

**ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ
ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑΣ**

**WATER SUPPLY AND SEWAGE COMPANY OF
ATHENS**

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ, ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ
& ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES, HYDRAULIC
& MARITIME ENGINEERING

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΟ
ΕΚΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΟΠΤΕΙΑΣ ΚΑΙ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΤΗΣ
ΑΘΗΝΑΣ

RESEARCH PROJECT
UPDATING OF THE SUPERVISION AND
MANAGEMENT OF THE WATER
RESOURCE SYSTEM OF ATHENS

ΤΕΥΧΟΣ 12
ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ Α΄ ΦΑΣΗΣ

VOLUME 12
FINAL REPORT OF PHASE A

ΣΥΝΤΑΞΗ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ, Ν. ΜΑΜΑΣΗΣ

BY: D. KOUTSOYIANNIS, N. MAMASSIS

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ

SCIENTIFIC DIRECTOR: D. KOUTSOYIANNIS

ΑΘΗΝΑ – ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2000

ATHENS – DECEMBER 2000

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Περιγράφονται οι κύριες συνιστώσες της πρώτης φάσης του ερευνητικού έργου. Συγκεκριμένα 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 και μετρητική, και η οργάνωση, διαχείριση και επεξεργασία των απαραίτητων δεδομένων. Ακόμη, περιγράφονται τα εργαλεία λογισμικού που αναπτύχθηκαν και το πρώτο διαχειριστικό σχέδιο που εκπονήθηκε, με εφαρμογή αυτών των εργαλείων, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου. Τέλος, επισκοπούνται οι εργασίες που απαιτούνται για την επιχειρησιακή ολοκλήρωση του συστήματος.

ABSTRACT

The main components of the first phase of the research project are presented. Specifically, 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 and measuring, and the organisation, processing and management of the necessary data. In addition, the software tools developed, and the first master plan for the management of the water resource system, which was elaborated in the framework of the research project using these software tools, are also described. Finally, the actions required for the operational integration of the system are summarised.

Ερευνητική ομάδα

Επιστημονικός υπεύθυνος και συντονιστής του έργου είναι ο Επίκουρος 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 επόμενο πίνακα (σε αλφαβητική σειρά).

Κ. Αναγνώστου, Πτυχιούχος Παντείου	Γραμματειακή υποστήριξη. Συλλογή δεδομένων.
Ι. Γαβριηλίδης, Πολιτικός Μηχανικός	Συμμετοχή στη μελέτη εγκατάστασης του μετρητικού δικτύου.
Α. Ευστρατιάδης, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ	Συλλογή και επεξεργασία υδρομετεωρολογικών δεδομένων. Ανάπτυξη συστημάτων στοχαστικής προσομοίωσης και υποστήριξης της διαχείρισης.
Δ. Ζαρρής, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc, Υποψήφιος Διδάκτορας	Συμμετοχή στη μελέτη εγκατάστασης του μετρητικού δικτύου.
Ν. Ζερβός, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ	Συμμετοχή στο σχεδιασμό του συστήματος υποστήριξης της διαχείρισης
Π. Καβαλαγιάς, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΕΜΠ	Τεχνική υποστήριξη πληροφοριακών συστημάτων. Υλοποίηση βάσης δεδομένων.
Γ. Καραβοκυρός, Μηχανικός Πληροφορικής	Ανάπτυξη συστήματος υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων της Αθήνας.
Α. Κουκουβίνος, Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ, DEA Γεωγραφίας	Σχεδιασμός και υλοποίηση γεωγραφικής βάσης δεδομένων.
Κ. Κωνσταντινίδης, Μηχανολόγος Μηχανικός	Συμμετοχή στη μελέτη εγκατάστασης του μετρητικού δικτύου.
Ν. Μαμάσης, Δρ. Μηχανικός ΕΜΠ	Διοικητική υποστήριξη. Συμμετοχή στη μελέτη εγκατάστασης του μετρητικού δικτύου.
Α. Μαυροδήμου, Αρχιτέκτων Μηχανικός	Οικονομική διαχείριση του έργου.
Ι. Ναλμπάντης, Δρ. Μηχανικός	Σχεδιασμός του συστήματος εκτίμησης υδατικών πόρων στο Β. Κηφισό. Επεξεργασία δεδομένων.
Μ. Οικονόμου, Τελειόφοιτος Παντείου	Γραμματειακή και λογιστική υποστήριξη. Συλλογή δεδομένων.
Τ. Παπαθανασιάδης, Πολιτικός Μηχανικός	Συμμετοχή στη μελέτη εγκατάστασης του μετρητικού δικτύου.
Α. Παπακώστας, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΕΜΠ	Σχεδιασμός βάσης δεδομένων
Δ. Ρόζος, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, Υποψήφιος Διδάκτορας	Σχεδιασμός και υλοποίηση συστήματος εκτίμησης υδατικών πόρων στο Β. Κηφισό.
Α. Χριστοφίδης, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc	Ανάπτυξη λογισμικού εφαρμογών

Από πλευράς ΕΥΔΑΠ, στις εργασίες του ερευνητικού έργου συνεργάστηκαν ο επιβλέπων του έργου Α. Ξανθάκης και τα μέλη της επιτροπής παρακολούθησης Σ. Πολιτάκη, Ν. Δαμιανόγλου, Δ. Γκριντζιά, Β. Τσουκαλά, Σ. Ναλπαντίδου και Κ. Κωνσταντινίδου.

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, Β. Περλέρος, Υδρογεωλόγος, και Σ. Δρακοπούλου, Υδρογεωλόγος.

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

Αναγνωρίσεις

Η ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ επιθυμεί να ευχαριστήσει:

- ♦ το Διευθυντή Στρατηγικού Σχεδιασμού και Προγραμματισμού της ΕΥΔΑΠ κ. Ι. Ναζλόπουλο που είχε την πρωτοβουλία για το ξεκίνημα αυτού του ερευνητικού έργου, τον Αναπληρωτή Διευθυντή της ίδιας Διεύθυνσης κ. Α. Ξανθάκη για τη συνεχή στήριξη της έρευνας, και το Γενικό Διευθυντή κ. Κ. Κυριαζή για το έμπρακτο ενδιαφέρον του·
- ♦ το Διευθύνοντα Σύμβουλο της ΕΥΔΑΠ κ. Δ. Ξένο και τον Πρόεδρο κ. Γ. Παπαβασιλείου για την εμπιστοσύνη που μας έδειξαν, αναθέτοντάς μας το ερευνητικό έργο·
- ♦ τα μέλη της επιτροπής παρακολούθησης του έργου Σ. Πολιτάκη, Ν. Δαμιανόγλου, Δ. Γκριντζιά, Β. Τσουκαλά, Σ. Ναλπαντίδου και Κ. Κωνσταντινίδου για τη συνεχή και ουσιαστική συνεργασία τους·
- ♦ το Διευθυντή Υδροληψίας και Μεταφοράς Νερού της ΕΥΔΑΠ κ. Χ. Καρόπουλο και τα στελέχη της ΕΥΔΑΠ κκ. Ε. Νεστορίδου και Σ. Γεωργιάδη για τις υποδείξεις και παρατηρήσεις τους·
- ♦ τον Προϊστάμενο της υπηρεσίας Η/Μ εγκαταστάσεων Κιούρκων Απόστολο Νασίκα για την βοήθεια του στην κατανόηση του συστήματος αντλητικών γεωτρήσεων Μαυροσουβάλας·
- ♦ 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·
- ♦ 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 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 Μόρνου.

Περιεχόμενα

Ερευνητική ομάδα	iii
Αναγνωρίσεις	v
Περιεχόμενα	vi
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	5
2 Υποδομές του έργου	6
2.1 Υποδομή πληροφορικής	6
2.2 Σύστημα μέτρησης υδρομετεωρολογικών μεταβλητών	8
2.2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2.2 Επιλογή θέσεων μετρητικών σταθμών	9
2.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	10
3 Διαχείριση και επεξεργασία δεδομένων	14
3.1 Κεντρική Βάση Δεδομένων	14
3.2 Βάση γεωγραφικών δεδομένων	16
3.3 Υδρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες	17
3.3.1 Επεξεργασία βροχομετρικών δεδομένων	17
3.3.2 Εκτίμηση απωλειών ταμειυτήρων λόγω εξάτμισης	18
3.3.3 Κατάρτιση μηνιαίων ισοζυγίων ταμειυτήρων	18
4 Ανάπτυξη συστημάτων λογισμικού	23
4.1 Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης	23
4.1.1 Εισαγωγή.....	23
4.1.2 Συνοπτική περιγραφή του σχήματος προσομοίωσης	23
4.1.3 Προσομοίωση της εμμονής	25
4.1.4 Σχεδιασμός υπολογιστικού συστήματος	26
4.2 Σύστημα προσομοίωσης υδρολογικού κύκλου Β. Κηφισού-Υλίκης.....	29

4.2.1	Επιλογή μοντέλου – πακέτο MODFLOW.....	29
4.2.2	Βαθμονόμηση μοντέλου - Παραδοχές.....	30
4.3	Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης.....	33
4.3.1	Εισαγωγή.....	33
4.3.2	Οι συνιστώσες του Υπολογιστικού Συστήματος.....	36
4.3.3	Βασικές επισημάνσεις ως προς τη μεθοδολογία και τη λειτουργία του συστήματος.....	38
5	Το διαχειριστικό σχέδιο	41
5.1	Σκοπός και αντικείμενο του Σχεδίου Διαχείρισης.....	41
5.2	Βασικές επισημάνσεις.....	42
6	Επιχειρησιακή ολοκλήρωση του συστήματος	49
6.1	Εισαγωγή.....	49
6.2	Σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας.....	49
6.3	Σύστημα μέτρησης των υδατικών πόρων.....	49
6.4	Σύστημα εκτίμησης και πρόγνωσης των υδατικών πόρων.....	50
6.5	Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης.....	50
6.6	Συνεργασία των συστημάτων.....	51
6.7	Προσαρμογή των συστημάτων στην επιχειρησιακή δομή της ΕΥΔΑΠ.....	51
6.8	Ολυμπιακοί Αγώνες 2004.....	52
	Αναφορές	53

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό

Το 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 Επίκουρο Καθηγητή Δ. Κουτσογιάννη το ερευνητικό έργο με τίτλο *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*. Το έργο περιλαμβάνει δύο φάσεις, η πρώτη από τις οποίες λήγει στο τέλος του έτους 2000, ενώ η δεύτερη ξεκινά αμέσως μετά το τέλος της πρώτης και λήγει στο τέλος του 2003.

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, αναπτύσσονται ακόμη Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας, σύστημα μέτρησης υδατικών πόρων και σύστημα εκτίμησης και πρόγνωσης υδατικών πόρων, ενώ δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην συνεργασία και τη μεταφορά τεχνογνωσίας μεταξύ ΕΜΠ και ΕΥΔΑΠ.

1.2 Αντικείμενο και στόχοι του ερευνητικού έργου

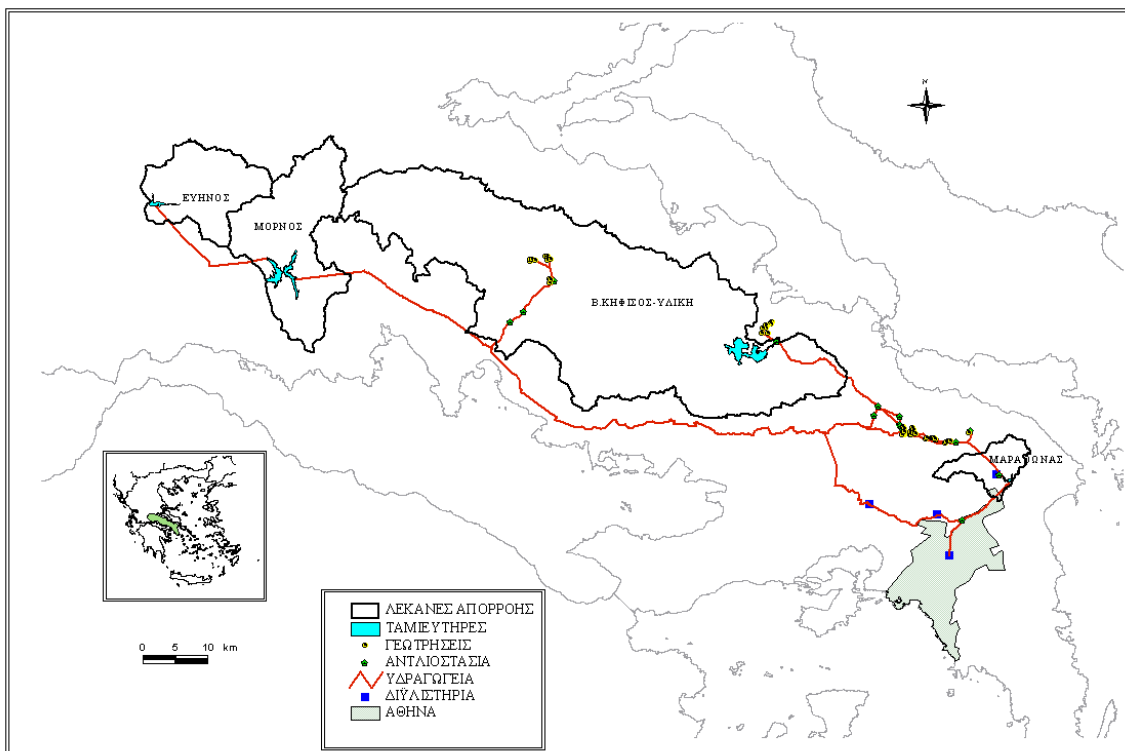
Κύριος στόχος του έργου είναι η ανάπτυξη και επιχειρησιακή λειτουργία ενός ολοκληρωμένου πληροφοριακού συστήματος, με τη χρήση του οποίου θα είναι δυνατή η ορθολογική διαχείριση του συστήματος υδατικών πόρων που αξιοποιεί η ΕΥΔΑΠ για την ύδρευση της Αθήνας.

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

1. ανάπτυξη Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας για την απεικόνιση και εποπτεία του εξωτερικού υδροδοτικού συστήματος της ΕΥΔΑΠ·
2. υποστήριξη της ανάπτυξης συστήματος μέτρησης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας·
3. ανάπτυξη συστήματος εκτίμησης και πρόγνωσης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας·
4. ανάπτυξη συστήματος υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας·

5. συνεργασία και μεταφορά τεχνογνωσίας στην ΕΥΔΑΠ για τα παραπάνω υποσυστήματα.

Το **πρώτο υποσύστημα** έχει στόχο την εποπτεία (αναγνώριση, προβολή ή εκτύπωση των διαφόρων χαρακτηριστικών) του εξωτερικού υδροδοτικού συστήματος της ΕΥΔΑΠ (βλ. Σχ. 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.



Σχ. 1.1: Το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας.

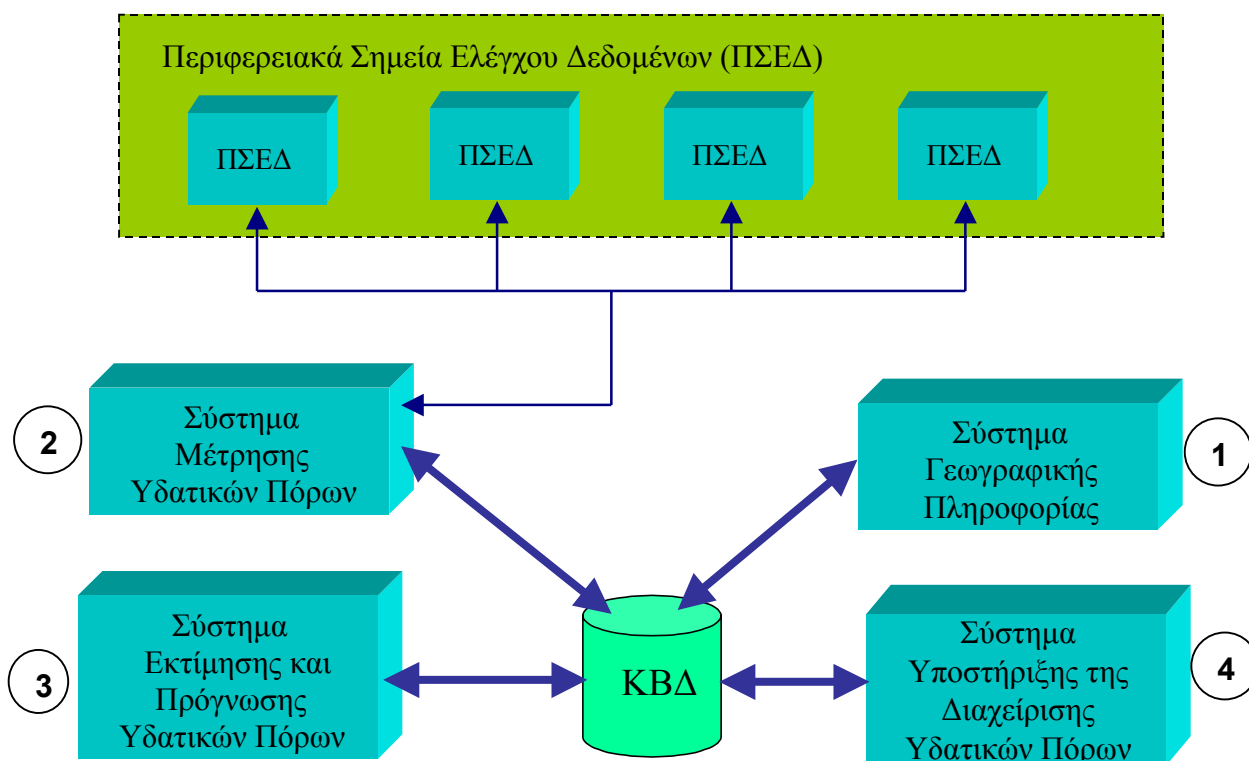
Το **δεύτερο υποσύστημα** έχει στόχο τη μέτρηση των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών και την επιχειρησιακή αξιοποίηση των μετρήσεων στη διαχείριση των υδατικών πόρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Πρόκειται για μετρητικό δίκτυο, που αποτελείται από τους σταθμούς μέτρησης των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών, 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, μιλίσκους, 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 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 κατακρημνισμάτων 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 της λεκάνης Β. Κηφισού – Υλίκης.

Το **τέταρτο υποσύστημα** περιλαμβάνει την υποστήριξη της διαχείρισης υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας (ΣΥΔΥΠ) 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 συμμετοχή προσωπικού της ΕΥΔΑΠ στην εκπόνηση διάφορων αντικειμένων.

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



Σχ. 1.2: Διασύνδεση πληροφοριακών συστημάτων.

1.3 Απαιτήσεις από το σύστημα

Η πρώτη εργασία που υλοποιήθηκε στα πλαίσια 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 (προβλέπεται από τη σύμβαση του έργου) περιλαμβάνεται στο Τεύχος 1, 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. Ακόμη είναι αριθμημένες, για γίνεται εύκολα η αναφορά σε αυτές, υπάρχει επεξηγηματικό κείμενο όπου αυτό απαιτείται, ενώ συνοδεύονται από κατάλογο με τεχνικούς όρους διαχείρισης υδατικών πόρων και υδροπληροφορικής.

1.4 Συνεργασία ΕΜΠ-ΕΥΔΑΠ

Η συνεργασία μεταξύ των ομάδων ΕΜΠ και ΕΥΔΑΠ στη διάρκεια της πρώτης φάσης ήταν απρόσκοπτη και από αυτήν προέκυψε η ανάλυση απαιτήσεων του συνολικού συστήματος (Τεύχος 1), η υλοποίηση των μελετών υπολογιστικού και μετρητικού εξοπλισμού (Τεύχη 2 και 4) και το διαχειριστικό σχέδιο (Τεύχος 5). Ακόμη πραγματοποιήθηκαν επιμέρους συνεργασίες μεταξύ των μελών των δύο ομάδων για την υλοποίηση επιμέρους αντικειμένων, 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.

Η μεταφορά τεχνογνωσίας θα επιταχυνθεί στο επόμενο χρονικό διάστημα και θα συνδυαστεί με την εγκατάσταση των υπολογιστικών συστημάτων (υλικού και λογισμικού), καθώς και με την υλοποίηση του μετρητικού δικτύου.

1.5 Ερευνητική συνιστώσα του έργου

Το προκείμενο έργο είναι ένα ερευνητικό έργο με σημαντικά ερευνητικά αποτελέσματα. Ήδη υπάρχουν ερευνητικές δημοσιεύσεις και ανακοινώσεις που εκπονήθηκαν στα πλαίσια του έργου, ενώ θα υπάρξουν ακόμη περισσότερες κατά τη δεύτερη φάση, αλλά και μετά τη λήξη του (δεδομένου ότι οι διαδικασίες συγγραφής και αξιολόγησης των ερευνητικών εργασιών είναι πολύ χρονοβόρες).

Ως τώρα έχουν ολοκληρωθεί ή βρίσκονται στο στάδιο της ολοκλήρωσης δέκα εργασίες και συγκεκριμένα:

- Δύο θεωρητικές εργασίες δημοσιευμένες στο κορυφαίο επιστημονικό περιοδικό *Water Resources Research* (Koutsoyiannis, 2000, 2001).¹
- Μία δημοσίευση σε πρακτικά διεθνούς συνεδρίου (Koutsoyiannis et al., 2001).
- Τρεις ανακοινώσεις δεκτές σε διεθνές επιστημονικό συνέδριο (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2001· Koutsoyiannis and Efstratiadis, 2001· Karavokiros et al., 2001).
- Μία προσκεκλημένη διάλεξη σε Αγγλικό πανεπιστήμιο (Koutsoyiannis, 1999).
- Τρεις ανακοινώσεις σε ελληνική επιστημονική ημερίδα (Κοκώσης και Κουτσογιάννης, 2000· Μαμάσης και Πολιτάκη, 2000· Ξανθάκης και Κουτσογιάννης, 2000).

¹ Τα πλήρη στοιχεία των δημοσιεύσεων και ανακοινώσεων αναγράφονται στον πίνακα αναφορών, στο τέλος του τεύχους.

2 Υποδομές του έργου

2.1 Υποδομή πληροφορικής

Πρωταρχική απαίτηση για την υλοποίηση του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων που αφορά στη διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας είναι η ύπαρξη και καλή λειτουργία της κατάλληλης υποδομής πληροφορικής. Έτσι, από ένα από τα πρώτα αντικείμενα που εκπονήθηκαν στα πλαίσια του έργου είναι η μελέτη του εξοπλισμού πληροφορικής. Βάσει της μελέτης αυτής συντάχθηκαν στη συνέχεια προδιαγραφές και έγινε η προμήθεια του εξοπλισμού από την αγορά με διαγωνισμό. Ο εξοπλισμός διακρίνεται σε υλικό εξοπλισμό και λογισμικό υποδομής και οι βασικές του λειτουργίες σχετίζονται αφενός με τη διαχείριση των δεδομένων και αφετέρου με την εκτέλεση των προγραμμάτων και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Η αρχιτεκτονική του συστήματος, σε ότι αφορά την υποδομή πληροφορικής, καθορίστηκε με βάση την αναμενόμενη ροή δεδομένων που φαίνεται στο Σχ. 2.1 και περιλαμβάνει οκτώ φάσεις:

Φάση 1 – Είσοδος στο σύστημα: Κατά τη φάση αυτή, τα πρωτογενή δεδομένα από το δίκτυο των υδρομετεωρολογικών σταθμών εισάγονται στο σύστημα. Η επικοινωνία με το δίκτυο αυτό γίνεται είτε καλώντας τους σταθμούς του δικτύου από τον κεντρικό κόμβο είτε αναμένοντας κλήσεις από τους σταθμούς στον κεντρικό κόμβο.

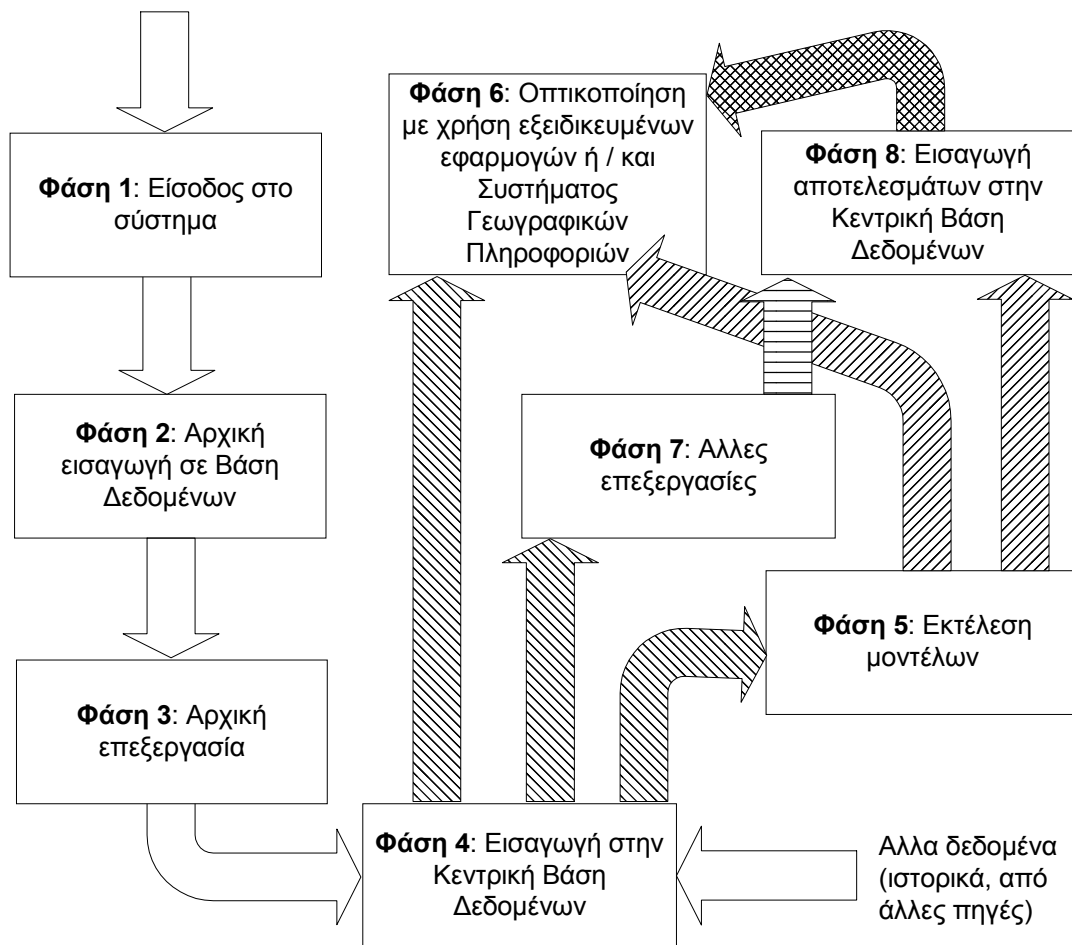
Φάση 2 – Αρχική εισαγωγή σε βάση δεδομένων: Κατά τη φάση αυτή, τα πρωτογενή δεδομένα εισάγονται σε «αρχική» – προσωρινή βάση δεδομένων, ώστε να είναι εφικτό στη συνέχεια να υποστούν την απαραίτητη πρώτη επεξεργασία. Η εν λόγω βάση δεδομένων έχει περισσότερο ως στόχο τη γρήγορη και αξιόπιστη αποθήκευση των δεδομένων και τη δυνατότητα μεταγενέστερης ανάκτησής τους, χωρίς ανάγκη υποστήριξης πολύπλοκων διεργασιών. Για το σκοπό αυτό χρειάζεται υπολογιστικός εξοπλισμός κατάλληλος για την υποστήριξη συστήματος διαχείρισης βάσεων δεδομένων (ΣΔΒΔ).

Φάση 3 – Αρχική επεξεργασία: Στη διάρκεια της φάσης αυτής, τα πρωτογενή δεδομένα υφίστανται (με χρήση εξειδικευμένων εφαρμογών) την επεξεργασία που θα τους επιτρέψει να εισαχθούν στην τελική τους μορφή στην Κεντρική Βάση Δεδομένων (ΚΒΔ) του συστήματος κατά την επόμενη φάση. Συνεπώς απαιτείται υπολογιστικός εξοπλισμός με επαρκή ισχύ για την υποστήριξη της διαδικασίας.

Φάση 4 – Εισαγωγή στην Κεντρική Βάση Δεδομένων: Κατά τη φάση αυτή, τα επεξεργασμένα δεδομένα εισάγονται στην ΚΒΔ έτσι ώστε να είναι ανακτήσιμα και αξιοποιήσιμα. Οι απαιτήσεις από τον εξοπλισμό περιλαμβάνουν και πάλι την υποστήριξη ΣΔΒΔ, όπως στη Φάση 2. Άλλα δεδομένα, τα οποία εισάγονται στην ΚΒΔ με διαφορετικές διαδικασίες, εκτός της παραπάνω, είναι ιστορικά υδρολογικά – μετεωρολογικά δεδομένα (κυρίως ημερήσιες, μηνιαίες και ετήσιες χρονοσειρές), προερχόμενα από άλλες πηγές. Τα δεδομένα αυτά υπάρχουν ήδη σε ηλεκτρονική μορφή, και προσαρμόζεται απλά η μορφή τους, ώστε να εισαχθούν απρόσκοπτα στην ΚΒΔ. Τέλος, στο σύστημα εισάγονται και τα διάφορα γεωγραφικά δεδομένα.

Φάση 5 – Εκτέλεση μοντέλων: Η εκτέλεση των διαφόρων προβλεπόμενων μαθηματικών / υπολογιστικών μοντέλων, με είσοδο δεδομένων από την ΚΒΔ, απαιτεί την ύπαρξη ισχυρού υπολογιστικού εξοπλισμού.

Δεδομένα σταθμών / ΠΣΕΔ



Σχ. 2.1: Ροή δεδομένων.

Φάση 6 – Οπτικοποίηση: Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των μοντέλων αλλά και των πληροφοριών της βάσης δεδομένων γίνεται με χρήση εξειδικευμένων εφαρμογών ή του υπό ανάπτυξη Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ). Για το σκοπό αυτό χρειάζεται εξοπλισμός με επαρκή υπολογιστική ισχύ και επιπλέον με δυνατότητες γραφικής απεικόνισης ικανοποιητικής απόδοσης. Διευκρινίζεται ότι όσον αφορά στα γεωγραφικά δεδομένα του ΣΓΠ, αυτά είναι σε γενικές γραμμές στατικά, δηλαδή δεν χρειάζονται τροποποιήσεις αλλά μόνο επισκόπηση σε συνδυασμό με τα δεδομένα από την ΚΒΔ.

Φάση 7 – Άλλες επεξεργασίες: Τυχόν άλλες επεξεργασίες στα δεδομένα γίνονται με χρήση εξειδικευμένων εφαρμογών και τα αποτελέσματά τους είτε αποθηκεύονται εκ νέου στην ΚΒΔ είτε οπτικοποιούνται. Οι απαιτήσεις σε υπολογιστικό εξοπλισμό είναι παρόμοιες με αυτές της Φάσης 3.

Φάση 8 – Εισαγωγή αποτελεσμάτων στην Κεντρική Βάση Δεδομένων. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των μοντέλων και των διαφόρων άλλων επεξεργασιών μπορούν να εισάγονται στην ΚΒΔ για μελλοντική ανάκτηση και περαιτέρω επεξεργασία τους. Οι απαιτήσεις σε υπολογιστικό εξοπλισμό ταυτίζονται με τις αντίστοιχες της Φάσης 2.

Με βάση τα παραπάνω, καθορίστηκαν οι ακόλουθες συνιστώσες του απαιτούμενου υπολογιστικού εξοπλισμού:

1. Υπολογιστικός εξοπλισμός για την υποστήριξη της λειτουργίας των Περιφερειακών Σημείων Ελέγχου Δεδομένων (ΠΣΕΔ· βλ. ενότητα 3.1). Ο εξοπλισμός αυτός αποτελείται από φορητούς

υπολογιστές και τους απαραίτητους διαμορφωτές (modems) για την επικοινωνία με το Κέντρο Διαχείρισης Δεδομένων (ΚΔΔ· βλ. ενότητα 3.1).

2. Επικοινωνιακός και υπολογιστικός εξοπλισμός για την υλοποίηση των λειτουργιών του ΚΔΔ, για το δίκτυο υδρομετεωρολογικών σταθμών και τα ΠΣΕΔ. Ο εξοπλισμός αυτός αποτελείται στη γενική περίπτωση από τον απαιτούμενο αριθμό διαμορφωτών, έναν τουλάχιστον εξυπηρετητή πρόσβασης (access server) και έναν υπολογιστή όπου θα εκτελούνται διαχειριστικές λειτουργίες.
3. Υπολογιστικός εξοπλισμός για τη φιλοξενία του ΣΔΒΔ, όπου αποθηκεύονται οι βάσεις δεδομένων (αρχική και κεντρική) του συστήματος.
4. Υπολογιστικός εξοπλισμός για διεκπεραίωση των απαραίτητων επεξεργασιών.
5. Υπολογιστικός εξοπλισμός για υποστήριξη του ΣΓΠ. Λόγω του χαρακτήρα του συγκεκριμένου ΣΓΠ, που περιλαμβάνει κυρίως επισκόπηση ήδη αποθηκευμένων γεωγραφικών πληροφοριών, ο εν λόγω υπολογιστικός εξοπλισμός είναι κατ' ουσία ένας εξυπηρετητής αρχείων (file server) όπου αποθηκεύονται οι γεωγραφικές πληροφορίες. Επίσης, ο εξυπηρετητής αυτός επικοινωνεί με την ΚΒΔ για την ανάκτηση των πληροφοριών που αποθηκεύονται εκεί και οπτικοποιούνται με χρήση του ΣΓΠ. Συνεπώς ο ίδιος εξοπλισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εξυπηρέτηση του ΣΓΠ και για γενική εξυπηρέτηση αρχείων, όπως αναμένεται να χρειάζεται στο συγκεκριμένο τοπικό δίκτυο (LAN).
6. Υπολογιστικός εξοπλισμός για την εκτέλεση των μαθηματικών / υπολογιστικών μοντέλων, ο οποίος μπορεί να διαθέτει και επαρκή ικανότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων.
7. Υπολογιστικός εξοπλισμός για την οπτικοποίηση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων των επεξεργασιών και των μοντέλων με χρήση είτε εξειδικευμένων εφαρμογών είτε του ΣΓΠ.
8. Βοηθητικός εξοπλισμός για την εσωτερική και εξωτερική δικτύωση του συστήματος, την αδιάλειπτη παροχή τάσης, τη λήψη αντιγράφων ασφαλείας (backup) κ.ο.κ.

Για τη διασφάλιση της λειτουργίας του συστήματος σε περίπτωση βλάβης προβλέπονται διάφορες προστατευτικές διατάξεις και η τακτική – περιοδική λήψη αντιγράφων ασφαλείας. Επίσης, κατάλληλο συμβόλαιο συντήρησης διασφαλίζει την έγκαιρη αντικατάσταση των τμημάτων του εξοπλισμού που έχουν υποστεί βλάβη. Τέλος, σε έκτακτες περιπτώσεις, είναι δυνατό να χρησιμοποιείται υπολογιστικός εξοπλισμός για περισσότερους από έναν ρόλους, για παράδειγμα ταυτόχρονη εξυπηρέτηση του ΣΔΒΔ και του ΣΓΠ. Αυτό ισχύει επειδή το σύστημα του εξοπλισμού είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε να διαθέτει συμπληρωματικότητα – συμβατότητα τεχνικών χαρακτηριστικών.

Στην υποδομή πληροφορικής συγκαταλέγονται ακόμη τα συστήματα λογισμικού που εξυπηρετούν τη διαχείριση της βάσης δεδομένων (Oracle), τη διαχείριση των γεωγραφικών πληροφοριών (ArcView) και την ανάπτυξη και συντήρηση μαθηματικών μοντέλων (Delphi).

2.2 Σύστημα μέτρησης υδρομετεωρολογικών μεταβλητών

2.2.1 Εισαγωγή

Απαραίτητη προϋπόθεση για την δόμηση ενός συστήματος με σκοπό την υποστήριξη της διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος είναι η διαθεσιμότητα επαρκών και αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με τους υδατικούς πόρους. Τα δεδομένα αυτά θα πρέπει να διατίθενται σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Σήμερα, η μέτρηση των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών στην περιοχή ενδιαφέροντος πραγματοποιείται από διάφορες υπηρεσίες (ΔΕΗ, ΕΜΥ, ΥΠΕΧΩΔΕ, ΥΠΓΕ, ΕΥΔΑΠ), με τη χρήση συμβατικών και αυτογραφικών οργάνων, και παρουσιάζει τα παρακάτω σημαντικά μειονεκτήματα:

1. Σε πολλές περιπτώσεις οι μετρήσεις δεν είναι αξιόπιστες και δεν έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια, κυρίως λόγω ελλιπούς συντήρησης των οργάνων και κακής εκπαίδευσης των παρατηρητών.
2. Υπάρχει σημαντική χρονική καθυστέρηση στη διαχείριση (μέτρηση, μεταφορά, επαλήθευση και ηλεκτρονική αρχειοθέτηση) των δεδομένων.
3. Η συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων γίνεται ξεχωριστά σε κάθε υπηρεσία και με διαφορετικές προδιαγραφές
4. Η χρονική κλίμακα μέτρησης δεν είναι πάντα η επιθυμητή.
5. Τα συμβατικά δίκτυα χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος λειτουργίας.

Για τους παραπάνω λόγους, είναι απαραίτητο το υπάρχον μετρητικό δίκτυο να συμπληρωθεί από ένα τηλεμετρικό δίκτυο αυτόματων σταθμών, έτσι ώστε οι μετρήσεις να έχουν την απαιτούμενη αξιοπιστία, ακρίβεια και χρονική διακριτικότητα, να είναι διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο και οι βλάβες των οργάνων να εντοπίζονται σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Οι κύριοι στόχοι που θα επιτευχθούν με την συνεχή μέτρηση των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών μέσα από την ανάπτυξη συστήματος μέτρησης των υδατικών πόρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας είναι:

1. η ποσοτική παρακολούθηση των υδατικών πόρων των λεκανών απορροής, οι οποίες 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).
2. η παρακολούθηση των υδρολογικών και κλιματικών χαρακτηριστικών των παραπάνω περιοχών, με την σταδιακή κατάρτιση αξιόπιστων χρονοσειρών όλων των απαιτούμενων μεταβλητών.
3. η τροφοδότηση των μοντέλων υδρολογικής και λειτουργικής προσομοίωσης με επίκαιρα δεδομένα.

Η ανάπτυξη συστήματος μέτρησης των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών στις λεκάνες απορροής που συνδέονται με το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας (Ευήνου, Μόρνου, Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης και Μαραθώνα) περιλαμβάνει την εγκατάσταση: **(α)** τεσσάρων αυτόματων τηλεμετρικών μετεωρολογικών σταθμών (ένας σε κάθε λεκάνη), **(β)** τεσσάρων αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών μέτρησης στάθμης ποταμών (ένας σε κάθε λεκάνη), **(γ)** τεσσάρων αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών μέτρησης στάθμης ταμιευτήρων (ένας σε κάθε ταμιευτήρα), **(δ)** συστήματος τηλεμετάδοσης, λήψης και επεξεργασίας δεδομένων, **(ε)** συμβατικών εγκαταστάσεων υδρομετρήσεων ποταμών (μία εγκατάσταση σε κάθε αυτόματο σταθμό μέτρησης στάθμης ποταμών) και **(ζ)** σύνδεση με άλλα μετρητικά συστήματα υδροφορέων που έχει αναπτύξει η ΕΥΔΑΠ.

Στα πλαίσια της πρώτης φάσης του ερευνητικού έργου έγινε η επιλογή θέσεων των σταθμών μέτρησης, ολοκληρώθηκε η μελέτη του συστήματος και οριστικοποιήθηκαν οι τεχνικές προδιαγραφές του. Στη συνέχεια διενεργήθηκε διαγωνισμός για την προμήθεια και εγκατάσταση του συστήματος, ο οποίος ήδη βρίσκεται στο τελικό του στάδιο. Αναμένεται ότι το σύστημα θα τεθεί σε λειτουργία το πρώτο εξάμηνο του 2001.

2.2.2 Επιλογή θέσεων μετρητικών σταθμών

Παίρνοντας υπόψη ορισμένες προϋποθέσεις που αφορούν στις υπάρχουσες μετρητικές υποδομές, την ασφάλεια των συστημάτων, την καταλληλότητα της θέσης από υδρολογικής πλευράς και την οικονομικότητα, καθορίστηκαν τα ακόλουθα γενικά κριτήρια για την επιλογή των θέσεων των μετρητικών σταθμών:

1. Οι αυτόματοι τηλεμετρικοί σταθμοί τοποθετούνται κοντά στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις που σχετίζονται με τα φράγματα ή τα αντλιοστάσια, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια των μετρητικών συστημάτων και οι παροχές τηλεφώνου και ηλεκτρικού ρεύματος.
2. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί τοποθετούνται κοντά στην ισοϋψή της μέγιστης στάθμης της λίμνης, έτσι ώστε να εκτιμώνται με ακρίβεια οι μεταβλητές που σχετίζονται με το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα (βροχόπτωση, εξάτμιση).
3. Οι αυτόματοι τηλεμετρικοί σταθμοί μέτρησης στάθμης ταμιευτήρων τοποθετούνται στα βαθύτερα σημεία των λιμνών, έτσι ώστε η μέτρηση να είναι δυνατή για κάθε δυνατή στάθμη του ταμιευτήρα. Στην εγκατάσταση του σταθμού λαμβάνονται υπόψη και τα φερτά υλικά που σταδιακά αποθηκεύονται στο νεκρό όγκο του φράγματος.
4. Οι υδρομετρικοί σταθμοί τοποθετούνται όσον το δυνατόν πλησιέστερα στα φράγματα (και ψηλότερα από την ισοϋψή της μέγιστης στάθμης), έτσι ώστε να ελέγχουν το μεγαλύτερο δυνατό τμήμα της απορροής που εισρέει στους ταμιευτήρες.
5. Η εγκατάσταση των μετεωρολογικών σταθμών γίνεται σύμφωνα με τους κανονισμούς του World Meteorological Organization (WMO, 1983).
6. Οι αυτόματοι τηλεμετρικοί σταθμοί μέτρησης στάθμης ποταμών τοποθετούνται σε θέσεις κατάλληλες από υδρολογικής απόψεως για τη διενέργεια υδρομετρήσεων (που θα πραγματοποιούνται στις ίδιες θέσεις).

Με βάση αυτά τα κριτήρια και μετά από επί τόπου επισκέψεις καθορίστηκαν οι ακριβείς θέσεις των σταθμών, οι οποίες αποτυπώθηκαν σε τοπογραφικά διαγράμματα και video για την υποβοήθηση του διαγωνισμού. Ενδεικτικά, οι προτεινόμενες θέσεις παρουσιάζονται στο Σχ. 2.2 και Σχ. 2.3, ενώ τα χαρακτηριστικά τους παρατίθενται συνοπτικά στον Πίν. 2.1.

2.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Το αντικείμενο του διαγωνισμού που προκήρυξε η ΕΥΔΑΠ είναι η προμήθεια, εγκατάσταση, και λειτουργία μετρητικών συστημάτων στις περιοχές των ταμιευτήρων Μόρνου, Υλίκης και Μαραθώνα, και η εκπαίδευση προσωπικού της ΕΥΔΑΠ στην λειτουργία και συντήρηση των υπό προμήθεια συστημάτων. Συγκεκριμένα, ο διαγωνισμός περιλάμβανε τα παρακάτω δύο αντικείμενα:

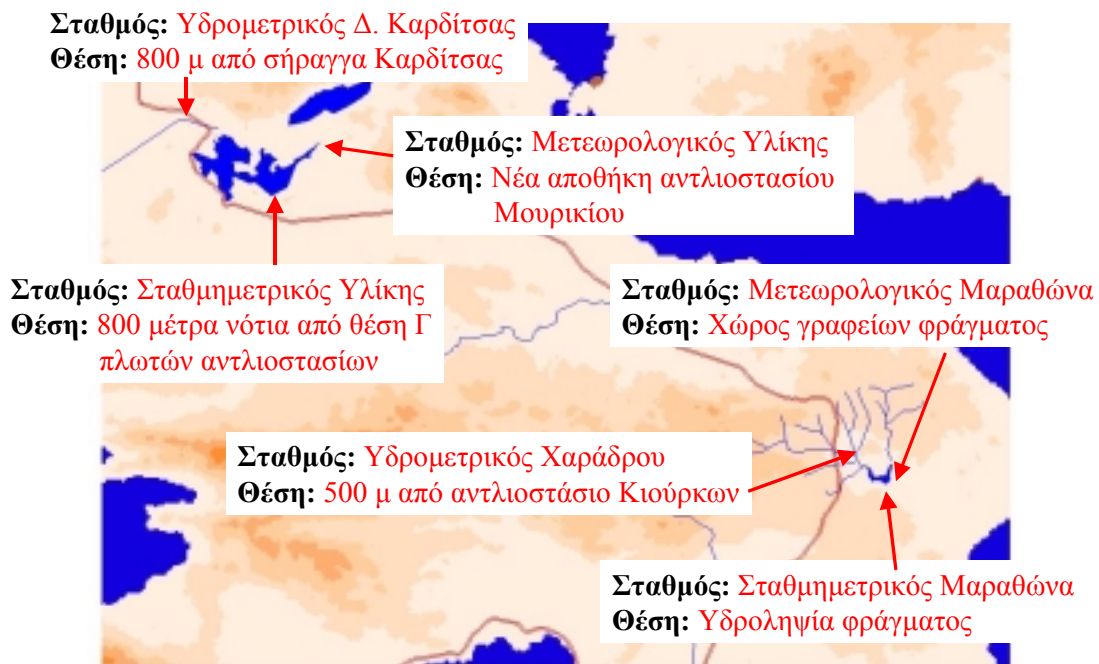
(α) Προμήθεια και εγκατάσταση:

1. αυτόματων τηλεμετρικών μετεωρολογικών σταθμών,
2. αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών μέτρησης στάθμης ταμιευτήρων,
3. αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών μέτρησης στάθμης ποταμών,
4. σταθμών συμβατικών υδρομετρήσεων σε φυσικά ή διαμορφωμένα υδατορεύματα μαζί με την τυχόν απαραίτητη υποδομή τους,
5. συστήματος λήψης δεδομένων του συνόλου των τηλεμετρικών σταθμών,

(β) Θέση σε λειτουργία και συντήρηση των συστημάτων για διάστημα 2 ετών, καθώς και εκτέλεση των υδρομετρήσεων στις θέσεις τοποθέτησης των αντίστοιχων συστημάτων για χρονικό διάστημα 2 ετών και με συχνότητα 3 υδρομετρήσεων ανά έτος και ανά σταθμό, και εκπαίδευση προσωπικού της ΕΥΔΑΠ στην εκτέλεση υδρομετρήσεων.



Σχ. 2.2: Θέσεις υδρομετεωρολογικών σταθμών στις λεκάνες Μόρνου-Ευήνου.



Σχ. 2.3: Θέσεις υδρομετεωρολογικών σταθμών στις λεκάνες Υλίκης-Μαραθώνα

Πίν. 2.1: Συνοπτικά χαρακτηριστικά προτεινόμενων θέσεων σταθμών

Θέση	Είδος	Επικοινωνία	Τροφοδοσία	Ασφάλεια	Υδρολογική καταλληλότητα	Παρατηρήσεις
Φράγμα Ευήνου	Μ	ΤΓ	ΓΡ	8	8	Υπάρχων σταθμός, απαιτείται κοπή δένδρων
Υδροληγία Μόρνου	Μ	ΤΓ	ΓΡ	8	9	
Αντλ. Μουρικού	Μ	ΤΓ	ΓΡ	10	9	
Φράγμα Μαραθώνα	Μ	ΤΓ	ΓΡ	9	9	
Φράγμα Ευήνου	Σ	ΤΓ	ΓΡ	9	10	Με τροποποίηση κατασκευής
Φράγμα Μόρνου	Σ	ΤΓ	ΓΡ	10	10 και 8	Δύο πιθανές θέσεις
Λίμνη Υλίκη	Σ	ΚΤ ή ΤΓ	Σ ή ΓΡ	9	10	
Φράγμα Μαραθώνα	Σ	ΤΓ	ΓΡ	10	9	
Ποταμός Ευήνος	Σ	ΚΤ ή Ρ	Σ	3	5	Δεν θα εγκατασταθεί σε αυτή τη φάση
	Υ	ΚΤ ή Ρ	Σ	3	5	Δεν θα εγκατασταθεί σε αυτή τη φάση
Ποταμός Μόρνος	Σ	ΚΤ ή ΤΓ	Σ ή ΓΡ	6	9	
	Υ	ΚΤ ή ΤΓ	Σ ή ΓΡ	6	9	
Δ. Καρδίτσας	Σ	ΚΤ	ΓΡ	6	10	
	Υ	ΚΤ	ΓΡ	6	10	
Ποταμός Χάραδρος	Σ	ΚΤ ή ΤΓ	Σ ή ΓΡ	6	8	
	Υ	ΚΤ ή ΤΓ	Σ ή ΓΡ	6	8	

Επεξηγήσεις:

Είδος (Μ: Μετεωρολογικός, Σ: Σταθμημετρικός, Υ: Υδρομετρικός)· Επικοινωνία (ΤΓ: Τηλεφωνική Γραμμή, ΚΤ: Κινητή Τηλεφωνία, Ρ: Ραδιοζεύξη)· Τροφοδοσία (ΓΡ: Γραμμή Ρεύματος, Σ: Συσσωρευτές)· Ασφάλεια (1 καθόλου ασφαλής, 10 πλήρης ασφάλεια)· Υδρολογική καταλληλότητα (1 ακατάλληλος, 10 απόλυτη καταλληλότητα).

Αναλυτικότερα για την ολοκλήρωση του συστήματος σύμφωνα με τους όρους του διαγωνισμού απαιτείται:

- ◆ Η προμήθεια και εγκατάσταση 3 αυτόματων τηλεμετρικών μετεωρολογικών σταθμών, που θα τοποθετηθούν στις εγκαταστάσεις υδροληψίας Μόρνου, στο αντλιοστάσιο Μουρικού και στην περιοχή εξωτερικά του χώρου των γραφείων του φράγματος Μαραθώνα. Οι σταθμοί περιλαμβάνουν αισθητήρες για τη μέτρηση της βροχόπτωσης, της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της διεύθυνσης και της ταχύτητας ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας και της ηλιοφάνειας, σύστημα αποθήκευσης και τηλεμετάδοσης των μετρήσεων, σύστημα ενεργειακής τροφοδοσίας των σταθμών, καθώς και περίφραξη.
- ◆ Η προμήθεια και εγκατάσταση 3 αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών μέτρησης στάθμης ταμιευτήρα, που θα τοποθετηθούν στο φρέαρ προσπέλασης των εγκαταστάσεων εκκένωσης του φράγματος Μόρνου, στην όχθη της λίμνης Υλίκης και στον πύργο υδροληψίας του φράγματος Μαραθώνα. Οι σταθμοί περιλαμβάνουν αισθητήρα (έναν ή περισσότερους, ώστε να εξασφαλίζεται η επιθυμητή ακρίβεια μετρήσεων) για τη μέτρηση της στάθμης, καθώς και σύστημα αποθήκευσης και τηλεμετάδοσης των μετρήσεων και ενεργειακής τροφοδοσίας των σταθμών.
- ◆ Η προμήθεια και εγκατάσταση 3 αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών μέτρησης στάθμης ποταμού, που θα τοποθετηθούν στην παλαιά γέφυρα Λευκαδιτίου του ποταμού Μόρνου, στη διώρυγα Καρδίτσας ανάντη της λίμνης Υλίκης και σε θέση του ποταμού Χαράδρου κοντά στα διυλιστήρια Κιούρκων. Οι σταθμοί περιλαμβάνουν αισθητήρα για τη μέτρηση της στάθμης, καθώς και σύστημα αποθήκευσης και τηλεμετάδοσης των μετρήσεων και ενεργειακής τροφοδοσίας των σταθμών.
- ◆ Η προμήθεια και εγκατάσταση 3 σταθμών συμβατικών υδρομετρήσεων σε φυσικά ή διαμορφωμένα ρέματα, συμπεριλαμβανομένης και της τυχόν μόνιμης ή φορητής υποδομής τους. Οι σταθμοί θα τοποθετηθούν στις ίδιες θέσεις με τους αυτόματους σταθμούς μέτρησης στάθμης ποταμών (που αναφέρονται και στην προηγούμενη παράγραφο). Οι υδρομετρήσεις θα βασίζονται στη μέτρηση στάθμης, ταχύτητας και διατομής και οι σταθμοί θα περιλαμβάνουν μιλίσκους ή άλλους αισθητήρες μέτρησης της ταχύτητας, διατάξεις μέτρησης της στάθμης του νερού και της διατομής του υδατορεύματος και διάταξη αυτόματου προσδιορισμού της θέσης του μιλίσκου. Επίσης, θα περιλαμβάνουν συσκευές κατάλληλες για τη μέτρηση της παροχής σε περίπτωση ροής με πολύ μικρό βάθος ροής (θερινή παροχή), οπότε δεν είναι εφικτή η μέτρηση του πεδίου ταχυτήτων (π.χ. μέθοδος διαλυμάτων). Ακόμη, θα πρέπει να προσδιοριστεί μέθοδος για την ακριβέστερη δυνατή εκτίμηση της παροχής από τα μετρούμενα μεγέθη, καθώς και να πραγματοποιηθεί μελέτη και κατασκευή όλης της τυχόν απαραίτητης μόνιμης ή φορητής υποδομής για την λειτουργία του σταθμού.
- ◆ Η προμήθεια και εγκατάσταση συστήματος τηλεχειρισμού και λήψης των δεδομένων των τηλεμετρικών σταθμών.
- ◆ Η θέση σε λειτουργία του συστήματος, η αντικατάσταση τυχόν ελαττωματικών ή χαλασμένων εξαρτημάτων και συσκευών και η συντήρηση του όλου συστήματος για διάρκεια 2 ετών από το χρόνο της έναρξης της λειτουργίας κάθε σταθμού.
- ◆ Η εκτέλεση συμβατικών υδρομετρήσεων στους σταθμούς που θα έχουν τοποθετηθεί και με τη μέθοδο που θα έχει προταθεί, από εξειδικευμένο συνεργείο του προμηθευτή. Θα γίνουν 6 υδρομετρήσεις ανά θέση σε χρονικό διάστημα 2 ετών, που οπωσδήποτε όμως θα καλύπτουν όλο το εύρος των παροχών που θα λειτουργεί ο σταθμός.
- ◆ Η εκπαίδευση συνεργείων της ΕΥΔΑΠ στην εκτέλεση των υδρομετρήσεων και στην συντήρηση των υπό προμήθεια συστημάτων.

3 Διαχείριση και επεξεργασία δεδομένων

3.1 Κεντρική Βάση Δεδομένων

Η Κεντρική Βάση Δεδομένων (ΚΒΔ) αποτελεί το θεμέλιο του συνολικού πληροφοριακού συστήματος που δημιουργείται 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).
- ◆ 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 Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας). 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 Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας 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 (πχ. 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 (αντλιοστασιών 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:

- ◆ Η γενική περίπτωση μετάδοσης είναι πως 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 σημαιοδότηση 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 (πχ. 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 σημαιοδότηση της λέξης κατάστασης κτλ.
- ◆ Απαιτείται ευέλικτη αντιστοίχιση 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 αποτελέσματα των υδρολογικών σεναρίων είναι 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 αστοχίες 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 διάφορες παράμετροι των διαδικασιών προσομοίωσης – βελτιστοποίησης.
- ◆ Τις διάφορες παράμετροι των υδρολογικών σεναρίων.
- ◆ Οι πίνακες αναφοράς της υπόλοιπης βάσης δεδομένων.
- ◆ Άλλα δεδομένα εφαρμογών.

3.2 Βάση γεωγραφικών δεδομένων

Το Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας (ΣΓΠ) αποτελεί υποσύστημα του πληροφοριακού συστήματος του έργου και σε αυτό αποθηκεύονται γεωγραφικά δεδομένα για τις συνιστώσες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στο περιβάλλον του ΣΓΠ είτε στα περιβάλλοντα των άλλων υποσυστημάτων του έργου.

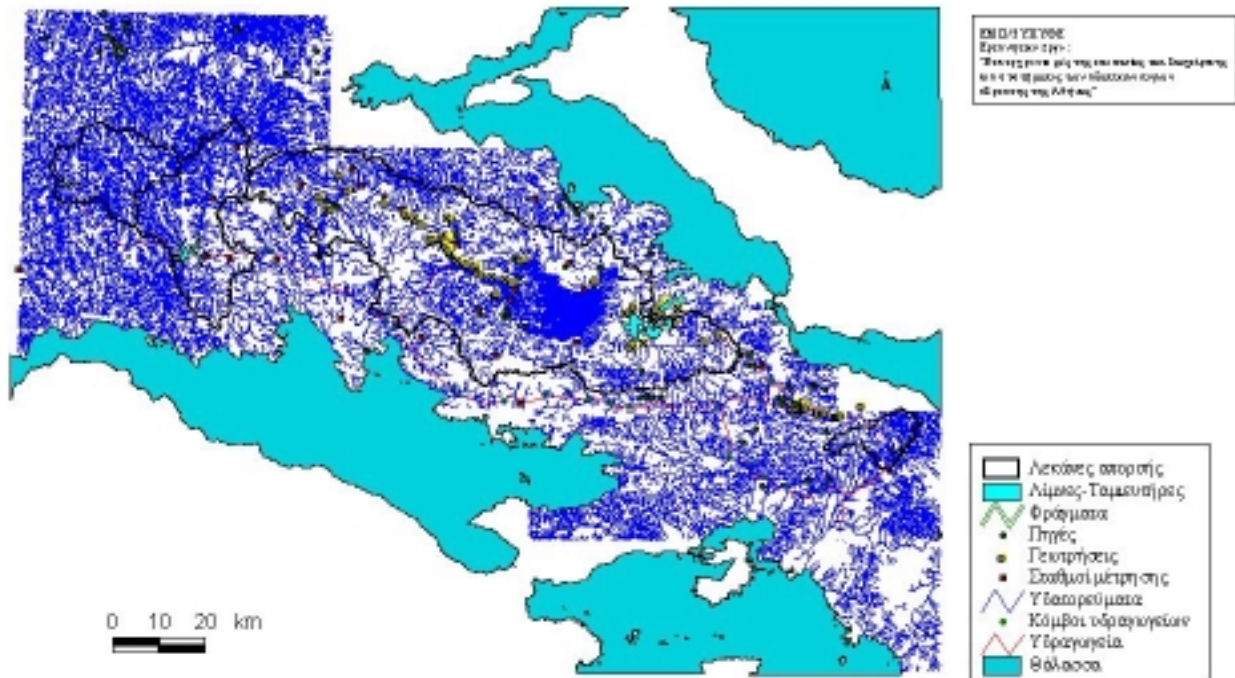
Τα δεδομένα που αποθηκεύονται στη Βάση Γεωγραφικών Δεδομένων (ΒΓΔ) αναφέρονται στις συνιστώσες του συστήματος υδροδότησης της Αθήνας, με κλίμακα προσέγγισης 1:100.000 και περιλαμβάνουν τις παρακάτω γενικές κατηγορίες:

1. Υδροδοτικό σύστημα (ταμιευτήρες, φράγματα, γεωτρήσεις, υδραγωγεία, τεχνικά έργα στα υδραγωγεία, αντλιοστάσια, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, διυλιστήρια).
2. Δεδομένα επιφανειακής και υπόγεια 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).
4. Ποιοτικά χαρακτηριστικά των υδατικών πόρων (θέσεις μέτρησης ποιοτικών χαρακτηριστικών νερού).

Ορισμένα από τα παραπάνω δεδομένα (υδραγωγεία, σταθμοί μέτρησης κλπ) παρουσιάζονται στο Σχ. 3.1.

Η ΒΓΔ σχεδιάστηκε έτσι ώστε να περιέχει πληροφορία θέσης για τις συνιστώσες του υδροδοτικού συστήματος. Αποθηκεύονται σε αυτήν η θέση και το σχήμα των αντικειμένων που συνθέτουν το σύστημα υδροδότησης της Αθήνας. Γενικά, ως μοντέλο δεδομένων ακολουθήθηκε το διανυσματικό, ενώ το μοντέλο ψηφιδωτής διαμέρισης χρησιμοποιήθηκε μόνο στην περίπτωση των ψηφιακών

μοντέλων υψομέτρου. Για την σύνδεση της ΒΓΔ με την ΚΒΔ έχει προβλεφθεί η χρήση ενός και μοναδικού αριθμού αναγνώρισης κάθε γεωγραφικής οντότητας που αποθηκεύεται και στις δύο βάσεις. Κάθε οντότητα που ορίζεται στην ΒΓΔ έχει το σχήμα μιας από τις τρεις βασικές γεωμετρίες που έχει αποδοθεί στην κλάση της (σημείο, γραμμή, πολύγωνο).



Σχ. 3.1: Υδρογραφία της περιοχής του υδροδοτικού συστήματος, φράγματα, υδραγωγεία, γεωτρήσεις, πηγές, και σταθμοί μέτρησης

3.3 Υδρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες

Η Κεντρική Βάση Δεδομένων, εκτός από τα δεδομένα που θα αποκτώνται από το αυτόματο μετρητικό σύστημα που περιγράφηκε στην ενότητα 2.2, περιλαμβάνει ακόμη και δεδομένα από συμβατικούς μετεωρολογικούς και υδρομετρικούς σταθμούς. Στη σημερινή της ανάπτυξη, όπου δεν έχει ακόμη ολοκληρωθεί η εγκατάσταση και λειτουργία του νέου συστήματος, η βάση δεδομένων περιέχει μόνο ιστορικά δεδομένα της δεύτερης κατηγορίας. Και στις δύο κατηγορίες πρωτογενών δεδομένων είναι απαραίτητο να γίνονται επεξεργασίες που αφορούν σε ελέγχους, συμπληρώσεις, συναθροίσεις και εξαγωγή δευτερογενών δεδομένων, ώστε να μπορέσουν τα δεδομένα αυτά να είναι αξιοποιήσιμα στη διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος.

Οι επεξεργασίες, που εφαρμόστηκαν στα ως τώρα διαθέσιμα ιστορικά υδρολογικά και μετεωρολογικά δεδομένα, αφορούσαν στην εκτίμηση των βροχοπτώσεων και εξατμίσεων στις επιφάνειες των ταμιευτήρων, καθώς και στις λεκάνες απορροής του συστήματος. Ακόμη, αφορούσαν στην εξαγωγή της χρονοσειράς των παροχών στη θέση Άγιος Δημήτριος του Ευήνου με βάση τα διαθέσιμα υδρομετρικά δεδομένα. Τέλος, εκπονήθηκαν τα ισοζύγια των ταμιευτήρων με στόχο την εκτίμηση των εισροών (Μαραθώνας, Μόρνος) ή των υπόγειων διαφυγών (Υλίκη).

3.3.1 Επεξεργασία βροχομετρικών δεδομένων

Για τις ανάγκες του έργου συλλέχθηκαν μηνιαία δείγματα βροχόπτωσης από 24 σταθμούς της Στερεάς Ελλάδας, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν αφενός για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης στους ταμιευτήρες και τις λεκάνες απορροής του υδροσυστήματος της Αθήνας (Μόρνου, Ευήνου, Υλίκης

και Μαραθώνα) και αφετέρου για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης στον Άνω, Μέσο και Κάτω Ρου του Βοιωτικού Κηφισού. Για τους περισσότερους βροχομετρικούς σταθμούς πραγματοποιήθηκε έλεγχος ομογένειας και εντοπίστηκαν έτσι οι προβληματικοί σταθμοί που δεν χρησιμοποιήθηκαν στην περαιτέρω ανάλυση. Στη συνέχεια έγιναν συμπληρώσεις στις χρονοσειρές με ελλείπουσες τιμές. Τέλος, υπολογίστηκαν οι επιφανειακές βροχοπτώσεις στους ταμιευτήρες και τις λεκάνες απορροής ανάντη των φραγμάτων, καθώς και στις υπολεκάνες του Β. Κηφισού.

3.3.2 Εκτίμηση απωλειών ταμιευτήρων λόγω εξάτμισης

Οι απώλειες λόγω εξάτμισης αποτελούν μία από τις συνιστώσες ισοζυγίου των ταμιευτήρων. Από τις ποικίλες μεθοδολογίες που απαντώνται στη βιβλιογραφία, η μέθοδος του Penman θεωρείται παγκοσμίως ως η πλέον τεκμηριωμένη για την εκτίμηση της εξάτμισης και είναι αυτή η οποία εφαρμόστηκε για την εκτίμηση των εξατμίσεων από τους 4 ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Για την εφαρμογή της απαιτούνται μετρήσεις μέσης θερμοκρασίας αέρα, μέσης σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνειας και μέσης ταχύτητας ανέμου στην περιοχή των ταμιευτήρων. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκαν οι μετεωρολογικοί σταθμοί που βρίσκονται σχετικά κοντά στους ταμιευτήρες και επιλέχθηκαν για να χρησιμοποιηθούν εκείνοι που ήταν πιο αξιόπιστοι.

Για τη συμπλήρωση και επέκταση των δειγμάτων εξάτμισης, οι οποίες υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Penman εφαρμόστηκαν και συγκρίθηκαν δύο εμπειρικές μεθοδολογίες. Η πρώτη συνίσταται στην κατασκευή του διαγράμματος εξάτμισης-θερμοκρασίας σε μέση μηνιαία κλίμακα (βρόχος εξάτμισης) και η επέκταση του δείγματος εξάτμισης βάσει μόνο των δεδομένων θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας τον άνω κλάδο του βρόχου για τους εαρινούς και τον κάτω για τους φθινοπωρινούς μήνες. Η δεύτερη μεθοδολογία στηρίζεται στην εφαρμογή παραμετρικής εμπειρικής σχέσης που συνδέει την εξάτμιση με την εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία, και την θερμοκρασία. Η ανάλυση έδειξε ότι η δεύτερη μεθοδολογία είναι πιο αξιόπιστη για τη συμπλήρωση και επέκταση των εξατμίσεων από την επιφάνεια των ταμιευτήρων, βάσει μετρήσεων μόνο της θερμοκρασίας.

3.3.3 Κατάρτιση μηνιαίων ισοζυγίων ταμιευτήρων

Η φυσική τροφοδοσία των ταμιευτήρων προέρχεται, κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της, από την απορροή της ανάντη υπολεκάνης, ενώ ένα μικρό ποσοστό της οφείλεται στη βροχόπτωση στην επιφάνεια των ταμιευτήρων. Η απορροή της λεκάνης διοχετεύεται στον ταμιευτήρα μέσω των υδατορευμάτων που καταλήγουν σε αυτόν. Η εκτίμηση των εισροών λόγω απορροής γίνεται άμεσα ή έμμεσα. Η πρώτη μέθοδος συνίσταται στη χρονική ολοκλήρωση της υδρομετρικής πληροφορίας ανάντη του ταμιευτήρα (εφόσον αυτή υφίσταται), με χρήση εξισώσεων στάθμης-παροχής. Η δεύτερη μέθοδος εκτίμησης των εισροών βασίζεται στην κατάρτιση χρονοσειρών υδατικού ισοζυγίου που περιλαμβάνουν το απόθεμα του ταμιευτήρα, το σύνολο των πάσης φύσεως εισροών (λόγω απορροής, βροχόπτωσης και τροφοδοσίας από ανάντη υδραγωγεία) και το σύνολο των πάσης φύσεως εκροών (απολήψεων και απωλειών λόγω εξάτμισης, υπερχειλίσης και υπόγειων διαφυγών). Εφόσον διατίθενται μετρήσεις ή εκτιμήσεις ως προς τους λοιπούς όρους μιας εξίσωσης ισοζυγίου, είναι δυνατή η εκτίμηση μίας άγνωστης συνιστώσας. Για τους ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, η άγνωστη συνιστώσα ισοζυγίου αναφέρεται είτε στην απορροή της ανάντη λεκάνης (ταμιευτήρες Μόρνου και Μαραθώνα) είτε στις υπόγειες διαφυγές (λίμνη Υλίκη).

Ταμιευτήρας Μόρνου

Προ της κατασκευής του φράγματος διατίθεται περιορισμένο δείγμα παροχών, το οποίο έχει προκύψει με αναγωγή υδρομετρικών δεδομένων μειωμένης αξιοπιστίας στις θέσεις Στενό και Περιβόλι (Αλεξοπούλου κ.ά., 1992). Από τη λειτουργία του φράγματος και έπειτα, η απορροή εκτιμήθηκε βάσει των στοιχείων ισοζυγίου του ταμιευτήρα. Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο ισοζύγιο είναι: Απόθεμα ταμιευτήρα, εκροές από τη σήραγγα Γκιόνας, απώλειες και μη μετρημένες εκροές στη

σήραγγα Γκιώνας, απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών από τον ταμιευτήρα, βροχόπτωση και απώλειες λόγω εξάτμισης από τον ταμιευτήρα, εισροές από τον Εύηνο.

Με βάση τόσο τα δεδομένα των περιόδων προ της κατασκευής του φράγματος, όσο και τα αποτελέσματα από την επίλυση της εξίσωσης ισοζυγίου, η μέση ετήσια απορροή στον ταμιευτήρα του Μόρνου ανέρχεται σε 273.6 hm³. Αντίθετα, εάν ληφθούν υπόψη μόνο τα δεδομένα από το 1979 και έπειτα, η τιμή αυτή μειώνεται σε 235.5 hm³. Τα μέσα μηνιαία στατιστικά μεγέθη απεικονίζονται στον Πίν. 3.1.

Πίν. 3.1: Στατιστικά μεγέθη απορροής της λεκάνης Μόρνου στη θέση του φράγματος για τις περιόδους 1951-68 και 1979-98 (hm³)

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή ¹	9.9	28.6	44.3	41.2	39.4	34.8	29.9	21.3	11.3	5.9	4.2	4.3	273.6
Τυπ. απόκλ.	12.2	21.9	27.2	32.6	26.5	16.2	10.5	10.1	5.9	3.3	2.9	2.7	101.3
Μέση τιμή ²	7.0	23.5	41.2	31.2	30.5	32.9	27.9	20.4	10.4	5.9	4.4	4.3	235.5
Τυπ. απόκλ.	5.6	15.1	27.1	21.4	17.0	16.0	8.9	8.8	5.1	2.9	3.3	3.0	85.3
Μέγιστο	60.2	93.6	100.0	131.5	127.8	65.8	51.3	44.8	28.4	16.6	12.3	10.9	461.0
Ελάχιστο	0.0	4.8	2.9	4.5	0.9	6.6	9.9	2.4	3.7	1.5	0.0	0.4	82.0

(1) Υπολογισμός με βάση το πλήρες δείγμα

(2) Υπολογισμός με βάση μόνο το δείγμα των περιόδων από το 1979-80 και έπειτα

Ταμιευτήρας Ευήνου

Η εκτίμηση της απορροής του Ευήνου στη θέση του φράγματος πραγματοποιήθηκε με επεξεργασία της διαθέσιμης υδρομετρικής πληροφορίας. Ως σταθμός βάσης επιλέχθηκε ο υδρομετρικός σταθμός Πόρου Ρηγανίου, για τον οποίο καταρτίστηκε συνεχές δείγμα μηνιαίων απορροών για την περίοδο 1970-71 μέχρι 1998-99. Το δείγμα απορροών μεταφέρθηκε στη θέση του φράγματος με μια απλή σχέση αναγωγής η οποία επαληθεύτηκε από τα πρόσφατα δεδομένα των ποσοτήτων που έχουν εκτραπεί από τον Εύηνο προς τον Μόρνο. Τα μηνιαία στατιστικά μεγέθη του δείγματος φαίνονται στον Πίν. 3.2.

Πίν. 3.2: Στατιστικά μεγέθη μηνιαίας απορροής Ευήνου στη θέση του φράγματος για την περίοδο 1970-99 (hm³).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	6.8	28.3	57.2	41.6	46.7	43.5	33.3	19.6	8.2	4.7	3.3	3.2	295.2
Τυπ. απόκλ.	5.6	20.3	38.5	29.4	28.8	23.0	12.1	8.5	3.2	1.5	1.0	1.4	101.9
Μέγιστο	27.1	90.7	167.2	129.2	148.0	104.6	64.8	39.1	18.6	9.3	5.9	8.9	678.3
Ελάχιστο	1.9	4.9	9.3	5.7	4.3	6.4	11.0	5.9	3.2	2.1	1.9	1.3	113.2

Λίμνη Υλίκη

Η τροφοδοσία της Υλίκης οφείλεται κυρίως στην απορροή της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, έκτασης 2036.4 km², μέσω της Συγκεντρωτικής Διώρυγας Καρδίτσας και στη συνέχεια της Σήραγγας Καρδίτσας. Δείγμα πρωτογενών υδρομετρικών δεδομένων στη Διώρυγα Καρδίτσας διατίθεται από το 1896 και είναι το χρονικά μεγαλύτερο στον ελληνικό χώρο. Οι επεξεργασίες των δεδομένων και η κατάρτιση καμπυλών στάθμης-παροχής έχουν γίνει στα πλαίσια προηγούμενων ερευνητικών έργων (Ρώτη κ.ά., 1990· Ρώτη και Ανυφαντή, 1992). Μετά από επικαιροποίηση των δεδομένων, προέκυψε αξιόπιστο δείγμα παροχών από το 1907 μέχρι το 1999 (με ορισμένα κενά κατά διαστήματα όπου δεν λειτούργησε η διώρυγα λόγω επισκευών τα οποία όμως συμπληρώθηκαν). Οι λοιπές εισροές, οι

οποίες προέρχονται από την απορροή της υπολεκάνης Υλίκης, έκτασης 422 km², εκτιμώνται ως το 6% των μηνιαίων εισροών από τη Σήραγγα Καρδίτσας (Ρώτη κ.ά., 1990). Με βάση την παραδοχή αυτή, η μέση ετήσια εισροή στον ταμιευτήρα Υλίκης ανέρχεται σε 412.6 hm³ ή σε 301.4 hm³, με χρήση του δείγματος μόνο των τελευταίων 30 ετών (Πίν. 3.3). Το δείγμα των τελευταίων 30 ετών θεωρείται πιο αντιπροσωπευτικό, καθώς λαμβάνει υπόψη του τη μείωση της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού εξαιτίας των αντλήσεων στην πεδιάδα της Κοπαΐδας.

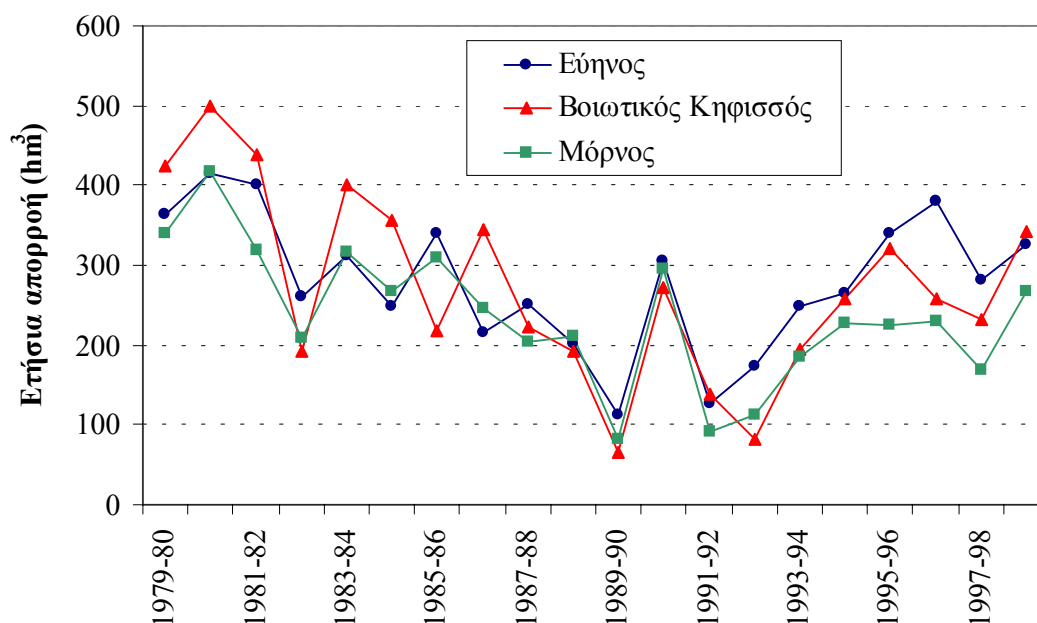
Συγκριτικό διάγραμμα με τη χρονική εξέλιξη της ετήσιας απορροής των λεκανών Μόρνου, Εύηνου και Βοιωτικού Κηφισού δίνεται στο Σχ. 3.2.

Πίν. 3.3: Στατιστικά μεγέθη απορροής λεκανών Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης (hm³).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή ¹	23.3	33.2	49.4	63.6	66.4	70.9	49.1	25.9	12.9	4.4	3.8	13.8	412.6
Τυπ. απόκλ. ¹	11.3	18.6	34.1	32.7	35.6	32.9	28.8	17.2	12.3	7.8	5.5	9.2	167.9
Μέση τιμή ²	16.4	23.6	33.4	48.7	50.2	59.4	40.6	16.9	3.8	0.4	1.0	7.2	301.4
Τυπ. απόκλ. ²	11.4	11.0	13.1	27.6	25.6	29.4	26.1	16.0	5.5	1.1	2.2	7.5	126.0
Μέγιστο	51.3	114.6	217.7	168.4	170.6	179.0	177.1	80.8	61.1	51.4	31.4	58.2	840.7
Ελάχιστο	0.0	7.4	11.0	15.8	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	70.8

(1) Υπολογισμός με βάση το πλήρες δείγμα των περιόδων 1907-99

(2) Υπολογισμός με βάση μόνο το δείγμα των περιόδων από το 1970-71 και έπειτα



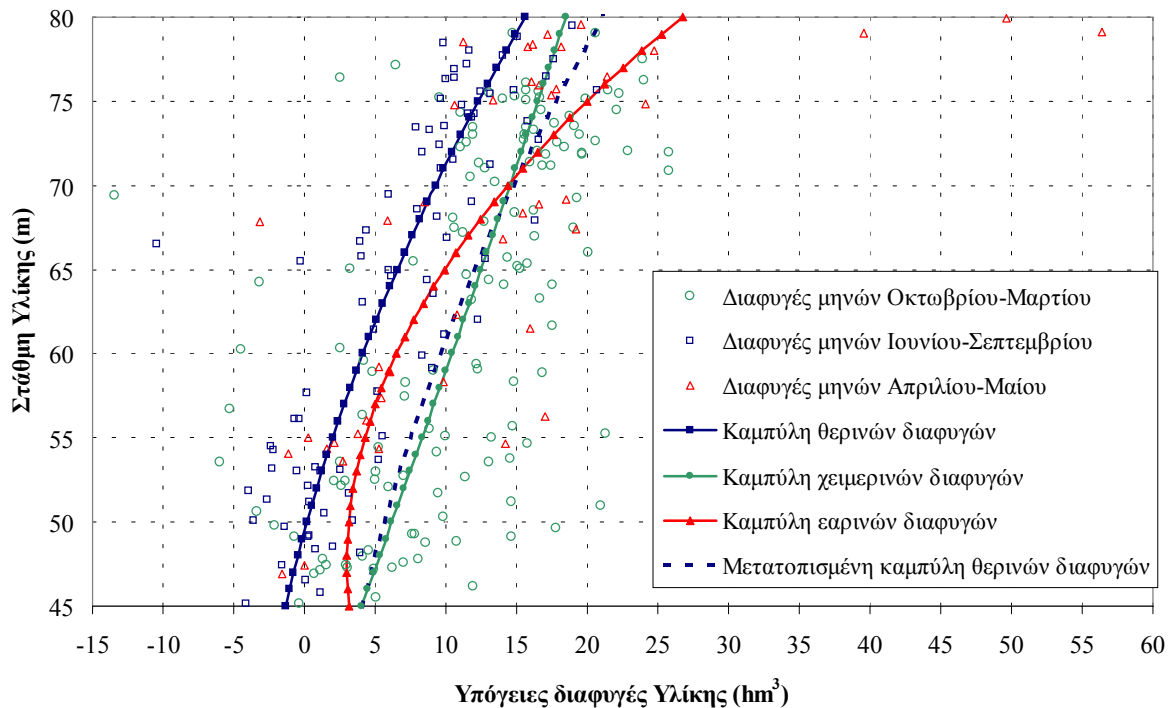
Σχ. 3.2: Χρονοσειρές ετήσιας απορροής λεκανών Μόρνου, Εύηνου και Β. Κηφισού.

Κατάρτιση υδρολογικού ισοζυγίου και χρονοσειράς διαφυγών λίμνης Υλίκης

Εξαιτίας του καρστικού της υποβάθρου, η λίμνη Υλίκη παρουσιάζει πολύ σημαντικές υπόγειες διαφυγές, οι οποίες μπορεί να ανέλθουν και στο 50% των εισροών σε υψηλές στάθμες. Ένα σημαντικό τμήμα των υπόγειων διαφυγών αναβλύζει στα συστήματα των πηγών Ούγγρων και Καμηλόβρυσης. Ο ποσοτικός προσδιορισμός των διαφυγών της Υλίκης γίνεται με εφαρμογή της μηνιαίας εξίσωσης ισοζυγίου (περίοδος 1977-99), η οποία περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες: Απόθεμα ταμιευτήρα, απορροή από τη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού-Υλίκης, αντλήσεις από

Παραλίμνη, απολήψεις για την ύδρευση της Αθήνας, απολήψεις για άρδευση της Κοπαΐδας, υπερχειλίσσεις προς Παραλίμνη, βροχόπτωση στην επιφάνεια της λίμνης, απώλειες λόγω εξάτμισης από τον ταμιευτήρα.

Για την εκτίμηση των καμπυλών στάθμης-διαφυγών της Υλίκης επικαιροποιήθηκε παλιότερη εργασία (Μαμάσης και Ναλμπάντης, 1995) και τελικά η σχέση υπογείων διαφυγών και στάθμης της λίμνης Υλίκης παρουσιάζονται στο Σχ. 3.3.



Σχ. 3.3: Σχέσεις στάθμης-διαφυγών λίμνης Υλίκης.

Ταμιευτήρας Μαραθώνα

Ο ταμιευτήρας Μαραθώνα λειτουργεί από το 1931, ωστόσο μετά την κατασκευή του υδραγωγείου του Μόρνου χρησιμοποιείται μόνο ως έργο εφεδρείας, διατηρώντας ένα απόθεμα ασφαλείας της τάξης των 25-40 hm³. Η ΕΥΔΑΠ έχει καταγράψει τα μηνιαία δεδομένα ισοζυγίου του ταμιευτήρα για τις περιόδους 1931-56 και 1970-89, τα οποία συλλέχθηκαν και αρχειοθετήθηκαν στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου. Με βάση τις επεξεργασίες των δεδομένων ισοζυγίου που συλλέχθηκαν, μόνο τα στοιχεία της περιόδου 1931-56 θεωρούνται αξιοποιήσιμα. Από το έτος 1957, οπότε εισήχθη το υδραγωγείο Υλίκης στο σύστημα ύδρευσης της Αθήνας, είναι αδύνατη η κατάρτιση ενός αξιόπιστου υδατικού ισοζυγίου του Μαραθώνα, αφού υπάρχει σημαντικό και μη συστηματικό σφάλμα στην εκτίμηση του όγκου νερού που διοχετεύεται στη λίμνη μέσω του υδραγωγείου στο Κακοσάλεσι. Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μηνιαίο ισοζύγιο του Μαραθώνα για την περίοδο 1931-56, είναι: Απόθεμα ταμιευτήρα, απώλειες λόγω εξάτμισης, απολήψεις για την ύδρευση της Αθήνας, υπερχειλίσσεις και λοιπές απώλειες, εισροές νερού από τις πηγές Σουλίου, εισροές νερού από το υδραγωγείο Παρνασσού, φυσική τροφοδοσία ταμιευτήρα

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των τελικών δειγμάτων απορροής των λεκανών Χάραδρου και Σταμάτας φαίνονται στον Πίν. 3.4. Η μέση ετήσια απορροή στον ταμιευτήρα Μαραθώνα ανέρχεται σε 13.4 hm³.

Πίν. 3.4: Στατιστικά μεγέθη μηνιαίας απορροής λεκανών Χάραδρου και Σταμάτας στη θέση του φράγματος Μαραθώνα για την περίοδο 1933-98 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	0.5	0.7	1.4	2.5	2.7	2.7	1.3	0.6	0.3	0.2	0.1	0.2	13.4
Τυπ. απόκλ.	0.5	0.8	1.1	2.3	1.9	2.2	0.8	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2	5.0
Μέγιστο	2.3	4.5	4.2	9.2	10.6	14.4	5.0	1.3	2.3	0.4	1.1	1.2	27.1
Ελάχιστο	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3

4 Ανάπτυξη συστημάτων λογισμικού

4.1 Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης

4.1.1 Εισαγωγή

Η αδυναμία περιγραφής των υδρολογικών διεργασιών με χρήση συμβατικών μεθόδων προσδιοριστικής υδρολογικής ανάλυσης οδήγησε στην εναλλακτική θεώρησή τους ως τυχαίων μεταβλητών και την αντιμετώπισή τους με τη θεωρία πιθανοτήτων. Η πιθανοτική θεώρηση μπορεί να δώσει απαντήσεις και ως προς την πρόγνωση των φαινομένων, ποσοτικοποιώντας την αβεβαιότητα γύρω από την εξέλιξή τους.

Η θεωρία των *στοχαστικών ανελίξεων* έχει αποδειχθεί διεθνώς ως μία από τις πληρέστερες μεθόδους περιγραφής των υδρολογικών διεργασιών. Βάσει αυτής έχει αναπτυχθεί ένα ευρύ φάσμα μοντέλων *στοχαστικής προσομοίωσης*, με τα οποία περιγράφεται μαθηματικά η χωρική και χρονική αλληλεξάρτηση των υδρολογικών μεταβλητών. Η χωρική εξάρτηση οφείλεται στην κοινή υδρολογική δίαιτα γειτονικών θέσεων ή λεκανών, ενώ η χρονική εξάρτηση οφείλεται στη διαπιστωμένη εμμονή όλων των υδρολογικών (και γενικότερα των γεωφυσικών) διεργασιών. Οι παράμετροι κάθε τέτοιου μοντέλου εκτιμώνται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών του ιστορικού δείγματος και κατά συνέπεια είναι άμεσα εξαρτημένες από την ποσότητα και ποιότητα της διατιθέμενης υδρολογικής πληροφορίας.

Τα στοχαστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τη γέννηση μεγάλου μήκους *συνθετικών χρονοσειρών*, οι οποίες αναπαράγουν τη στατιστική δομή και τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δεδομένων. Η χρήση συνθετικών χρονοσειρών κρίνεται απόλυτα αναγκαία για τον ορθολογικό σχεδιασμό και διαχείριση ενός συστήματος υδατικών πόρων, αφού με τον τρόπο αυτό:

- δεν τίθενται περιορισμοί ως προς το χρονικό ορίζοντα μελέτης, εφόσον δεν χρησιμοποιείται το ίδιο το ιστορικό δείγμα (το οποίο κατά κανόνα έχει μικρό μήκος), αλλά τα στατιστικά χαρακτηριστικά του·
- είναι εφικτή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων ως προς την αξιοπιστία του συστήματος για οσοδήποτε μικρή τιμή της αποδεκτής πιθανότητας αστοχίας (π.χ. 1%)·
- διερευνάται η απόκριση του συστήματος για ευρύ φάσμα ισοπίθανων υδροκλιματικών σεναρίων.

Η στοχαστική προσομοίωση εφαρμόζεται είτε με τυχαίες αρχικές συνθήκες είτε με αναφορά στις επίκαιρες τιμές των υδρολογικών μεταβλητών. Η δεύτερη περίπτωση προϋποθέτει τη διατύπωση του στοχαστικού μοντέλου υπό μορφή *πρόγνωσης*, η οποία αποσκοπεί στη μελέτη του υδροσυστήματος για σχετικά βραχύ χρονικό ορίζοντα.

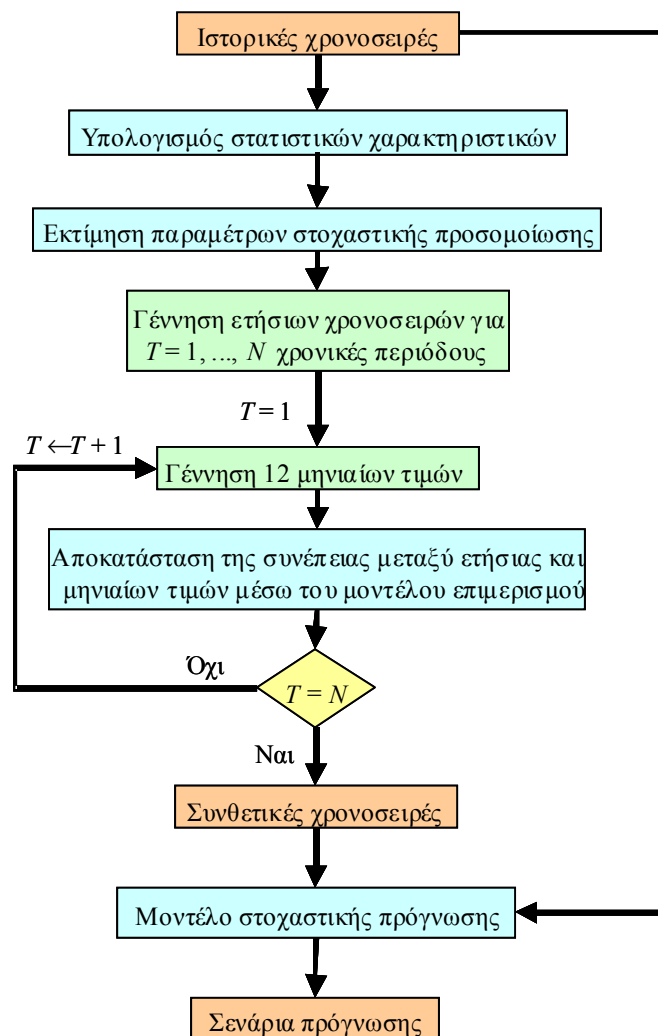
4.1.2 Συνοπτική περιγραφή του σχήματος προσομοίωσης

Για τη στοχαστική προσομοίωση των υδρολογικών μεταβλητών υιοθετήθηκε ένα συνδυαστικό σχήμα πολλών μεταβλητών και δύο διαδοχικών χρονικών επιπέδων ή φάσεων. Κάθε μεταβλητή αναφέρεται είτε σε διαφορετικές διεργασίες (π.χ. βροχή και απορροή) είτε στη ίδια διεργασία, η οποία πραγματοποιείται σε διαφορετικές θέσεις (απορροή Μόρνου και Ευήνου). Με την πολυμεταβλητή ανάλυση επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών του

υδροσυστήματος, οι οποίες συσχετίζονται εξαιτίας της κοινής υδρολογικής διαίτας της ευρύτερης περιοχής της Στερεάς Ελλάδας.

Το πρώτο επίπεδο (υψηλό επίπεδο) αναφέρεται σε χρονοσειρές αραϊής χρονικής κλίμακας, ενώ το δεύτερο επίπεδο (χαμηλό επίπεδο) αναφέρεται σε πυκνότερη χρονική κλίμακα. Ως υψηλή χρονική κλίμακα επιλέγεται η ετήσια, για την οποία οι χρονοσειρές παρουσιάζουν *στάσιμο* (stationary) χαρακτήρα. Η επιλογή της χαμηλότερης κλίμακας εξαρτάται από το είδος του προβλήματος που εξετάζεται. Κατά κανόνα, σε προβλήματα στρατηγικής διαχείρισης υδατικών πόρων, όπως αυτό που αντιμετωπίζεται εδώ, θεωρείται επαρκής η χρήση μηνιαίου βήματος. Η ανάλυση δύο χρονικών επιπέδων επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών μοντέλων για την προσομοίωση των ετήσιων και μηνιαίων υδρολογικών διεργασιών, με στόχο την ακριβέστερη περιγραφή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, τα οποία είναι η *εμμονή* και η *περιοδικότητα* αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, για τις ετήσιες χρονοσειρές εισάγεται μια γενικευμένη συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς, στην οποία προσαρμόζεται ένα καινοτομικό σχήμα συμμετρικών κινούμενων μέσων όρων, ενώ για τις μηνιαίες χρονοσειρές υιοθετείται ένα μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης.

Το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου στοχαστικής προσομοίωσης απεικονίζεται στο Σχ. 4.1.



Σχ. 4.1: Διάγραμμα ροής του μεθοδολογικού σχήματος στοχαστικής προσομοίωσης-πρόγνωσης.

Αρχικά υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ιστορικού δείγματος και βάσει αυτών εκτιμώνται οι παράμετροι του ετήσιου και του μηνιαίου μοντέλου αντίστοιχα. Στη συνέχεια παράγονται οι ετήσιες χρονοσειρές, για όλο το μήκος της περιόδου προσομοίωσης. Η γέννηση των

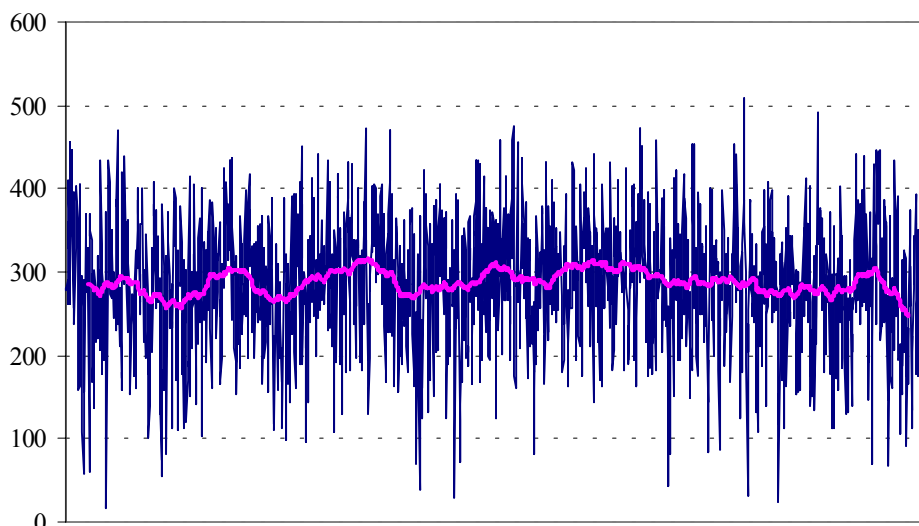
μηνιαίων χρονοσειρών πραγματοποιείται βήμα προς βήμα. Για κάθε έτος, παράγονται 12 μηνιαίες τιμές χωρίς αναφορά στη γνωστή ετήσια τιμή και ακολούθως καλείται το μοντέλο *επιμερισμού* (disaggregation) που εφαρμόζει μια διαδικασία αναγωγής, με την οποία εξασφαλίζεται η συμβατότητα μεταξύ των χρονοσειρών των δύο επιπέδων. Εφόσον απαιτείται η παραγωγή σεναρίων στοχαστικής πρόγνωσης, καλείται το αντίστοιχο μοντέλο, στοιχεία εισόδου του οποίου είναι τόσο οι συνθετικές όσο και οι ιστορικές χρονοσειρές.

4.1.3 Προσομοίωση της εμμονής

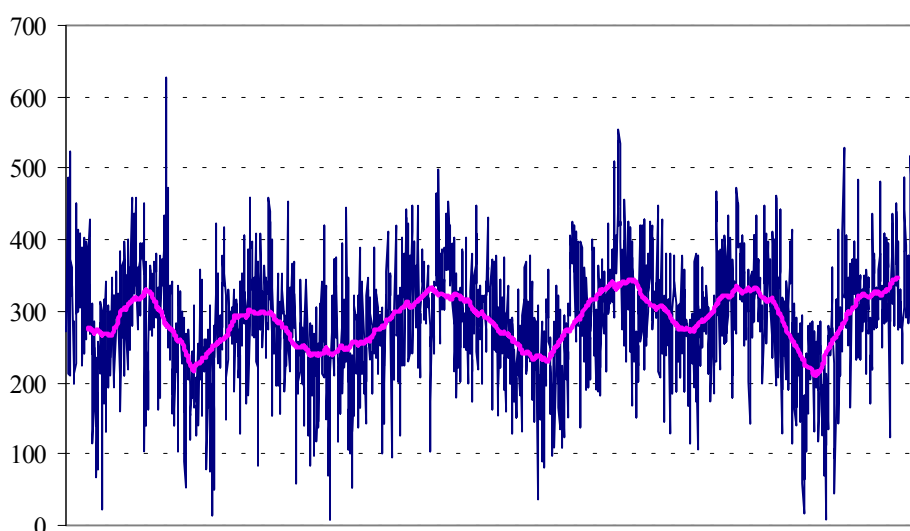
Η υδρολογική εμμονή, γνωστή και ως φαινόμενο Hurst ή φαινόμενο Ιωσήφ, αναφέρεται στην φυσική τάση ομαδοποίησης των περιόδων χαμηλής υδροφορίας και των περιόδων υψηλής υδροφορίας αντίστοιχα (Hurst, 1951). Με την εμμονή σχετίζονται οι παρατεταμένες ξηρασίες και οι πάσης φύσεως κλιματικές διακυμάνσεις, οι οποίες εμφανίζονται ως ακανόνιστες διαταραχές στα μέσα στατιστικά χαρακτηριστικά των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών, σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Η εμμονή αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τον ορθολογικό σχεδιασμό και διαχείριση συστημάτων υδραυλικών έργων (Bras and Rodriguez-Iturbe, 1993). Ωστόσο, τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται στα πλέον διαδεδομένα προγράμματα επιχειρησιακής υδρολογίας, είναι βραχείας μνήμης και κατά συνέπεια δεν ενδείκνυνται για την προσομοίωση της μακροπρόθεσμης εμμονής

Για την προσομοίωση των ξηρασιών ακολουθούνται διεθνώς δύο ειδών προσεγγίσεις. Η πρώτη συνίσταται στη μαθηματική περιγραφή του φαινομένου της εμμονής και την εισαγωγή του στα στοχαστικά μοντέλα ως παραμέτρου (*συντελεστής Hurst*), της οποίας ο ορισμός και ο τρόπος εκτίμησης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος. Μοντέλα προσομοίωσης της εμμονής έχουν αναπτυχθεί από τους Mandelbrot (1965), Mandelbrot and Wallis (1969), Mejia et al. (1972) και άλλους. Η δεύτερη προσέγγιση συνίσταται στην υιοθέτηση απλούστερων σχημάτων στοχαστικής προσομοίωσης, με τεχνητή επέμβαση στις στατιστικές τους παραμέτρους (π.χ. μείωση της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης ή απορροής). Κατά κανόνα, οι τιμές των παραμέτρων προκύπτουν μετά από διερεύνηση υποθετικών σεναρίων κλιματικής αλλαγής, όπως αυτά προκύπτουν από μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία περιγράφουν τις φυσικές διεργασίες που σχετίζονται με το κλίμα και τον υδρολογικό κύκλο. Η προσέγγιση αυτή είναι λιγότερο αξιόπιστη τόσο επειδή βασίζεται σε αυθαίρετες υποθέσεις όσο και εξαιτίας του χαμηλού βαθμού επαλήθευσης των κλιματικών μοντέλων.

Στην παρούσα εργασία, υιοθετήθηκε μια πρωτότυπη προσέγγιση (Koutsoyiannis, 2000), η οποία μπορεί να αναπαράγει ετήσιες χρονοσειρές με εμμονή (βλ. Σχ. 4.3) ή όχι (βλ. Σχ. 4.2). Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μια γενικευμένη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, στην εισάγονται παράμετροι που χαρακτηρίζουν την εμμονή. Η συνάρτηση παρουσιάζει τη χαρακτηριστική μορφή ουράς, η οποία αντιπροσωπεύει τη μακροπρόθεσμη εμμονή των υδρολογικών διεργασιών.



Σχ. 4.2: Συνθετική χρονοσειρά ετήσιας απορροής 2000 ετών στον ταμιευτήρα Ευήνου (σε hm^3) και κινούμενοι μέσοι όροι 100 ετών – Ευμενές υδρολογικό σενάριο (χωρίς μακροπρόθεσμη εμμονή).



Σχ. 4.3: Συνθετική χρονοσειρά ετήσιας απορροής 2000 ετών στον ταμιευτήρα Ευήνου (σε hm^3) και κινούμενοι μέσοι όροι 100 ετών – Δυσμενές υδρολογικό σενάριο (με μακροπρόθεσμη εμμονή).

4.1.4 Σχεδιασμός υπολογιστικού συστήματος

Οι διάφορες μεθοδολογίες στοχαστικής προσομοίωσης (αναλυτικά περιγράφονται στο Τεύχος 9), υλοποιήθηκαν σε ένα ενιαίο λογισμικό πακέτο, με την ονομασία *Κασταλία*. Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του υπολογιστικού συστήματος έγιναν με βάση τις προδιαγραφές, που ορίστηκαν στην ανάλυση απαιτήσεων (Τεύχος 1).

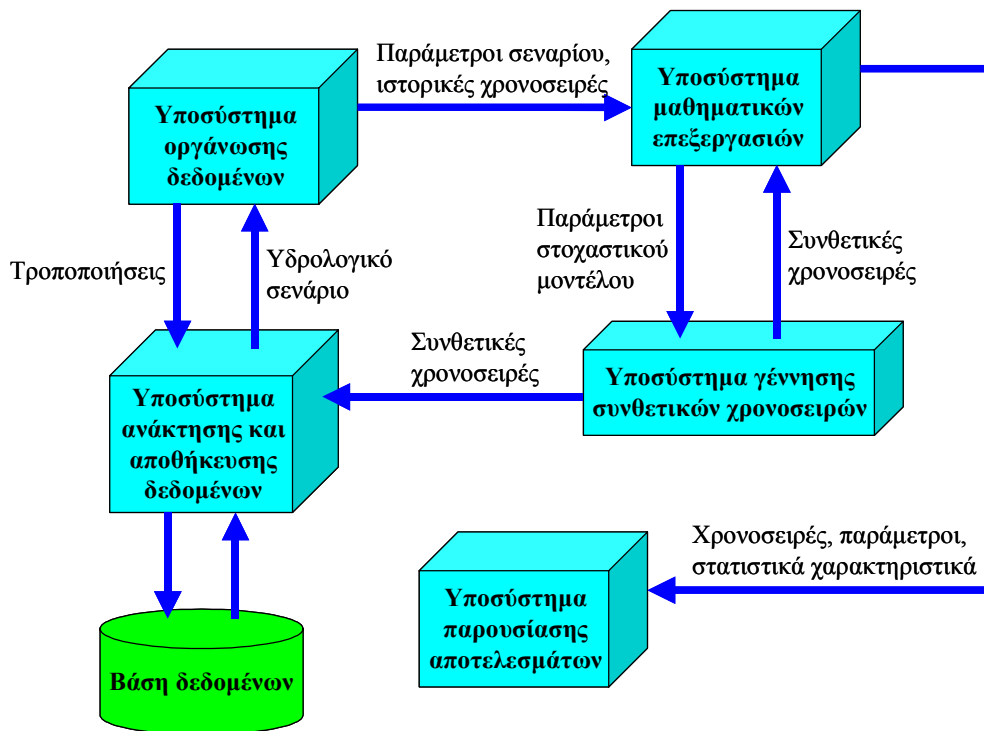
Οι λειτουργίες που επιτελεί το πρόγραμμα είναι:

- 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 *Κασταλία* λειτουργεί ως αυτόνομο πρόγραμμα σε περιβάλλον Windows. Η ανάπτυξη του λογισμικού έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Object Pascal/Delphi, Στην παρούσα (μη επιχειρησιακή) έκδοση του συστήματος δεν υπάρχει σύνδεση με τα υπόλοιπα υποσυστήματα του έργου, η οποία προβλέπεται να υλοποιηθεί μέσω της κεντρικής βάσης δεδομένων κατά τη δεύτερη Φάση. Ακόμη στην *Κασταλία* διατίθενται αναλυτικές οδηγίες χρήσης σε ηλεκτρονική μορφή.

Στο Σχ. 4.4 απεικονίζονται η αρχιτεκτονική δομή και οι συνιστώσες (υποσυστήματα) του προγράμματος. Η *Κασταλία* υποστηρίζεται από μια τοπική βάση δεδομένων, η οποία στην παρούσα έκδοση είναι ανεξάρτητη από την Κεντρική Βάση Δεδομένων του έργου. Στην επόμενη έκδοση του προγράμματος, κατά την οποία προβλέπεται η επιχειρησιακή λειτουργία του, η τοπική βάση θα ενσωματωθεί στην κεντρική. Το πρόγραμμα αποτελείται από 5 υποσυστήματα, οι λειτουργίες των οποίων περιγράφονται στη συνέχεια του υποκεφαλαίου.



Σχ. 4.4: Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός και υποσυστήματα Κασταλίας..

Σε μια τυπική *σύννοδο* (session), ο χρήστης είτε επιλέγει ένα υφιστάμενο υδρολογικό σενάριο είτε δημιουργεί ένα νέο σενάριο. Από τη 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 με στόχο την εκτίμηση των παραμέτρων των στοχαστικών μοντέλων. Στη συνέχεια ο χρήστης μπορεί να ζητήσει τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών και να οπτικοποιήσει τα δεδομένα και τα στατιστικά τους χαρακτηριστικά, μέσω του υποσυστήματος παρουσίασης αποτελεσμάτων. Μετά το πέρας της συνόδου, όλες οι πληροφορίες μπορούν να αποθηκευτούν στη βάση δεδομένων,

ώστε να είναι διαθέσιμες μεταγενέστερα. Σημειώνεται ότι ο χρήστης δεν χρειάζεται να επεμβαίνει στην ίδια τη βάση, αφού όλες οι τροποποιήσεις πραγματοποιούνται μέσω του προγράμματος.

Μέσω του **υποσυστήματος ανάκτησης και αποθήκευσης**, εξασφαλίζεται η επικοινωνία του προγράμματος με τη βάση δεδομένων. Μετά την εκκίνηση κάθε συνόδου, ανακτώνται όλες οι απαιτούμενες πληροφορίες από τη βάση, δηλαδή οι παράμετροι του υδρολογικού σεναρίου και των μεταβλητών του, καθώς και οι ιστορικές χρονοσειρές, οι οποίες μεταφέρονται στην εσωτερική μνήμη του προγράμματος. Καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης της συνόδου, το σύνολο των υπολογιστικών διαδικασιών, που αφορούν ανάγνωση και τροποποίηση δεδομένων, πραγματοποιούνται στη μνήμη του προγράμματος, το οποίο καθίσταται ανεξάρτητο από τη βάση. Μετά το πέρας της συνόδου, τα τροποποιημένα δεδομένα του υδρολογικού σεναρίου (π.χ. οι συνθετικές χρονοσειρές), μπορούν να αποθηκευτούν στη βάση μέσω μιας αντίστροφης διαδικασίας.

Το **υποσύστημα οργάνωσης δεδομένων**, το οποίο αποτελεί το μέσο επικοινωνίας του προγράμματος με τον χρήστη, επιτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Επιλογή υφιστάμενου υδρολογικού σεναρίου ή ορισμός νέου σεναρίου.
- Ορισμός ή τροποποίηση παραμέτρων υδρολογικού σεναρίου.
- Ορισμός ή τροποποίηση παραμέτρων υδρολογικών μεταβλητών.

Όλες οι επεμβάσεις του χρήστη ελέγχονται, έτσι ώστε να εμποδίζεται η εισαγωγή μη συμβατών δεδομένων και να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του προγράμματος. Ο έλεγχος περιλαμβάνει δύο στάδια: **(α)** έλεγχο συμβατότητας του τύπου των εισαγόμενων στοιχείων και **(β)** έλεγχο αριθμητικών ορίων.

Το **υποσύστημα μαθηματικών επεξεργασιών** επιτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Υπολογισμός στατιστικών χαρακτηριστικών ιστορικού δείγματος.
- Εκτίμηση παραμέτρων στοχαστικών μοντέλων.
- Υπολογισμός στατιστικών χαρακτηριστικών συνθετικών χρονοσειρών.

Η **γέννηση συνθετικών χρονοσειρών** ετήσιου και μηνιαίου χρονικού βήματος συνιστά την κύρια λειτουργία του προγράμματος. Οι χρονοσειρές, οι οποίες αναφέρονται σε μία ή περισσότερες θέσεις, παράγονται ανά ομάδες ίσου μήκους. Κάθε ομάδα διαφοροποιείται ως προς τις τιμές της τυχαματικής συνιστώσας του στοχαστικού σχήματος γέννησης.

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ δύο τρόπων γέννησης χρονοσειρών: **(α)** προσομοίωση μόνιμης κατάστασης ή **(β)** πρόγνωση με δεδομένες αρχικές συνθήκες. Η πρώτη περίπτωση συνίσταται στην παραγωγή χρονοσειρών, οι οποίες δεν είναι συνεπείς με τα επίκαιρα και παρελθόντα δεδομένα. Αντίθετα, η δεύτερη περίπτωση συνίσταται στην αναγωγή των ετήσιων και μηνιαίων χρονοσειρών μέσω του μοντέλου πρόγνωσης, έτσι ώστε οι συνθετικές τιμές που αντιστοιχούν στα παρελθόντα έτη και μήνες να ταυτίζονται με τα πραγματικά δεδομένα.

Το **υποσύστημα παρουσίασης αποτελεσμάτων** περιλαμβάνει την οπτικοποίηση υπό μορφή πινάκων και γραφημάτων των δεδομένων που ανακτώνται από τη βάση και τα αποτελεσμάτων των πάσης φύσεως επεξεργασιών. Συγκεκριμένα, υπό μορφή πινάκων, παρουσιάζονται:

- οι τιμές των ιστορικών και οι συνθετικών χρονοσειρών,
- τα στατιστικά μεγέθη των ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών,
- οι παράμετροι των στοχαστικών μοντέλων για τις ετήσιες και μηνιαίες μεταβλητές,
- τα στατιστικά μεγέθη των τυχαίων όρων των ετήσιων και μηνιαίων μεταβλητών,

Υπό μορφή γραφημάτων απεικονίζονται:

- τα ετήσια και μηνιαία στατιστικά χαρακτηριστικά του ιστορικού δείγματος και των συνθετικών χρονοσειρών (μέσες τιμές, τυπικές αποκλίσεις, συντελεστές ασυμμετρίας, συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης, συντελεστές ετεροσυσχέτισης μηδενικής τάξης),
- το αυτοσυσχετόγραμμα, πραγματικό και θεωρητικό, του ετήσιου ιστορικού δείγματος και των συνθετικών χρονοσειρών,
- το φάσμα ισχύος του ετήσιου ιστορικού δείγματος,
- οι ετήσιες και μηνιαίες χρονοσειρές του ιστορικού δείγματος και των συνθετικών χρονοσειρών.

4.2 Σύστημα προσομοίωσης υδρολογικού κύκλου Β. Κηφισού-Υλίκης

Σε συνθήκες αυξημένης ζήτησης νερού, σε συνθήκες έμμονης ξηρασίας ή και σε περιπτώσεις βλάβης σε ένα υδραγωγείο, αναμένεται να γίνονται σημαντικές απολήψεις από τους υπόγειους υδροφορείς του υδροσυστήματος, οι οποίοι θεωρούνται, γενικά, εφεδρικές πηγές (ΕΥΔΑΠ, 1996). Οι ομάδες των γεωτρήσεων που, σήμερα, η ΕΥΔΑΠ θεωρεί ότι θα πρέπει να διατηρούνται σε εφεδρεία είναι οι ακόλουθες τέσσερις: Μαυροσουβάλας, Ούγγρων και Παραλίμνης, Αυλώνα, και Βασιλικών-Παρορίου. Από αυτές, οι γεωτρήσεις της τελευταίας ομάδας αντλούν νερό από τον πιο σημαντικό και εκτεταμένο υδροφορέα του υδροσυστήματος που είναι αυτός της λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού. Για το λόγο αυτό, η δυναμική πληροφορία σχετικά με τα αποθέματα υπόγειου νερού στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του συστήματος υποστήριξης της διαχείρισης του συστήματος. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου ένα υπολογιστικό σύστημα για την προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού με έμφαση στην προσομοίωση των υπόγειων νερών. Βέβαια, για τα σημερινά επίπεδα ζήτησης νερού και με απρόσκοπτη λειτουργία των εξωτερικών υδραγωγείων, τα υπόγεια νερά του Βοιωτικού Κηφισού παραμένουν ως εφεδρική πηγή. Σε ότι αφορά τη λεκάνη της Υλίκης, οι γεωτρήσεις που έχουν διανοιχθεί στην περίμετρο της λίμνης κατά την τελευταία περίοδο λειψυδρίας θεωρείται ότι αντλούν ουσιαστικά νερό από τη λίμνη (μειώνοντας τα αποθέματά της) και, κατά συνέπεια, δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την ύδρευση της Αθήνας. Γι' αυτό και στην παρούσα πρώτη φάση του ερευνητικού έργου, τα υπόγεια νερά της λεκάνης της Υλίκης δεν διερευνήθηκαν.

4.2.1 Επιλογή μοντέλου – πακέτο MODFLOW

Τα κριτήρια που τέθηκαν για την επιλογή του μοντέλου κατάλληλου για την προσομοίωση των υπόγειων νερών του Βοιωτικού Κηφισού ήταν τα ακόλουθα:

1. Η συμμόρφωση με την ανάλυση απαιτήσεων (Τεύχος 1) σε ότι αφορά στις απαιτήσεις σε δεδομένα, εξαγόμενα και τη θεωρητική τεκμηρίωση.
2. Η θεώρηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του φυσικού συστήματος: **(α)** οι υδροφορείς είναι καρστικοί με γεωμετρία αγωγών άγνωστη, και **(β)** οι υπόγειοι αγωγοί είναι πολλοί και μικροί στην κλίμακα του πεδίου ροής (λεκάνη έκτασης της τάξης των 2000 km²).
3. Ο σοβαρός περιορισμός στο κόστος του έργου (για το συγκεκριμένο σύστημα) και στο χρόνο εκτέλεσής του.

Με όλους τους παραπάνω περιορισμούς, η διεθνής και η ελληνική εμπειρία μας οδήγησαν μονοσήμαντα στην προσέγγιση του Ισοδύναμου Πορώδους Μέσου (Equivalent Porous Medium, ή, σε συντομογραφία, EPM) και τον τυπικό εκπρόσωπό της, το μοντέλο MODFLOW της Αμερικανικής Υπηρεσίας U.S. Geological Survey (USGS). Για την υλοποίηση του μοντέλου αυτού (υπολογιστικό σύστημα ΣΥΒΟΙΚ) επελέγη το έτοιμο πακέτο GMS (Groundwater Modeling System) του Αμερικανικού Υπουργείου Άμυνας.

Απαιτήσεις σε εξαγόμενα

Στο τέλος κάθε κύκλου προσομοίωσης, το μοντέλο πρέπει να δίνει τα ακόλουθα εξαγόμενα:

- ◆ Τη διακύμανση της μηνιαίας απορροής των πηγών εκφόρτισης του καρστικού συστήματος του Βοιωτικού Κηφισού.
- ◆ Τη διακύμανση των μηνιαίων συνολικών ρυθμιστικών αποθεμάτων υπόγειου νερού στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.
- ◆ Τη χωροχρονική διακύμανση του υδραυλικού φορτίου.
- ◆ Τη χωροχρονική διακύμανση της απόλυτης στάθμης του υπόγειου ορίζοντα.
- ◆ Τη χωροχρονική διακύμανση της παροχής του υπόγειου νερού.
- ◆ Τη χωροχρονική διακύμανση της κατεύθυνσης ροής του υπόγειου νερού.
- ◆ Τη χωροχρονική διακύμανση της καθαρής επαναφόρτισης.

Ακόμη, το σύστημα πρέπει να δίνει για κάθε αρχή του μήνα και το σύνολο των διαθέσιμων, κάθε φορά, δεδομένων εισόδου.

Απαιτούμενα δεδομένα

Τα γεωγραφικά δεδομένα, στα οποία έγιναν επεξεργασίες, παρουσιάζονται στη συνέχεια:

1. Επιφανειακή εμφάνιση κύριων γεωλογικών σχηματισμών.
2. Υδραυλικές ιδιότητες υδροφορέων.
3. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους.
4. Επιφανειακός υδροκρίτης.
5. Θέση σημείων ύδατος (ποταμοί, λίμνες πηγές, γεωτρήσεις).
6. Αρδευόμενες εκτάσεις.

Σε ότι αφορά στη βροχόπτωση, μετά τη συλλογή, αξιολόγηση και επεξεργασία των δεδομένων σημειακής βροχόπτωσης υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα σε 17 βροχομετρικούς σταθμούς. Σχετικά με την παροχή του Βοιωτικού Κηφισού, έχουν γίνει στο παρελθόν υδρομετρήσεις από το ΙΓΜΕ (Παγούνης, 1994) σε 11 σημεία του ποταμού για τα έτη 1983-1994. Για τις μεγάλες πηγές της περιοχής μελέτης διατίθενται μετρήσεις παροχής την περίοδο 1981-95 (Παγούνης, 1994). Από την ΕΥΔΑΠ μας διατέθηκαν δεδομένα στάθμης υπόγειου νερού από μετρήσεις που διενεργεί συστηματικά για λογαριασμό της ΕΥΔΑΠ το ΙΓΜΕ σε 42 σημεία της ευρύτερης λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης.

Οι αρδευτικές ανάγκες στην πλειονότητα των περιπτώσεων καλύπτονται από γεωτρήσεις. Η καταγραφή, όμως, των γεωτρήσεων αυτών, καθώς και του ημερολόγιου λειτουργίας τους δεν είναι δυνατή. Γι' αυτό, στα πλαίσια αυτού του ερευνητικού έργου, οι πραγματικές γεωτρήσεις κάθε περιοχής αντικαθίστανται από εικονικές γεωτρήσεις ισοδύναμης λειτουργίας. Στην περιοχή μελέτης υφίστανται τέσσερις Τοπικοί Οργανισμοί Εγγείων Βελτιώσεων (ΤΟΕΒ). Εκτός από τους οργανισμούς αυτούς καλλιεργήσιμες εκτάσεις υπάρχουν και σε πεδινές περιοχές γύρω από διάφορους οικισμούς (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2000β).

4.2.2 Βαθμονόμηση μοντέλου - Παραδοχές

Γενικά

Κατά τη διάρκεια της κατάρτισης του μοντέλου, στο παρόν ερευνητικό έργο, είχε ολοκληρωθεί η «Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης» (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2000α). Στη μελέτη εκείνη καταρτίστηκε υδρογεωλογικό μοντέλο του καρστικού συστήματος της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού βασισμένο στο υπολογιστικό μοντέλο MODFLOW, το οποίο ενσωμάτωσε, σε μεγάλο βαθμό, την παλιότερη, από υδρογεωλογική άποψη, γνώση της περιοχής μελέτης (από μελέτες κυρίως του ΙΓΜΕ).

Τα χαρακτηριστικά αυτού του μοντέλου ικανοποιούν σε γενικές γραμμές τις απαιτήσεις του παρόντος ερευνητικού έργου (με εξαίρεση τον αρκετά μεγάλο χρόνο που απαιτεί η επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου). Με τα παραπάνω δεδομένα και με σύμφωνη γνώμη της ΕΥΔΑΠ, αποφασίστηκε να αξιοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό το υπάρχον βαθμονομημένο μοντέλο του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α) και να γίνει προσπάθεια προσαρμογής του στις επιχειρησιακές ανάγκες της ΕΥΔΑΠ. Έτσι, διατηρήθηκε ουσιαστικά το βαθμονομημένο μοντέλο της μελέτης του ΥΠΕΧΩΔΕ και δόθηκε βάρος στην προσαρμογή του σε επιχειρησιακό υπολογιστικό περιβάλλον. Στη συνέχεια, περιγράφονται συνοπτικά οι παραδοχές του μοντέλου κατά τη βαθμονόμησή του, ενώ δίνονται και αναλυτικά στοιχεία για την προσαρμογή του σε επιχειρησιακές συνθήκες.

Περιοχή μελέτης

Το μοντέλο καλύπτει το σημαντικότερο μέρος της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, όπως αυτή ορίζεται από τον επιφανειακό υδροκρίτη. Ο ορισμός της περιοχής έγινε με τα ακόλουθα κριτήρια:

1. Τα πλευρικά όρια του μοντέλου αναπαριστούν, όσο αυτό είναι δυνατό, υδρολιθολογικά όρια.
2. Τα πλευρικά όρια είναι αρκετά μακριά από τις περιοχές ιδιαίτερου ενδιαφέροντος (περιοχές πηγών και γεωτρήσεων), έτσι ώστε ενδεχόμενα σφάλματα του μοντέλου στη γειτονιά των ορίων να μην επηρεάζουν σημαντικά τις προβλέψεις του μοντέλου στις περιοχές ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.
3. Στις περιοχές όπου δεν εμφανίζεται κορεσμένη ζώνη, όπως στα πολύ ορεινά τμήματα της λεκάνης, με κατάλληλο χειρισμό των οριακών συνθηκών, έγινε αφαίρεση ολόκληρων τμημάτων της λεκάνης εντός του επιφανειακού υδροκρίτη, έτσι ώστε να μη διαταράσσεται το υδατικό ισοζύγιο στο πεδίο ροής.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, ως περιοχή μελέτης είχε επιλεγεί, τελικά, το τμήμα της λεκάνης από το ύψος της Γραβιάς ως το ύψος του Ορχομενού διαστάσεων 53×18 km.

Μεθοδολογία και κριτήρια βαθμονόμησης

Η μεθοδολογία της βαθμονόμησης του μοντέλου ακολούθησε δύο στάδια. Πρώτα έγινε προσομοίωση της ροής στον υπό μελέτη υδροφορέα σε μόνιμες συνθήκες (steady state), και, στη συνέχεια, αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης σε συνθήκες μη μονιμότητας (transient state). Στο κάθε ένα από τα δύο στάδια, έγιναν προσαρμογές των αρχικών εκτιμήσεων των υδραυλικών ιδιοτήτων του υδροφορέα αλλά και άλλων παραμέτρων (όπως οι παράμετροι υδραυλικής επικοινωνίας υδροφορέα και ποταμού) με διαδοχικές δοκιμές (trial and error).

Στο πρώτο στάδιο της βαθμονόμησης (steady state), θεωρήθηκε μια ιδεατή χρονική περίοδος με μέσες υδρολογικές συνθήκες και συνθήκες εκμετάλλευσης του υδροφορέα που αντιστοιχεί στην πενταετία 1984-89. Η χρονική αυτή περίοδος θεωρήθηκε απολύτως αντιπροσωπευτική των μέσων υδρολογικών συνθηκών. Η εκτίμηση των απολήψεων για άρδευση έγινε για κάθε μια αρδευόμενη περιοχή με βάση δεδομένα από το Υπουργείο Γεωργίας σχετικά με τις καλλιέργειες, τις ανάγκες σε νερό της κάθε καλλιέργειας για κάθε μήνα, την απόδοση των δικτύων, και την έκταση της περιοχής.

Τα κριτήρια καλής προσαρμογής του μοντέλου ήταν, κατά βάση, δύο:

- Η αναπαραγωγή των μετρημένων τιμών της στάθμης σε 18 σημεία ελέγχου της περιοχής μελέτης.
- Η επίτευξη ενός ικανοποιητικού υδατικού ισοζυγίου.

Η προσαρμογή του μοντέλου, που επιτεύχθηκε, θεωρήθηκε ικανοποιητική για τους στόχους της μελέτης και τα διαθέσιμα δεδομένα. Η μέγιστη απόκλιση της υπολογισμένης από την μετρημένη στάθμη ήταν 5.0 m, ενώ η μέγιστη απόκλιση στις περιοχές ενδιαφέροντος (κατάντη τμήμα της περιοχής μελέτης) ήταν 0.5 ως 1.0 m.

Στο δεύτερο στάδιο της βαθμονόμησης, έγινε προσομοίωση της ροής στον υπό μελέτη υδροφορέα σε μη μόνιμες συνθήκες (transient state) με αξιοποίηση των αποτελεσμάτων του πρώτου σταδίου. Οι προσομοιώσεις έγιναν για χρονική περίοδο ίση με μια πενταετία (1984-89), δηλαδή για 60 μηνιαίες χρονικές περιόδους (stress periods). Χρησιμοποιήθηκαν 10 σημεία ελέγχου της στάθμης. Τα κριτήρια καλής προσαρμογής του μοντέλου ήταν τα ίδια, όπως και στο πρώτο στάδιο. Η προσαρμογή του μοντέλου που επιτεύχθηκε θεωρήθηκε ικανοποιητική για τους στόχους της μελέτης και τα διαθέσιμα δεδομένα.

Προετοιμασία του μοντέλου για επιχειρησιακή χρήση - Τοποθέτηση του προβλήματος

Η επιχειρησιακή χρήση του μοντέλου 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 (που είναι ο υδροφορέας), για ουσιαστικά άγνωστη εξωτερική διέγερση, που είναι η βροχόπτωση, είναι, βέβαια, και αυτή άγνωστη. Μπορεί να ελεγχθεί μόνον μερικά μέσω των απολήψεων από το σύστημα. Η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος, με αποκλειστική χρήση ιστορικών δεδομένων, είναι ανεπαρκής για την ασφαλή διαχείρισή του, δεδομένου ότι η ιστορική χρονοσειρά βροχόπτωσης έχει πρακτικά μηδενική πιθανότητα ακριβούς επανάληψής της στο μέλλον. Άλλωστε, η μοναδική ιστορική χρονοσειρά δεν επιτρέπει πιθανοτικές εκτιμήσεις για κάθε έτος ξεχωριστά στο μέλλον.

Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη χρήση 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 αντιμετωπίζοντας, έτσι, με επιτυχία τα παραπάνω προβλήματα. Οι παραγόμενες συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης έχουν τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά με τις ιστορικές και παράγονται με το πρόγραμμα ΚΑΣΤΑΛΙΑ.

Μια συγκεκριμένη ομάδα συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης, που έχει παραχθεί με ένα μοναδικό σύνολο παραμέτρων των μοντέλων γέννησης χρονοσειρών, αναφέρεται ως υδρολογικό σενάριο. Πριν από τη χρήση του μοντέλου, κάθε υδρολογικό σενάριο συνδυάζεται με ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα απολήψεων νερού για ύδρευση και άρδευση μέσω γεωτρήσεων. Για συγκεκριμένο διαχειριστικό σενάριο, και με τη βοήθεια του μοντέλου προσομοίωσης στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, πραγματοποιείται ένας αριθμός προσομοιώσεων (ίσως με τον αριθμό των συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης) και παράγονται συνθετικές χρονοσειρές παροχής των πηγών εκφόρτισης του υδροφορέα και στάθμης υπόγειου νερού σε επιλεγμένες θέσεις. Στη συνέχεια, γίνεται τυπική στατιστική επεξεργασία των εξαγόμενων μεγεθών η οποία δίνει, για το συγκεκριμένο διαχειριστικό σενάριο, τη μελλοντική διακύμανση των παροχών των πηγών και της στάθμης του υδροφορέα εκφρασμένων με πιθανοτικούς όρους. Στην παρούσα πρώτη φάση του ερευνητικού έργου δεν έγινε σύνδεση του υπό μελέτη συστήματος με τον Υδρονομέα.

Πιλοτική εφαρμογή επιχειρησιακού πακέτου

Μετά την επιχειρησιακή προσαρμογή του μοντέλου MODFLOW, έγινε εφαρμογή σε συγκεκριμένο αντιπροσωπευτικό πρόβλημα πρόγνωσης της συμπεριφοράς του καρστικού συστήματος της λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού. Το υδρολογικό σενάριο, που επιλέχτηκε, συνίσταται στη διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών για τη συνολική διάρκεια των διατιθέμενων δειγμάτων βροχόπτωσης (1967-98). Οι συνθετικές χρονοσειρές είναι 1000 τον αριθμό και αναφέρονται στη δεκαετία 1998-99 ως 2007-08. Εξετάστηκαν δύο διαχειριστικά σενάρια: (**α**) το διαχειριστικό σενάριο 1 στο οποίο οι απολήψεις από τις γεωτρήσεις Βασιλικών – Παρορίου θεωρήθηκαν μηδενικές, και (**β**) το διαχειριστικό σενάριο 2 με εντατική εκμετάλλευση των γεωτρήσεων Βασιλικών-Παρορίου και πρόγραμμα απολήψεων τις ιστορικές απολήψεις του έτους 1994. Και στα δύο διαχειριστικά σενάρια

θεωρήθηκαν οι απολήψεις για άρδευση, που είχαν χρησιμοποιηθεί στη μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α) για την πενταετία 1984-89 και μάλιστα οι μεγαλύτερες τιμές τους (για το έτος 1988).

Τα εξαγόμενα του MODFLOW, υφίστανται περαιτέρω στατιστική επεξεργασία και τα αποτελέσματα δίνονται υπό τη μορφή των ακόλουθων στατιστικών χαρακτηριστικών ενός ορισμένου αριθμού μεγεθών μαρτύρων:

1. Τροχιά της μέσης τιμής του μεγέθους μάρτυρα για όλους τους μήνες του χρονικού ορίζοντα.
2. Τροχιά του ποσοστημορίου 10% του μεγέθους μάρτυρα για όλους τους μήνες του χρονικού ορίζοντα.
3. Τροχιά του ποσοστημορίου 90% του μεγέθους μάρτυρα για όλους τους μήνες του χρονικού ορίζοντα.

Τα μεγέθη μάρτυρες, που επιλέχθηκαν, είναι η παροχή πηγών Μέλανα (Ορχομενού), Μαυρονερίου και Πολυγύρας, και η στάθμη του υδροφορέα σε τρεις γεωτρήσεις (μία στον Άνω Ρου, μία στον Μέσο Ρου και μία στον Κάτω Ρου). Τα κύρια εξαγόμενα του μοντέλου είναι υδατικά ισοζύγια για χρονική περίοδο 10 ετών, για κάθε μια από τις 10 χρονοσειρές ξεχωριστά και για τα δύο διαχειριστικά σενάρια. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων μας οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Τυχόν εντατική εκμετάλλευση των γεωτρήσεων Βασιλικών – Παρορίου για μια δεκαετία στο μέλλον θα έχει σημαντική επίδραση στην παροχή των κύριων πηγών του καρστικού συστήματος. Η επίδραση είναι μεγάλη για τις πηγές Μαυρονερίου – οι οποίες στερεύουν προσωρινά, προς το τέλος της δεκαετίας – και πολύ μικρότερη για τις πηγές Μέλανα.
2. Τυχόν εντατική εκμετάλλευση των γεωτρήσεων Βασιλικών – Παρορίου για μια δεκαετία στο μέλλον θα έχει σημαντική επίδραση στην πιεζομετρία του καρστικού συστήματος. Η επίδραση είναι μεγαλύτερη στον Άνω Ρου και μειώνεται προοδευτικά προς τον Κάτω Ρου, όπου το φυσικό σύστημα παρουσιάζει μικρή ευαισθησία στις συνθήκες εντατικής εκμετάλλευσης που εξετάστηκαν.

4.3 Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης

4.3.1 Εισαγωγή

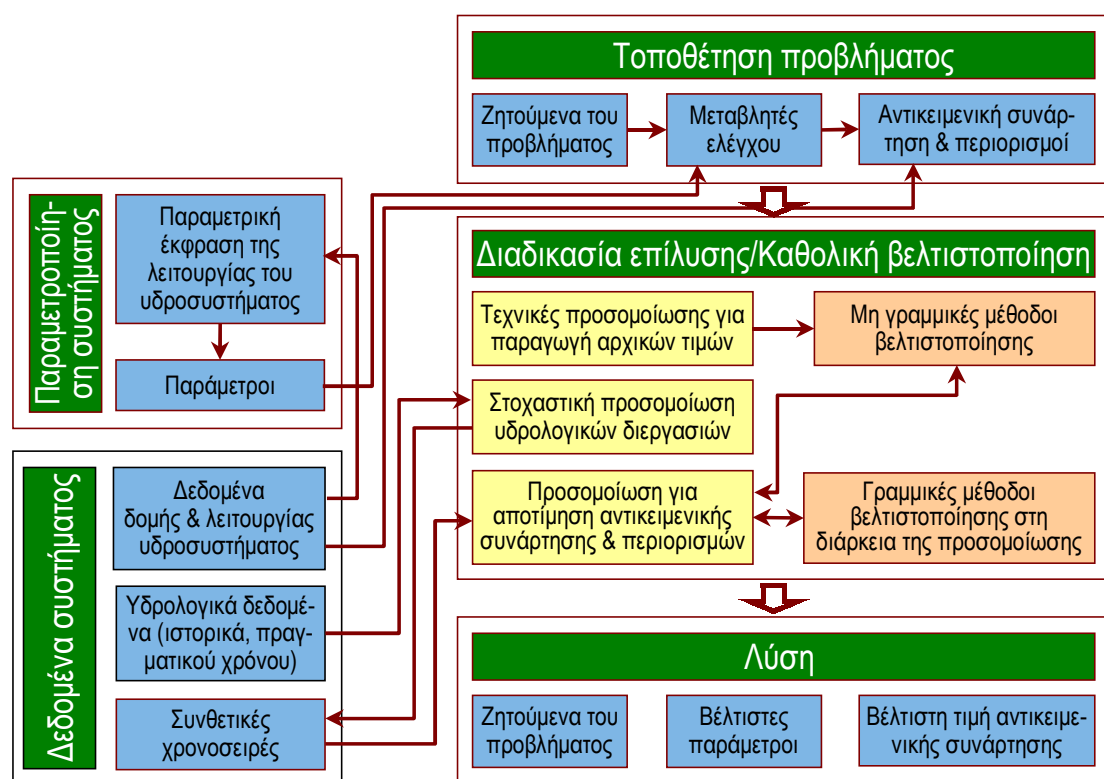
Το υπολογιστικό σύστημα προσομοιώνει ένα μοντέλο του συστήματος υδροδότησης της Αθήνας, που αντιστοιχεί στο σύστημα εξωτερικών υδραγωγείων της ΕΥΔΑΠ και σε πολύ μικρότερο βαθμό σε αρχικούς κλάδους του εσωτερικού υδραγωγείου. Ο Υδρονομέας 2.0 αποτελεί την μετεξέλιξη της πρώτης έκδοσης που είχε αναπτυχθεί 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 κρίθηκε αναγκαία ώστε να ανταποκριθεί στις αυξημένες απαιτήσεις που τίθενται σε ένα Σύστημα Υποστήριξης της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, όπως αυτές καταγράφονται στο τεύχος Ανάλυσης Απαιτήσεων του παρόντος έργου (Τεύχος 1). Παράλληλα ο Υδρονομέας έπρεπε να διαθέτει την κατάλληλη δομή, ώστε να προσαρμόζεται εύκολα σε απαιτήσεις επιχειρησιακής λειτουργίας που προβλέπονται για τη δεύτερη φάση του παρόντος ερευνητικού έργου.

Μια πρώτη συνέπεια των παραπάνω ήταν να δοθεί σε αυτήν την 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 στη μεθοδολογία παραμετροποίησης-προσομοίωσης-βελτιστοποίησης, η οποία σχηματικά απεικονίζεται στο Σχ. 4.5. Η μεθοδολογία παραμετροποίησης, που ακολουθήθηκε και σε αυτήν την έκδοση του Υδρονομέα 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 μεταφόρτωσης, το οποίο επιλύεται με ταχείες τεχνικές δικτυακού γραμμικού προγραμματισμού.

Το πρόβλημα της εύρεσης του βέλτιστου κανόνα διαχείρισης του συστήματος ανάγεται, σύμφωνα με τους Nalbantis and Koutsoyiannis (1997), σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα. 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.



Σχ. 4.5: Διάγραμμα ροής του σχήματος παραμετροποίησης-προσομοίωσης-βελτιστοποίησης.

Παράλληλα, η δεύτερη έκδοση του Υδρονομέα είχε εξ αρχής συγκεκριμένο αντικείμενο εφαρμογής 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 στην διαχείριση που καθορίζεται από το εκάστοτε σενάριο.

- Τροποποίηση της λειτουργίας των αντλιοστασίων απόληξης νερού από την Υλίκη στο μοντέλο, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση 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 συνδέουν τα διυλιστήρια.
- Κατανομή της ζήτησης σε τέσσερις τελικούς κόμβους που αντιστοιχούν στις τέσσερις βασικές περιοχές, οι οποίες εξυπηρετούνται από τις μονάδες επεξεργασίας νερού.

Τέλος, κατά την ανάπτυξη του Υδρονομέα 2.0 δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην ασφάλεια του υπολογιστικού συστήματος με στόχο τον έλεγχο της πρόσβασης στο σύστημα και της δυνατότητας επεξεργασίας των δεδομένων που βρίσκονται στη Βάση.

Ο χρήστης του Υδρονομέα μπορεί να θέσει πολλαπλούς στόχους προσομοίωσης που αφορούν:

- στην κάλυψη ζήτησης ύδρευσης ή άρδευσης,
- στη διακύμανση της στάθμης ταμιευτήρων μέσα σε εποχιακά διαφοροποιημένα ανώτατα και κατώτατα όρια. Οι στόχοι αυτοί αφενός εξασφαλίζουν ένα ελάχιστο απόθεμα νερού και αφετέρου περιορίζουν τον κίνδυνο υπερχείλισης όπως π.χ. στον ταμιευτήρα του Μαραθώνα,
- στην ελάχιστη ροή σε επιλεγμένους αγωγούς του δικτύου που διατηρείται για λόγους ασφάλειας ή για περιβαλλοντική διατήρηση.

Όλοι οι στόχοι εντάσσονται σε έναν κατάλογο προτεραιοτήτων, σύμφωνα με τη σπουδαιότητα του στόχου και ο χρήστης επιλέγει την ανώτατη αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας για κάθε έναν από αυτούς. Η εποχιακή μεταβολή των στόχων, όπως της ανώτατης στάθμης αποθήκευσης πλημμυρικού όγκου ταμιευτήρων καθώς και η πρόβλεψη διαχρονικής αύξησης της τιμής των στόχων, λαμβάνονται υπόψη κατά την προσομοίωση.

Η προσομοίωση βασίζεται σε παραμετρικούς κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων. Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τους καταχωρημένους στη Βάση κανόνες λειτουργίας που προέκυψαν ύστερα από βελτιστοποίηση. Εναλλακτικά, μπορεί να ορίσει νέους κανόνες λειτουργίας. Για να είναι αποδεκτό το αποτέλεσμα της προσομοίωσης θα πρέπει να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς μέγιστης αποδεκτής πιθανότητας αστοχίας στόχων που έχει θέσει ο χρήστης.

Η διαδικασία της προσομοίωσης μπορεί να αναλυθεί βήμα προς βήμα μέσω του Υποσυστήματος Δυναμικής Απεικόνισης. Παρακολουθώντας τα μεγέθη των συνιστωσών του υδροσυστήματος, όπως τη στάθμη των ταμιευτήρων και τη ροή στα υδραγωγεία, ο χρήστης μπορεί να ελέγξει καλύτερα τη διαδικασία και να αποκτήσει σαφέστερη αντίληψη του τρόπου εκτέλεσης της προσομοίωσης.

Ορισμένα από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση ή την βελτιστοποίηση μπορούν να καταγραφούν στη Βάση Δεδομένων, έπειτα από επιλογή του χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η εκτέλεση διαδοχικών δοκιμαστικών προσομοιώσεων διατηρώντας παράλληλα τα αποτελέσματα του πλέον αποδοτικού κανόνα λειτουργίας.

Είναι πιθανόν οι βέλτιστοι κανόνες λειτουργίας να μην έχουν υπολογιστεί για κάποιο σενάριο, ούτε και να είναι γνωστοί. Κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης το υπολογιστικό σύστημα υπολογίζει, με βάση μια αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση που έχει ορίσει 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 αποδεκτό επίπεδο αστοχίας.

Για να είναι αποδεκτός ένας κανόνας λειτουργίας θα πρέπει βεβαίως, όπως και στην προσομοίωση, να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς που έθεσε ο χρήστης. Η αναγκαιότητα 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 με τη Φόρμα 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, με παρέμβαση του χρήστη, να διακοπεί προσωρινά ή να ανασταλεί, διατηρώντας το μέχρι εκείνη τη στιγμή βέλτιστο αποτέλεσμα.

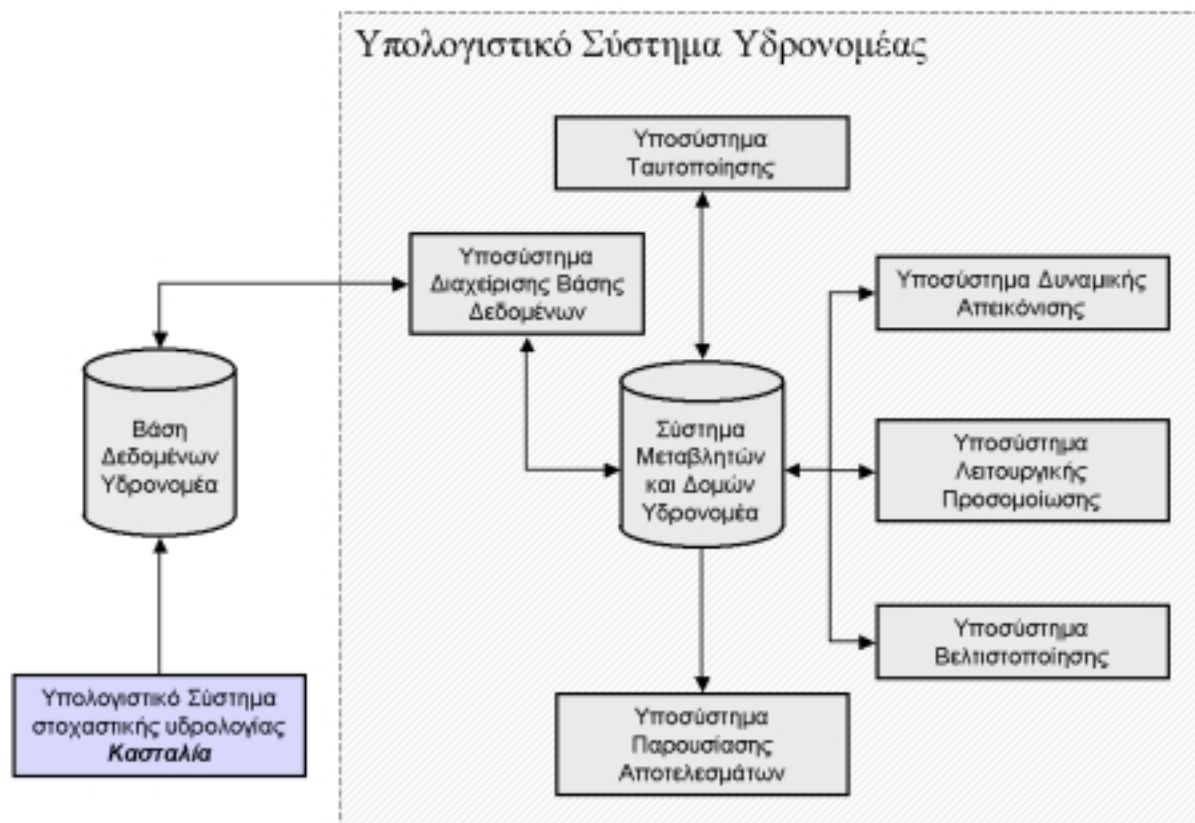
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης δίνονται με πιθανοτικούς όρους. Σε αυτά συγκαταλέγονται η πιθανότητα αστοχίας στην ικανοποίηση των στόχων και περιορισμών που έθεσε ο χρήστης, το υδατικό και ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος, όπως και βασικά οικονομικά μεγέθη που προκύπτουν από τη λειτουργία του υδροσυστήματος.

4.3.2 Οι συνιστώσες του Υπολογιστικού Συστήματος

Στο Σχ. 4.6 παρουσιάζεται μια απλουστευμένη αλλά κατατοπιστική εικόνα των βασικών υποσυστημάτων του Υδρονομέα και των αλληλεπιδράσεών τους. Από το σχήμα διαφαίνεται ότι τα υδρολογικά δεδομένα του υπολογιστικού συστήματος Κασταλία καταχωρούνται στη Βάση Δεδομένων του Υδρονομέα, απ' όπου εισάγονται στον Υδρονομέα για επεξεργασία. Το σχήμα δεν συμπεριλαμβάνει τις επιδράσεις χρηστών στο σύστημα. Τα συστατικά του Υδρονομέα παρουσιάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

Το **Υποσύστημα Διαχείρισης της Βάσης Δεδομένων** παρέχει τις απαραίτητες λειτουργίες για την εισαγωγή, διαμόρφωση και αποθήκευση των δεδομένων που απαρτίζουν ένα διαχειριστικό σενάριο. Οι λειτουργίες αυτές περιλαμβάνουν την εισαγωγή επιλεγμένων σεναρίων από τη Βάση Δεδομένων και την αποθήκευσή τους στο εσωτερικό Σύστημα Δομών Δεδομένων και Μεταβλητών, στο οποίο και έχουν άμεση πρόσβαση όλα τα υποσυστήματα του Υδρονομέα.

Το **Υποσύστημα Ταυτοποίησης** αναγνωρίζει τους χρήστες με βάση τον κωδικό πρόσβασης και το σύνθημά τους. Αφού αναγνωριστεί ο χρήστης, το σύστημα ελέγχει τα δικαιώματα εκτέλεσης λειτουργιών και επικαιροποιεί τις μεταβλητές πρόσβασης στο Σύστημα Μεταβλητών και Δομών Δεδομένων του Υδρονομέα.



Σχ. 4.6: Τα βασικά συστατικά του Υδρονομείας και οι αλληλοεπιδράσεις τους

Το **Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης** αναπαριστά τη λειτουργία του υδροσυστήματος για μεγάλο χρονικό διάστημα. Χρησιμοποιεί τις εσωτερικές δομές και τις καθολικές μεταβλητές του Υδρονομείας στις οποίες είναι καταχωρημένο το μοντέλο του υδροσυστήματος, οι επιλογές του χρήστη και οι χρονοσειρές εισόδου. Για την εκτέλεση προσομοίωσης απαιτείται η επιλογή ενός κανόνα λειτουργίας που εισάγεται σε παραμετρική μορφή. Μετά την προσομοίωση της συνολικής προβλεπόμενης περιόδου, το Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης επιστρέφει τα εξής αποτελέσματα:

- Το σύνολο των χρονικών βημάτων και χρονικών περιόδων, όπου δεν ήταν δυνατή η εξυπηρέτηση στόχου.
- Το συνολικό όγκο νερού που χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη του στόχου, εάν ο στόχος αναφέρεται στην κατανάλωση νερού.
- Τα συνολικά μεγέθη του υδατικού ισοζυγίου για κάθε έναν από τους κόμβους του δικτύου, δηλαδή την απορροή, την βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, την εξάτμιση, τις εκροές από τον κόμβο μέσω υδραγωγείων, την υπερχείλιση, και τις υπόγειες διαφυγές.
- Τις ροές των υδραγωγείων του δικτύου και για τις δύο κατευθύνσεις.
- Την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε χρονικό βήμα και για κάθε υδραγωγείο που λειτουργεί με άντληση. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται από το Υποσύστημα Παρουσίασης αποτελεσμάτων για την εκτίμηση των μέσων ετήσιων τιμών του ενεργειακού ισοζυγίου.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ενημερώνονται οι καθολικές μεταβλητές των συνιστωσών του δικτύου που χρησιμοποιούνται στο Υποσύστημα Δυναμικής Απεικόνισης, όπως ο επίκαιρος όγκος των ταμιευτήρων, ο όγκος που μεταφέρθηκε από τους αγωγούς κατά τη διάρκεια του επίκαιρου χρονικού βήματος κ.ά.

Το **Υποσύστημα Βελτιστοποίησης** ενεργοποιείται από το χρήστη και εκτελεί επαναληπτικά το Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης. Ανάλογα με την αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης η προσομοίωση εκτελείται με διαφορετικό κάθε φορά διάνυσμα παραμέτρων του παραμετρικού χωρικού κανόνα ή/και με διαφοροποιημένο κατάλογο στόχων προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται και αξιολογούνται με τα προηγούμενα και διατηρούνται τα αποτελέσματα του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας.

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. Το υποσύστημα αυτό όταν ενεργοποιηθεί εκτελείται παράλληλα με το Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης, ενώ με εντολή του χρήστη μπορεί να διακόψει προσωρινά και να επαναθέσει σε λειτουργία την προσομοίωση. Οι λειτουργίες του υποσυστήματος παρέχουν την ευχέρεια στο χρήστη να οπτικοποιήσει σε κάθε της φάση τη διαδικασία της προσομοίωσης, παρέχοντάς του συγκεκριμένες πληροφορίες.

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 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.
- Το αναλυτικό υδατικό ισοζύγιο ετήσιων μέσων όρων για κάθε κόμβο του δικτύου.
- Το ισοζύγιο ροών των υδραγωγείων του δικτύου και για τις δύο κατευθύνσεις.
- Τα οικονομικά μεγέθη που προκύπτουν από την κατανάλωση ενέργειας.

Σε περίπτωση που έχει προηγηθεί βελτιστοποίηση τα αποτελέσματα αναφέρονται στον βέλτιστο κανόνα λειτουργίας.

4.3.3 Βασικές επισημάνσεις ως προς τη μεθοδολογία και τη λειτουργία του συστήματος

Το λογισμικό πακέτο Υδρονομέας (έκδοση 2.0) αποτελεί τον πυρήνα του ολοκληρωμένου υπολογιστικού συστήματος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου. Βασίζεται σε πρωτότυπο και προχωρημένο μεθοδολογικό-θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο υλοποιεί με γρήγορες και αποτελεσματικές υπολογιστικές δομές και διαδικασίες σε ένα εύχρηστο παραθυρικό υπολογιστικό περιβάλλον.

Το υπολογιστικό σύστημα 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.

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 εισδοδοί για την προσομοίωση της λειτουργίας του υδροσυστήματος. Με την τελευταία προσομοίωση προσδιορίζονται, 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. Όλες οι ποσότητες αυτές λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή του μέτρου επίδοσης.

Σε ένα σύνθετο υδροσύστημα, όπως αυτό της Αθήνας, προσφέρονται εναλλακτικές δυνατότητες σε ότι αφορά στον 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.).

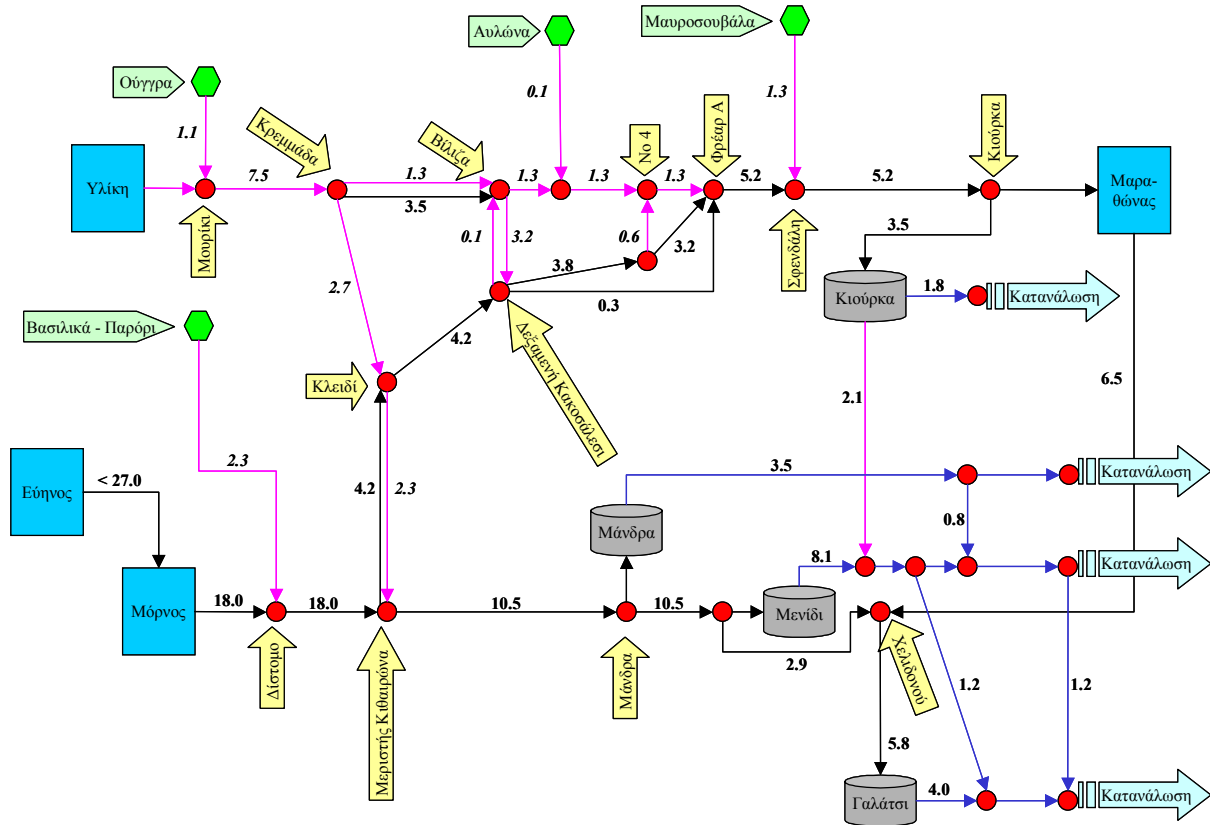
Αυτή η βελτιστοποίηση σε κάθε βήμα προσομοίωσης, που έχει ονομαστεί εσωτερική βελτιστοποίηση, αποδείχθηκε ότι μπορεί να αναχθεί σε γραμμικό δικτυακό πρόβλημα μεταφόρτωσης, το οποίο επιλύεται με το δικτυακό αλγόριθμο simplex. Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι η ταχύτητά του, ιδιότητα 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 μεταφόρτωσης, έγιναν εκτεταμένες μαθηματικές αναλύσεις με βάση τις οποίες μπόρεσε να γίνει η μετατροπή ενός τυχόντος πραγματικού υδροσυστήματος σε ένα μαθηματικό αντικείμενο γνωστό ως διγράφο.

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. Στην περίπτωση αυτή προσφέρονται διάφοροι αλγόριθμοι μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ντετερμινιστικοί, όπως η απλή αλλά αργή μέθοδος των επάλληλων πλεγμάτων, ή στοχαστικοί, όπως η γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδος της μετακινούμενης σύνθετης εξέλιξης (shuffled complex evolution). Μέχρι τώρα, ο τελευταίος αλγόριθμος έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα, αλλά το πρόβλημα αξίζει να ερευνηθεί περαιτέρω με στόχο την ανάπτυξη ενός ακόμη καλύτερου αλγορίθμου κατάλληλα προσαρμοσμένου στις ιδιαιτερότητες του υπόψη προβλήματος.

Οι παραπάνω μεθοδολογίες και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι υλοποιήθηκαν στο υπολογιστικό σύστημα Υδρονομέας (έκδοση 2.0). 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 σχεσιακής 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 και εκθέσεων.

Εκτός από τις εργασίες προγραμματισμού, η θέση σε λειτουργία του Υδρονομέα για το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας απαίτησε 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 (βλ. Σχ. 4.7).



Σχ. 4.7: Σχηματική παράσταση του μοντέλου του υδροσυστήματος (κόμβοι και κλάδοι) με τις αντίστοιχες τιμές παροχευτικότητας (σε m^3/s). Με πλάγια γράμματα αναγράφονται οι παροχευτικότητες των κλάδων στους οποίους η ροή πραγματοποιείται με άντληση.

Ο Υδρονομέας έχει ήδη δώσει ορισμένα πρώτα αποτελέσματα αφού χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την κατάρτιση του Σχεδίου Διαχείρισης του Υδροδοτικού Συστήματος της Αθήνας για το έτος 2000-2001, ενώ έγινε και μια πρώτη ανάλυση ευαισθησίας ως προς τους λειτουργικούς κανόνες. Όπως προέκυψε ύστερα από δοκιμαστικές προσομοιώσεις, υψηλές αποδόσεις παρατηρούνται με διάφορους κανόνες λειτουργίας. Κοινό χαρακτηριστικό των κανόνων λειτουργίας με υψηλές αποδόσεις είναι η κατά προτεραιότητα απόληξη νερού από τον ταμιευτήρα του Ευήνου, προφανώς προς αποφυγή των υπερχειλίσεων. Ο βέλτιστος κανόνας λειτουργίας των ταμιευτήρων μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά ακόμα και με μικρές τροποποιήσεις στις ιδιότητες των συνιστωσών του δικτύου.

Στο επόμενο διάστημα αναμένεται να υπάρξει μεθοδική χρήση του Υδρονομέα, κυρίως από πλευράς ΕΥΔΑΠ, ώστε με τις επιστημονικές και τις παρατηρήσεις που θα διατυπωθούν να γίνουν οι κατάλληλες προσαρμογές και διορθώσεις, με στόχο να κατασκευαστεί η επιχειρησιακή έκδοση του λογισμικού. Σε αυτή την επιχειρησιακή έκδοση, η οποία θα λειτουργεί με επίκαιρα υδρολογικά και λειτουργικά δεδομένα που θα λαμβάνονται με το υπό κατασκευή μετρητικό σύστημα, θα ενσωματωθούν και οι τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις σε θέματα βελτιστοποίησης και λογισμικών εργαλείων, δεδομένου ότι οι εν λόγω τεχνολογίες εξελίσσονται ραγδαία.

5 Το διαχειριστικό σχέδιο

5.1 Σκοπός και αντικείμενο του Σχεδίου Διαχείρισης

Με τον πρόσφατο 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%. Σε εφαρμογή της σχετικής πρόβλεψης του Νόμου 2744/1999 έχει συναφθεί και υπογραφεί σύμβαση μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου και της ΕΥΔΑΠ, η οποία μεταξύ άλλων προέβλεπε τη σύνταξη Σχεδίου Διαχείρισης των διαθεσίμων συστημάτων παροχής ακατέργαστου ύδατος.

Λόγω της απόλυτης συνάφειας σχεδίου διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας με το παρόν ερευνητικό έργο, ζητήθηκε η συνδρομή της ερευνητικής ομάδας του ΕΜΠ στη σύνταξη του. Με τη συνεργασία της ερευνητικής ομάδας του ΕΜΠ και της ΕΥΔΑΠ ολοκληρώθηκε το εν λόγω σχέδιο διαχείρισης, το οποίο εγκρίθηκε αρμοδίως και υποβλήθηκε στο ΥΠΕΧΩΔΕ.

Αντικείμενο του υπόψη σχεδίου διαχείρισης ήταν 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 αξιοποίησης των υδατικών πόρων που διατίθενται για την κάλυψη της ζήτησης αυτής.

Βασική προϋπόθεση ήταν η μελέτη του ισοζυγίου μεταξύ αφενός της ζήτησης νερού και των τάσεών της και αφετέρου της φυσικής προσφοράς υδατικών πόρων και της μεταβλητότητας και αβεβαιότητάς της. Δεύτερη προϋπόθεση ήταν 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 πρέπει να χαρακτηρίζονται από ορθολογικότητα, δηλαδή να είναι επιστημονικά θεμελιωμένοι, αποδοτικότητα, δηλαδή να αξιοποιούν τους 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 πρέπει να γίνεται με οικονομικά πρόσφορο τρόπο.

5.2 Βασικές επισημάνσεις

Είναι γνωστή η πολυπλοκότητα του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας με τις πολλαπλές πηγές επιφανειακού και υπόγειου νερού, και τους πολλαπλούς χώρους ταμίευσης και αγωγούς μεταφοράς. Είναι ακόμη γνωστό ότι το πρόβλημα της διαχείρισης ενός συστήματος υδατικών πόρων είναι από τα πλέον περίπλοκα και απαιτητικά λόγω των αντικρουόμενων στόχων και περιορισμών του. Έτσι, η κατάρτιση ενός οργανωμένου σχεδίου διαχείρισης οφείλει να αντιμετωπιστεί με μια διαδικασία διαδοχικών προσεγγίσεων. Με αυτή την έννοια, το σχέδιο διαχείρισης πρέπει να θεωρηθεί ως πρώτη προσέγγιση, η οποία επιδέχεται πολλών βελτιώσεων που αναμένεται να υπάρξουν στις επόμενες προσεγγίσεις που θα ακολουθήσουν. Αυτό ισχύει ακόμη περισσότερο στη συγκεκριμένη συγκυρία, δεδομένου ότι το ερευνητικό έργο βρίσκεται στο πρώτο στάδιο της εκπόνησής του και αναμένεται να υπάρχουν εγκυρότερα αποτελέσματα σε επόμενα στάδια.

Για την κάλυψη των απαιτήσεων του Νόμου 2744/1999 και της Σύμβασης ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΔΑΠ (1999), ο χρονικός ορίζοντας του σχεδίου διαχείρισης θεωρήθηκε πέντε χρόνια, δηλαδή καλύπτει την περίοδο μέχρι και το 2004. Αυτή η πενταετία είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, επειδή:

- είναι η πρώτη πενταετία που η ΕΥΔΑΠ λειτουργεί με το νέο θεσμικό πλαίσιο·
- θα ενταχθούν στο σύστημα τα νέα έργα Ευήνου σε πλήρη λειτουργία, καθώς και μια σειρά ενισχυτικών έργων·
- μετά τη μείωσή της στην προηγούμενη έμμονη ξηρασία (1988-94), η κατανάλωση αυξάνεται πλέον με μεγάλο ρυθμό·
- προβλέπεται να γίνουν σημαντικές επεκτάσεις των δραστηριοτήτων της ΕΥΔΑΠ·
- στην πενταετία αυτή εντάσσεται και η Ολυμπιάδα του 2004, που χρήζει ειδικής αντιμετώπισης και σε ό,τι αφορά την ύδρευση.

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, και παίρνοντας υπόψη και την πορεία εκπόνησης του παρόντος ερευνητικού έργου, το διαχειριστικό σχέδιο συντάχθηκε με τις ακόλουθες παραδοχές:

1. Συμβατικός χρονικός ορίζοντας 5 ετών (μέχρι το τέλος του 2004).
2. Πρόβλεψη ετήσιας αναθεώρησης του διαχειριστικού σχεδίου, με δυνατότητες αναθεώρησης και σε πραγματικό χρόνο (κατόπιν ειδικής μελέτης) αν παραστεί ιδιαίτερη ανάγκη (π.χ. ανάγκη εφαρμογής ειδικών τιμολογίων για τον έλεγχο της κατανάλωσης σε περίπτωση έμμονης ξηρασίας).
3. 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.

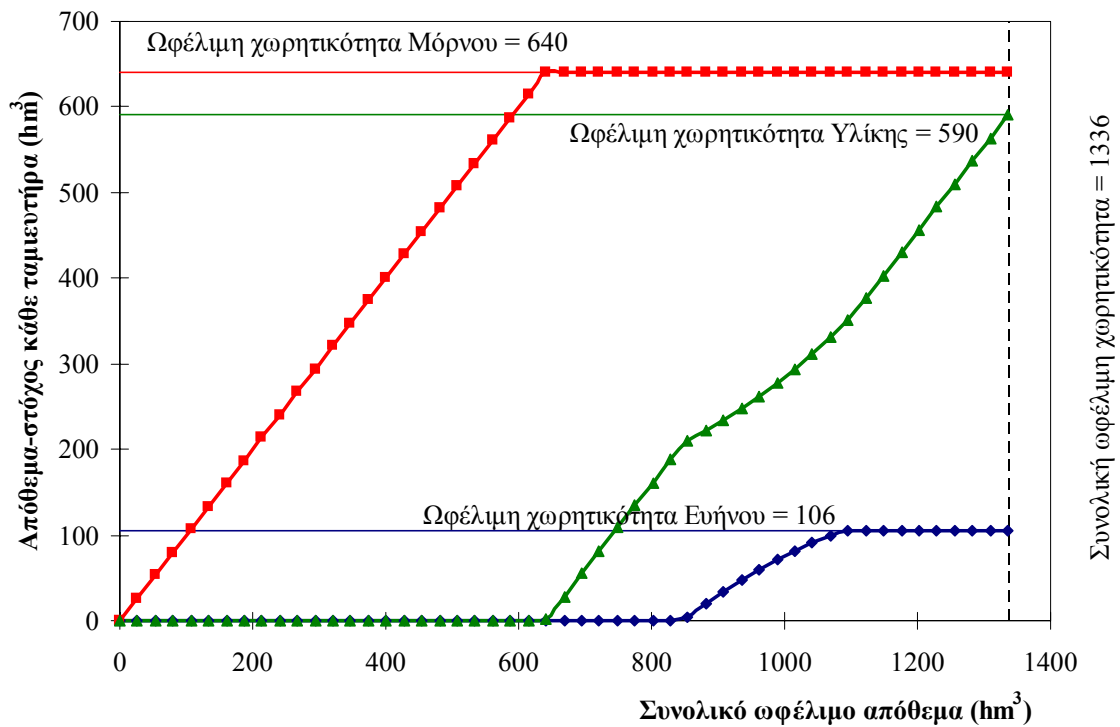
Το διαχειριστικό σχέδιο αναπτύσσει τα παρακάτω επιμέρους αντικείμενα: υδροδοτικό σύστημα, ζήτηση νερού, υδατικοί πόροι, οικονομικά δεδομένα, περιβαλλοντικές όψεις της διαχείρισης

μεθοδολογία διαχείρισης, εκτιμήσεις μελλοντικών απολήψεων, ασφάλεια του υδροδοτικού συστήματος έναντι έκτακτων περιστατικών, συμπεράσματα και προτάσεις. Επιπλέον περιλαμβάνει παραρτήματα που περιέχουν πίνακες και σχήματα δεδομένων και αποτελεσμάτων. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

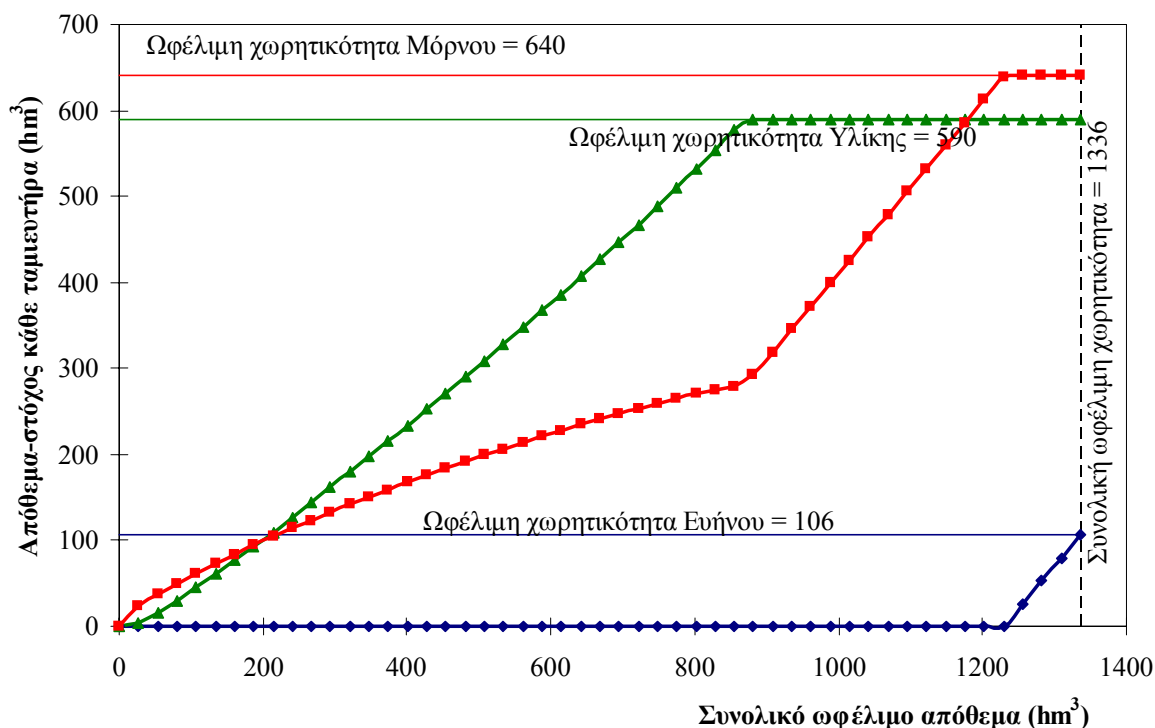
1. Για την ύδρευση της Αθήνας διατίθεται σήμερα ένα εκτεταμένο σύστημα υδατικών πόρων και αγωγών μεταφοράς, το οποίο χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα πολλαπλών εναλλακτικών λύσεων, τόσο ως προς τους υδατικούς πόρους (4 ταμειυτήρες και γεωτρήσεις, κύριοι, βοηθητικοί και εφεδρικοί υδατικοί πόροι) όσο και ως προς τις διαδρομές μεταφοράς (δύο κύριες διαδρομές με δυνατότητα αλληλοσυνδέσεων). Οι εναλλακτικές λύσεις που διατίθενται συμβάλλουν θετικά στην αξιοπιστία του συστήματος, και στις συνήθεις συνθήκες λειτουργίας αλλά και στην κάλυψη περιπτώσεων έκτακτων αναγκών, είτε αυτές οφείλονται στην υδρολογική δίαιτα (ξηρασία) είτε σε άλλους λόγους (περιστατικά βλαβών). Από την άλλη πλευρά, η δυνατότητα εναλλακτικών λύσεων εγείρει την ανάγκη ορθής επιλογής της καλύτερης κάθε φορά λύσης και συνακόλουθα της χρήσης προχωρημένων μεθόδων διαχείρισης βασισμένων σε τεχνικές βελτιστοποίησης.
2. Με τη λήξη της περιόδου της έμμονης ξηρασίας που ήταν μια έντονη δοκιμασία για το σύστημα και τη διαχείρισή του, τη λειτουργία των προσωρινών έργων μεταφοράς νερού από τον Εύηνο στα μέσα της δεκαετίας του 1990 και τη διακοπή της πολιτικής μείωσης της κατανάλωσης από πλευράς ΕΥΔΑΠ, η κατανάλωση κυμαίνεται σήμερα στα προ της ξηρασίας επίπεδα (370 hm^3 ετησίως μετρημένα στην είσοδο των διυλιστηρίων) παρουσιάζοντας εντονότερες αυξητικές τάσεις με ρυθμό 6-7% ετησίως. Παίρνοντας υπόψη το ρυθμό αυτό και τα σχέδια ανάπτυξης της ΕΥΔΑΠ με την υδροδότηση νέων περιοχών, εκτιμάται ότι η ετήσια κατανάλωση το 2010 μπορεί να φτάσει κατά μέσο όρο τα 510 hm^3 ή κατά μέγιστο τα 590 hm^3 . Ωστόσο, με κατάλληλη πολιτική μπορεί να πραγματοποιηθούν μικρότεροι αυξητικοί ρυθμοί που θα περιορίσουν την κατανάλωση του 2010 στο ικανοποιητικό επίπεδο των 420 hm^3 . Παίρνοντας υπόψη και τις δυνατότητες του υδροδοτικού συστήματος, οι οποίες προέκυψαν από εκτεταμένες αναλύσεις στα πλαίσια της εκπόνησης του σχεδίου διαχείρισης και συνοψίζονται πιο κάτω, αλλά και τη σχέση κατανάλωσης-κόστους, διαπιστώνεται ότι η κατανάλωση δεν θα πρέπει να αφεθεί να αυξάνεται ανεξέλεγκτα, αλλά θα πρέπει να ελέγχεται με στόχο να μην ξεπεράσει το επίπεδο των 420 hm^3 το 2010.
3. Το συνολικό μέσο ετήσιο δυναμικό των επιφανειακών υδατικών πόρων ανέρχεται στο επίπεδο των 840 hm^3 . Η τιμή αυτή είναι αρκετά μικρότερη από παλιότερες εκτιμήσεις και η μείωση οφείλεται στα πιο πρόσφατα υδρολογικά δεδομένα, που περιλαμβάνουν και την περίοδο της έμμονης ξηρασίας (1988-89 έως 1994-95). Πέραν της μείωσης των μέσων στατιστικών χαρακτηριστικών όμως, η εμπειρία από την εν λόγω ξηρασία υποδεικνύει ότι θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στις εκτιμήσεις και προγνώσεις μας η γενικότερα διαπιστωμένη φυσική τάση της ομαδοποίησης των ξηρών ετών (το αποκαλούμενο φαινόμενο Hurst ή φαινόμενο Ιωσήφ), κάτι που συνεπάγεται ακόμη μεγαλύτερη μείωση του εκμεταλλεύσιμου υδατικού δυναμικού.
4. Οι υπόγειοι υδατικοί πόροι αντιμετωπίστηκαν ως εφεδρικοί πόροι για την κάλυψη ιδιαίτερα δυσμενών υδρολογικών συνθηκών και έκτακτων περιστατικών. Προϋπόθεση για να λειτουργήσουν ως εφεδρικοί πόροι είναι να μην υπεραντλούνται σε συνεχή βάση για άλλες χρήσεις (άρδευση). Εξ άλλου είναι γνωστό ότι η άντληση επηρεάζει την ποσότητα των επιφανειακών υδάτων και, κατά συνέπεια, τις εισροές στην Υλίκη. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητο αφενός να κρατούνται στοιχεία των αντλούμενων ποσοτήτων και αφετέρου να ελέγχεται η χρήση των πόρων αυτών διεξοδικά και σε συνεχή βάση.

5. Ειδικότερα, στην ευνοϊκή περίπτωση που δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της μακροπρόθεσμης εμμονής, το εκμεταλλεύσιμο για την υδροδότηση της Αθήνας υδατικό δυναμικό με αξιοπιστία (ασφάλεια) 99% σε ετήσια βάση ανέρχεται στα 550 hm^3 . Στο μέγεθος αυτό περιλαμβάνεται το σύνολο των επιφανειακών υδατικών πόρων καθώς και οι υπόγειοι υδατικοί πόροι, με την παραδοχή ότι οι τελευταίοι αποτελούν εφεδρεία που χρησιμοποιείται δυνητικά (παίρνοντας υπόψη και το κόστος) όταν το συνολικό απόθεμα των ταμιευτήρων μειωθεί κάτω από το κατώφλι του 40% της χωρητικότητάς τους και υποχρεωτικά (ανεξαρτήτως κόστους) όταν το συνολικό απόθεμα των ταμιευτήρων μειωθεί κάτω από το κατώφλι του 25% της χωρητικότητάς τους. Με αυτές τις τιμές των κατωφλίων, η μέση ετήσια συμβολή των υπόγειων νερών στο συνολικό απολήψιμο υδατικό δυναμικό είναι μόλις 5 hm^3 αλλά μπορεί να αυξηθεί αν αυξηθούν οι τιμές των κατωφλίων. Η χαμηλή αυτή τιμή οφείλεται στο γεγονός ότι οι γεωτρήσεις έχουν θεωρηθεί ως εφεδρικές πηγές, οι οποίες τελικά χρησιμοποιούνται σπάνια. Η διαφορά $550 - 5 = 545 \text{ hm}^3$ αποτελεί τη συμβολή των επιφανειακών υδατικών πόρων. Η διαφορά του φυσικού μείον το απολήψιμο επιφανειακό υδατικό δυναμικό ($840 - 545 = 295 \text{ hm}^3$) αναλίσκεται σε υπερχειλίσσεις, υπόγειες διαφυγές, απώλειες εξάτμισης ή διατίθεται για περιβαλλοντική ροή (Εύηνος) και αρδευτική χρήση (Υλίκη).
6. Αν, όπως είναι και επιστημονικά ορθότερο, ληφθεί υπόψη και το φαινόμενο της μακροπρόθεσμης εμμονής, το απολήψιμο για την υδροδότηση της Αθήνας υδατικό δυναμικό του συστήματος κατεβαίνει στα 480 hm^3 ετησίως, με τις ίδιες παραδοχές ως προς την αξιοπιστία και τη συμμετοχή των υπόγειων υδατικών πόρων. Αυτό το μέγεθος, με βάση τα διαθέσιμα ως τώρα δεδομένα, θα πρέπει να θεωρείται ως το ασφαλές ανώτατο όριο του υπάρχοντος συστήματος υδατικών πόρων.
7. Τα παραπάνω μεγέθη δεν λαμβάνουν υπόψη την περιορισμένη παροχετευτικότητα του συστήματος των αγωγών μεταφοράς του αδιύλιστου νερού. Αν ληφθούν υπόψη τα σημερινά επίπεδα παροχετευτικότητας, το απολήψιμο για την υδροδότηση της Αθήνας υδατικό δυναμικό του συστήματος κατεβαίνει στα 410 hm^3 ετησίως (στα διυλιστήρια). Ωστόσο, με τα έργα ενίσχυσης των υδραγωγείων που έχουν δρομολογηθεί από την ΕΥΔΑΠ και βρίσκονται στο στάδιο της υλοποίησης, θα μπορέσει στο ορατό μέλλον το σύστημα να μεταφέρει την ασφαλή ποσότητα των 480 hm^3 ετησίως. Επιπροσθέτως, τα εν λόγω έργα ενίσχυσης θα βελτιώσουν την ασφάλεια του συστήματος έναντι περιστατικών βλάβης.
8. Τα πιο πάνω μεγέθη εκτιμήθηκαν με βάση λογισμικά πακέτα που αναπτύσσονται από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο για την ΕΥΔΑΠ στα πλαίσια του ερευνητικού έργου. Πρόκειται ειδικότερα για τα πακέτα *Κασταλία* (στοχαστική προσομοίωση και πρόγνωση εισροών ταμιευτήρων) και *Υδρονομέας* (προσομοίωση και βελτιστοποίηση υδροδοτικού συστήματος). Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι τα ως τώρα ιστορικά υδρολογικά δείγματα παρουσιάζουν ελλείψεις και προβλήματα ποιότητας. Αναμένεται ότι με την ολοκλήρωση του ερευνητικού έργου, οπότε θα λειτουργούν επιχειρησιακά τόσο τα συστήματα λογισμικού, όσο και το σύγχρονο σύστημα μέτρησης των υδατικών πόρων που αναπτύσσεται στα πλαίσια του έργου, θα βελτιωθεί η αξιοπιστία των εκτιμήσεων. Άλλωστε, τα μεγέθη που υπεισέρχονται στη διαχείριση των υδατικών πόρων είναι από τη φύση τους δυναμικά και θα πρέπει να επικαιροποιούνται σε συνεχή βάση.
9. Ως αποτέλεσμα των προσομοιώσεων και βελτιστοποιήσεων με τα πιο πάνω πακέτα λογισμικού, προέκυψαν διάφοροι κανόνες λειτουργίας του συστήματος ταμιευτήρων. Εξ αυτών διακρίνουμε δύο, οι οποίοι μπορούν να αποτελέσουν ασφαλή βάση για τη διαχείριση των ταμιευτήρων. Ο κανόνας 1 που απεικονίζεται στο Σχ. 5.1 είναι ο πλέον κατάλληλος για τη μεγιστοποίηση της απολήψιμης ποσότητας από το σύστημα (επίπεδο 480 hm^3 ετησίως), χωρίς να λαμβάνει υπόψη την οικονομικότητα. Ο κανόνας 2 που απεικονίζεται στο Σχ. 5.2 αποτελεί ένα συμβιβασμό

ανάμεσα στην οικονομικότητα και την αξιοπιστία και είναι ο βέλτιστος (ή σχεδόν βέλτιστος) για κατανάλωση μέχρι και 420 hm^3 ετησίως.



Σχ. 5.1: Γραφική παράσταση βέλτιστων κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων Μόρνου, Ευήνου και Υλίκης για τον στόχο μεγιστοποίησης της ασφαλούς απόδοσης του συστήματος με θεώρηση απεριόριστης παροχευτικότητας υδραγωγείων και δυσμενών υδρολογικών χρονοσειρών.



Σχ. 5.2: Γραφική παράσταση βέλτιστων κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων Μόρνου, Ευήνου και Υλίκης με θεώρηση του πραγματικού συστήματος.

10. Ακόμη και μετά την ολοκλήρωση του έργου του Ευήνου, δεν υπάρχει ασφαλής τρόπος ικανοποίησης επιπέδων ζήτησης μεγαλύτερων των σημερινών με πλήρη αποκλεισμό του υδραγωγείου Υλίκης από το σύστημα. Η προσομοίωση του συστήματος, με εφαρμογή του κανόνα λειτουργίας 2, έδειξε ότι η μέση ετήσια απαιτούμενη ενέργεια άντλησης ακολουθεί τη μεταβολή της κατανάλωσης, ξεκινώντας από μια ελάχιστη τιμή 35 GWh/έτος και αυξάνοντας με περίπου σταθερό ρυθμό 0.9 GWh/hm³.
11. Η διατήρηση της οικολογικής παροχής κατάντη του φράγματος Αγ. Δημητρίου που επιβάλλουν οι σχετικοί περιβαλλοντικοί όροι αποτελεί τον σημαντικότερο, από περιβαλλοντικής πλευράς, περιορισμό στη διαχείριση του συστήματος. Η τήρηση του όρου αυτού έχει βέβαια αρνητική συνέπεια για την υδροδότηση της Αθήνας, αφού αφαιρεί από το δυναμικό του συστήματος έως και 30 hm³ ετησίως. Ως προς τους όρους για τα υπόγεια νερά, οι μικρές απολήψεις από τους υδροφορείς που εμφανίζονται στα σενάρια που εξετάστηκαν δεν αναμένεται να οδηγήσουν σε παραβίαση των περιβαλλοντικών όρων για τις πηγές της λεκάνης Β. Κηφισού, αλλά πάντως το θέμα αυτό χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση.
12. Σε ότι αφορά τα περιστατικά βλάβης, η διακοπή της λειτουργίας της σήραγγας Κιθαιρώνα προέκυψε ως το δυσμενέστερο σενάριο αφού οδηγεί σε σοβαρό έλλειμμα (άνω του 30%) στην κάλυψη της ζήτησης λόγω περιορισμένης παροχευτικότητας στο υπόλοιπο σύστημα που παραμένει σε λειτουργία, ενώ δημιουργεί και πρόβλημα ως προς τη χωρική διανομή του διυλισμένου νερού.
13. Με θεώρηση του χαμηλού σεναρίου μεταβολής της κατανάλωσης και χωρίς να ληφθούν υπόψη τα έργα ενίσχυσης των υδραγωγείων που προβλέπονται από το αναπτυξιακό σχέδιο της ΕΥΔΑΠ, προκύπτει ότι δεν αναμένεται να παρουσιαστούν ουσιαστικά προβλήματα στην υδροδότηση της Αθήνας σε ορίζοντα πενταετίας που αποτελεί και το συμβατικό χρονικό ορίζοντα του διαχειριστικού σχεδίου. Ωστόσο, ώσπου να λειτουργήσει πλήρως το έργο του Ευήνου, θα

απαιτηθεί μεγαλύτερη συνεισφορά της Υλίκης και των γεωτρήσεων, η οποία αναμένεται να κορυφωθεί κατά το επόμενο υδρολογικό έτος (2001-02).

14. Στο χρονικό ορίζοντα της πενταετίας εντάσσεται και η διεξαγωγή των Ολυμπιακών αγώνων. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ιδιαίτερες απαιτήσεις για την απαιτούμενη ετοιμότητα από πλευράς διαθεσιμότητας υδατικών πόρων, επάρκειας έργων μεταφοράς (τόσο σε κανονικές συνθήκες, όσο και σε συνθήκες βλάβης) και κάλυψης των ειδικών συνθηκών χωροχρονικής κατανομής της κατανάλωσης νερού. Η ΕΥΔΑΠ έχει ήδη προχωρήσει στην ανάθεση σχετικής μελέτης με στόχο την πρόβλεψη των ειδικών συνθηκών ζήτησης που θα διαμορφωθούν, καθώς και τη διερεύνηση των απαραίτητων έργων και μέτρων για την κάλυψη αυτών των ειδικών συνθηκών.
15. Τα χαρακτηριστικά της συγκυρίας που διέπει τη διαχείριση για το τρέχον υδρολογικό έτος είναι τα ακόλουθα:
 - i. Το διαρρέυσαν υδρολογικό έτος ήταν φτωχό υδρολογικά, κάτι που προκαλεί ανησυχία, τόσο γιατί θα μειώσει περαιτέρω τα στατιστικά υδρολογικά μεγέθη που αναφέρθηκαν πιο πάνω (σημειωτέον ότι μέχρι την περίοδο που συντάχθηκε το σχέδιο δεν υπήρχαν πλήρη διαθέσιμα υδρολογικά δεδομένα για το έτος 1999-2000), όσο και από την άποψη του φαινομένου της μακροπρόθεσμης εμμόνης που προαναφέρθηκε.
 - ii. Ο ρυθμός αύξησης της κατανάλωσης είναι ανησυχητικά υψηλός: το Σεπτέμβριο του 1999 η κατανάλωση, μετρημένη στην έξοδο των διυλιστηρίων, ήταν 31 802 420 m³ ενώ το Σεπτέμβριο του 2000 ήταν 35 779 884 m³, δηλαδή αυξημένη κατά 12.5%. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η ΕΥΔΑΠ θα πρέπει να μελετήσει και να είναι σε θέση να εφαρμόσει άμεσα τρόπους ελέγχου της ζήτησης (και μέσω τιμολογιακών μέτρων).
 - iii. Μετά την πλημμύρα που έγινε στα τέλη του 1999, καταστράφηκε το έργο προσωρινής υδροληψίας από τον Εύηνο με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η μεταφορά νερού από τη λεκάνη του Εύηνου. Αν και αναμένεται ότι τα οριστικά έργα υδροληψίας θα έχουν ολοκληρωθεί την άνοιξη του 2001, δεν πρέπει να αναμένεται ότι ο Εύηνος θα συμβάλει στην υδροδότηση της πρωτεύουσας το υδρολογικό έτος 2000-01, δεδομένου ότι για να λειτουργήσουν τα οριστικά έργα θα πρέπει να πληρωθεί ο νεκρός όγκος του ταμιευτήρα.
 - iv. Στην αρχή του υδρολογικού έτους (1 Οκτωβρίου 2000) τα ωφέλιμα αποθέματα των ταμιευτήρων ήταν 372 hm³ για το Μόρνο (μετρούμενα από τη στάθμη υδροληψίας, αν και με πλώτα αντλιοστάσια είναι δυνατό να αντληθούν περίπου 100 hm³ επιπλέον), 323 hm³ για την Υλίκη και 15 hm³ για το Μαραθώνα (σύνολο 720 hm³). Επισημαίνεται ότι το απόθεμα στο Μαραθώνα είναι κάτω από τα ασφαλή επίπεδα (για κάλυψη έκτακτων περιστατικών) και θα πρέπει να αυξηθεί με μεταφορά νερού από άλλους ταμιευτήρες.
16. Με βάση τα πιο πάνω χαρακτηριστικά, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (αλλά και ο ίδιος ο λειτουργικός κανόνας του Σχ. 5.2 που προαναφέρθηκε) οδηγούν στο συμπέρασμα ότι κατά τους πρώτους μήνες του τρέχοντος υδρολογικού έτους αποκλείεται να χρειαστεί η άντληση νερού από την Υλίκη ή από εφεδρικές πηγές αλλά θεωρείται απίθανο να μη χρειαστεί καθόλου άντληση σε όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους (εκτός αν ανακατασκευαστούν τα έργα προσωρινής υδροληψίας από τον Εύηνο και αφεθεί η στάθμη του Μαραθώνα στα σημερινά χαμηλά επίπεδα). Η αναμενόμενη ποσότητα ενέργειας που θα χρειαστεί για την άντληση, όπως προκύπτει από τη μέση τιμή 200 προσομοιώσεων, ανέρχεται σε 50 GWh. Μέρος αυτής της ενέργειας διατίθεται για την αύξηση του αποθέματος του Μαραθώνα, σε επίπεδα της τάξης των 35 hm³. Εάν υιοθετηθεί χαμηλότερο επίπεδο αποθεμάτων ασφαλείας στο Μαραθώνα, της τάξης των 23-33 hm³, η μέση απαιτούμενη ενέργεια θα μειωθεί κατά 20 περίπου GWh. Σημειώνεται

ότι το θέμα των βέλτιστων αποθεμάτων ασφαλείας Μαραθώνα βρίσκεται ακόμα υπό διερεύνηση.

6 Επιχειρησιακή ολοκλήρωση του συστήματος

6.1 Εισαγωγή

Με την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης του ερευνητικού έργου ξεκινά η δεύτερη φάση, η οποία αποσκοπεί στην επιχειρησιακή ολοκλήρωση του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων. Το τελικό σύστημα στην επιχειρησιακή του μορφή, εκτός από την πλήρη και λεπτομερή προσομοίωση των εξωτερικών υδραγωγείων, των ταμιευτήρων και των άλλων έργων που συνδέονται με το εξωτερικό δίκτυο ύδρευσης της Αθήνας, θα αξιοποιεί τις πληροφορίες από το σύστημα τηλεμέτρησης που θα υλοποιηθεί προκειμένου να πραγματοποιήσει τη βελτιστοποίηση των κανόνων λειτουργίας του συστήματος ταμιευτήρων. Ακόμη θα συνυπολογίζει, πέραν της ύδρευσης των Αθηνών, και τις άλλες θεσμοθετημένες χρήσεις νερού και θα προτείνει εναλλακτικές δυνατότητες λειτουργίας σε περίπτωση βλαβών του συστήματος. Η ολοκληρωμένη πρόγνωση των οικονομικών επιπτώσεων από τη λειτουργία του συστήματος καθώς και η αναπροσαρμογή των κανόνων λειτουργίας σε περίπτωση που αυτό κριθεί αναγκαίο (π.χ. αλλαγή των υδρολογικών ή οικονομικών δεδομένων) αποτελούν βασικούς στόχους του έργου. Τα ιδιαίτερα σημαντικά προβλήματα που τίθενται από την επιχειρησιακή λειτουργία του συστήματος (π.χ. η προσομοίωση/βελτιστοποίηση με ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεσμάτων, κάτω από σαφείς χρονικούς περιορισμούς), προσδίδουν στο έργο μια σημαντική ερευνητική συνιστώσα.

Ιδιαίτερη σημασία στη δεύτερη φάση θα δοθεί, εκτός από τη λειτουργία της υποστήριξης της διαχείρισης, και στη λειτουργία της εποπτείας του υδροδοτικού συστήματος. Για το σκοπό αυτό, θα αναπτυχθούν κατάλληλες υπολογιστικές διαδικασίες για την επεξεργασία και εποπτική παρουσίαση δεδομένων τόσο από την Κεντρική Βάση Δεδομένων, όσο και από το σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας.

Στο τελικό στάδιο της επιχειρησιακής λειτουργίας εγκαθίσταται το υπολογιστικό σύστημα στο περιβάλλον που πρόκειται να λειτουργήσει επιχειρησιακά και έπειτα από μια μεταβατική φάση προσαρμογής του και εκπαίδευσης του προσωπικού που θα το χειρίζεται, τίθεται οριστικά σε λειτουργία.

6.2 Σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας

Στην πρώτη φάση δόθηκε βάρος στη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων με γεωγραφική αναφορά. Στη δεύτερη φάση η έμφαση θα δοθεί στην κατασκευή προγραμμάτων υπολογιστή, τα οποία θα επεξεργάζονται, θα οπτικοποιούν και θα παρουσιάζουν υπό μορφή πινάκων, γραφημάτων και χαρτών τα γεωγραφικά δεδομένα. Ειδικότερα, προβλέπονται διάφορες μορφές παρουσίασης, όπως θεματικοί χάρτες, χάρτες κατανομής μετρήσεων στο χώρο, διαγράμματα εξέλιξης χρονοσειρών, τομές κατά μήκος συγκεκριμένων διαδρομών, σχηματικά διαγράμματα (τοπολογίας αγωγών και θέσεων έργων), κ.ά.

6.3 Σύστημα μέτρησης των υδατικών πόρων

Το σύστημα μέτρησης υδατικών πόρων μελετήθηκε στην πρώτη φάση αλλά δεν υλοποιήθηκε ακόμη (λόγω διαδικαστικών προβλημάτων του σχετικού διαγωνισμού που διενήργησε η ΕΥΔΑΠ για την

προμήθεια και εγκατάσταση των οργάνων). Είναι επιτακτική ανάγκη να υλοποιηθεί το σύστημα με τον ταχύτερο δυνατό ρυθμό στην αρχή της δεύτερης φάσης του ερευνητικού έργου. Εκτός από τις εργασίες υλοποίησης του μετρητικού συστήματος, μια άλλη σειρά εργασιών αποσκοπεί στην αυτόματη καταχώρηση και επεξεργασία των δεδομένων. Συγκεκριμένα, θα κατασκευαστούν προγράμματα για την αυτόματη και άμεση καταχώρηση και επεξεργασία των δεδομένων των τηλεμετρικών σταθμών, την εξαγωγή δευτερογενών μεταβλητών, όπως επιφανειακής βροχόπτωσης και εξάτμισης από την επιφάνεια των ταμιευτήρων, την επεξεργασία των μετρήσεων στάθμης και παροχής ποταμών προκειμένου να εξαχθούν ημερήσιες χρονοσειρές της παροχής και ισοζύγια των ταμιευτήρων. Τα προγράμματα θα είναι απολύτως προσαρμοσμένα στις ιδιαιτερότητες του μετρητικού συστήματος και θα είναι προσανατολισμένα στην τροφοδοσία των συστημάτων πρόγνωσης και διαχείρισης. Προγραμματίζεται ακόμη μια σειρά εφαρμογών λογισμικού που θα επιτρέπει την προβολή των σχετικών δεδομένων στο Διαδίκτυο σε πραγματικό χρόνο για την ενημέρωση των αρμόδιων φορέων και του κοινού.

6.4 Σύστημα εκτίμησης και πρόγνωσης των υδατικών πόρων

Το πρόγραμμα *Κασταλία* που αποσκοπεί στην προσομοίωση και πρόγνωση των επιφανειακών υδατικών πόρων και την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητάς τους έχει πρακτικώς ολοκληρωθεί στην πρώτη φάση του έργου. Απομένει ο έλεγχος του προγράμματος και οι βελτιωτικές προσαρμογές με βάση και τις παρατηρήσεις των χρηστών, η προσθήκη υπολογιστικών διαδικασιών για την αξιοποίηση των επίκαιρων δεδομένων που θα προέρχονται από το αυτόματο μετρητικό σύστημα, καθώς και η επιχειρησιακή διασύνδεσή του με το σύστημα *Υδρονομέας*.

Το σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, το οποίο δίνει έμφαση στα υπόγεια νερά της λεκάνης, προγραμματίζεται να επεκταθεί με τη θεώρηση και των υπόγειων νερών της Υλίκης και να συνδυαστεί επιχειρησιακά με το σύστημα *Υδρονομέας*. Επιπλέον, θα επιχειρηθεί η εκτίμηση των υδατικών αποθεμάτων των άλλων υπόγειων υδατικών πόρων (εκτός του Βοιωτικού Κηφισού-Υλίκης, π.χ. Μαυροσουβάλας), με βάση τα αποτελέσματα άλλων προγραμμάτων και μελετών της ΕΥΔΑΠ.

6.5 Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης

Η ανάπτυξη της τελικής επιχειρησιακής έκδοσης του υπολογιστικού συστήματος *Υδρονομέας* προϋποθέτει τις ακόλουθες εργασίες:

1. Κωδικοποίηση υποσυστημάτων με βάση τον τελικό σχεδιασμό.
2. Έλεγχος υποσυστημάτων που αφορά στην ορθότητα, πληρότητα και τήρηση των περιορισμών που προδιαγράφηκαν.
3. Αναθεώρηση και συμπλήρωση της βάσης δεδομένων της πρώτης φάσης.
4. Ενοποίηση υποσυστημάτων σε ένα ολοκληρωμένο λογισμικό πακέτο.
5. Εισαγωγή στη βάση δεδομένων διαχειριστικών σεναρίων ομαλών συνθηκών και σεναρίων έκτακτων περιπτώσεων.
6. Έλεγχος του συνολικού υπολογιστικού συστήματος που θα πραγματοποιηθεί με διαδοχικές προσομοιώσεις/βελτιστοποιήσεις χρησιμοποιώντας πραγματικά και υποθετικά δεδομένα και με διάφορα σενάρια, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία και αξιοπιστία του συστήματος.
7. Σύνταξη οδηγιών χρήσης λογισμικού.

Η επιχειρησιακή λειτουργία συστήματος περιλαμβάνει τις ακόλουθες εργασίες:

1. Εγκατάσταση του υπολογιστικού συστήματος στον τελικό χώρο λειτουργίας του.
2. Σύνδεση με τηλεμετρικούς σταθμούς και άλλες μονάδες παροχής πληροφοριών.
3. Δοκιμαστική λειτουργία του συστήματος κάτω από πραγματικές συνθήκες.

Στην επιχειρησιακή φάση του έργου θα δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην λειτουργία του συστήματος σε περιόδους βλάβης κάποιων από τις συνιστώσες του δικτύου. Το σύστημα θα πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμοστεί στη νέα κατάσταση μέσα σε περιορισμένο χρονικό διάστημα. Η προσαρμογή αυτή συνίσταται στην τροποποίηση του μοντέλου του δικτύου με τα χαρακτηριστικά του όπως προκύπτουν από την νέα κατάσταση, και στην επιλογή ενός προκαθορισμένου σεναρίου έκτακτης ανάγκης.

6.6 Συνεργασία των συστημάτων

Βασική συνιστώσα της δεύτερης φάσης του έργου είναι η απρόσκοπτη συνεργασία των υπολογιστικών συστημάτων μεταξύ τους, με σκοπό την άμεση αξιοποίηση των επί μέρους αποτελεσμάτων του ενός συστήματος από το άλλο εντός προκαθορισμένων χρονικών πλαισίων.

Για το σκοπό αυτό θα ενοποιηθούν οι επί μέρους βάσεις δεδομένων σε μια κεντρική βάση, η οποία θα εμπλουτίζεται συνεχώς. Καθώς όλα τα συστήματα θα έχουν πρόσβαση στα ίδια δεδομένα, τυχόν αλλαγές που θα γίνονται στα δεδομένα αυτά από το ένα σύστημα θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ως δεδομένα εισόδου από κάποιο άλλο.

Σε αυτήν τη λογική εντάσσεται και η προβλεπόμενη στην δεύτερη φάση του έργου αξιοποίηση των επίκαιρων τηλεμετρικών δεδομένων από το σύστημα *Κασταλία*. Το σύστημα αυτό θα είναι σε θέση να χρησιμοποιεί άμεσα τα επίκαιρα υδρολογικά δεδομένα και να παράγει επικαιροποιημένες συνθετικές χρονοσειρές που είναι απαραίτητες για τη διενέργεια αξιόπιστων προσομοιώσεων. Κατ' αυτόν τον τρόπο το σύστημα *Υδρονομέας*, το οποίο θα τροφοδοτείται με τις συνθετικές χρονοσειρές αυτές, θα προσαρμόζει άμεσα τόσο τους κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων, όσο και τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της επιλεγμένης διαχειριστικής πολιτικής.

Επίσης στην δεύτερη φάση του έργου, όπως προαναφέρθηκε, θα υλοποιηθεί η αλληλεπίδραση του μοντέλου προσομοίωσης της υδρολογικής λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και του *Υδρονομέας* με αποτέλεσμα την ακριβέστερη απεικόνιση αυτού του τμήματος του υδροσυστήματος σε μοντέλο.

Σημαντικό ρόλο στην επιχειρησιακή φάση του έργου θα έχει το σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας. Με το σύστημα αυτό θα πραγματοποιείται η οργάνωση, και οπτικοποίηση τόσο των ιστορικών δεδομένων που έχουν γεωγραφική συνιστώσα, όσο και των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων για διάφορα μελλοντικά σενάρια, όπως προκύπτουν από την εκτέλεση των προσομοιώσεων.

6.7 Προσαρμογή των συστημάτων στην επιχειρησιακή δομή της ΕΥΔΑΠ

Στη δεύτερη φάση του έργου τα συστήματα θα πρέπει να προσαρμοστούν, έτσι ώστε να ενταχθούν στην επιχειρησιακή δομή της ΕΥΔΑΠ και να καλύπτουν καλύτερα τις ανάγκες της. Αυτό θα διαφανεί πιο συγκεκριμένα κατά την διάρκεια δοκιμών των συστημάτων κάτω από συνθήκες επιχειρησιακής λειτουργίας. Οι αναγκαίες προσαρμογές προβλέπεται να περιλαμβάνουν διάφορες πτυχές της λειτουργίας των συστημάτων, από το είδος, το εύρος και την μορφή των αποτελεσμάτων που θα καταγράφουν, μέχρι την προσαρμογή στις ανάγκες των χρηστών του λογισμικού που αναπτύσσεται. Είναι προφανές ότι αυτή η διαδικασία θα απαιτήσει την στενή συνεργασία των αρμόδιων της ΕΥΔΑΠ με την ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ.

6.8 Ολυμπιακοί Αγώνες 2004

Τέλος ένα από τα βασικά σενάρια που θα προσομοιωθούν στη δεύτερη φάση του έργου αφορά τις συνθήκες που θα προκύψουν από την αναμενόμενη αύξηση των αναγκών ύδρευσης την περίοδο των Ολυμπιακών Αγώνων 2004.

Αναφορές

- Bras, R. L., and I. Rodriguez-Iturbe, *Random Functions and Hydrology*, Dover Publications, 1993.
- 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.
- Hurst, H. E., Long-term storage capacity of reservoirs, *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 116, pp. 776-808, 1951.
- 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.
- Koutsoyiannis, D., The Athens water resource system: A modern management perspective, *Invited lecture at the Imperial College*, London, December 1999, Imperial College of Science, Technology and Medicine, 1999.
- 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., Coupling stochastic models of different time scales, *Water Resources Research*, 37(2), 379-392, 2001.
- 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.
- 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.
- Mandelbrot, B. B., Une class de processus stochastiques homothetiques a soi: Application a la loi climatologique de H. E. Hrst, *Compte Rendus Academie Science*, 260, 3284-3277, 1965.
- Mandelbrot, B. B., and J. R. Wallis, Computer experiments with fractional Gaussian noises, Parts 1, 2 and 3, *Water Resources Research*, 5(1), 1969.
- Mejia, J. M., I. Rodriguez-Iturbe, and D. R. Dawdy, Streamflow simulation, 2, The broken line process as a potential model for hydrologic simulation, *Water Resources Research*, 8(4), 931-941, 1972.
- Nalbantis, I. and D. Koutsoyiannis, A parametric rule for planning and management of multiple reservoir systems, *Water Resources Research*, 33(9), 2165-2177, 1997.
- World Meteorological Organization (WMO), Guide to Hydrological Instruments and Methods of Observation, Publication 8, Fifth Edition, Geneva, 1983.

- Αλεξοπούλου, Κ., Π. Αναστασοπούλου, Δ. Μπόκου, Ν. Σταυρίδης, και Ν. Μαμάσης, *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Φάση Α, Τεύχος 2, Βροχομετρικοί και υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1992.
- ΕΥΔΑΠ, Διαχειριστικό Σχέδιο Ύδρευσης (Μετάφραση από το αγγλικό πρωτότυπο), τεχνική υποστήριξη: Knight Riésold, Δεκέμβριος 1996.
- Καραβοκυρός, Γ., Ι. Ναλμπάντης, Ν. Μαμάσης, Α. Κουκουβίνος, και Α. Ευστρατιάδης, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 1, Ανάλυση απαιτήσεων, 1999.
- 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.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, ΕΜΠ, 1997.
- 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 Σ. Πολιτάκη, Η εξέλιξη της ζήτησης νερού στην Αθήνα, *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. Παγούνης, Μ., Υδρογεωλογική έρευνα Νομού Βοιωτίας, ΙΓΜΕ, Αθήνα, 1994.
- 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
- Ρώτη, Σ., και Χ. Ανυφαντή, *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Φάση Α, Τεύχος 10, Ισοζύγια ταμειυτήρων, 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.
- ΥΠΕΧΩΔΕ, *Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης*, Υδρογεωλογικό μοντέλο λεκάνης πηγών Βοιωτικού Κηφισού, 2000α.
- ΥΠΕΧΩΔΕ, *Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης* Γεωργοτεχνική μελέτη, 2000β.