ώστε οι μετρήσεις να έχουν την απαιτούμενη αξιοπιστία, ακρίβεια και χρονική διακριτότητα, να είναι διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο και οι βλάβες των οργάνων να εντοπίζονται σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Οι κύριοι στόχοι που αναμένεται να επιτευχθούν με την αυτόματη μέτρηση των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών στις λεκάνες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας είναι:

- η ποσοτική παρακολούθηση των υδατικών πόρων στις λεκάνες απορροής που συνδέονται με το υδροδοτικό σύστημα και ειδικότερα η βελτίωση της εκτίμησης των παραμέτρων που υπεισέρχονται στα ισοζύγια των ταμιευτήρων (εξάτμιση-βροχόπτωση στις λίμνες, εισροές, κλπ.)·
- η παρακολούθηση των υδρολογικών και κλιματικών χαρακτηριστικών των παραπάνω περιοχών, με την σταδιακή κατάρτιση αξιόπιστων χρονοσειρών μεγάλου μήκους για όλες τις μετρούμενες μεταβλητές·
- η τροφοδότηση των μοντέλων υδρολογικής και λειτουργικής προσομοίωσης με επίκαιρα δεδομένα·
- η άμεση πρόσβαση στα δεδομένα από τους ενδιαφερόμενους (επιστήμονες, κοινό) μέσω εφαρμογών διαδικτύου.

4.2 Εγκατάσταση των σταθμών

Το αυτόματο τηλεμετρικό δίκτυο αποτελείται από 11 σταθμούς, εκ των οποίων οι τέσσερις είναι μετεωρολογικοί, οι τέσσερις είναι σταθμοί μέτρησης στάθμης ταμιευτήρων και οι τρεις είναι σταθμοί μέτρησης στάθμης και παροχής ποταμών. Στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου έγινε η εγκατάσταση εννιά σταθμών ενώ οι υπόλοιποι δύο (μετεωρολογικός και σταθμημετρικός ταμιευτήρα Ευήνου) είχαν ήδη εγκατασταθεί στα πλαίσια κατασκευής του φράγματος Ευήνου. Οι δύο αυτοί σταθμοί είναι σε διαδικασία ενσωμάτωσης στο υπόλοιπο μετρητικό δίκτυο. Η εγκατάσταση των σταθμών έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (WMO, 1983). Η γεωγραφική θέση των αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της ακριβούς θέσης όπου τοποθετήθηκαν οι σταθμοί. Ακόμη, περιγράφονται και οι θέσεις όπου έχουν τοποθετηθεί οι συμβατικοί σταθμοί τα δεδομένα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της λειτουργίας των αυτόματων σταθμών.



Σχήμα 4.1: Γεωγραφική θέση αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών.

4.2.1 Μετεωρολογικοί σταθμοί

Μαραθώνας: Ο αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός εγκαταστάθηκε στο χώρο των γραφείων του φράγματος σε θέση που απέχει περίπου 20 μέτρα από τον Βορειοδυτικό τοίχο του κτιρίου Αποθήκης Μαραθώνα. Ο σταθμός τροφοδοτείται ενεργειακά με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από κοντινό κτίριο ενώ η μετάδοση των δεδομένων γίνεται με ασύρματη τηλεφωνία. Η θέση κρίνεται πολύ ικανοποιητική από πλευράς υδρολογικής καταλληλότητας και ασφάλειας των εγκαταστάσεων.

Στον ίδιο χώρο λειτουργεί και συμβατικός μετεωρολογικός σταθμός που είναι εγκατεστημένος δίπλα στο κτίριο που στεγάζει το μουσείο του φράγματος. Ο σταθμός διαθέτει βροχόμετρο, εξατμισόμετρο, θερμόμετρο και ανεμόμετρο και την ευθύνη λειτουργίας του έχει η ΕΥΔΑΠ. Ο συμβατικός σταθμός

είναι σε ακατάλληλη θέση από υδρολογικής πλευράς δεδομένου ότι δεν έχει την απαιτούμενη απόσταση από το κτίριο του μουσείου και περιβάλλεται από δένδρα.

Μόρνος: Ο αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός εγκαταστάθηκε στο χώρο όπου βρίσκονται οι εγκαταστάσεις της υδροληψίας. Η θέση αυτή βρίσκεται στην ανατολική όχθη του ταμιευτήρα, ακριβώς δίπλα στη λίμνη και κοντά στο δρόμο που πηγαίνει για Λιδορίκι. Ο μετεωρολογικός ιστός τοποθετήθηκε στη βορειοδυτική γωνία του περιφραγμένου χώρου. Ο σταθμός τροφοδοτείται ενεργειακά με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από το κτίριο υδροληψίας, ενώ η μετάδοση των δεδομένων γίνεται με σταθερή τηλεφωνία. Η θέση κρίνεται πολύ ικανοποιητική από πλευράς υδρολογικής καταλληλότητας και ασφάλειας των εγκαταστάσεων.

Στη νότια πλευρά του φράγματος Μόρνου λειτουργεί συμβατικός μετεωρολογικός σταθμός που είναι εξοπλισμένος με βροχογράφο, εξατμισόμετρο και θερμόμετρο. Η λειτουργία του σταθμού γίνεται από το ΥΠΕΧΩΔΕ που συλλέγει τα δεδομένα και τα διαθέτει στην ΕΥΔΑΠ. Ο σταθμός δεν είναι σε κατάλληλη θέση, καθώς βρίσκεται ακριβώς στην κορυφή ενός λοφίσκου. Ακόμη, στην περιοχή του ταμιευτήρα βρίσκεται και ο μετεωρολογικός σταθμός του Λιδορικού που είναι εγκατεστημένος πάνω από την κεντρική πλατεία του χωριού και περιλαμβάνει βροχογράφο και μετεωρολογικά όργανα. Ο σταθμός βρίσκεται σε ακατάλληλη θέση (κοντά σε κτίρια) και έχει προταθεί η μετακίνησή του.

Υλίκη: Ο αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός εγκαταστάθηκε στο χώρο των εγκαταστάσεων του αντλιοστασίου Μουρικού. Η ακριβής θέση του σταθμού είναι σε απόσταση περίπου 60 μέτρων περίπου από τον δυτικό τοίχο της Νέας Αποθήκης. Ο σταθμός τροφοδοτείται ενεργειακά με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος ενώ η μετάδοση των δεδομένων γίνεται με κινητό τηλέφωνο. Η θέση κρίνεται πολύ ικανοποιητική από πλευράς υδρολογικής καταλληλότητας και ασφάλειας των εγκαταστάσεων.

Στην περιοχή της λίμνης Υλίκης λειτουργούν δύο συμβατικοί μετεωρολογικοί σταθμοί κοντά στο αντλιοστάσιο Μουρικού. Ο πρώτος είναι εγκατεστημένος στη δυτική πλευρά της περιφράξης του αντλιοστασίου και περιλαμβάνει ανεμογράφο, βροχόμετρο και θερμόμετρο. Υπεύθυνη για την λειτουργία του είναι η ΕΥΔΑΠ. Ο δεύτερος σταθμός βρίσκεται σε απόσταση 60 περίπου μέτρων και αντιδιαμετρικά από τον πρώτο ως προς τη διώρυγα Μουρικού. Ο σταθμός αυτός έχει δική του πρόχειρη περίφραξη, περιλαμβάνει βροχόμετρο, εξατμισόμετρο και θερμόμετρο και υπεύθυνο για την λειτουργία του είναι το ΥΠΕΧΩΔΕ. Οι δύο σταθμοί είναι σε ακατάλληλη θέση από υδρολογικής πλευράς δεδομένου ότι ο πρώτος περιβάλλεται από δένδρα και δεν έχει την απαιτούμενη απόσταση από το κτίριο του αντλιοστασίου, ενώ ο δεύτερος βρίσκεται κάτω ακριβώς από πολύ ψηλά δένδρα.

Εύηνος: Ο αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός εγκαταστάθηκε στην νότια πλευρά του ταμιευτήρα κοντά στις κτιριακές εγκαταστάσεις του εργοταξίου. Ο σταθμός τροφοδοτείται ενεργειακά με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ η μετάδοση των δεδομένων γίνεται προσωρινά με απευθείας σύνδεση με τον καταχωρητή. Η θέση είναι κατάλληλη από υδρολογικής πλευράς και είναι κοντά στην ανώτατη επιφάνεια του ταμιευτήρα, αλλά έχουν φυτευτεί μία σειρά από δένδρα μεταξύ του σταθμού και της λίμνης, τα οποία όταν μεγαλώσουν θα δημιουργήσουν πρόβλημα στην λειτουργία του σταθμού. Ακόμη η θέση κρίνεται πολύ ικανοποιητική από πλευράς ασφάλειας των εγκαταστάσεων. Για να ενταχθεί ο σταθμός στο μετρητικό δίκτυο του παρόντος έργου θα πρέπει να εξασφαλιστεί η δυνατότητα πλήρους χειρισμού του σταθμού (χρονικό βήμα, τρόπος επικοινωνίας) και η τηλεμετάδοση των μετρήσεων σε αναγνωρίσιμη μορφή.

4.2.2 Σταθμοί μέτρησης στάθμης ταμιευτήρων

Μαραθώνας: Το αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης του ταμιευτήρα εγκαταστάθηκε στον πύργο υδροληψίας εξωτερικά. Ο σταθμός τροφοδοτείται ενεργειακά με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος ενώ η μετάδοση των δεδομένων γίνεται με ασύρματη τηλεφωνία. Ακόμη, η θέση κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική από πλευράς ασφάλειας των εγκαταστάσεων.

Το συμβατικό σταθμήμετρο του ταμιευτήρα έχει τοποθετηθεί στον πύργο υδροληψίας (στην πλευρά που βρίσκεται η είσοδος) και η στάθμη μετριέται σε ημερήσια βάση. Το σταθμήμετρο αυτό λειτουργεί για τις συνήθεις στάθμες της λίμνης (204-223 μέτρα).

Μόρνος: Το αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης του ταμιευτήρα εγκαταστάθηκε σε ειδικό φρέαρ που υπάρχει στο κτίριο υδροληψίας το οποίο κατασκευάστηκε για τη μέτρηση της στάθμης του ταμιευτήρα (επικοινωνεί με την ελεύθερη επιφάνεια της λίμνης). Ο σταθμός τροφοδοτείται ενεργειακά με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος ενώ η μετάδοση των δεδομένων γίνεται με σταθερή τηλεφωνία. Η θέση κρίνεται πολύ ικανοποιητική από πλευράς ασφάλειας των εγκαταστάσεων, αλλά όχι ιδιαίτερα από υδρολογικής πλευράς και όπως προέκυψε από την πιλοτική λειτουργία θα πρέπει να αλλάξει θέση.

Ο συμβατικός τρόπος μέτρησης της στάθμης του ταμιευτήρα γίνεται σε ημερήσια βάση με την πραγματοποίηση χωροστάθμησης, όπου υπολογίζεται η υψομετρική διαφορά της ελεύθερης επιφάνειας της λίμνης από γνωστά υψομετρικά σημεία (refer).

Υλίκη: Το αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης του ταμιευτήρα εγκαταστάθηκε στην περιοχή των πλωτών αντλιοστασίων Γ. Συγκεκριμένα η ακριβής θέση βρίσκεται περίπου 800 μέτρα νότια από τα πλωτά αντλιοστάσια (θέση Γ). Σε αυτό το σημείο το βάθος της λίμνης φτάνει τα 45 μέτρα και απέχει από την ακτή περίπου 220 μέτρα, μετρημένα στην επιφάνεια του νερού, ενώ η θέση εγκατάστασης του ερμαρίου ή οικίσκου βρίσκεται 55 μέτρα από την λίμνη.

Ο συμβατικός τρόπος μέτρησης της στάθμης του ταμιευτήρα Υλίκης γίνεται με την ανάγνωση σταθμημέτρου σε ημερήσια βάση το οποίο έχει τοποθετηθεί στην τεχνητή λίμνη (έχει δημιουργηθεί κοντά στο αντλιοστάσιο Μουρικίου για να διευκολύνει την άντληση). Το σταθμήμετρο αυτό λειτουργεί όταν η στάθμη της λίμνης κυμαίνεται μεταξύ των 68 και 80 μέτρων. Οι χαμηλότερες στάθμες μετριούνται με την τοποθέτηση σταθμημέτρων σε διάφορα σημεία της λίμνης, ανάλογα με την στάθμη της. Η ρύθμιση της κλίμακας των σταθμημέτρων αυτών γίνεται με την πραγματοποίηση χωροστάθμησης, έτσι ώστε η παρατήρηση να γίνεται σε απόλυτο υψόμετρο.

Εύηνος: Η μέτρηση της στάθμης του ταμιευτήρα γίνεται με μετρητική διάταξη, η οποία έχει τοποθετηθεί στο φρέαρ θυροφραγμάτων της υδροληψίας προς τον ταμιευτήρα Μόρνου.

4.2.3 Σταθμοί μέτρησης στάθμης ποταμών

Μαραθώνας: Το αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης του χειμάρρου Χαράδρου τοποθετήθηκε σε σημείο που βρίσκεται 500 μέτρα από το διυλιστήριο Κιούρκων. Η θέση είναι κατάλληλη από υδρολογικής πλευράς και βρίσκεται ανάντη της συμβολής του χειμάρρου με την έξοδο των νερών των διυλιστηρίων. Έτσι, στη θέση μετριέται η φυσική παροχή του ποταμού. Στη συγκεκριμένη θέση κατασκευάστηκε μεταλλική γέφυρα για την εγκατάσταση του σταθμημέτρου αλλά και τον χειρισμό των μολίσκων κατά τη διάρκεια υδρομετρήσεων. Η ενεργειακή τροφοδοσία γίνεται με ηλιακές κυψέλες και η μετάδοση των μετρήσεων με ασύρματη τηλεφωνία. Η θέση βρίσκεται κοντά στα διυλιστήρια και παρέχει σε σημαντικό βαθμό ασφάλεια στις μετρητικές εγκαταστάσεις.

Μόρνος: Το αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης του ποταμού Μόρνου τοποθετήθηκε στην παλαιά γέφυρα του δρόμου Λευκαδιτίου-Κονιάκου, που βρίσκεται πολύ κοντά στο χωριό Λευκαδίτι (η απόσταση είναι μικρότερη από ένα χιλιόμετρο). Η ενεργειακή τροφοδοσία γίνεται με ηλιακές κυψέλες και η μετάδοση των μετρήσεων με ασύρματη τηλεφωνία. Η θέση είναι κατάλληλη από υδρολογικής πλευράς και εξασφαλίζεται σε σημαντικό βαθμό η ασφάλεια του συστήματος μετά από συνεννόηση με τις αρχές του οικισμού Λευκαδίτι, δεδομένου ότι η γέφυρα χρησιμοποιείται σπάνια και σχεδόν αποκλειστικά από τους κατοίκους δύο κοντινών οικισμών.

Στον ποταμό Μόρνο και σε θέση ανάντη του φράγματος δεν λειτουργεί σήμερα κανένας συμβατικός υδρομετρικός σταθμός. Στο παρελθόν έχουν λειτουργήσει δύο υδρομετρικοί σταθμοί (Στενό και Περιβόλι), οι οποίοι ήταν εγκατεστημένοι περίπου στη σημερινή θέση φράγματος.

Υλίκη: Το αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης της διώρυγας Καρδίτσας τοποθετήθηκε στη γέφυρα της επαρχιακής οδού που οδηγεί στο Ακραιφνιο και βρίσκεται ανάντη των υπάρχοντων σταθμημέτρων της ΕΥΔΑΠ. Η θέση ελέγχει το σύνολο των απορροών του Β. Κηφισού στη λίμνη της Υλίκης (αποτελούν πάνω από το 90% των συνολικών εισροών στη λίμνη). Η ενεργειακή τροφοδοσία γίνεται με ηλιακές κυψέλες και η μετάδοση των μετρήσεων με ασύρματη τηλεφωνία.

Οι απορροές του Β. Κηφισού στη λίμνη Υλίκη μετριοούνται σήμερα από τον υδρομετρικό σταθμό της νέας διώρυγας Καρδίτσας. Η νέα διώρυγα Καρδίτσας λειτούργησε για πρώτη φορά το 1977 και η ΕΥΔΑΠ εγκατέστησε συμβατικό σταθμήμετρο σε απόσταση περίπου 800 μέτρων από την αρχή της νέας σήραγγας Καρδίτσας. Το 1978 πραγματοποιήθηκε μία υδρομέτρηση με στόχο τον προσδιορισμό του συντελεστή τραχύτητας της διώρυγας. Με τη χρήση της σχέσης του Manning και γνωρίζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διώρυγας (διατομή, κλίση) ο συντελεστής τραχύτητας προσδιορίστηκε σε 55. Η ΕΥΔΑΠ εφαρμόζοντας τη σχέση του Manning για διάφορες στάθμες κατάρτισε μία καμπύλη στάθμης παροχής της διώρυγας. Ο οριζοντιογραφικός προσδιορισμός του σταθμημέτρου και η διατομή τη διώρυγας στη θέση αυτή, επιβεβαιώθηκαν το 1989, με στοιχειώδεις τοπογραφικές εργασίες που έγιναν από ομάδα του ΕΜΠ (*Κουτσογιάννης κ.ά.*, 1990). Με βάση τη διατομή της διώρυγας και τον εκτιμημένο συντελεστή τραχύτητας καταρτίστηκε από την ομάδα του ΕΜΠ νέα καμπύλη στάθμης παροχής. Η νέα καμπύλη διαφοροποιείται από αυτήν της ΕΥΔΑΠ μόνο από τη στάθμη 3.30 και άνω όπου η διατομή γίνεται σύνθετη και ο υπολογισμός της παροχής βασίζεται σε δημοσιευμένη εργασία των *Noutsopoulos and Xadjipanos* (1983). Η καμπύλη που καταρτίστηκε από το ΕΜΠ δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα (ενδεικτικά αναφέρεται ότι στη στάθμη των 5 μέτρων η παροχή είναι μικρότερη κατά 10%). Στην ίδια θέση με αυτήν του συμβατικού σταθμημέτρου έχει εγκατασταθεί τα τελευταία χρόνια αυτόματος σταθμός μέτρησης στάθμης, ο οποίος τροφοδοτείται ενεργειακά από τις εγκαταστάσεις γειτονικής γεώτρησης και αποθηκεύει τα δεδομένα σε μονάδα συλλογής (data logger). Στα δεδομένα αυτά υπάρχει πρόσβαση με την επιτόπου μεταφορά τους από τη μονάδα συλλογής σε φορητό υπολογιστή. Η σύγκριση των μετρήσεων στάθμης των δύο σταθμών (συμβατικού και αυτόματου) η οποία έχει γίνει από την ΕΥΔΑΠ δείχνει σημαντικές αποκλίσεις ιδιαίτερα σε συγκεκριμένες περιοχές του πεδίου τιμών.

Εύηνος: Στην περιοχή δεν βρέθηκε θέση κατάλληλη για την εγκατάσταση σταθμημετρικού και υδρομετρικού σταθμού. Η διερεύνηση της θέσης υδρομετρικού σταθμού ανάντη του φράγματος Εύηνου βασίστηκε σε μία πρώτη επιλογή θέσης που είχε γίνει από τους *Σταυρίδη κ.ά.* (1990). Η θέση αυτή βρίσκεται 300 μέτρα κατάντη της γέφυρας του δρόμου Αράχοβα-Περδικόβρυση και ελέγχει περίπου το 75% των απορροών της λεκάνης ανάντη του φράγματος του Εύηνου. Στην περιοχή αυτή υπάρχει ευθύγραμμο τμήμα της κοίτης του ποταμού που προσφέρεται για εγκατάσταση υδρομετρικού σταθμού. Δυστυχώς η συγκεκριμένη θέση (όπως και οι θέσεις μέχρι και τη γέφυρα Αράχοβα-Περδικόβρυσης) βρίσκεται μέσα στη λεκάνη κατάκλυσης του ταμιευτήρα. Στην περιοχή ανάντη της γέφυρας και σε απόσταση που να είναι εφικτή η πρόσβαση των συνεργείων υδρομέτρησης, δεν υπάρχουν κατάλληλες θέσεις σε αυτή τη φάση δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες αμμοληψίες (για την κατασκευή των έργων), οι οποίες έχουν αλλοιώσει την φυσική κοίτη του ποταμού. Ακόμη το τμήμα του ποταμού από την παραπάνω περιοχή μέχρι και την περιοχή Δενδροχωρίου (η οποία είναι αρκετά ανάντη), έχει πολύ δύσκολη πρόσβαση και έτσι δεν ενδείκνυται για εγκατάσταση υδρομετρικού σταθμού. Τέλος η παροχή ρεύματος και τηλεφωνικής γραμμής σε όλες τις παραπάνω θέσεις δεν είναι οικονομικά εφικτή, ενώ η περιοχή σε αυτή τη φάση δεν καλύπτεται από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Στον ποταμό Εύηνο και σε θέση ανάντη του φράγματος δεν λειτουργεί σήμερα κανένας υδρομετρικός σταθμός. Στο παρελθόν έχει λειτουργήσει ο υδρομετρικός σταθμός Αγίου Δημητρίου που βρίσκονταν περίπου στη σημερινή θέση φράγματος.

4.3 Διαχείριση δεδομένων

4.3.1 Ροή δεδομένων

Οι πρωτογενείς μετρήσεις που γίνονται από τους αισθητήρες των αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών αρχικά αποθηκεύονται στον καταχωρητή δεδομένων κάθε σταθμού, και η πρόσβαση σε αυτές πραγματοποιείται με τη χρήση τηλεφωνικής γραμμής (σταθερής ή κινητής). Ακόμη, υπάρχει η εναλλακτική δυνατότητα για την επιτόπου ανάκτηση των μετρήσεων με τη σύνδεση φορητού υπολογιστή στον καταχωρητή δεδομένων (σε περιπτώσεις βλάβης του συστήματος μετάδοσης).

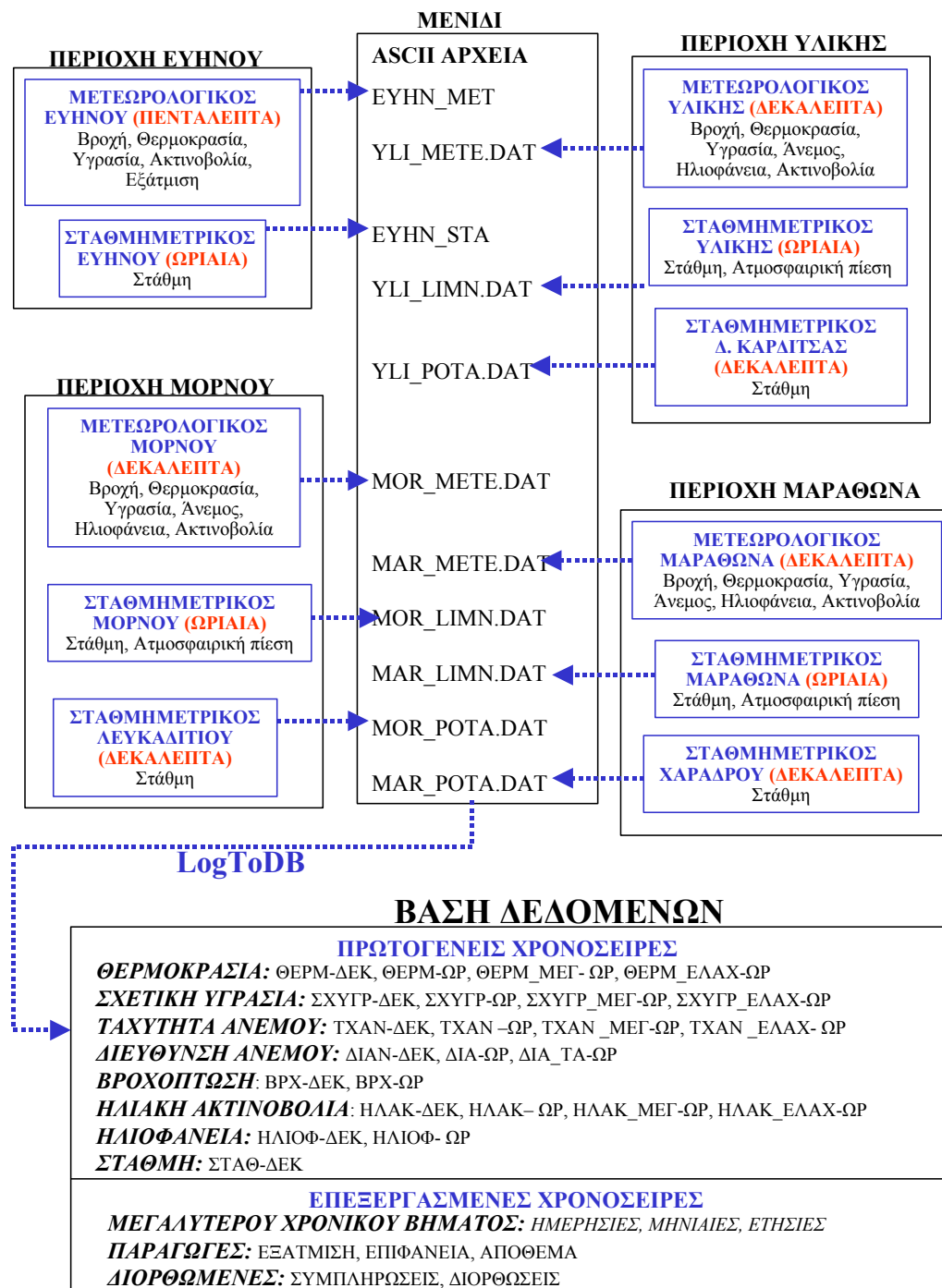
Σε χώρο των διυλιστηρίων Μενιδίου είναι εγκατεστημένο το Κέντρο Διαχείρισης Δεδομένων (ΚΔΔ) που συλλέγει, αρχειοθετεί και επεξεργάζεται το σύνολο των πρωτογενών μετρήσεων και των υπολοίπων πληροφοριών. Η επικοινωνία μεταξύ των μετρητικών σταθμών και του ΚΔΔ γίνεται τηλεφωνικά. Συγκεκριμένα το ΚΔΔ επικοινωνεί κάθε 24 ώρες (κατά προτίμηση νυκτερινές ώρες) με τους αυτόματους σταθμούς που διαθέτουν σταθερή ή κινητή τηλεφωνική γραμμή, αντλεί τα δεδομένα των αισθητήρων για τα προηγούμενα χρονικά βήματα και τα αποθηκεύει σειριακά σε ASCII αρχεία. Οι παράμετροι της επικοινωνίας για κάθε σταθμό (ώρα κλήσης, αριθμός τηλεφώνου, είδος ενημέρωσης κλπ) ρυθμίζονται μέσα από στο λογισμικό PC208W που διατίθεται από την εταιρεία για τον έλεγχο των καταχωρητών. Ακόμη, μέσα από το λογισμικό προσδιορίζεται η επόμενη ενέργεια που θα γίνει όταν ολοκληρωθεί η ενημέρωση του ASCII αρχείου με τις καινούργιες μετρήσεις. Έτσι έχει οριστεί η σειρά επικοινωνίας με τους τηλεμετρικούς σταθμούς, ενώ όταν ανακτηθούν οι μετρήσεις και από τον τελευταίο σταθμό στη συνέχεια εκτελείται μια μακροεντολή που εισάγει αυτόματα τις μετρήσεις στη Βάση Δεδομένων.

Τα πεδία που μεταδίδονται για τα δεκάλεπτα δεδομένα είναι: (1) κωδικός χρονοσειράς, (2) κωδικός σταθμού, (3) έτος, (4) ημέρα, (5), ώρα/λεπτά, (6) θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), (7) σχετική υγρασία (%), (8) ταχύτητα ανέμου (m/s), (9) διεύθυνση ανέμου (μοίρες), (10) βροχόπτωση (mm), (11) ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2), (12) διάρκεια ηλιοφάνειας (min) και (13) ένδειξη κατάστασης μπαταρίας.

Τα πεδία που μεταδίδονται για τα ωριαία δεδομένα είναι: (1) κωδικός χρονοσειράς, (2) κωδικός σταθμού, (3) έτος, (4) ημέρα, (5) ώρα/λεπτά, (6) μέση θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), (7) μέγιστη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), (8) ελάχιστη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), (9) μέση σχετική υγρασία (%), (10) μέγιστη σχετική υγρασία (%), (11) ελάχιστη σχετική υγρασία (%), (12) μέση ταχύτητα ανέμου (m/s), (13) διεύθυνση ανέμου (μοίρες), (14) τυπική απόκλιση διεύθυνσης ανέμου (m/s), (15) μέγιστη ταχύτητα ανέμου (m/s), (16) ελάχιστη ταχύτητα ανέμου (m/s), (17) βροχόπτωση (mm), (18) μέση ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2), (19) μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2), (20) ελάχιστη ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2), (21) διάρκεια ηλιοφάνειας (min) και (22) ένδειξη κατάστασης μπαταρίας.

Τα αρχεία των σταθμών μέτρησης στάθμης ποταμών αποτελούνται από γραμμές κάθε μία από τις οποίες αντιπροσωπεύει ωριαίες μετρήσεις και αποτελούνται από επτά πεδία, ήτοι: (1) κωδικός χρονοσειράς, (2) κωδικός σταθμού, (3) έτος, (4) ημέρα, (5) ώρα/λεπτά, (6) βάθος (cm), (7) ένδειξη κατάστασης μπαταρίας.

Τα αρχεία των σταθμών μέτρησης στάθμης ταμιευτήρων αποτελούνται από γραμμές κάθε μία από τις οποίες αντιπροσωπεύει ωριαίες μετρήσεις και αποτελούνται από οκτώ πεδία, ήτοι: (1) κωδικός χρονοσειράς, (2) κωδικός σταθμού, (3) έτος, (4) ημέρα, (5) ώρα/λεπτά, (6) βάθος (cm), (7) ατμοσφαιρική πίεση (pounds per square inch-psi) και (8) ένδειξη κατάστασης μπαταρίας.



Σχήμα 4.2: Ροή δεδομένων τηλεμετρικού δικτύου.

Οι μετρήσεις που περιλαμβάνονται στα ASCII αρχεία εισάγονται αυτόματα στις κατάλληλες θέσεις της Βάσης Δεδομένων, με την εκτέλεση μιας μακροεντολής. Η εισαγωγή των πρωτογενών δεδομένων στη βάση περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα για κάθε σταθμό:

- Υλοποίηση όλων των απαιτούμενων πρωτογενών χρονοσειρών στη Βάση Δεδομένων και καταγραφή των κωδικών τους.
- Υλοποίηση στη βάση δεδομένων των αντιστοιχιών μεταξύ στηλών ASCII αρχείων και κωδικών χρονοσειρών. Η αντιστοιχία αυτή υλοποιείται με την αποθήκευση στη βάση συγκεκριμένων καταχωρητών (logger) και μορφών αποθήκευσης (storage format). Ένας καταχωρητής μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερες από μία μορφές αποθήκευσης, όπως στην περίπτωση των

μετεωρολογικών σταθμών που οι καταχωρητές περιλαμβάνουν δύο μορφές αποθήκευσης, οι οποίες αφορούν τις δεκάλεπτες και ωριαίες μετρήσεις.

- Εκτέλεση της μακροεντολής (LogToDB) που λαμβάνει υπόψη όλους τους καταχωρητές και εισάγει τις μετρήσεις στη βάση του συνόλου των σταθμών.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η ροή των δεδομένων του τηλεμετρικού δικτύου.

4.3.2 Ονοματολογία χρονοσειρών

Ο μεγάλος αριθμός πρωτογενών και επεξεργασμένων χρονοσειρών επιβάλλει την εισαγωγή μιας ονοματολογίας που να αποδίδει συνοπτικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς. Έτσι το συνοπτικό όνομα κάθε χρονοσειράς αποτελείται από τέσσερα κύρια μέρη το κάθε ένα από τα οποία συνδέεται με την κατηγορία του σταθμού, το όνομα, την μεταβλητή και το χρονικό βήμα.

Τα είδη των σταθμών που μέχρι τώρα έχουν εισαχθεί στη βάση είναι: Αυτόματος Μετεωρολογικός Σταθμός (ΑΜΣ), Αυτόματος Σταθμημετρικός Σταθμός (ΑΣΣ), Αυτόματος Υδρομετρικός Σταθμός (ΑΥΣ), Συμβατικός Μετεωρολογικός Σταθμός (ΣΜΣ), Συμβατικός Σταθμημετρικός Σταθμός (ΣΣΣ) και Συμβατικός Υδρομετρικός Σταθμός (ΣΥΣ).

Το όνομα του σταθμού συμβολίζεται με 3-4 γράμματα Έτσι μέχρι τώρα έχουν εισαχθεί ονόματα όπως ΜΟΡΝ (Μόρνος), ΥΛΙ (Υλίκη), ΜΑΡ (Μαραθώνας), ΛΕΥΚ (Λευκαδίτι), ΧΑΡ (Χάραδρος) και άλλα.

Η μεταβλητή συμβολίζεται με ορισμένα γράμματα όπως π.χ. ΘΕΡΜ (θερμοκρασία), ΣΧΥΓΡ (σχετική υγρασία) ή ΤΧΑΝ (ταχύτητα ανέμου). Αν πρόκειται για χρονοσειρά μεγίστων ή ελαχίστων τότε χρησιμοποιείται ο ανάλογος συμβολισμός π.χ. ΘΕΡΜ_ΜΕΓ (μέγιστη θερμοκρασία), ΣΧΥΓΡ_ΕΛΑΧ (ελάχιστη σχετική υγρασία).

Το χρονικό βήμα των χρονοσειρών μπορεί να είναι ακανόνιστο (ΑΚΑΝ), δεκάλεπτο (ΔΕΚ), ωριαίο (ΩΡ), ημερήσιο (ΗΜ), μηνιαίο (ΜΗΝ) και ετήσιο (ΕΤ).

4.3.3 Επεξεργασία δεδομένων

Οι δεκάλεπτες και ωριαίες πρωτογενείς μετρήσεις αποθηκεύονται αυτόματα στις αντίστοιχες χρονοσειρές της βάσης δεδομένων. Με βάση τις δεκάλεπτες και ωριαίες πρωτογενείς μετρήσεις υπολογίζονται οι δευτερογενείς χρονοσειρές ωριαίου, ημερήσιου, μηνιαίου και ετήσιου χρονικού βήματος. Οι δευτερογενείς χρονοσειρές προκύπτουν από τις μετρημένες: (α) ως μέσος όρος (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία), (β) ως συνάθροιση (π.χ. βροχή), (γ) ως μέγιστη ή ελάχιστη τιμή (π.χ. μέγιστες θερμοκρασίες) ή (δ) ως επιλογή τιμών σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (π.χ. στάθμη ταμιευτήρα). Ανεξάρτητα από τον τρόπο υπολογισμού, η μετάβαση σε χρονοσειρές μεγαλύτερου χρονικού βήματος απαιτεί την παραδοχή ενός ελάχιστου αριθμού ελλειπουσών τιμών στη χρονοσειρά του προηγούμενου χρονικού βήματος, όπου η υπέρβασή του έχει ως αποτέλεσμα τον μη υπολογισμό τιμής. Σε αυτή την εφαρμογή τα όρια αυτά τέθηκαν σε τέσσερις τιμές για τις ωριαίες χρονοσειρές, τρεις για τις ημερήσιες και μηδέν για τις μηνιαίες χρονοσειρές. Αυτό σημαίνει ότι για τον υπολογισμό κάθε τιμής μιας ημερήσιας χρονοσειράς απαιτούνται τουλάχιστον 20 ωριαίες τιμές, για τον υπολογισμό μιας μηνιαίας τιμής δεν πρέπει να λείπουν περισσότερες από τρεις ημέρες του μήνα, ενώ για τον υπολογισμό μιας ετήσιας τιμής απαιτούνται και οι 12 μηνιαίες τιμές.

Εκτός από τις προηγούμενες δευτερογενείς χρονοσειρές υπάρχουν και παράγωγες χρονοσειρές οι οποίες αφορούν μεταβλητές που δεν έχουν μετρηθεί άμεσα. Τέτοιες μεταβλητές είναι η εξάτμιση, η επιφάνεια και το απόθεμα ταμιευτήρα. Η εξάτμιση υπολογίζεται από τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, την ταχύτητα ανέμου και την ηλιοφάνεια, ενώ η επιφάνεια και το απόθεμα ταμιευτήρα υπολογίζονται από τη στάθμη και την καμπύλη στάθμης-επιφάνειας-όγκου του ταμιευτήρα.

Τέλος, υπάρχουν και οι χρονοσειρές που έχουν προέλθει από συμπλήρωση ή διόρθωση των πρωτογενών ή και δευτερογενών δεδομένων.

4.3.4 Υδρομετρήσεις

Μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί πέντε υδρομετρήσεις σε δύο θέσεις (τρεις στη διώρυγα Καρδίτσας και δύο στη γέφυρα Λευκαδιτίου). Οι δύο πρώτες (μία σε κάθε θέση) έγιναν με στόχο την εξοικείωση του προσωπικού της ΕΥΔΑΠ με τον εξοπλισμό και την τυποποίηση των διαδικασιών που απαιτούνται. Για το σκοπό αυτό μάλιστα έγιναν και ορισμένες εργασίες υποδομής στις συγκεκριμένες θέσεις και συγκεκριμένα η σήμανση χαρακτηριστικών σημείων των διατομών πάνω στις γέφυρες ώστε να μεταφέρεται άμεσα και με ακρίβεια το σύστημα ανάρτησης του μιλίσκου. Οι υπόλοιπες είχαν σκοπό τη μέτρηση της παροχής σε διάφορες στάθμες των υδατορευμάτων και τα συνοπτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Συνοπτικά αποτελέσματα υδρομετρήσεων.

Θέση	Ημερομηνία	Στάθμη ⁽¹⁾ (m)	Παροχή (m ³ /s)
Δ. Καρδίτσας	07/01/2003 11-12:00	1.30 (1.36)	14.78
Δ. Καρδίτσας	29/01/2003 10:30-12:30	2.55 (2.58)	61.59
Γ. Λευκαδιτίου	02/04/2003 10-12:30	(0.68)	8.73

(1) Σε παρένθεση η ένδειξη του αυτόματου σταθμού.

Το αμέσως επόμενο διάστημα θα πραγματοποιηθούν και άλλες υδρομετρήσεις στις δύο θέσεις με σκοπό την εκπόνηση καμπυλών στάθμης παροχής. Στη θέση Λευκαδίτι θα απαιτηθεί μελλοντικά σημαντικός αριθμός υδρομετρήσεων (6-12 ανά έτος) τα επόμενα χρόνια για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ στάθμης και παροχής. Αντίθετα στη διώρυγα Καρδίτσας που έχει τυποποιημένη διατομή οι υδρομετρήσεις μπορούν να είναι πιο αραιές (μία ανά έτος) αφού κύριο σκοπό έχουν την εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας της διώρυγας. Υπενθυμίζεται ότι με βάση μία μόνο υδρομέτρηση που πραγματοποιήθηκε το έτος 1978, εκτιμήθηκε συντελεστής τραχύτητας ίσος με 55, και με βάση αυτή την εκτίμηση έχουν προκύψει οι καμπύλες στάθμης παροχής που χρησιμοποιεί η ΕΥΔΑΠ.

4.4 Αξιολόγηση και ολοκλήρωση του δικτύου

4.4.1 Γενικές παρατηρήσεις από τη λειτουργία του δικτύου

Η πιλοτική λειτουργία του δικτύου για περισσότερο από ένα έτος ανέδειξε μια σειρά από προβλήματα τα περισσότερα από τα οποία σταδιακά αντιμετωπίστηκαν. Ένας από τους σημαντικότερους ελέγχους που έγιναν ήταν η σύγκριση των μετρήσεων των αυτόματων οργάνων με αυτές των συμβατικών, διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο υποκεφάλαιο. Σε γενικές γραμμές η λειτουργία του δικτύου κρίνεται ικανοποιητική αν και απαιτούνται ορισμένες διορθωτικές κινήσεις που θα βελτιώσουν την ποιότητα των μετρήσεων. Στη συνέχεια αναφέρονται τα σημαντικότερα προβλήματα που απομένει να επιλυθούν στο άμεσο μέλλον.

- Στους αισθητήρες υπερήχων (μέτρησης στάθμης ποταμών) παρατηρήθηκε η μέτρηση τιμών που ήταν εμφανώς λανθασμένες. Συγκεκριμένα η μέτρηση στάθμης της Διώρυγας Καρδίτσας σποραδικά (ορισμένες φορές την ημέρα) έπαιρνε την ίδια πολύ υψηλή τιμή (συγκεκριμένα έπαιρνε την τιμή 1090 και μετά τον 1/2003 την τιμή 936). Ακόμη, η μέτρηση της στάθμης του ποταμού Μόρνου στη θέση Λευκαδίτι ήταν σε πολλές περιπτώσεις αρνητική ενώ σε άλλες περιπτώσεις έπαιρνε την τιμή 606.

- Ο αισθητήρας θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού Υλίκης έδινε σε ορισμένες περιπτώσεις τη (δεκάλεπτη) μέτρηση 6999. Και στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις εφαρμόστηκε ο έλεγχος ακραίων τιμών και απορρίφθηκαν οι συγκεκριμένες μετρήσεις.
- Η στάθμη του ταμιευτήρα Μόρνου μεταβάλλεται σημαντικά στο χρόνο και δεν περνάει τον έλεγχο χρονικής συνέπειας. Είναι προφανές ότι ο σταθμός θα πρέπει να αλλάξει θέση δεδομένου οι μετρήσεις επηρεάζονται από τις απολήψεις νερού που γίνονται μέσω της σήραγγας Γκιόνας.
- Οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας τις νυκτερινές ώρες συνήθως είναι αρνητικές. Το γεγονός αυτό παρατηρείται σε όλους τους αισθητήρες και είναι συνηθισμένο γενικότερα στους περισσότερους τύπους αισθητήρων ηλιακής ακτινοβολίας. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με τη δημιουργία μιας επεξεργασμένης ωριαίας χρονοσειράς στην οποία έχουν αντικατασταθεί οι αρνητικές τιμές με μηδενικά. Από αυτήν τη χρονοσειρά προέρχονται και οι παράγωγες χρονοσειρές μεγαλύτερων χρονικών βημάτων. Η πρωτογενής χρονοσειρά που περιέχει τις αρνητικές τιμές διατηρείται στη βάση.

4.4.2 Σύγκριση δεδομένων

Η αξιολόγηση των μετρήσεων των αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη σύγκρισή τους με τις μετρήσεις των συμβατικών οργάνων που έχει εγκαταστήσει και λειτουργεί η ΕΥΔΑΠ. Γενικά η σύγκριση μεταξύ μετρήσεων των συμβατικών και των τηλεμετρικών σταθμών δίνει σχετικά καλά αποτελέσματα με εξαίρεση το βροχόμετρο του Μόρνου όπου σημειώθηκε δύο φορές βλάβη και το σταθμήμετρο του ταμιευτήρα Μόρνου το οποίο θα πρέπει να αλλάξει θέση. Ακόμη μικρότερα προβλήματα σημειώθηκαν στο σταθμήμετρο του ταμιευτήρα Υλίκης και της Διώρυγας Καρδίτσας.

4.4.3 Πρόσθετες εργασίες

Η εγκατάσταση του μετρητικού δικτύου ολοκληρώθηκε με εξαίρεση το σταθμημετρικό σταθμό στο χείμαρρο Χάραδρο που αναμένεται να γίνει στο αμέσως επόμενο διάστημα. Με βάση τα λειτουργικά προβλήματα που προέκυψαν κατά την περίοδο πιλοτικής λειτουργίας του δικτύου θα πρέπει να πραγματοποιηθούν μια σειρά από πρόσθετες εργασίες που περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

- Αλλαγή θέσης στο σταθμό μέτρησης στάθμης του ταμιευτήρα Μόρνου. Η διαδικασία είναι αρκετά εύκολη αφού ο αισθητήρας θα ποντιστεί ακριβώς κάτω από το μετεωρολογικό σταθμό του ταμιευτήρα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος καταχωρητής δεδομένων.
- Ένταξη στο σύστημα των δύο σταθμών του Ευήνου (μετεωρολογικός και μέτρησης στάθμης ταμιευτήρα), που αν και δεν αποτέλεσαν αντικείμενο του παρόντος έργου (είχαν τοποθετηθεί από την εταιρεία που κατασκεύασε το φράγμα), αναπτύχθηκε για λόγους πληρότητας όλη η απαιτούμενη υποδομή για την διαχείριση των δεδομένων τους. Συγκεκριμένα σε αυτή τη φάση θα πρέπει να επαναλειτουργήσει ο μετεωρολογικός σταθμός, ενώ θα πρέπει να λειτουργήσει σύστημα αυτόματης μεταφοράς των μετρήσεων στη βάση δεδομένων.
- Ελαχιστοποίηση των μετρήσεων εκτός ορίων που παρατηρούνται κυρίως στους σταθμούς μέτρησης στάθμης ποταμών.
- Τοποθέτηση δεύτερου βροχόμετρου στους μετεωρολογικούς σταθμούς δεδομένου ότι η βροχή αποτελεί τη σημαντικότερη πληροφορία που παίρνουμε από τους σταθμούς αυτούς, ενώ η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων βροχόπτωσης τους κάνει ευάλωτους σε βλάβες. Ήδη στον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Μόρνου παρουσιάστηκε δύο φορές βλάβη (βούλωσε το βροχόμετρο) με αποτέλεσμα να χαθούν σημαντικές μετρήσεις βροχόπτωσης.
- Μακροπρόθεσμα θα πρέπει να εξεταστεί από την ΕΥΔΑΠ η τοποθέτηση δεύτερης σειράς αισθητήρων για όλες τις μεταβλητές και ιδιαίτερα για τη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία είναι η

αμέσως πιο σημαντική μεταβλητή μετά τη βροχόπτωση αφού είναι απαραίτητη για την εκτίμηση της εξάτμισης.

4.4.4 Παρακολούθηση λειτουργίας και συντηρήσεων

Η παρακολούθηση της λειτουργίας των μετρητικών σταθμών και της καταγραφής των πάσης φύσεως συντηρήσεων που εκτελούνται είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ομαλή ροή αλλά και αξιοπιστία των μετρήσεων. Για το σκοπό αυτό καταρτίστηκαν ειδικά έντυπα για κάθε σταθμό (μετεωρολογικό, σταθμημετρικό ταμιευτήρα, σταθμημετρικό ποταμού) που παρουσιάζονται στο Τεύχος 16. Για κάθε σταθμό υπάρχει ένα έντυπο για την παρακολούθηση των συντηρήσεων καθώς και ένα έντυπο που αποτελεί την ταυτότητα του σταθμού. Στο τελευταίο καταγράφονται τα χαρακτηριστικά του σταθμού και όλων των διατάξεων καθώς και οι πάσης φύσεως αλλαγές (νέοι αισθητήρες, αλλαγή θέσης κλπ).

Το έντυπο συντήρησης περιλαμβάνει μια σειρά από όμοιους πίνακες, κάθε ένας από τους οποίους αφορά ένα συγκεκριμένο περιστατικό συντήρησης. Ο πίνακας περιλαμβάνει πεδία για την καταγραφή της ημερομηνίας της συντήρησης καθώς και τα ονόματα του συντηρητή και του επιβλέποντα του σταθμού. Στη συνέχεια υπάρχουν δύο στήλες από πεδία, η πρώτη από τις οποίες αφορά το είδος της συντήρησης (βλάβη, αντικατάσταση, τακτική συντήρηση, έκτακτη συντήρηση κλπ) και η δεύτερη τη συσκευή του σταθμού πάνω στην οποία έγινε η επέμβαση. Ο χρήστης του εντύπου θα πρέπει απλώς να επιλέξει τα κατάλληλα πεδία και από τις δύο στήλες. Τέλος υπάρχει ειδικό πεδίο για την καταγραφή τυχόν παρατηρήσεων.

Το έντυπο ταυτότητας σταθμού αποτελείται από τέσσερις πίνακες. Ο πρώτος σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της γεωγραφικής θέσης του σταθμού (νομός, κοινότητα, λεκάνη απορροής, γεωγραφικές συντεταγμένες κλπ). Ο δεύτερος πίνακας σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων και του καταχωρητή, όπως ο οίκος κατασκευής, ο τύπος, το ύψος τοποθέτησης του οργάνου καθώς και το αρχείο υπολογιστή όπου υπάρχει το εγχειρίδιο οδηγιών. Ο τρίτος πίνακας περιλαμβάνει τη συνοπτική περιγραφή των υπολοίπων διατάξεων του σταθμού όπως το modem, η τηλεφωνική συσκευή, η τηλεφωνική γραμμή, η παροχή ρεύματος και τα μηχανικά μέρη του σταθμού (ιστός, περίφραξη κλπ). Τέλος, στον τελευταίο πίνακα καταγράφονται χρονολογικά οι συντηρήσεις όπως αυτές προκύπτουν από το ειδικό έντυπο συντήρησης. Η καταγραφή είναι απόλυτα συνοπτική και περιλαμβάνει ημερομηνία και κωδικό συντήρησης καθώς και παρατηρήσεις εφόσον αυτό θεωρηθεί σκόπιμο.

5 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες

5.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό καλύπτει το τμήμα των δυναμικών πληροφοριών του συστήματος, υδρολογικών και μετεωρολογικών. Περιγράφονται συνοπτικά οι εργασίες συλλογής, ανάλυσης και επεξεργασίας των πρωτογενών υδρομετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής μελέτης, με σκοπό την κατάρτιση αξιόπιστων ιστορικών δειγμάτων επιφανειακής υδρολογίας, που αναφέρονται στους ταμειυτήρες του υδροσυστήματος της Αθήνας και τις λεκάνες απορροής τους.

5.2 Βροχομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες

5.2.1 Βροχομετρικοί σταθμοί και έλεγχοι ομογένειας

Για τις ανάγκες του έργου συλλέχθηκαν τα μηνιαία και, σε ορισμένες περιπτώσεις, ημερήσια δείγματα βροχοπτώσεων 26 σταθμών της Στερεάς Ελλάδας. Για την αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι ομογένειας με την ημιεμπειρική μέθοδο της διπλής αθροιστικής καμπύλης. Η μέθοδος εφαρμόζεται για τα ετήσια ύψη βροχής και αποσκοπεί στον εντοπισμό τεχνητών αλλαγών στις συνθήκες μέτρησης, που επηρεάζουν συστηματικά το αποτέλεσμα της μέτρησης (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1997, σ. 107-119). Ο έλεγχος έγινε συγκρίνοντας το δείγμα των αθροιστικών ετήσιων υψών βροχής κάθε σταθμού με το αντίστοιχο ενός τουλάχιστον γειτονικού του, και κατέδειξε ότι τα δεδομένα των περισσότερων σταθμών μπορούν να θεωρηθούν, σε γενικές γραμμές, αξιόπιστα.

5.2.2 Συμπλήρωση ελλείψεων και επέκταση δειγμάτων

Οι, ως επί το πλείστον, σποραδικές ελλείψεις των βροχομετρικών δειγμάτων της περιοχής μελέτης, που οφείλονται, κυρίως, σε βλάβες οργάνων και αμέλειες ή κωλύματα παρατηρητών, συμπληρώθηκαν με την απλούστερη στατιστική τεχνική, που είναι η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης. Σύμφωνα με αυτή, η εκτίμηση της τιμής της προς συμπλήρωση μεταβλητής y_i συναρτήσει της γνωστής τιμής x_i γίνεται μέσω ενός γραμμικού μοντέλου της μορφής:

$$y_i = a + b x_i \quad (5.1)$$

όπου a και b παράμετροι (τομή και κλίση ευθείας παλινδρόμησης), τέτοιες ώστε να ελαχιστοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της εκτίμησης. Επισημαίνεται ότι, ελήφθη πρόνοια ώστε να μηδενιστούν οι τυχόν αρνητικές τιμές, στην περίπτωση εμφάνισης αρνητικού a .

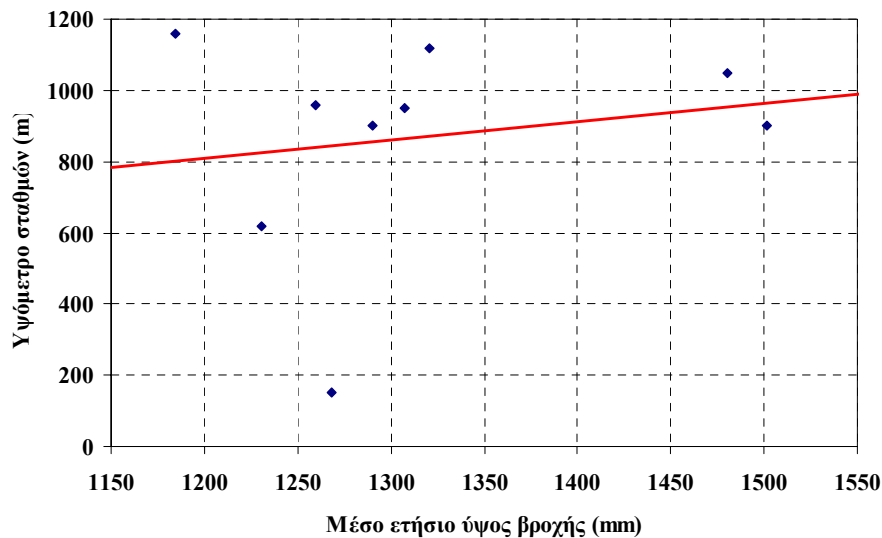
5.2.3 Υψομετρική αναγωγή βροχοπτώσεων

Για τις λεκάνες απορροής του Ευήνου και του Βοιωτικού Κηφισού απαιτήθηκε μεταφορά της διαθέσιμης βροχομετρικής πληροφορίας σε διαφορετικά υψόμετρα, με εφαρμογή της μεθόδου του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 129-141). Έστω z_s το μέσο υψόμετρο της λεκάνης, z_σ το μέσο υψόμετρο των βροχομετρικών σταθμών και h_s το επιφανειακό μέσο ετήσιο ύψος βροχής. Αν οι τιμές z_s και z_σ διαφέρουν σημαντικά, απαιτείται διόρθωση της υπολογιζόμενης βροχόπτωσης, πολλαπλασιάζοντας το αρχικό δείγμα επί την ποσότητα:

$$\lambda = 1 + \beta \frac{z_s - z_\sigma}{h_s} \quad (5.2)$$

όπου β η βροχομετρική βαθμίδα, ήτοι η ανά μονάδα μέτρου μεταβολή του ύψους βροχής, η οποία ταυτίζεται με την κλίση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των μέσων ετήσιων τιμών των σημειακών δειγμάτων και των αντίστοιχων υψομέτρων των βροχομετρικών σταθμών.

Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται το διάγραμμα διασποράς της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης συναρτήσει του υψομέτρου 9 βροχομετρικών σταθμών της λεκάνης απορροής του Ευήνου. Είναι προφανές ότι οι δύο μεταβλητές είναι πρακτικά ασυσχέτιστες. Η έλλειψη συσχέτισης αποδίδεται στην κυριαρχία άλλων παραγόντων, όπως ο γεωγραφικός προσανατολισμός (π.χ. ύπαρξη σταθμών στην ομβροσκιά) και οι χιονοπτώσεις, που φαίνεται να είναι πιο σημαντικοί σε σχέση με την επίδραση της ορογραφίας.

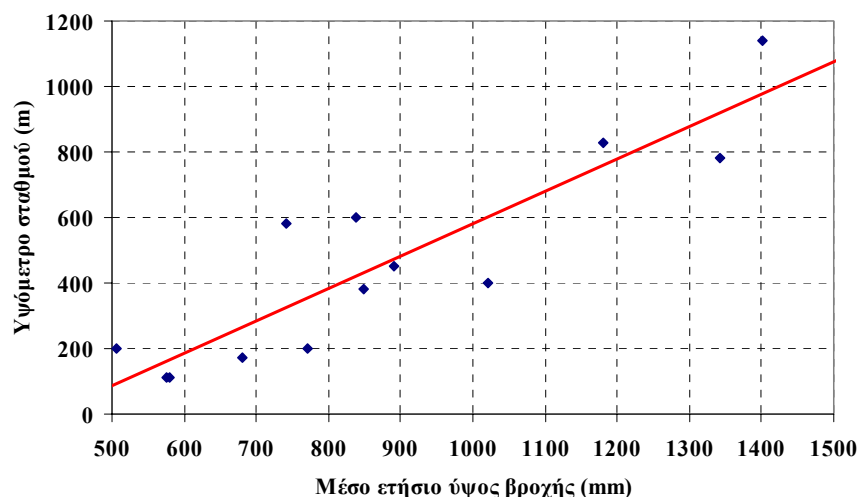


Σχήμα 5.1: Γραφική απεικόνιση σχέσης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης-υψομέτρου στην λεκάνη απορροής του Ευήνου και της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης.

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται το διάγραμμα διασποράς της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης συναρτήσει του υψομέτρου 10 βροχομετρικών σταθμών της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Η τελευταία χωρίστηκε σε δύο ζώνες, όπου η πρώτη περιλαμβάνει τα ορεινά υψόμετρα και τους αντίστοιχους σταθμούς, και η δεύτερη τα πεδινά υψόμετρα. Είναι φανερό ότι η συσχέτιση των δύο μεταβλητών είναι σαφώς καλύτερη σε σχέση με τη λεκάνη απορροής του Ευήνου, καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού ισούται με $r^2 = 0.800$. Θεωρώντας ενιαία βροχοβαθμίδα για τις δύο ζώνες διαχωρισμού της λεκάνης, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές υψομετρικής αναγωγής που χρησιμοποιήθηκαν για την κατάρτιση των σχετικών χρονοσειρών επιφανειακής βροχόπτωσης. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Στοιχεία για τον υπολογισμό του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής στις δύο ζώνες της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

	Ορεινή ζώνη	Πεδινή ζώνη
Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)	970.3	239.8
Μέσο υψόμετρο σταθμών (m)	651.4	158.0
Επιφανειακό ετήσιο ύψος βροχής (mm)	1058.0	624.4
Βροχοβαθμίδα (mm/m)	0.809	0.809
Συντελεστής υψομετρικής αναγωγής	1.244	1.106



Σχήμα 5.2: Γραφική απεικόνιση σχέσης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης-υψομέτρου στην περιοχή του Βοιωτικού Κηφισού και της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης.

5.2.4 Εκτίμηση επιφανειακής βροχόπτωσης ταμιευτήρων

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Ευήνου συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2. Η χρονοσειρά προέκυψε με ενοποίηση δύο δειγμάτων. Έως τον Μάρτιο του 2001 έγινε μεταφορά του μηνιαίου δείγματος του σταθμού Δρυμόνα, που βρίσκεται σε υψόμετρο $z_s = 900$ m, και αναγωγή της στη μέση στάθμη του ταμιευτήρα, $z_s = 480$ m. Για μέση ετήσια βροχόπτωση του σταθμού Δρυμόνα, ίση με $h_s = 1301.1$ mm, και με εφαρμογή της σχέσης (5.2), προέκυψε συντελεστής υψομετρικής αναγωγής ίσος με $\lambda = 0.834$, που παρά την εξαιρετικά χαμηλή προσαρμογή του δείγματος, θεωρήθηκε σχετικά αξιόπιστος για τους σκοπούς της ανάλυσης. Από τον Απρίλιο του 2001, η βροχόπτωση μετριέται στον μετεωρολογικό σταθμό του φράγματος. Ωστόσο, από τον Μάρτιο του 2003, ο σταθμός δεν λειτουργεί λόγω βλάβης του οργάνου, ενώ και στο σύντομο χρονικό διάστημα που λειτουργήσε απρόσκοπτα κατέγραψε τιμές βροχόπτωσης που φαίνονται ύποπτα χαμηλές.

Πίνακας 5.2: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Ευήνου για τα υδρολογικά έτη 1970-71 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	108.0	221.8	216.0	143.2	161.9	109.0	114.5	68.0	35.4	26.2	32.6	54.4	1291.0
Τυπ. απόκλ.	76.9	105.9	123.8	92.3	90.4	66.5	66.3	37.3	24.9	31.8	26.1	49.0	278.0
Μέγιστο	310.2	447.6	561.6	370.2	331.9	293.3	304.2	137.0	91.7	159.9	101.0	201.8	1696.0
Ελάχιστο	0.3	23.7	48.7	0.0	6.4	1.7	19.3	9.7	0.0	0.0	0.0	1.0	743.8

Η χρονοσειρά μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Μόρνου προέκυψε με απευθείας μεταφορά της χρονοσειράς βροχόπτωσης του σταθμού Λιδορικίου και χωρίς υψομετρική αναγωγή, δεδομένου ότι ο σταθμός βρίσκεται πολύ κοντά στον ταμιευτήρα. Τα διαθέσιμα δεδομένα καλύπτουν την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1958 έως τον Ιανουάριο του 2002. Από τον Φεβρουάριο του 2002, η βροχόπτωση στον ταμιευτήρα Μόρνου μετριέται από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που εγκατέστησε η ΕΥΔΑΠ στα πλαίσια αυτού του έργου. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ενοποιημένου δείγματος συνοψίζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Μόρνου για τα υδρολογικά έτη 1958-59 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	89.2	187.2	182.3	118.8	137.1	93.7	94.5	57.4	30.2	22.2	27.4	45.0	1085.1
Τυπ. απόκλ.	65.3	89.7	106.2	78.3	75.7	55.9	57.0	32.0	21.2	27.3	22.4	41.8	229.9
Μέγιστο	258.7	373.3	468.4	308.7	276.8	244.6	253.7	114.3	76.5	133.4	84.2	168.3	1414.5
Ελάχιστο	0.3	19.8	40.6	0.0	5.3	1.4	16.1	8.1	0.0	0.0	0.0	0.8	620.3

Η χρονοσειρά μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια της Υλίκης προέκυψε με μεταφορά της χρονοσειράς βροχόπτωσης του γειτονικού σταθμού Αλιάρτου και χωρίς υψομετρική αναγωγή, δεδομένου ότι η υψομετρική διαφορά του από τη λίμνη δεν είναι σημαντική. Τα διαθέσιμα δεδομένα καλύπτουν μια μεγάλη χρονική περίοδο μήκους 90 ετών, από τον Οκτώβριο του 1907 έως τον Ιούλιο του 2001. Στο διάστημα από τον Αύγουστο του 2001 έως τον Μάιο του 2002, η βροχόπτωση στη λίμνη υπολογίστηκε με απευθείας μεταφορά του χαμηλής αξιοπιστίας δείγματος του σταθμού Μουρικού, ενώ από τον Ιούνιο του 2002, η βροχόπτωση μετρείται από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που εγκατέστησε η ΕΥΔΑΠ στα πλαίσια του παρόντος έργου. Το τελικό δείγμα μηνιαίας βροχόπτωσης προκύπτει με ενοποίηση των παραπάνω τριών δειγμάτων. Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά της ενοποιημένης χρονοσειράς συνοψίζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Υλίκης για τα υδρολογικά έτη 1907-08 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	71.1	89.8	108.7	94.2	79.8	70.7	40.7	33.6	20.7	6.8	12.6	29.5	657.6
Τυπ. απόκλ.	59.8	55.0	61.1	52.9	47.1	43.6	32.9	28.9	25.5	10.3	25.6	34.8	157.3
Μέγιστο	269.9	250.5	286.7	331.8	233.4	195.6	165.6	159.1	167.8	50.5	209.4	142.4	1192.7
Ελάχιστο	0.0	2.1	7.0	5.0	0.0	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	333.6

Τέλος, η χρονοσειρά μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του Μαραθώνα προέκυψε με βάση τις καταγραφές του βροχομέτρου του συμβατικού μετεωρολογικού σταθμού της ΕΥΔΑΠ που είναι εγκατεστημένος κοντά στο φράγμα, και από τις αρχές του 2002, του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού που κατασκευάστηκε στα πλαίσια του έργου. Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Μαραθώνα για τα υδρολογικά έτη 1932-33 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	62.9	79.9	110.7	93.4	69.1	64.9	35.6	25.7	15.2	7.6	5.8	18.1	588.9
Τυπ. απόκλ.	54.2	51.1	66.2	52.5	42.7	51.6	32.9	23.8	22.0	13.0	13.8	30.5	153.1
Μέγιστο	206.9	290.0	298.5	221.0	177.8	353.0	158.5	135.2	153.3	58.0	86.2	197.1	1103.0
Ελάχιστο	0.0	0.0	18.7	5.2	6.0	1.8	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	325.3

5.3 Υδρομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες

5.3.1 Σκοπός

Οι επεξεργασίες των υδρομετρικών δεδομένων των λεκανών Ευήνου, Μόρνου, Βοιωτικού Κηφισού, Υλίκης και Μαραθώνα, σε συνδυασμό με την κατάρτιση των υδατικών ισοζυγίων, αποσκοπούν στην παραγωγή μηνιαίων δειγμάτων απορροής στις θέσεις των τεσσάρων ταμιευτήρων του υδροδοτικού

συστήματος της Αθήνας. Το μεγαλύτερο μέρος των εργασιών αφορά την εκτίμηση της απορροής της λεκάνης ανάντη του ταμιευτήρα Ευήνου, για την οποία απαιτήθηκε η συλλογή, αξιολόγηση και επεξεργασία ενός εκτενούς δείγματος πρωτογενών δεδομένων, τόσο κατά την πρώτη όσο και κατά την δεύτερη φάση του έργου. Σε ό,τι αφορά στους υπόλοιπους ταμιευτήρες, για τον Μόρνο και τον Μαραθώνα επικαιροποιήθηκαν τα δεδομένα της πρώτης φάσης του έργου, ενώ για την Υλίκη έγινε εξαιρετικά εκτεταμένη διερεύνηση, που είναι αντικείμενο του Τεύχους 21.

5.3.2 Μεθοδολογία

Πρωτεύουσα πληροφορία της τεχνικής υδρολογίας είναι οι μετρήσεις παροχής των υδατορευμάτων, που συνιστούν τη βασική πληροφορία όλων των μέτρων που σχετίζονται με την αξιοποίηση και διαχείριση των υδατικών πόρων. Κύριος στόχος της υδρομετρίας είναι η παραγωγή αδιάλειπτων χρονοσειρών παροχής, σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Η διαδικασία εκτέλεσης μετρήσεων παροχής και, ακολούθως, η μεθοδολογία κατάρτισης χρονοσειρών παροχής πυκνού χρονικού βήματος βασίζεται σε υδρομετρήσεις αραιού βήματος καθώς και χρονοσειρές στάθμης (*Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος*, 1999, σ. 315-343).

Η παροχή εκτιμάται έμμεσα, με μέτρηση της ταχύτητας ροής. Εφόσον είναι γνωστό το πεδίο ταχυτήτων σε διάφορα σημεία της διατομής του υπό μελέτη υδατορεύματος, η παροχή προκύπτει άμεσα από κατάλληλη προσέγγιση του ολοκληρώματος της ταχύτητας στη διατομή του υδατορεύματος. Το τυπικό όργανο μέτρησης της ταχύτητας ροής είναι ο *μυλίσκος*. Αν το βάθος είναι σχετικά μικρό, τότε η διενέργεια μιας μοναδικής μέτρησης κατά την κατακόρυφη έννοια θεωρείται επαρκής (*World Meteorological Organization*, 1981, σ. 2.53).

Η διαδικασία μέτρησης της παροχής δεν μπορεί να έχει την χρονική διακριτότητα που απαιτείται για την εξαγωγή χρονοσειρών παροχής. Για τον λόγο αυτό, οι τελευταίες προκύπτουν έμμεσα, χρησιμοποιώντας ως βάση μετρήσεις στάθμης πυκνού χρονικού βήματος. Η μέτρηση της στάθμης ενός υδατορεύματος, γίνεται κατά κύριο λόγο με σταθμημέτρα και, σε ορισμένες περιπτώσεις, με σταθμηγράφους, που είναι αυτόματα καταγραφικά όργανα. Συνήθως θεωρείται ορθότερη η χρονοσειρά του σταθμημέτρου, ενώ η χρονοσειρά του σταθμηγράφου υπόκειται σε μια απλή διαδικασία αναγωγής.

Ο μετασχηματισμός της μετρημένης στάθμης σε παροχή γίνεται είτε μέσω αναλυτικών ή μέσω στατιστικών σχέσεων. Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται σε νόμους της υδραυλικής και προϋποθέτει την γνώση των γεωμετρικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών της ροής. Συνηθέστερα, χρησιμοποιείται ο εμπειρικός τύπος του Manning. Εναλλακτικά, ακολουθείται η στατιστική προσέγγιση, βάσει της οποίας η παροχή εκτιμάται μέσω αμφιμονοσήμαντων μαθηματικών σχέσεων $Q = f(h)$ που προκύπτουν με προσαρμογή γνωστών, από υδρομετρήσεις, τιμών παροχής, Q_i , στις αντίστοιχες τιμές στάθμης, h_i . Απαραίτητα προϋπόθεση για την εξαγωγή τέτοιων σχέσεων είναι η ύπαρξη ικανοποιητικού δείγματος μετρήσεων (Q_i, h_i), για όλες τις συνήθεις δίαιτες ροής. Η συνάρτηση $Q = f(h)$ καλείται *καμπύλη στάθμης-παροχής* (rating curve) και συνήθως περιγράφεται από μια γενική σχέση δύναμης. Σε πιο σύνθετες διατομές, όπου η γεωμετρία της κοίτης μεταβάλλεται με την στάθμη, η καμπύλη μπορεί να αποτελείται από m το πλήθος τμήματα. Υπό την προϋπόθεση ότι όλα τα ζεύγη σημείων (Q_i, h_i) περιγράφονται από μια ενιαία εξίσωση, η εκτίμηση των παραμέτρων της καμπύλης γίνεται εύκολα, μέσω γραμμικής παλινδρόμησης. Αν, ωστόσο, απαιτούνται περισσότερες από μία σχέσεις δύναμης, δεν υπάρχει αναλυτική μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων και απαιτείται βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος τη μέση τετραγωνική απόκλιση μεταξύ των παρατηρημένων και εκτιμημένων παροχών και κατάλληλους περιορισμούς (βλ. τεύχος 17).

Στα περισσότερα υδατορεύματα, η σχέση στάθμης-παροχής υπόκειται σε αλλαγές με την πάροδο του χρόνου που οφείλονται στην μεταβολή των χαρακτηριστικών της διατομής, εξαιτίας της διάβρωσης,

της απόθεσης φερτών υλικών, της ανάπτυξης της χλωρίδας, κλπ. Αυτές οι αλλαγές δεν επιτρέπουν να θεωρηθεί ρεαλιστική μια μοναδική διαχρονική καμπύλη, αλλά επιβάλλουν τη χρήση ενός συνόλου καμπυλών. Κατά συνέπεια, πριν την κατάρτιση των καμπυλών απαιτείται η ομαδοποίηση των υδρομετρήσεων σε υποσύνολα, με τρόπο ώστε οι μετρήσεις κάθε υποσυνόλου να περιγράφονται από την ίδια σχέση.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η αντιμετώπιση του προβλήματος κατασκευής σχέσεων στάθμης-παροχής δεν είναι μια τετριμμένη διαδικασία, καθώς σημαντικό μέρος αυτής γίνεται με το χέρι, κάτι που προφανώς προϋποθέτει σημαντική εμπειρία από πλευράς μελετητή. Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη αυτόματων μεθοδολογιών ανάλυσης υδρομετρικών δεδομένων με στόχο την κατάρτιση πολλαπλών σχέσεων στάθμης-παροχής συνιστά ένα ανοιχτό πεδίο έρευνας στον χώρο της τεχνικής υδρολογίας (*Tsakalias and Koutsoyiannis, 1999*).

Μετά την επεξεργασία των σταθμημετρικών δεδομένων και ειδικότερα την αναγωγή των μετρήσεων του σταθμηγράφου, και την κατάρτιση των καμπυλών στάθμης-παροχής, υπολογίζονται οι χρονοσειρές παροχής. Αυτό δεν γίνεται με άμεση εφαρμογή της σχέσης στάθμης-παροχής, αφού κάτι τέτοιο θα είχε ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό παροχών που διαφέρουν από τις αντίστοιχες μετρημένες κατά τις χρονικές στιγμές πραγματοποίησης των υδρομετρήσεων. Για τον λόγο αυτό, εφαρμόζεται μια διαδικασία διόρθωσης των χρονοσειρών στάθμης, γνωστή ως μέθοδος *Stout* (*Shaw, 1994, σ. 119*).

5.3.3 Απορροή λεκάνης Ευήνου

Στη λεκάνη απορροής του Ευήνου, ο πλέον αξιόλογος υδρομετρικός σταθμός είναι ο σταθμός Πόρου Ρηγανίου, που βρίσκεται 35 km ανάντη των εκβολών του ποταμού και είναι σε συνεχή λειτουργία από το 1960 υπό την εποπτεία της ΔΕΗ. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει ο σταθμός Αγίου Δημητρίου (Νεοχωρίου), ο οποίος λειτούργησε από το 1970 μέχρι την έναρξη κατασκευής του φράγματος, στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Παρόλο που ο τελευταίος παρουσιάζει το πλεονέκτημα της άμεσης γειννιάσής του με τον ταμιευτήρα, για την αναγωγή των παροχών στη θέση του φράγματος επιλέχθηκε τελικά ως σταθμός βάσης ο σταθμός Πόρου Ρηγανίου, ο οποίος μάλιστα διαθέτει και σταθμηγράφο.

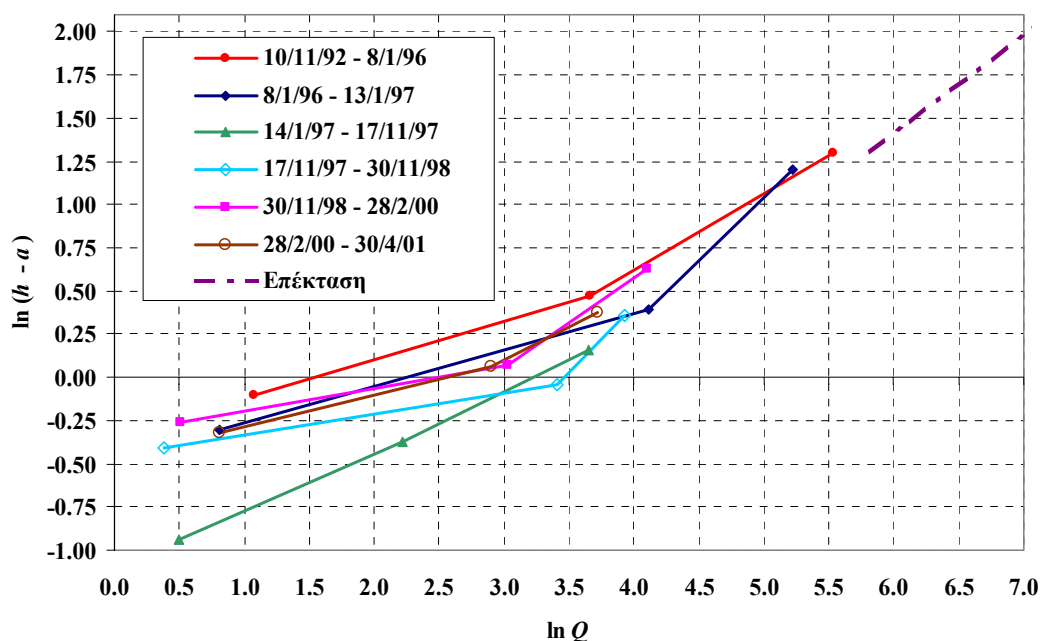
Η υδρομετρική πληροφορία στη θέση Πόρος Ρηγανίου περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες:

- δεδομένα σταθμήμετρου σε ημερήσιο βήμα (8 το πρωί)
- δεδομένα σταθμηγράφου σε ωριαίο βήμα, τα οποία αναφέρονται σε σημαντικά πλημμυρικά επεισόδια και προέρχονται από ψηφιοποίηση της ταινίας του οργάνου·
- υδρομετρήσεις δεκαπενθήμερου, περίπου, χρονικού βήματος (με εξαίρεση του θερινούς μήνες), οι οποίες, ελλείψει στοιχείων, θεωρείται ότι πραγματοποιούνται στις 10 το πρωί.

Τα παραπάνω στοιχεία, τα οποία ήταν διαθέσιμα από προηγούμενα ερευνητικά έργα του ΕΜΠ (*Μαμάσης και Ναλμπάντης, 1995· Χριστοφίδης και Μαμάσης, 1995*) μέχρι το υδρολογικό έτος 1993-94 (*Τσακαλίας και Κουτσογιάννης, 1995*), επικαιροποιήθηκαν μέχρι τον Απρίλιο του 2001, βάσει πρωτογενών δεδομένων που ελήφθησαν από την ΔΕΗ. Ειδικότερα, η κατασκευή των καμπυλών στάθμης-παροχής και ο υπολογισμός των παροχών πραγματοποιήθηκε για την περίοδο από τον Νοέμβριο του 1992 και έπειτα.

Αρχικά, ενοποιήθηκαν τα σταθμημετρικά δεδομένα που προέρχονται από τις καταγραφές του σταθμήμετρου και του σταθμηγράφου. Ως όργανο βάσης ελήφθη το σταθμήμετρο, το οποίο είναι λιγότερο ευαίσθητο σε σφάλματα, ενώ από αυτό προέρχονται οι τιμές στάθμης που αναφέρονται στα έντυπα των υδρομετρήσεων, μέσω των οποίων κατασκευάστηκαν οι καμπύλες στάθμης-παροχής.

Στην συνέχεια ελήφθη το δείγμα των υδρομετρήσεων διατεταγμένο κατά αύξουσα χρονολογική σειρά, στο οποίο έγινε ομαδοποίηση των δεδομένων και απόρριψη των εξωκείμενων σημείων. Ακολούθως, για κάθε ομάδα δεδομένων κατασκευάστηκε η αντίστοιχη καμπύλη στάθμης-παροχής. Η επέκταση των καμπυλών στην περιοχή των υψηλών τιμών στάθμης, ήτοι τιμών μεγαλύτερων της μέγιστης παρατηρημένης, έγινε με εφαρμογή αναλυτικών εξισώσεων της υδραυλικής. Συνολικά προέκυψαν έξι καμπύλες (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Γραφική παράσταση των σχέσεων στάθμης-παροχής στη θέση Πόρος Ρηγανίου. Με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η επέκταση των σχέσεων για στάθμες μεγαλύτερες από 3 m, η οποία προκύπτει με εφαρμογή εξισώσεων της υδραυλικής.

Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν οι μηνιαίοι όγκοι απορροής. Το τελικό δείγμα μηνιαίας απορροής στην θέση Πόρος Ρηγανίου ξεκινά τον Μάιο του 1961, λίγο δηλαδή μετά την έναρξη λειτουργίας του υδρομετρικού σταθμού, και ολοκληρώνεται τον Απρίλιο του 2001, μέχρις ότου επικαιροποιήθηκαν τα πρωτογενή υδρομετρικά δεδομένα της ΔΕΗ. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος δίνονται στον Πίνακα 5.6.

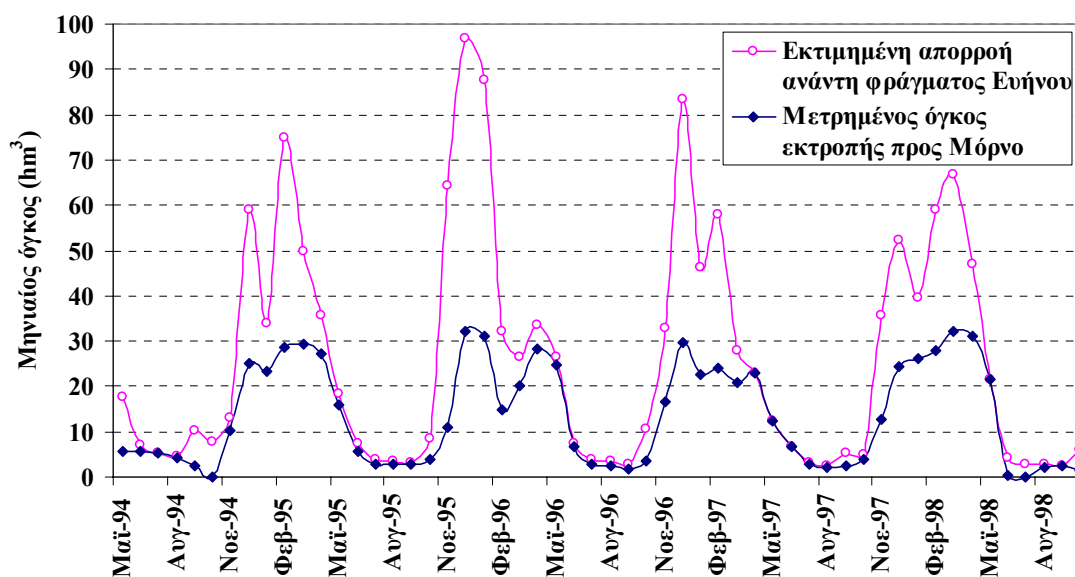
Πίνακας 5.6: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας απορροής Ευήνου στη θέση Πόρος Ρηγανίου για τα υδρολογικά έτη 1960-61 έως 2000-01 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	16.9	70.3	136.7	99.9	114.2	103.5	77.8	45.0	19.3	11.2	7.8	7.7	718.2
Τυπ. απόκλ.	13.8	53.5	97.0	71.6	71.2	56.3	30.5	22.5	8.5	4.2	2.5	3.6	249.9
Μέγιστο	67.7	226.7	417.9	323.1	370.0	261.6	162.1	97.7	46.6	23.1	14.7	23.4	1695.9
Ελάχιστο	4.7	10.4	18.4	14.2	10.8	15.9	27.5	14.7	8.0	5.1	4.1	3.4	283.0

Στη συνέχεια, έγινε κατάρτιση δείγματος μηνιαίας απορροής ανάντη του φράγματος Ευήνου. Μέχρι την έναρξη της λειτουργίας του φράγματος Αγίου Δημητρίου στον ποταμό Ευήνο (Σεπτέμβριος 2001), η εκτίμηση της απορροής της ανάντη λεκάνης έγινε έμμεσα, με αναγωγή της μηνιαίας απορροής στην θέση Πόρος Ρηγανίου μέσω του λόγου των αντίστοιχων εμβαδών λεκάνης.

Από τον Μάιο του 1995 έως τον Οκτώβριο του 1999, στην θέση του φράγματος λειτούργησε ένα προσωρινό έργο εκτροπής (πρόφραγμα), που καταστράφηκε εξαιτίας μια εξαιρετικά έντονης πλημμύρας. Συνεπώς, κατά την περίοδο αυτή, πρέπει να συνυπολογιστεί και ο όγκος εκτροπής προς τον ταμιευτήρα Μόρνου μέσω του προφράγματος. Αυτό έγινε με την παραγωγή κατάλληλης σχέσης (βλ. Τεύχος 17).

Στο Σχήμα 5.45.4 συγκρίνονται το μηνιαίο δείγμα απορροής στη θέση Άγιος Δημήτριος και η χρονοσειρά με τις τιμές των όγκων εκτροπής για την περίοδο λειτουργίας του προφράγματος. Παρατηρείται ότι τις περιόδους χαμηλής υδροφορίας, το σύνολο σχεδόν της εκτιμημένης απορροής εκτρέπεται προς τον ταμιευτήρα του Μόρνου, ενώ κατά τις περιόδους υψηλής υδροφορίας, και λόγω ανεπαρκούς παροχευτικότητας της σήραγγας εκτροπής, ο υπολειπόμενος όγκος προφανώς υπερχειλίζει κατάντη του προφράγματος.



Σχήμα 5.4: Σύγκριση μηνιαίας απορροής στη θέση του φράγματος Αγίου Δημητρίου με τις ποσότητες που εκτράπηκαν προς τον ταμιευτήρα Μόρνου (τιμές σε hm^3)

Τα πρωτογενή δεδομένα του σταθμού Πόρου Ρηγανίου που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της απορροής ανάντη του ταμιευτήρα Ευήνου ελήφθησαν μέχρι τον Απρίλιο του 2001. Από την έναρξη της λειτουργίας του ταμιευτήρα και έκτοτε, ήτοι από τον Σεπτέμβριο του 2001, η απορροή ανάντη του φράγματος εκτιμήθηκε από την εξίσωση υδατικού ισοζυγίου, σε μηνιαία βάση. Στο ενδιάμεσο διάστημα μήκους τεσσάρων μηνών, η απορροή του Ευήνου συμπληρώθηκε μέσω γραμμικής παλινδρόμησης με την αντίστοιχη μηνιαία απορροή του Μόρνου, με την οποία παρουσιάζει ισχυρή συσχέτιση. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της δίνονται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Ευήνου στην θέση του φράγματος για τα υδρολογικά έτη 1970-71 έως 2002-03 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	6.9	27.1	53.7	40.2	43.5	38.1	33.3	19.3	7.7	4.6	3.3	3.4	281.1
Τυπ. απόκλ.	5.7	18.9	36.3	25.0	23.7	18.5	12.7	7.6	2.7	1.4	0.9	1.7	79.1
Μέγιστο	27.1	77.7	167.2	111.7	100.3	99.1	64.8	33.4	16.1	7.3	5.9	10.3	414.7
Ελάχιστο	1.9	4.2	7.4	5.7	4.3	6.4	11.0	5.9	3.2	2.1	1.9	1.3	113.2

5.3.4 Απορροή λεκάνης Μόρνου

Στην λεκάνη απορροής του Μόρνου δεν λειτουργεί σήμερα κανένας υδρομετρικός σταθμός. Στο παρελθόν έχουν λειτουργήσει δύο υδρομετρικοί σταθμοί στις θέσεις Στενό και Περιβόλι. Συγκεκριμένα, στην θέση Στενό διατίθενται ημερήσιες σταθμημετρικές παρατηρήσεις από το 1950 έως το 1974, αραιές μετρήσεις παροχής από το 1950 έως το 1956 και συστηματικές υδρομετρήσεις κατά την περίοδο από τον Αύγουστο του 1963 έως τον Οκτώβριο του 1968. Στην θέση Περιβόλι διατίθενται ημερήσιες παρατηρήσεις στάθμης από το 1964 έως το 1974, και συστηματικές υδρομετρήσεις κατά την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1963 έως τον Οκτώβριο του 1968. Στα πλαίσια προηγούμενου ερευνητικού έργου του ΕΜΠ έγινε αξιολόγηση και επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, με σκοπό την εξαγωγή των ημερήσιων δειγμάτων παροχής (Κουτσογιάννης και Τζεράνης, 1988· Μαμάσης και Τζεράνης, 1989). Επιπλέον, έγινε ενοποίηση των δειγμάτων και μεταφορά της παροχομετρικής πληροφορίας στην θέση του φράγματος Μόρνου (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1989).

Στα πλαίσια του παρόντος έργου, υλοποιήθηκε ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης του ποταμού Μόρνου, που τοποθετήθηκε στην παλαιά γέφυρα του δρόμου Λευκαδιτίου-Κονιάκου και ελέγχει περίπου το 70% των απορροών της λεκάνης ανάντη του φράγματος Μόρνου. Εξαιτίας της πολύ μικρής περιόδου λειτουργίας του εν λόγω υδρομετρικού σταθμού και της διενέργειας δύο μόλις πιλοτικών υδρομετρήσεων, δεν είναι ακόμα δυνατή η αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων.

Από την επεξεργασία των δεδομένων των υδρομετρικών σταθμών στις θέσεις Στενό και Περιβόλι προέκυψε ένα αξιόπιστο δείγμα μηνιαίας απορροής μήκους δέκα υδρολογικών ετών, που καλύπτει τις περιόδους 1951-52 έως 1955-56 και 1963-64 έως 1967-68. Πρόκειται για τις περιόδους κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν υδρομετρήσεις, οπότε ήταν δυνατή η εξαγωγή σχέσεων στάθμης-παροχής. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος συνοψίζονται στον Πίνακα 5.8. Από την έναρξη της λειτουργίας του ταμιευτήρα Μόρνου και έκτοτε, ήτοι από το υδρολογικό έτος 1979-80, η απορροή της υπολεκάνης ανάντη του φράγματος, έκτασης 588.1 km², εκτιμάται από την εξίσωση υδατικού ισοζυγίου σε μηνιαία βάση. Τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά συνοψίζονται στον Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.8: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Μόρνου στην θέση του φράγματος για τα υδρολογικά έτη 1951-52 έως 1955-56 και 1963-64 έως 1967-68 (hm³) – Η χρονοσειρά προέκυψε από επεξεργασία υδρομετρικών δεδομένων στις θέσεις Στενό και Περιβόλι.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	15.6	39.4	51.0	62.2	58.1	38.5	34.0	23.3	13.3	6.0	3.9	4.2	349.6
Τυπ. απόκλ.	19.0	30.0	27.5	42.4	33.6	16.7	12.6	12.6	7.1	4.2	1.9	2.0	89.8
Μέγιστο	2.2	4.8	6.3	22.7	20.5	10.7	16.0	9.7	4.6	1.5	1.7	0.4	200.0
Ελάχιστο	60.2	93.6	90.8	131.5	127.8	65.5	51.3	44.8	28.4	16.6	7.0	6.9	461.0

Πίνακας 5.9: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Μόρνου στην θέση του φράγματος για τα υδρολογικά έτη 1979-80 έως 2002-03 (hm³) – Η χρονοσειρά προέκυψε από επεξεργασία των δεδομένων υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρα.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	6.7	22.2	39.2	31.1	32.2	31.7	28.7	20.2	9.8	6.4	4.5	4.5	237.4
Τυπ. απόκλ.	5.8	15.5	26.7	21.3	18.4	15.4	8.6	8.0	3.7	2.8	3.2	3.1	82.9
Μέγιστο	23.2	63.1	104.0	78.0	74.3	67.1	45.3	34.9	16.3	11.3	11.2	11.8	418.6
Ελάχιστο	0.0	5.8	5.7	2.9	3.9	5.8	11.0	3.9	3.1	2.0	0.0	0.0	86.5

5.3.5 Απορροή λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού

Η λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού καταλαμβάνει συνολική έκταση 2042.6 km². Το κύριο υδατόρευμα αυτής, μαζί με ένα πλήθος δευτερευόντων κλάδων που συγκεντρώνουν τα νερά των μεγάλων καρστικών πηγών της περιοχής, τροφοδοτούν την λίμνη Υλίκη μέσω της Συγκεντρωτικής Διώρυγας Καρδίτσας και, στη συνέχεια, της Σήραγγας Καρδίτσας.

Ο σημαντικότερος υδρομετρικός σταθμός βρίσκεται στην Διώρυγα Καρδίτσας, ήτοι την έξοδο της λεκάνης, και ελέγχει το μεγαλύτερο ποσοστό (άνω του 90%) των επιφανειακών εισροών της Υλίκης. Ο εν λόγω σταθμός, όπου γίνεται καθημερινή καταγραφή της στάθμης νερού στην διώρυγα, ξεκίνησε να λειτουργεί από τις αρχές του 20ου αιώνα, λίγο μετά δηλαδή την ολοκλήρωση των έργων αποξήρανσης της Κωπαΐδας. Γενικά, στη μακρά περίοδο λειτουργίας του σταθμού υπήρξαν πολλές μεταβολές, τόσο στη διατομή της διώρυγας όσο και στη θέση και λειτουργία των διαφόρων σταθμημέτρων που είχαν κατά καιρούς τοποθετηθεί, κυρίως από τον Οργανισμό Κωπαΐδας. Οι τελευταίες επεμβάσεις χρονολογούνται στα τέλη του 1977, οπότε κατασκευάστηκε η λεγόμενη νέα διώρυγα. Έκτοτε, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται επί της Συγκεντρωτικής Διώρυγας, περί τα 800 m ανάντη της σήραγγας, όπου η ΕΥΔΑΠ εγκατέστησε νέο σταθμήμετρο. Η αναγωγή της στάθμης σε παροχή γίνεται μέσω πινακοποιημένων τιμών που βασίζονται στην εξίσωση ομοιόμορφης ροής του Manning. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο εκτίμησης των παροχών δίνονται στο Τεύχος 16.

Στα πλαίσια του παρόντος έργου, υλοποιήθηκε ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης της διώρυγας Καρδίτσας, το οποίο τοποθετήθηκε στη γέφυρα της επαρχιακής οδού που οδηγεί στο Ακραιφνίο και βρίσκεται ανάντη των υπαρχόντων σταθμημέτρων της ΕΥΔΑΠ (βλ. 4.2.3). Ωστόσο, η σύγκριση των μετρήσεων στάθμης των δύο σταθμών (συμβατικού και αυτόματου) δείχνει σημαντικές αποκλίσεις, ιδιαίτερα σε συγκεκριμένες περιοχές του πεδίου τιμών. Συνεπώς, δεν είναι ακόμα δυνατή η αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων.



Σχήμα 5.5: Θέσεις υδρομετρικών σταθμών του ΙΓΜΕ σε πηγές (κύκλοι) και υδατορεύματα (τρίγωνα) της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

Επισημαίνεται ότι στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού έχουν λειτουργήσει κατά το παρελθόν πολλοί ακόμη υδρομετρικοί σταθμοί, κυρίως στον άνω ρου του ποταμού. Στις αρχές του 1980, το ΙΓΜΕ εγκατέστησε ένα εκτεταμένο δίκτυο μέτρησης της παροχής κατά μήκος του Βοιωτικού Κηφισού και των κύριων παραποτάμων του, που τροφοδοτούνται από καρστικές πηγές ιδιαίτερα αξιόλογου

υδατικού δυναμικού (Σχήμα 5.5). Εκτεταμένη ανάλυση των παραπάνω δεδομένων γίνεται στο Τεύχος 21, στα πλαίσια αναλυτικής υδρολογικής μελέτης της λεκάνης.

Το δείγμα μηνιαίας απορροής στην έξοδο της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού για το σύνολο των υδρολογικών ετών από το 1907-08 έως το 1989-90 προέρχεται από συστηματική διερεύνηση και επεξεργασία των ημερήσιων δεδομένων στάθμης (Ρώτη κ.ά., 1990· Ρώτη και Ανυφαντή, 1992). Τα στοιχεία των τελευταίων ετών λαμβάνονται απευθείας από την ΕΥΔΑΠ, υπό μορφή χρονοσειράς ημερήσιων όγκων απορροής, και μετατρέπονται άμεσα σε μηνιαίους όγκους, που είναι και το χρονικό βήμα ενδιαφέροντος για τα μαθηματικά μοντέλα του ερευνητικού έργου. Στα πλαίσια της πρώτης φάσης του έργου, ενημερώθηκαν οι χρονοσειρές έως το υδρολογικό έτος 1999-00 (Ευστρατιάδης κ.ά., 2000), ενώ κατά την δεύτερη φάση έγινε νέα επικαιροποίηση για τρία ακόμη έτη, και το σύνολο των δεδομένων απορροής, σε ημερήσια και μηνιαία κλίμακα, καταχωρήθηκαν στην βάση δεδομένων.

Από τον Σεπτέμβριο του 1964 έως τον Νοέμβριο του 1967, οπότε δεν λειτούργησε η διάλυρα λόγω επισκευών, καθώς και από τον Οκτώβριο του 1976 έως τον Σεπτέμβριο του 1977, διάστημα κατά το οποίο κατασκευάστηκε η νέα διάλυρα, δεν υπάρχουν μετρήσεις στάθμης και, συνεπώς, δεν είναι δυνατή η εκτίμηση της παροχής. Τα κενά της χρονοσειράς μηνιαίας απορροής συμπληρώθηκαν με την μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, θεωρώντας ότι η απορροή τον κάθε μήνα είναι μια γραμμική συνάρτηση της σημειακής βροχόπτωσης στην Αλίαρτο και της απορροής του προηγούμενου μήνα.

Το τελικό δείγμα απορροής του Βοιωτικού Κηφισού καλύπτει μια περίοδο 96 πλήρων υδρολογικών ετών, από τον 1907-08 έως το 2002-03. Σημειώνεται ότι για λόγους που οφείλονται τόσο σε μια φαινόμενη τάση μείωσης των κατακρημισμάτων της λεκάνης όσο και στην κατασκευή σημαντικών υδροληπτικών έργων ανάντη, η απορροή του Βοιωτικού Κηφισού παρουσιάζει εμφανή πτωτική τάση. Για τον λόγο αυτό, μόνο η τελευταία τριακονταετία θεωρείται ότι μπορεί να δώσει ασφαλή εκτίμηση του μεγέθους των απορροών, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τη λήψη αποφάσεων σε σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης καθώς και την εκτίμηση των επιφανειακών εισροών της Υλίκης. Στον Πίνακα 5.10 δίνονται τα βασικά στατιστικά μεγέθη του πλήρους δείγματος απορροής, ενώ στον Πίνακα 5.11 δίνονται τα ίδια μεγέθη για την περίοδο 1970-71 έως 2002-03.

Πίνακας 5.10: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Βοιωτικού Κηφισού στην Διάλυρα Καρδίτσας για την περίοδο 1907-08 έως 2002-03 (hm³).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	21.4	30.7	46.1	59.5	62.4	66.8	46.5	24.2	11.9	4.1	3.5	12.8	386.5
Τυπ. απόκλ.	10.9	17.7	31.9	30.8	34.2	31.1	27.1	16.3	11.6	7.3	5.2	8.7	159.7
Μέγιστο	48.4	108.1	205.4	158.9	160.9	168.9	167.1	76.2	57.6	48.5	29.6	54.9	793.1
Ελάχιστο	0.0	6.5	9.0	14.9	3.5	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.5

Πίνακας 5.11: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Βοιωτικού Κηφισού στην Διάλυρα Καρδίτσας για την περίοδο 1970-71 έως 2002-03 (hm³).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	14.4	21.3	31.9	45.5	48.1	56.7	39.4	16.6	4.0	0.5	0.9	6.4	285.9
Τυπ. απόκλ.	10.7	10.4	13.5	25.6	27.6	28.2	24.9	15.4	5.6	1.1	2.0	7.0	125.5
Μέγιστο	42.1	49.7	60.9	115.0	125.0	111.0	88.3	55.0	22.6	4.2	8.1	23.1	527.5
Ελάχιστο	0.0	6.5	9.0	14.9	3.5	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.5

Επισημαίνεται ότι κατά τους θερινούς μήνες, και σε ορισμένες περιπτώσεις από την αρχή της αρδευτικής περιόδου, η κοίτη του Βοιωτικού Κηφισού και των λοιπών υδατορευμάτων που

συμβάλλουν στην Διώρυγα Καρδίτσας (με κυριότερο τον Μέλανα) φράσσονται μέσω πρόχειρων κατασκευών, και τα νερά τους διοχετεύονται στο αποστραγγιστικό δίκτυο της Κωπαΐδας ώστε να χρησιμοποιηθούν για αρδευτικούς σκοπούς.

5.3.6 Απορροή λεκάνης Υλίκης

Εκτός από τον Βοιωτικό Κηφισό, μικρό μέρος της επιφανειακής τροφοδοσίας της Υλίκης προέρχεται και από επιφανειακούς υδατικούς πόρους της τοπικής της λεκάνης, έκτασης 424.0 km². Στην λεκάνη της Υλίκης δεν υπάρχουν καθόλου μετρήσεις παροχής στα υδατορεύματα που τροφοδοτούν την λίμνη, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των απευθείας εισροών λόγω επιφανειακής απορροής. Ως εκ τούτου, η εκτίμηση των εν λόγω εισροών είναι αναγκαστικά χονδροειδής, καθώς βασίζεται αποκλειστικά σε παραδοχές και καθόλου σε μετρήσεις.

Με βάση ένα σύνολο εύλογων παραδοχών, η συνεισφορά της λεκάνης της Υλίκης εκτιμάται ως το 6% της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, σε μέση ετήσια χρονική κλίμακα. Χονδροειδώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι ακόμη και σε κλίμακα μήνα, η συνολική απορροή της Υλίκης προκύπτει με προσαύξηση κατά 6% την μετρημένης απορροής στην Διώρυγα Καρδίτσας. Η εν λόγω μεθοδολογία προτάθηκε από τους *Κουτσογιάννη και Ναλμπάντη* (1989) και ακολουθήθηκε έκτοτε σε όλες τις μελέτες που απαιτούν την κατάρτιση του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου της λίμνης (βλ. 5.5.5). Εκτενής διερεύνηση που έγινε στα πλαίσια του έργου επαληθεύει την παραπάνω άποψη (βλ. Τεύχος 21).

5.3.7 Απορροή λεκανών Χάραδρου και Σταμάτας

Ο χειμάρρος Χάραδρος καθώς και το μικρό ρέμα της Σταμάτας αποτελούν τους επιφανειακούς τροφοδότες του ταμιευτήρα Μαραθώνα. Η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής τους ανάντη του φράγματος ανέρχεται σε 118.0 km².

Στην λεκάνη δεν λειτούργησαν κατά το παρελθόν υδρομετρικοί σταθμοί. Στα πλαίσια του έργου, υλοποιήθηκε ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης του Χάραδρου, που τοποθετήθηκε σε απόσταση 500 μέτρων από το διωλιστήριο Κιούρκων (βλ. 4.2.3). Έως τώρα, δεν έχουν πραγματοποιηθεί υδρομετρήσεις, ώστε να είναι δυνατή η κατάρτιση σχέσεων στάθμης-παροχής.

Η μηνιαία απορροή του Μαραθώνα εκτιμάται μέσω επίλυσης της εξίσωσης υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα, από την έναρξη λειτουργίας του τον Φεβρουάριο του 1933. Ωστόσο, για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, και συγκεκριμένα μετά την ένταξη των έργων της Υλίκης στο σύστημα υδροδότησης της Αθήνας στα μέσα της δεκαετίας του 1950, η κατάρτιση του εν λόγω ισοζυγίου δεν ήταν δυνατή, καθώς δεν υπήρχε αντικειμενικός τρόπος εκτίμησης των ποσοτήτων νερού που προέρχονται από την Υλίκη. Η αδυναμία αυτή αποκαταστάθηκε μόλις τα τελευταία δύο έτη, οπότε τοποθετήθηκαν νέα παροχόμετρα τόσο κατά μήκος του υδραγωγείου Υλίκης όσο και στο υδραγωγείο Μπογιατίου. Ωστόσο, οι μετρήσεις ακόμη δεν θεωρούνται αξιόπιστες (*Νασίκας*, 2003, προσωπική επικοινωνία).

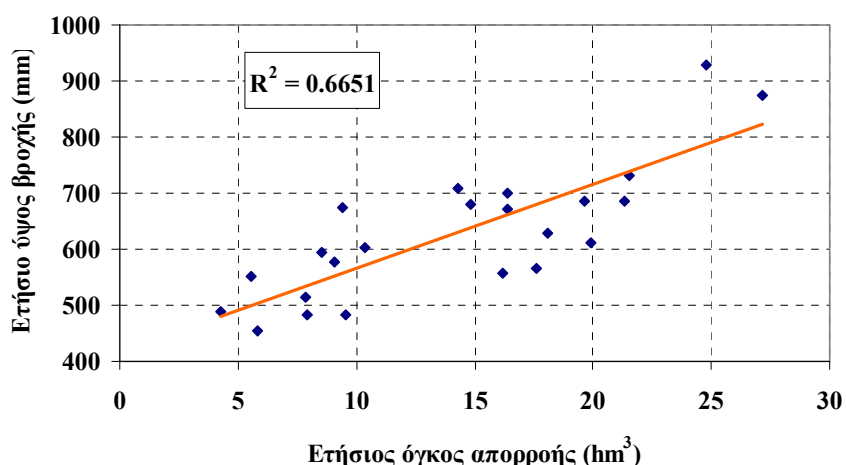
Τα βασικά στατιστικά μεγέθη της μηνιαίας απορροής του Μαραθώνα, όπως αυτή προκύπτει από το μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα των υδρολογικών ετών 1932-33 έως 1957-58 συνοψίζονται στον Πίνακα 5.12. Έκτοτε, η εκτίμηση της απορροής γίνεται μέσω γραμμικής συσχέτισης με την μηνιαία βροχόπτωση του σταθμού του φράγματος. Οι παράμετροι των μηνιαίων μοντέλων παλινδρόμησης δίνονται στον Πίνακα 5.13. Γενικά, η προσαρμογή του μοντέλου θεωρείται από κακή (π.χ. τον μήνα Μάιο) έως σχετικά ικανοποιητική. Σε ετήσια βάση, ο συντελεστής προσδιορισμού ανέρχεται στο 0.665 (Σχήμα 5.6).

Πίνακας 5.12: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Μαραθώνα για την περίοδο 1932-33 έως 1957-58 (hm^3) – Επεξεργασία δεδομένων υδατικού ισοζυγίου ταμειυτήρα.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	0.5	0.7	1.5	2.9	3.1	2.5	1.2	0.6	0.4	0.2	0.2	0.2	14.2
Τυπ. απόκλ.	0.6	1.0	1.3	2.4	2.4	2.0	0.9	0.3	0.4	0.1	0.2	0.2	6.5
Μέγιστο	2.3	4.5	4.2	9.2	10.6	9.7	5.0	1.3	2.3	0.4	1.1	0.8	27.1
Ελάχιστο	0.0	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3

Πίνακας 5.13: Παράμετροι γραμμικής συσχέτισης για την εκτίμηση της μηνιαίας απορροής του Μαραθώνα συναρτήσει της μετρημένης βροχόπτωσης στον σταθμό του φράγματος.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
Κλίση	0.009	0.016	0.015	0.044	0.041	0.041	0.020	0.001	0.012	0.005	0.011	0.006
Τομή	-0.1	-0.5	-0.2	-1.7	-0.0	0.1	0.6	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
Συντ. προσδ.	0.694	0.408	0.473	0.723	0.632	0.548	0.466	0.004	0.794	0.325	0.792	0.508



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα διασποράς ετήσιας απορροής ταμειυτήρα Μαραθώνα συναρτήσει της ετήσιας βροχόπτωσης στον σταθμό του φράγματος (υδρολογικά έτη 1932-33 έως 1957-58).

5.3.8 Εκτίμηση επιφανειακού υδατικού δυναμικού του υδροσυστήματος

Στον Πίνακα 5.14 συνοψίζονται οι μέσες ετήσιες εισροές από επιφανειακή απορροή των τεσσάρων ταμειυτήρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, όπως προκύπτουν βάσει της ανάλυσης του παρόντος κεφαλαίου. Ειδικότερα, η απορροή της Υλίκης εκτιμάται με προσαύξηση κατά 6% της μετρημένης απορροής στην Διώρυγα Καρδίτσας. Σημειώνεται ότι το σχετικό δείγμα, βάσει του οποίου προκύπτει η μέση ετήσια τιμή, αναφέρεται στην περίοδο από το 1970-71 και έπειτα, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό της υφιστάμενης διαίτας της λεκάνης. Με την παραδοχή αυτή, το μέσο ετήσιο επιφανειακό υδατικό δυναμικό του συστήματος ανέρχεται σε 820 hm^3 .

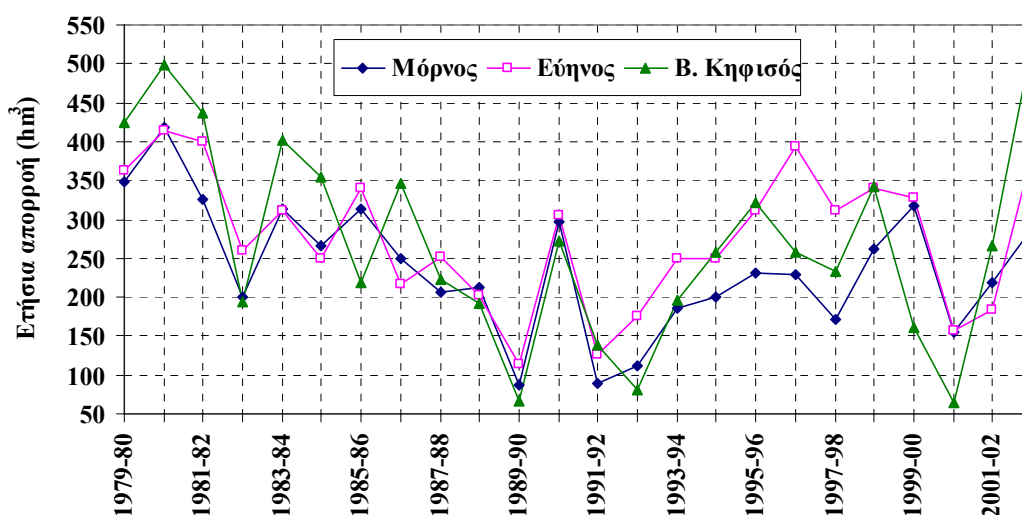
Οι αναλυτικοί πίνακες των χρονοσειρών απορροής των τεσσάρων ταμειυτήρων παρατίθενται στο Παράρτημα Γ του τεύχους 17. Στο Σχήμα 5.7 απεικονίζονται οι απορροές των λεκανών Μόρνου, Ευήνου και Βοιωτικού Κηφισού για τα υδρολογικά έτη 1979-80 έως 2002-03, για τα οποία υπάρχει κοινό ιστορικό δείγμα. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι το δυναμικό των λεκανών αλλά και η διαίτα των απορροών είναι, σε γενικές γραμμές, παρόμοια. Μετά από μια σταθερά πτωτική τάση των απορροών κατά την δεκαετία του 1980, η οποία είχε ως αποκορύφωμα την έμμονη ξηρασία της περιόδου 1988-1994 που οδήγησε το σύστημα στα όρια της ασφαλούς λειτουργίας του, παρατηρήθηκε σταθερή ανάκαμψη έως τα τέλη μέσα της δεκαετίας του 1990. Ακολούθως προέκυψε

μια νέα περίοδος εξαιρετικά χαμηλής υδροφορίας, που παρά και την ένταξη των έργων του Ευήνου στο σύστημα δημιούργησε την ανάγκη λήψης έκτακτων μέτρων, με ενεργοποίηση των εφεδρικών υδατικών πόρων (Υλίκη και γεωτρήσεις). Ωστόσο, τα τελευταία δύο υδρολογικά έτη παρατηρείται μια θεαματική ανάκαμψη, ιδιαίτερα στο ανατολικό σύστημα Υλίκης-Μαραθώνα, που κατά το τρέχον υδρολογικό έτος οδήγησε πολύ γρήγορα το σύστημα των ταμιευτήρων σε ιστορικό ρεκόρ αποθεμάτων.

Πίνακας 5.14: Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκανών απορροής υδροσυστήματος.

Λεκάνη απορροής	Έκταση (km ²)	Μέση ετήσια απορροή (hm ³)
Μόρνου (ανάτη φράγματος)	588.1	237.4
Ευήνου (ανάτη φράγματος)	351.9	281.1
Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης ⁽¹⁾	2466.6	285.9
Χάραδρου (ανάτη φράγματος)	118.0	14.4
ΣΥΝΟΛΟ	3524.6	818.8

(1) Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού έχει έκταση 2042.6 km², ενώ η λεκάνη της Υλίκης 424 km².



Σχήμα 5.7: Διακύμανση ετήσιας απορροής λεκανών Μόρνου, Ευήνου και Βοιωτικού Κηφισού.

5.4 Εκτίμηση απωλειών ταμιευτήρων λόγω εξάτμισης

5.4.1 Γενικά - Μεθοδολογία υπολογισμού εξάτμισης

Η παραγωγή μηνιαίων χρονοσειρών εξάτμισης των ταμιευτήρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας είναι απαραίτητη για την κατάρτιση των υδατικών τους ισοζυγίων.

Η φυσική εξάτμιση είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί με αξιόπιστο τρόπο. Το σύνηθες όργανο μέτρησης είναι το εξατμισόμετρο. Η διαφορά κλίμακας ως προς την έκταση και τον όγκο νερού της λεκάνης του εξατμισίμετρου σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη ενός ταμιευτήρα έχουν ως αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της πραγματικής τιμής της εξάτμισης. Επιπλέον, συχνά παρατηρούνται προβλήματα που σχετίζονται με την τοποθέτηση, επιτήρηση, συντήρηση και ασφάλεια του οργάνου, τα οποία το καθιστούν εντελώς αναξιόπιστο. Κατά συνέπεια, είναι προτιμότερος ο έμμεσος τρόπος εκτίμησης της εξάτμισης, με βάση μετρήσεις άλλων μετεωρολογικών μεταβλητών που την επηρεάζουν. Από τις ποικίλες μεθοδολογίες που απαντώνται στη βιβλιογραφία, η μέθοδος του Penman θεωρείται παγκοσμίως ως η πλέον τεκμηριωμένη και είναι αυτή η οποία εφαρμόστηκε για

την εκτίμηση των εξατμίσεων από τους τέσσερις ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Η μέθοδος αυτή, που βασίζεται στην περιγραφή των φυσικών μηχανισμών του φαινομένου, περιγράφεται συνοπτικά στο Τεύχος 17, ενώ για περισσότερες λεπτομέρειες παραπέμπουμε στους *Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλο* (1999, σ. 165-232).

Η ανάγκη ύπαρξης ταυτόχρονων μετρήσεων θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου που απαιτεί η μέθοδος Penman, περιορίζει το εύρος εφαρμογής της. Συχνά, παρατηρείται έλλειψη δεδομένων, με εξαίρεση της θερμοκρασίας που είναι η ευκολότερα μετρούμενη μετεωρολογική μεταβλητή. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί τρόποι εκτίμησης της εξάτμισης συναρτήσει μόνο της θερμοκρασίας, που χρησιμοποιήθηκαν για την επέκταση των δειγμάτων και την συμπλήρωση των ελλείψεων.

Η εξάτμιση, εξαρτάται από τρεις θεμελιώδεις παράγοντες:

- τη φυσική διαθεσιμότητα του νερού σε υγρή φάση·
- τη διαθεσιμότητα ενέργειας στην επιφάνεια του νερού για την πραγματοποίηση της εξάτμισης·
- την ευκολία με την οποία διαχέονται οι υδρατμοί στην ατμόσφαιρα.

Η μέθοδος που ανέπτυξε ο *Penman* (1948) συνδυάζει την εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια της γης με τις εξισώσεις διάχυσης των υδρατμών και αισθητής θερμότητας, και καταλήγει στη σχέση υπολογισμού του ύψους εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια, η οποία απαιτεί τα ακόλουθα δεδομένα εισόδου:

- το γεωγραφικό πλάτος αναφοράς, φ (σε rad)·
- ο δείκτης της ημέρας του έτους, J ·
- το υψόμετρο z (σε m)·
- η μέση θερμοκρασία του αέρα, T (σε °C)·
- η μέση σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, U (%)·
- οι ώρες ηλιοφάνειας, n ·
- η μέση ταχύτητα του ανέμου, u (σε m/s), μετρημένη σε ύψος 2 m από το έδαφος.

Ένα συχνό πρόβλημα που προκύπτει κατά την εφαρμογή της μεθόδου Penman είναι το γεγονός ότι τα απαιτούμενα μετεωρολογικά δεδομένα, πλην της θερμοκρασίας, διατίθενται μόνο για μικρά χρονικά διαστήματα. Συνεπώς, το δείγμα εξάτμισης μήκους ίσου με την περίοδο κοινών παρατηρήσεων των τεσσάρων μετεωρολογικών μεταβλητών είναι γενικά μικρό. Είναι ωστόσο δυνατό, χρησιμοποιώντας το κατά κανόνα πολύ μεγαλύτερο δείγμα της θερμοκρασίας, να γίνει συμπλήρωση ή επέκταση του αντίστοιχου δείγματος εξάτμισης, βάσει δύο εμπειρικών μεθόδων.

Η πρώτη μέθοδος συνίσταται στην κατασκευή του λεγόμενου *βρόχου εξάτμισης*, ήτοι του διαγράμματος εξάτμισης-θερμοκρασίας σε μέση μηνιαία κλίμακα. Η εκτίμηση της εξάτμισης γίνεται συναρτήσει μόνο της θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας τον άνω κλάδο του βρόχου για τους εαρινούς και τον κάτω για τους φθινοπωρινούς μήνες.

Μια ακριβέστερη μέθοδος βασίζεται στην εφαρμογή μια παραμετρική σχέσης της εξάτμισης και της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας αέρα.

5.4.2 Χρονοσειρές εξάτμισης ταμιευτήρων

Η ανάγκη ύπαρξης ταυτόχρονων μετρήσεων θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου, καθιστούσε μέχρι πρόσφατα προβληματική την εφαρμογή της μεθόδου Penman για την εκτίμηση της επιφανειακής εξάτμισης των ταμιευτήρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Κατά την πρώτη φάση του έργου, αναζητήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από σταθμούς που βρίσκονταν έστω και σε μεγάλη απόσταση από τους ταμιευτήρες, με αποτέλεσμα την κατάρτιση δειγμάτων εξάτμισης κατά Penman, μειωμένης σχετικά αξιοπιστίας (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2000). Τα

δείγματα αυτά συμπληρώθηκαν και επεκτάθηκαν, όσο ήταν δυνατό, με εφαρμογή των εμπειρικών μεθόδων που περιγράφονται στο Τεύχος 17.

Μετά την εγκατάσταση των αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών στην περιοχή όλων των ταμιευτήρων πλην του Ευήνου, είναι πλέον δυνατή η εκτίμηση της εξάτμισης με μεγάλη ακρίβεια, και μάλιστα όχι μόνο σε μηνιαία αλλά και σε ημερήσια βάση. Οι υπολογισμοί γίνονται αυτόματα, μέσω του προγράμματος *Υδρογνώμων*. Αν και οι νέες χρονοσειρές θεωρούνται πολύ πιο αξιόπιστες, τα παλιά δείγματα χρησιμοποιούνται για την κατάρτιση των μηνιαίων υδατικών ισοζυγίων των ταμιευτήρων, ενώ όπου υπάρχουν ελλείψεις χρησιμοποιούνται οι μέσες μηνιαίες τιμές. Στην συνέχεια περιγράφονται οι διαδικασίες υπολογισμού των χρονοσειρών εξάτμισης.

Για την εφαρμογή της μεθόδου Penman πριν την έναρξη λειτουργίας των αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών των ταμιευτήρων, αναζητήθηκαν μηνιαία δεδομένα μέσης θερμοκρασίας αέρα, μέσης σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνειας και μέσης ταχύτητας ανέμου από μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής μελέτης, τα χαρακτηριστικά των οποίων συνοψίζονται στον Πίνακα 5.15

Πίνακας 5.15: Μετεωρολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν για εκτιμήσεις εξάτμισης.

Όνομασία σταθμού	Λεκάνη απορροής	Μεταβλητές	Περίοδος μετρήσεων
Αγρίνιο	Αχελώου	Θερμοκρασία	10/1961 – 12/1990
		Σχετική υγρασία	10/1961 – 12/1990
		Ηλιοφάνεια	8/1979 – 6/1988
		Ταχύτητα ανέμου	1/1956 – 12/1990
Αλιάρτος	Βοιωτικού Κηφισού	Θερμοκρασία	1/1977 – 6/1997
		Σχετική υγρασία	1/1977 – 6/1992
		Ηλιοφάνεια	1/1977 – 6/1993
		Ταχύτητα ανέμου	1/1970 – 12/1987
Αεροδρόμιο Τατοίου	Αττικού Κηφισού	Θερμοκρασία	2/1951 – 12/1997
		Σχετική υγρασία	1/1956 – 12/1997
		Ταχύτητα ανέμου	1/1956 – 12/1997
Αράχοβα	Ευήνου	Θερμοκρασία	10/1977 – 4/1986
Γραμμένη Οξιά	Ευήνου	Θερμοκρασία	6/1971 – 9/1987
Δρυμόνας	Ευήνου	Θερμοκρασία	1/1974 – 9/1994
Λαμία	Σπερχειού	Θερμοκρασία	10/1962 – 12/1990
		Σχετική υγρασία	10/1962 – 12/1990
		Ηλιοφάνεια	1/1977 – 6/1993
		Ταχύτητα ανέμου	1/1977 – 6/1993
Λιδορίκι	Μόρνου	Θερμοκρασία	10/1970 – 6/1995
		Σχετική υγρασία	1/1977 – 6/1992
Νέα Φιλαδέλφεια	Αττικού Κηφισού	Ηλιοφάνεια	1/1977 – 12/1998
Πόρος Ρηγανίου	Ευήνου	Θερμοκρασία	11/1977 – 8/1982

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μηνιαίας εξάτμισης κάθε ταμιευτήρα είναι:

Ταμιευτήρας Ευήνου

- Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στον σταθμό Δρυμόνα (1974-94)·
- Μέσες μηνιαίες σχετικές υγρασίες στον σταθμό Λιδορικού (1977-92)·
- Μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας στον σταθμό Λαμίας (1977-93)·
- Μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου στον σταθμό Αλιάρτου (1977-87)·

Ταμιευτήρας Μόρνου

- Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στον σταθμό Λιδορικού (1970-95)·
- Μέσες μηνιαίες σχετικές υγρασίες στον σταθμό Λιδορικού (1977-92)·
- Μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας στον σταθμό Λαμίας (1977-93)·
- Μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου στον σταθμό Αλιάρτου (1977-87)·

Λίμνη Υλίκη

- Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στον σταθμό Αλιάρτου (1977-97)·
- Μέσες μηνιαίες σχετικές υγρασίες στον σταθμό Αλιάρτου (1977-92)·
- Μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας στον σταθμό Αλιάρτου (1977-93)·
- Μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου στον σταθμό Αλιάρτου (1977-87)·

Ταμιευτήρας Μαραθώνα

- Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στον σταθμό Τατοΐου (1951-97)·
- Μέσες μηνιαίες σχετικές υγρασίες στον σταθμό Τατοΐου (1956-97)·
- Μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας στον σταθμό Νέας Φιλαδέλφειας (1977-98)·
- Μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου στον σταθμό Τατοΐου (1956-97)·

Εντός παρενθέσεως αναγράφεται η περίοδος παρατηρήσεων κάθε χρονοσειράς.

Οι χρονοσειρές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας διορθώθηκαν ώστε να αντιστοιχούν στην μέση στάθμη του αντίστοιχου ταμιευτήρα. Η αναγωγή έγινε με βάση τη μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα στη μέση στάθμη του ταμιευτήρα, τη μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα του σταθμού αναφοράς και τη μέση μηνιαία *θερμοβαθμίδα*.

Στα πρωτογενή δείγματα μέσης μηνιαίας σχετικής υγρασίας και ωρών ηλιοφάνειας κάθε μήνα δεν απαιτήθηκε καμία προσαρμογή.

Τέλος, στα πρωτογενή δείγματα μέσης μηνιαίας ταχύτητας ανέμου απαιτήθηκε αναγωγή μόνο για τον έναν από τους δύο σταθμούς, και συγκεκριμένα το Τατόι. Αυτό έγινε επειδή το ανεμόμετρο είναι τοποθετημένο στα 11.2 m, αρκετά ψηλότερα δηλαδή από το υψόμετρο αναφοράς των 2 m.

Η μέθοδος Penman εφαρμόστηκε μόνο για τις περιόδους ταυτόχρονης διαθεσιμότητας των απαιτούμενων μετεωρολογικών μεταβλητών. Δεδομένου ότι τα πρωτογενή δεδομένα ελήφθησαν από σταθμούς που απέχουν σημαντικά από τους ταμιευτήρες (σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα χρησιμοποιήθηκαν κοινά πρωτογενή δείγματα), οι χρονοσειρές που προέκυψαν θεωρούνται σχετικά μειωμένης αξιοπιστίας.

Στον Πίνακα 5.16 δίνονται, για τους τέσσερις ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, οι μέσες τιμές των χρονοσειρών εξάτμισης, σε μηνιαία και ετήσια κλίμακα. Όπως είναι αναμενόμενο, οι απώλειες εξάτμισης αυξάνονται μεταβαίνοντας προς χαμηλότερα υψόμετρα, ήτοι από τον Εύηνο προς την Υλίκη, δεδομένου ότι αυξάνει η μέση θερμοκρασία.

Πίνακας 5.16: Μέσες τιμές ύψους εξάτμισης ταμιευτήρων (mm) – Εκτίμηση κατά Penman.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Εύηνος	66.2	31.7	22.6	26.7	38.0	70.1	107.3	145.7	190.6	212.3	174.7	123.2	1184.5
Μόρνος	67.3	32.9	23.5	27.1	39.6	71.2	110.7	154.9	195.6	215.5	185.7	126.7	1232.1
Υλίκη	70.2	35.7	27.2	31.2	42.2	73.6	118.1	168.0	214.0	227.5	196.2	132.6	1326.0
Μαραθώνας	72.1	35.7	25.9	31.2	43.8	80.5	119.1	176.7	203.7	221.4	191.7	131.2	1340.3

Για την συμπλήρωση και επέκταση των χρονοσειρών εξάτμισης που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Penman με βάση τα δείγματα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, εφαρμόστηκαν και συγκρίθηκαν οι εμπειρικές μεθοδολογίες του βρόχου εξάτμισης και της παραμετρικής σχέσης.

Πρόεκυψαν χρονοσειρές εξάτμισης σημαντικά μεγαλύτερου μήκους, και συγκεκριμένα:

- για τον ταμιευτήρα Ευήνου από τον Ιανουάριο του 1974 έως τον Σεπτέμβριο του 1994·
- για τον ταμιευτήρα Μόρνου από τον Οκτώβριο του 1970 έως τον Ιούνιο του 1995·
- για την λίμνη Υλίκη από τον Ιανουάριο του 1977 έως τον Δεκέμβριο του 1997·
- για τον ταμιευτήρα Μαραθώνα από τον Φεβρουάριο του 1951 έως τον Δεκέμβριο του 1997.

Από τα μέσα του 2002, τέθηκαν σε λειτουργία τρεις αυτόματοι μετεωρολογικοί σταθμοί, στην γειτονιά των ταμιευτήρων Μόρνου, Υλίκης και Μαραθώνα (βλ. 4.2.1). Οι εν λόγω σταθμοί καταγράφουν μια πληθώρα μετεωρολογικών παραμέτρων, και οι μετρήσεις τους καταχωρούνται στην κεντρική βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του έργου. Τα εν λόγω δεδομένα, μετά από στοιχειώδη επεξεργασία (συνάθροιση) μετατρέπονται στην χρονική κλίμακα που ενδιαφέρει, και που στην προκειμένη περίπτωση, είναι η μηνιαία.

Η μηνιαία μετεωρολογική πληροφορία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της εξάτμισης, με εφαρμογή της μεθόδου Penman. Σε αντίθεση με την έως τώρα προσέγγιση, ο υπολογισμός γίνεται με μεγάλη ακρίβεια, αφού όλες οι μεταβλητές (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ώρες ηλιοφάνειας, ταχύτητα ανέμου) μετρώνται στην θέση ενδιαφέροντος, και δεν προκύπτουν με μεταφορά δειγμάτων από σχετικά κοντινές έως και πολύ απομακρυσμένες θέσεις. Επισημαίνεται ότι για τους ταμιευτήρες Μόρνου και Υλίκης, οι τιμές που υπολογίστηκαν κατά το υδρολογικό έτος 2002-03 βρίσκονται κοντά στις αντίστοιχες μέσες μηνιαίες των παλαιών δειγμάτων. Το γεγονός αυτό συνιστά ένδειξη της αξιοπιστίας της έως τώρα προσέγγισης. Από την άλλη πλευρά, οι αντίστοιχες εκτιμήσεις για τον ταμιευτήρα Μαραθώνα βρίσκονται στο κάτω όριο των τιμών του δείγματος. Γενικά, θα ήταν σκόπιμη η αξιολόγηση των δύο προσεγγίσεων, με σύγκριση των τιμών εξάτμισης που υπολογίζονται με την παλιά και τη νέα μέθοδο. Αυτό βεβαίως θα μπορεί να γίνει μετά από εύλογο χρονικό διάστημα λειτουργίας του μετρητικού δικτύου (π.χ. σε ορίζοντα πέντε ετών), ώστε να υπάρχει ένα δείγμα ικανοποιητικού μεγέθους.

Οι χρονοσειρές εξάτμισης που τελικά χρησιμοποιούνται για την κατάρτιση των μηνιαίων υδατικών ισοζυγίων των ταμιευτήρων προκύπτουν με ενοποίηση δύο δειγμάτων, ήτοι:

- του «παλαιού» δείγματος εξάτμισης που υπολογίζεται με την μέθοδο Penman και με βάση στοιχεία που προέρχονται από τους παλαιότερους σταθμούς
- του «νέου» δείγματος εξάτμισης που επίσης υπολογίζεται με την μέθοδο Penman, αλλά με βάση τα στοιχεία των αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών των ταμιευτήρων (ισχύει μόνο για τους ταμιευτήρες Μόρνου, Υλίκης και Μαραθώνα).

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ενοποιημένου δείγματος για κάθε έναν από τους τέσσερις ταμιευτήρες δίνονται στους Πίνακες 5.17 ως 5.20.

Πίνακας 5.17: Βασικά στατιστικά μεγέθη ενοποιημένου δείγματος εξάτμισης Ευήνου για την περίοδο 1973-74 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	66.6	33.0	22.3	26.6	39.4	72.4	109.7	151.3	179.2	209.3	179.8	116.6	1213.0
Τυπ. απόκλ.	3.4	1.6	1.5	3.2	3.7	10.0	13.3	13.1	14.4	18.8	15.9	11.3	37.7
Μέγιστο	72.2	35.8	25.1	33.0	46.4	91.3	134.2	173.6	205.2	235.8	208.1	138.7	1260.0
Ελάχιστο	60.3	30.7	19.8	21.0	32.6	56.9	85.4	132.0	156.5	182.5	161.1	103.2	1146.9

Πίνακας 5.18: Βασικά στατιστικά μεγέθη ενοποιημένου δείγματος εξάτμισης Μόρνου για την περίοδο 1970-71 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	68.7	34.0	23.7	27.8	40.4	74.2	109.8	156.4	196.2	217.3	186.9	123.2	1259.6
Τυπ. απόκλ.	4.5	2.6	2.0	3.1	3.0	7.5	10.9	11.7	10.9	16.4	14.0	9.9	51.7
Μέγιστο	76.5	40.6	29.6	35.2	47.7	86.6	134.2	176.3	211.3	267.9	213.3	140.0	1392.3
Ελάχιστο	60.3	27.2	19.8	21.0	32.6	56.9	85.4	131.2	172.4	192.4	161.5	95.2	1162.5

Πίνακας 5.19: Βασικά στατιστικά μεγέθη ενοποιημένου δείγματος εξάτμισης Υλίκης για την περίοδο 1976-77 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	73.7	37.6	25.7	29.7	43.2	78.4	115.6	169.6	217.1	232.3	194.8	126.6	1343.2
Τυπ. απόκλ.	5.1	1.7	1.2	1.3	3.1	4.0	7.3	9.2	9.0	11.2	10.9	8.5	30.5
Μέγιστο	84.8	40.3	28.2	32.2	48.6	83.8	128.0	183.5	233.9	261.9	213.2	145.3	1406.5
Ελάχιστο	64.9	34.9	22.9	27.3	32.5	68.8	96.1	155.4	194.8	219.0	165.2	102.0	1277.6

Πίνακας 5.20: Βασικά στατιστικά μεγέθη ενοποιημένου δείγματος εξάτμισης Μαραθώνα για την περίοδο 1950-51 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	70.4	37.3	27.2	32.5	46.5	85.3	126.4	182.1	209.2	217.8	176.9	116.1	1328.4
Τυπ. απόκλ.	5.6	3.8	2.4	3.3	4.8	8.4	13.4	13.6	12.8	15.2	18.2	14.9	58.4
Μέγιστο	89.5	49.0	33.3	41.1	52.1	96.0	147.4	200.9	229.0	252.7	227.5	163.3	1432.8
Ελάχιστο	61.1	27.6	20.1	21.8	26.9	58.5	81.0	140.0	159.9	185.1	152.6	96.6	1152.6

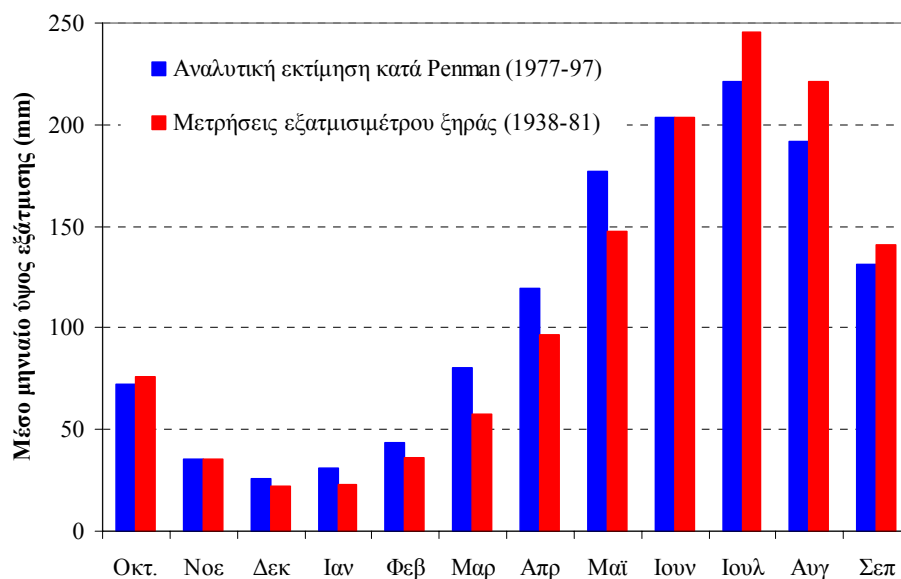
Σχετικά με τον ταμιευτήρα Μαραθώνα, στο έντυπο της ΕΥΔΑΠ με κωδικό Ε15 και τίτλο "Παρατηρήσεις εξατμίσεως εις λίμνην Μαραθώνος", αναγράφονται οι μηνιαίες τιμές των υψών εξάτμισης τριών εξατμισίμετρων, που αναφέρονται ως "πλωτόν εξατμισίμετρον", "εξατμισίμετρον ξηράς παρά γραφείου" και "εξατμισίμετρον ξηράς εις όχθην λίμνης" τα οποία λειτούργησαν κατά την περίοδο 1931-38, ενώ έκτοτε μόνο το "εξατμισίμετρον ξηράς παρά γραφείου" συνέχισε να λειτουργεί. Βάσει των στοιχείων του εντύπου, η πραγματική εξάτμιση της λίμνης υπολογιζόταν με αναγωγή των μετρήσεων του εξατμισίμετρου ξηράς. Οι συντελεστές αναγωγής, οι οποίοι παρατίθενται στον Πίνακα 5.21, προήλθαν από γραμμική συσχέτιση της εξάτμισης του πλωτού εξατμισίμετρου, το οποίο καταργήθηκε το 1938, με την εξάτμιση του εξατμισίμετρου ξηράς για την περίοδο 1931-38.

Πίνακας 5.21: Συντελεστές αναγωγής των μετρήσεων εξατμισίμετρου για τον υπολογισμό της πραγματικής εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα Μαραθώνα.

Μήνας	Συντελεστής αναγωγής	Μήνας	Συντελεστής αναγωγής
Ιανουάριος	1.067	Ιούλιος	0.626
Φεβρουάριος	0.662	Αύγουστος	0.708
Μάρτιος	0.629	Σεπτέμβριος	0.85
Απρίλιος	0.487	Οκτώβριος	0.855
Μάιος	0.468	Νοέμβριος	1.335
Ιούνιος	0.566	Δεκέμβριος	1.481

Λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις προηγούμενης μελέτης (Ρώτη κ.ά., 1990), κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν και επί τόπου επισκέψεις στον σταθμό, και με βάση επιπλέον αναλύσεις, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όπως προέκυψε από τις επί τόπου επισκέψεις, τις ημέρες που έβρεχε διαπιστώθηκε είτε ότι υπήρχε ασυμβατότητα των δεδομένων του βροχόμετρου και του εξατμισόμετρου είτε ότι δεν γινόταν σωστή αφαίρεση της βροχής από την εξάτμιση, αφού η εξάτμιση λαμβανόταν είτε ίση με μηδέν είτε ίση με την ένδειξη του οργάνου.
- Κατά το μεγαλύτερο διάστημα λειτουργίας του, ο σταθμός ήταν απροστάτευτος, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται το δοχείο του εξατμισόμετρου ως πηγή πόσιμου νερού για σκυλιά, πουλιά και άλλα ζώα.
- Οι εξατμίσεις του εξατμισόμετρου ξηράς μετατρέπονταν σε πραγματικές βάσει των συντελεστών αναγωγής της λίμνης Μαραθώνα της περιόδου 1931-38, κατά την οποία λειτούργησε το πλωτό εξατμισόμετρο στη λίμνη. Αν και είναι αδύνατη η εκτίμηση της αξιοπιστίας του συγκεκριμένου οργάνου, έχει αποδειχθεί ότι γενικά τα πλωτά εξατμισόμετρα παρουσιάζουν προβλήματα αξιοπιστίας, κυρίως λόγω της εναλλαγής του νερού τους με αυτό της λίμνης, υπό μορφή σταγονιδίων. Κατά συνέπεια είναι αμφισβητήσιμη η αξιοπιστία των συντελεστών εξατμισόμετρου, κάτι που ενισχύεται από το γεγονός ότι το εξατμισόμετρο ξηράς έχει αλλάξει θέση αρκετές φορές από το 1938.
- Παρόλα αυτά, συγκρίνοντας τις μέσες μηνιαίες των πρωτογενών τιμών του εξατμισόμετρου με τις τιμές που προέκυψαν με την αναλυτική μέθοδο Penman, και που θεωρούνται ακριβείς, προκύπτει ότι οι μετρήσεις του εξατμισόμετρου προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά την πραγματικότητα (βλ. Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.8: Σύγκριση μέσων μηνιαίων υψών εξάτμισης στον ταμιευτήρα Μαραθώνα με βάση τον αναλυτικό υπολογισμό κατά Penman και το δείγμα του εξατμισόμετρου

5.5 Υδατικά ισοζύγια ταμιευτήρων

5.5.1 Σκοπός

Ο κύριος σκοπός της κατάρτισης υδατικών ισοζυγίων των ταμιευτήρων είναι η παρακολούθηση της πορείας των αποθεμάτων και των λοιπών συνιστωσών του, όπως των φυσικών εισροών, που απαιτούνται για την επιχειρησιακή διαχείριση του συστήματος και την λήψη αποφάσεων. Η κατάρτιση των ισοζυγίων εξυπηρετεί και πρακτικούς λόγους. Εφόσον διατίθενται μετρήσεις ή εκτιμήσεις ως προς όλους πλην ενός όρους, είναι δυνατή η εκτίμησή του με επίλυση της εξίσωσης ισοζυγίου ως προς την άγνωστη συνιστώσα του. Συγκεκριμένα, για τους ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, η άγνωστη συνιστώσα ισοζυγίου αναφέρεται στην απορροή της ανάντη λεκάνης (ταμιευτήρες Ευήνου, Μόρνου και Μαραθώνα), και ειδικά όσον αφορά την Υλίκη στις απώλειές της λόγω υπόγειων διαφυγών, που είναι εξαιρετικά σημαντικές λόγω του διαπερατού υποβάθρου του πυθμένα και των τοιχωμάτων της λίμνης.

Οι τυπικές συνιστώσες ισοζυγίου ενός φυσικού ή τεχνητού ταμιευτήρα είναι η απορροή της ανάντη λεκάνης, η βροχόπτωση και οι απώλειες εξάτμισης, υπόγειων διαφυγών και υπερχειλίσης. Κατά κανόνα, η απορροή είναι η άγνωστη συνιστώσα του ισοζυγίου, ως προς την οποία επιλύεται η εξίσωση του ισοζυγίου. Η βροχόπτωση και η εξάτμιση υπολογίζονται με βάση το αντίστοιχο ισοδύναμο ύψος νερού, το οποίο είτε μετριέται απευθείας (ύψος βροχόπτωσης) είτε εκτιμάται συναρτήσει άλλων στοιχείων (ύψος εξάτμισης), πολλαπλασιασμένο επί την μέση επιφάνεια του ταμιευτήρα κατά το χρονικό βήμα αναφοράς.

Υπόγειες διαφυγές είναι οι πάσης φύσεως απώλειες νερού μέσω του πυθμένα, των τοιχωμάτων του ταμιευτήρα και του φράγματος. Η απευθείας μέτρηση των απωλειών είναι, προφανώς, αδύνατη. Για τον λόγο αυτό, οι διαφυγές εκτιμώνται μέσω εμπειρικών σχέσεων, συναρτήσει της μέσης στάθμης του ταμιευτήρα. Τέλος, η υπερχειλίση αναφέρεται σε μη ελεγχόμενες εκροές νερού, που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια εξαιρετικών πλημμυρικών επεισοδίων. Εφόσον πρόκειται για τεχνητό ταμιευτήρα, η υπερχειλίση διοχετεύεται μέσω του υπερχειλιστή του φράγματος, και μπορεί να εκτιμηθεί εφόσον είναι γνωστή η σχέση στάθμης-παροχής του υπερχειλιστή.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται λεπτομερέστερα στοιχεία για (α) τη μεθοδολογία κατάρτισης των χρονοσειρών υδατικού ισοζυγίου των ταμιευτήρων της Αθήνας, και (β) τον τρόπο επικαιροποίησης αυτών κατά την επιχειρησιακή πλέον φάση λειτουργίας των σχετικών συνιστωσών του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια του έργου (μετρητικό δίκτυο, βάση δεδομένων, λογισμικό *Υδρογνώμων*).

5.5.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων

Από τους τέσσερις ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, μόνον αυτός της Υλίκης είναι φυσική λίμνη και χρησιμοποιείται σήμερα ως βοηθητικός υδατικός πόρος. Ο ταμιευτήρας Μαραθώνα χρησιμοποιείται κυρίως για την αποθήκευση νερού για λόγους ασφαλείας, λόγω της εγγύτητας του στην Αθήνα. Τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων και των φραγμάτων τους συνοψίζονται στον Πίνακα 5.22.

Πίνακας 5.22: Χαρακτηριστικά ταμιευτήρων υδροδοτικού συστήματος Αθήνας.

	Εύηνος	Μόρνος	Υλίκη	Μαραθώνας
Έτος έναρξης πλήρους λειτουργίας	2001	1981	1957	1931
Έκταση λεκάνης απορροής (km ²) ⁽¹⁾	351.9	588.1	2466.6	118.0
Κατώτατη στάθμη υδροληψίας (m)	458.3	384.0	43.5	204.4
Στάθμη υπερχειλίσσης (m)	505.0	435.0	79.8 ⁽²⁾	224.0 ⁽³⁾
Ολική χωρητικότητα (hm ³)	137.63	763.71	594.75	42.85
Ωφέλιμη χωρητικότητα (hm ³)	112.05	630.23	584.75	33.20
Νεκρός όγκος (hm ³)	25.58	133.48	10.00	9.65
Μέγιστη επιφάνεια (km ²) ⁽⁴⁾	3.60	19.93	27.74	2.57
Ύψος φράγματος από την θεμελίωση (m)	104	139		47
Υψόμετρο στέψης (m)	516.0	446.5		227.0
Μήκος στέψης (m)	600	815		285

(1) Η έκταση της λεκάνης απορροής αναφέρεται πάντοτε ανάντη του φράγματος, ενώ στην περίπτωση της Υλίκης περιλαμβάνει την τοπική λεκάνη τροφοδοσίας της λίμνης, έκτασης 424 km², καθώς και την λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, έκτασης 2042.6 km².

(2) Κανονικά, η στάθμη υπερχειλίσσης της Υλίκης βρίσκεται στα +77.7 m, υπάρχει ωστόσο περιθώριο αύξησης της αποθηκευτικής ικανότητας της λίμνης με την τοποθέτηση πασσαλοσανίδων.

(3) Κανονικά, η στάθμη υπερχειλίσσης του Μαραθώνα βρίσκεται στα +223.0 m, υπάρχει ωστόσο περιθώριο αύξησης της αποθηκευτικής ικανότητας του ταμιευτήρα με την τοποθέτηση πασσαλοσανίδων.

(4) Η μέγιστη επιφάνεια αναφέρεται στην στάθμη υπερχειλίσσης.

5.5.3 Ταμιευτήρας Ευήνου

Τα έργα του Ευήνου, που περιλαμβάνουν το φράγμα και την σήραγγα εκτροπής προς τον ταμιευτήρα Μόρνου, τέθηκαν σε πλήρη λειτουργία τον Σεπτέμβριο του 2001. Η κατώτατη στάθμη υδροληψίας του ταμιευτήρα βρίσκεται στα +458.3 m, η στάθμη υπερχειλίσσης στα +505.0 m, ενώ η έκταση της λεκάνης απορροής του ανέρχεται σε 351.9 km².

Τα πρωτογενή στοιχεία για την κατασκευή της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Ευήνου ελήφθησαν από τον κατασκευαστή του φράγματος (*Καραβοκύρης*, 2000, προσωπική επικοινωνία), ενώ τα αντίστοιχα αποθέματα εκτιμήθηκαν με εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στο τεύχος 17. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη αποθέματος, ήτοι η συνολική χωρητικότητα (137.6 hm³), ο νεκρός όγκος (25.6 hm³) και η ωφέλιμη χωρητικότητα, ως διαφορά των δύο προηγούμενων μεγεθών (112.0 hm³).

Η απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας μεταφέρονται μέσω της σήραγγας Ευήνου-Μόρνου, μήκους 29.4 km. Η σήραγγα λειτουργεί υπό πίεση και έχει μεταβλητή παροχαρακτηριστικότητα, εξαρτώμενη από την στάθμη του ταμιευτήρα Ευήνου (μέγιστη 27.0 m³/s). Η σήραγγα εκβάλλει στον ταμιευτήρα του Μόρνου, 10 m πάνω από την στάθμη υπερχειλίσσης του φράγματος (+445 m).

Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα Ευήνου είναι:

Μηνιαία μεταβολή αποθέματος ταμιευτήρα: Υπολογίζεται συναρτήσει της στάθμης την πρώτη ημέρα κάθε μήνα.

Απορροή ανάντη λεκάνης: Πρόκειται για την άγνωστη συνιστώσα του ταμιευτήρα.

Βροχόπτωση στον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες εισροές από βροχόπτωση εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος βροχής επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα.

Απώλειες λόγω εξάτμισης από τον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες από εξάτμιση εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος εξάτμισης επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα.

Υπερχείλιση ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες από υπερχειλίση υπολογίζονται αθροίζοντας τα ημερήσια στοιχεία που προκύπτουν με βάση τις ημερήσιες τιμές της στάθμης υπερχειλίσης και την καμπύλη στάθμης-παροχής του υπερχειλιστή.

Εκτροπή προς Μόρνο: Οι μηνιαίες ποσότητες νερού που διοχετεύονται μέσω της σήραγγας εκτροπής προς τον ταμιευτήρα του Μόρνου προκύπτουν αθροίζοντας τις αντίστοιχες ημερήσιες που δίνονται από την ΕΥΔΑΠ.

Εκροές κατάντη του φράγματος: Για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων στα οικοσυστήματα και στο δέλτα του ποταμού από τη μείωση της ροής λόγω της λειτουργίας του ταμιευτήρα Ευήνου, προβλέπεται η διατήρηση μόνιμης παραμένουσας ροής κατάντη του φράγματος ίσης με $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.5.4 Ταμιευτήρας Μόρνου

Το φράγμα του Μόρνου κατασκευάστηκε μεταξύ των ετών 1972-1979, ενώ ο ταμιευτήρας τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία για την ύδρευση της Αθήνας το 1981. Η κατώτατη στάθμη υδροληψίας του ταμιευτήρα βρίσκεται στα +384.0 m, η στάθμη υπερχειλίσης στα +435.0 m, ενώ η έκταση της λεκάνης απορροής του ανάντη του φράγματος ανέρχεται σε 588.1 km^2 .

Τα πρωτογενή στοιχεία για την κατασκευή της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Μόρνου ελήφθησαν από την ΕΥΔΑΠ, ενώ τα αντίστοιχα αποθέματα εκτιμήθηκαν με εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στο τεύχος 17. Η συνολική χωρητικότητα (763.7 hm^3), ο νεκρός όγκος (133.5 hm^3) και η ωφέλιμη χωρητικότητα, ως διαφορά των δύο προηγούμενων μεγεθών (630.2 hm^3). Σημειώνεται ότι, ακόμη και αν τα αποθέματα κατέλθουν κάτω από την στάθμη υδροληψίας, υπάρχει, θεωρητικά, η δυνατότητα χρήσης πλωτών αντλιοστασίων, μέσω των οποίων εξασφαλίζονται περί τα 100 hm^3 επιπλέον νερού. Η δυνατότητα αυτή αφορά βεβαίως κατάσταση ανάγκης, και δεν θεωρείται σκόπιμο να λαμβάνεται υπόψη στις εκτιμήσεις των επιφανειακών υδατικών αποθεμάτων του συστήματος.

Οι απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας διοχετεύονται στο υδραγωγείο του Μόρνου, μήκους 188 km. Το υδραγωγείο, παροχετευτικότητας $18.0 \text{ m}^3/\text{s}$ στο ανάντη του μεριστή Κιθαιρώνα τμήμα του και $15.5 \text{ m}^3/\text{s}$ στο κατάντη, μεταφέρει νερό με βαρύτητα από τον ταμιευτήρα Μόρνου στις μονάδες επεξεργασίας Μάνδρας και Μενιδίου, ενώ συνδέεται με το υδραγωγείο Υλίκης στην θέση Δαφνούλα, μέσω του ενωτικού υδραγωγείου Μαραθώνα.

Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα Μόρνου, το οποίο έχει καταρτιστεί από τον Νοέμβριο του 1979 και έκτοτε, είναι:

Μηνιαία μεταβολή αποθέματος ταμιευτήρα: Υπολογίζεται συναρτήσει της στάθμης την πρώτη ημέρα κάθε μήνα.

Απορροή ανάντη λεκάνης: Αποτελεί την άγνωστη συνιστώσα του ισοζυγίου.

Βροχόπτωση στον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες εισροές από βροχόπτωση εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος βροχής επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα.

Εισροές από τον Εύηνο: Πρόκειται για τις ποσότητες που διοχετεύονται από τον Εύηνο, μέσω της σήραγγας εκτροπής

Απώλειες εξάτμισης από τον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες από εξάτμιση εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος εξάτμισης επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα.

Απώλειες στη σήραγγα Γκιώνας: Η συνιστώσα αυτή εισάγεται επειδή η μέτρηση των απολήψεων γίνεται στην έξοδο της σήραγγας Γκιώνας. Μέχρι τον Δεκέμβριο 1983, οι εν λόγω απώλειες ήταν

σημαντικές και ανέρχονταν σε $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Στις αρχές του 1984 έγιναν επεμβάσεις στεγανοποίησης στη σήραγγα, με αποτέλεσμα τον δραστικό περιορισμό (πρακτικά μηδενισμό) των απωλειών.

Απώλειες υπόγειων διαφυγών από τον ταμιευτήρα: Οι απώλειες διαφυγών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τις διηθήσεις που συγκεντρώνονται στις δύο από τις τρεις σήραγγες αποστράγγισης της στοάς του Πύρνου, όπου υπάρχουν κατάλληλες διατάξεις για την μέτρησή τους (υπερχειλιστές λεπτής στέψης). Με επεξεργασία των εν λόγω μετρήσεων, έχουν προταθεί εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού των απωλειών συναρτήσει της στάθμης του ταμιευτήρα (Τζεράνης, 1989). Στην δεύτερη κατηγορία απωλειών εντάσσονται: (α) οι διαφυγές από το φράγμα και την θεμελίωσή του, (β) οι διαφυγές από την κουρτίνα τσιμεντενέσεων του Πύρνου, (γ) οι άμεσες διαφυγές από την περιοχή του Πύρνου που δεν διέρχονται μέσω της στοάς και των σήραγγων, και (δ) τυχόν άλλες διαφυγές από διάφορα σημεία της λεκάνης κατάκλυσης. Βάσει ορισμένων παραδοχών, οι συνολικές διαφυγές σε μηνιαία βάση προκύπτουν με διπλασιασμό των υπολογισμένων απωλειών του Πύρνου, και εκτιμώνται από τη σχέση:

$$L_t = 0.012 (\bar{Z}_t - 390) + 0.07 \quad (5.3)$$

όπου L_t οι απώλειες (σε $\text{hm}^3/\text{μήνα}$) και \bar{Z}_t η μέση στάθμη του ταμιευτήρα (σε m) κατά τον μήνα t .

Υπερχείλιση ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες από υπερχείλιση υπολογίζονται αθροίζοντας τα ημερήσια στοιχεία που προκύπτουν με βάση τις ημερήσιες τιμές της στάθμης υπερχείλισης και την καμπύλη στάθμης-παροχής του υπερχειλιστή.

Εκροές από τη σήραγγα Γκιώνας: Οι μηνιαίες ποσότητες νερού που προορίζονται για ύδρευση της Αθήνας υπολογίζονται αθροίζοντας τις αντίστοιχες ημερήσιες τιμές, οι οποίες προκύπτουν βάσει μετρήσεων στον υπερχειλιστή παχείας στέψης που βρίσκεται στην έξοδο της σήραγγας Γκιώνας.

5.5.5 Λίμνη Υλίκη

Η λίμνη Υλίκη αποτέλεσε την κύρια πηγή τροφοδοσίας της Αθήνας από το 1957, μόλις ολοκληρώθηκε η κατασκευή του υδραγωγείου Υλίκης, μέχρι το 1981, οπότε και εντάχθηκαν στο σύστημα τα έργα του Μόρνου. Η Υλίκη έχει λεκάνη απορροής 424.0 km^2 , ενώ σε αυτή διοχετεύονται, μέσω της Σήραγγας Καρδίτσας, και τα επιφανειακά νερά της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, έκτασης 2042.6 km^2 , που αποτελούν και τον βασικό τροφοδότη της λίμνης.

Ο πυθμένας της Υλίκης βρίσκεται στα $+40.0 \text{ m}$, ενώ η κατώτατη στάθμη πραγματοποίησης απολήψεων έχει καθοριστεί στα $+43.5 \text{ m}$, ώστε να αφήνεται ένα ελάχιστο ελεύθερο απόθεμα της τάξης των 10 hm^3 . Όταν η στάθμη της Υλίκης υπερβαίνει τα $+77.7 \text{ m}$, το πλεονάζοντα νερά οδηγούνται στην γειτονική λίμνη Παραλίμνη, μέσω της διώρυγας Μουρικού. Ωστόσο, με την τοποθέτηση πρόχειρων πασσαλοσανίδων, η στάθμη υπερχείλισης ανέρχεται πλέον στα $+79.8 \text{ m}$.

Τα πρωτογενή στοιχεία για την κατασκευή της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας της λίμνης Υλίκης ελήφθησαν από της ΕΥΔΑΠ, ενώ τα αντίστοιχα αποθέματα εκτιμήθηκαν με εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στο τεύχος 17. Η συνολική χωρητικότητα της λίμνης, φτάνει τα 594.8 hm^3 , ενώ η ωφέλιμη χωρητικότητά της ανέρχεται σε 584.8 hm^3 .

Οι απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας πραγματοποιούνται μέσω των αντλιοστασίων της ΕΥΔΑΠ στο Μουρικό, ενώ για στάθμες μικρότερες των $+71.0 \text{ m}$ χρησιμοποιούνται και τα πλωτά αντλιοστάσια. Επιπλέον, κατά την αρδευτική περίοδο, πραγματοποιούνται απολήψεις για άρδευση, μέσω του αντλιοστασίου Κωπαΐδας. Οι υδρευτικές απολήψεις από την Υλίκη μεταφέρονται μέσω του ομώνυμου υδραγωγείου προς στον ταμιευτήρα Μαραθώνα και τα διωλιστήρια των Κιούρκων. Η μεταφορά του νερού γίνεται μέσω ενός αρκετά πολύπλοκου δικτύου ανοιχτών και κλειστών αγωγών και ωστικών αντλιοστασίων.

Χαρακτηριστικό της Υλίκης είναι οι πολύ σημαντικές απώλειες νερού από διαφυγές, οι οποίες μπορεί να ανέλθουν και στο 50% των εισροών σε υψηλές στάθμες, και οφείλονται στον διαπερατό χαρακτήρα του υποβάθρου της λίμνης. Πράγματι, λόγω της έντονης καρστικοποίησης, οι γεωλογικοί σχηματισμοί των τοιχωμάτων της Υλίκης, όπως και της γειτονικής της Παραλίμνης, δεν είναι στεγανοί, με αποτέλεσμα την διαφυγή σημαντικών ποσοτήτων νερού (μόνο ο πυθμένας της λίμνης έχει αργλικές προσχώσεις). Σύμφωνα με τους Παγούνη κ.ά. (1986), οι κυριότερες θέσεις των υπόγειων διαφυγών εντοπίζονται στην βορειοανατολική και νοτιοδυτική όχθη της λίμνης. Οι κατευθύνσεις της υπόγειας ροής είναι προς βορειοανατολικά, με αποδέκτες τις πηγές Ούγγρας και Καμηλόβρυσης και, στην συνέχεια, την Παραλίμνη, και προς νοτιοδυτικά έως νοτιοανατολικά, με αποδέκτες, όπως εικάζεται, τις πηγές Κοκκόση, δυτικά των μικρών πηγών του όρμου της Ανθηδώνας.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των υπόγειων απωλειών της Υλίκης, που είναι η άγνωστη συνιστώσα του υδατικού της ισοζυγίου, έχει απασχολήσει όλους τους μελετητές του υδατικού της δυναμικού. Οι κύρια δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν πολλά σημεία διαφυγής (καταβόθρες) που είναι διασκορπισμένα στον πυθμένα και τα τοιχώματα της λίμνης. Στα πλαίσια του έργου, επιχειρήθηκε εκτεταμένη διερεύνηση, όπου έγινε επισκόπηση των παλαιότερων μελετών και ανάλυση των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων. Οι σχετικές εργασίες περιγράφονται στο Τεύχος 21.

Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο της λίμνης Υλίκης, το οποίο έχει καταρτιστεί από τον Οκτώβριο του 1977 και έκτοτε, είναι:

Μηνιαία μεταβολή αποθέματος λίμνης: Υπολογίζεται συναρτήσει της στάθμης την πρώτη ημέρα κάθε μήνα.

Απορροή λεκάνης Υλίκης: Βάσει ορισμένων παραδοχών, η συνεισφορά της τοπικής λεκάνης τροφοδοσίας της Υλίκης εκτιμάται ως το 6% της μηνιαίας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, μετρούμενης στην Διώρυγα Καρδίτσας.

Βροχόπτωση στην λίμνη: Οι μηνιαίες εισροές από βροχόπτωση εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος βροχής επί την μέση μηνιαία επιφάνεια της λίμνης.

Εισροές από Σήραγγα Καρδίτσας: Πρόκειται για το σύνολο των επιφανειακών νερών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, τα οποία διοχετεύονται στην Υλίκη μέσω της Συγκεντρωτικής Διώρυγας και, στη συνέχεια, της Σήραγγας Καρδίτσας.

Εισροές από Παραλίμνη: Πρόκειται για αντλήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο 1977-80, με σκοπό την ενίσχυση του υδατικού δυναμικού της λίμνης.

Εισροές από γεωτρήσεις: Πέριξ της Υλίκης έχουν διανοιχθεί γεωτρήσεις, τα νερά των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για ενίσχυση του δυναμικού της λίμνης κατά τα έτη 1993 και 1994. Έχει ωστόσο παρατηρηθεί ότι οι αντλήσεις νερού από τις εν λόγω γεωτρήσεις αυξάνουν τις υπόγειες διαφυγές της λίμνης, οπότε, στην ουσία, ανακυκλώνεται μέρος της ίδιας ποσότητας νερού. Για τον λόγο αυτό, η επίδρασή τους στο υδατικό ισοζύγιο είναι ασαφής.

Απώλειες εξάτμισης από την λίμνη: Οι μηνιαίες απώλειες από εξάτμιση εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος εξάτμισης επί την μέση μηνιαία επιφάνεια της λίμνης.

Απολήψεις για την ύδρευση της Αθήνας: Οι απολήψεις για ύδρευση πραγματοποιούνται μέσω των αντλιοστασίων στο Μουρίκι και των πλωτών αντλιοστασίων, και εκτιμώνται σε ημερήσια βάση από την ΕΥΔΑΠ. Ο υπολογισμός των απολήψεων γίνεται με δύο τρόπους: (α) έμμεσα, με βάση τις ώρες λειτουργίας των αντλιοστασίων, και (β) άμεσα, με μέτρηση της παροχής στην θέση Βίλιζα, από την οποία αφαιρούνται οι τοπικού χαρακτήρα απολήψεις και οι διαρροές κατά μήκος του υδραγωγείου Υλίκης, που εκτιμώνται σε ποσοστό 3%. Οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις, της τάξης του 20%. Η μέχρι σήμερα κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου γίνεται με βάση τις απολήψεις που εκτιμώνται με την πρώτη μέθοδο.

Απολήψεις για άρδευση της Κωπαΐδας: Οι απολήψεις αυτές λαμβάνουν χώρα κατά την αρδευτική περίοδο, συνήθως από τα μέσα Ιουνίου έως τα μέσα Αυγούστου, και πραγματοποιούνται μέσω των αντλιοστασίων του Οργανισμού Κωπαΐδας.

Υπερχείλισης προς Παραλίμνη: Η υπερχείλιση της Υλίκης προς την Παραλίμνη πραγματοποιείται μέσω της διώρυγας Μουρικού. Κανονικά η στάθμη υπερχείλισης είναι στα +77.7 m, όμως συνήθως η διώρυγα φράσσεται με πασσαλοσανίδες, και έτσι η στάθμη μπορεί να ανέρχεται έως τα +79.8 m.

Υπόγειες διαφυγές: Πρόκειται για την άγνωστη συνιστώσα της λίμνης, ως προς την οποία επιλύεται η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου της.

Με στατιστική επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων διαφυγών, καταρτίστηκαν αναλυτικές σχέσεις εκτίμησής τους, που διαφοροποιούνται ανάλογα με την εποχή του έτους και είναι συνάρτηση της μέσης μηνιαίας στάθμης της λίμνης. Οι εν λόγω σχέσεις είναι:

$$L_t = \begin{cases} 0.545 \bar{Z}_t - 26.6 & \text{για την περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου} \\ 0.545 \bar{Z}_t - 21.8 & \text{για την περίοδο Δεκεμβρίου-Απριλίου} \end{cases} \quad (5.4)$$

με τυπικό σφάλμα $3.6 \text{ hm}^3/\mu\eta\text{να}$ (βλ. 9.7).

5.5.6 Ταμιευτήρας Μαραθώνα

Τα έργα του Μαραθώνα, που περιλαμβάνουν το φράγμα στον ποταμό Χάραδρο, το υδραγωγείο Μαραθώνα, την σήραγγα Μπογιατίου και τα διυλιστήρια Γαλατσίου, ολοκληρώθηκαν το 1931. Μέχρι το 1957, οπότε ολοκληρώθηκαν τα έργα της Υλίκης, ο ταμιευτήρας Μαραθώνα αποτέλεσε την κύρια πηγή υδροδότησης της Αθήνας. Ήδη όμως από τα τέλη της δεκαετίας του 1940, το δυναμικό του ταμιευτήρα άρχισε να ενισχύεται μέσω συμπληρωματικών έργων ύδρευσης από το ρέμα Κακοσάλεσι, τις πηγές Σουλίου και το μικρό φράγμα στον Άγιο Θωμά. Σήμερα, ο ταμιευτήρας Μαραθώνα λειτουργεί κυρίως ως έργο αναρρύθμισης και ως απόθεμα ασφαλείας.

Η έκταση της λεκάνης απορροής ανάντη του φράγματος, συμπεριλαμβανομένης και της λεκάνης του μικρού ρέματος Σταμάτας που εκτρέπεται στον Χάραδρο, ανέρχεται στα 118.0 km^2 . Η κατώτατη στάθμη υδροληψίας του ταμιευτήρα βρίσκεται στα +204.4 m και η στάθμη υπερχείλισης στα +223.0 m. Η τελευταία έχει αυξηθεί κατά ένα ακόμη μέτρο, με την τοποθέτηση πασσαλοσανίδων.

Τα πρωτογενή στοιχεία για την κατασκευή της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Μαραθώνα εκτιμήθηκαν από τους παλαιούς τοπογραφικούς χάρτες που δόθηκαν από την ΕΥΔΑΠ (οι χάρτες ανήκαν στην εταιρεία ULEN και έχουν κατασκευαστεί πριν την κατάκλυση του ταμιευτήρα), ενώ τα αντίστοιχα αποθέματα εκτιμήθηκαν με εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στο τεύχος 17. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη αποθέματος, ήτοι η συνολική χωρητικότητα (42.9 hm^3), ο νεκρός όγκος (9.7 hm^3) και η ωφέλιμη χωρητικότητα, ως διαφορά των δύο προηγούμενων μεγεθών (33.2 hm^3).

Η ΕΥΔΑΠ έχει καταγράψει σε ειδικά έντυπα τα μηνιαία δεδομένα ισοζυγίου του ταμιευτήρα για τις περιόδους 1931-56 και 1970-89, τα οποία συλλέχθηκαν και αρχειοθετήθηκαν στα πλαίσια της πρώτης φάσης του έργου (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2000). Σημειώνεται ότι δεν κατέστη δυνατός ο εντοπισμός των στοιχείων της περιόδου 1957-69. Τα στοιχεία αναγράφονται στο έντυπο με κωδικό E7 και με τίτλο "Πίναξ εξατμίσεως, απορροής και παροχής ύδατος λίμνης Μαραθώνος". Με βάση τις επεξεργασίες των δεδομένων ισοζυγίου που συλλέχθηκαν, μόνο τα στοιχεία της περιόδου 1931-56 θεωρούνται αξιοποιήσιμα. Από το έτος 1957, οπότε εντάχθηκαν τα έργα Υλίκης στο σύστημα υδατικών πόρων της Αθήνας, είναι αδύνατη η κατάρτιση ενός αξιόπιστου υδατικού ισοζυγίου του Μαραθώνα, αφού

υπάρχει έντονη αβεβαιότητα ως προς την εκτίμηση των αδιύλιστων ποσοτήτων νερού που διοχετεύονται στην λίμνη μέσω του διυλιστηρίου Κιούρκων.

Οι μεταβλητές που υφίστανται στο μηνιαίο ισοζύγιο του Μαραθώνα για την περίοδο 1931-32 έως 1956-57, όπως καταγράφονται στο έντυπο Ε7, είναι:

Μηνιαία μεταβολή αποθέματος ταμιευτήρα: Υπολογίζεται συναρτήσει της στάθμης την πρώτη ημέρα κάθε μήνα.

Εισροές νερού από τις πηγές Σουλίου: Αναφέρεται στην περίοδο από τον Δεκέμβριο του 1946, οπότε τέθηκε σε λειτουργία η ενίσχυση του ταμιευτήρα Μαραθώνα από τις υφάλμυρες πηγές Σουλίου, που βρίσκονται σε απόσταση 12 km από το φράγμα.

Εισροές νερού από το υδραγωγείο Παρνασσού: Το σύστημα τροφοδοσίας από το υδραγωγείο Παρνασσού τέθηκε σε λειτουργία τον Σεπτέμβριο του 1950, με σκοπό την περαιτέρω αύξηση των απολήψιμων υδατικών πόρων για την ύδρευση της Αθήνας.

Απώλειες λόγω εξάτμισης: Οι μηνιαίες απώλειες εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα εκτιμώνται με αναγωγή των παρατηρήσεων εξάτμισιμετρου.

Απολήψεις για την ύδρευση της Αθήνας: Εκτιμώμενες εκροές από τη σήραγγα Μπογιατίου, προκύπτουν συνυπολογίζοντας τις απώλειες στις εγκαταστάσεις των διυλιστηρίων Γαλατσίου.

Υπερχειλίσαις και λοιπές απώλειες: Οι λοιπές απώλειες επεξηγούνται κατά περίπτωση στον έντυπο Ε7 και πρόκειται για μικρές ποσότητες, της τάξης των χιλιάδων ή δεκάδων χιλιάδων κυβικών μέτρων. Οι κυριότερες αιτίες απωλειών που αναφέρονται στο έντυπο είναι λόγω διοχέτευσης νερού για τον καθαρισμό του Αδριάνειου υδραγωγείου ή της σήραγγας Μπογιατίου και λόγω υπερχειλίσαις της υπολεκάνης Σταμάτας.

Φυσική τροφοδοσία ταμιευτήρα: Πρόκειται για την άγνωστη συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα, που περιλαμβάνει την απορροή των λεκανών Χάραδρου και Σταμάτας, καθώς και την επιφανειακή βροχόπτωση.

Από το 2001, μετά την εγκατάσταση παροχομέτρων στα διυλιστήρια των Κιούρκων, την σήραγγα Μπογιατίου και κατά μήκος του υδραγωγείου Υλίκης, είναι δυνατή πλέον η μέτρηση, ή έστω εκτίμηση, όλων των μεγεθών εισροών και εκροών του ταμιευτήρα Μαραθώνα, εκτός βεβαίως των φυσικών εισροών λόγω απορροής. Συνεπώς, υιοθετώντας παρόμοια μεθοδολογία με τους υπόλοιπους τρεις ταμιευτήρες, η κατάρτιση του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα περιλαμβάνει τις εξής συνιστώσες:

Μηνιαία μεταβολή αποθέματος ταμιευτήρα: Υπολογίζεται συναρτήσει της στάθμης την πρώτη ημέρα κάθε μήνα.

Απορροή ανάντη λεκάνης: Πρόκειται για την άγνωστη συνιστώσα του ταμιευτήρα, ως προς την οποία επιλύεται η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου του.

Βροχόπτωση στον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες εισροές από βροχόπτωση εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος βροχής επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα.

Εισροές από τα διυλιστήρια Κιούρκων: Πρόκειται για ακάθαρτο νερό που διοχετεύεται μέσω των διυλιστηρίων Κιούρκων απευθείας στον ταμιευτήρα Μαραθώνα, προτού υποστεί επεξεργασία.

Απώλειες λόγω εξάτμισης από τον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες από εξάτμιση εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος εξάτμισης επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα.

Υπερχειλίσαις ταμιευτήρα: Κατά το παρελθόν, έχουν καταγραφεί υπερχειλίσαις του ταμιευτήρα Μαραθώνα. Σήμερα, δεδομένου ότι ο ταμιευτήρας έχει μόνο ρυθμιστικό χαρακτήρα, δεν αφήνεται να υπερχειλίσαι, καθώς ενδέχεται να σημειωθούν μεγάλες καταστροφές κατάντη του φράγματος.

Εκροές από τη σήραγγα Μπογιατίου: Οι μηνιαίες ποσότητες νερού που προορίζονται για ύδρευση της Αθήνας υπολογίζονται αθροίζοντας τις αντίστοιχες ημερήσιες τιμές.

5.5.7 Πλαίσιο επικαιροποίησης υδατικών ισοζυγίων ταμιευτήρων

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η διαδικασία επικαιροποίησης των υδατικών ισοζυγίων των ταμιευτήρων, με χρήση του λογισμικού *Υδρογνώμων*. Για κάθε έναν από τους τέσσερις ταμιευτήρες του συστήματος έχει καταρτιστεί ένας πίνακας, στο οποίο παρατίθενται όλες οι χρονοσειρές που συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με τις συνιστώσες του ισοζυγίου. Δίπλα από κάθε χρονοσειρά δίνεται, σε παρένθεση, ο κωδικός της στην βάση δεδομένων. Εφόσον η χρονοσειρά έχει προκύψει μέσω κάποιας επεξεργασίας (συνάθροιση, μετατροπή σε άλλες μονάδες, κλπ.), δίπλα από τον κωδικό υπάρχει ένα βέλος που παραπέμπει στους κωδικούς των χρονοσειρών βάσει των οποίων προκύπτει η εν λόγω χρονοσειρά. Ο κάθε πίνακας είναι χωρισμένος σε τέσσερα τμήματα που περιλαμβάνουν τα γενικά δεδομένα, τα δεδομένα που σχετίζονται με τις παρεμβολές, τις χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται στο ισοζύγιο του ταμιευτήρα και, τέλος, τις χρονοσειρές που αναφέρονται στην εκάστοτε άγνωστη συνιστώσα, ως προς την οποία επιλύεται η εξίσωση ισοζυγίου. Συγκεκριμένα:

- Στα γενικά δεδομένα περιλαμβάνονται οι χρονοσειρές (κατά κανόνα ημερήσιου βήματος), με συνάθροιση των οποίων προκύπτουν οι μηνιαίες τιμές που τελικά υπεισέρχονται στο ισοζύγιο.
- Στα δεδομένα παρεμβολών (interpolations) περιλαμβάνονται όλα τα δεδομένα που υπεισέρχονται στην αντίστοιχη φόρμα του λογισμικού *Υδρογνώμων*. Στην φόρμα καλείται η ημερήσια χρονοσειρά στάθμης του ταμιευτήρα, βάσει της οποίας υπολογίζονται συνιστώσες όπως η μέση μηνιαία επιφάνεια, το απόθεμα την πρώτη κάθε μήνα και οι μηνιαίες υπόγειες διαφυγές.
- Στα δεδομένα ισοζυγίου περιλαμβάνονται οι τελικές χρονοσειρές που υπεισέρχονται στην αντίστοιχη φόρμα του λογισμικού *Υδρογνώμων*. Μέσω της φόρμας γίνεται ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα και καθορίζεται η χρονοσειρά στην οποία αποθηκεύονται τα αποτελέσματα. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η δυνατότητα συμμετοχής στον υπολογισμό μιας μεταβλητής περισσοτέρων της μίας χρονοσειρές. Οι εν λόγω χρονοσειρές τοποθετούνται στη σειρά. Για κάθε μήνα, εφόσον το πρόγραμμα δεν βρει τιμή στην πρώτη χρονοσειρά, ανατρέχει στη δεύτερη, αλλιώς στην τρίτη κ.ο.κ. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση που υπάρχουν δεδομένα από διαφορετικές πηγές που αφορούν στην ίδια μεταβλητή. Στα ισοζύγια των ταμιευτήρων της ΕΥΔΑΠ υπάρχουν πολλά τέτοια παραδείγματα, όπως παλιά ιστορικά δείγματα που υπήρχαν σε μηνιαία χρονική κλίμακα, αλλά από κάποιο χρονικό σημείο και μετά καταγράφονται σε ημερήσια βάση. Ακόμη, για αρκετές μετεωρολογικές μεταβλητές, χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας σταθμοί εφόσον υπάρχει έλλειψη δεδομένων.
- Στο τέλος κάθε πίνακα παρουσιάζονται οι χρονοσειρές που προέρχονται από τον υπολογισμό των ισοζυγίων και αναφέρονται είτε στις μηνιαίες εισροές στον ταμιευτήρα λόγω απορροής (Εύηνος, Μόρνος, Μαραθώνας) ή στις μηνιαίες υπόγειες διαφυγές (Υλίκη).

Ο Πίνακας 5.23 αποτελεί ένα παράδειγμα για την μορφή των πινάκων που καταρτίστηκαν για τον υπολογισμό του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου του κάθε ταμιευτήρα.

Πίνακας 5.23: Χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα Ευήνου.

Μεταβλητή	Μονάδες	Κωδικοί χρονοσειρών
ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ		
Εκτροπή προς Μόρνο	1000 m ³	2283
Περιβαλλοντική εκροή κατάντη του φράγματος	1000 m ³	2281
Ημερήσια υπερχειλίση		
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΜΑΣ INTERPOLATION		
Ημερήσια στάθμη (συμβατική)	m	2209
Μηνιαία στάθμη	m	2211
Καμπύλη στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος		11, 12, 4573
Ημερήσια επιφάνεια	km ²	2779 ← 2209 + K12
Ημερήσιος όγκος	hm ³	2781 ← 2209 + K12
ΜΗΝΙΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΜΑΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ		
Εκτροπή προς Μόρνο	hm ³	2601 ← 2283
Περιβαλλοντική εκροή κατάντη του φράγματος	hm ³	2285 ← 2281
Ύψος βροχής στον ταμιευτήρα	mm	
Υπερχειλίσεις	hm ³	
Ύψος εξάτμισης στον ταμιευτήρα	mm	
Μηνιαία χρονοσειρά αποθέματος	hm ³	2785 ← 2781
Μηνιαία χρονοσειρά επιφάνειας	km ²	2783 ← 2779
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		
Απορροή υπολεκάνης	hm ³	
Ισοδύναμο ύψος απορροής	mm	

6 Θεωρητική τεκμηρίωση μεθοδολογιών

Είναι γνωστό ότι το πρόβλημα της διαχείρισης ενός συστήματος υδατικών πόρων είναι από τα πλέον δύσκολα και απαιτητικά λόγω αφενός της πολυπλοκότητας των φυσικών διεργασιών του νερού και αφετέρου των αντικρουόμενων στόχων και περιορισμών κατά τη διαχείρισή του. Είναι ακόμη γνωστή η πολυπλοκότητα του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας με τις πολλές πηγές επιφανειακού και υπόγειου νερού, τους διαφορετικούς χώρους ταμίευσης και τις εναλλακτικές διαδρομές μεταφοράς του νερού από τις πηγές μέχρι τις μονάδες επεξεργασίας νερού (MEN).

Η κεντρική ιδέα του ερευνητικού έργου ήταν η κατασκευή ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων (ΣΥΑ) για τη διαχείριση του συστήματος υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, στηριγμένου σε σύγχρονα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης-βελτιστοποίησης και σε τεχνικές πληροφορικής. Το ΣΥΑ αποσκοπεί στο βέλτιστο έλεγχο του υδροσυστήματος και ακολουθεί ολιστική προσέγγιση, με στόχο την ποσοτικά αξιόπιστη, ποιοτικά και περιβαλλοντικά ασφαλή, και οικονομικά πρόσφορη κάλυψη των υδατικών αναγκών, μέσω κατάλληλης αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων. Οι επιζητούμενοι τρόποι διαχείρισης επιδιώκεται να χαρακτηρίζονται από ορθολογικότητα, δηλαδή να είναι επιστημονικά θεμελιωμένοι, αποδοτικότητα, δηλαδή να αξιοποιούν τους υδατικούς πόρους σε επαρκή βαθμό λαμβάνοντας υπόψη και τις οικονομικές συνιστώσες, και βιωσιμότητα, δηλαδή να μην δημιουργούν πρόβλημα εξάντλησης των υδατικών πόρων στο μέλλον για την κάλυψη των σημερινών αναγκών.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και ακολουθήθηκε, όσο και αν υπαγορεύτηκε από τις ιδιαίτερες απαιτήσεις του συγκεκριμένου υδροδοτικού συστήματος και τις ανάγκες του εν λόγω ερευνητικού έργου, έχει ευρύτερο χαρακτήρα και γενικότερο προσανατολισμό. Με αυτή την έννοια, αλλά και με σκοπό να τεθεί η μεθοδολογία στη γνώση και κρίση της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας, αποφασίστηκε, με τη σύμφωνη γνώμη των αρμόδιων της ΕΥΔΑΠ, να γίνει μια σειρά από δημοσιεύσεις σε έγκυρα διεθνή επιστημονικά περιοδικά της περιοχής των υδατικών πόρων, αλλά και ανακοινώσεις σε επιστημονικά συνέδρια και ημερίδες. Ήδη έχουν υπάρξει επτά δημοσιεύσεις σε περιοδικά, χωρίς να έχει ολοκληρωθεί, λόγω των χρονοβόρων διαδικασιών αξιολόγησης από τις συντακτικές επιτροπές των έγκυρων περιοδικών, η σειρά των προβλεπόμενων δημοσιεύσεων.

Κατάλογος των επτά αυτών δημοσιεύσεων δίνεται στον Πίνακα 6.1, όπου έχουν διακριθεί σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται οι δημοσιεύσεις που αναφέρονται στον πυρήνα του ΣΥΑ, δηλαδή στη βελτιστοποίηση του υδροσυστήματος μέσα από την πρωτότυπη μεθοδολογία *παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση*. Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται οι δημοσιεύσεις που αναφέρονται στη στοχαστική προσομοίωση και πρόγνωση των υδρολογικών εισόδων του υδροσυστήματος. Η ανάγκη υπερετήσιας ρύθμισης του υδροσυστήματος προϋποθέτει την προσομοίωση της λειτουργίας του για χρονικό ορίζοντα πολλών ετών. Προφανώς, για έναν τέτοιο χρονικό ορίζοντα είναι απολύτως αδύνατη η πρόγνωση της εξέλιξης των υδρολογικών διεργασιών με χρήση συμβατικών ντετερμινιστικών μεθόδων. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιείται η πιθανοτική-στοχαστική προσέγγιση, η οποία μπορεί να δώσει πιθανοτικές απαντήσεις ως προς τη χρονική πρόγνωση των φαινομένων, ποσοτικοποιώντας την αβεβαιότητα γύρω από την εξέλιξή τους. Η πρωτότυπη ερευνητική εργασία που έχει διεξαχθεί στην περιοχή της στοχαστικής υδρολογικής προσομοίωσης αναφέρεται πρωτίτως στα θέματα της μακροπρόθεσμης εμμονής και της αναπαραγωγής της (φαινόμενο το οποίο κρίθηκε ιδιαίτερα σημαντικό μετά την εμπειρία της έμμονης ξηρασίας στις αρχές της δεκαετίας του 1990), της ταυτόχρονης προσομοίωσης των υδρολογικών

διεργασιών σε πολλές θέσεις, της ταυτόχρονης χρήσης διαφορετικών χρονικών κλιμάκων μελέτης και της «δέσμευσης» της προσομοίωσης με τις γνωστές (μετρημένες) υδρολογικές συνθήκες του παρόντος και του παρελθόντος, σε τρόπο ώστε οι δεσμευμένες προσομοιωμένες χρονοσειρές να αποτελούν πιθανά σενάρια για το μέλλον.

Πίνακας 6.1: Κατάλογος δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά.

Κατηγορία 1: Μεθοδολογία προσομοίωσης και διαχείρισης του υδροσυστήματος

1. 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, Special issue on Design and application of decision-support systems for integrated water management: lessons to be learned), 599-609, 2003.
[Σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση του συστήματος υδατικών πόρων της Αθήνας]
2. 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.
[Σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση συστημάτων πολλών ταμιευτήρων]
3. 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.
[Αξιολόγηση της μεθόδου παραμετροποίησης-προσομοίωσης-βελτιστοποίησης για τον έλεγχο συστημάτων ταμιευτήρων]

Κατηγορία 2: Μεθοδολογία στοχαστικής προσομοίωσης των υδρολογικών εισόδων

4. Koutsoyiannis, D., The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy, *Hydrological Sciences Journal*, 47(4), 573-595, 2002.
[Απλή διατύπωση του φαινομένου Hurst και του κλασματικού Γκαουσιανού θορύβου]
 5. Koutsoyiannis, D., Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics, *Hydrological Sciences Journal*, 48(1), 3-24, 2003.
[Κλιματική αλλαγή, φαινόμενο Hurst και υδρολογική στατιστική]
 6. Koutsoyiannis, D., A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series, *Water Resources Research*, 36(6), 1519-1533, 2000.
[Γενικευμένο μαθηματικό πλαίσιο για τη στοχαστική προσομοίωση και πρόγνωση υδρολογικών χρονοσειρών]
 7. Koutsoyiannis, D., Coupling stochastic models of different time scales, *Water Resources Research*, 37(2), 379-392, 2001.
[Σύζευξη στοχαστικών μοντέλων διαφορετικών χρονικών κλιμάκων]
-

Στο τεύχος 15, αντί άλλων περιγραφών και επεξηγήσεων της μεθοδολογίας, παρατίθενται αυτούσιες οι δημοσιεύσεις του Πίνακα 6.1, οι οποίες περιγράφουν με σαφήνεια τα κυριότερα σημεία της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε. Η σειρά παράθεσης που ακολουθείται, ίδια με αυτή του Πίνακα 1, έχει επιλεγεί με στόχο την καλύτερη αναγνωσιμότητα του όλου κειμένου.

Εκτός των δημοσιεύσεων σε περιοδικά, υπήρξαν ως τώρα και 15 δημοσιεύσεις σε πρακτικά επιστημονικών συνεδρίων ή ανακοινώσεις σε επιστημονικά συνέδρια και ημερίδες, κατάλογος των οποίων παρατίθεται στον Πίνακα 6.2, όπου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις δημοσιεύσεις σε

πρακτικά συνεδρίων μετά από πλήρη αξιολόγηση και τις δημοσιεύσεις και ανακοινώσεις σε λοιπά συνέδρια και ημερίδες. Οι περιλήψεις αυτών των εργασιών παρατίθενται επίσης στο Τεύχος 15, ενώ ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να βρει τα πλήρη κείμενα στις ιστοσελίδες του προγράμματος (<http://www.itia.ntua.gr/g/projinfo/14/>).

Πίνακας 6.2: Κατάλογος ανακοινώσεων σε επιστημονικά συνέδρια και ημερίδες.

Κατηγορία 1: Δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων μετά από πλήρη αξιολόγηση

1. Koutsoyiannis, D., A. Efstratiadis, and G. Karavokiros, A decision support tool for the management of multi-reservoir systems, *Proceedings of the Integrated Decision-Making for Watershed Management Symposium*, Chevy Chase, Maryland, January 2001, U.S. Environmental Protection Agency, Duke Power, Virginia Tech, 2001.
[Εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση συστημάτων πολλών ταμειωτήρων]
2. Nalbantis, I., E. Rozos, G. M. T. Tentes, A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, Integrating groundwater models within a decision support system, *Proceedings of the 5th International Conference of European Water Resources Association: "Water Resources Management in the Era of Transition"*, edited by G. Tsakiris, Athens, September 2002, 279-286, European Water Resources Association, International Association of Hydraulic Research, Athens, 2002.
[Ενταξη μοντέλων υπόγειων νερών σε σύστημα υποστήριξης αποφάσεων]
3. Mamassis, N., and D. Koutsoyiannis, A hydrometeorological telemetric network for the water resources monitoring of the Athens water resource system, *Proceedings of the 5th International Conference of European Water Resources Association: "Water Resources Management in the Era of Transition"*, edited by G. Tsakiris, Athens, September 2002, 157-163, European Water Resources Association, International Association of Hydraulic Research, Athens, 2002.
[Υδρομετεωρολογικό τηλεμετρικό δίκτυο για την εποπτεία των υδατικών πόρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας]
4. 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, July 2002, 1423-1428, International Association of Hydraulic Research, International Water Association, International Association of Hydrological Sciences, 2002.
[Εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου για ολική βελτιστοποίηση συστημάτων υδατικών πόρων]

Κατηγορία 2: Δημοσιεύσεις και ανακοινώσεις σε λοιπά συνέδρια και ημερίδες

5. Koutsoyiannis, D., The Athens water resource system: A modern management perspective, *Invited lecture at the Imperial College*, London, December 1999, Imperial College, London, 1999.
[Το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας: Μια σύγχρονη προοπτική διαχείρισης]
 6. Κοκώσης, Χ., και Δ. Κουτσογιάννης, Νερό για την πόλη: Στρατηγικός σχεδιασμός, διαχείριση της ζήτησης και έλεγχος των διαρροών στα δίκτυα, *Ημερίδα με θέμα Νερό για την πόλη: Στρατηγικός σχεδιασμός, διαχείριση της ζήτησης και έλεγχος των διαρροών στα δίκτυα*, Αθήνα, Νοέμβριος 2000, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Εταιρία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Πρωτεύουσας, 2000.
 7. Ξανθάκης, Α., και Δ. Κουτσογιάννης, Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας για την προσεχή πενταετία, *Ημερίδα με θέμα Νερό για την πόλη: Στρατηγικός σχεδιασμός, διαχείριση της ζήτησης και έλεγχος των διαρροών στα δίκτυα*, Αθήνα, Νοέμβριος 2000, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Εταιρία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Πρωτεύουσας, 2000.
-

Πίνακας 6.2 (συνέχεια): Κατάλογος ανακοινώσεων σε επιστημονικά περιοδικά σε επιστημονικά συνέδρια και ημερίδες.

-
8. Κουτσογιάννης, Δ., Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων στη διαχείριση υδατικών πόρων: Η περίπτωση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, *Νερό και Περιβάλλον, 2η Ημερίδα της ΕΥΔΑΠ για την Παγκόσμια Ημέρα Νερού*, Αθήνα, Μάρτιος 2001, Εταιρία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Πρωτεύουσας, 2001.
 9. Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, Global optimisation techniques in water resources management, *26th General Assembly of the European Geophysical Society, Geophysical Research Abstracts, Vol. 3*, Nice, March 2001, European Geophysical Society, 2001.
[Τεχνικές ολικής βελτιστοποίησης στη διαχείριση υδατικών πόρων]
 10. Koutsoyiannis, D., and A. Efstratiadis, A stochastic hydrology framework for the management of multiple reservoir systems, *26th General Assembly of the European Geophysical Society, Geophysical Research Abstracts, Vol. 3*, Nice, March 2001, European Geophysical Society, 2001.
[Πλαίσιο στοχαστικής υδρολογίας για τη διαχείριση συστημάτων πολλών ταμιευτήρων]
 11. Karavokiros, G., A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, A decision support system for the management of the water resource system of Athens, *26th General Assembly of the European Geophysical Society, Geophysical Research Abstracts, Vol. 3*, Nice, March 2001, European Geophysical Society, 2001.
[Σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση του συστήματος υδατικών πόρων της Αθήνας]
 12. Karavokiros, G., A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, Determining management scenarios for the water resource system of Athens, *Proceedings, Hydrorama 2002, 3rd International Forum on Integrated Water Management*, March 2002, 175-181, Water Supply and Sewerage Company of Athens, Athens, 2002.
[Καθορισμός σεναρίων διαχείρισης για το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας]
 13. Xenos, D., I. Passios, S. Georgiades, E. Parlisis, and D. Koutsoyiannis, Water demand management and the Athens water supply, *Proceedings of the 7th BNAWQ Scientific and Practical Conference "Water Quality Technologies and Management in Bulgaria"*, Sofia, February 2002, Sofia, 2002. [Η διαχείριση της ζήτησης νερού και η περίπτωση της υδροδότησης της Αθήνας]
 14. Koutsoyiannis, D., Hydrological statistics for engineering design in a varying climate, *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5*, Nice, April 2003, European Geophysical Society, American Geophysical Union, 2003.
[Υδρολογική στατιστική για τεχνικό σχεδιασμό σε ένα μεταβαλλόμενο κλίμα]
 15. Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, E. Rozos, and I. Nalbantis, Calibration of a conjunctive surface-groundwater simulation model using multiple responses, *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5*, Nice, April 2003, European Geophysical Society, American Geophysical Union, 2003.
[Βαθμονόμηση μοντέλου συνδυασμένης προσομοίωσης επιφανειακών και υπόγειων νερών με χρήση πολλαπλών αποκρίσεων]
-

7 Πρόγραμμα «Κασταλία» για την στοχαστική προσομοίωση και πρόγνωση υδρολογικών χρονοσειρών

7.1 Εισαγωγή

Το αντικείμενο του κεφαλαίου εντάσσεται στο υποσύστημα 3 (*Ανάπτυξη συστήματος εκτίμησης και πρόγνωσης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*), που έχει ως κύριο στόχο την ανάπτυξη ενός μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης και πρόγνωσης των υδρομετεωρολογικών διεργασιών του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, και συγκεκριμένα των απορροών, βροχοπτώσεων και εξατμίσεων των ταμιευτήρων. Το τελικό προϊόν είναι το υπολογιστικό σύστημα *Κασταλία*, που είναι συνιστώσα του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων (ΣΥΑ). Η ανάπτυξη του λογισμικού έγινε και στις δύο φάσεις του έργου. Κατά την πρώτη φάση, αναπτύχθηκε μια μη επιχειρησιακή έκδοση, κατά την οποία η έμφαση δόθηκε στην ανάπτυξη των μεθοδολογιών, την υλοποίηση των υπολογιστικών διαδικασιών και αλγορίθμων και την ανάπτυξη του περιβάλλοντος εργασίας (*Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2000*). Κατά την δεύτερη φάση, αναπτύχθηκε η επιχειρησιακή έκδοση του συστήματος, με την ολοκλήρωση των εργασιών υλοποίησης του περιβάλλοντος εργασίας και την αποκατάσταση της επικοινωνίας του προγράμματος με την βάση δεδομένων του ΣΥΑ.

7.2 Μαθηματικό υπόβαθρο

7.2.1 Η έννοια της στοχαστικής ανέλιξης

Από την πληθώρα των πηγών αβεβαιότητας που διέπει την λειτουργία ενός συστήματος υδατικών πόρων, σημαντικότερη ασφαλώς είναι η υδρολογική. Αυτή συναρτάται με την αδυναμία πρόβλεψης της εξέλιξης των υδρομετεωρολογικών διεργασιών, η χαοτική συμπεριφορά των οποίων καθιστά ανέφικτη την πραγματοποίηση ασφαλών προγνώσεων για χρονικό ορίζοντα πέραν των λίγων ημερών.

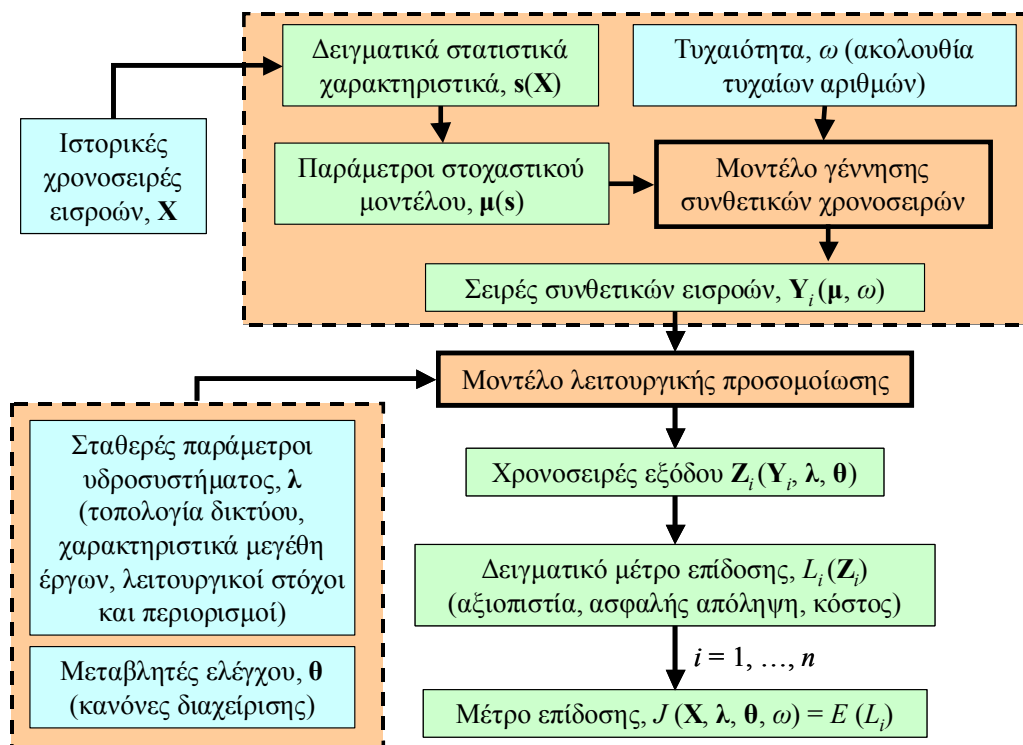
Η αδυναμία πρόγνωσης των υδρομετεωρολογικών διεργασιών με χρήση προσδιοριστικών μοντέλων οδήγησε στην εναλλακτική θεώρησή τους ως τυχαίων μεταβλητών και την αντιμετώπισή τους με τη θεωρία των *στοχαστικών ανελιξέων* (stochastic processes), που αποτελεί ιδιαίτερο κλάδο της θεωρίας πιθανοτήτων. Ως στοχαστική ανέλιξη νοείται μια οικογένεια τυχαίων μεταβλητών X_t , όπου t παράμετρος που συνήθως παριστάνει χρόνο (*Κουτσογιάννης, 1997, σ. 34*). Μια υλοποίηση της στοχαστικής ανέλιξης, ήτοι ένα σύνολο παρατηρήσεων της X_t , διατεταγμένο σε αυστηρή χρονική ακολουθία, καλείται *χρονοσειρά* (time series). Εφόσον τα στατιστικά χαρακτηριστικά μιας ανέλιξης δεν μεταβάλλονται με το χρόνο, αυτή καλείται *στάσιμη* (stationary). Από την οπτική γωνία της θεωρίας πιθανοτήτων, οι υδρολογικές χρονοσειρές αντιμετωπίζονται ως ανελιξίσεις σε *διακριτό* χρόνο.

Το γεγονός ότι μια υδρολογική διεργασία περιγράφεται από μια στοχαστική ανέλιξη, δεν σημαίνει ότι δεν υπακούει σε κανενός είδους αιτιοκρατία. Ως γνωστό, τα μεγέθη αυτά εμφανίζουν *περιοδικές διακυμάνσεις* κατά την διάρκεια του έτους, που οφείλονται προφανώς στην ετήσια κίνηση της γης και στα κλιματικά φαινόμενα που αυτή προκαλεί. Επιπλέον, η διεργασία που περιγράφεται από την ανέλιξη X_t έχει *στοχαστική δομή* ή *αλλιώς μνήμη*, καθώς οι τιμές της για διάφορες τιμές του t είναι στατιστικά εξαρτημένες. Η μνήμη είναι θεμελιώδες χαρακτηριστικό όλων των υδρομετεωρολογικών

διεργασιών και οφείλεται στην φυσική επίδραση των προηγούμενων πραγματοποιήσεων των ίδιων ή άλλων διεργασιών, με τις οποίες συνδέονται με σχέσεις αιτίου και αποτελέσματος.

7.2.2 Η έννοια της στοχαστικής προσομοίωσης

Ο όρος *στοχαστική προσομοίωση* (stochastic simulation) είναι πολύ γενικός, και αναφέρεται σε υπολογιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούν γεννήτριες τυχαίων αριθμών τόσο για την ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων όσο και για την επίλυση δύσκολων μαθηματικών προβλημάτων, τα οποία δεν έχουν αναλυτική λύση, ενώ η αριθμητική τους επίλυση είναι εξαιρετικά χρονοβόρα. Η μελέτη συστημάτων υδατικών πόρων που διέπονται από αβεβαιότητες αποτελεί τυπικό πεδίο εφαρμογής της στοχαστικής προσομοίωσης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 7.1. Η ποσοτικοποίηση της υδρολογικής αβεβαιότητας επιτυγχάνεται με χρήση *στοχαστικών υδρολογικών μοντέλων*, το υπόβαθρο των οποίων βασίζεται στην θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων. Πρόκειται για μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν στατιστικά τις συσχετίσεις των υδρολογικών διεργασιών και εφαρμόζονται για την γέννηση *συνθετικών χρονοσειρών* που είναι συνεπείς με τις ιστορικές, δηλαδή αναπαράγουν την στατιστική δομή και τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων διεργασιών. Οι συνθετικές χρονοσειρές εισάγονται στο μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης του υδροσυστήματος, παρέχοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα δυνατών αποκρίσεων του, που είναι τόσο πιο περιεκτικό σε πληροφορία όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των σεναρίων που διερευνάται. Επιπλέον, ένας άλλος παράγοντας που καθιστά αναγκαία την χρήση συνθετικών χρονοσειρών, και μάλιστα μεγάλου μήκους, είναι η υιοθέτηση υψηλών επιπέδων *αξιοπιστίας*.



Σχήμα 7.1: Συνιστώσες στοχαστικής προσομοίωσης συστημάτων υδατικών πόρων.

7.2.3 Τύποι προσομοίωσης

Σε μελέτες σχεδιασμού ή στρατηγικής διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων, όπου ζητούμενο είναι η αποτίμηση της μακροχρόνιας επίδοσης του συστήματος, η εν λόγω επίδοση δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες εκκίνησης του μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης, ήτοι το αρχικό καθεστώς υδροφορίας και αποθεμάτων. Επιπλέον, όλα τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου του συστήματος, όπως η

διάταξη και τα χαρακτηριστικά των έργων και η ετήσια ζήτηση νερού, θεωρούνται σταθερά και ανεξάρτητα του χρόνου. Ο τύπος αυτός της προσομοίωσης ονομάζεται *μόνιμης κατάστασης* (steady-state). Κατά την προσομοίωση μόνιμης κατάστασης, οι επιμέρους σειρές εισροών μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμα μιας μεμονωμένης χρονοσειράς μεγάλου (θεωρητικά άπειρου) μήκους.

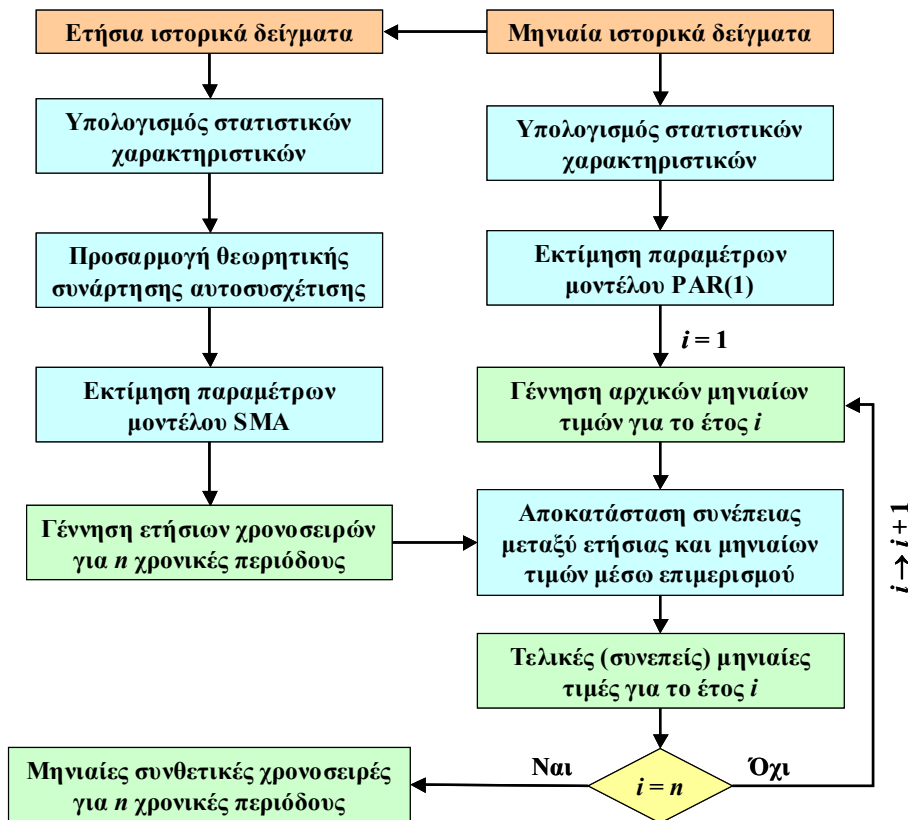
Αντίθετα, η επιχειρησιακή διαχείριση ενός υδροσυστήματος επιβάλλει την ενσωμάτωση των αρχικών συνθηκών στο μοντέλο προσομοίωσης, καθώς η βραχυχρόνια και πιθανόν μεσοπρόθεσμη επίδοση του συστήματος ενδέχεται να εξαρτάται καθοριστικά τόσο από το επίκαιρο καθεστώς υδροφορίας όσο και από τα επίκαιρα αποθέματα νερού. Επιπλέον, ορισμένες παράμετροι λειτουργίας του υδροσυστήματος (π.χ., ζήτηση) είναι μεταβαλλόμενες στον χρόνο. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η λεγόμενη *καταληκτική* (terminating) προσομοίωση (Winston, 1994, σ. 1220), βάσει της οποίας παράγονται πολλές αλλά μικρού, κατά κανόνα, μήκους σειρές εισροών, με κατάλληλη προσαρμογή του στοχαστικού μοντέλου ώστε να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων αλλά και την ακολουθία των ιστορικών τιμών. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται *στοχαστική πρόγνωση*. Στην συνέχεια, η λειτουργική προσομοίωση του συστήματος επαναλαμβάνεται με διαφορετικό κάθε φορά σενάριο εισροών, αλλά με τις ίδιες αρχικές συνθήκες αποθεμάτων, τις ίδιες συνθήκες μεταβολής των παραμέτρων, και το ίδιο χρονικό ορίζοντα ελέγχου.

7.3 Σχήμα γέννησης συνθετικών χρονοσειρών

7.3.1 Γενική περιγραφή

Για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών υιοθετήθηκε ένα στοχαστικό σχήμα πολλών μεταβλητών, που υλοποιείται σε δύο χρονικά επίπεδα. Κάθε μεταβλητή αναφέρεται σε συγκεκριμένη υδρολογική διεργασία, που λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένη γεωγραφική θέση. Το υψηλό επίπεδο αναφέρεται σε χρονοσειρές ετήσιας χρονικής κλίμακας, για την οποία οι στοχαστικές ανεξίτητες θεωρούνται στάσιμες, ενώ ως χαμηλή κλίμακα επιλέγεται η μηνιαία, ήτοι η τυπική κλίμακα διαχείρισης υδροσυστημάτων, στην οποία οι στοχαστικές ανεξίτητες θεωρούνται κυκλοστάσιμες.

Ο αλγόριθμος γέννησης συνθετικών χρονοσειρών απεικονίζεται στο Σχήμα 7.2. Είσοδος είναι τα μηνιαία ιστορικά δείγματα των μεταβλητών, βάσει των οποίων προκύπτουν τα αντίστοιχα ετήσια. Αρχικά υπολογίζονται τα δειγματικά στατιστικά χαρακτηριστικά, σε μηνιαία και ετήσια βάση. Στη συνέχεια, για κάθε ετήσια μεταβλητή ορίζεται μια θεωρητική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, που περιγράφει την μακροπρόθεσμη εμμονή της αντίστοιχης διεργασίας. Η δομή της αυτοσυσχέτισης αναπαράγεται μέσω ενός στάσιμου μοντέλου συμμετρικά κινούμενων μέσων όρων (SMA), οι παράμετροι του οποίου εκτιμώνται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των ετήσιων δειγμάτων. Το μοντέλο SMA έχει γενικευτεί ώστε να προσαρμόζεται σε πολυμεταβλητά σχήματα προσομοίωσης, και χρησιμοποιείται για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών σε όλες τις θέσεις και για όλον τον χρονικό ορίζοντα της προσομοίωσης. Για τη στοχαστική προσομοίωση των μηνιαίων μεταβλητών χρησιμοποιείται ως βάση ένα περιοδικό μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης, το PAR(1), διατυπωμένο ως πολυμεταβλητό. Οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμώνται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των μηνιαίων ιστορικών χρονοσειρών. Η γέννηση των μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών, η οποία προϋποθέτει να έχει ολοκληρωθεί η παραγωγή των ετήσιων συνθετικών τιμών, γίνεται σε δύο φάσεις. Αρχικά, για κάθε ένα έτος ξεχωριστά, γεννώνται 12 μηνιαίες τιμές μέσω του PAR(1), που προφανώς δεν είναι συνεπείς με τις αντίστοιχες ετήσιες. Για την αποκατάσταση της συνέπειας, εφαρμόζεται μια διαδικασία γραμμικής αναγωγής, μέσω της οποίας οι μηνιαίες συνθετικές τιμές διορθώνονται, ώστε συναθροιζόμενες να ισούνται με την αντίστοιχη ετήσια. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα έτη, οπότε προκύπτει ένα τελικό συνθετικό δείγμα μηνιαίων τιμών που είναι συνεπές με το ετήσιο, το οποίο έχει προκύψει με εφαρμογή του μοντέλου SMA, αναπαράγοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το ιδιαίτερα κρίσιμο φαινόμενο της εμμονής.



Σχήμα 7.2: Διάγραμμα ροής σχήματος γέννησης συνθετικών χρονοσειρών για την στοχαστική προσομοίωση συστημάτων υδατικών πόρων σε μηνιαία χρονική κλίμακα, για n συνολικά έτη.

7.3.2 Μεθοδολογία αναπαγωγής της εμμονής

Η ύπαρξης μακροπρόθεσμης εμμονής (persistence) στις γεωφυσικές διεργασίες ανακαλύφθηκε από τον Hurst (1951). Στην υδρολογία, το φαινόμενο της εμμονής (γνωστό και ως φαινόμενο Hurst) αναφέρεται στην ιδιότητα των υγρών και ξηρών ετών να εμφανίζονται κατά ομάδες, και φαίνεται ότι σχετίζεται με την εμφάνιση παρατεταμένων ξηρασιών, καθώς και την εμφάνιση υδροκλιματικών αλλαγών (Evans, 1996· Koutsoyiannis, 2003). Σχετικά με τους μηχανισμούς γέννησης του φαινομένου, θεωρείται ότι οφείλει την ύπαρξή του στην ταυτόχρονη εμφάνιση πολλαπλών τυχαίων διαταραχών στα μέσα στατιστικά χαρακτηριστικά των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών, σε διάφορες χρονικές κλίμακες (Koutsoyiannis, 2002, 2003).

Ο εμπειρικός εντοπισμός της ύπαρξης μακροπρόθεσμης εμμονής σε μια χρονοσειρά γίνεται, μεταξύ άλλων, με την κατασκευή του δειγματικού αυτοσυσχετογράμματος. Εφόσον η χρονοσειρά έχει εμμονή, το διάγραμμα παρουσιάζει την χαρακτηριστική μορφή πλατειάς ουράς, ενώ, αντίθετα, αν η χρονοσειρά δεν έχει εμμονή, το διάγραμμα φθίνει πολύ γρήγορα προς το μηδέν. Κατά συνέπεια, το σχήμα του αυτοσυσχετογράμματος αποτελεί ισχυρή ένδειξη της ύπαρξης ή όχι εμμονής.

Για την μαθηματική περιγραφή της εμμονής αναπτύχθηκε μια γενικευμένη μεθοδολογία, που σε αντίθεση με τα υφιστάμενα αναλυτικά μοντέλα (FGN, FFGN, broken line) είναι απλή στην εφαρμογή της και άμεσα προσαρμόσιμη σε πολυμεταβλητά σχήματα. Έστω η στάσιμη στοχαστική ανέλιξη X_i σε διακριτό χρόνο (π.χ. έτος) i , με αυτοσυνδιασπορά:

$$\gamma_j = \text{Cov} [X_i, X_{i+j}] \quad (7.1)$$

Δεδομένου ότι το μήκος ενός υδρολογικού δείγματος είναι κατά κανόνα μικρό (της τάξης των μερικών δεκάδων ετών), μόνο οι πρώτες τιμές των αυτοσυνδιασπορών μπορούν να εκτιμηθούν με

αποδεκτή ακρίβεια. Επιπλέον, οι δειγματικές εκτιμήσεις της αυτοσυνδιασποράς εισάγουν σημαντική αρνητική μεροληψία, με αποτέλεσμα να φθίνουν γρήγορα συναρτήσει του χρόνου (Koutsoyiannis, 2003). Αυτό μπορεί να οδηγήσει στο λανθασμένο συμπέρασμα ότι τα γ_j μηδενίζονται γρήγορα και, συνεπώς, η μνήμη της ανέλιξης είναι μικρή, ενώ κάτι τέτοιο μπορεί να μην ισχύει. Για τους παραπάνω λόγους, η ακολουθία των γ_j , δεν προκύπτει με βάση το εμπειρικό αυτοσυσχετόγραμμα αλλά παράγεται με εφαρμογή της θεωρητικής συνάρτησης (Koutsoyiannis, 2000):

$$\gamma_j = \gamma_0 [1 + \kappa \beta j]^{-1/\beta} \quad (7.2)$$

όπου κ και β παράμετροι. Η παράμετρος κ περιγράφει το σχήμα της συνάρτησης αυτοσυνδιασποράς, ενώ η παράμετρος β σχετίζεται άμεσα με την εμμονή της στοχαστικής ανέλιξης. Επιλέγοντας κατάλληλες τιμές των παραμέτρων β και κ μπορεί να παραχθεί ένα ευρύ φάσμα στοχαστικών δομών, οι οποίες περιγράφουν διεργασίες βραχείας (τύπου ARMA) έως μακράς μνήμης (τύπου FGN). Στο πρόγραμμα υποστηρίζεται και η δυνατότητα αυτόματης εκτίμησης της μίας ή και των δύο των παραμέτρων, με προσαρμογή του θεωρητικού αυτοσυσχετογράμματος στο εμπειρικό.

7.3.3 Γέννηση ετήσιων χρονοσειρών

Αποδεικνύεται ότι μια στοχαστική ανέλιξη X_i με γνωστή ακολουθία αυτοσυνδιασπορών γ_j , η οποία περιγράφεται από την δομή (7.2), μπορεί να αναπαραχθεί μέσω ενός στάσιμου μοντέλου *συμμετρικά κινούμενων μέσων όρων* (SMA, symmetric moving average) της μορφής (Koutsoyiannis, 2000):

$$X_i = \sum_{j=-s}^s \alpha_{|j|} V_{i+j} = \alpha_s V_{i-s} + \dots + \alpha_1 V_{i-1} + \alpha_0 V_i + \alpha_1 V_{i+1} + \dots + \alpha_s V_{i+s} \quad (7.3)$$

όπου α_j συντελεστές στάθμισης και V_i μεταβλητές ανανέωσης (λευκός θόρυβος), που θεωρείται ότι είναι στοχαστικά ανεξάρτητες μεταξύ τους και έχουν μοναδιαία διασπορά. Οι συντελεστές α_j συνδέονται με τις αυτοσυνδιασπορές γ_j μέσω ενός συστήματος $2s+1$ εξισώσεων της μορφής:

$$\gamma_i = \sum_{j=-s}^{s-i} \alpha_{|j|} \alpha_{|i+j|} \quad (7.4)$$

Το παραπάνω σύστημα έχει κλειστή (αναλυτική) λύση, και μάλιστα εξαιρετικά γρήγορη από υπολογιστική άποψη, μέσω του *ταχύ μετασχηματισμού Fourier* (FFT, fast Fourier transform). Εναλλακτικά, η εκτίμηση των συντελεστών α_j μπορεί να γίνει αριθμητικά.

Ο Koutsoyiannis (2000) γενίκευσε το μοντέλο SMA, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί για την ταυτόχρονη γέννηση m μεταβλητών που είναι στοχαστικά εξαρτημένες. Αυτό γίνεται εύκολα, με την παραγωγή συσχετισμένου (πολυμεταβλητού) λευκού θορύβου της μορφής:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{b} \mathbf{W}_i \quad (7.5)$$

όπου $\mathbf{W}_i = (W_i^1, \dots, W_i^m)^T$ διάνυσμα m στοχαστικά ανεξάρτητων μεταβλητών μοναδιαίας διασποράς, και \mathbf{b} μητρώο διαστάσεων $m \times m$ τέτοιο ώστε:

$$\mathbf{b} \mathbf{b}^T = \mathbf{c} \quad (7.6)$$

όπου \mathbf{c} μητρώο $m \times m$, κάθε στοιχείο του οποίου υπολογίζεται από την σχέση:

$$c^{lk} = \frac{\text{Cov}[X^l, X^k]}{\sum_{r=-s}^s \alpha_{|r|}^l \alpha_{|r|}^k} \quad (7.7)$$

Για κάθε έτος i , οι τυχαίες μεταβλητές \mathbf{W}_i παράγονται μέσω μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών γάμα κατανομής, ενώ τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους, ήτοι οι μέσες τιμές, $\boldsymbol{\mu}_w$, και οι συντελεστές ασυμμετρίας, $\boldsymbol{\xi}_w$, εκτιμώνται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\mu}_w &= \mathbf{b}^{-1} \boldsymbol{\mu}_v \\ \boldsymbol{\xi}_w &= (\mathbf{b}^{(3)})^{-1} \boldsymbol{\xi}_v\end{aligned}\quad (7.8)$$

όπου $\mathbf{b}^{(3)}$ μητρώο που περιέχει τους κύβους των στοιχείων του \mathbf{b} .

7.3.4 Γέννηση μηνιαίων χρονοσειρών

Δεδομένου ότι η μακροπρόθεσμη εμμονή των υδρολογικών διεργασιών αναπαράγεται στην ετήσια κλίμακα μέσω της (7.3), η έμφαση στην μηνιαία χρονική κλίμακα δίνεται στην αναπαράγωγή της περιοδικότητας που χαρακτηρίζει τις εν λόγω διεργασίες. Οι μηνιαίες χρονοσειρές γεννώνται μέσω ενός πολυμεταβλητού μοντέλου αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης, PAR(1), ήτοι:

$$\mathbf{X}_\tau = \mathbf{a}_\tau \mathbf{X}_{\tau-1} + \mathbf{b}_\tau \mathbf{V}_\tau \quad (7.9)$$

όπου τ ο δείκτης του μήνα, \mathbf{a}_τ , \mathbf{b}_τ μητρώα παραμέτρων και \mathbf{V}_τ διάνυσμα στοχαστικά ανεξάρτητων μεταβλητών (λευκός θόρυβος), μοναδιαίας διασποράς. Το μητρώο \mathbf{a}_τ διατυπώνεται ως διαγώνιο και περιέχει τους συντελεστές αυτοσυσχέτισης υστέρησης 1, ενώ το μητρώο \mathbf{b}_τ υπολογίζεται ως:

$$\mathbf{b}_\tau \mathbf{b}_\tau^T = \text{Cov}[\mathbf{X}_\tau, \mathbf{X}_\tau] - \mathbf{a}_\tau \text{Cov}[\mathbf{X}_{\tau-1}, \mathbf{X}_{\tau-1}] \mathbf{a}_\tau^T \quad (7.10)$$

Οι τυχαίες μεταβλητές \mathbf{V}_τ παράγονται μέσω μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών που ακολουθούν κατανομή γάμα τριών παραμέτρων. Οι εν λόγω παράμετροι εκτιμώνται συναρτήσει των περιθώριων στατιστικών χαρακτηριστικών των \mathbf{V}_τ . Οι μέσες τιμές των \mathbf{V}_τ υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$E[\mathbf{V}_\tau] = \mathbf{b}_\tau^{-1} \{E[\mathbf{X}_\tau] - \mathbf{a}_\tau E[\mathbf{X}_{\tau-1}]\} \quad (7.11)$$

Οι διασπορές των \mathbf{V}_τ είναι εξ ορισμού ίσες με τη μονάδα, ενώ οι τρίτες ροπές, που σχετίζονται με την ασυμμετρία των \mathbf{V}_τ , υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\mu_3[\mathbf{V}_\tau] = (\mathbf{b}^{(3)})_\tau^{-1} \{\mu_3[\mathbf{X}_\tau] - \mathbf{a}_\tau^{(3)} \mu_3[\mathbf{X}_{\tau-1}]\} \quad (7.12)$$

7.3.5 Αποκατάσταση συνέπειας μηνιαίων χρονοσειρών

Η διαδικασία γέννησης των μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών είναι εντελώς ανεξάρτητη από την γέννηση των ετήσιων συνθετικών τιμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή χρονοσειρών που είναι ασυνεπείς μεταξύ τους, καθώς με την συνάθροιση των μηνιαίων χρονοσειρών κατά έτος δεν προκύπτουν αθροίσματα που να ταυτίζονται με τις αντίστοιχες συνθετικές τιμές. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται μέσω μιας διαδικασίας *επιμερισμού* (disaggregation), που αναπτύχθηκε από τους *Koutsoyiannis and Manetas* (1996) και *Koutsoyiannis* (2001), για σχήματα μιας μεταβλητής. Θεωρώντας γνωστή την ετήσια τιμή Z , παράγεται μέσω του PAR(1) μια ακολουθία 12 βοηθητικών μηνιαίων τιμών \tilde{X}_τ , που ακολούθως διορθώνονται με εφαρμογή του γραμμικού μετασχηματισμού:

$$X_\tau = \tilde{X}_\tau + \lambda_\tau (Z - \tilde{Z}) \quad (7.13)$$

όπου \tilde{Z} το ετήσιο άθροισμα των \tilde{X}_τ , και λ_τ συντελεστής αναγωγής που δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_\tau = \frac{\sum_{j=1}^{12} \sigma_{\tau j}}{\sum_{\tau=1}^{12} \sum_{j=1}^{12} \sigma_{\tau j}} \quad (7.14)$$

Η παραπάνω μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για οποιαδήποτε κατανομή των μεταβλητών χαμηλού επιπέδου X_τ , αναπαράγοντας πλήρως τις μέσες τιμές και το μητρώο συνδιασπορών του ιστορικού δείγματος. Ωστόσο, η διαδικασία αναγωγής μεταβάλλει ορισμένα στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών, και συγκεκριμένα τις ασυμμετρίες και τις ετεροσυσχετίσεις, που

κατά κανόνα υπεκτιμώνται. Για τον λόγο αυτό, ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία τύπου Monte Carlo, με σκοπό την εξομάλυνση των αποκλίσεων που παρατηρούνται μεταξύ των στατιστικών χαρακτηριστικών της βοηθητικής και ανηγμένης μηνιαίας συνθετικής χρονοσειράς. Η διαδικασία αποσκοπεί στην εύρεση μιας στατιστικά ανεξάρτητης ακολουθίας μηνιαίων μεταβλητών, η οποία προσεγγίζει όσο το δυνατόν την ετήσια τιμή, έτσι ώστε η διαδικασία επιμερισμού να μην αλλοιώνει σημαντικά τα χαρακτηριστικά της αρχικής χρονοσειράς (Koutsoyiannis and Manetas, 1996).

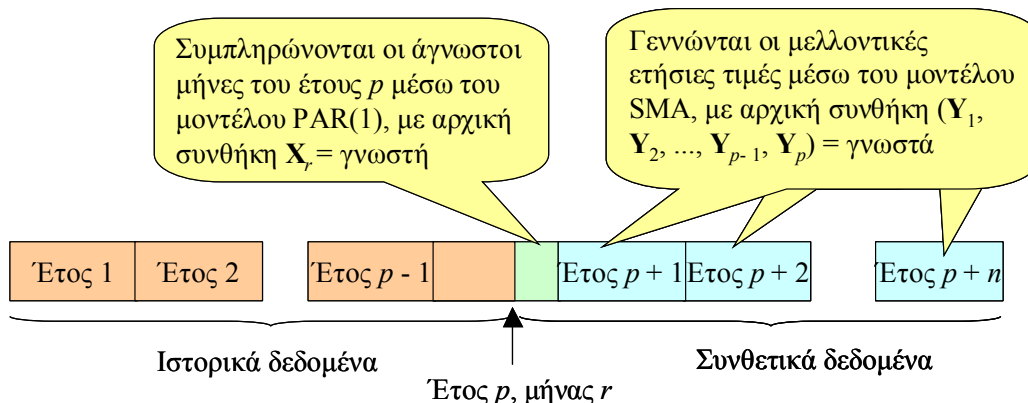
7.3.6 Γέννηση χρονοσειρών υπό μορφή πρόγνωσης

Το σχήμα SMA γενικεύεται ως μοντέλο στοχαστικής πρόγνωσης, με εφαρμογή μιας διαδικασίας αναγωγής (Koutsoyiannis, 2000). Αρχικά, γεννάται μια χρονοσειρά ετήσιων μεταβλητών \tilde{X}_i , για το διάστημα από $i = -k$ έως $i = -n$, όπου το k το πλήθος των ετών για τα οποία διατίθεται ιστορικό δείγμα και n ο ορίζοντας της πρόγνωσης. Έστω $\mathbf{Y} = [X_0, X_{-1}, \dots, X_{-k}]^T$ το διάνυσμα των γνωστών (ιστορικών) τιμών και έστω $\tilde{\mathbf{Y}} = [\tilde{X}_0, \tilde{X}_{-1}, \dots, \tilde{X}_{-k}]^T$ το τμήμα της ακολουθίας των \tilde{X}_i που αναφέρεται στο παρελθόν. Αποδεικνύεται ότι ο γραμμικός μετασχηματισμός:

$$X_i = \tilde{X}_i + \mathbf{n}_i^T \mathbf{h}^{-1} (\mathbf{Y} - \tilde{\mathbf{Y}}) \quad (7.15)$$

όπου $\mathbf{n}_i^T = \text{Cov} [\tilde{X}_i, \tilde{\mathbf{Y}}]$ και $\mathbf{h} = \text{Cov} [\tilde{\mathbf{Y}}, \tilde{\mathbf{Y}}]$ διατηρεί την μέση τιμή και ακολουθία αυτοσυνδιασπορών των ιστορικών τιμών, \tilde{X}_i . Συνεπώς, για κάθε μελλοντική χρονική περίοδο $i > 0$, ορίζονται τα στοιχεία του διανύσματος \mathbf{n}_i και διορθώνεται η τιμή της αντίστοιχης ετήσιας μεταβλητής X_i , μέσω της (7.15)

Στο Σχήμα 7.3 απεικονίζεται η γενική μεθοδολογία πρόγνωσης. Έστω ότι κατά τον μήνα r του έτους p είναι γνωστή η ακολουθία των πραγματοποιήσεων των υδρολογικών μεταβλητών, ήτοι τα διανύσματα των ιστορικών ετήσιων τιμών μέχρι το έτος $p - 1$ και όλων των μηνιαίων τιμών του τρέχοντος έτους p μέχρι τον μήνα r . Με βάση την επίκαιρη μηνιαία τιμή \mathbf{X}_r , συμπληρώνεται το τρέχον υδρολογικό έτος, με εφαρμογή του σχήματος γέννησης PAR(1). Η τιμή που προκύπτει, μαζί με τις $p - 1$ προηγούμενες, θεωρούνται γνωστές και εισάγονται στο σχήμα γέννησης ετήσιων χρονοσειρών ως δέσμευση. Μετά την παραγωγή των μελλοντικών ετήσιων τιμών, γεννώνται οι αντίστοιχες μηνιαίες με εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στα εδάφια 7.3.4 και 7.3.5.



Σχήμα 7.4: Απεικόνιση της διαδικασίας γέννησης συνθετικών χρονοσειρών υπό μορφή πρόγνωσης.

7.3.7 Μεθοδολογία αποσύνθεσης μητρώων συνδιασπορών

Η παραγωγή συσχετισμένου λευκού θορύβου, τόσο στα πλαίσια της γέννησης των ετήσιων όσο και των μηνιαίων μεταβλητών, προϋποθέτει την επίλυση μιας μητρωικής εξίσωσης της μορφής:

$$\mathbf{c} = \mathbf{b} \mathbf{b}^T \quad (7.16)$$

όπου \mathbf{c} ένα $m \times m$ μητρώο που περιέχει τις συνδιασπορές (αυτοσυσχετίσεις και ετεροσυσχετίσεις) των ιστορικών δειγμάτων, και \mathbf{b} μητρώο παραμέτρων, του οποίου ζητείται ο προσδιορισμός. Το πρόβλημα έχει άπειρες λύσεις, εφόσον το \mathbf{c} είναι θετικά ορισμένο και καμία λύση, διαφορετικά. Ακόμη και αν μπορεί να βρεθεί μια λύση μέσω τυπικών μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης (π.χ. κατά Cholesky ή Jacobi), ενδέχεται να οδηγεί σε υπερβολικά υψηλές τιμές ασυμμετρίας των τυχαίων όρων, που είναι αδύνατο να αναπαραχθούν μέσω των υφιστάμενων γεννητριών γάμα κατανομής. Ο Koutsoyiannis (1999) ανέπτυξε μια μέθοδο, βάσει την οποίας μπορεί πάντοτε να υπολογιστεί ένα μητρώο \mathbf{b} (ανεξάρτητα αν το μητρώο συνδιασπορών είναι ή όχι θετικά ορισμένο), τέτοιο ώστε να αναπαράγονται κατά τον βέλτιστο τρόπο τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος. Η μέθοδος είναι κοινή είτε πρόκειται για το στάσιμο μοντέλο SMA είτε για το κυκλοστάσιμο PAR(1), και έγκειται στην διατύπωση της (7.16) ως προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης.

7.3.8 Παραγωγή τυχαίων αριθμών

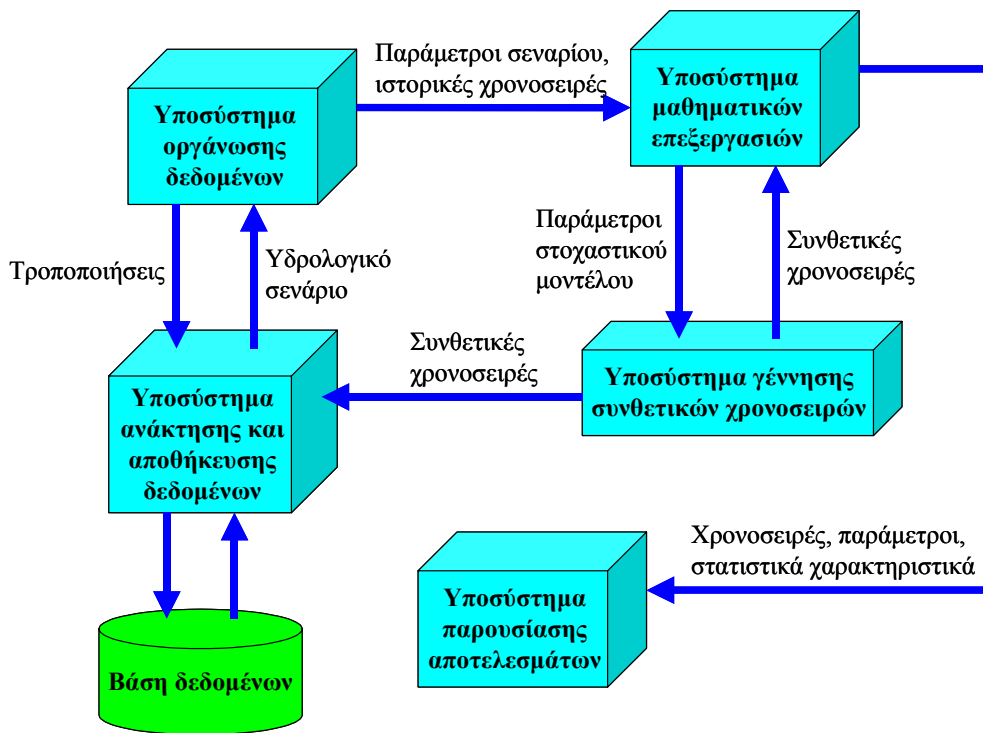
Η εφαρμογή ενός στοχαστικού μοντέλου απαιτεί την παραγωγή τυχαίων αριθμών που ακολουθούν μια συγκεκριμένη κατανομή πιθανοτήτων, η επιλογή της οποίας είναι άμεσα εξαρτημένη από τα περιθώρια στατιστικά χαρακτηριστικά του ιστορικού δείγματος (μέση τιμή, διασπορά, ασυμμετρία). Για την προσομοίωση των τυχαίων όρων \mathbf{W} και \mathbf{V} του ετήσιου και μηνιαίου σχήματος γέννησης, αντίστοιχα, χρησιμοποιείται η κατανομή γάμα τριών παραμέτρων (Pearson III), που είναι από τις πιο διαδεδομένες στατιστικές κατανομές της τεχνικής υδρολογίας, καθώς είναι συμβατή με τις πιο χαρακτηριστικές υδρολογικές διεργασίες, όπως είναι οι μηνιαίες και ετήσιες βροχοπτώσεις και απορροές (Κουτσογιάννης, 1997, σ. 151). Στα πλαίσια του έργου, υλοποιήθηκαν τρεις γεννήτριες αριθμών γάμα κατανομής, και επελέγη εκείνη που υπερτερεί τόσο σε ακρίβεια όσο και σε ταχύτητα.

7.4 Σχεδιασμός υπολογιστικού συστήματος

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που περιγράφηκε στην ενότητα 7.3 υλοποιήθηκε σε ενιαίο υπολογιστικό σύστημα, με την ονομασία *Κασταλία*, ο σχεδιασμός του οποίου έγινε με βάση τις προδιαγραφές της ανάλυσης απαιτήσεων (Καραβοκυρός κ.ά., 2000). Η *Κασταλία* λειτουργεί σε περιβάλλον Windows, ενώ η ανάπτυξη του λογισμικού έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Object Pascal/Delphi. Οι λειτουργίες που επιτελεί το πρόγραμμα είναι:

- Ανάκτηση ιστορικών και διαχείριση συνθετικών χρονοσειρών·
- Υπολογισμός στατιστικών χαρακτηριστικών ιστορικών δεδομένων και εκτίμηση παραμέτρων στοχαστικών μοντέλων·
- Γέννηση ετήσιων και μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών σε μία ή περισσότερες θέσεις·
- Παρουσίαση υπό μορφή πινάκων και γραφημάτων των χρονοσειρών, των στατιστικών μεγεθών τους και των παραμέτρων του μοντέλου.

Η βασική οντότητα της *Κασταλίας* είναι το υδρολογικό σενάριο, ήτοι το σύνολο των δεδομένων και πληροφοριών που συνιστούν ένα πλήρες πρόβλημα σύνθεσης χρονοσειρών. Κάθε σενάριο περιλαμβάνει μία τουλάχιστον μεταβλητή, που αναφέρεται σε συγκεκριμένη υδρολογική διεργασία και σε συγκεκριμένη γεωγραφική οντότητα. Κάθε μεταβλητή μπορεί να αναφέρεται το πολύ σε μία ιστορική χρονοσειρά, ενώ αντίθετα μια χρονοσειρά μπορεί να αντιστοιχεί σε περισσότερες από μία μεταβλητές, υπό την προϋπόθεση ότι κάθε μία ανήκει σε διαφορετικό σενάριο. Τέλος, σε κάθε μεταβλητή αντιστοιχεί μία ή περισσότερες συνθετικές χρονοσειρές. Στο Σχήμα 7.5 απεικονίζονται η αρχιτεκτονική δομή και οι συνιστώσες (υποσυστήματα) του προγράμματος.



Σχήμα 7.5: Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός και υποσυστήματα *Κασταλίας*.

Η επιχειρησιακή έκδοση της *Κασταλίας* υποστηρίζεται από την κεντρική βάση δεδομένων του έργου. Το πρόγραμμα αποτελείται από πέντε υποσυστήματα. Σε μια τυπική *σύνοδο* (session), ο χρήστης είτε επιλέγει ένα υφιστάμενο υδρολογικό σενάριο είτε δημιουργεί ένα νέο σενάριο. Από την κεντρική βάση δεδομένων ανακτώνται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την εκτέλεση μιας ολοκληρωμένης εφαρμογής, δηλαδή οι παράμετροι του υδρολογικού σεναρίου καθώς και οι ιστορικές χρονοσειρές στις οποίες αναφέρεται το σενάριο. Ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τις παραμέτρους του σεναρίου, μέσω του υποσυστήματος οργάνωσης δεδομένων. Μετά την ανάκτηση των δεδομένων ή τις τροποποιήσεις τους, το πρόγραμμα εκτελεί διάφορες μαθηματικές επεξεργασίες για την εκτίμηση των παραμέτρων του στοχαστικού μοντέλου. Στη συνέχεια ο χρήστης μπορεί να ζητήσει την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών και να οπτικοποιήσει τα δεδομένα και τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά, μέσω του υποσυστήματος παρουσίασης αποτελεσμάτων. Μετά το πέρας της συνόδου, οι συνθετικές χρονοσειρές μπορούν να αποθηκευτούν στη βάση δεδομένων, ώστε να είναι διαθέσιμες από άλλες εφαρμογές. Σε κανένα στάδιο δεν απαιτείται επέμβαση του χρήστη στα στοιχεία της βάσης, καθώς η διαχείριση των δεδομένων πραγματοποιούνται αποκλειστικά μέσω του προγράμματος.

7.5 Πλαίσιο επιχειρησιακής εφαρμογής συστήματος

7.5.1 Γέννηση χρονοσειρών για προσομοίωση μόνιμης κατάστασης

Το πρόβλημα συνίσταται στη γέννηση συνθετικών εισροών (ήτοι χρονοσειρών απορροής και βροχόπτωσης) των τεσσάρων ταμιευτήρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, για την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Στην προσομοίωση μόνιμης κατάστασης, οι συνθετικές χρονοσειρές έχουν μεγάλο μήκος, που είναι σε σημαντικό βαθμό εξαρτώμενο από το όριο αξιοπιστίας που τίθεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η ζητούμενη αξιοπιστία, τόσο μεγαλύτερος οφείλει να είναι ο χρονικός ορίζοντας της προσομοίωσης. Για το σύστημα της Αθήνας, το όριο αξιοπιστίας που επιβάλλεται είναι πολύ υψηλό, της τάξης του 99%, που σημαίνει ότι, κατά

μέσο όρο, η ζήτηση νερού θα πρέπει να ικανοποιείται απολύτως στα 99 από τα 100 χρόνια. Προφανώς, για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα απαιτείται η προσομοίωση αρκετών εκατοντάδων ετών. Δεδομένων και των χρονικών περιορισμών που οφείλονται στον υπολογιστικό φόρτο του μοντέλου λειτουργικής προσομοίωσης, εκτιμάται ότι ένα μήκος 2000 ετών είναι επαρκές για την εκτίμηση τέτοιων ακραίων επιπέδων αξιοπιστίας, με ικανοποιητική ακρίβεια αλλά και ταχύτητα. Συνεπώς, για την εύρεση της πολιτικής διαχείρισης που εξασφαλίζει αξιοπιστία 99%, πραγματοποιούνται 2000 προσομοιώσεις ενός ετήσιου κύκλου λειτουργίας του συστήματος ταμειωτήρων της Αθήνας. Η εν λόγω αξιοπιστία προϋποθέτει πλήρη επάρκεια υδατικών πόρων για την κάλυψη της ζήτησης σε τουλάχιστον 1980 από τα 2000 προσομοιωμένα έτη.

Ο καθορισμός της παραμέτρου εμμονής της θεωρητικής συνάρτησης αυτοσυνδιασποράς (7.2) αποτέλεσε αντικείμενο ιδιαίτερης διερεύνησης, δεδομένου ότι επηρεάζει άμεσα την επίδοση του υδροσυστήματος. Η υποεκτίμηση της εμμονής έχει ως συνέπεια την γέννηση υπερβολικά ευνοϊκών εισροών, με συνέπεια την υπερεκτίμηση της αξιοπιστίας του συστήματος (αυτό συμβαίνει επειδή η δυνατότητα υπερετήσιας ρύθμισης του συστήματος εξομαλύνει την εμφάνιση ετών χαμηλών εισροών που εναλλάσσονται με έτη υψηλής υδροφορίας). Αντίθετα, η υπερεκτίμηση της εμμονής έχει ως συνέπεια την γέννηση υπερβολικά δυσμενών εισροών, με συνέπεια την υποεκτίμηση της αξιοπιστίας του συστήματος και την αδικαιολόγητη αύξηση του κόστους λειτουργίας του, δεδομένου ότι η συνεχής εμφάνιση μακροχρόνιων ξηρασιών θα «αναγκάζει» το μοντέλο να επιβάλλει υπερβολικές αντλήσεις. Μετά από ανάλυση των εμπειρικών αυτοσυσχετογραμμάτων των μεγάλου μήκους υδρολογικών δειγμάτων της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, επελέγη η τιμή $\beta = 2$, που θεωρείται κοινή για όλες τις μεταβλητές του στοχαστικού μοντέλου.

7.5.2 Γέννηση σεναρίων στοχαστικής πρόγνωσης

Η επιχειρησιακή διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας συνίσταται στην εκπόνηση σχεδίου διαχείρισης των υδατικών πόρων, στο οποίο καθορίζεται η πολιτική λειτουργίας του υδροσυστήματος για το τρέχον υδρολογικό έτος. Η εν λόγω πολιτική επιλέγεται με βάση τα σενάρια απολήψεων που προκύπτουν με εφαρμογή του μοντέλου στοχαστικής ανάλυσης του υδροσυστήματος υπό μορφή καταληκτικής προσομοίωσης, λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη τις επίκαιρες συνθήκες υδροφορίας και αποθεμάτων, την προβλεπόμενη εξέλιξη της ζήτησης καθώς και τυχόν τροποποιήσεις στο σχήμα του υδροσυστήματος, λόγω βλαβών ή και προσθήκης νέων έργων. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται με βάση τις επίκαιρες συνθήκες ενδέχεται να επηρεάσουν την βιωσιμότητα των υδατικών πόρων για χρονικό ορίζοντα αρκετά μεγαλύτερο του υδρολογικού έτους. Στο συγκεκριμένο υδροδοτικό σύστημα, ως ασφαλής χρονικός ορίζοντας θεωρείται η δεκαετία. Κατά συνέπεια, το μήκος των χρονοσειρών πρόγνωσης είναι ίσο με δέκα έτη, με έναρξη την αρχή του τρέχοντος υδρολογικού έτους. Δεδομένου του υπολογιστικού φόρτου της προσομοίωσης, κρίνεται επαρκής η παραγωγή 200 τέτοιων σειρών, που εκφράζουν ισοπίθανες τροχιές εξέλιξης των εισροών.

Είναι προφανές ότι ο χρονικός ορίζοντας της δεκαετίας είναι υπερβολικά μεγάλος για τον καθορισμό συγκεκριμένης σταθερής πολιτικής διαχείρισης, χωρίς δυνατότητα αναθεώρησής της. Αυτό συμβαίνει επειδή οι δυνατότητες πρόγνωσης της εξέλιξης των υδατικών αποθεμάτων αλλά και της ζήτησης είναι περιορισμένες, λόγω εγγενών φυσικών και ανθρώπινων αβεβαιοτήτων. Συνεπώς, προτείνεται η ετήσια αναθεώρηση του σχεδίου διαχείρισης, με δυνατότητες επικαιροποίησης και σε ενδιάμεσα διαστήματα, εφόσον παραστεί ιδιαίτερη ανάγκη, όπως μια βλάβη που αναμένεται να διαρκέσει αρκετούς μήνες. Η επικαιροποίηση εντός του υδρολογικού έτους έχει νόημα να γίνεται αφού έχουν παρέλθει ορισμένοι μήνες, ώστε να υπάρχει μια εικόνα σχετικά με την εξέλιξη της υδροφορίας του τρέχοντος έτους που να είναι στατιστικά αξιοποιήσιμη. Ως πλέον κατάλληλες περιόδους επικαιροποίησης του σχεδίου διαχείρισης θεωρούνται η αρχή της εαρινής και η αρχή της θερινής περιόδου (Μάρτιος και Ιούνιος).

8 Υδρονομέας (έκδοση 3.2) - Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων

8.1 Στόχοι ανάπτυξης του Υδρονομέα

8.1.1 Περιγραφή του ερευνητικού αντικειμένου

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά το υπολογιστικό σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης υδατικών πόρων *Υδρονομέας* στην έκδοση 3.2. Το εν λόγω σύστημα αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, με σκοπό την υποστήριξη της ΕΥΔΑΠ στη διαδικασία λήψης σχετικών αποφάσεων.

Το υπολογιστικό σύστημα προσομοιώνει ένα μοντέλο του συστήματος υδροδότησης της Αθήνας, που αντιστοιχεί στο σύστημα εξωτερικών υδραγωγείων της ΕΥΔΑΠ και, σε πολύ μικρότερο βαθμό, σε αρχικούς κλάδους του εσωτερικού υδραγωγείου.

8.1.2 Δεύτερη έκδοση

Η δεύτερη έκδοση του *Υδρονομέα* (έκδοση 2.1) αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ίδιου ερευνητικού έργου και παραδόθηκε στην ΕΥΔΑΠ στο τέλος της 1ης φάσης, τον Δεκέμβριο του 2000 (*Καραβοκυρός κ.ά.*, 2000a). Αποτέλεσε την μετεξέλιξη μιας πρώτης έκδοσης που είχε αναπτυχθεί από την ίδια ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ στα έτη 1997-1998 στα πλαίσια της τρίτης φάσης του ερευνητικού έργου *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*. Το έργο αυτό είχε χρηματοδοτηθεί από τη Διεύθυνση Ύδρευσης και Αποχέτευσης του ΥΠΕΧΩΔΕ (*Καραβοκυρός κ.ά.*, 1999).

Η μετεξέλιξη αυτή του *Υδρονομέα* ήταν αναγκαία ώστε να ανταποκριθεί στις αυξημένες απαιτήσεις που τίθενται σε ένα Σύστημα Υποστήριξης της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, όπως αυτές καταγράφηκαν στο σχετικό τεύχος ανάλυσης απαιτήσεων (*Καραβοκυρός κ.ά.*, 2000b). Παράλληλα ο *Υδρονομέας* θα έπρεπε να διαθέτει την κατάλληλη υποδομή, ώστε να προσαρμοστεί εύκολα στις απαιτήσεις της επιχειρησιακής λειτουργίας που προβλέπονταν στη 2η φάση του έργου.

Μια πρώτη συνέπεια των παραπάνω ήταν να δοθεί κατά την πρώτη φάση του έργου ιδιαίτερη βαρύτητα στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Στόχος ήταν η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων καθώς και η προσαρμογή υφιστάμενων που επιτρέπουν την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων μέσα στα χρονικά περιθώρια που προδιαγράφονται. Για την επίτευξη του στόχου αυτού η ερευνητική ομάδα συνέχισε το θεωρητικό της έργο, που βασίζεται στο σχήμα παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση. Η μεθοδολογία παραμετροποίησης διατήρησε τον αριθμό μεταβλητών απόφασης, βάσει των οποίων πραγματοποιείται η κατανομή της ζήτησης νερού στους υδατικούς πόρους, σε χαμηλά επίπεδα. Μια νέα μέθοδος μετασχηματισμού του μοντέλου του υδροσυστήματος σε διγράφο που επινοήθηκε ανήγαγε το πρόβλημα προσομοίωσης της μεταφοράς του νερού στα επιμέρους υδραγωγεία σε τυπικό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο επιλύεται με γνωστές και εξαιρετικά ταχείες μαθηματικές τεχνικές.

Παράλληλα, έγινε αναγωγή του προβλήματος εύρεσης του κατάλληλου κανόνα διαχείρισης του συστήματος, όπως διατυπώνεται από τους *Nalbantis and Koutsoyiannis* (1997), σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Εδώ, βασικός στόχος του παρόντος ερευνητικού έργου ήταν η επιλογή, ύστερα από δοκιμές, ενός αξιόπιστου και αποδοτικού αλγορίθμου επίλυσης αναλόγων προβλημάτων και η προσαρμογή του στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

Η δεύτερη έκδοση του *Υδρονομέα* είχε εξ αρχής συγκεκριμένο αντικείμενο εφαρμογής, δηλαδή το σύστημα υδροδότησης της Αθήνας. Αυτό είχε ως συνέπεια την προσαρμογή του σχεδιασμού του υπολογιστικού συστήματος στις απαιτήσεις του πολύπλοκου συστήματος εξωτερικών υδραγωγείων που διαχειρίζεται η ΕΥΔΑΠ και την ακριβέστερη απεικόνιση του υδροσυστήματος σε μοντέλο. Σε σχέση με παλαιότερα μοντέλα υδροσυστήματος που είχαν χρησιμοποιηθεί, οι βασικότερες αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία με τους αρμόδιους παράγοντες της ΕΥΔΑΠ είναι οι ακόλουθες:

- Εισαγωγή των γεωτρήσεων ως εφεδρικών υδατικών πόρων στο μοντέλο. Η λειτουργία των ανυψωτικών αντλιοστασίων μπορεί να προσαρμοσθεί στη διαχείριση που καθορίζεται από το εκάστοτε σενάριο.
- Τροποποίηση της λειτουργίας των αντλιοστασίων απόληψης νερού από την Υλίκη στο μοντέλο, ώστε να εξαρτάται από τη στάθμη της λίμνης.
- Προσαρμογή του μοντέλου δικτύου ώστε η λειτουργία ωστικών αντλιοστασίων να συνδέεται με την παροχή στο υδραγωγείο.
- Επέκταση του αρχικού μοντέλου του υδροσυστήματος και απεικόνιση του συνόλου των κλάδων του εσωτερικού υδραγωγείου που είναι σημαντικοί στην προσομοίωση του δικτύου.
- Εισαγωγή στο μοντέλο των μονάδων των διυλιστηρίων καθώς και των αγωγών διυλισμένου νερού που εξασφαλίζουν διασυνδέσεις μεταξύ των διυλιστηρίων.
- Κατανομή της ζήτησης σε τέσσερις τελικούς κόμβους που αντιστοιχούν στις τέσσερις βασικές περιοχές που εξυπηρετούνται από τις μονάδες επεξεργασίας νερού.

8.1.3 Τρίτη έκδοση

Η τρίτη έκδοση του *Υδρονομέα* αναπτύχθηκε στα πλαίσια της 2ης φάσης του ερευνητικού έργου, και συγκεκριμένα την περίοδο Ιανουαρίου 2001-Δεκεμβρίου 2003. Αποτελεί την επιχειρησιακή έκδοση του Συστήματος Υποστήριξης της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και συγκεντρώνει όλη την εμπειρία που αποκομίστηκε σε όλη τη διάρκεια αυτής της περιόδου από τη λειτουργία του ως βασικού λογισμικού της ΕΥΔΑΠ για την εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης του υδροσυστήματος της Αθήνας.

Σε αυτήν την έκδοση, το υπολογιστικό σύστημα συνδέθηκε με την Κεντρική Βάση Δεδομένων (ΚΒΔ) του ερευνητικού έργου. Αποτέλεσμα ήταν να καταστεί εφικτή η ανταλλαγή δεδομένων με άλλες εφαρμογές που επικοινωνούν με την ΚΒΔ. Ειδικότερα, η νέα έκδοση του *Υδρονομέα* είναι σε θέση να χρησιμοποιεί υδρολογικές χρονοσειρές που δημιουργήθηκαν από το Υπολογιστικό Σύστημα Στοχαστικής Υδρολογίας *Κασταλία* ή από το Σύστημα Επεξεργασίας Χρονοσειρών *Υδρογνώμων* και να αποθηκεύει στην ΚΒΔ τα αποτελέσματα υπολογισμών προς χρήση από άλλες εφαρμογές.

Η φιλικότητα του συστήματος με το χρήστη βελτιώθηκε με την προσθήκη δυνατότητας σχεδιασμού του μοντέλου δικτύου με γραφικό τρόπο. Κατάλληλα διαμορφωμένες φόρμες διευκολύνουν την τροποποίηση και εν συνεχεία αποθήκευση των χαρακτηριστικών των συνιστωσών του δικτύου.

Ως προς το μοντέλο, η τρίτη έκδοση του *Υδρονομέα* διακρίνεται από την δυνατότητα ακριβέστερης προσομοίωσης του υδροσυστήματος και των ιδιοτήτων του. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης παρέχει τη δυνατότητα εποχιακής μεταβολής των συντελεστών των κανόνων λειτουργίας ταμειωτήρων με αποτέλεσμα την καλύτερη προσέγγιση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος διαχείρισης. Επίσης το υπολογιστικό σύστημα λαμβάνει υπόψη όλες τις αλλαγές στο δίκτυο

(υποθετικές ή πραγματικές) που προβλέπονται από το σενάριο διαχείρισης να επέλθουν κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου (επέκταση δικτύου, παροδική βλάβη ορισμένων συνιστωσών, αύξηση παροχευτικότητας υδραγωγείων, λειτουργία νέου ταμιευτήρα κλπ.).

Στο υποσύστημα παρουσίασης αποτελεσμάτων των υπολογισμών έγιναν μια σειρά από προσθήκες και βελτιώσεις με στόχο την πληρέστερη ενημέρωση των χρηστών. Σε αυτήν την προσπάθεια σημαντική υπήρξε η βοήθεια των στελεχών της ΕΥΔΑΠ με τους οποίους συνεργάστηκε στενά η ερευνητική ομάδα του έργου.

8.2 Λειτουργίες του υπολογιστικού συστήματος

Υστερα από την εκκίνηση του *Υδρονομέα* εμφανίζεται στην οθόνη η Κύρια Φόρμα του υπολογιστικού συστήματος. Οι εκτελέσιμες λειτουργίες του συστήματος μπορούν να επιλεγούν από τους σχετικούς καταλόγους επιλογών ή με το πάτημα σχετικού εικονιδίου.

Σε μια τυπική σύνοδο (session) του *Υδρονομέα*, ο χρήστης αρχικά καλείται να πραγματοποιήσει ταυτοποίηση δίνοντας τον κωδικό πρόσβασης και το σύνθημά του. Αν και η ταυτοποίηση δεν πρέπει να είναι απαραίτητα η πρώτη ενέργεια μετά την εκκίνηση του συστήματος, οι δυνατότητες που προσφέρει το σύστημα σε μη εξουσιοδοτημένους χρήστες είναι πολύ περιορισμένες, όπως είναι η άμεση επισκόπηση από την οθόνη του υπολογιστή των οδηγιών χρήσης του *Υδρονομέα*.

Αφού ο χρήστης με την ταυτοποίηση αποκτήσει τα απαιτούμενα δικαιώματα μπορεί να προχωρήσει στην επισκόπηση των έργων που είναι αποθηκευμένα στη ΚΒΔ. Το επιλεγμένο έργο φορτώνεται στον *Υδρονομέα* και ο χρήστης μπορεί αρχικά να εμφανίσει στην οθόνη το μοντέλο του δικτύου, να επισκοπήσει τα χαρακτηριστικά των συνιστωσών του και να τροποποιήσει ορισμένα από αυτά έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στο σενάριο διαχείρισης που επιθυμεί. Εναλλακτικά, ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει το μοντέλο του δικτύου από την αρχή και κατόπιν να το αποθηκεύσει στην ΚΒΔ.

Προσομοίωση καλείται η μαθηματική μέθοδος, η οποία αναπαριστά τη λειτουργία ενός φυσικού συστήματος στο χρόνο. Στην προκειμένη περίπτωση προσομοιώνεται η λειτουργία ενός μοντέλου του συστήματος ύδρευσης της Αθήνας. Ο χρήστης μπορεί να θέσει πολλαπλούς στόχους προσομοίωσης για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα που αφορούν:

- την κάλυψη ζήτησης ύδρευσης ή άρδευσης·
- τη διακύμανση της στάθμης ταμιευτήρων μέσα σε εποχιακά διαφοροποιημένα ανώτατα και κατώτατα όρια και την αποφυγή υπερχειλίσής τους. Οι στόχοι αυτοί αφενός εξασφαλίζουν ένα ελάχιστο απόθεμα νερού και αφετέρου περιορίζουν τον κίνδυνο υπερχειλίσης·
- την ελάχιστη, μέγιστη ή σταθερή ροή σε επιλεγμένους αγωγούς του δικτύου.

Όλοι οι στόχοι εντάσσονται σε έναν κατάλογο προτεραιοτήτων σύμφωνα με τη σπουδαιότητα του καθενός. Η εποχιακή και διαχρονική μεταβολή της τιμής των στόχων, όπως είναι η ανώτατη στάθμη αποθήκευσης πλημμυρικού όγκου ταμιευτήρων και η αυξητική τάση της κατανάλωσης νερού για ύδρευση, λαμβάνονται υπόψη κατά την προσομοίωση.

Η προσομοίωση στον *Υδρονομέα* βασίζεται σε παραμετρικούς κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων. Η διαδικασία της προσομοίωσης μπορεί να αναλυθεί βήμα προς βήμα μέσω του Υποσυστήματος Δυναμικής Απεικόνισης. Παρακολουθώντας τα μεγέθη των συνιστωσών του υδροσυστήματος, όπως η στάθμη των ταμιευτήρων και η ροή στα υδραγωγεία, ο χρήστης μπορεί να ελέγξει καλύτερα τη διαδικασία και να αποκτήσει σαφέστερη αντίληψη του τρόπου εκτέλεσης της προσομοίωσης.

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση ή την βελτιστοποίηση μπορούν να καταγραφούν στη ΚΒΔ, έπειτα από επιλογή του χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο είναι

δυνατή η εκτέλεση διαδοχικών δοκιμαστικών προσομοιώσεων διατηρώντας παράλληλα στη Βάση τα αποτελέσματα του πλέον αποδοτικού κανόνα λειτουργίας.

Αρχικά, οι βέλτιστοι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων ενός υδροσυστήματος δεν είναι γνωστοί. Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης το υπολογιστικό σύστημα υπολογίζει με βάση ένα μέτρο επίδοσης (αντικειμενική συνάρτηση) που ορίζει ο χρήστης τον πλέον αποδοτικό κανόνα λειτουργίας πραγματοποιώντας διαδοχικές προσομοιώσεις και συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Οι δυνατές αντικειμενικές συναρτήσεις είναι οι ακόλουθες:

- ελαχιστοποίηση της μέσης πιθανότητας αστοχίας για κάλυψη της ζήτησης νερού για την ύδρευση της Αθήνας, για δεδομένες τιμές στόχων
- ελαχιστοποίηση του μέσου κόστους λειτουργίας του υδροσυστήματος για δεδομένες τιμές στόχων και δεδομένο αποδεκτό επίπεδο αστοχίας
- μεγιστοποίηση της εγγυημένης απόδοσης του υδροσυστήματος, για δεδομένο επίπεδο αστοχίας.

Για να είναι αποδεκτός ένας κανόνας λειτουργίας θα πρέπει βεβαίως, όπως και στην προσομοίωση, να ικανοποιεί τους περιορισμούς θέτει ο χρήστης. Η αναγκαιότητα επανάληψης της βελτιστοποίησης μπορεί να προκύψει ακόμα και μετά από μικρής εμβέλειας μετατροπές στη δομή ή τα χαρακτηριστικά του δικτύου ή μετά από αλλαγές στους στόχους και τις επιλογές του σεναρίου που εξετάζεται.

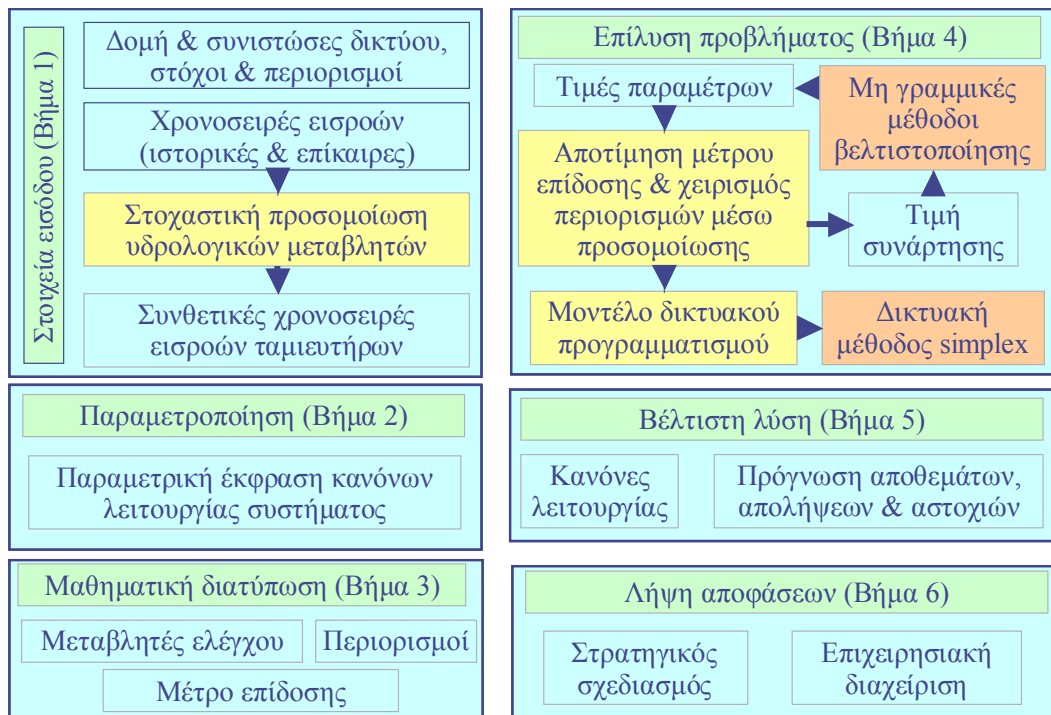
Η πρόοδος της προσομοίωσης όπως και της βελτιστοποίησης παρακολουθείται μέσω της Φόρμας Κατάστασης Προσομοίωσης/Βελτιστοποίησης στην οθόνη του υπολογιστή. Ο χρήστης ενημερώνεται για τον αριθμό των προσομοιωμένων ετών καθώς και το χρόνο που παρήλθε από την έναρξη της διαδικασίας. Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης αναφέρεται επιπλέον ο αριθμός των κανόνων λειτουργίας που προσομοιώθηκαν, ο βέλτιστος κανόνας λειτουργίας που έχει υπολογιστεί και η τιμή του δείκτη επίδοσης. Η διαδικασία μπορεί ανά πάσα στιγμή να διακοπεί προσωρινά ή να ανασταλεί με παρέμβαση του χρήστη, διατηρώντας το μέχρι εκείνη τη στιγμή βέλτιστο αποτέλεσμα.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης δίνονται με πιθανοτικούς όρους. Σε αυτά συγκαταλέγονται η πιθανότητα αστοχίας στην ικανοποίηση των στόχων και περιορισμών που έθεσε ο χρήστης και ο χρονικός και ποσοτικός εντοπισμός της αστοχίας. Αναλυτικά ισοζύγια (υδατικά, ενεργειακά) για κάθε συνιστώσα του συστήματος παρατίθενται μαζί με την τυπική απόκλιση των εκάστοτε μεγεθών. Επίσης, ισοπίθανες καμπύλες δίνουν την πρόβλεψη διακύμανσης των αποθεμάτων των ταμιευτήρων καθώς και της παροχής των υδραγωγείων.

8.3 Μαθηματικό υπόβαθρο

8.3.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο βέλτιστης διαχείρισης υδροσυστημάτων

Το σχήμα παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση (βλ. Σχήμα 8.1) είναι μια γενική μεθοδολογία αντιμετώπισης προβλημάτων βέλτιστου ελέγχου συστημάτων υδατικών πόρων, που παρουσιάζει σημαντικά θεωρητικά, τεχνικά και πρακτικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών τεχνικών (Koutsoyiannis and Economou, 2003). Η κεντρική ιδέα συνίσταται στη διατύπωση της πολιτικής διαχείρισης των υδροσυστήματος με τη μορφή παραμετρικών κανόνων, όπου το πλήθος των παραμέτρων αντιστοιχεί στο πλήθος των βαθμών ελευθερίας του συστήματος, το οποίο διατηρείται φειδωλό. Για δεδομένες τιμές παραμέτρων, είναι δυνατή η λεπτομερής προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος, μέσω της οποίας αποτιμάται η επίδοση αυτού. Διερευνώντας εναλλακτικές τιμές παραμέτρων μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας βελτιστοποίησης, εντοπίζεται η αντικειμενικά καλύτερη πολιτική διαχείρισης, ήτοι η διαχείριση που μεγιστοποιεί την επίδοση του συστήματος.



Σχήμα 8.1: Διάγραμμα ροής μεθοδολογικού σχήματος παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση.

Επιχειρώντας μια σύγκριση μεταξύ της προτεινόμενης μεθοδολογίας και των τυπικών, μη παραμετρικών προσεγγίσεων, μπορούμε να επισημάνουμε τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Με την παραμετροποίηση του μαθηματικού μοντέλου του υδροσυστήματος επιτυγχάνεται δραστικός περιορισμός του πλήθους των βαθμών ελευθερίας, και κατά συνέπεια μειώνεται ο υπολογιστικός φόρτος της διαδικασίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης σε εφικτά επίπεδα.
- Οι μαθηματικοί περιορισμοί του συστήματος, φυσικοί και λειτουργικοί, όσοι και αν είναι, αντιμετωπίζονται σχεδόν αποκλειστικά μέσω της προσομοίωσης. Κατά συνέπεια, το πρόβλημα βελτιστοποίησης της επίδοσης του συστήματος διατυπώνεται χωρίς πολλούς περιορισμούς, κάτι που διευκολύνει σημαντικά την επίλυσή του.
- Η δραστική μείωση του υπολογιστικού φόρτου επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου στοχαστικής προσομοίωσης, ήτοι την χρήση συνθετικών χρονοσειρών μεγάλου μήκους, κάτι που αποτελεί προϋπόθεση για την εκτίμηση της αξιοπιστίας του υδροσυστήματος με ικανοποιητική ακρίβεια.
- Επειδή ζητούμενο του προβλήματος είναι οι βελτιστοποιημένοι κανόνες λειτουργίας του συστήματος, που εξαρτώνται μόνο από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των εισροών, και όχι οι βήμα προς βήμα απολήψεις, που εξαρτώνται από την ακολουθία των εισροών, η διαχείριση του υδροσυστήματος μπορεί να γίνεται βάσει των συγκεκριμένων κανόνων, χωρίς να απαιτείται επικαιροποίηση του μοντέλου, εφόσον δεν μεταβάλλονται ουσιαστικά οι συνθήκες λειτουργίας του υδροσυστήματος.

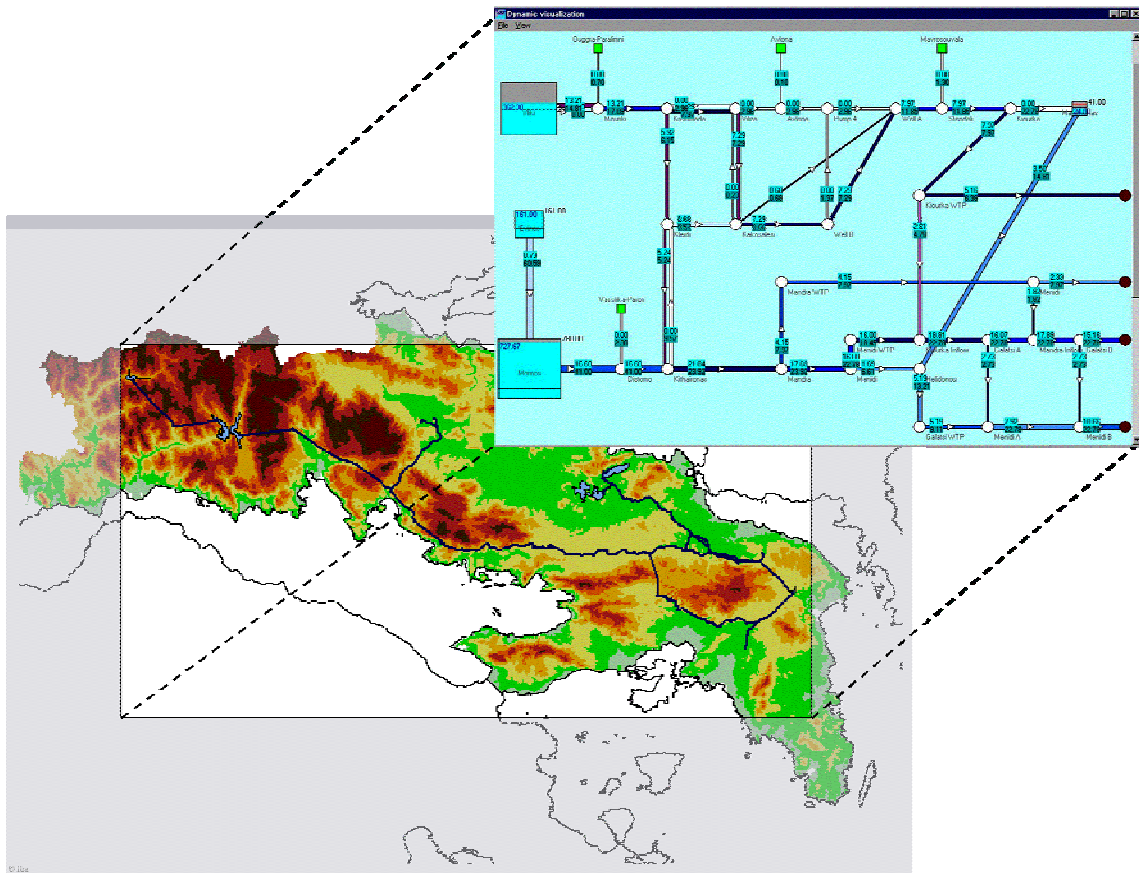
Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφεται αναλυτικά η υλοποίηση του εν λόγω μεθοδολογικού σχήματος στο μοντέλο που αναπτύχθηκε για την υποστήριξη της διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας.

8.3.2 Σχηματοποίηση μοντέλου υδροσυστήματος

Ως σχηματοποίηση νοείται η διαδικασία μετασχηματισμού των συνιστωσών του φυσικού συστήματος σε συνιστώσες του μοντέλου προσομοίωσης. Στο Σχήμα 8.2 απεικονίζεται η σχηματοποίηση του

υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, και πιο συγκεκριμένα η διάταξη των συνιστωσών του δικτύου, μέσω του *Υδρονομέα*. Οι συνιστώσες που υποστηρίζει το πρόγραμμα και υλοποιήθηκαν στο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι:

- *κόμβοι*, ήτοι θέσεις ζήτησης νερού ή σημεία αλλαγής της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών μεγεθών του δικτύου·
- *ταμιευτήρες*, ήτοι έργα αποθήκευσης επιφανειακών υδατικών πόρων·
- *γεωτρήσεις*, ήτοι έργα υδροληψίας από υπόγειους υδροφορείς·
- *υδραγωγεία*, ήτοι στοιχεία μεταφοράς νερού που συνδέουν ζεύγη κόμβων και αναφέρονται σε φυσικούς ή τεχνητούς αγωγούς·
- *στόχοι*, που ορίζονται από τον φορέα διαχείρισης και εκφράζουν τις απαιτήσεις που τίθενται ως προς τη λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 8.2: Παράδειγμα σχηματοποίησης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας.

8.3.3 Παραμετροποίηση υδροσυστήματος

Γενικά

Το μαθηματικό μοντέλο του υδροσυστήματος παραμετροποιείται ως προς τον τρόπο διαχείρισης των αποθεμάτων νερού, εισάγοντας κατάλληλους κανόνες λειτουργίας για τους ταμιευτήρες και τις γεωτρήσεις, που μάλιστα μεταβάλλονται εποχιακά. Οι κανόνες λειτουργίας καθορίζουν, σε κάθε χρονικό βήμα, τις επιθυμητές απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά, συναρτήσει των συνολικών διαθέσιμων αποθεμάτων και της συνολικής ζήτησης. Από την άλλη πλευρά, η κατανομή των απολήψεων στο δίκτυο των υδραγωγείων καθορίζεται με βάση τους φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος, και με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς του

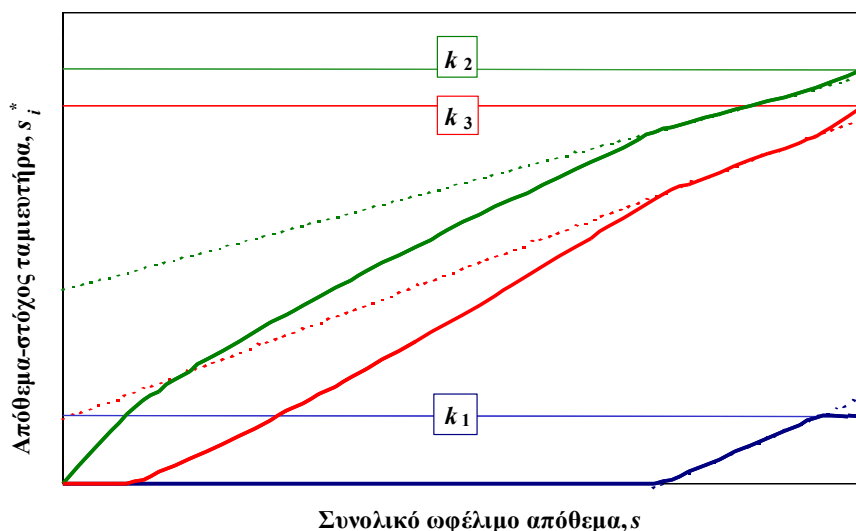
νερού από τις πηγές στην κατανάλωση. Συνεπώς, οι κανόνες λειτουργίας συνιστούν μία μόνο από τις συνιστώσες διαχείρισης ενός υδροσυστήματος.

Κανόνες λειτουργίας ταμιευτήρων

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στον *Υδρονομέα* βασίζεται σε πρόταση των *Nalbantis and Koutsoyiannis* (1997) για τον βέλτιστο έλεγχο συστημάτων ταμιευτήρων πολλαπλού σκοπού. Σύμφωνα με αυτήν οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων του συστήματος, που στην προκειμένη περίπτωση είναι παραμετρικοί, καθορίζουν τα επιθυμητά μεγέθη διαχείρισης των ταμιευτήρων (δηλαδή τα αποθέματα ή τις απολήψεις) συναρτήσει της επίκαιρης κατάστασης του συστήματος. Θεωρώντας ότι η τελευταία ορίζεται πλήρως από το αναμενόμενο συνολικό απόθεμα, $s(t)$, στο τέλος του χρονικού βήματος, μια εφικτή μαθηματική διατύπωση κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων (όπου ο δείκτης του χρονικού βήματος παραλείπεται για λόγους απλούστευσης) είναι:

$$s_i^* = k_i - a_i k + b_i s \quad (8.1)$$

όπου k_i η ωφέλιμη χωρητικότητα του i ταμιευτήρα, k η ολική ωφέλιμη χωρητικότητα του συστήματος, a_i και b_i παράμετροι που λαμβάνουν τιμές στο διάστημα $[0, 1]$, και s_i^* το επιθυμητό απόθεμα ή απόθεμα-στόχος στο τέλος του χρονικού βήματος. Σημειώνεται ότι η σχέση (8.1) είναι ελαφρά τροποποιημένη σε σχέση με την αυθεντική των *Nalbantis and Koutsoyiannis* (1997), ώστε οι παράμετροι της εξίσωσης να είναι αδιάστατες. Επιπλέον, έχουν παραλειφθεί οι περιορισμοί που αφορούν στο άθροισμα των a_i και b_i , και οι οποίοι εξασφαλίζουν, υπό προϋποθέσεις, την ισχύ της ισότητας αθροιστικών απολήψεων και ζήτησης. Η εν λόγω ισότητα, καθώς και οι φυσικοί περιορισμοί χωρητικότητας των ταμιευτήρων, εξασφαλίζονται μέσω μιας διαδικασίας αναγωγής, που καθιστά την τελική μαθηματική διατύπωση των κανόνων μη γραμμική. Επιπλέον, στους κανόνες ενσωματώνονται περιορισμοί ανώτερης και κατώτερης στάθμης, που τίθενται από τον χρήστη υπό μορφή λειτουργικών περιορισμών.



Σχήμα 8.3: Γραφική παράσταση των κανόνων λειτουργίας τριών υποθετικών ταμιευτήρων. Με λεπτή γραμμή απεικονίζεται η ωφέλιμη χωρητικότητα κάθε ταμιευτήρα, με παχιά γραμμή η τελική μορφή των κανόνων λειτουργίας, ενώ με διακεκομμένη η αρχική (γραμμική) τους μορφή.

Στο Σχήμα 8.3 παρουσιάζονται οι κανόνες λειτουργίας για τρεις υποθετικούς ταμιευτήρες. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται το συνολικό ωφέλιμο απόθεμα του συστήματος, ενώ στον κατακόρυφο άξονα φαίνεται το απόθεμα-στόχος κάθε ταμιευτήρα. Με λεπτή οριζόντια γραμμή απεικονίζεται η ωφέλιμη χωρητικότητα κάθε ταμιευτήρα, που αποτελεί το φυσικό άνω όριο του αντίστοιχου αποθέματος. Με διακεκομμένη απεικονίζονται οι αρχικοί κανόνες, όπως προκύπτουν από τη σχέση

(8.1), ενώ με συνεχή γραμμή απεικονίζονται οι κανόνες στην τελική τους μορφή, που είναι έντονα μη γραμμική. Το νομογράφημα αυτό αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο για τη διαχείριση των ταμιευτήρων, καθώς σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ο χρήστης μπορεί να ελέγξει την κατάσταση των αποθεμάτων και να την συγκρίνει με την επιθυμητή κατάσταση που ορίζει ο κανόνας λειτουργίας. Εφόσον το τρέχον απόθεμα κάποιου ταμιευτήρα ξεπερνά το επιθυμητό, επιβάλλεται η πραγματοποίηση απολήψεων, με στόχο την μηδενισμό ή, αν κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, την ελαχιστοποίηση της διαφοράς των δύο μεγεθών. Ομοίως, αν το τρέχον απόθεμα υπολείπεται του επιθυμητού, επιβάλλεται η διακοπή των απολήψεων, ώστε να αφεθεί ο ταμιευτήρας να γεμίσει μέχρι να επιτευχθεί ο όγκος-στόχος. Επισημαίνεται ότι σε καμία περίπτωση δεν αφήνεται το σύστημα να αστοχήσει προκειμένου να ικανοποιηθούν οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων. Οι τελευταίοι εκφράζουν την μακροχρόνια στρατηγική διαχείρισης των επιφανειακών υδατικών πόρων, που μόνο σε συνδυασμό με τους φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς που αναφέρονται στο δίκτυο των υδραγωγείων καθορίζουν την λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Κανόνες λειτουργίας γεωτρήσεων

Στο υδροσύστημα της Αθήνας, τα υπόγεια νερά θεωρούνται εφεδρικοί υδατικοί πόροι. Κατά συνέπεια, η διαχείρισή τους συνίσταται, κατά κύριο λόγο, στην ενεργοποίηση ή όχι των γεωτρήσεων μέσω των οποίων πραγματοποιούνται οι υπόγειες απολήψεις. Με βάση το σκεπτικό αυτό, σε κάθε γεώτρηση i του μοντέλου του υδροσυστήματος ορίζονται δυο κατώφλια b_i^{up} και b_i^{down} , που ορίζονται ως ποσοστά επί του συνολικού ωφέλιμου όγκου του συστήματος, s . Εφόσον το απολήψιμο δυναμικό των ταμιευτήρων βρίσκεται πάνω από το πρώτο κατώφλι b_i^{up} , απαγορεύεται η χρήση της γεώτρησης (αυτό γίνεται εφόσον δεν παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί που θέτει ο χρήστης), ενώ όταν βρεθεί κάτω από το δεύτερο κατώφλι b_i^{down} , η γεώτρηση χρησιμοποιείται κατά προτεραιότητα σε σχέση με τα επιφανειακά νερά. Τέλος, για ενδιάμεσες τιμές, η γεώτρηση χρησιμοποιείται μόνο εφόσον η λειτουργία της προκύπτει οικονομικότερη σε σχέση με τις λοιπές εναλλακτικές λύσεις.

8.3.4 Μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης

Τοποθέτηση του προβλήματος

Η προσομοίωση είναι η διαδικασία αναπαράστασης των φυσικών διεργασιών που σχετίζονται με την διαχείριση των αποθεμάτων και την μεταφορά νερού από τις πηγές (ταμιευτήρες, γεωτρήσεις) στην κατανάλωση. Η προσομοίωση εκτελείται σε μηνιαία χρονικά βήματα, τα οποία ομαδοποιούνται σε χρονικές περιόδους (έτη). Είσοδος του μοντέλου προσομοίωσης είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη και η τοπολογία των συνιστωσών του υδροσυστήματος, οι υδρολογικές χρονοσειρές, οι λειτουργικοί περιορισμοί καθώς και οι παράμετροι των κανόνων λειτουργίας. Έξοδος του μοντέλου είναι οι προσομοιωμένες χρονοσειρές απολήψεων και κατανομής τους στα υδραγωγεία, βάσει των οποίων εκτιμάται η επίδοση του συστήματος

Σε κάθε χρονικό βήμα, ο υπολογισμός των απολήψεων και της κατανομής τους στα υδραγωγεία διατυπώνεται ως ένα σύνθετο πρόβλημα, που επιβάλλει τις ακόλουθες 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 κατά το δυνατόν πιστότερα η πολιτική διαχείρισης που επιβάλουν οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων·
- ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς νερού, εκφρασμένου σε όρους ενέργειας άντλησης.

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, οι παραπάνω απαιτήσεις περιγράφονται μαθηματικά μέσω ενός σχήματος δικτυακού γραμμικού προγραμματισμού, γνωστού από την επιχειρησιακή έρευνα και ως πρόβλημα μεταφόρτωσης. Το πρόβλημα έγκειται στην ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς μιας γνωστής ποσότητας, μέσω ενός διγράφου, ήτοι ενός δικτύου αποτελούμενου από κόμβους και κλάδους. Οι μεταβλητές ελέγχου είναι οι επιμέρους ποσότητες που μεταφέρονται μέσω των κλάδων· κάθε κλάδος έχει συγκεκριμένο μοναδιαίο κόστος και ορισμένη μεταφορική ικανότητα. Οι περιορισμοί είναι οι εξισώσεις συνέχειας των κόμβων και οι εξισώσεις μεταφορικής ικανότητας των κλάδων. Η προσαρμογή του μοντέλου μεταφόρτωσης στο πρόβλημα διαχείρισης υδροσυστημάτων περιγράφεται με λεπτομέρεια στη συνέχεια

Μαθηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του υδροσυστήματος

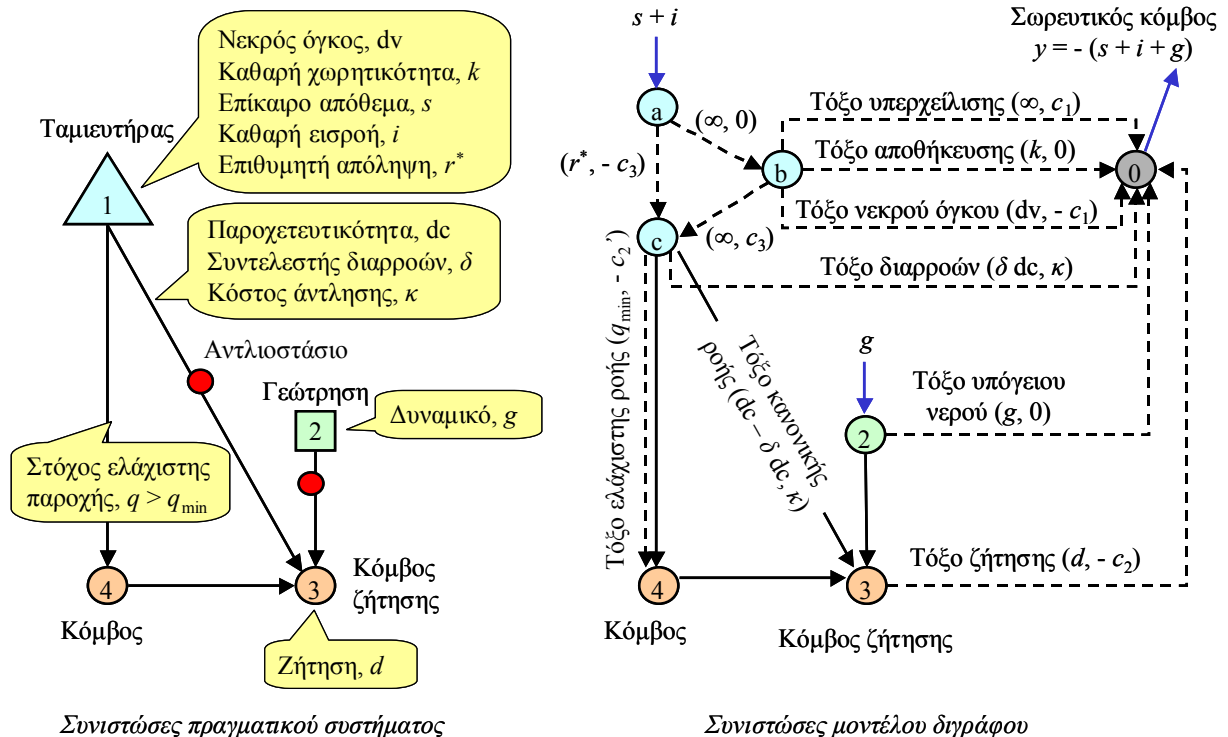
Στόχος είναι η αναπαράσταση όλων των συνιστωσών των εξισώσεων δυναμικής του συστήματος μέσω ενός ιδεατού διγράφου, ώστε όλες οι μεταβλητές που εκφράζουν αποθήκευση, μεταφορά ή απόληψη νερού να αντιστοιχούν στις μεταβλητές ενός προβλήματος μεταφόρτωσης. Το μοντέλο διατηρεί την τοπολογία του πραγματικού συστήματος, δηλαδή όλες τις δυνατές διαδρομές του νερού. Η βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων υδατικών πόρων στις επιμέρους συνιστώσες του συστήματος διατυπώνεται ως πρόβλημα μεταφόρτωσης. Η ικανοποίηση των τεσσάρων απαιτήσεων που τέθηκαν προηγουμένως εξασφαλίζεται ορίζοντας κατάλληλες τιμές προσφοράς και ζήτησης στους κόμβους, και κατάλληλες τιμές μεταφορικής ικανότητας και μοναδιαίου κόστους, στα τόξα του διγράφου. Ειδικότερα, το μοναδιαίο κόστος είναι θετικό, δηλαδή εκφράζει ποινή, όταν ζητούμενο είναι η απαγόρευση της συγκεκριμένης μεταφοράς νερού (π.χ. αποφυγή υπερχειλίσεων) και αρνητικό όταν ζητούμενο είναι η επιβολή της συγκεκριμένης μεταφοράς νερού (π.χ. ικανοποίηση στόχου ζήτησης).

Στο Σχήμα 8.4 δίνεται ένα παράδειγμα σχηματοποίησης του μοντέλου για ένα υποθετικό σύστημα αποτελούμενο από τέσσερις κόμβους και τέσσερα υδραγωγεία. 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 του δικτύου. Κατάντη του ταμιευτήρα επιβάλλεται η διατήρησης μιας ελάχιστης παροχής στο αντίστοιχο υδραγωγείο. Όπως είναι φανερό, οι πραγματικοί κόμβοι και τα υδραγωγεία αποτελούν μέρος μόνο των συνιστωσών του διγράφου. Πέρα από τις πραγματικές συνιστώσες, ορίζονται εικονικές συνιστώσες που απεικονίζονται με διακεκομμένη γραμμή. Συγκεκριμένα:

Οι *κόμβοι* του υδροσυστήματος, με εξαίρεση τον ταμιευτήρα, διατηρούνται στο μοντέλο ως έχουν. Επιπλέον, στο μοντέλο εισάγεται ένας εικονικός «σωρευτικός» κόμβος, στον οποίο διοχετεύεται το σύνολο του νερού που είτε αποθηκεύεται στον ταμιευτήρα ή καταναλώνεται ή δεν αντλείται από την γεώτρηση ή «χάνεται» από το σύστημα λόγω διαρροών και υπερχειλίσεων. Ο εν λόγω κόμβος τίθεται ώστε να ισχύουν οι υποθέσεις του προβλήματος μεταφόρτωσης, και συγκεκριμένα η υπόθεση συνολικής προσφοράς ίσης με την συνολική ζήτηση.

Η λειτουργία του ταμιευτήρα αναπαρίσταται μέσω τριών εικονικών κόμβων, στους οποίους πραγματοποιούνται η προσφορά, η απόληψη και η αποθήκευση νερού (οι εν λόγω κόμβοι συμβολίζονται με a , b και c , αντίστοιχα). Ειδικότερα, η προσφορά νερού περιλαμβάνει το απόθεμα του ταμιευτήρα στην αρχή του χρονικού βήματος, στο οποίο προστίθενται οι καθαρές υδρολογικές εισροές. Έξι εικονικά τόξα προσομοιώνουν τις διεργασίες που σχετίζονται με την λειτουργία του ταμιευτήρα. Το πρώτο τόξο ($a-c$) συνδέει τον κόμβο προσφοράς με τον κόμβο απόληξης και «μεταφέρει» την επιθυμητή απόληψη, r^* , όπως αυτή υπολογίζεται με εφαρμογή του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας. Η μεταφορική ικανότητα του εν λόγω τόξου τίθεται ίση με την επιθυμητή απόληψη, ενώ εισάγεται αρνητικό μοναδιαίο κόστος ίσο με $-c_3$, ώστε να επιβάλλει την απόληψη ακριβώς της επιθυμητής ποσότητας, ήτοι την ικανοποίηση του κανόνα λειτουργίας, εφόσον βεβαίως κάτι τέτοιο δεν παραβιάζει τους λοιπούς περιορισμούς του συστήματος. Το δεύτερο τόξο ($a-b$), το οποίο έχει μηδενικό μοναδιαίο κόστος και απεριόριστη μεταφορική ικανότητα, συνδέει τον κόμβο

προσφοράς με τον κόμβο αποθήκευσης, «μεταφέρει» νερό που μπορεί, δυνητικά, να αποθηκευτεί στον ταμιευτήρα, εφόσον δεν παραβιάζονται οι φυσικοί και λειτουργικοί περιορισμοί. Το τρίτο τόξο (b-c) συνδέει τον κόμβο προσφοράς με τον κόμβο απόληξης και «μεταφέρει» νερό πέραν την επιθυμητής απόληξης, r^* . Προκειμένου να μην παραβιάζεται άσκοπα ο κανόνας λειτουργίας του ταμιευτήρα, στο εν λόγω τόξο, που θεωρείται ότι έχει απεριόριστη μεταφορική ικανότητα, τίθεται μοναδιαίο κόστος ίσο με c_3 . Τα υπόλοιπα τρία τόξα συνδέουν τον κόμβο αποθήκευσης με τον σωρευτικό κόμβο του διγράφου. Το πρώτο «γεμίζει» υποχρεωτικά τον ταμιευτήρα μέχρι τον νεκρό του όγκο, dv . Η ικανοποίηση του εν λόγω φυσικού περιορισμού εξασφαλίζεται με την επιβολή ενός πολύ μεγάλου αρνητικού μοναδιαίου κόστους, ίσου με $-c_1$, που είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο του κόστους εφαρμογής του παραμετρικού κανόνα, δηλαδή $c_1 \gg c_3$. Το επόμενο τόξο, που έχει μηδενικό κόστος, γεμίζει τον ταμιευτήρα το πολύ μέχρι την ωφέλιμη χωρητικότητα αυτού, k . Το τελευταίο τόξο, που έχει απεριόριστη μεταφορική ικανότητα, «μεταφέρει» την υπερχειλίση του ταμιευτήρα. Στην περίπτωση που η τελευταία δεν είναι επιθυμητή, δηλαδή έχει τεθεί ως λειτουργικός περιορισμός η αποφυγή των υπερχειλίσεων στον συγκεκριμένο ταμιευτήρα, ορίζεται ένα πολύ μεγάλο μοναδιαίο κόστος, ίσο, κατ' απόλυτη τιμή, με το κόστος παραβίασης του περιορισμού νεκρού όγκου, c_1 .



Σχήμα 8.4: Παράδειγμα μετασχηματισμού των συνιστωσών ενός πραγματικού υδροσυστήματος σε συνιστώσες του μοντέλου διγράφου. Ο κόμβος 0 είναι ο σωρευτικός, ενώ οι κόμβοι a, b, c προσομοιώνουν την λειτουργία του ταμιευτήρα. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν πραγματικά υδραγωγεία, ενώ οι διακεκομμένες αντιπροσωπεύουν εικονικά τόξα που αναφέρονται στους σχετικούς περιορισμούς. Σε παρένθεση δίνονται η μεταφορική ικανότητα και το μοναδιαίο κόστος κάθε τόξου.

Η γεώτρηση, και για την ακρίβεια ο υδροφορέας που αυτή υδρομαστεύει, θεωρείται ως ταμιευτήρας απεριόριστης χωρητικότητας, στον οποίο λαμβάνει χώρα προσφορά νερού ίση με το επίκαιρο υπόγειο δυναμικό, g . Η γεώτρηση συνδέεται με τον κατάντη κόμβο του δικτύου μέσω ενός τόξου μεταφορικής ικανότητας g και μοναδιαίου κόστους ίσου με το πραγματικό κόστος (ειδική ενέργεια) άντλησης, καθώς και με τον σωρευτικό κόμβο του διγράφου μέσω ενός ιδεατού τόξου μεταφορικής ικανότητας g και μηδενικού μοναδιαίου κόστους, το οποίο αναπαριστά την ποσότητα υπόγειου νερού που δεν χρησιμοποιήθηκε κατά το τρέχον χρονικό βήμα.

Ο *κόμβος ζήτησης* συνδέεται με τον *σωρευτικό κόμβο* του μοντέλου μέσω ενός *ιδεατού τόξου* μεταφορικής ικανότητας d , που αντιπροσωπεύει την κατανάλωση νερού που προφανώς δεν μπορεί να ξεπεράσει την αντίστοιχη ζήτηση. Στο τόξο τίθεται αρνητικό μοναδιαίο κόστος $-c_2$, ώστε να επιβάλει την απόληψη νερού για ικανοποίηση του σχετικού λειτουργικού περιορισμού. Μεταξύ των απόλυτων τιμών c_1 , c_2 και c_3 ισχύει η σχέση $c_1 \gg c_2 \gg c_3$, που σημαίνει πρακτικά ότι η ικανοποίηση των φυσικών περιορισμών προηγείται της ικανοποίησης των λειτουργικών περιορισμών που, με την σειρά της, προηγείται της ικανοποίησης του παραμετρικού κανόνα.

Τα *υδραγωγεία* αντιπροσωπεύονται από τόξα που έχουν μεταφορική ικανότητα ίση με την πραγματική τους παροχευτικότητα, dc , και μοναδιαίο κόστος ίσο με το πραγματικό κόστος μεταφοράς νερού, κ . Με βάση τις υποθέσεις του μαθηματικού μοντέλου του υδροσυστήματος, το τελευταίο εκφράζεται σε μονάδες ειδικής ενέργειας και είναι τάξεις μεγέθους μικρότερο από τα λοιπά εικονικά κόστη που εισάγονται για την ικανοποίηση των περιορισμών του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι η ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης είναι τελευταία σε σειρά προτεραιότητας, όπως ακριβώς επιβάλλουν οι απαιτήσεις του μοντέλου προσομοίωσης.

Στην περίπτωση που θεωρείται μη μηδενικός *συντελεστής διαρροών*, δ , το σχετικό υδραγωγείο επιμερίζεται σε δύο τόξα μεταφορικής ικανότητας $(1 - \delta)dc$ και δdc , αντίστοιχα, και μοναδιαίου κόστους κ . Το πρώτο τόξο προσομοιώνει την μεταφορά νερού, ενώ το δεύτερο, το οποίο συνδέει τον *άναντη κόμβο* με τον *σωρευτικό κόμβο* του διγράφου, προσομοιώνει τις απώλειες νερού κατά μήκος του υδραγωγείου, που θεωρούνται σταθερό ποσοστό της παροχής.

Ο *στόχος ελάχιστης παροχής*, q_{\min} , προσομοιώνεται επιμερίζοντας το σχετικό υδραγωγείο σε δύο παράλληλα τόξα μεταφορικής ικανότητας q_{\min} και $dc - q_{\min}$, αντίστοιχα. Στο πρώτο τόξο τίθεται αρνητικό μοναδιαίο κόστος $-c_2'$, ώστε να επιβάλει την μεταφορά νερού για ικανοποίηση του σχετικού λειτουργικού περιορισμού, ενώ στο δεύτερο τόξο τίθεται μοναδιαίο κόστος ίσο με το πραγματικό, κ , όπου βεβαίως $\kappa \ll c_2'$. Σημειώνεται ότι μεταξύ των τιμών c_2' και c_2 ισχύει $c_2' > c_2$ εφόσον ο στόχος ελάχιστης παροχής βρίσκεται σε υψηλότερη προτεραιότητα σε σχέση με τον στόχο ζήτησης, και $c_2' < c_2$ στην αντίθετη περίπτωση. Αν αντί για περιορισμός ελαχίστου υπήρχε περιορισμός μέγιστου, τότε και πάλι το σχετικό υδραγωγείο θα επιμεριζόταν σε δύο παράλληλα τόξα. Στην περίπτωση αυτή, το πρώτο προσομοιώνει την μεταφορά νερού μέχρι το επιθυμητό όριο, q_{\max} , η οποία γίνεται με το πραγματικό κόστος, κ , ενώ το δεύτερο τόξο, η μεταφορική ικανότητα του οποίου είναι ίση με $dc - q_{\max}$, προσομοιώνει την μεταφορά νερού πάνω από το εν λόγω όριο, η οποία γίνεται με εικονικό κόστος που είναι δυο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο του πραγματικού. Τέλος, ο περιορισμός σταθερής παροχής, q_{const} , προσομοιώνεται μέσω δύο εικονικών τόξων μεταφορικής ικανότητας q_{const} και $dc - q_{\text{const}}$, και μοναδιαίου κόστους $-c_2'$ και c_2' , αντίστοιχα.

Γενικά, για κάθε λειτουργική απαίτηση (στόχο) του συστήματος εισάγεται ένα εικονικό τόξο, το μοναδιαίο κόστος του οποίου εξαρτάται από τη σειρά προτεραιότητας του αντίστοιχου στόχου. Ειδικότερα, στην περίπτωση στόχων απόληξης και περιορισμών ελάχιστης παροχής ή ελάχιστου αποθέματος, το κόστος είναι αρνητικό ώστε να υποχρεώσει την μεταφορά νερού. Αντίθετα, στην περίπτωση περιορισμών μέγιστης παροχής ή μέγιστου αποθέματος, το κόστος είναι θετικό ώστε να επιβάλει ποινή στην παραβίαση του εν λόγω περιορισμού.

Επικαιροποίηση ιδιοτήτων διγράφου

Οι τιμές μεταφορικής ικανότητας των εικονικών τόξων του διγράφου αντιστοιχούν είτε σε πραγματικά μεγέθη, ήτοι χωρητικότητες ταμιευτήρων, δυναμικότητες γεωτρήσεων και παροχευτικότητες υδραγωγείων, είτε σε επιθυμητά, όπως επιθυμητές απολήψεις, στόχοι ζήτησης, άνω και κάτω όρια αποθεμάτων ή παροχών, κλπ. Ως επί το πλείστον, αυτές ορίζονται με βάση τις επίκαιρες τιμές των φυσικών και λειτουργικών περιορισμών του συστήματος. Εξαίρεση αποτελούν τα

τόξα άπειρης χωρητικότητας, όπως αυτά που προσομοιώνουν «μεταφορά» υπερχειλίσεων (η απεριόριστη χωρητικότητα εκφράζεται αριθμητικά μέσω ενός μεγάλου θετικού αριθμού).

Ο τρόπος καθορισμού των τιμών του μοναδιαίου κόστους συνιστά ένα εξαιρετικά σημαντικό όσο και πρωτότυπο σημείο του μοντέλου που αναπτύχθηκε. Τα εν λόγω κόστη ομαδοποιούνται σε κατηγορίες κόστους, με τρόπο ώστε το μοναδιαίο κόστος ενός τόξου που ανήκει σε συγκεκριμένη κατηγορία να ξεπερνά το αθροιστικό κόστος όλων των τόξων των προηγούμενων κατηγοριών. Άμεση συνέπεια είναι αφενός η ανεξάρτητη ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κάθε κατηγορίας και αφετέρου η κατά προτεραιότητα ελαχιστοποίηση των κοστών που ανήκουν σε υψηλότερες κατηγορίες.

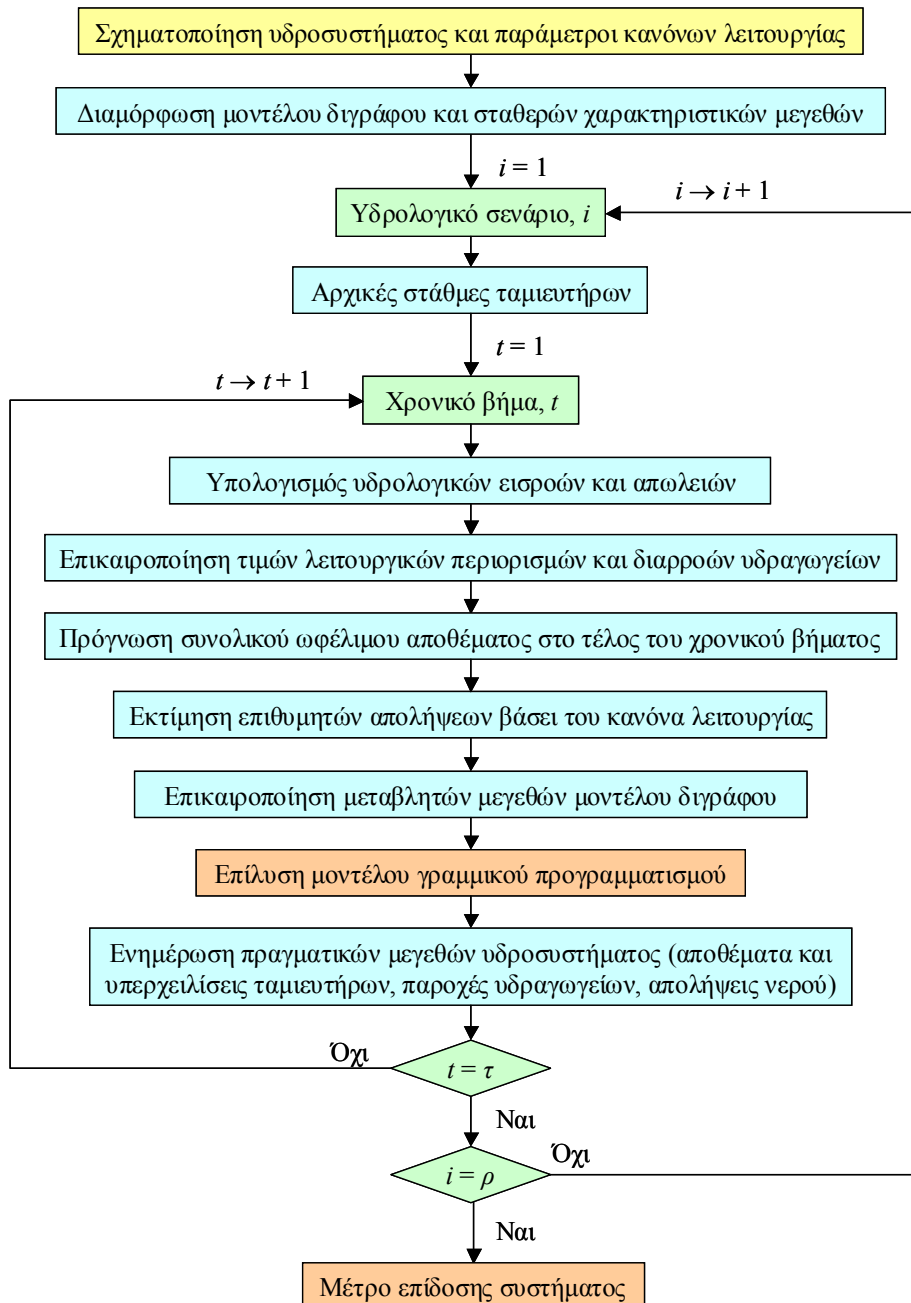
Κάθε τόξο προσομοιώνει συγκεκριμένη διεργασία με μηδενικό, αρνητικό ή θετικό μοναδιαίο κόστος, ανάλογα με τον αν η πραγματοποίησή της είναι αδιάφορη, επιθυμητή ή ανεπιθυμητή, αντίστοιχα. Χωρίς κόστος πραγματοποιούνται η μεταφορά των εισροών των ταμιευτήρων, η αποθήκευση νερού στους ταμιευτήρες καθώς και η μη εξάντληση του απολήψιμου δυναμικού των γεωτρήσεων. Κάθε άλλη διεργασία ή, ισοδύναμα, κάθε άλλος τύπος τόξου κατατάσσεται στην σχετική κατηγορία κόστους που φαίνεται στον Πίνακα 8.1. Με τον τρόπο αυτό, η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους «μεταφοράς» νερού εξασφαλίζει πρώτα την ικανοποίηση των περιορισμών πλήρωσης του νεκρού όγκου και αποφυγής των ανεπιθύμητων υπερχειλίσεων (κατηγορία 1), μετά την ικανοποίηση των λειτουργικών περιορισμών (κατηγορία 2), έπειτα την τήρηση του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας, ήτοι την ικανοποίηση των επιθυμητών απολήψεων (κατηγορία 3) και τέλος την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς νερού μέσω του δικτύου των υδραγωγείων και γεωτρήσεων, ήτοι της ενέργειας άντλησης (κατηγορία 4). Αυτό σημαίνει ότι η οικονομικότητα της διαχείρισης δεν επηρεάζει τον τρόπο λειτουργίας των ταμιευτήρων (δηλαδή δεν παραβιάζεται ο κανόνας λειτουργίας ώστε να επιβληθούν λιγότερες αντλήσεις) και, αντίστοιχα, ο τρόπος λειτουργίας των ταμιευτήρων δεν επηρεάζει τους περιορισμούς του συστήματος (δηλαδή δεν παραβιάζονται οι στόχοι που θέτει ο διαχειριστής του συστήματος ώστε να τηρηθεί επακριβώς ο κανόνας λειτουργίας των ταμιευτήρων). Για τον προσδιορισμό του μοναδιαίου κόστους ακολουθείται ένας αναδρομικός αλγόριθμος, που ξεκινά από τα κόστη χαμηλότερης προτεραιότητας. Πρώτα ορίζονται τα μοναδιαία κόστη των τόξων που προσομοιώνουν τη μεταφορά νερού μέσω των υδραγωγείων και των γεωτρήσεων, που τίθενται ίσα με την αντίστοιχη τιμή της ειδικής ενέργειας. Ακόμη και στα τόξα που προσομοιώνουν την μεταφορά νερού χωρίς άντληση τίθεται ένα πολύ μικρό μοναδιαίο κόστος, ϵ , ώστε να εμποδίζεται η άσκοπη μεταφορά ή ανακύκλωση του νερού μέσω του δικτύου σε βάρος της αποθήκευσης αυτού στους ταμιευτήρες.

Πίνακας 8.1: Κατηγορίες μοναδιαίου κόστους και σχετικές διεργασίες που πραγματοποιούνται μέσω των εικονικών τόξων του μοντέλου διγράφου.

Κατηγορία	Διεργασίες με αρνητικό κόστος	Διεργασίες με θετικό κόστος
1	Ανεπιθύμητη υπερχείλιση ταμιευτήρων	Πλήρωση νεκρού όγκου ταμιευτήρων
2	Ικανοποίηση περιορισμών μέγιστης παροχής υδραγωγείων ή μέγιστης στάθμης ταμιευτήρων	Ικανοποίηση στόχων ζήτησης νερού και περιορισμών ελάχιστης παροχής υδραγωγείων ή ελάχιστης στάθμης ταμιευτήρων
3	Απόληψη νερού από ταμιευτήρα πάνω από την αντίστοιχη επιθυμητή	Απόληψη νερού από ταμιευτήρα μέχρι την αντίστοιχη επιθυμητή
4	Μεταφορά νερού μέσω των υδραγωγείων και των γεωτρήσεων	

Αλγόριθμος προσομοίωσης

Το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου απεικονίζεται στο Σχήμα 8.5. Το εν λόγω διάγραμμα αναφέρεται στη γενική περίπτωση *καταληκτικής προσομοίωσης*, στην οποία εξετάζονται ρ υδρολογικά σενάρια με κοινή ημερομηνία εκκίνησης και μήκους τ μηνών έκαστο, ώστε το σύνολο των προσομοιωμένων χρονικών βημάτων να ισούται με $n = \rho \times \tau$. Η *προσομοίωση μόνιμης κατάστασης* μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση της καταληκτικής, θεωρώντας $\rho = 1$. Οι σχετικές υπολογιστικές διαδικασίες εκτελούνται σε μηνιαία χρονικά βήματα.



Σχήμα 8.5: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου προσομοίωσης.

Στοιχεία εισόδου είναι σχηματοποίηση του υδροσυστήματος και οι τιμές των παραμέτρων των κανόνων λειτουργίας των ταμιευτήρων και γεωτρήσεων. Πριν την έναρξη της προσομοίωσης, διαμορφώνεται το μοντέλο διγράφου, ήτοι η διάταξη των ιδεατών κόμβων και τόξων. Επιπλέον, ορίζονται τα σταθερά χαρακτηριστικά μεγέθη του μοντέλου.

Η προσομοίωση εκτελείται σε δύο βρόχους. Ο εξωτερικός βρόχος αναφέρεται στα υδρολογικά σενάρια, ενώ ο εσωτερικός στην προσομοίωση των διεργασιών κάθε σεναρίου. Πριν την εκτέλεση κάθε σεναρίου επαναφέρονται οι συνθήκες εκκίνησης, ήτοι οι αρχικές στάθμες των ταμιευτήρων. Στη συνέχεια, για κάθε χρονικό βήμα t , επιλύεται το γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, ενώ τα αποτελέσματα του εκάστοτε βήματος χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για το επόμενο. Κατά συνέπεια, η προσομοίωση ενός σεναρίου εισροών μήκους τ συνίσταται στην *σειριακή* επίλυση αντίστοιχου αριθμού μοντέλων δικτυακού γραμμικού προγραμματισμού. Πλεονέκτημα της γραμμικής διατύπωσης είναι η ύπαρξη εξαιρετικά γρήγορων αλγορίθμων επίλυσης, όπως η μέθοδος simplex ή παραλλαγές αυτής, προσαρμοσμένες στις μαθηματικές ιδιαιτερότητες του προβλήματος (π.χ. ύπαρξη αραιών μητρώων). Επιπλέον, με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται πιστή αναπαράσταση των διεργασιών που σχετίζονται με την λειτουργία του υδροσυστήματος, με σχετικά μικρό υπολογιστικό φόρτο.

Μετά την ολοκλήρωση των υπολογιστικών διαδικασιών εκτιμάται το αντίστοιχο δειγματικό μέτρο επίδοσης. Το καθολικό μέτρο επίδοσης, που συνιστά και την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, προκύπτει μετά την προσομοίωση του συνόλου των υδρολογικών σεναρίων.

Μέτρα επίδοσης υδροσυστήματος

Ως μέτρο επίδοσης του υδροσυστήματος ορίζεται ένας ποσοτικός δείκτης που αντιπροσωπεύει την αποτελεσματικότητα της πολιτικής διαχείρισης που εφαρμόζεται, όπως αυτή εκφράζεται μέσω των κανόνων λειτουργίας των ταμιευτήρων και γεωτρήσεων. Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, το μέτρο επίδοσης αναφέρεται σε ένα από τα ακόλουθα μεγέθη:

- ετήσια πιθανότητα αστοχίας ως προς την ικανοποίηση των λειτουργικών περιορισμών·
- μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας (μόνο για καταληκτική προσομοίωση)·
- ετήσια ασφαλής απόληψη νερού·
- μέσο ετήσιο κόστος λειτουργίας, εκφρασμένο σε όρους κατανάλωσης ενέργειας.

Ειδικότερα, όσον αφορά την πιθανότητα αστοχίας, ορίζεται ένα σύνθετο μέτρο που περιλαμβάνει τη συχνότητα εμφάνισης ελλειμμάτων καθώς και το σχετικό έλλειμμα κάθε στόχου. Στην περίπτωση που ο εν λόγω στόχος δεν επιτυγχάνεται οριακά, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής και της επιτευχθείσας τιμής είναι πολύ μικρή, τότε η συχνότητα αστοχιών πολλαπλασιάζεται επί κάποιον μειωτικό συντελεστή.

8.3.5 Εύρεση βέλτιστης πολιτικής διαχείρισης

Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε υποστηρίζει εναλλακτικούς τύπους αντικειμενικών συναρτήσεων, στις οποίες συνδυάζονται οι δείκτες επίδοσης που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Για την εκκίνηση της διαδικασίας απαιτείται ο προσδιορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης και ο καθορισμός ορισμένων ορισμάτων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, που σχετίζονται με την διαδικασία αναζήτησης καθώς και τα κριτήρια σύγκλισης και τερματισμού. Σε κάθε επαναληπτικό κύκλο, ο αλγόριθμος γεννά ένα νέο διάλυμα παραμέτρων, που εκφράζει την συγκεκριμένη πολιτική διαχείρισης. Στη συνέχεια καλείται ο αλγόριθμος προσομοίωσης και υπολογίζεται η επίδοση της επίκαιρης πολιτικής διαχείρισης, ήτοι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η γέννηση κάθε νέου συνδυασμού παραμέτρων βασίζεται στους ήδη ελεγμένους συνδυασμούς, και γίνεται με εφαρμογή ενός συνδυασμού προσδιοριστικών και τυχαίων μαθηματικών κανόνων. Εφόσον ικανοποιούνται τα κριτήρια σύγκλισης ή τερματισμού, τα οποία ορίζει ο χρήστης, ο αλγόριθμος διακόπτεται και επιστρέφει την καλύτερη από τις λύσεις που έχουν διερευνηθεί μέχρι εκείνο το σημείο.

Ο *Υδρονομέας* υποστηρίζει τους ακόλουθους τύπους αντικειμενικών συναρτήσεων:

- ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος, για δεδομένες τιμές στόχων·

- μεγιστοποίηση της ασφαλούς απόληψης του συστήματος, για δεδομένη αξιοπιστία και δεδομένες τιμές στόχων·
- ελαχιστοποίηση της μέσης ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας από τα ωστικά και ανυψωτικά αντλιοστάσια, για δεδομένη αξιοπιστία και δεδομένες τιμές στόχων.

8.3.6 Μεθοδολογία βελτιστοποίησης

Για την επίλυση δυσχερών προβλημάτων ολικής βελτιστοποίησης έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο φάσμα μεθοδολογιών, εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση των οποίων γίνεται από τον *Ευστρατιάδη* (2001). Η σύγχρονη τάση συνίσταται στην ανάπτυξη υβριδικών αλγοριθμικών σχημάτων, τα οποία συνδυάζουν στοιχεία από διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις ώστε να εκμεταλλευτούν τα ισχυρά χαρακτηριστικά τους. Παρά την ύπαρξη ενός μεγάλου φάσματος αλγορίθμων μη γραμμικής βελτιστοποίησης, οι ιδιαιτερότητες των προβλημάτων που προέκυψαν στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου ώθησαν στην αναζήτηση νέων, βελτιωμένων σχημάτων.

Ο *εξελικτικός αλγόριθμος απόπτωσης-απλόκου* είναι μια ευρετική τεχνική ολικής βελτιστοποίησης, στην οποία επιχειρείται σύζευξη διαφορετικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων και ορισμένων πρωτότυπων στοιχείων (*Ευστρατιάδης*, 2001· *Efstathiadis and Koutsoyiannis*, 2002). Το προτεινόμενο σχήμα βελτιστοποίησης έχει εξεταστεί σε ένα ευρύ φάσμα τυπικών συναρτήσεων της βιβλιογραφίας καθώς και σε πολύπλοκα προβλήματα από τον χώρο της υδρολογίας, έχοντας αποδειχθεί πολύ αξιόπιστο ως προς τον εντοπισμό του ολικού βελτίστου με λογικό πλήθος δοκιμών.

Το υπόβαθρο του αλγορίθμου βασίζεται σε τρεις θεμελιώδεις έννοιες:

- μια στρατηγική *εξελικτικής αναζήτησης* για την διερεύνηση του εφικτού χώρου·
- ένα σύνολο κανόνων εξέλιξης που χρησιμοποιούν ως βάση ένα κατάλληλα τροποποιημένο σχήμα *κατερχόμενο απλόκου*·
- μια τεχνική *προσομοιωμένης απόπτωσης*, βάσει της οποίας ρυθμίζεται ο βαθμός τυχαιότητας στην αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων κατά την διαδικασία αναζήτησης.

Ο *εξελικτικός αλγόριθμος* που αναπτύχθηκε συνδυάζει την ευρωστία της προσομοιωμένης απόπτωσης σε τραχέα προβλήματα βελτιστοποίησης, με την αποτελεσματικότητα των μεθόδων κλίσης σε απλούς χώρους αναζήτησης. Αρχικά γεννιέται ένας πληθυσμός τυχαίων λύσεων, ομοιόμορφα κατανομημένων στον εφικτό χώρο, που εξελίσσεται σταδιακά, μέχρι να συγκλίνει στο ολικό ακρότατο του προβλήματος. Σε κάθε κύκλο, ορισμένα (κατά κανόνα ένα) μέλη του πληθυσμού αντικαθίσταται από νέα σημεία. Ο αλγόριθμος αναζητά βελτιωμένες λύσεις, αν όμως δεν μπορεί να βρει τέτοιες επιδιώκει να διερευνήσει νέες περιοχές του εφικτού χώρου, αποδεχόμενος ακόμα και λύσεις που χειροτερεύουν αντί να βελτιώνουν την τιμή της συνάρτησης. Η πιθανότητα αποδοχής τέτοιων λύσεων ρυθμίζεται μέσω ενός ειδικού κανόνα, τέτοιου ώστε στα αρχικά στάδια της αναζήτησης να διερευνώνται όσο το δυνατό περισσότερες περιοχές ακροτάτων, ενώ στα τελικά στάδια να εξασφαλίζεται σύγκλιση προς το ολικό ακρότατο.

8.4 Σχεδιασμός του υπολογιστικού συστήματος

8.4.1 Υποσυστήματα του Υδρονομέα

Στο Σχήμα 8.6 παρουσιάζεται μια απλουστευμένη αλλά κατατοπιστική εικόνα των βασικών υποσυστημάτων του *Υδρονομέα* και των αλληλεπιδράσεών τους. Το σχήμα δεν συμπεριλαμβάνει τις επιδράσεις χρηστών στο σύστημα, ενώ ο *Υδρονομέας* εξωτερικά ανταλλάσσει πληροφορίες μόνο με την Κεντρική Βάση Δεδομένων (ΚΒΔ).

Συγκεκριμένα τα υποσυστήματα του *Υδρονομέα* έχουν τις εξής λειτουργίες:

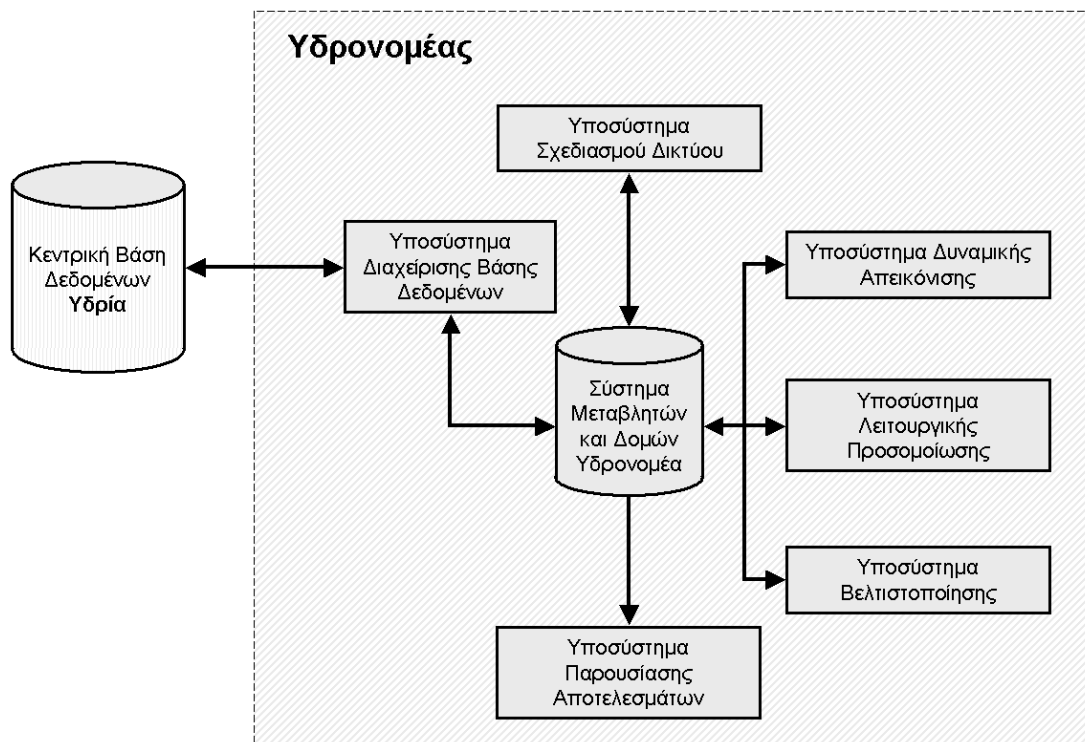
Το *Υποσύστημα Διαχείρισης της Βάσης Δεδομένων* παρέχει τις απαραίτητες λειτουργίες για την εισαγωγή, διαμόρφωση και αποθήκευση των δεδομένων που απαρτίζουν ένα έργο.

Μέσω του *Υποσυστήματος Σχεδιασμού Δικτύου* ο χρήστης μπορεί δημιουργήσει ένα μοντέλο δικτύου και να του προσδώσει τα χαρακτηριστικά που επιθυμεί, ή να τροποποιήσει τα χαρακτηριστικά των συστατικών ενός δικτύου που έχει φορτωθεί από την ΚΒΔ. Οι τροποποιήσεις καταγράφονται στο Σύστημα Μεταβλητών και Δομών Δεδομένων του *Υδρονομέα*. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορούν να τροποποιηθούν τα στοιχεία των ταμιευτήρων, των κόμβων, των υδραγωγείων, των γεωτρήσεων και των στόχων προσομοίωσης και να πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις, διατηρώντας παράλληλα στη Βάση Δεδομένων του *Υδρονομέα* το αρχικό σενάριο.

Το *Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης* αναπαριστά τη λειτουργία του υδροσυστήματος με τη βοήθεια ενός μοντέλου του υδροσυστήματος.

Το *Υποσύστημα Βελτιστοποίησης* ενεργοποιείται από το χρήστη και εκτελεί επαναληπτικά το *Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης* με διαφορετικές τιμές μεταβλητών ελέγχου κάθε φορά. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αξιολογούνται συγκριτικά με προηγούμενες προσομοιώσεις για να επιλεγούν νέες μεταβλητές ελέγχου.

Το *Υποσύστημα Δυναμικής Απεικόνισης* μπορεί να ενεργοποιηθεί από την αρχή ή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Χρησιμοποιεί το σύστημα μεταβλητών και δομών του *Υδρονομέα* για να παραστήσει την επίκαιρη κατάσταση του δικτύου.



Σχήμα 8.6: Τα βασικά συστατικά του *Υδρονομέα* και οι αλληλοεπιδράσεις τους.

Το *Υποσύστημα Παρουσίασης Αποτελεσμάτων* επεξεργάζεται τα πρωτογενή αποτελέσματα της προσομοίωσης και βελτιστοποίησης για να τα παρουσιάσει σε κατάλληλη μορφή στο χρήστη. Συγκεκριμένα παρέχει τις ακόλουθες πληροφορίες:

- Την συνολική πιθανότητα αστοχίας ως προς τη χρονική περίοδο και το χρονικό βήμα για κάθε έναν στόχο που έθεσε ο χρήστης ξεχωριστά. Εάν ο στόχος αναφέρεται στην κατανάλωση νερού, τότε δίνεται επιπλέον και η αστοχία κάλυψης όγκου.

- Την χρονική κατανομή της αστοχίας κάθε στόχου. Σε περίπτωση που ο στόχος αναφέρεται στην κατανάλωση νερού, τότε δίνεται επιπλέον και η ποσοτική κατανομή του ελλειμματικού όγκου.
- Το αναλυτικό υδατικό ισοζύγιο για κάθε κόμβο και ταμειυτήρα του δικτύου.
- Το ισοζύγιο ροών των υδραγωγείων του δικτύου.
- Την κατανάλωση ενέργειας για τη μεταφορά νερού διαμέσου αντλιοστασίων.
- Την πρόβλεψη παροχής σε κάθε υδραγωγείο του δικτύου στη βάση ισοπίθανων καμπυλών.
- Την πρόβλεψη άντλησης νερού σε κάθε μονάδα γεώτρησης του δικτύου στη βάση ισοπίθανων καμπυλών.
- Την πρόβλεψη διακύμανσης της στάθμης και όγκου σε κάθε ταμειυτήρα του συστήματος στη βάση ισοπίθανων καμπυλών.

8.4.2 Στοιχεία ενός έργου

Ο *Υδρονομέας* συνδέεται με την ΚΒΔ με σκοπό τη μόνιμη αποθήκευση των δεδομένων ενός έργου ή την εισαγωγή αυτών για περαιτέρω επεξεργασία και υπολογισμούς. Αναλυτικότερα, τα δεδομένα που απαρτίζουν ένα έργο (σενάριο διαχείρισης) είναι τα ακόλουθα:

Δεδομένα μοντέλου δικτύου. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται η τοπολογία του μοντέλου του δικτύου, οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των έργων αξιοποίησης νερού που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο (κόμβοι, ταμειυτήρες, υδραγωγεία, γεωτρήσεις) και οι αρχικές συνθήκες προσομοίωσης (αρχική στάθμη νερού στους ταμειυτήρες).

Υδρολογικά δεδομένα. Τα υδρολογικά δεδομένα ή αλλιώς το *υδρολογικό σενάριο* που χρησιμοποιεί ο *Υδρονομέας* είναι κατά κανόνα ιστορικές ή συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης, εξάτμισης και απορροής στους ταμειυτήρες. Στην πραγματικότητα ο *Υδρονομέας* είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε αποθηκευμένη χρονοσειρά με μηνιαίο χρονικό βήμα και μονάδα μέτρησης τα χιλιοστά. Αντίθετα, ο *Υδρονομέας* δεν διαθέτει λειτουργίες επεξεργασίας και αποθήκευσης χρονοσειρών, παρά μόνον αποθήκευσης της επιλογής υφιστάμενων χρονοσειρών ή υδρολογικών σεναρίων και του τρόπου χρήσης τους στο συγκεκριμένο έργο (αρχική ημερομηνία προσομοίωσης, διάρκεια προσομοίωσης, διαμόρφωση ενοτήτων χρονοσειρών).

Στόχοι και περιορισμοί. Πρόκειται για στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την προσομοίωση, τηρούμενης της προτεραιότητας εξυπηρέτησής τους. Στο έργο περιλαμβάνονται στόχοι που έθεσε ο χρήστης από τις παρακάτω κατηγορίες:

- κατανάλωση νερού για ύδρευση και άρδευση
- ελάχιστη ή μέγιστη στάθμη ταμειυτήρα
- αποφυγή υπερχειλίσεως ταμειυτήρα
- ελάχιστη, μέγιστη η σταθερή ροή νερού σε υδραγωγείο ή φυσικό υδατόρευμα

Επιλογές προσομοίωσης. Οι επιλογές που είναι απαραίτητες για τη διενέργεια προσομοίωσης είναι:

- ο καθορισμός των μεταβλητών ελέγχου και των τιμών των συντελεστών του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας των ταμειυτήρων,
- η επιλογή θεωρούμενης πραγματικής ή απεριόριστης παροχетеυτικότητας υδραγωγείων κατά την προσομοίωση
- η επιλογή εποχιακής μεταβολής των κανόνων λειτουργίας των ταμειυτήρων

Επιλογές βελτιστοποίησης. Οι επιλογές αυτές είναι απαραίτητες για τη διενέργεια βελτιστοποίησης, όπως:

- η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης
- η επιλογή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης και των στοιχείων εισόδου

Γενικά στοιχεία του έργου (ονομασία, περιγραφή).

Ύστερα από υπολογισμούς ο *Υδρονομέας* παρέχει δυνατότητες αποθήκευσης των αποτελεσμάτων με σκοπό τη χρήση τους από άλλα συστήματα που συνδέονται στην ΚΒΔ. Συγκεκριμένα με επιλογή του χρήστη αποθηκεύονται τα ακόλουθα στοιχεία:

- Οι συντελεστές του πλέον πρόσφατου κανόνα λειτουργίας ταμιευτήρων που χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση.
- Η αστοχία των στόχων και περιορισμών που προέκυψε κατά την προσομοίωση με τον παραπάνω κανόνα λειτουργίας.
- Οι μέσες ετήσιες τιμές του υδατικού ισοζυγίου για την συνολική περίοδο προσομοίωσης και για κάθε υδρολογικό έτος ξεχωριστά, όπως προέκυψαν κατά την προσομοίωση με τον παραπάνω κανόνα λειτουργίας.
- Η πρόβλεψη του αποθέματος των ταμιευτήρων του συστήματος στη βάση ισοπίθανων καμπυλών.
- Σε περίπτωση βελτιστοποίησης μπορούν να καταχωρηθούν οι συντελεστές των δέκα βέλτιστων κανόνων λειτουργίας.

Κατά την εισαγωγή του έργου από τη ΚΒΔ δεν φορτώνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών, παρά μόνον οι συντελεστές του κανόνα λειτουργίας των ταμιευτήρων. Τα εν λόγω αποτελέσματα μπορούν να αναπαραχθούν εκτελώντας μια προσομοίωση με τα στοιχεία που φορτώθηκαν.

Ο *Υδρονομέας* διαθέτει δυνατότητα σύνδεσης και ανταλλαγής δεδομένων με άλλες εφαρμογές, μέσω της ΚΒΔ.

9 Σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης

9.1 Εισαγωγή

Το αντικείμενο του κεφαλαίου εντάσσεται στο υποσύστημα 3 (*Ανάπτυξη συστήματος εκτίμησης και πρόγνωσης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*), με στόχο την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πληροφορικού συστήματος για τη μοντελοποίηση των κύριων διεργασιών του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού καθώς και η βελτίωση της σχέσης στάθμης και υπόγειων διαφυγών της Υλίκης. Το υπολογιστικό σύστημα αποτελεί, μαζί με το υποσύστημα πρόγνωσης των εισροών στους ταμιευτήρες Ευήνου, Μόρνου και Μαραθώνα, ένα βοηθητικό εργαλείο για το σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας (*Υδρονομέας*), έτσι ώστε το τελευταίο να ανταποκριθεί σε συγκεκριμένες επιχειρησιακές ανάγκες της ΕΥΔΑΠ.

9.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Για την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, αναπτύχθηκε ένα πρωτότυπο σχήμα ολοκληρωμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών της λεκάνης, που προκύπτει με σύζευξη τριών επιμέρους μοντέλων: (α) ενός μοντέλου ισοζυγίου της εδαφικής υγρασίας, (β) ενός μοντέλου προσομοίωσης της κίνησης του υπόγειου νερού, και (γ) ενός μοντέλου κατανομής των υδατικών αναγκών της λεκάνης (*Rozos et al.*, 2003).

9.2.1 Προσομοίωση επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών

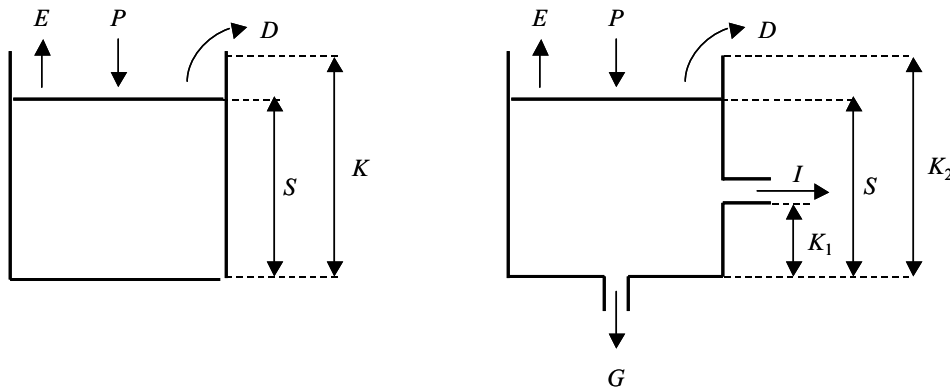
Η προσομοίωση των επιφανειακών διεργασιών της λεκάνης πραγματοποιείται μέσω ενός μοντέλου ισοζυγίου της εδαφικής υγρασίας, μηνιαίας χρονικής κλίμακας. Το μοντέλο αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή της κλασικής προσέγγισης του Thornthwaite, η οποία θεωρείται επαρκής μόνο για απλές υδρολογικές λεκάνες χειμαρρικής διαίτας, χωρίς αξιόλογη υπόγεια αποθήκευση (*Dingman*, 1994, pp. 299-301· *Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος*, 1999, σ. 236-243). Το πρωτότυπο μοντέλο απεικονίζεται στο Σχήμα 9.1, αριστερά, ενώ η τροποποιημένη εκδοχή του στο Σχήμα 9.1, δεξιά.

Η υδρολογική λειτουργία μιας λεκάνης εξομοιώνεται με τη λειτουργία μιας εννοιολογικής δεξαμενής συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας. Σε κάθε χρονικό βήμα t , το απόθεμά της αναπαριστά την αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας, S_t . Στοιχεία εισόδου είναι η βροχόπτωση, P_t , και η δυνητική εξατμοδιαπνοή, $E_{p,t}$. Η συνολική απορροή Q_t , επιμερίζεται σε δύο συνιστώσες, μια άμεση ροή, D_t , που εμφανίζεται κατά την διάρκεια πλημμυρών, και μια ταχεία υποδερμική ροή, I_t , ήτοι την συνιστώσα που πραγματοποιείται με χρονική υστέρηση. Η πλημμυρική απορροή πραγματοποιείται εφόσον η αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας ξεπεράσει τη χωρητικότητα της δεξαμενής, K_2 . Από την άλλη πλευρά, η υποδερμική ροή θεωρείται ότι υλοποιείται μέσω μιας οριζόντιας οπής που βρίσκεται σε στάθμη $K_1 < K_2$, και ο ρυθμός της θεωρείται ανάλογος της διαθέσιμης υγρασίας $S_t - K_1$ και ενός συντελεστή στείρευσης λ , ήτοι $dI_t / dt = \lambda (S_t - K_1)$. Επιπλέον, υπάρχει και μια κατακόρυφη οπή, που αναπαριστά τη φυσική διεργασία της κατείδυσης προς τον υπόγειο υδροφορέα. Όμοια με την υποδερμική ροή, αυτή θεωρείται ανάλογη της διαθέσιμης υγρασίας S_t κι ενός συντελεστή στείρευσης μ , ήτοι $dG_t / dt = \mu S_t$. Τέλος, επιβάλλεται ένα άνω όριο, ε , που εκφράζει το μέγιστο ποσοστό της

βροχόπτωσης που μπορεί να εξατμιστεί άμεσα. Στην περίπτωση που η άμεση εξατμοδιαπνοή υπολείπεται της δυναμικής, προκύπτει επιπλέον ζήτηση εξατμοδιαπνοής, αυτή τη φορά από τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία. Ο ρυθμός της τελευταίας εκτιμάται ως:

$$\frac{dE_{St}}{dt} = \zeta \frac{E_{Pt} - \varepsilon P_t}{K_2} S_t \quad (9.1)$$

όπου ζ αριθμητικός συντελεστής, που εισάγεται για να υπάρχει συμβατότητα των μονάδων μέτρησης. Η εξατμοδιαπνοή από το έδαφος, μαζί με την κατεισδύση και την υποδερμική ροή συνιστούν τις απώλειες εδαφικής υγρασίας. Για τον υπολογισμό τους, επιλύονται οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το ισοζύγιο μάζας κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος προσομοίωσης. Λεπτομέρειες δίνονται στο Τεύχος 21.



Σχήμα 9.1: Αρχικό (αριστερά) και τροποποιημένο (δεξιά) μοντέλο εδαφικής υγρασίας.

Μια βασική παραδοχή του μοντέλου είναι ότι η υπερχειλίση πραγματοποιείται μετά την ολοκλήρωση των υπόλοιπων υδρολογικών διεργασιών, γεγονός που συνεπάγεται ότι κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος επιτρέπεται στην εδαφική υγρασία να ξεπεράσει τη χωρητικότητα της δεξαμενής. 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 να εξατμιστεί ή να κατεισδύσει. Η υπόθεση αυτή επιτρέπει την παραγωγή πιο ρεαλιστικών αποκρίσεων της λεκάνης, οι οποίες είναι συνεπείς με την μεταβλητότητα της βροχόπτωσης.

9.2.2 Προσομοίωση υπόγειων υδρολογικών διεργασιών

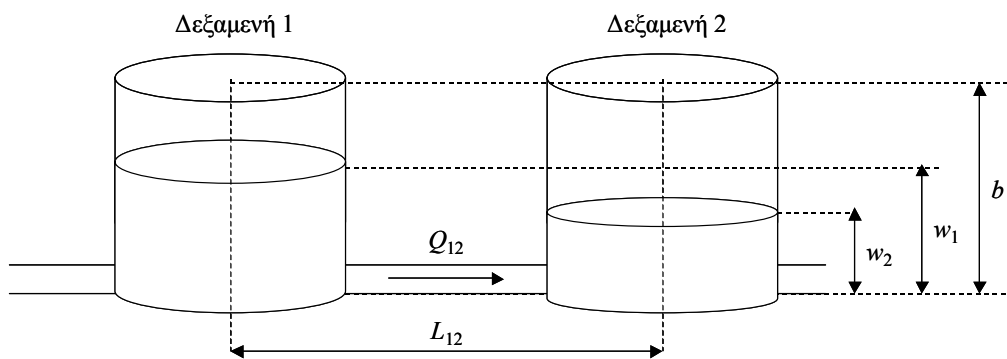
Η προσομοίωση της υπόγειας κίνησης του νερού βασίζεται στην τεχνική των πολυκυτταρικών μοντέλων (Bear, 1979), και υλοποιήθηκε ως ειδική περίπτωση του σχήματος που περιγράφουν οι Rozos and Koutsoyiannis (2002). Σύμφωνα με αυτό, ο υδροφορέας αναπαρίσταται ως ένας κάναβος αποτελούμενο από δεξαμενές και στοιχεία μεταφοράς (αγωγοί), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 9.2. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε δεξαμενής i είναι το εμβαδόν της βάσης, F_i , και το ύψος της οροφής της, b_i , που εκφράζει και το όριο μεταξύ των φρεάτιων και των υπό πίεση συνθηκών. Το εμβαδόν της δεξαμενής προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την επιφάνεια του αντίστοιχου υδροφορέα επί την ειδική απόδοση αυτού, S_Y , ενώ το ύψος της οροφής ισούται με το πάχος του υδροφορέα. Αν W_i είναι η στάθμη νερού στην δεξαμενή, τότε ο αποθηκευμένος όγκος νερού υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_i = p w_i F_i \quad (9.2)$$

όπου p το πορώδες του υδροφορέα (αδιάστατο). Το υδραυλικό φορτίο, H_i , υπολογίζεται ως:

$$H_i = \begin{cases} W_i & W_i \leq b_i \\ b_i + (W_i - b_i) \theta & W_i > b_i \end{cases} \quad (9.3)$$

όπου θ είναι ο λόγος της ειδικής απόδοσης προς την αποθηκευτικότητα υπό συνθήκες πίεσης.



Σχήμα 9.2: Δεξαμενές μοντέλου προσομοίωσης υπόγειων υδρολογικών διεργασιών.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε αγωγού (i, j) είναι ο όρος υδραυλικής αγωγιμότητας (conductance), c_{ij} , που ορίζεται σε μονάδες παροχής, και το μήκος του, L_{ij} , που υπολογίζεται ως η απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους των διασυνδεδεμένων δεξαμενών. Η φορά κίνησης εξαρτάται από την διαφορά στάθμης μεταξύ των δεξαμενών. Η ειδική παροχή q_{12} , ήτοι ο ανά μονάδα επιφάνειας μεταφερόμενος όγκος νερού μεταξύ δύο δεξαμενών 1 και 2 υπολογίζεται από την εξίσωση Darcy:

$$q_{12} = c_{12} \frac{H_1 - H_2}{L_{12}} \quad (9.4)$$

Οι δεξαμενές τροφοδοτούνται από την κατείσδυση των υπερκείμενων λεκανών, η λειτουργία των οποίων προσομοιώνεται μέσω των δεξαμενών εδαφικής υγρασίας. Μια άλλη μορφή φόρτισης είναι η άντληση, που επιβάλλεται για την ικανοποίηση των υδατικών αναγκών από το μοντέλο κατανομής των απολήψεων (βλ. 9.2.4). Η εκφόρτιση ενός υδροφορέα μέσω μιας πηγής μοντελοποιείται μέσω μιας δεξαμενής πολύ μεγάλης βάσης, που τροφοδοτείται μόνο από γειτονικές της δεξαμενές. Έτσι, οι απειροελάχιστες μεταβολές στάθμης μετασχηματίζονται στο υδρογράφημα της πηγής.

Για γνωστές αρχικές στάθμες και χρονοσειρές κατείσδυσης και άντλησης είναι δυνατή η αναπαράσταση της κίνησης του υπόγειου νερού μεταξύ των δεξαμενών σε κάθε χρονικό βήμα. Για το σύνολο των δεξαμενών, προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων της μορφής (9.4), που επιλύεται μέσω ενός ρητού αριθμητικού σχήματος. Έξοδοι του μοντέλου είναι οι χρονοσειρές στάθμης και αποθέματος όλων των δεξαμενών, και οι χρονοσειρές παροχής των πηγών.

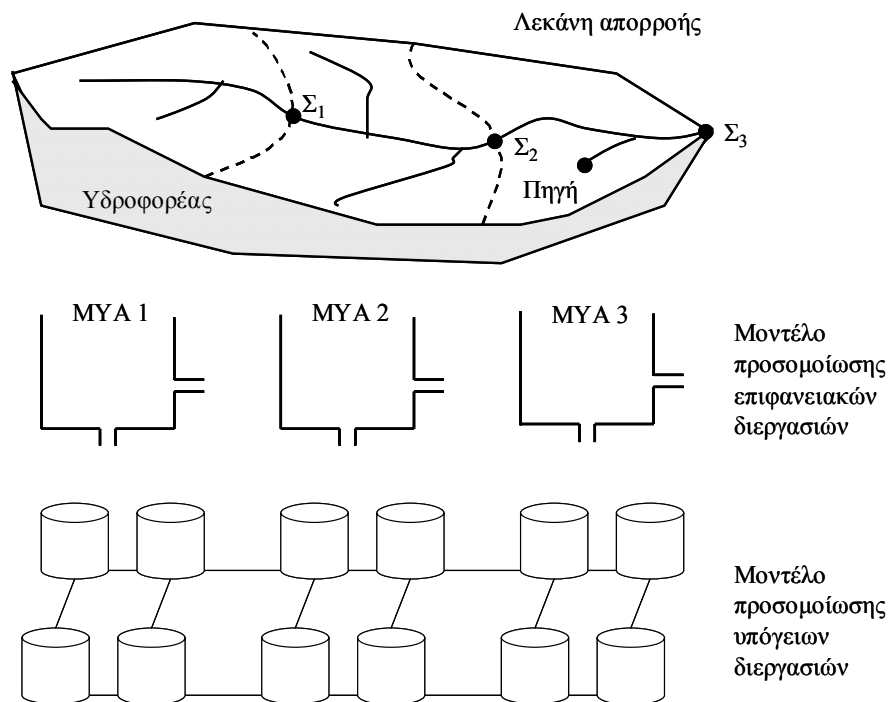
9.2.3 Σχήμα συνδυασμένης προσομοίωσης επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών

Το συνδυασμένο σχήμα προσομοίωσης ακολουθεί σε μια ημικατανεμημένη προσέγγιση, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 9.3. Η συνολική λεκάνη απορροής χωρίζεται σε χωρικές ενότητες, με παρόμοια γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, που καλούνται μονάδες υδρολογικής απόκρισης (hydrological response units). Αυτές δεν αντιστοιχούν κατ' ανάγκη σε φυσικές υπολεκάνες, παρά είναι εννοιολογικές οντότητες, οι υδρολογικές διεργασίες των οποίων αναπαρίστανται μέσω των δεξαμενών συγκέντρωσης εδαφικής υγρασίας. Χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε μονάδας υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ) είναι η έκταση, A , οι παράμετροί της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας (K_1, K_2, λ, μ), η αρχική εδαφική υγρασία, S_0 , και οι χρονοσειρές εισόδου, ήτοι η βροχόπτωση, P_t , και η δυνητική εξατμοδιαπνοή, E_{p_t} , εκφρασμένες σε ισοδύναμα ύψη. Η παράμετρος ε , ήτοι το άνω όριο πραγματοποίησης της άμεσης εξατμοδιαπνοής, θεωρείται κοινή για όλες τις ΜΥΑ.

Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο του υδροφορέα διαμορφώνεται ως ένας κánaβος κυττάρων, σε κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί μια δεξαμενή υπόγειου νερού. Χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε κυττάρου είναι οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους (X, Y), η επιφάνεια, E , και η αρχική στάθμη

νερού, w_0 , της αντίστοιχης δεξαμενής υπόγειου νερού, οι όροι υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τις δύο διευθύνσεις (c_x, c_y), και οι υδατικές ανάγκες, D_i . Το πορώδες θεωρείται κοινό σε όλη την έκταση του υδροφορέα.

Κάθε υπόγεια δεξαμενή τροφοδοτείται από την κατείδυση συγκεκριμένης ΜΥΑ, ενώ αντίθετα, κάθε ΜΥΑ μπορεί να τροφοδοτεί περισσότερες από μια δεξαμενές υπόγειου νερού. Αυτό αυξάνει την ευελιξία του μοντέλου, επιτρέποντας την χρήση διαφορετικής χωρικής ανάλυσης για τις επιφανειακές και υπόγειες διεργασίες. Συνεπώς, ένα λεπτομερές σχήμα προσομοίωσης της υπόγειας κίνησης του νερού μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με ένα αδρομερές σχήμα προσομοίωσης της επιφανειακής ροής. Για την εξασφάλιση της ευστάθειας του αριθμητικού σχήματος επίλυσης, υιοθετείται ένα μικρό υπολογιστικό βήμα, πολύ μικρότερο από το τυπικό μηνιαίο βήμα της προσομοίωσης. Συνεπώς, οι φορτίσεις, ήτοι η κατείδυση και η άντληση, που είναι γνωστές σε αδρή χρονική διακριτότητα, επιμερίζονται ομοιόμορφα, ώστε να είναι συνεπείς με το υιοθετούμενο υπολογιστικό βήμα. Ομοίως, οι χρονοσειρές εξόδου του πολυκυτταρικού μοντέλου (απορροή πηγών, απώλειες προς τη θάλασσα) συναθροίζονται στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Συνεπώς, αίρονται οι περιορισμοί χρονικής κλίμακας, καθώς οι υπολογιστικές παράμετροι του μοντέλου υπόγειων νερών ρυθμίζονται αυτόματα.



Σχήμα 9.3: Παράδειγμα συνδυασμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων υδρολογικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής και του υποκείμενου υδροφορέα αυτής.

9.2.4 Μοντέλο κατανομής απολήψεων

Στο μοντέλο προσομοίωσης λαμβάνονται υπόψη και οι απολήψεις που πραγματοποιούνται τόσο από επιφανειακά όσο και από υπόγεια νερά. Στην πραγματικότητα, αυτές είναι άγνωστες (δεν έχουν μετρηθεί) και πρέπει να εκτιμηθούν προσεγγιστικά. Αρχικά, επιλύεται το μοντέλο προσομοίωσης των επιφανειακών διεργασιών και εκτιμάται η επιφανειακή απορροή της λεκάνης Q_f , ως άθροισμα των απορροών των επιμέρους ΜΥΑ. Ομοίως, επιλύεται το μοντέλο προσομοίωσης των υπόγειων διεργασιών και εκτιμάται η πηγαία απορροή Q_s , ως άθροισμα των εκροών των επιμέρους πηγών, θεωρώντας μηδενική φόρτιση λόγω αντλήσεων. Η συνολική απορροή της λεκάνης, Q , προκύπτει αθροίζοντας τα μεγέθη Q_f και Q_s . Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένα μοντέλο κατανομής της ζήτησης, το

οποίο εκτιμά τις απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά, συναρτήσει των επιμέρους υδατικών αναγκών. Συγκεκριμένα, οι υδατικές ανάγκες σε κάθε κελί ικανοποιούνται με τρεις δυνατούς τρόπους: (α) άντληση από την υποκείμενη δεξαμενή υπόγειου νερού, (β) απόληψη επιφανειακών νερών ανάντη πηγής, και (γ) απόληψη επιφανειακών νερών λεκάνης.

Οι απολήψεις γίνονται κατά προτεραιότητα, σύμφωνα με την σειρά που ορίζει ο χρήστης. Για κάθε κύτταρο είναι γνωστή η χρονοσειρά των υδατικών αναγκών, D_t , και οι πηγές απόληξης. Το μοντέλο προσπαθεί να ικανοποιήσει την ζήτηση από την πρώτη πηγή. Εφόσον οι υδατικοί πόροι δεν επαρκούν, το έλλειμμα καλύπτεται από την επόμενη πηγή απόληξης κοκ. Αν η απόληψη γίνεται από τα επιφανειακά νερά, αυτή αφαιρείται από τη συνολική απορροή. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η εκτίμηση της πραγματικής κατανομής των επιφανειακών και υπόγειων απολήψεων, με βάση μόνο τις θεωρητικές ανάγκες σε νερό στις διάφορες περιοχές της λεκάνης.

Εφόσον πραγματοποιούνται απολήψεις από υπόγεια νερά, το δυναμικό των πηγών είναι μικρότερο από αυτό που υποτέθηκε αρχικά, καθώς η στάθμη των υπόγειων δεξαμενών μειώνεται λόγω των αντλήσεων. Για τον λόγο αυτόν, επαναλαμβάνεται η επίλυση του μοντέλου υπόγειων νερών, με φόρτιση τις επίκαιρες αντλήσεις. Στη συνέχεια, επαναλαμβάνεται η εκτέλεση του μοντέλου κατανομής της ζήτησης για τον υπολογισμό των απολήψεων. Προφανώς, επειδή η απορροή των πηγών είναι μικρότερη από προηγουμένως, το μοντέλο επιβάλλει περαιτέρω αντλήσεις. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να επέλθει σύγκλιση, που συνήθως επιτυγχάνεται σε δύο μόλις κύκλους.

9.2.5 Βαθμονόμηση μοντέλου

Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου προσομοίωσης διατυπώνεται ως πρόβλημα ολικής βελτιστοποίησης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, αναπτύχθηκε ένας ευρετικός αλγόριθμος, όπου επιχειρείται σύζευξη υφιστάμενων μεθοδολογικών προσεγγίσεων και ορισμένων πρωτότυπων στοιχείων (βλ. 8.3.6).

9.3 Δεδομένα λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού

9.3.1 Σκοπός

Στα πλαίσια των εργασιών υποδομής πραγματοποιήθηκε συλλογή, επεξεργασία και στατιστική ανάλυση ενός εξαιρετικά μεγάλου φάσματος γεωγραφικών, υδρολογικών, υδρογεωλογικών και άλλων δεδομένων της περιοχής, καθώς και ενός σημαντικού αριθμού σχετικών μελετών. Η διερεύνηση αυτή, σε συνδυασμό με τις επισκέψεις που πραγματοποιήθηκαν από μέλη της ερευνητικής ομάδας και την συνεργασία με της με εμπειρογνώμονες από την ΕΥΔΑΠ και το ΠΓΜΕ, συνέβαλαν στην καλύτερη κατανόηση των πολύπλοκων φυσικών διεργασιών της λεκάνης, με απώτερο στόχο την βέλτιστη σχηματοποίηση της μαθηματική δομής του μοντέλου προσομοίωσης.

9.3.2 Βροχομετρικά δεδομένα

Εξετάστηκαν τα διαθέσιμα στοιχεία όλων των βροχομετρικών σταθμών της ευρύτερης περιοχής, περιλαμβανομένων και αυτών που είχαν λειτουργήσει σε παλαιότερες περιόδους. Από το σύνολο των σταθμών επελέγησαν οι 13 που απεικονίζονται στον χάρτη του Σχήματος 9.4. Τα δεδομένα των εν λόγω σταθμών χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης για την περίοδο 1966-67 έως 1993-94, σε δύο χαρακτηριστικές ζώνες της λεκάνης. Η πρώτη ζώνη περιλαμβάνει τους ορεινούς καρστικούς όγκους, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει τα πεδινά τμήματα αυτής. Η διαφορά όσον αφορά το ύψος βροχόπτωσης είναι πολύ σημαντική, καθώς η μέση ετήσια τιμή στις ορεινές περιοχές ξεπερνά τα 1300 mm, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τις πεδινές περιοχές ανέρχεται στα επίπεδα των 650 mm. Σημειώνεται ότι τα μηνιαία δείγματα βροχόπτωσης προέκυψαν

με συνάθροιση των πρωτογενών ημερήσιων τιμών, μετατοπισμένων κατά δύο ημέρες, που είναι και ο κατά προσέγγιση χρόνος συρροής της λεκάνης. Η μετατόπιση έγινε ώστε να αποφευχθούν τυχόν ασυμβατότητες μεταξύ φόρτισης (βροχόπτωση) και απόκρισης της λεκάνης (απορροή) κατά την προσομοίωση, στην περίπτωση εμφάνισης πλημμυρών στο τέλος του μήνα.



Σχήμα 9.4: Θέσεις βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης.

9.3.3 Δεδομένα χιονόπτωσης

Στη λεκάνη δεν πραγματοποιούνται μετρήσεις χιονόπτωσης, παρά την ύπαρξη εκτεταμένων περιοχών με πολύ μεγάλο υψόμετρο. Μια χονδροειδής εκτίμηση της συνεισφοράς της χιονόπτωσης στα συνολικά κατακρημνίσματα πραγματοποιήθηκε συλλέγοντας τις μετρήσεις χιονιού στον σταθμό Πυράς, που βρίσκεται σε υψόμετρο 1140 m και ανήκει στη γειτονική λεκάνη του Μόρνου. Η ανάλυση κατέδειξε ότι η συνεισφορά της χιονόπτωσης στο υδατικό δυναμικό της λεκάνης είναι αρκετά αξιόλογη, ιδιαίτερα σε περιόδους χαμηλής, γενικά, υδροφορίας.

9.3.4 Υδρομετρικά δεδομένα

Όπως προαναφέρθηκε, από το 1907 διατίθενται εκτιμήσεις της μηνιαίας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού μέσω της Σήραγγας Καρδίτσας. Η διερεύνηση που έγινε ανέδειξε ορισμένα προβλήματα αξιοπιστίας, που οφείλονται σε συστηματικά σφάλματα αλλά και σε αμέλειες του παρατηρητή. Από την ανάλυση του δείγματος προκύπτει σημαντική μείωση του δυναμικού της λεκάνης, μέρος της οποίας οφείλεται στην εντατική εκμετάλλευση των υδροφορέων για την ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών.

Από το 1980, το ΙΓΜΕ υλοποίησε ένα εκτεταμένο πρόγραμμα υδρομετρήσεων στην περιοχή του Βοιωτικού Κηφισού (Παγούνης κ.ά., 1994), σε 22 συνολικά θέσεις, που απεικονίζονται στον χάρτη του Σχήματος 5.5. Οι υδρομετρήσεις πραγματοποιούνται ανά 15 περίπου ημέρες, χρονική κλίμακα που κρίνεται απόλυτα ανεπαρκής για την εξαγωγή αξιόπιστων δειγμάτων απορροής κατά μήκος του ποταμού. Από την άλλη πλευρά, κρίθηκε δυνατή η κατασκευή σχετικά αξιόπιστων χρονοσειρών απορροής των πηγών, θεωρώντας ότι η διακύμανση της παροχής τους είναι σχετικά μικρή σε κλίμακα μικρότερη του μήνα. Ακόμη, τα δεδομένα του ΙΓΜΕ χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση εκτεταμένων στατιστικών αναλύσεων, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την χωρική κατανομή του επιφανειακού και πηγαιού υδατικού δυναμικού της λεκάνης.

9.3.5 Δεδομένα υπόγειας υδρολογίας

Το ΙΓΜΕ διενεργεί για λογαριασμό της ΕΥΔΑΠ συστηματικές μετρήσεις στάθμης σε 42 θέσεις παρατήρησης στην περιοχή μελέτης. Γενικά, οι παρατηρούμενες υπερετήσεις διακυμάνσεις της στάθμης στις υπόλοιπες γεωτρήσεις είναι σχετικά περιορισμένες. Αντίθετα, στην περιοχή του μέσου του Βοιωτικού Κηφισού, με βάση τις καταγραφές των πιεζόμετρων αλλά και τις μετρήσεις παροχής των πηγών Μαυρονερίου προκύπτει ότι η απόκριση του υδροφορέα είναι ευαίσθητη στην αλλαγή των συνθηκών υδροφορίας και την πραγματοποίηση εκτεταμένων αντλήσεων.

9.3.6 Δεδομένα αρδευτικών αναγκών

Οι αρδευτικές ανάγκες υπολογίστηκαν έμμεσα, βάσει των θεωρητικών αναγκών των καλλιεργειών σε νερό και των αρδευόμενων εκτάσεων. Γενικά, η άρδευση πραγματοποιείται με αντλήσεις από υπόγεια νερά, αλλά και με απευθείας απολήψεις επιφανειακών νερών από τον Βοιωτικό Κηφισό και τις πηγές του. Μια τρίτη πηγή υδροδότησης είναι οι αντλήσεις από την Υλίκη, που τα τελευταία χρόνια έχουν σταθεροποιηθεί στα επίπεδα των 15-20 hm³/έτος. Λαμβάνοντας υπόψη εκτιμήσεις του ΓΕΩΤΕΕ (1995), με τη θεώρηση ετήσιων αναγκών της τάξης των 660-680 mm, η αρδευτική ζήτηση της περιοχής μελέτης εκτιμώνται σε 238 hm³/έτος, ποσότητα που επιμερίζεται σε 40 hm³ στον άνω ρου, 56 hm³ στον μέσο και κάτω ρου και 141 hm³ στην Κωπαΐδα και τις παρακείμενες εκτάσεις.

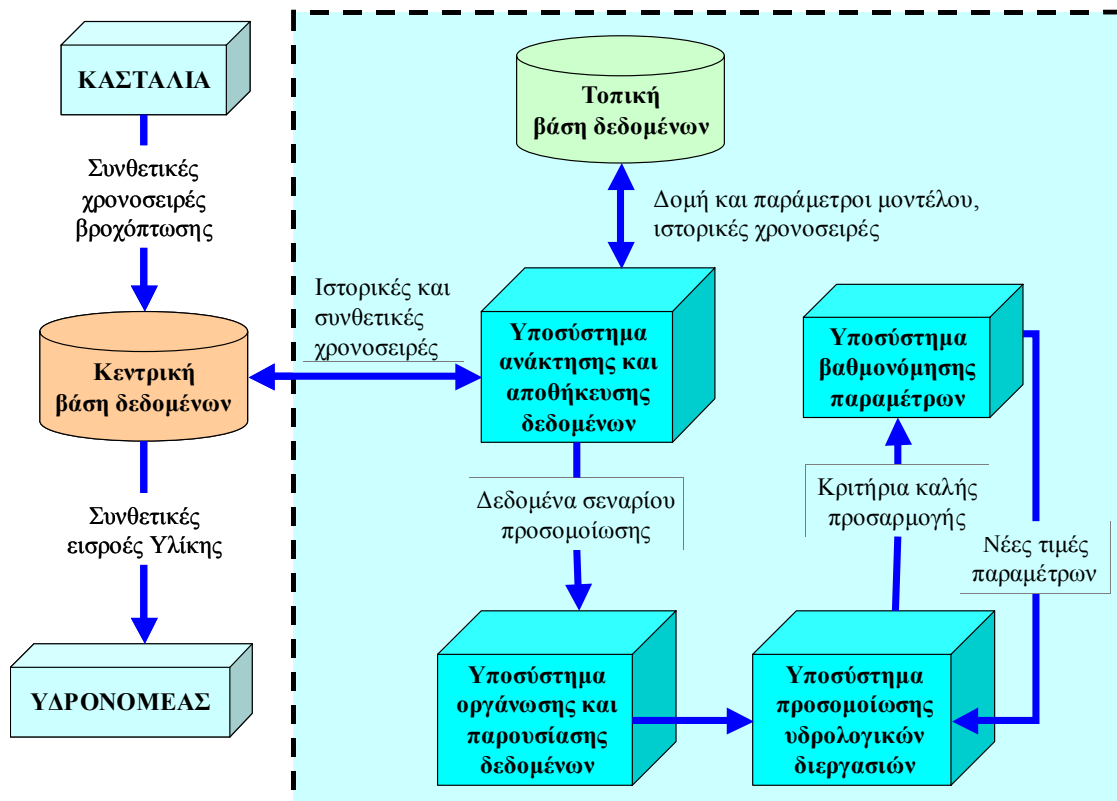
9.4 Ανάπτυξη λογισμικού προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών

Το μεθοδολογικό πλαίσιο υλοποιήθηκε σε ενιαίο υπολογιστικό σύστημα, ο σχεδιασμός του οποίου έγινε με βάση τις προδιαγραφές της ανάλυσης απαιτήσεων. Οι δύο κύριες λειτουργίες του είναι: (α) η αναπαράσταση των ιστορικών αποκρίσεων της λεκάνης, με σκοπό τη βαθμονόμηση του μοντέλου προσομοίωσης, και (β) η πρόγνωση της εξέλιξης των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης, για δεδομένο σενάριο βαθμονόμησης και δεδομένες αρχικές συνθήκες, με χρήση συνθετικών χρονοσειρών εισόδου.

Το πρόγραμμα υποστηρίζεται από μια τοπική βάση δεδομένων, όπου αποθηκεύονται οι πληροφορίες που αναφέρονται στη μαθηματική δομή, τις συνιστώσες, τις παραμέτρους και τις ιστορικές χρονοσειρές εισόδου των σεναρίων προσομοίωσης. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα επικοινωνίας και με την κεντρική βάση του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων (ΣΥΑ), για την ανάκτηση και αποθήκευση των ιστορικών και, κυρίως, των συνθετικών χρονοσειρών εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται αφενός η αυτονομία του συστήματος όσο και η επιχειρησιακή του ένταξη στο ΣΥΑ, αφού είναι εφικτή η ανταλλαγή πληροφοριών με τα υπόλοιπα συστήματα του έργου.

Στο Σχήμα 9.5 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική δομή του προγράμματος και το πλαίσιο συνεργασίας του με τα λογισμικά Κασταλία και Υδρονομέας. Σε μια τυπική σύνοδο, ο χρήστης επιλέγει ένα υφιστάμενο σενάριο προσομοίωσης ή δημιουργεί ένα νέο. Από τη βάση ανακτώνται οι απαραίτητες πληροφορίες, δηλαδή η μαθηματική δομή, οι αρχικές συνθήκες και οι παράμετροι του σεναρίου και οι χρονοσειρές εισόδου. Ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τα δεδομένα εισόδου, και να εισάγει νέα χρονοσειρά είτε από την τοπική είτε από την κεντρική βάση. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η προσομοίωση των ιστορικών αποκρίσεων ή η πρόγνωση των μελλοντικών αποκρίσεων της λεκάνης. Στην πρώτη περίπτωση, παρέχεται η δυνατότητα αυτόματης βαθμονόμησης επιλεγμένων παραμέτρων καθώς και αρχικών συνθηκών του μοντέλου, μέσω βελτιστοποίησης. Ο χρήστης μπορεί να οπτικοποιήσει το σύνολο των δεδομένων και να ελέγξει το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης. Μετά το

πέρας της συνόδου, το σύνολο των πληροφοριών του σεναρίου μπορούν να αποθηκευτούν στην τοπική βάση δεδομένων, ενώ ειδικά οι χρονοσειρές εξόδου αποθηκεύονται και στην κεντρική βάση.



Σχήμα 9.5: Αρχιτεκτονική δομή και συνιστώσες υπολογιστικού συστήματος.

9.5 Προσαρμογή μοντέλου προσομοίωσης στη λεκάνη του Β. Κηφισού

9.5.1 Σκοπός και περιορισμοί του μοντέλου

Σκοπός του μοντέλου είναι η πρόγνωση των εισροών της Υλίκης, μέσω της Διώρυγας Καρδίτσας, καθώς και των επιπτώσεων στην υδρολογική δίαιτα του Βοιωτικού Κηφισού των απολήψεων που πραγματοποιούνται μέσω των υδρευτικών γεωτρήσεων του μέσου ρου της λεκάνης απορροής του. Κατά την κατάστρωση του μοντέλου ελήφθησαν υπόψη οι ακόλουθοι περιοριστικοί παράγοντες:

- η έλλειψη αξιόπιστης και συστηματικής χωρικής πληροφορίας όσον αφορά την υδρολογία της περιοχής μελέτης, και κυρίως την υπόγεια υδρολογία·
- η αδυναμία εκτίμησης των πραγματικών υδατικών αναγκών, σε συνδυασμό με την πλήρη έλλειψη στοιχείων σχετικά με τον επιμερισμό των απολήψεων από επιφανειακά και υπόγεια νερά·
- η αοριστία που οφείλεται στην υδραυλική επικοινωνία του υδροφορέα με την θάλασσα.

Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τους υπολογιστικούς περιορισμούς, οδήγησαν στην ανάγκη ανάπτυξης ενός ημικατανεμημένου σχήματος που χρησιμοποιεί τα ελάχιστα στοιχεία εισόδου και ένα φειδωλό πλήθος παραμέτρων. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η επαληθευσσιμότητα του μοντέλου, καθώς δεν απαιτούνται επιπλέον δεδομένα σε σχέση με αυτά που συστηματικά διατίθενται στην περιοχή. Από την άλλη πλευρά, το σχετικά μικρό πλήθος παραμέτρων εξασφαλίζει ευσταθή μαθηματική δομή, αξιόπιστη προγνωστική ικανότητα και χαμηλό υπολογιστικό φόρτο.

9.5.2 Σχηματοποίηση λεκάνης απορροής, υδροφορέα και υδροσυστήματος

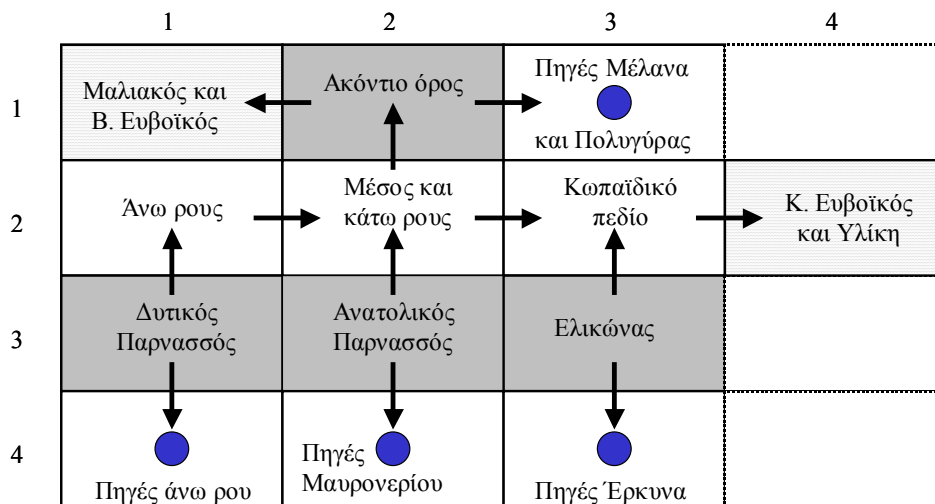
Το μοντέλο που διαμορφώθηκε περιλαμβάνει τρία επίπεδα προσομοίωσης: (α) το υδροσύστημα, ήτοι τους υδατικούς πόρους και τα έργα αξιοποίησης, (β) τη λεκάνη απορροής, και (γ) τον υδροφορέα. Για την προσομοίωση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών η συνολική λεκάνη απορροής, έκτασης 2042.6 km², χωρίστηκε σε δύο μονάδες υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ), που αντιστοιχούν σε περιοχές με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά (βλ. Σχήμα 9.6). Η ΜΥΑ 1, έκτασης 651.9 km², προσομοιώνει τις υδρολογικές διεργασίες στις ορεινές περιοχές, όπου υπάρχει έντονη ανάπτυξη του καρστ, ενώ η ΜΥΑ 2, έκτασης 1390.9 km², προσομοιώνει τις αντίστοιχες διεργασίες στις περιοχές χαμηλού υψομέτρου, όπου κυριαρχούν οι ποτάμιες αποθέσεις.



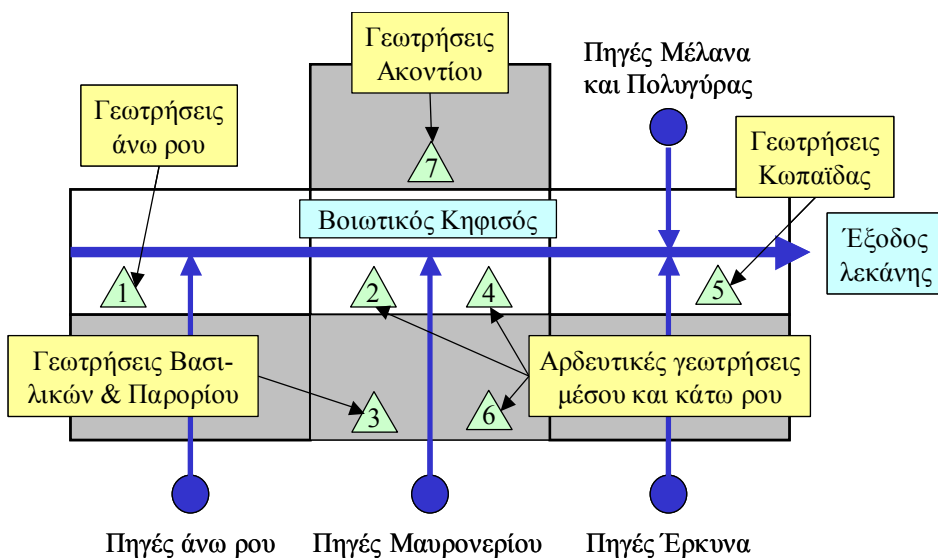
Σχήμα 9.6: Λεκάνη απορροής Βοιωτικού Κηφισού και κύριες καρστικές πηγές. Η σκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί στην ΜΥΑ 1, ενώ η λευκή στην ΜΥΑ 2.

Για την προσομοίωση της κίνησης των υπογείων υδάτων υιοθετήθηκε μια διάταξη 4 × 4 κυττάρων, η κάτοψη των οποίων απεικονίζεται στο Σχήμα 9.7. Σε κάθε κύτταρο (i, j) αντιστοιχεί μια εννοιολογική δεξαμενή υπόγειου νερού, ενώ η φορά της ροής συμβολίζονται με βέλη. Στα κύτταρα (1, 1) και (2, 4) αντιστοιχούν εικονικές δεξαμενές, οι οποίες συγκεντρώνουν τις διαφυγές προς τη θάλασσα. Τα κύτταρα (4, 1), (4, 2), (1, 3) και (4, 3) αντιστοιχούν στις πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου, Μαυρονερίου, Μέλανα-Πολυγύρας (θεωρούμενες ως ενιαία πηγή) και Έρκυνα, αντίστοιχα. Οι εν λόγω δεξαμενές έχουν αμελητέα επιφάνεια, ενώ οι συντεταγμένες και η αρχική τους στάθμη αντιστοιχούν στις συντεταγμένες και το απόλυτο υψόμετρο εκφόρτισης των αντίστοιχων πηγών. Οι δεξαμενές που αντιστοιχούν στα κύτταρα που απεικονίζονται με γκρι χρώμα τροφοδοτούνται από την κατείδυση της ΜΥΑ 1. Ειδικότερα, η (3, 1) προσομοιώνει την λειτουργία του υδροφορέα του ΒΔ Παρνασσού που τροφοδοτεί τις πηγές του άνω ρου, η (1, 2) του υδροφορέα του Ακοντίου που τροφοδοτούν τις πηγές Μέλανα-Πολυγύρας, η (3, 2) του υδροφορέα του ΒΑ Παρνασσού, που τροφοδοτεί τις πηγές Μαυρονερίου, ενώ η (3, 3) του υδροφορέα του Ελικώνα, που τροφοδοτεί τις πηγές Έρκυνα. Οι δεξαμενές που αντιστοιχούν στα λευκά κύτταρα τροφοδοτούνται από την κατείδυση της ΜΥΑ 2. Ειδικότερα, η (2, 1) προσομοιώνει τη λειτουργία του υδροφορέα του άνω ρου, η (2, 2) του υδροφορέα του μέσου και κάτω ρου, ενώ η (2, 3) της Κωπαΐδας. Τέλος, τα κύτταρα (1, 4), (3, 4) και (4, 4) τίθενται για υπολογιστικούς λόγους, χωρίς να συμμετέχουν στην κίνηση του νερού.

Για τις ανάγκες του μοντέλου διαμορφώθηκε ένα στοιχειώδες υδροσύστημα που περιλαμβάνει τον κύριο κλάδο του Βοιωτικού Κηφισού, τους βασικούς παραποτάμους του, που τροφοδοτούνται από τις καρστικές πηγές, και τις αρδευτικές και υδρευτικές γεωτρήσεις (Σχήμα 9.8).



Σχήμα 9.7: Διακριτοποίηση του υδροφορέα σε κύτταρα και απεικόνιση των δυνατών κινήσεων του υπόγειου νερού. Με κύκλο απεικονίζονται τα κύτταρα στα οποία αντιστοιχούν πηγές.



Σχήμα 9.8: Σχηματική απεικόνιση υδροσυστήματος που αποτελείται από κλάδους ποταμών (βέλη), πηγές (κύκλοι) και ομάδες γεωτρήσεων (τρίγωνα). Στο παρασκήνιο απεικονίζεται η διακριτοποίηση της λεκάνης στις δύο μονάδες υδρολογικής απόκρισης και του υδροφορέα σε κύτταρα.

Οι γεωτρήσεις συμπύσσονται σε ομάδες. Κάθε ομάδα θεωρείται ότι αντλεί νερό από τον υδροφορέα που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη δεξαμενή υπόγειου νερού. Συγκεκριμένα:

- οι γεωτρήσεις που αναπτύσσονται στις πεδινές εκτάσεις της λεκάνης (άνω, μέσος και κάτω ρους Βοιωτικού Κηφισού, Κωπαΐδα), και υδρομαστεύουν προσχωματικούς κυρίως υδροφορείς·
- οι αρδευτικές και υδρευτικές γεωτρήσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή του μέσου ρου και υδρομαστεύουν τον καρστικό υδροφορέα που τροφοδοτεί τις πηγές Μαυρονερίου (κύτταρο 3, 2)·
- οι γεωτρήσεις του ΥΠΓΕ, που αναπτύσσονται στις παρυφές του Ακοντίου και υδρομαστεύουν τον καρστικό υδροφορέα που τροφοδοτεί τις πηγές Μέλανα-Πολυγύρας (κύτταρο 1, 2).

Οι απολήψεις γίνονται από επιφανειακά και υπόγεια νερά. Η μηνιαία κατανομή των απολήψεων γίνεται αυτόματα από το μοντέλο, εφόσον για κάθε περιοχή ζήτησης είναι γνωστές οι υδατικές ανάγκες και ο τρόπος πραγματοποίησης των απολήψεων (πηγές υδροδότησης). Οι υδατικές ανάγκες της λεκάνης επιμερίστηκαν σε επτά περιοχές ζήτησης που συνοψίζονται στον Πίνακα 9.1.

Πίνακας 9.1: Περιοχές ζήτησης νερού υδροσυστήματος περιοχής μελέτης.

α/α	Όνομασία	Τρόποι υδροδότησης
1	Γραβιά-Λιλαία-Αμφίκλεια	Αντλήσεις από γεωτρήσεις άνω ρου
2	Ελάτεια-Τιθορέα-Εξαρχος-Ανθοχώρι	Αντλήσεις από προσχωματικές γεωτρήσεις μέσου ρου
3	Ελάτεια-Τιθορέα-Εξαρχος-Ανθοχώρι	Αντλήσεις από καρστικές γεωτρήσεις μέσου ρου
4	Άγιος Βλάσιος έως Ρωμαϊκό	Απολήψεις από Μαυρονέρι Αντλήσεις από γεωτρήσεις κάτω ρου
5	Κωπαΐδα και παρακείμενες εκτάσεις	Μεταφορά νερού από Υλίκη Απολήψεις από επιφανειακά νερά Αντλήσεις από γεωτρήσεις Κωπαΐδας
6	Αθήνα (μέσω υδραγωγείου Διστόμου)	Αντλήσεις από γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου
7	Υδραγωγείο Κωπαΐδας	Αντλήσεις από γεωτρήσεις Ακοντίου

9.5.3 Ιστορικές χρονοσειρές

Οι περιορισμοί που αφορούν την διαθεσιμότητα των δεδομένων, και ειδικά των υδρομετρικών πληροφοριών που αναφέρονται στις πηγές, κατέστησε αναπόφευκτη την επιλογή μιας μικρής σχετικά περιόδου ελέγχου της προσαρμογής του μοντέλου, και συγκεκριμένα από τον Οκτώβριο του 1984 έως τον Σεπτέμβριο του 1994. Η περίοδος ελέγχου χωρίστηκε σε δύο ενότητες. Η πρώτη περιλαμβάνει τα υδρολογικά έτη 1984-85 έως 1989-90, και χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου, ενώ η υπόλοιπη περίοδος χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση του μοντέλου.

Οι ιστορικές χρονοσειρές εισόδου είναι η βροχόπτωση και δυνητική εξατμοδιαπνοή των δύο ΜΥΑ, οι υδατικές ανάγκες, και οι χρονοσειρές απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των τεσσάρων πηγών, που χρησιμοποιούνται ως κριτήρια καλής προσαρμογής. Οι εν λόγω χρονοσειρές προέκυψαν μετά τις επεξεργασίες των δεδομένων της περιοχής, που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 9.3.

9.5.4 Μεθοδολογία και κριτήρια βαθμολόγησης

Η βαθμολόγηση του μοντέλου διατυπώθηκε ως ένα πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης. Οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος αναφέρονται στις 22 συνολικά παραμέτρους του επιφανειακού και υπόγειου μοντέλου, καθώς και ορισμένες από τις αρχικές συνθήκες προσομοίωσης, και συγκεκριμένα τις αρχικές στάθμες των δύο δεξαμενών συγκέντρωσης εδαφικής υγρασίας και των δεξαμενών υπόγειου νερού που αναφέρονται στα γειτονικά των πηγών κύτταρα.

Η προσαρμογή του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα ελέγχθηκε μέσω ενός σύνθετου μέτρου επίδοσης, που περιλαμβάνει πολλαπλά κριτήρια καλής προσαρμογής, και τα οποία αναφέρονται σε πολλαπλές αποκρίσεις της λεκάνης. Συγκεκριμένα, οι αποκρίσεις που ελέγχθηκαν είναι η μηνιαία απορροή του Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης και οι απορροές των ομάδων πηγών Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου, Μαυρονερίου, Μέλανα-Πολυγύρας και Έρκυνα.

Τα κριτήρια καλής προσαρμογής που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε απόκριση είναι ο συντελεστής προσδιορισμού μεταξύ της προσομοιωμένης και ιστορικής χρονοσειράς (γνωστός στην υδρολογία ως δείκτης Nash-Sutcliffe) και ορισμένοι όροι σφάλματος. Ο πρώτος όρος αναφέρεται στη μεροληψία του μοντέλου, ήτοι την απόκλιση της ιστορικής από την προσομοιωμένη μέση τιμή. Ο δεύτερος όρος αναφέρεται στην αναπαραγωγή των μηδενικών απορροών, και τέθηκε ώστε να εμποδίσει τόσο την αδικαιολόγητη στέρηση του Βοιωτικού Κηφισού και των πηγών του όσο και την παραγωγή απορροής στην περίπτωση στέρησης. Επιπλέον, εισήχθη ένας ακόμη όρος σφάλματος, ώστε να αποφευχθεί η έντονη υπερετήσια τάση ανύψωση ή ταπείνωση της στάθμης των υπόγειων δεξαμενών. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε η διατήρηση ομαλής διαίτας των υδροφορέων, κάτι που είναι

συμβατό με τις παρατηρημένες διακυμάνσεις στάθμης στα πιεζόμετρα της λεκάνης. Αντίστοιχος όρος εισήχθη και για τις δεξαμενές εδαφικής υγρασίας. Όλοι οι παραπάνω όροι σταθμίστηκαν σε μια ενιαία αριθμητική έκφραση (αντικειμενική συνάρτηση), με χρήση κατάλληλων συντελεστών βάρους. Μεγαλύτερο βάρος δόθηκε στην αναπαραγωγή της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού (που είναι το κύριο ζητούμενο του μοντέλου), και μικρότερο στην αναπαραγωγή της απορροής των πηγών.

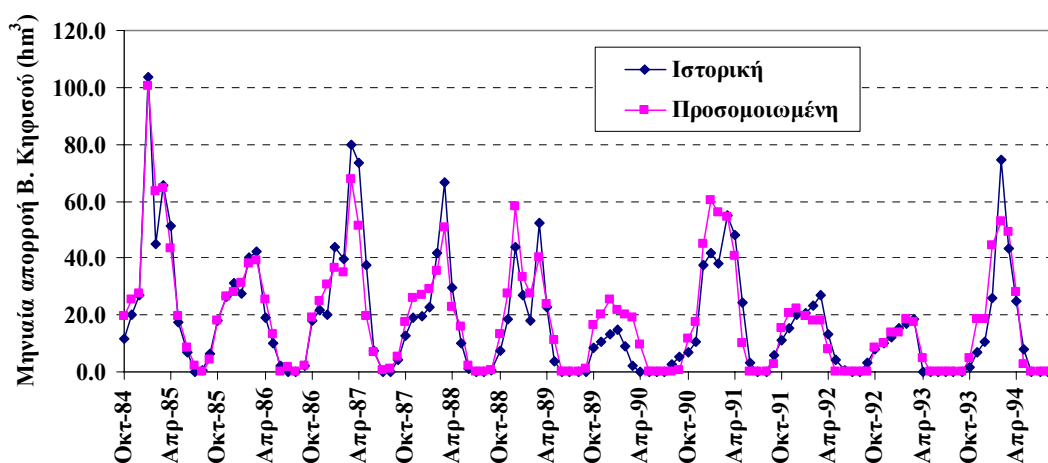
9.5.5 Αποτελέσματα βέλτιστης λύσης

Εξαιτίας των εγγενών δυσκολιών του προβλήματος, η διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου αποδείχθηκε εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρα. Υιοθετήθηκε μια υβριδική, ημιαυτόματη μέθοδος, ώστε να κατευθυνθεί η αναζήτηση προς συγκεκριμένες περιοχές τιμών των παραμέτρων, για τις οποίες: (α) μπορούσε να αποδοθεί φυσικό νόημα, (β) προέκυπταν ικανοποιητικές τιμές για όλα τα κριτήρια καλής προσαρμογής, και (γ) προέκυπτε λογικό, κατά την κρίση μας, ισοζύγιο των υδατικών πόρων της λεκάνης. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες αναλύσεις, με τις οποίες εντοπίστηκε ένα εξαιρετικά μεγάλο πλήθος συνδυασμών παραμέτρων που δίνουν παρόμοια καλή προσαρμογή του μοντέλου στα παρατηρημένα υδρογραφήματα του Βοιωτικού Κηφισού και των πηγών του, όπως αυτή εκφράζεται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Η επιλογή της τελικής λύσης (βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων) έγινε λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον κριτήρια, ποιοτικά και εμπειρικά, και ελέγχοντας την επίδοση του μοντέλου κατά την περίοδο επαλήθευσης.

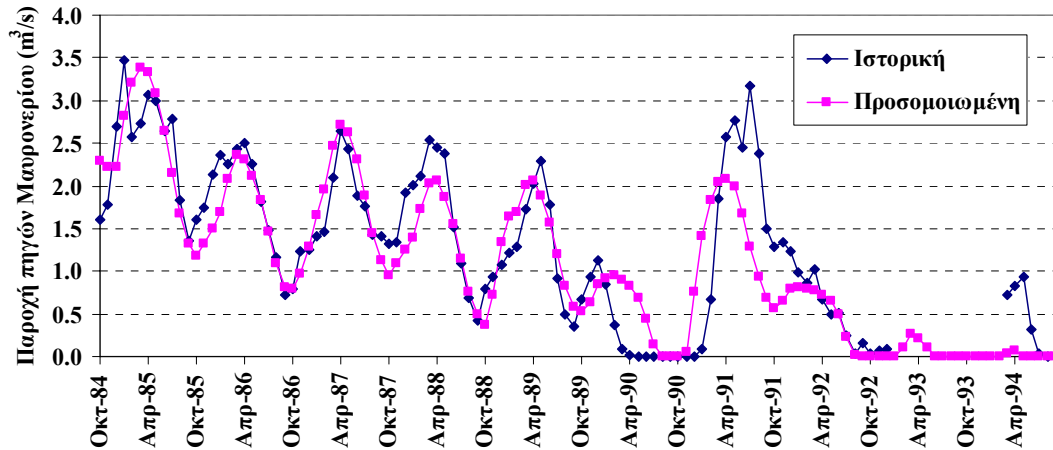
Τα αποτελέσματα της βέλτιστης λύσης, όσον αφορά τους συντελεστές προσδιορισμού για τις δύο περιόδους ελέγχου του μοντέλου, συνοψίζονται στον Πίνακα 9.2. Επιπλέον, στα Σχήματα 9.9 και 9.10 απεικονίζονται τα ιστορικά και προσομοιωμένα υδρογραφήματα στις δύο σημαντικότερες θέσεις ενδιαφέροντος, ήτοι την έξοδο της λεκάνης και τις πηγές Μαυρονερίου, που είναι αυτές που επηρεάζονται άμεσα από τις υδρευτικές απολήψεις μέσω των γεωτρήσεων Βασιλικών-Παρορίου.

Πίνακας 9.2: Συντελεστές προσδιορισμού για τις περιόδους βαθμονόμησης (Οκτώβριος 1994 – Σεπτέμβριος 1990) και επαλήθευσης (Οκτώβριος 1990 – Σεπτέμβριος 1994).

Χρονοσειρά ελέγχου	Βαθμονόμηση	Επαλήθευση
Απορροή Βοιωτικού Κηφισού	0.8873	0.8237
Απορροή πηγών Μαυρονερίου	0.8039	0.4651
Απορροή πηγών Μέλανα-Πολυγύρας	0.2876	-0.0830
Απορροή πηγών Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου	0.7273	0.2819
Απορροή πηγών Έρκυνα	0.2822	0.1632



Σχήμα 9.9: Ιστορική και προσομοιωμένη χρονοσειρά απορροής Βοιωτικού Κηφισού στη Διώρυγα Καρδίτσας (έξοδος λεκάνης).



Σχήμα 9.10: Ιστορική και προσομοιωμένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής πηγών Μαυρονερίου.

Στον Πίνακα 9.3 δίνεται το μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης (επιφανειακό και υπόγειο) για τη δεκαετία ελέγχου. Από το σύνολο της βροχόπτωσης, το 50.6% εξατμίζεται, το 42.4% κατεισδύει στον υδροφορέα, και μόλις το 7.2% απορρέει επιφανειακά, κάτι που οφείλεται στις γεωμορφολογικές ιδιαιτερότητες της λεκάνης (εκτεταμένο καρστικό υπόβαθρο, ήπιες κλίσεις σε μεγάλο τμήμα της). Η ΜΥΑ 1, που αναπαριστά τα ορεινά τμήματα της λεκάνης, παρουσιάζει υψηλή κατεισδυση και αξιόλογη συνεισφορά της υποδερμικής ροής. Αντίθετα, η ΜΥΑ 2 έχει ως χαρακτηριστικό την δυνατότητα αποθήκευσης σημαντικής ποσότητας εδαφικής υγρασίας, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας εξατμίζεται, ενώ ένα μικρό ποσοστό απορρέει ή κατεισδύει αργά προς τον υπόγειο υδροφορέα.

Από τη συνολική κατεισδυση, το 28.5% «επιστρέφει» στην λεκάνη με την μορφή πηγαίας απορροής, που συνιστά το 62.5% της μέσης ετήσιας φυσικοποιημένης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Οι επιφανειακές αρδευτικές απολήψεις κατά την περίοδο ελέγχου εκτιμώνται σε 82.0 hm³, ενώ οι απολήψεις από υπόγεια νερά εκτιμώνται 123.1 hm³. Στις παραπάνω ποσότητες περιλαμβάνονται και οι εντατικές αντλήσεις για την ενίσχυση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας των ετών 1990-1994. Οι εν λόγω αντλήσεις φαίνεται ότι προκάλεσαν υπερεκμετάλλευση του υδροφορέα, όπως καταδεικνύει η σημαντική διαφορά στην αποθήκευση του υπόγειου νερού.

Το μεγαλύτερο μέρος κατεισδυσης, ήτοι ποσοστό 61.5%, μεταγγίζεται υπογείως εκτός λεκάνης, καταλήγοντας στην θάλασσα. Συνεπώς, το 76.7% της βροχόπτωσης μετασχηματίζεται σε υδρολογικές απώλειες, που κατανέμονται σε εξάτμιση και διαφυγές με αναλογία 2:1 περίπου. Επισημαίνεται ότι τα περισσότερα σενάρια βαθμονόμησης έδωσαν αρκετά μικρότερες εκτιμήσεις όσον αφορά τις υπόγειες διαφυγές, ανεβάζοντας το ποσοστό της εξάτμισης στα επίπεδα του 60-65%. Ωστόσο, η μείωση των διαφυγών, που επετεύχθη με κατάλληλη ρύθμιση των ορίων των παραμέτρων του υπόγειου μοντέλου (μικρότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, υψηλό πορώδες), είχε δυσμενείς συνέπειες όσον αφορά την προσαρμογή των υδρογραφημάτων των πηγών, κυρίως κατά την περίοδο επαλήθευσης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το υπόγειο σύστημα αποκρίνεται με μεγάλη ταχύτητα στην βροχόπτωση, οπότε είναι λογικό να αναμένονται υψηλές ταχύτητες ροής και, ως συνέπεια αυτού, μεγάλες διαφυγές προς την θάλασσα. Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει αοριστία του προβλήματος καθώς δεν είναι δυνατή η έστω και κατά προσέγγιση εκτίμηση των διαφυγών βάσει μετρήσεων.

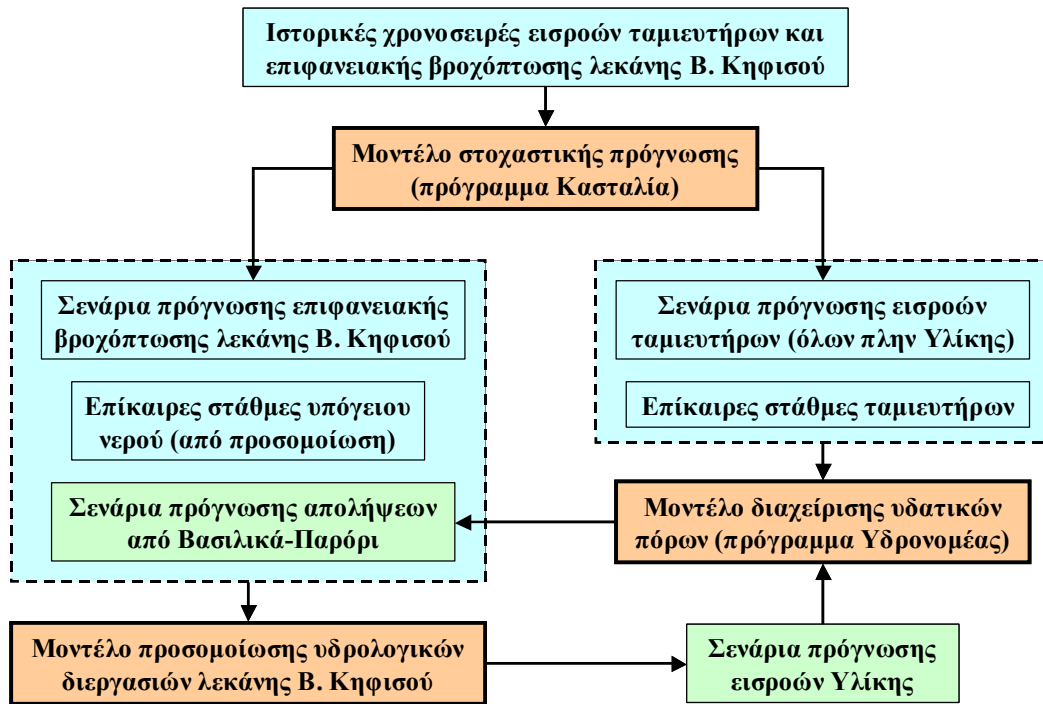
Πίνακας 9.3: Μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο λεκάνης για την περίοδο 1984-85 έως 1993-94 (hm³).

Συνιστώσα ισοζυγίου	Μέση ετήσια τιμή	Ποσοστό
<i>Ισοζύγιο επιφανειακών υδατικών πόρων</i>		
Βροχόπτωση	1575.0	1.000
Εξατμοδιαπνοή	796.5	0.506
Επιφανειακή απορροή	113.9	0.072
Κατείσδυση	668.4	0.424
<i>Ισοζύγιο υπόγειων υδατικών πόρων</i>		
Κατείσδυση	668.4	1.000
Διαφυγές εκτός λεκάνης	411.4	0.615
Απορροή πηγών	189.8	0.284
Αντλήσεις	123.1	0.184
Διαφορά αποθήκευσης	-55.9	-0.084
<i>Ισοζύγιο αρδευτικών και υδρευτικών απολήψεων</i>		
Απολήψεις από επιφανειακά νερά	82.0	0.400
Αντλήσεις υπόγειων νερών	123.1	0.600
Σύνολο απολήψεων	205.1	1.000
<i>Ισοζύγιο υδρολογικών απωλειών</i>		
Εξατμοδιαπνοή	796.5	0.659
Διαφυγές εκτός λεκάνης	411.4	0.341
Σύνολο απωλειών	1207.9	1.000
<i>Ισοζύγιο απορροής Βοιωτικού Κηφισού</i>		
Επιφανειακή απορροή	113.9	
Απορροή πηγών	189.8	
Αρδευτικές απολήψεις	82.0	
Καθαρή απορροή	221.7	

9.6 Προετοιμασία μοντέλου για επιχειρησιακή χρήση

9.6.1 Ένταξη του μοντέλου στο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων

Η επιχειρησιακή χρήση του συστήματος 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 φυσικού συστήματος για ανεξέλεγκτη (και ουσιαστικά άγνωστη) εξωτερική διέγερση, που είναι η βροχόπτωση, είναι, βέβαια, και αυτή ανεξέλεγκτη και άγνωστη. Μπορεί να ελεγχθεί μόνον μερικά, ελέγχοντας τις απολήψεις από το σύστημα. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την εφαρμογή της μεθόδου της στοχαστικής προσομοίωσης. Αυτή συνίσταται στην παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης, πράγμα που επιτρέπει τη μελέτη του συστήματος για οσοδήποτε μεγάλο χρονικό ορίζοντα και τη διερεύνηση πολλαπλών υδρολογικών σεναρίων. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιείται συνδυασμένη λειτουργία του υδρολογικού μοντέλου με τα προγράμματα *Κασταλία* και *Υδρονομέας*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.11.



Σχήμα 9.11: Λογικό διάγραμμα διαδικασίας επιχειρησιακής εφαρμογής του συστήματος προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

Τα βήματα των υπολογισμών έχουν ως εξής:

- Βήμα 1:** Για επιλεγμένο χρόνο έναρξης της επιχειρησιακής λειτουργίας γίνεται, μέσω της *Κασταλίας* στοχαστική πρόγνωση των μελλοντικών βροχοπτώσεων των ΜΥΑ του μοντέλου για 10 μελλοντικά έτη (200 σενάρια πρόγνωσης). Ταυτόχρονα, γίνεται στοχαστική πρόγνωση των μελλοντικών εισροών των ταμιευτήρων Μόρνου, Ευήνου, Υλίκης και Μαραθώνα.
- Βήμα 2:** Για τον ίδιο χρόνο έναρξης γίνεται αρχικοποίηση των αρχικών συνθηκών του μοντέλου υδρολογικών διεργασιών. Με βάση τα ιστορικά δεδομένα των υδρολογικών εισόδων των μοντέλων και τις ιστορικές απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά, πραγματοποιείται προσομοίωση της λειτουργίας του υδροσυστήματος της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού για το χρονικό διάστημα από τον χρόνο έναρξης της αρχικοποίησης ως τον χρόνο έναρξης της επιχειρησιακής εφαρμογής. Επιπλέον, ορίζονται οι επίκαιρες στάθμες των ταμιευτήρων, που αποτελούν στοιχείο εισόδου του *Υδρονομέα*.
- Βήμα 3:** Για τον χρονικό ορίζοντα των 10 ετών καθορίζονται οι ζητήσεις για κάθε χρήση νερού. Η ζήτηση για άρδευση θεωρείται γνωστή, ενώ η ζήτηση για ύδρευση της Αθήνας που επιβάλλεται στις γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου θεωρείται αρχικά μηδενική.
- Βήμα 4:** Τρέχει το σύστημα υδρολογικής προσομοίωσης για όλες τις χρονοσειρές μήκους 10 ετών και παράγει τα αντίστοιχα σενάρια εισροών στην Υλίκη (οι εισροές στην Υλίκη προκύπτουν με προσαύξηση κατά 6% της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στην Διώρυγα Καρδίτσας).
- Βήμα 5:** Τα εν λόγω σενάρια, μαζί με τα σενάρια εισροών των υπόλοιπων ταμιευτήρων που έχουν παραχθεί στο βήμα 1, εισάγονται στον *Υδρονομέα*, που αναζητά τους βέλτιστους κανόνες διαχείρισης του υδροσυστήματος, βάσει των οποίων πραγματοποιεί την κατανομή των απολήψεων από όλους τους υδατικούς πόρους, μεταξύ των οποίων και τις υδρευτικές γεωτρήσεις της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

Βήμα 6: Οι απολήψεις αυτές εισάγονται στο σύστημα υδρολογικής προσομοίωσης το οποίο τρέχει εκ νέου με επανάληψη του βήματος 4 και στη συνέχεια του βήματος 5, στο οποίο ο *Υδρονομέας* δέχεται τροποποιημένες (προφανώς χαμηλότερες), εισροές στην Υλίκη.

Βήμα 7: Η διαδικασία (βήματα 4-6) επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση.

9.7 Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών Υλίκης

Η τροφοδοσία της Υλίκης μέσω της Διώρυγας Καρδίτσας αντιμετωπίστηκε ολοκληρωμένα μέσω του μοντέλου προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και διαχείρισης των υδατικών της πόρων. Στα πλαίσια του έργου, έγιναν επιπλέον εργασίες που αναφέρονται στην διερεύνηση των υπόλοιπων υδρολογικών διεργασιών της Υλίκης, με έμφαση στην μοντελοποίηση των υπόγειων διαφυγών της.

Λόγω της έντονης καρστικοποίησης, οι γεωλογικοί σχηματισμοί των τοιχωμάτων της Υλίκης δεν είναι στεγανοί, με αποτέλεσμα την διαφυγή σημαντικών ποσοτήτων νερού (μόνο ο πυθμένας της λίμνης έχει αργιλικές προσχώσεις). Ο ποσοτικός προσδιορισμός των υπόγειων απωλειών της Υλίκης έχει απασχολήσει όλους τους μελετητές του υδατικού δυναμικού της περιοχής. Οι θέσεις των διαφυγών εντοπίζονται στην ΒΑ και ΝΔ όχθη της λίμνης, ενώ οι κυριότερες κατευθύνσεις της υπόγειας ροής είναι προς ΒΑ, με αποδέκτες τις πηγές Ούγγρας και Καμηλόβρυσης (*Παγούνης κ.ά.*, 1986).

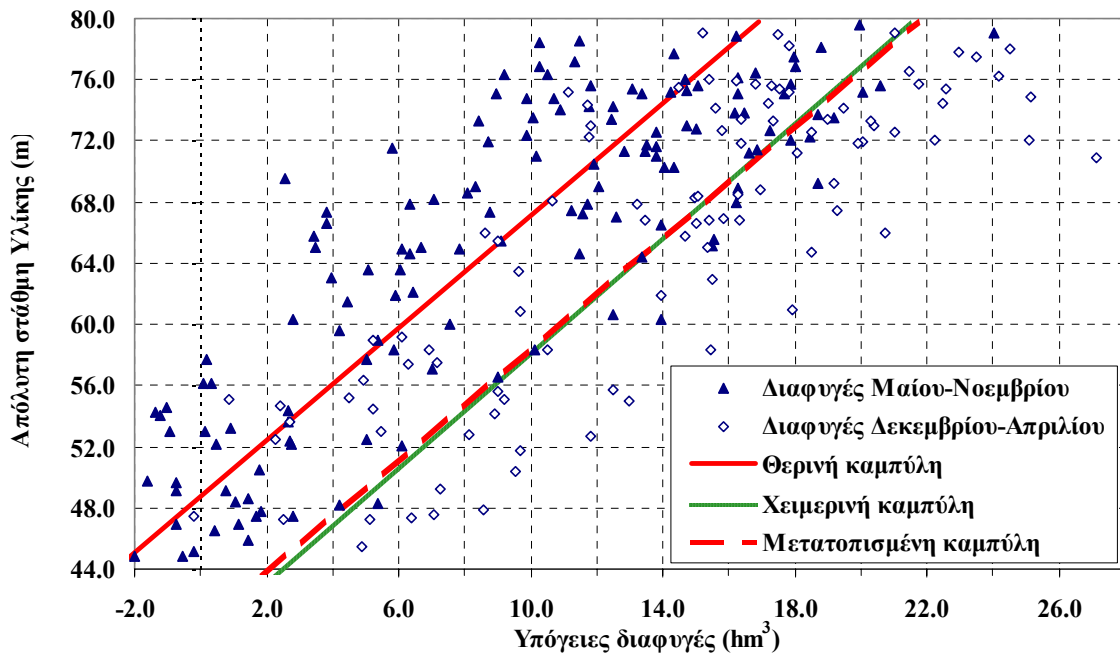
Ο προσδιορισμός των διαφυγών βασίστηκε στην κατάρτιση του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου της λίμνης. Η συσχέτιση των απωλειών με κάποιο άλλο χαρακτηριστικό της λίμνης, όπως η στάθμη, είναι αναγκαία για την πληρότητα της εκτίμησης αυτής και την δυνατότητα μελλοντικών προβλέψεων. Πριν τη στατιστική επεξεργασία έγινε εκτεταμένη ανάλυση των ιστορικών δεδομένων, με στόχο την άμβλυνση των αβεβαιοτήτων που οφείλονται σε συστηματικά ή άλλα σφάλματα. Καταρχήν, απομακρύνθηκαν από το δείγμα ορισμένα σημεία που κρίθηκαν εντελώς αναξιόπιστα, τα περισσότερα από τα οποία αναφέρονται σε περιόδους που παρατηρήθηκε υπερχειλίση της Υλίκης προς την Παραλίμνη. Μια άλλη πηγή σφαλμάτων οφείλεται στην πραγματοποίηση αντλήσεων μέσω των παρακείμενων στην λίμνη υδρευτικών γεωτρήσεων της ΕΥΔΑΠ. Υπάρχει ισχυρή ένδειξη ότι οι εν λόγω γεωτρήσεις αντλούν στην ουσία νερό από την ίδια την λίμνη, κάτι που βεβαίως δεν είναι δυνατόν να ληφθεί υπόψη στην εξίσωση ισοζυγίου. Ένα ενδιαφέρον σημείο είναι η διαφοροποίηση της διαίτας των διαφυγών μεταξύ χειμερινών και θερινών μηνών, καθώς οι παρατηρούμενες διαφυγές κατά τη χειμερινή περίοδο είναι αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες της θερινής περιόδου κατά περίπου 5 hm³/μήνα. Η διερεύνηση που έγινε κατέδειξε ότι: (α) η φαινόμενη μετατόπιση της χειμερινής καμπύλης στάθμης-διαφυγών δεν είναι απόρροια κάποιου συστηματικού σφάλματος αλλά έχει κάποια φυσική ερμηνεία, και (β) υπάρχει σημαντική υπόνοια ότι οι υπόγειες διαφυγές της λίμνης είναι μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίζονται με βάση τα ιστορικά δεδομένα ισοζυγίου της λίμνης.

Η τελική χρονοσειρά διαφυγών προέκυψε μετά εξετάζοντας ένα προς ένα τα σημεία του δείγματος και απορρίφθηκαν αυτά για τα οποία υπήρχαν υποψίες ύπαρξης συστηματικών σφαλμάτων καθώς και ορισμένα που θεωρήθηκαν εξωκείμενα. Το δείγμα αυτό χρησιμοποιήθηκε ως στατιστική πληροφορία για την κατάρτιση αναλυτικών σχέσεων στάθμης-απωλειών. Οι σχέσεις που εξήχθησαν θεωρούνται αρκετά πιο αξιόπιστες σε σχέση με παλιότερες προσεγγίσεις, όπως υποδηλώνει η αρκετά χαμηλότερη τιμή του τυπικού σφάλματος. Στο Σχήμα 9.12 απεικονίζονται τα δείγματα διαφυγών για τις δύο περιόδους και οι αντίστοιχες καμπύλες. Η τελική σχέση υπολογισμού των υπόγειων διαφυγών L της Υλίκης συναρτήσει της μέσης μηνιαίας στάθμης Z είναι:

$$L = \begin{cases} 0.545 Z - 26.6 & \text{για την περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου} \\ 0.545 Z - 21.8 & \text{για την περίοδο Δεκεμβρίου-Απριλίου} \end{cases} \quad (9.5)$$

Η σχέση (9.5) είναι η καλύτερη προσέγγιση από όσες έχουν γίνει έως τώρα, καθώς έχει βελτιωθεί η τιμή του τυπικού σφάλματος στα επίπεδα των $3.7 \text{ hm}^3/\mu\text{ήνα.}$, για όλους τους μήνες του έτους. Η μόνη εποχιακή διαφοροποίηση έγκειται στην παράλληλη μετατόπιση των ευθειών, που ερμηνεύεται από το μεγαλύτερο υδραυλικό φορτίο (ήτοι την διαφορά της στάθμης της Υλίκης με την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα) που παρατηρείται κατά την χειμερινή περίοδο.

Τέλος, εξετάστηκε η δυνατότητα εισαγωγής στη σχέση (9.5) περαιτέρω επεξηγηματικών μεταβλητών, που σχετίζονται, έστω και έμμεσα, με την πιεζομετρία της περιοχής γύρω από την Υλίκη. Συγκεκριμένα, καταρτίστηκαν μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης, με επιπλέον μεταβλητές την απορροή του Βοιωτικού Κηφισού και της επιφανειακή βροχοπτώση στη λεκάνη της Υλίκης, οι οποίες, ωστόσο, αποδείχτηκαν στατιστικά μη σημαντικές.



Σχήμα 9.12: Τελικές καμπύλες στάθμης-διαφυγών λίμνης Υλίκης.

10 Σχέδια Διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας και επικαιροποιήσεις

10.1 Το θεσμικό πλαίσιο της ΕΥΔΑΠ

10.1.1 Ο Νόμος 2744/1999

Με τον Νόμο 2744/1999 αναδιοργανώθηκε η Εταιρεία Υδρεύσεως και Αποχετεύσεως Πρωτεύουσας (ως ΕΥΔΑΠ Α.Ε.) με σκοπό τη βελτίωση των προσφερομένων από αυτήν υπηρεσιών. Παράλληλα, έγινε εισαγωγή της εταιρείας στο Χρηματιστήριο Αξιών Αθηνών με δυνατότητα διάθεσης μετοχών μέχρι ποσοστού 49%. Έτσι, η ΕΥΔΑΠ διατηρεί το δημόσιο χαρακτήρα της.

Το άρθρο 1 του εν λόγω νόμου καθορίζει το νομικό καθεστώς της ΕΥΔΑΠ. Ειδικότερα, στην παράγραφο 4 του άρθρου αυτού καθορίζονται οι σκοποί της εταιρείας:

Στους σκοπούς της Εταιρείας περιλαμβάνονται ιδίως:

α. Η παροχή υπηρεσιών ύδρευσης και αποχέτευσης, η μελέτη, κατασκευή εγκατάσταση, λειτουργία, εκμετάλλευση, διαχείριση, συντήρηση, επέκταση και ανανέωση των συστημάτων ύδρευσης και αποχέτευσης. Στις δραστηριότητες και τα έργα αυτά συμπεριλαμβάνονται η άντληση, αφαλάτωση, επεξεργασία, αποθήκευση, μεταφορά, διανομή και διαχείριση των προς τους σκοπούς αυτούς αποδιδόμενων υδάτων πάσης φύσεως, καθώς και τα έργα και οι δραστηριότητες συλλογής, μεταφοράς, επεξεργασίας, αποθήκευσης και διαχείρισης των πάσης φύσεως λυμάτων (πλην των τοξικών) και η επεξεργασία, διανομή, διάθεση και διαχείριση των προϊόντων των δικτύων αποχετεύσεως.

β. Η πραγματοποίηση επενδύσεων σύμφωνα με τις παραγράφους 6 και 7 του παρόντος άρθρου.

Το άρθρο 2 που αναφέρεται στα δικαιώματα και τις υποχρεώσεις της ΕΥΔΑΠ (παράγραφος 1) ορίζει (μεταξύ άλλων) ότι:

Χορηγείται στην ΕΥΔΑΠ το αποκλειστικό δικαίωμα παροχής υπηρεσιών ύδρευσης και αποχέτευσης στη γεωγραφική περιοχή της παραγράφου 1 του άρθρου 8 και ειδικότερα: α) άντλησεως, συλλογής, αφαλατώσεως, αποθηκείσεως, μεταφοράς, επεξεργασίας, διανομής και διαχειρίσεως ύδατος πάσης χρήσεως, και β) της συλλογής, μεταφοράς, επεξεργασίας, αποθηκείσεως, διαθέσεως και διαχειρίσεως αποβλήτων και άλλων λυμάτων, εξαιρουμένων των τοξικών. Το δικαίωμα αυτό είναι ανεκχώρητο και αμεταβίβαστο.

Στο ίδιο άρθρο (παράγραφος 2) προβλέπεται η σύναψη σύμβασης μεταξύ ΕΥΔΑΠ και Ελληνικού Δημοσίου για τον καθορισμό των λεπτομερειών άσκησης του παραπάνω δικαιώματος.

Εξ άλλου, για την έρευνα και τη συλλογή του νερού, το οποίο είναι κοινωνικό αγαθό, την ευθύνη διατηρεί σύμφωνα με το νόμο το Ελληνικό Δημόσιο. Το Ελληνικό Δημόσιο διατηρεί, επίσης, την ευθύνη για τη μελέτη και την κατασκευή των απαραίτητων έργων ώστε να διαθέτει τις αναγκαίες για την ύδρευση ποσότητες νερού στην ΕΥΔΑΠ. Για το σκοπό αυτό ιδρύεται Νομικό Πρόσωπο Δημοσίου Δικαίου (ΝΠΔΔ) με την επωνυμία «Εταιρεία Παγίων ΕΥΔΑΠ» (ΕΠΕΥΔΑΠ) το οποίο τελεί υπό την εποπτεία του Υπουργού Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων (άρθρο 4 του νόμου). Στην ιδιοκτησία της ΕΠΕΥΔΑΠ περιέρχονται τα πάγια στρατηγικής σημασίας, όπως τα

φράγματα Μόρνου και Μαραθώνα, και τα έργα και οι εγκαταστάσεις της Υλίκης. Στο ίδιο νομικό πρόσωπο θα περιέλθει και η ιδιοκτησία του έργου του Εύηνου όταν αυτό παραληφθεί. Με τον τρόπο αυτό, τα πάγια στρατηγικής σημασίας παραμένουν στην απόλυτη ιδιοκτησία του δημοσίου. Τα της οργανώσεως και διοικήσεως της ΕΠΕΥΔΑΠ θα ρυθμισθούν με Προεδρικό Διάταγμα.

Το άρθρο 6 καθορίζει τις υποχρεώσεις του Δημοσίου και αναφέρει (παράγραφος 1, μεταξύ άλλων) ότι

Το Δημόσιο διαθέτει ακατέργαστο ύδωρ στην ΕΥΔΑΠ ώστε να εξασφαλίζεται η εύλογη κατανάλωση ύδατος εκ μέρους των καταναλωτών της και να είναι σε θέση η ΕΥΔΑΠ να ανταποκριθεί στις υποχρεώσεις παροχής υπηρεσιών ύδρευσης. Η ποσότητα, η ποιότητα και η μέθοδος παροχής του ακατέργαστου νερού θα καθορίζεται στη σύμβαση της παραγράφου 2 του άρθρου 2. Με την ίδια σύμβαση ορίζεται το ύψος του τιμήματος που καταβάλλεται από την ΕΥΔΑΠ για τη διάθεση σε αυτή του ακατέργαστου ύδατος, το οποίο αποδίδεται στην «Εταιρεία Παγίων ΕΥΔΑΠ».

Στη συνέχεια, στο ίδιο άρθρο, καθορίζονται και επιμερίζονται οι αρμοδιότητες του Δημοσίου:

Το Υπουργείο Ανάπτυξης μεριμνά για την έρευνα και τη συλλογή του ύδατος αυτού και το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων για τη μελέτη, κατασκευή και λειτουργία νέων έργων και για τη λειτουργία, συντήρηση και επέκταση υφιστάμενων έργων προς το σκοπό εκπλήρωσης της υποχρέωσής του αυτής σύμφωνα με τα οριζόμενα στο ν. 1739/1987. Η «Εταιρεία Παγίων ΕΥΔΑΠ» έχει την ευθύνη για τη λειτουργία και συντήρηση των παγίων που θα μεταβιβασθούν δυνάμει των παραγράφων 1, 2 και 3 του άρθρου 4 του παρόντος. Το σύνολο ή τμήμα των εργασιών λειτουργίας και συντήρησης των παγίων αυτών μπορεί να ανατίθεται στην ΕΥΔΑΠ έναντι εύλογης αμοιβής. Κατ' εξαίρεση για τη λειτουργία και συντήρηση υδραγωγείων ή άλλων εκ των παγίων, τα οποία ενδεχομένως θα μεταβιβασθούν, είναι υπεύθυνη η ΕΥΔΑΠ, εφόσον η τελευταία ζητήσει να αναλάβει τη λειτουργία και συντήρησή τους με δικές της δαπάνες.

Επίσης, το Δημόσιο διατηρεί την αρμοδιότητα καθορισμού τιμολογίων στα πλαίσια της κυβερνητικής πολιτικής. Ειδικότερα, με το άρθρο 3 η αρμοδιότητα αυτή ανατίθεται από κοινού στους Υπουργούς Οικονομικών και Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων μετά από γνώμη του Διοικητικού Συμβουλίου της ΕΥΔΑΠ. Προβλέπεται ότι τα τιμολόγια θα καθορίζονται ανά πενταετία και σε τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η εύλογη απόδοση των επενδύσεων της ΕΥΔΑΠ και η χρηματοδότηση των δραστηριοτήτων της με ορθολογικό τρόπο.

10.1.2 Άλλα νομοθετήματα γενικά για τη διαχείριση υδατικών πόρων

Η διαχείριση των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας θα είναι, βέβαια, πέραν του Νόμου 2744/1999, σύμφωνη με το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των υδατικών πόρων με σημαντικότερο νομοθέτημα το Νόμο 1739/87 (ΥΒΕΤ, 1988). Ο νόμος αυτός, στο Άρθρο 9, παρ. 7, θεσπίζει το δικαίωμα χρήσης νερού για ύδρευση αλλά και την προτεραιότητα της ύδρευσης έναντι άλλων χρήσεων:

Η ύδρευση προηγείται από κάθε άλλη χρήση νερού. Το δικαίωμα χρήσης νερού για ύδρευση δεν μπορεί να καταργηθεί ή να περιορισθεί. Αν οι ανάγκες του δικαιούχου για την ίδια ποιότητα και ποσότητα αυτού ικανοποιούνται από έργα κοινής ωφελείας ή αν το περιεχόμενο και η άσκηση του δικαιώματος επεκτείνεται πέραν από το αναγκαίο, το δικαίωμα αυτό καταργείται ή περιορίζεται αντίστοιχα με απόφαση του οικείου νομάρχη, ύστερα από εισήγηση της αρμόδιας περιφερειακής υπηρεσίας διαχείρισης υδατικών πόρων και γνωμοδότηση της αρμόδιας διεύθυνσης τεχνικών υπηρεσιών δήμων και κοινοτήτων.

Ήδη, με το Ν. 3199/2003, η ελληνική νομοθεσία εναρμονίζεται με την κοινοτική οδηγία-πλαίσιο 2000/60/ΕΕ με τίτλο «Οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τη θέσπιση

πλαίσιου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων» (ΕΕ, 2000) που ψηφίστηκε το έτος 2000 από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Το σύνολο των διατάξεων της οδηγίας έχει άμεση ή έμμεση σχέση με τη διαχείριση των πόρων ύδρευσης της Αθήνας. Ειδικά το Άρθρο 7 ασχολείται με «υδατικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για άντληση ποσίου ύδατος» και αναφέρει συγκεκριμένα:

Μέσα σε κάθε Περιοχή Λεκάνης Απορροής Ποταμού, τα κράτη μέλη προσδιορίζουν (α) όλα τα υδατικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για υδροληψία με σκοπό την ανθρώπινη κατανάλωση και παρέχουν κατά μέσο όρο άνω των 10 m³ ημερησίως ή εξυπηρετούν περισσότερα από 50 άτομα· (β) τα υδατικά συστήματα που προορίζονται για τέτοια χρήση μελλοντικά.

Τα κράτη μέλη παρακολουθούν σύμφωνα με το Παράρτημα V, τα υδατικά συστήματα που παρέχουν άνω των 100 m³ ημερησίως.

Ακόμη, στην οδηγία θεσπίζονται:

- Στο Άρθρο 3 ο συντονισμός διοικητικών ρυθμίσεων μέσα σε Περιοχές Λεκάνης Απορροής Ποταμού·
- Στο Άρθρο 4 περιβαλλοντικοί στόχοι για τα επιφανειακά και τα υπόγεια ύδατα·
- Στο Άρθρο 8 η παρακολούθηση της κατάστασης των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων και των προστατευόμενων περιοχών·
- Στο Άρθρο 9 η αρχή της ανάκτησης (μερικής ή ολικής) του κόστους των υπηρεσιών ύδατος (λεπτομέρειες παρουσιάζονται στο Παράρτημα III)·
- Στο Άρθρο 11 η υποχρέωση κάθε κράτους μέλους να καταρτίσει πρόγραμμα μέτρων ανά Περιοχή Λεκάνης Απορροής Ποταμού για την επίτευξη των στόχων της οδηγίας·
- Στο Άρθρο 13 η κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Ποταμού (λεπτομέρειες για την κατάρτισή τους παρουσιάζονται στο Παράρτημα VII).

10.1.3 Η σύμβαση μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου και της ΕΥΔΑΠ

Σε εφαρμογή της σχετικής πρόβλεψης του Νόμου 2744/1999 (άρθρο 2, παράγραφος 2) έχει συναφθεί και υπογραφεί σύμβαση μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου και της ΕΥΔΑΠ που ισχύει από τις 25-10-1999 (ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΔΑΠ, 1999). Τα σχετικά με την προμήθεια ανεπεξέργαστου νερού περιγράφονται στην παράγραφο 1 του άρθρου 15 της σύμβασης, η οποία αναφέρει τα εξής:

(α) Καθορισμός ποσότητας ακατέργαστου ύδατος και του οφειλόμενου τιμήματος.

Το Δημόσιο προμηθεύει την ΕΥΔΑΠ με ακατέργαστο ύδωρ από τις εκάστοτε υπάρχουσες πηγές, ώστε να εξασφαλίζεται η εύλογη κατανάλωση ύδατος εκ μέρους των καταναλωτών της και να είναι σε θέση η ΕΥΔΑΠ να ανταποκριθεί στις υποχρεώσεις παροχής υπηρεσιών ύδρευσης.

Το τίμημα του ακατέργαστου ύδατος για την πρώτη πενταετία από την έναρξη ισχύος της παρούσης, συμψηφίζεται με το κόστος υπηρεσιών που προσφέρει η ΕΥΔΑΠ για τη συντήρηση και λειτουργία των παγίων που ανήκουν κατά κυριότητα στην «Εταιρεία Παγίων ΕΥΔΑΠ».

Το προαναφερθέν συμψηφιζόμενο κόστος λειτουργίας και συντήρησης αναφέρεται στη συνήθη συντήρηση και δεν αφορά μεμονωμένες επεμβάσεις, ανακαινίσεις, αντικαταστάσεις, προμήθειες ή επιμέρους νέα έργα δαπάνης για το καθένα μεγαλύτερης των 50.000.000 δρχ. Τα έργα αυτά δύνανται να σχεδιάζονται και να εκτελούνται από την ΕΥΔΑΠ με ιδιαίτερη συμφωνία και χρηματοδότηση από το ΥΠΕΧΩΔΕ πέραν του συμψηφιζόμενου κόστους συντήρησης.

Στο ως άνω συμψηφιζόμενο κόστος συντήρησης δεν περιλαμβάνεται επίσης η συντήρηση και λειτουργία παγίων αντιπλημμυρικής προστασίας ομβρίων υδάτων, το οποίο δύνανται να συμφωνείται με χωριστή σύμβαση, σύμφωνα με το άρθρο 6 παράγραφοι 2 και 3 του Νόμου.

Η ΕΥΔΑΠ αναλαμβάνει επί πλέον την υποχρέωση, στο πλαίσιο του τιμήματος να επιβάλλει στην «Εταιρεία Παγίων ΕΥΔΑΠ», το κόστος της ετήσιας λειτουργίας της (αμοιβές προσωπικού και έξοδα λειτουργίας) μέχρι του ύψους των εκατόν πενήντα εκατομμυρίων (150.000.000) δρχ. ετησίως κατ' ανώτατο όριο. Η ΕΥΔΑΠ αναλαμβάνει επίσης την ευθύνη, μετά από υπόδειξη της «Εταιρείας Παγίων ΕΥΔΑΠ», για τη σύνταξη μελετών που αφορούν την ασφαλή κατάσταση των παγίων στοιχείων της «Εταιρείας Παγίων ΕΥΔΑΠ».

Η τιμή του ακατέργαστου ύδατος μετά την πρώτη πενταετία, καθορίζεται με έγγραφη συμφωνία των μερών, ταυτόχρονα με το κόστος συντήρησης και λειτουργίας των παγίων, σε συνάρτηση με την τιμολογιακή πολιτική, και λαμβάνοντας υπόψη οπωσδήποτε την τιμή πώλησης του ακατέργαστου ύδατος προς τρίτους από την ΕΥΔΑΠ.

Η ΕΥΔΑΠ αναλαμβάνει την υποχρέωση να συντάξει Σχέδιο Διαχείρισης των διαθεσίμων συστημάτων παροχής ακατέργαστου ύδατος και να το υποβάλει προς έγκριση στον εποπτεύοντα την ΕΥΔΑΠ Υπουργό εντός ενός έτους από της ισχύος της παρούσης σύμβασης. Σε περίπτωση που με βάση το σχέδιο αυτό απαιτείται η απόληψη νερού και από τα υπάρχοντα συστήματα πέραν των ταμιευτήρων Ευήνου, Μόρνου και Μαραθώνα η ΕΥΔΑΠ δικαιούται πρόσθετη αποζημίωση, ανάλογη με την επιβάρυνση του κόστους λειτουργίας, που θα επιφέρει η τροποποίηση αυτή και που θα ρυθμιστεί με ιδιαίτερη συμφωνία.

(β) Μέθοδος παροχής ακατέργαστου ύδατος

Το ακατέργαστο ύδωρ θα παραδίδεται στο σημείο εισόδου των Μονάδων Επεξεργασίας Νερού (ΜΕΝ).

Η ΕΥΔΑΠ κατά την πρώτη πενταετία που έχει την ευθύνη συντήρησης των εξωτερικών υδραγωγείων, οφείλει να τηρεί στοιχεία παροχής του ύδατος επί μηνιαίας βάσεως, τόσο στο σημείο εισόδου των ΜΕΝ όσο και στις εξόδους των συστημάτων παροχής ακατέργαστου ύδατος (έξοδος Γκιώνας, έξοδος σήραγγας Μπογιατίου, αντλιοστάσιο Μουρικίου). Τα στοιχεία των ανωτέρω μετρήσεων θα παραδίδονται στην «Εταιρεία Παγίων ΕΥΔΑΠ».

(γ) Ποιότητα ακατέργαστου ύδατος

Το ακατέργαστο ύδωρ που προμηθεύεται η ΕΥΔΑΠ από το Δημόσιο και προέρχονται από επιφανειακά και υπόγεια νερά κατατάσσεται στην κατηγορία Α2 σύμφωνα με την Οδηγία ΕΚ (75/440/ΕΟΚ) «Περί της ποιότητας που απαιτείται για το επιφανειακό νερό που προορίζεται για την εξαγωγή πόσιμου νερού».

Το Δημόσιο προβαίνει σε δειγματοληψία και αναλύει / ελέγχει το ακατέργαστο νερό σε μηνιαία βάση και δίνει αντίγραφα των δεδομένων σε ηλεκτρονική μορφή στην ΕΥΔΑΠ.

10.2 Σκοπός και αντικείμενο των σχεδίων διαχείρισης

Σχέδιο Διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας εκπονήθηκε, για πρώτη φορά και, για πρώτη φορά, τον Οκτώβριο του 2000, σε εφαρμογή της σχετικής πρόβλεψης του άρθρου 15 της σύμβασης που παρατέθηκε πιο πάνω. Η πρώτη επικαιροποίηση έγινε τον Οκτώβριο 2001 και η δεύτερη τον Οκτώβριο 2002. Το σχέδιο αποτελεί την απαραίτητη βάση για τη ρύθμιση θεμάτων που άπτονται σχέσεων μεταξύ των φορέων που εμπλέκονται στην υδροδότηση της Αθήνας, σύμφωνα με το νομικό καθεστώς που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, και ειδικότερα της ΕΥΔΑΠ, της ΕΠΕΥΔΑΠ και των συναρμόδιων υπουργείων (Εθνικής Οικονομίας, Οικονομικών και Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων). Ιδιαίτερα, τα θέματα παροχής από το Ελληνικό Δημόσιο προς την ΕΥΔΑΠ ακατέργαστου νερού, της τιμολόγησης του ακατέργαστου νερού και της

τιμολόγησης της παροχής υπηρεσιών ύδρευσης συναρτώνται άμεσα με τον τρόπο διαχείρισης του συστήματος υδροδότησης.

Αντικείμενο του κάθε σχεδίου διαχείρισης είναι η μελέτη ορθολογικών, αποδοτικών και βιώσιμων τρόπων και μεθοδολογιών διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος με στόχο την ποσοτικά αξιόπιστη, ποιοτικά και περιβαλλοντικά ασφαλή, και οικονομικά πρόσφορη κάλυψη της ζήτησης υδρευτικού νερού στην περιοχή αρμοδιότητας της ΕΥΔΑΠ, μέσω της κατάλληλης της αξιοποίησης των υδατικών πόρων που διατίθενται για την κάλυψη της ζήτησης αυτής.

Βασική αρχική προϋπόθεση είναι η μελέτη του ισοζυγίου μεταξύ αφενός της ζήτησης νερού και των τάσεων της και αφετέρου της φυσικής προσφοράς υδατικών πόρων και της μεταβλητότητας και αβεβαιότητάς της. Δεύτερη προϋπόθεση είναι η μελέτη των οικονομικών παραμέτρων που αφορούν στη λειτουργία του συστήματος (κόστος μεταφοράς νερού) αλλά και στην τιμολόγηση των υπηρεσιών ύδρευσης και τη σχέση των τιμολογίων και της ζήτησης.

Οι τρόποι και μεθοδολογίες διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος αναφέρονται πρωτίστως στη λειτουργία του υφιστάμενου υδροδοτικού συστήματος και αφορούν στη ρύθμιση της ροής στους ταμιευτήρες, στον επιμερισμό της απόληξης νερού ανά κύρια, δευτερεύουσα ή εφεδρική πηγή, και στη μεταφορά νερού μέσω του δικτύου εξωτερικών υδραγωγείων. Μπορεί επίσης να αναφέρονται και σε πρόσθετα έργα για την ενίσχυση του υδροδοτικού συστήματος, εφόσον απαιτούνται.

Οι επιζητούμενοι τρόποι διαχείρισης θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από ορθολογικότητα, δηλαδή να είναι επιστημονικά θεμελιωμένοι, αποδοτικότητα, δηλαδή να αξιοποιούν τους διαθέσιμους προς εκμετάλλευση υδατικούς πόρους στο μέγιστο δυνατό βαθμό, και βιωσιμότητα, δηλαδή να μη δημιουργούν πρόβλημα εξάντλησης των υδατικών πόρων στο μέλλον για την κάλυψη των αναγκών του σήμερα.

Εξ άλλου, η κάλυψη της ζήτησης πρέπει να γίνεται με αξιοπιστία με την έννοια της μείωσης της πιθανότητας μη κάλυψης της απαιτούμενης ποσότητας νερού σε πολύ μικρά και αποδεκτά επίπεδα. Η έννοια της αξιοπιστίας αναφέρεται πρωτίστως στη μείωση της αβεβαιότητας που προκαλεί η μεταβλητότητα της φυσικής προσφοράς υδατικών πόρων (ξηρασίες) αλλά περιλαμβάνει και άλλες πηγές αβεβαιότητας όπως τα δυσμενή έκτακτα περιστατικά (βλάβες) στα έργα του συστήματος. Επίσης η κάλυψη της ζήτησης πρέπει να γίνεται με νερό ασφαλούς ποιότητας αλλά και χωρίς να δημιουργεί προβλήματα στο περιβάλλον (οικοσυστήματα) λόγω υπέρμετρης αποστέρησης νερού, προκειμένου αυτό να διατεθεί στην υδρευτική χρήση. Τέλος η κάλυψη της ζήτησης θα πρέπει να γίνεται με οικονομικά πρόσφορο τρόπο.

10.3 Βασικές επισημάνσεις

Το πρόβλημα της διαχείρισης ενός συστήματος υδατικών πόρων όπως αυτό της Αθήνας είναι από τα πλέον περίπλοκα και απαιτητικά λόγω των αντικρουόμενων στόχων και περιορισμών του. Έτσι, η κατάρτιση ενός οργανωμένου σχεδίου διαχείρισης ήταν απαραίτητο να αντιμετωπιστεί με μια διαδικασία διαδοχικών προσεγγίσεων. Με αυτή την έννοια, το πρώτο Σχέδιο Διαχείρισης, που εκπονήθηκε τον Οκτώβριο του 2000, ήταν μια πρώτη προσέγγιση, ενώ οι δύο επόμενες εκδόσεις του αποτελούν τη δεύτερη και τρίτη προσέγγιση, με μια διαδικασία διαδοχικών βελτιώσεων.

Για την κάλυψη των απαιτήσεων του Νόμου 2744/1999 και της Σύμβασης ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΔΑΠ (1999), ο χρονικός ορίζοντας των σχεδίων διαχείρισης που εκπονήθηκαν θεωρήθηκε πέντε χρόνια, δηλαδή καλύπτει την περίοδο μέχρι και το 2004. Η πρώτη κρίσιμη πενταετία χαρακτηρίζεται από:

- τη λειτουργία της ΕΥΔΑΠ με το νέο θεσμικό πλαίσιο·

- την ένταξη στο σύστημα των έργων Ευήνου σε πλήρη λειτουργία, καθώς και μια σειρά ενισχυτικών έργων·
- τη σημαντική αύξηση της κατανάλωσης, μετά τη μείωσή της στην προηγούμενη έμμονη ξηρασία (1988-94)·
- τις σημαντικές επεκτάσεις των δραστηριοτήτων της ΕΥΔΑΠ·
- την Ολυμπιάδα του 2004, και τις ειδικές ανάγκες που αυτή δημιουργεί.

Ωστόσο, ο ορίζοντας της πενταετίας είναι υπερβολικά μεγάλος αν πρόκειται να καθοριστεί πλήρως η πολιτική διαχείρισης μέχρι το τέλος της πενταετούς περιόδου, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα αναθεώρησής της. Αυτό γιατί οι δυνατότητες πρόγνωσης της εξέλιξης των υδατικών αποθεμάτων αλλά και της ζήτησης είναι περιορισμένες, λόγω εγγενών φυσικών και ανθρώπινων αβεβαιοτήτων. Από την άλλη πλευρά, ο ορίζοντας της πενταετίας είναι μικρός αν πρόκειται να εξεταστεί η επίπτωση ενός διαχειριστικού μέτρου στη μελλοντική διαθεσιμότητα υδατικών πόρων.

Για τους λόγους αυτούς, τα Διαχειριστικά Σχέδια εκπονήθηκαν με τις ακόλουθες παραδοχές:

- Συμβατικός χρονικός ορίζοντας 5 ετών·
- Ετήσια αναθεώρηση κάθε διαχειριστικού σχεδίου·
- Αναθεώρηση ανά τρίμηνο ή και συχνότερα, εφόσον παραστεί ιδιαίτερη ανάγκη (π.χ. ανάγκη εφαρμογής ειδικών τιμολογίων για τον έλεγχο της κατανάλωσης σε περίπτωση έμμονης ξηρασίας)·
- Μελέτη των κανόνων λειτουργίας του συστήματος για ορίζοντες μεγαλύτερους των 5 ετών (π.χ. 10 ετών) για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας της διαχείρισης των υδατικών πόρων.

10.4 Δομή των σχεδίων διαχείρισης

Τα τρία (μαζί με αυτό της πρώτης φάσης) διαχειριστικά σχέδια που εκπονήθηκαν περιλαμβάνουν τα ακόλουθα κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή του υδροδοτικού συστήματος (υδατικοί πόροι, αγωγοί μεταφοράς, γεωτρήσεις, αντλιοστάσια, διωλιστήρια, λειτουργία υδροδοτικού συστήματος, έργα υπό κατασκευή και προσωρινά έργα, προβλήματα σχετικά με τη μεταφορά νερού στην Αθήνα και επιπτώσεις τους στη διαθεσιμότητα υδατικών πόρων).

Κεφάλαιο 3: Ζήτηση νερού (ιστορικά δεδομένα, κατηγορίες χρήσεων νερού, ανάλυση της εξέλιξης της ζήτησης, εποχιακή και ημερήσια διακύμανση της ζήτησης, απώλειες νερού, αναπτυξιακά σχέδια ΕΥΔΑΠ και αντίστοιχες απαιτήσεις σε νερό, μεσοπρόθεσμες εκτιμήσεις μελλοντικής ζήτησης, άλλες – εκτός ΕΥΔΑΠ – χρήσεις νερού).

Κεφάλαιο 4: Υδατικοί πόροι (εκτιμήσεις επιφανειακών υδατικών πόρων, δυνατότητες άντλησης υπόγειων νερών).

Κεφάλαιο 5: Οικονομικά δεδομένα (κόστος άντλησης νερού, λοιποί συντελεστές κόστους).

Κεφάλαιο 6: Περιβαλλοντικές όψεις της διαχείρισης (θέματα ποιότητας νερού, περιβαλλοντικές δεσμεύσεις).

Κεφάλαιο 7: Μεθοδολογία διαχείρισης.

Κεφάλαιο 8: Εκτιμήσεις μελλοντικών απολήψεων (παραδοχές, στόχοι και περιορισμοί, μέγιστες δυνατότητες απολήψεων για διάφορα σενάρια, προβλέψεις μελλοντικών απολήψεων ανά ταμειυτήρα και υδροφορέα για εναλλακτικά σενάρια, συνεπαγόμενα κόστη).

Κεφάλαιο 9: Ασφάλεια του υδροδοτικού συστήματος έναντι έκτακτων περιστατικών (εφεδρικές πηγές, μέτρα ετοιμότητας εφεδρικών πηγών και αντίστοιχα κόστη, αντιμετώπιση βλαβών, αντιμετώπιση ειδικών συνθηκών κατανάλωσης, π.χ. Ολυμπιακοί Αγώνες).

Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα και προτάσεις.

Παραρτήματα: Πίνακες και σχήματα δεδομένων και αποτελεσμάτων και ειδικότερα αναφέρονται (α) στα δεδομένα ζήτησης νερού και την επεξεργασία τους, (β) στα τα υδρολογικά δεδομένα και την επεξεργασία τους, και (γ) στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού.

11 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, αναπτύχθηκε ένα προχωρημένο υπολογιστικό σύστημα για την υποστήριξη της διαχείρισης του υδροσυστήματος. Βασίζεται σε πρωτότυπο και ολοκληρωμένο μεθοδολογικό-θεωρητικό υπόβαθρο, που υλοποιεί με γρήγορες και αποτελεσματικές υπολογιστικές δομές και διαδικασίες σε ένα εύχρηστο παραθυρικό υπολογιστικό περιβάλλον.

Το υπολογιστικό σύστημα *Υδρονομέας*, που αποτελεί τον πυρήνα του όλου συστήματος, πραγματοποιεί κατά βάση βελτιστοποίηση, προκειμένου να εντοπίσει τις βέλτιστες δυνατές πολιτικές διαχείρισης του συστήματος υδατικών πόρων. Η αξιολόγηση κάθε πολιτικής προϋποθέτει την ποσοτική έκφραση της επίδοσής της, η οποία υλοποιείται μέσω ενός μέτρου (ή δείκτη) επίδοσης. Το μέτρο επίδοσης, που είναι και το προς βελτιστοποίηση μέγεθος, μπορεί να είναι εναλλακτικά η πιθανότητα αστοχίας του υδροσυστήματος (προς ελαχιστοποίηση), το κόστος λειτουργίας του υδροσυστήματος (προς ελαχιστοποίηση) ή η συνολική απόληψη από το υδροσύστημα (προς μεγιστοποίηση).

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που ακολουθείται (και σε αντίθεση με συμβατικές μεθοδολογίες), οι ποσότητες που επηρεάζουν το μέτρο επίδοσης και αποτελούν τις μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος βελτιστοποίησης, δεν είναι οι απολήψεις από τις διάφορες συνιστώσες του υδροσυστήματος, αλλά οι παράμετροι ενός παραμετρικού κανόνα λειτουργίας του υδροσυστήματος. Εφόσον καθοριστούν οι τιμές αυτών των παραμέτρων, προσδιορίζονται μονοσήμαντα οι απολήψεις σε κάθε χρονικό βήμα, οπότε προσδιορίζεται και το σχετικό μέτρο επίδοσης. Η χρήση παραμετρικών κανόνων για τη λειτουργία του υδροσυστήματος είναι γνωστή ως παραμετροποίησή του.

Ειδικότερα, ο προσδιορισμός του μέτρου επίδοσης γίνεται μέσω λεπτομερούς προσομοίωσης της λειτουργίας του υδροσυστήματος για ένα κατάλληλο χρονικό ορίζοντα. Προηγουμένως έχει εκτελεστεί στοχαστική προσομοίωση των υδρολογικών μεταβλητών, βάσει της οποίας έχουν παραχθεί οι κατάλληλες εισοδοί για την προσομοίωση της λειτουργίας του υδροσυστήματος. Αυτό γίνεται μέσω του υπολογιστικού συστήματος *Κασταλία*, το οποίο υλοποιεί πρωτότυπες στη θεωρητική τους βάση και υπολογιστικά γρήγορες στοχαστικές μεθοδολογίες.

Η *Κασταλία* ανακτά από την κεντρική βάση δεδομένων τα ιστορικά δεδομένα μετρήσεων των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών, οι οποίες προέρχονται είτε από συμβατικούς μετρητικούς σταθμούς, οι οποίοι έχουν λειτουργήσει στο παρελθόν στην ευρύτερη περιοχή, είτε από σύγχρονους αυτόματους τηλεμετρικούς σταθμούς, που εγκαταστάθηκαν στα πλαίσια αυτού του ερευνητικού έργου. Τα ιστορικά δεδομένα αναλύονται στατιστικά, προκειμένου να εκτιμηθούν οι παράμετροι των στοχαστικών μοντέλων, τα οποία παράγουν, εν συνεχεία, τις συνθετικές χρονοσειρές, που και αυτές αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων.

Η κεντρική βάση δεδομένων περιέχει, ακόμη, πλήθος άλλων στοιχείων, που αναφέρονται στη δομή και τοπολογία του υδροσυστήματος και τα χαρακτηριστικά των επιμέρους συνιστωσών του, και έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο που προσφέρει το σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων Oracle. Συνεργάζεται άμεσα με σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας, για τη διαχείριση και οπτικοποίηση όσων πληροφοριών έχουν γεωγραφική συνιστώσα, το οποίο αναπτύχθηκε στη βάση του λογισμικού ArcView. Επιπλέον, η κεντρική βάση δεδομένων συνοδεύεται από το λογισμικό *Υδρογνώμων*, το οποίο προσφέρει πλούσιες δυνατότητες διαχείρισης και επεξεργασίας των δεδομένων της βάσης.

Πέραν των στοχαστικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται ως κύριο εργαλεία εκτίμησης και πρόγνωσης των υδρολογικών εισόδων του συστήματος, αναπτύχθηκε ακόμη ένα εννοιολογικό μοντέλο, κατάλληλο για την προσομοίωση των υπόγειων και επιφανειακών συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμήθηκαν συναρτήσει των ιστορικών αποκρίσεων της λεκάνης, και συγκεκριμένα των υδρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης και τις θέσεις των κύριων καρστικών πηγών αυτής.

Οι χρονοσειρές υδρολογικών εισροών μεταφέρονται στο σύστημα *Υδρονομέας*, που προσδιορίζει βήμα προς βήμα όλα τα μεγέθη που αφορούν στη λειτουργία όλων των συνιστωσών του υδροσυστήματος, όπως οι απολήψεις από κάθε υδατικό πόρο, οι παροχές σε κάθε αγωγό, οι παροχετεύσεις σε κάθε κόμβο κατανάλωσης, οι απώλειες νερού σε κάθε κόμβο, οι καταναλώσεις ενέργειας κ.ά.

Σε ένα σύνθετο υδροσύστημα, όπως αυτό της Αθήνας προσφέρονται εναλλακτικές δυνατότητες σε ότι αφορά τον τρόπο μεταφοράς του νερού από τον κάθε κόμβο αφετηρίας προς τον κόμβο κατανάλωσης. Οι παροχές των επιμέρους αγωγών δεν είναι δυνατό ούτε σκόπιμο να αντιμετωπιστούν με, παραμετρικούς ή όχι, κανόνες λειτουργίας. Η πολλαπλότητα των λύσεων επιτρέπει την αναζήτηση μιας βέλτιστης λύσης, οπότε σε κάθε βήμα προσομοίωσης επιλύεται ένα ξεχωριστό πρόβλημα βελτιστοποίησης με αντικειμενικό στόχο το ελάχιστο δυνατό κόστος μεταφοράς του νερού και παράλληλα την απόλυτη συμμόρφωση με τους διάφορους φυσικούς περιορισμούς (π.χ. παροχευτικότητα αγωγών) και την κατά το δυνατό συμμόρφωση με τους λειτουργικούς περιορισμούς (π.χ. τήρηση ελάχιστων ροών σε αγωγούς, αποφυγή υπερχειλίσεων κτλ.).

Αυτή η βελτιστοποίηση σε κάθε βήμα προσομοίωσης, που έχει ονομαστεί εσωτερική βελτιστοποίηση, αποδείχθηκε ότι μπορεί να αναχθεί σε γραμμικό δικτυακό πρόβλημα εφόσον δεν υπάρχουν διαρροές στους αγωγούς και σε κάθε περίπτωση σε γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Το τελευταίο επιλύεται με αλγόριθμο *simplex*. Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι η ταχύτητά του, ιδιότητα άκρως επιθυμητή για το υπόψη πρόβλημα επειδή η εσωτερική βελτιστοποίηση εκτελείται εκ νέου σε κάθε βήμα προσομοίωσης. Για να μπορέσει να αναχθεί το πραγματικό πρόβλημα της μεταφοράς νερού στο υδροσύστημα στο τυπικό μαθηματικό πρόβλημα της γραμμικής βελτιστοποίησης, έγιναν εκτεταμένες μαθηματικές αναλύσεις με βάση τις οποίες μπόρεσε να γίνει η μετατροπή ενός τυχόντος πραγματικού υδροσυστήματος σε ένα μαθηματικό αντικείμενο γνωστό ως διγράφο και η εκχώρηση συντελεστών εικονικού ή πραγματικού κόστους σε κάθε κλάδο (τόξο) του διγράφου.

Αντίθετα με την εσωτερική βελτιστοποίηση, η εξωτερική βελτιστοποίηση που αποσκοπεί στον προσδιορισμό των παραμέτρων του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας και έχει ως αντικειμενικό στόχο την επίτευξη της καθολικά βέλτιστης επίδοσης του υδροσυστήματος, αποτελεί ένα έντονα μη γραμμικό πρόβλημα, με πολλά τοπικά ακρότατα. Για την περίπτωση αυτή αναπτύχθηκε μια ειδική τεχνική με την ονομασία *εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου* (*evolutionary annealing-simplex*), κατάλληλα προσαρμοσμένη στις ιδιαιτερότητες του υπόψη προβλήματος.

Πέρα από τους υπολογιστικούς αλγορίθμους, ο *Υδρονομέας* προσφέρει και μια σειρά επιπλέον λειτουργιών και δυνατοτήτων, όπως τη διαχείριση των σχετικών δεδομένων και των υπολογιστικών σεναρίων μέσω τη κεντρικής βάσης δεδομένων, την ασφάλεια χειρισμού των δεδομένων μέσω εκχώρησης κατάλληλων δικαιωμάτων ανά κατηγορία χρηστών, την εποπτική παράσταση της προσομοίωσης και των κανόνων λειτουργίας μέσω δυναμικής γραφικής απεικόνισης, και την εξαγωγή εύχρηστων πινακοποιημένων αποτελεσμάτων των υπολογισμών.

Εκτός από τις εργασίες προγραμματισμού, η θέση σε λειτουργία όλου υπολογιστικού συστήματος για το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας απαιτήσε μια σειρά από εκτεταμένες εργασίες αναζήτησης και επεξεργασίας δεδομένων σχετικών με τη δομή, την ταυτότητα και τα λεπτομερή χαρακτηριστικά όλων

των συνιστωσών του υδροσυστήματος. Αποτέλεσμα των ενεργειών αυτής της κατηγορίας είναι η κατάρτιση ενός δομημένου μοντέλου του υδροσυστήματος που είναι κατανοητό και αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά το φυσικό υδροσύστημα με τον απλούστερο δυνατό τρόπο αλλά και χωρίς υπεραπλουστεύσεις ως προς τη δομή, τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία του.

Το υπολογιστικό σύστημα έχει ήδη δώσει αποτελέσματα αφού χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την κατάρτιση του *Σχεδίου Διαχείρισης του Υδροδοτικού Συστήματος της Αθήνας* για τα έτη 2000-2001 έως 2003-2004, αλλά και για ενδιάμεσες τριμηνιαίες επικαιροποιήσεις τους. Το τελευταίο χρονικό διάστημα έχει υπάρξει συστηματική χρήση του από την ΕΥΔΑΠ. Στα πλαίσια αυτής της χρήσης έγιναν αρκετές επισημάνεις και προτάσεις. Χάρη στη στενή συνεργασία έγινε δυνατή η βελτίωση του λογισμικού. Επισημαίνεται ότι μεταβολές που αναπόδραστα συμβαίνουν στο σύστημα και τη διαχείρισή του δημιουργούν νέες ανάγκες, ενώ οι γρήγορες εξελίξεις στις επιστήμες και τεχνολογίες που συνδέονται με τη διαχείριση υδροσυστημάτων, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται και η πληροφορική, προσφέρουν νέες δυνατότητες για βελτίωση ενός λογισμικού συστήματος. Έτσι, για να παραμείνει το σύστημα σε λειτουργική επιχειρησιακή κατάσταση, αλλά και για να μπορέσει να βελτιωθεί και να αναπτυχθεί περαιτέρω, θα πρέπει να θεωρηθεί όχι ως ένα στατικό ολοκληρωμένο προϊόν, αλλά ως ένα δυναμικά εξελισσόμενο σύστημα, κάτι που μπορεί να εξασφαλιστεί μέσω της συστηματικής συντήρησης και επικαιροποίησης του και της αμφίδρομης συνεργασίας του επιχειρησιακού φορέα (ΕΥΔΑΠ) και του φορέα ανάπτυξης (ΕΜΠ).

Αναφορές

- ΕΥΔΑΠ, Διαχειριστικό Σχέδιο Ύδρευσης (Μετάφραση από το αγγλικό πρωτότυπο), τεχνική υποστήριξη: Knight Piésold, Δεκέμβριος 1996.
- Ευστρατιάδης, Α., *Διερεύνηση μεθόδων αναζήτησης ολικού βελτίστου σε προβλήματα υδατικών πόρων*, Μεταπτυχιακή εργασία, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.
- Ευστρατιάδης, Α., *Διερεύνηση μεθόδων αναζήτησης ολικού βελτίστου σε προβλήματα υδατικών πόρων*, MSc thesis, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.
- Ευστρατιάδης, Α., *Διερεύνηση μεθόδων αναζήτησης ολικού βελτίστου σε προβλήματα υδατικών πόρων*, MSc thesis, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.
- Ευστρατιάδης, Α., Ι. Ναλμπάντης, και Ε. Ρόζος, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 21, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2003.
- Ευστρατιάδης, Α., Ι. Ναλμπάντης, και Ν. Μαμάσης, *Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 8, 129 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
- Ευστρατιάδης, Α., και Δ. Κουτσογιάννης, *Κασταλία: Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τεύχος 9, 70 σελίδες, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
- ΙΓΜΕ, *Εκτίμηση υπόγειου υδατικού δυναμικού, Συμπλήρωση της ταξινόμησης ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων στα υδατικά διαμερίσματα της χώρας*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Παράρτημα 3, 327 σελίδες, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, Νοέμβριος 1996.
- Καραβοκυρός, Γ., Α. Ευστρατιάδης, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Ν. Δαμιανόγλου, Κ. Κωνσταντινίδου, Σ. Ναλπαντίδου, Α. Ξανθάκης, και Σ. Πολιτάκη, *Ανάλυση απαιτήσεων του συστήματος, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 1, 74 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2000α.
- Καραβοκυρός, Γ., Α. Ευστρατιάδης, και Δ. Κουτσογιάννης, *Υδρονομέας (έκδοση 2): Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τεύχος 11, 84 σελίδες, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000β.

- Καραβοκυρός, Γ., Δ. Κουτσογιάννης, και Ν. Μανδέλλος, Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του υδροσυστήματος της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 3*, Τεύχος 40, 161 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, Τελική έκθεση πρώτης φάσης, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 1*, Τεύχος 7, 114 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβρουάριος 1989.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Ι. Ναλμπάντης, Εκτίμηση δυνατοτήτων του σημερινού υδροδοτικού συστήματος Μόρνου-Υλίκης, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 2*, Τεύχος 8, 87 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 1989.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Ι. Τζεράνης, 2η αναγνωριστική έκθεση: Προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης Μόρνου, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 1*, 32 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 1988.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ν. Μαμάσης, και Ι. Ναλμπάντης, Στοχαστική προσομοίωση υδρολογικών μεταβλητών, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 2*, Τεύχος 13, 313 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 1990.
- Κουτσογιάννης, Δ., *Στατιστική Υδρολογία*, Έκδοση 4, 312 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.
- Μαμάσης, Ν., *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Μετρητικό σύστημα, Τεύχος 16, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2003.
- Μαμάσης, Ν., και Ι. Ναλμπάντης, *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Φάση Β, Τεύχος 20, Μελέτη υδρολογικών ισοζυγίων, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1995.
- Μαμάσης, Ν., και Ι. Τζεράνης, Μετρήσεις παροχής & καμπύλες στάθμης-παροχής λεκανών Μόρνου & Ευήνου, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 1*, Τεύχος Δ, 113 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 1988.
- Παγούνης, Μ., Α. Γκατζογιάννης, και Θ. Γκέρτσος, *Μελέτη σύνταξης υδατικού ισοζυγίου Βοιωτικού Κηφισού*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, 1986.
- Παγούνης, Μ., Θ. Γκέρτσος, και Α. Γκατζογιάννης, *Υδρογεωλογική έρευνα λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, 1994.
- Ρώτη, Σ., και Χ. Ανυφαντή, *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Φάση Α, Τεύχος 10, Ισοζύγια ταμιευτήρων, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1992.
- Ρώτη, Σ., Ν. Μαμάσης, και Κ. Τσολακίδης, *Διερεύνηση προσφερόμενων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών*, Τεύχος 11, Επεξεργασία υδρομετεωρολογικών δεδομένων λεκάνης Υλίκης, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1990.

- Σταυρίδης, Ν., Δ. Μπώκου, Αλεξοπούλου, Αναστασοπούλου, και Ν. Μαμάσης, Βροχομετρικοί και υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 1*, Τεύχος 2, 219 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 1992.
- Τζεράνης, Ι., και Κ. Τσολακίδης. *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών*, Τεύχος 9, Επισκόπηση υδρολογικών μελετών της ευρύτερης περιοχής Υλίκης, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1989.
- Τζεράνης, Ι.,. *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών*, Τεύχος 3, Επισκόπηση δεδομένων διαφυγών και ισοζυγίου ταμιευτήρα Μόρνου, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1989.
- Τσακαλίας, Γ., και Δ. Κουτσογιάννης, Καμπύλες στάθμης-παροχής και εξαγωγή παροχών, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 2*, Τεύχος 19, 125 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 1995.
- ΥΒΕΤ, *Ο Νόμος 1739/1987 για τη διαχείριση των υδατικών πόρων*, 47 σελίδες, 1987.
- ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΔΑΠ, *Σύμβαση μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου και της ΕΥΔΑΠ*, Αθήνα, 1999.
- Χριστοφίδης, Α., και Ν. Μαμάσης, *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Φάση Β, Τεύχος 18, Επεξεργασία υδρομετεωρολογικών δεδομένων, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1995.
- Bear, J., *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York, 1979.
- Dingman, S. L., *Physical Hydrology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems, *Proceedings of the 5th International Conference on Hydroinformatics*, Vol. 2, 1423-1428, Cardiff, UK, July 2002, IAHR, IWA, IAHS, 2002.
- ESRI, *ArcView GIS*, Redlands, 1999.
- ESRI, Avenue, Customization and application development for ArcView, Redlands, 1998.
- Evans, T. E., The effects of changes in the world hydrological cycle on availability of water resources, *Global climate Change and Agricultural Production: Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological, Pedological and Plant Physiological Processes*, edited by F. Bazaaz and W. Sombroek, Chapter 2, FAO and John Wiley, Chichester, West Sussex, UK, 1996.
- Hurst, H. E., Long-term storage capacity of reservoirs, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 116, pp. 776-808, 1951.
- Koutsoyiannis, D., A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series, *Water Resources Research*, 36(6), 1519-1534, 2000.
- 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., Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics, *Hydrological Sciences Journal*, 48(1), 3-24, 2003.

- Koutsoyiannis, D., Coupling stochastic models of different time scales, *Water Resources Research*, 37(2), 379-392, 2001.
- Koutsoyiannis, D., Optimal decomposition of covariance matrices for multivariate stochastic models in hydrology, *Water Resources Research*, Vol. 35(4), pp. 1219-1229, 1999.
- Koutsoyiannis, D., The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy, *Hydrological Sciences Journal*, 47(4), 573-595, 2002.
- Nalbantis, I., and D. Koutsoyiannis, A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems, *Water Resources Research*, 33(9), 2165-2177, 1997.
- Noutsopoulos G. and P. Hadjipanos, Discharge computations in compound channels, *International Association for Hydraulic Research*, pp. 173-180, 1983.
- Penman, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Royal Society of London Proceedings*, Series A, 193, 120-145, 1948.
- Rozos, E., A. Efstratiadis, I. Nalbantis, and D. Koutsoyiannis, Calibration of a semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, Paper submitted to *Hydrological Sciences Journal*, 2003.
- Rozos, E., and D. Koutsoyiannis, An assessment of flow equations in modeling of karstic aquifers, Paper submitted to *Journal of Hydrology*, 2002.
- Shaw, E. M., *Hydrology in Practice*, 3rd edition, Chapman & Hall, London, 1994.
- Tsakalias, G., and D. Koutsoyiannis, A comprehensive system for the exploration and analysis of hydrological data, *Water Resources Management*, 13, 269-302, 1999.
- Winston, W. L., *Operations Research, Applications and Algorithms*, 3rd edition, Duxbury, Belmont, 1994.
- World Meteorological Organization (WMO), *Guide to Hydrological Instruments and Methods of Observation*, Publication 8, Fifth Edition, Geneva, 1983.
- World Meteorological Organization (WMO), *Guide to Hydrological Practices*, Vol. 1, Data Acquisition and Processing, Publication 168, Fourth Edition, World Meteorological Organization, Geneva, 1981.