

# ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Δ. Κουτσογιάννης<sup>1</sup> και Α. Ευστρατιάδης<sup>2</sup>

Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)

<sup>1</sup> dk@itia.ntua.gr <sup>2</sup> andreas@itia.ntua.gr

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (ΣΥΑ), σε συνδυασμό με την ανθρώπινη κρίση και εμπειρία, μπορούν να συμβάλλουν στη λήψη ορθολογικών αποφάσεων σε ευρύ φάσμα ασθενώς δομημένων τεχνολογικών προβλημάτων. Η βέλτιστη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων αποτελεί ένα από τα τυπικά πεδία εφαρμογής των ΣΥΑ. Η πολυπλοκότητα της διαχείρισης των υδατικών πόρων δημιουργεί την ανάγκη ολιστικής προσέγγισης που βασίζεται στη θεωρία συστημάτων και κάνει χρήση προχωρημένων μαθηματικών τεχνικών. Στην εργασία συνοψίζεται η εμπειρία που έχει αποκτηθεί στην ανάπτυξη ΣΥΑ για τη διαχείριση μεγάλων υδροσυστημάτων του ελλαδικού χώρου. Ειδικότερα, περιγράφεται η πορεία προς ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο, το οποίο περιλαμβάνει πρωτότυπα μοντέλα στοχαστικής ανάλυσης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Το εν λόγω πλαίσιο, το οποίο διαρκώς βελτιώνεται και εξελίσσεται, έχει πρόσφατα χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά για την υποστήριξη της εποπτείας και διαχείρισης του εξαιρετικά απαιτητικού υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Στο άμεσο μέλλον, προβλέπεται η γενίκευση και εμπλουτισμός των μαθηματικών μοντέλων και υπολογιστικών εργαλείων, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούνται για τη βιώσιμη διαχείριση υδροσυστημάτων σε ευρύ φάσμα κλιμάκων.

## EXPERIENCE FROM THE DEVELOPMENT OF DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR THE MANAGEMENT OF LARGE-SCALE HYDROSYSTEMS OF GREECE

### ABSTRACT

Decision support systems (DSS), in combination with human judgment and experience, may guide to rational decisions in a variety of ill-structured technological problems. Optimal management of water recourse systems constitutes a typical field for application of DSS. The complexity of the water resource management raises the need for a holistic approach, based on systems theory and making use of advanced mathematical techniques. The paper presents the experience gained in developing of DSS for the management of large-scale hydrosystems in Greece. Specifically, it describes the route to an integrated methodological framework, comprising innovative models for stochastic analysis, simulation and optimisation. This framework, which is progressively improved and evolved, has been recently implemented operationally for the support of the supervision and management of the exceptionally complex water supply system of Athens. In the near future, the generalisation and enhancement of the mathematical models and computer tools is scheduled, in order to make a comprehensive tool for the sustainable management of hydrosystems of a wide range of scales.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Η έννοια των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων

Σύμφωνα με έναν γενικό ορισμό, τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (ΣΥΑ – αγγλικά Decision Support Systems, DSS) είναι εφαρμογές λογισμικού που υποστηρίζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, βοηθώντας τους αρμόδιους χρήστες να κατανοήσουν τις επιπτώσεις των δράσεών τους (French, 2000). Σημειώνεται ότι ο όρος «σύστημα υποστήριξης αποφάσεων» αντικατέστησε σχεδόν ολοκληρωτικά τις πρακτικά ισοδύναμες έννοιες «έμπειρο σύστημα» και «τεχνητή νοημοσύνη», οι οποίες ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένες στην επιστήμη της πληροφορικής μέχρι πριν μία δεκαετία. Η διαφοροποίηση αυτή σηματοδοτεί μια σημαντική στροφή στην προτεραιότητα των στόχων ανάπτυξης των υπολογιστικών συστημάτων, ήτοι από την υποκατάσταση στην υποβοήθηση της κρίσης του χρήστη-εμπειρογνώμονα (Dreyfus and Dreyfus, 1986· Watkins and McKinney, 1995).

Τα ΣΥΑ έχουν βρει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογής, κυρίως στον έλεγχο και στη διαχείριση πολύπλοκων φυσικών ή τεχνητών συστημάτων (Eom et al., 1998· Turban and Aronson, 1998). Μπορεί να λεχθεί ότι τα ΣΥΑ κινούνται στην αιχμή της επιστήμης και τεχνολογίας, αξιοποιώντας αφενός τις ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις στον χώρο της πληροφορικής και αφετέρου την παραγωγή νέας γνώσης στο επιστημονικό πεδίο της μαθηματικής προσομοίωσης και ανάλυσης συστημάτων.

Επιχειρώντας να δώσουμε έναν πιο εξειδικευμένο ορισμό, μπορούμε να διακρίνουμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά ενός ΣΥΑ:

1. Πρόκειται για ολοκληρωμένο σύστημα από υπολογιστικά εργαλεία, με διαδραστικό, κατά κανόνα, περιβάλλον λειτουργίας (προϋποθέτει δηλαδή επέμβαση του χρήστη, μέσω κατάλληλα σχεδιασμένου interface).
2. Παρέχει δυνατότητες τυποποίησης, οργάνωσης, διαχείρισης και επεξεργασίας των πληροφοριών (π.χ. μέσω βάσεων δεδομένων) καθώς και οπτικοποίησης αυτών (π.χ. μέσω συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας).
3. Ενσωματώνει μαθηματικά εργαλεία ανάλυσης συστημάτων, όπως μοντέλα προσομοίωσης, βελτιστοποίησης και ανάλυσης αποφάσεων.
4. Σχεδιάζεται με στόχο την υποβοήθηση του χρήστη στη λήψη αποφάσεων σε σχετικά πολύπλοκα και ασθενώς δομημένα προβλήματα (ήτοι προβλήματα που δεν επιδέχονται άμεση διατύπωση εξισώσεων), μέσω της διατύπωσης και λεπτομερούς διερεύνησης σειράς εναλλακτικών επιλογών.

Είναι προφανές ότι ακόμη και το πιο εξελιγμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων δεν είναι δυνατό να υποκαταστήσει τον άνθρωπο στο σύνολο των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Οι εν λόγω δραστηριότητες μπορούν να καταταχθούν στις ακόλουθες κατηγορίες (βλ. και Sage, 1993):

1. Συλλογή πρωτογενών πληροφοριών.
2. Επεξεργασία και οργάνωση δεδομένων.
3. Διατύπωση και διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων.
4. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.
5. Ανάληψη δράσεων.

Τα τελευταία χρόνια, η συλλογή των πρωτογενών πληροφοριών γίνεται όλο και περισσότερο μέσω συστημάτων αυτοματισμού των μετρήσεων, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως συνιστώσες ενός ΣΥΑ. Ωστόσο, η κύρια λειτουργία των ΣΥΑ

επικεντρώνεται στις δραστηριότητες 2 και 3. Συγκεκριμένα, η επεξεργασία και οργάνωση των δεδομένων (ήτοι η μετατροπή της πρωτογενούς πληροφορίας, δηλαδή της μέτρησης, σε αξιοποιήσιμη από το μαθηματικό μοντέλο πληροφορία) πραγματοποιείται μέσω εφαρμογών διαχείρισης και επεξεργασίας των πληροφοριών, που μπορεί να είναι από απλά εργαλεία λογιστικών φύλλων μέχρι πιο σύνθετα εργαλεία σχεσιακών βάσεων δεδομένων και συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας. Από την άλλη πλευρά, η δραστηριότητα 3, η οποία αποτελεί την κεντρική συνιστώσα ενός ΣΥΑ, αναφέρεται στην εφαρμογή εξειδικευμένων μαθηματικών μοντέλων (από απλά εμπειρικά μοντέλα έως εξελιγμένα μοντέλα προσομοίωσης και βελτιστοποίησης), τα οποία αναπαριστούν τη δυναμική εξέλιξη του υπό μελέτη συστήματος, διερευνώντας τις επιπτώσεις εναλλακτικών δράσεων που σχετίζονται με τη λειτουργία και διαχείριση αυτού. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αξιολογήσει αλλά και να ερμηνεύσει ένα ευρύ φάσμα τέτοιων δράσεων (δραστηριότητα 4), εστιάζοντας μάλιστα όχι μόνο στις άμεσες επιπτώσεις (που μπορεί να είναι και προφανείς) αλλά και στις μελλοντικές. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η λήψη της τελικής απόφασης και, συνεπακόλουθα, η ανάληψη των σχετικών δράσεων τεκμηριώνεται αντικειμενικά, και σε συνδυασμό με την εμπειρία και κρίση του αναλυτή οδηγεί στην επιλογή της απόφασης με ορθολογικά κριτήρια. Τονίζεται, πάντως, ότι η λήψη απόφασης και η ανάληψη δράσεων (δραστηριότητα 5), προσιδιάζει στον άνθρωπο, ο οποίος έχει και την ευθύνη για τις συνέπειες και δεν μπορεί να υποκατασταθεί από το ΣΥΑ.

Δεν πρέπει να παραγνωριστεί το γεγονός ότι η προσαρμογή ενός ΣΥΑ σε ένα συγκεκριμένο πρακτικό πρόβλημα καθώς και η επιχειρησιακή λειτουργία του δεν είναι εύκολη. Απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό τόσο στο στάδιο της ανάπτυξης όσο και στο στάδιο της συντήρησης. Πράγματι, εξαιτίας των ταχύτατων τεχνολογικών-μεθοδολογικών εξελίξεων, τα ΣΥΑ απαιτούν διαρκή προσαρμογή στις νέες απαιτήσεις. Η ανάγκη αυτή προκύπτει και λόγω της σύγχρονης τάσης για ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των προβλημάτων, όπου εκτός από τις τεχνικές συνιστώσες λαμβάνονται υπόψη και οι ποικίλοι θεσμικοί, κοινωνικοί και οικονομικοί παράγοντες, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία λήψης των αποφάσεων όλο και πιο πολύπλοκη. Όσον για τη λειτουργία των ΣΥΑ, παρόλο που αυτά οφείλουν να σχεδιάζονται με τρόπο ώστε να είναι όσο το δυνατό πιο φιλικά, δεν παύουν να απαιτούν χρόνο, αφενός για την εκμάθηση των εργαλείων κι αφετέρου για την κατάρτιση και εξοικείωση των χρηστών με τις μεθοδολογίες και τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται.

## **1.2 Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων στη διαχείριση των υδατικών πόρων**

Λόγω της πολυπλοκότητας στη δομή και τη λειτουργία τους, της στοχαστικής φύσης των σχετιζόμενων φυσικών διεργασιών, της πληθώρας δεδομένων που απαιτεί η διαχείρισή τους, καθώς και της ύπαρξης κατά κανόνα αντικρουόμενων στόχων και περιορισμών, τα συστήματα υδατικών πόρων έχουν αποτελέσει προνομιακό πεδίο εφαρμογής των ΣΥΑ. Μερικές από τις τυπικές εφαρμογές των ΣΥΑ στην ευρύτερη περιοχή των υδατικών πόρων είναι (βλ. και Watkins and McKinney, 1995):

- Διαχείριση λιμνών και ταμιευτήρων (για την εξυπηρέτηση στόχων υδροδότησης, παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, ελέγχου ρύπανσης).
- Έλεγχος πλημμυρών και διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου (σε λεκάνες ποταμών αλλά και αστικές λεκάνες).

- Διαχείριση υδροφορέων - συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων πόρων.
- Διαχείριση συστημάτων διανομής νερού (δίκτυα ανοιχτών και κλειστών αγωγών, αντλιοστάσια, κλπ.).
- Έλεγχος βλαβών ή διαρροών σε δίκτυα ύδρευσης.
- Έλεγχος ρύπανσης σε λεκάνες απορροής και Δέλτα ποταμών.
- Διαχείριση μη σημειακών πηγών ρύπανσης σε γεωργικές περιοχές.

Η παρούσα εργασία εστιάζεται στη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων μεγάλης κλίμακας. Πρόκειται για υδροσυστήματα που περιλαμβάνουν μεγάλα υδραυλικά έργα συλλογής, αξιοποίησης και μεταφοράς νερού (ταμιευτήρες, υδροηλεκτρικοί σταθμοί, γεωτρήσεις, υδραγωγεία, αντλιοστάσια), τα οποία μπορούν να εκτείνονται σε περισσότερες από μία λεκάνες απορροής. Εκτός των τεχνικών έργων, στα εν λόγω υδροσυστήματα περιλαμβάνονται ακόμη το φυσικό περιβάλλον και τα σχετιζόμενα οικοσυστήματα.

Για τη διαχείριση τέτοιων μεγάλης κλίμακας υδροσυστημάτων έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικά πακέτα, τα οποία αποτελούν εμπορικά προϊόντα και χρησιμοποιούνται ως ΣΥΑ μετά από προσαρμογή στο υπό μελέτη υδροσύστημα. Τα εν λόγω πακέτα έχουν αναπτυχθεί και συντηρούνται από εξειδικευμένα ερευνητικά κέντρα (όπως είναι στην Ευρώπη η Delft Hydraulics στην Ολλανδία, η Danish Hydraulic Institute στη Δανία και η HR Wallingford στη Μεγάλη Βρετανία). Οι εν λόγω οργανισμοί προωθούν τα προϊόντα τους σε όλο τον κόσμο, παρέχοντας παράλληλα υπηρεσίες συμβούλου σε έργα σχετικά με την αξιοποίηση και διαχείριση των υδατικών πόρων. Σε μερικά από τα προϊόντα αυτά προτιμάται η χρήση απλουστευμένων μοντέλων που απευθύνονται σε μη καταρτισμένους χρήστες (π.χ. στελέχη των τοπικών φορέων διαχείρισης). Από την άλλη πλευρά, σε πανεπιστήμια αναπτύσσονται πιο πλήρη, από πλευράς θεωρητικού υποβάθρου, ΣΥΑ, πλην όμως η εφαρμογή τους είναι συνήθως ακαδημαϊκού ή πιλοτικού χαρακτήρα, χωρίς να δίνεται έμφαση στο επιχειρησιακό σκέλος (γενικότητα, φιλικότητα περιβάλλοντος, συμβατότητα με άλλες εφαρμογές). Συνοψίζοντας, μπορεί να λεχθεί ότι παρά την ανάπτυξη πληθώρας ΣΥΑ με αντικείμενο τη διαχείριση των υδατικών πόρων, φαίνεται γενικά να υπάρχει ασυμβατότητα μεταξύ της τεχνολογικής (από πλευράς ποιότητας και ευελιξίας του λογισμικού) και μεθοδολογικής (όσον αφορά τα χρησιμοποιούμενα μαθηματικά μοντέλα) συνιστώσας τους.

Στην παρούσα εργασία επισκοπείται η προσπάθεια ολοκληρωμένης προσέγγισης που επιχειρείται στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ, η οποία έχει ξεκινήσει από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 και αποσκοπεί στην υλοποίηση ΣΥΑ τα οποία αφενός υποστηρίζουν μεθοδολογίες αιχμής κι αφετέρου αξιοποιούν τις σύγχρονες εξελίξεις στον χώρο της πληροφορικής. Η εργασία διαρθρώνεται σε πέντε ενότητες, συμπεριλαμβανομένης και της παρούσας εισαγωγής. Στην ενότητα 2 επιχειρείται ιστορική αναδρομή της υπερδεκαετούς ερευνητικής δραστηριότητας στην ανάπτυξη ΣΥΑ σχετικών με τη διαχείριση των υδατικών πόρων στην Ελλάδα. Στην ενότητα 3 παρουσιάζεται συνοπτικά το κύριο μεθοδολογικό πλαίσιο που έχει ως τώρα αναπτυχθεί, σημαντικό μέρος του οποίου είναι προϊόν πρωτότυπης ερευνητικής εργασίας. Στην ενότητα 4 περιγράφονται οι επιμέρους συνιστώσες του ΣΥΑ που αναπτύχθηκε για την επιχειρησιακή διαχείριση του συστήματος υδροδότησης της Αθήνας, το οποίο είναι και το πλέον πολύπλοκο υδροσύστημα του ελληνικού χώρου. Τέλος, στην ενότητα 5 συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας και παρουσιάζονται οι μελλοντικές προοπτικές.

### 3. Ιστορικό των ΣΥΑ που αναπτύχθηκαν στο ΕΜΠ

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ έχουν γίνει μείζονες προσπάθειες για την ανάπτυξη ΣΥΑ για τη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων. Η πρώτη προσπάθεια επιχειρήθηκε την περίοδο 1989-1991, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών». Αντικείμενο του έργου ήταν η εκτίμηση του υδατικού δυναμικού των λεκανών Μόρνου, Ευήνου και Υλίκης, και η διερεύνηση μεθόδων ορθολογικής διαχείρισής του. Στα πλαίσια αυτά, υλοποιήθηκε η πρώτη ολοκληρωμένη εφαρμογή πληροφορικής (σε λειτουργικό σύστημα MS-DOS) που συντάχθηκε και λειτούργησε στην Ελλάδα πάνω στο θέμα της ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων (Ναλμπάντης, 1990). Επιπλέον, ήταν η πρώτη φορά που τα έργα υδροδότησης της Αθήνας μελετήθηκαν ως ενιαίο σύστημα, με εφαρμογή μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης. Μάλιστα, το ίδιο μοντέλο εφαρμόστηκε για τη διερεύνηση της επίδοσης διάφορων εναλλακτικών διατάξεων του ταμιευτήρα Ευήνου, στα πλαίσια της υδρολογικής μελέτης του έργου (Κουτσογιάννης κ.ά., 1991).

Κατά την περίοδο 1993-1995, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 2», αναπτύχθηκε μια βελτιωμένη έκδοση του προηγούμενου μοντέλου, τόσο σε περιβάλλον Windows 95 όσο και σε Unix. Στο μοντέλο, το οποίο ήταν εστιασμένο στη διαχείριση του συστήματος ταμιευτήρων Μόρνου, Ευήνου και Υλίκης, υλοποιήθηκε το σχήμα παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση, με χρήση γενετικών αλγορίθμων είτε για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος ή για τη μεγιστοποίηση της ασφαλούς απόληψης (Τσακαλίας και Κουτσογιάννης, 1995).

Στα πλαίσια της τρίτης φάσης του ίδιου έργου (1996-1999), έγινε γενίκευση του μοντέλου διαχείρισης, με ανάπτυξη ενός υπολογιστικού πακέτου γενικού σκοπού, υποστηριζόμενου από μια σχεσιακή βάση δεδομένων (Υδρονομέας, έκδοση 1). Το εν λόγω λογισμικό διέθετε δυνατότητες προσαρμογής σε υδροσυστήματα οποιασδήποτε τοπολογίας, χειριζόμενο ένα ευρύ φάσμα χρήσεων νερού καθώς και περιορισμούς αστοχίας. Επιπλέον, παρείχε τη δυνατότητα βελτιστοποίησης όχι μόνο της ασφαλούς απόληψης αλλά και της παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας, μέσω παραμετροποίησης της λειτουργίας των Υ/Η μονάδων. Το λογισμικό Υδρονομέας χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια δύο πιλοτικών εφαρμογών: (α) στο υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας, αποτελούμενο από 4 ταμιευτήρες (Καραβοκυρός κ.ά., 1999), και (β) στο σύστημα ταμιευτήρων Αχελώου-Θεσσαλίας και συναφών έργων εκτροπής, αποτελούμενο από 7 ταμιευτήρες και 7 μονάδες παραγωγής ενέργειας (Ευστρατιάδης και Ζερβός, 1999).

Η γνώση και εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια όλων αυτών των ετών, αξιοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας», σκοπός του οποίου ήταν η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου ΣΥΑ, προσανατολισμένου στην επιχειρησιακή διαχείριση του συστήματος υδροδότησης της Αθήνας. Το εν λόγω έργο, το οποίο βρίσκεται στο στάδιο ολοκλήρωσης (1999-2003), ανατέθηκε και εκπονήθηκε σε συνεργασία με την Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης της Αθήνας (ΕΥΔΑΠ), που θα είναι και ο φορέας-χρήστης του ΣΥΑ. Η δομή του έργου και τα υπολογιστικά εργαλεία που αναπτύχθηκαν περιγράφονται στην ενότητα 4.

### **3. Μεθοδολογικό πλαίσιο ολοκληρωμένης διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων**

#### **3.1 Η έννοια της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων**

Ο βέλτιστος έλεγχος ενός υδροσυστήματος, και ειδικότερα ενός υδροσυστήματος μεγάλης κλίμακας, προϋποθέτει ολιστική προσέγγιση, με στόχο την ποσοτικά αξιόπιστη, ποιοτικά και περιβαλλοντικά ασφαλή, και οικονομικά πρόσφορη κάλυψη των υδατικών αναγκών, μέσω κατάλληλης αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων. Οι επιζητούμενοι τρόποι διαχείρισης 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 μην δημιουργούν πρόβλημα εξάντλησης των υδατικών πόρων στο μέλλον για την κάλυψη των σημερινών αναγκών.

Με βάση τα παραπάνω, έχει υλοποιηθεί ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο για τη βέλτιστη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων, και ειδικότερα συστημάτων πολλαπλών ταμιευτήρων. Το εν λόγω πλαίσιο χρησιμοποιεί αφενός ένα στοχαστικό μοντέλο πρόγνωσης (με τη στατιστική έννοια του όρου) της εξέλιξης των φυσικών εισροών, και αφετέρου ένα μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της λειτουργίας του υδροσυστήματος, τα οποία τροφοδοτείται με τα δεδομένα εξόδου (συνθετικές χρονοσειρές εισροών) του πρώτου μοντέλου. Η περιγραφή των παραπάνω μοντέλων γίνεται στις ενότητες 2.2 και 2.3, αντίστοιχα.

#### **3.2 Γέννηση υδρολογικών χρονοσειρών για προσομοίωση**

Η ανάγκη υπερετήσιας ρύθμισης ενός υδροσυστήματος προϋποθέτει την προσομοίωση της λειτουργίας του για χρονικό ορίζοντα πολλών ετών. Προφανώς, για έναν τέτοιο χρονικό ορίζοντα είναι απολύτως αδύνατη η πρόγνωση της εξέλιξης των υδρολογικών διεργασιών με χρήση συμβατικών ντετερμινιστικών μεθόδων. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιείται η πιθανοτική-στοχαστική προσέγγιση, η οποία μπορεί να δώσει απαντήσεις ως προς τη χρονική πρόγνωση των φαινομένων, ποσοτικοποιώντας την αβεβαιότητα γύρω από την εξέλιξή τους. Η εν λόγω προσέγγιση συνίσταται στην προσαρμογή κατάλληλων στοχαστικών μοντέλων στα ιστορικά δείγματα, μέσω των οποίων γεννώνται υδρολογικές χρονοσειρές μεγάλου μήκους που είναι στατιστικά συνεπείς με τις ιστορικές. Ένας ακόμη παράγοντας που καθιστά αναγκαία τη χρήση συνθετικών χρονοσειρών μεγάλου μήκους είναι η υιοθέτηση υψηλών επιπέδων αξιοπιστίας, τόσο κατά τη φάση σχεδιασμού όσο και λειτουργίας των συστημάτων υδατικών πόρων. Η ασφαλής εκτίμηση της αξιοπιστίας ενός υδροσυστήματος προϋποθέτει την ύπαρξη προσομοιωμένων χρονοσειρών απολήψεων για χρονικό ορίζοντα που υπερβαίνει κατά πολύ το σύνηθες μήκος των ιστορικών δειγμάτων.

Για τη γέννηση των συνθετικών υδρολογικών χρονοσειρών που στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στο μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του υδροσυστήματος, εφαρμόζεται ένα ολοκληρωμένο μαθηματικό πλαίσιο, το οποίο βασίζεται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε πρωτότυπη ερευνητική εργασία. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένα σχήμα δύο χρονικών επιπέδων (ετήσιο, μηνιαίο) και πολλών μεταβλητών. Κάθε μεταβλητή αναφέρεται σε συγκεκριμένη υδρολογική διεργασία, η οποία πραγματοποιείται σε συγκεκριμένη θέση (π.χ. βροχόπτωση ή εισροή σε ταμιευτήρα). Το μοντέλο αναπαράγει τα ουσιώδη στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων, τόσο στην ετήσια όσο και στη μηνιαία κλίμακα, ήτοι τις περιθώριες ροπές μέχρι τρίτης τάξεως (μέσες τιμές, διασπορές, ασυμμετρίες), καθώς

και τις συσχετίσεις των μεταβλητών στο χρόνο (αυτοσυσχετίσεις για μοναδιαία υστέρηση σε μηνιαία κλίμακα και οποιαδήποτε υστέρηση σε ετήσια κλίμακα) και το χώρο (ετεροσυσχετίσεις για μηδενική υστέρηση). Επιπλέον, αναπαράγει το εξαιρετικά κρίσιμο φαινόμενο της εμμονής (γνωστό και ως φαινόμενο Hurst), το οποίο εμφανίζεται με τη μορφή πολλαπλών τυχαίων διακυμάνσεων σε όλες τις υπερετήσιες κλίμακες, και συνδέεται άμεσα με την εμφάνιση μακρών περιόδων χαμηλής υδροφορίας (ξηρασιών).

Συνοπτικά, η λειτουργία του μοντέλου έχει ως εξής: Αρχικά ορίζεται μια θεωρητική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των ετήσιων μεταβλητών, της μορφής (Koutsoyiannis, 2000):

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

όπου  $\gamma_j$  η αυτοσυνδιασπορά για βήμα υστέρησης  $j$ ,  $\gamma_0$  η διασπορά της μεταβλητής,  $\beta$  παράμετρος που σχετίζεται με το φαινόμενο της εμμονής και  $\kappa$  δεύτερη παράμετρος. Επιλέγοντας κατάλληλες τιμές των παραμέτρων  $\beta$  και  $\kappa$  μπορεί να παραχθεί ένα ευρύ φάσμα στοχαστικών δομών, οι οποίες περιγράφουν διεργασίες βραχείας (τύπου ARMA) έως μακράς μνήμης (τύπου FGN).

Η δομή αυτοσυσχέτισης (1) μπορεί να αναπαραχθεί μέσω ενός στάσιμου μοντέλου συμμετρικά κινούμενων μέσων όρων της μορφής:

$$Z_i = \sum_{j=-s}^s \alpha_{|j|} V_{i+j} = \alpha_s V_{i-s} + \dots + \alpha_1 V_{i-1} + \alpha_0 V_i + \alpha_1 V_{i+1} + \dots + \alpha_s V_{i+s} \quad (2)$$

όπου  $i$  η χρονική περίοδος (έτος),  $Z_i$  στάσιμη στοχαστική ανέλιξη,  $V_i$  τυχαίες μεταβλητές (λευκός θόρυβος) και  $\alpha_i$  αριθμητικοί συντελεστές που υπολογίζονται αναλυτικά συναρτήσει της ακολουθίας των αυτοσυνδιασπορών  $\gamma_j$  (Koutsoyiannis, 2000). Το παραπάνω σχήμα διατυπώνεται εύκολα ως πολυμεταβλητό, παράγοντας σε κάθε χρονική περίοδο  $i$  συσχετισμένο λευκό θόρυβο, ήτοι:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{b} \mathbf{W}_i \quad (3)$$

όπου  $\mathbf{V}_i$  διάνυσμα των συσχετισμένων μεταβλητών  $V_i^k$  σε κάθε θέση  $k$  ( $k = 1, \dots, n$ ),  $\mathbf{W}_i$  διάνυσμα τυχαίων όρων ασυσχέτιστων μεταξύ τους στο χώρο και το χρόνο, τα στατιστικά χαρακτηριστικά των οποίων υπολογίζονται συναρτήσει των περιθώριων κατανομών των ιστορικών δειγμάτων, και  $\mathbf{b}$  μητρώο που εξαρτάται από τις συνδιασπορές των ιστορικών δειγμάτων (Koutsoyiannis, 2000). Σημειώνεται ότι επειδή ο υπολογισμός του μητρώου  $\mathbf{b}$  δεν μπορεί να γίνει αναλυτικά, εφαρμόζεται μια καινοτόμος μεθοδολογία βέλτιστης αποσύνθεσης μητρώων, βασισμένη σε ένα σχήμα μη γραμμικής βελτιστοποίησης (Koutsoyiannis, 1999).

Δεδομένου ότι η μακροπρόθεσμη εμμονή των υδρολογικών διεργασιών αναπαράγεται στην ετήσια κλίμακα μέσω της (2), η έμφαση στην κατώτερη (μηνιαία) χρονική κλίμακα δίνεται στην αναπαραγωγή της περιοδικότητας που χαρακτηρίζει τις εν λόγω διεργασίες. Αρχικά, οι μηνιαίες χρονοσειρές παράγονται μέσω ενός πολυμεταβλητού μοντέλου αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης, PAR(1), το οποίο περιγράφεται από τη σχέση:

$$\tilde{\mathbf{X}}_s = \mathbf{a}_s \tilde{\mathbf{X}}_{s-1} + \mathbf{b}_s \mathbf{V}_s \quad (4)$$

όπου  $\tilde{\mathbf{X}}_s$  διάνυσμα των  $n$  συσχετισμένων μεταβλητών που αναφέρονται στο χρονικό βήμα (μήνα)  $s$ ,  $\mathbf{a}_s$  και  $\mathbf{b}_s$  μητρώα παραμέτρων, και  $\mathbf{V}_s$  διάνυσμα τυχαίων όρων ασυσχέτιστων στο χώρο και στο χρόνο, με μοναδιαία διασπορά και με στατιστικά χαρακτηριστικά που υπολογίζονται συναρτήσει των περιθώριων κατανομών των

ιστορικών δειγμάτων. Οι μητρικές παράμετροι  $\mathbf{a}_s$  και  $\mathbf{b}_s$  εκτιμώνται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των από κοινού κατανομών των μηνιαίων ιστορικών δειγμάτων. Ειδικότερα, το μητρώο  $\mathbf{b}_s$  υπολογίζεται με εφαρμογή του αλγορίθμου βέλτιστης αποσύνθεσης μητρώων, με τρόπο ώστε να είναι δυνατή η αναπαραγωγή οσοδήποτε υψηλών συντελεστών ασυμμετρίας (Koutsoyiannis, 1999).

Εφόσον είναι γνωστό το πολυμεταβλητό διάνυσμα των ετήσιων τιμών  $\mathbf{Z}_i$  μέσω της (2), αν σε κάθε έτος  $i$  παραχθεί μια αρχική ακολουθία μηνιαίων τιμών  $\tilde{\mathbf{X}}_s$  μέσω της (4), είναι προφανές ότι το ετήσιο άθροισμα της  $\tilde{\mathbf{Z}}_i$  δεν θα ταυτίζεται με το γνωστό  $\mathbf{Z}_i$ . Θα πρέπει, λοιπόν, η ακολουθία  $\tilde{\mathbf{X}}_s$  να μετασχηματιστεί έτσι ώστε οι τελικές μηνιαίες τιμές  $\mathbf{X}_s$  να είναι συνεπείς με τις αντίστοιχες ετήσιες (διατήρηση αθροιστικής ιδιότητας). Ο απλούστερος δυνατός μετασχηματισμός είναι γραμμικός και δίνεται από την εξίσωση (Koutsoyiannis and Manetas, 1996· Koutsoyiannis, 2001):

$$\mathbf{X}_i^* = \tilde{\mathbf{X}}_i^* + \mathbf{h} (\mathbf{Z}_i^* - \tilde{\mathbf{Z}}_i^*) \quad (5)$$

όπου

$$\mathbf{X}_i^* := [\mathbf{X}_{(i-1)k+1}^T, \dots, \mathbf{X}_{ik}^T]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{Z}_i^* := [\mathbf{Z}_i^T, \mathbf{Z}_{i+1}^T, \mathbf{X}_{(i-1)k}^T]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{h} = \text{Cov}[\mathbf{X}_i^*, \mathbf{Z}_i^*] \{ \text{Cov}[\mathbf{Z}_i^*, \mathbf{Z}_i^*] \}^{-1} \quad (8)$$

ενώ  $k = 12$  είναι ο αριθμός των μηνών ενός έτους, και  $\tilde{\mathbf{X}}_i^*$  και  $\tilde{\mathbf{Z}}_i^*$  είναι διανύσματα μεταβλητών που ορίζονται με βάση τα  $\tilde{\mathbf{X}}_s$  και  $\tilde{\mathbf{Z}}_i$  με τρόπο παρόμοιο με αυτό που ορίζονται τα  $\mathbf{X}_i^*$  και  $\mathbf{Z}_i^*$ . Διευκρινίζεται ότι το διάνυσμα  $\mathbf{X}_i^*$  περιέχει τις μηνιαίες τιμές όλων των μηνών του έτους  $i$  για όλες τις εξεταζόμενες θέσεις (π.χ. για 5 θέσεις, το  $\mathbf{X}_i^*$  περιέχει  $12 \times 5 = 60$  μεταβλητές) και το διάνυσμα  $\mathbf{Z}_i^*$  περιέχει (α) τις ετήσιες τιμές του παρόντος έτους· (β) τις ετήσιες τιμές του επόμενου έτους· και (γ) τις μηνιαίες τιμές του τελευταίου μήνα του προηγούμενου έτους (π.χ. για 5 θέσεις, το  $\mathbf{Z}_i^*$  περιλαμβάνει  $3 \times 5 = 15$  μεταβλητές). Τα στοιχεία (β) και (γ) του  $\mathbf{Z}_i^*$  έχουν περιληφθεί για να εξασφαλίσουν ότι ο μετασχηματισμός δεν θα διατηρήσει μόνο τις συνδιασπορές μεταξύ των μηνών του ίδιου έτους αλλά και εκείνες με το προηγούμενο και επόμενο έτος. Ας σημειωθεί ότι στο στάδιο της γέννησης των μηνιαίων τιμών του έτους  $i$ , οι μηνιαίες τιμές του έτους  $i - 1$  είναι γνωστές (γι' αυτό στο  $\mathbf{Z}_i^*$  έχουν εισαχθεί μηνιαίες τιμές του έτους  $i - 1$ ) αλλά οι μηνιαίες τιμές του έτους  $i + 1$  δεν είναι γνωστές (γι' αυτό στο  $\mathbf{Z}_i^*$  έχουν εισαχθεί ετήσιες τιμές του έτους  $i + 1$ , οι οποίες είναι γνωστές. Αποδεικνύεται ότι με τον ορισμό του μητρώου  $\mathbf{h}$  από τη (8) είναι δυνατή η ακριβής διατήρηση των μέσων τιμών και διασπορών των μεταβλητών  $\mathbf{X}_s$ , όλων των δυνατών συσχετίσεων μεταξύ  $\mathbf{X}_s$  μεταξύ τους αλλά και με τα  $\mathbf{Z}_i$ , καθώς και οποιασδήποτε γραμμικής σχέσης (π.χ. της αθροιστικής ιδιότητας) μεταξύ των  $\mathbf{Z}_i$  και  $\mathbf{X}_s$  (Koutsoyiannis, 2001). Μειονέκτημα του μετασχηματισμού (5) είναι η αδυναμία αναπαραγωγής των ασυμμετριών, το οποίο αντιμετωπίζεται με ένα απλό σχήμα επαναλήψεων, ήτοι με παραγωγή πολλαπλών ακολουθιών  $\tilde{\mathbf{X}}_s$ , με στόχο την ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ των  $\tilde{\mathbf{Z}}_i^*$  και  $\tilde{\mathbf{Z}}_i$ .



Παρόμοια διαδικασία αναγωγής με την (5) εφαρμόζεται και στο ετήσιο μοντέλο, στην περίπτωση που η χρονοσειρά των ετήσιων τιμών  $\mathbf{Z}_i$  παράγεται με δεδομένες αρχικές συνθήκες, ήτοι για δεδομένη ακολουθία της τρέχουσας ( $i = 0$ ) και των παρελθουσών ετήσιων τιμών (λειτουργία υπό μορφή στοχαστικής πρόγνωσης). Αυτό επιτυγχάνεται γεννώντας μια αρχική ακολουθία ετήσιων τιμών  $\tilde{\mathbf{Z}}_i$  χωρίς δέσμευση (ήτοι με τυχαίες αρχικές συνθήκες) και εν συνεχεία εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό (5), με κατάλληλα ορισμένο μητρώο  $\mathbf{h}$ . Με τον τρόπο αυτό, η τελική ακολουθία των  $\mathbf{Z}_i$ , η οποία συμπίπτει ακριβώς με την ιστορική χρονοσειρά για βήμα  $i \leq 0$ , διατηρεί τις μέσες τιμές, τις διασπορές και τις συσχετίσεις της αρχικής ακολουθίας  $\tilde{\mathbf{Z}}_i$  (Koutsoyiannis, 2000).

### 3.3 Μεθοδολογία προσομοίωσης και βελτιστοποίησης υδροσυστημάτων

Το μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης υδροσυστημάτων βασίζεται σε πρωτότυπη ερευνητική εργασία (Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997· Koutsoyiannis et al., 2002· Koutsoyiannis and Economou, 2003· Efstratiadis et al., 2003· Koutsoyiannis et al., 2003). Στόχος του μοντέλου που είναι αφενός η όσο το δυνατόν ακριβέστερη αναπαράσταση των διεργασιών που σχετίζονται με τη λειτουργία ενός συστήματος υδατικών πόρων και αφετέρου η εύρεση πρόσφορων πολιτικών διαχείρισης, που βελτιστοποιούν την επίδοση του συστήματος.

Εστω ένα σύστημα  $n$  ταμιευτήρων τυχαίας διάταξης, το οποίο εξυπηρετεί έναν μοναδικό κατάντη στόχο ζήτησης  $D$ . Ζητούμενη είναι η κατανομή των απολήψεων  $R_i$  από κάθε ταμιευτήρα  $i$ , έτσι ώστε να ικανοποιείται ακριβώς η ζήτηση  $D$ . Ισοδύναμα, το πρόβλημα διατυπώνεται ως η εύρεση της κατανομής των αποθεμάτων  $S_i$  ώστε το άθροισμα αυτών να ισούται με τον συνολικό διαθέσιμο απόθεμα του συστήματος,  $V$ . Συνεπώς, αν  $T$  είναι το μήκος του χρονικού ορίζοντα ελέγχου του υδροσυστήματος, υπάρχουν  $n \times T$  βαθμοί ελευθερίας στη διαχείριση του εν λόγω συστήματος. Εφόσον το παραπάνω διατυπωθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης, κάτι που προϋποθέτει τον ορισμό μιας αντικειμενικής συνάρτησης που αποτιμά την επίδοση του συστήματος, προκύπτουν  $n \times T$  μεταβλητές ελέγχου προς προσδιορισμό. Το πλήθος αυτό είναι εξαιρετικά μεγάλο εφόσον χρησιμοποιούνται συνθετικές χρονοσειρές, με αποτέλεσμα είτε να καθίσταται ανέφικτη η βελτιστοποίηση είτε να επιδιώκονται υπερβολικές απλουστεύσεις του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος (π.χ. γραμμικοποίηση εξισώσεων δυναμικής), ώστε να καθίσταται εφικτή η βελτιστοποίηση με λογικό υπολογιστικό φόρτο.

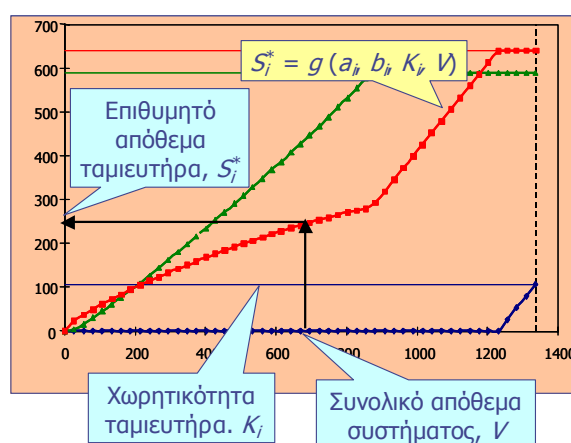
Η εναλλακτική θεώρηση που έχει προταθεί, είναι η διατύπωση των μεταβλητών ελέγχου υπό μορφή παραμετρικών κανόνων λειτουργίας της μορφής:

$$S_i^* = g(a_i, b_i, K_i, K, V) \quad (9)$$

όπου  $S_i^*$  το απόθεμα-στόχος του  $i$  ταμιευτήρα στο τέλος κάθε μήνα,  $K_i$  η ωφέλιμη χωρητικότητα του  $i$  ταμιευτήρα,  $K$  η συνολική ωφέλιμη χωρητικότητα του συστήματος και  $a_i, b_i$  παράμετροι. Με την παραπάνω διατύπωση, οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος καθίστανται ανεξάρτητες του μήκους του χρονικού ορίζοντα ελέγχου, καθώς είναι συναρτήσεις μόνο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συστήματος ( $K_i, K$ ), της τρέχουσας κατάστασης των υδατικών αποθεμάτων του συστήματος ( $V$ ) και δύο μόνο παραμέτρων ανά ταμιευτήρα ( $a_i, b_i$ ). Οι εν λόγω παράμετροι αποτελούν τις μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος και είναι ανεξάρτητες του μήκους του ορίζοντα ελέγχου. Συνεπώς, η βελτιστοποίηση της

επίδοσης του συστήματος καθίσταται πλέον εφικτή, χωρίς να απαιτούνται όμως απλουστεύσεις στη δομή του μοντέλου δυναμικής του συστήματος.

Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται οι κανόνες λειτουργίας ενός υποθετικού συστήματος τριών ταμιευτήρων, υπό μορφή νομογραφήματος. Οι κανόνες δίνουν το επιθυμητό απόθεμα κάθε ταμιευτήρα συναρτήσει του συνολικού αποθέματος του συστήματος, με εφαρμογή του αλγορίθμου των Nalbantis and Koutsoyiannis (1997). Μετά την βελτιστοποίηση των παραμέτρων, το νομογράφημα μπορεί να χρησιμοποιείται για τη διαχείριση του συστήματος, χωρίς να απαιτείται επικαιροποίηση του μοντέλου βελτιστοποίησης (αυτό συμβαίνει επειδή οι συνθετικές χρονοσειρές εισροών παράγονται συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών των ιστορικών υδρολογικών δειγμάτων, που μπορούν να θεωρηθούν αμετάβλητα στο χρόνο).



Σχήμα 1: Γραφική απεικόνιση παραμετρικών κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων.

Σε κάθε χρονικό βήμα του ορίζοντα ελέγχου, και για δεδομένες τιμές των παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$ , υπολογίζονται τα επιθυμητά αποθέματα και συνεπώς οι επιδιωκόμενες απολήψεις από τους ταμιευτήρες. Ωστόσο, η γνώση των επιθυμητών απολήψεων δεν είναι πάντοτε επαρκής για τον προσδιορισμό όλων των μεταβλητών του υδροσυστήματος, ήτοι των πραγματικών απολήψεων και της κατανομής τους κατάντη. Συγκεκριμένα, δεν είναι επαρκής όταν υφίσταται ένας τουλάχιστο από τους ακόλουθους λόγους:

- Οι επιθυμητές απολήψεις από τους ταμιευτήρες δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν εξαιτίας των περιορισμών του κατάντη δικτύου (π.χ. παροχευετικότητα αγωγών, δυναμικότητες αντλιοστασίων, χωρητικότητες μονάδων επεξεργασίας νερού, κτλ.).
- Ο τρόπος μεταφοράς των απολήψεων από τους ταμιευτήρες μέσω του δικτύου των υδραγωγείων δεν είναι μονοσήμαντος.
- Πολλαπλοί και αντικρουόμενοι στόχοι πρέπει να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα, και μάλιστα με συγκεκριμένη σειρά προτεραιότητας.
- Η συνολική ζήτηση νερού υπερτερεί της συνολικής προσφοράς.

Ο προσδιορισμός των πραγματικών απολήψεων και η μεταφορά τους από τους ταμιευτήρες προς τους κόμβους κατανάλωσης διατυπώνεται ως ένα μοντέλο δικτυακού γραμμικού προγραμματισμού (Efstratiadis et al., 2003). Το μοντέλο ορίζεται έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες:

- αυστηρή τήρηση του συνόλου των φυσικών περιορισμών του συστήματος (χωρητικότητες ταμιευτήρων, παροχτευτικότητες υδραγωγείων)·
- ιεραρχημένη ικανοποίηση των διαχειριστικών στόχων και περιορισμών, βάσει της σειράς προτεραιότητας που έχει οριστεί·
- ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς του νερού στο δίκτυο (π.χ. κόστος άντλησης)·
- ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ των πραγματικών και των επιθυμητών απολήψεων, έτσι ώστε να τηρείται όσο το δυνατόν ο κανόνας διαχείρισης των ταμιευτήρων·
- ελαχιστοποίηση των απωλειών του συστήματος λόγω υπερχειλίσσης.

Η επίλυση του προβλήματος προϋποθέτει μετασχηματισμό του μαθηματικού μοντέλου του υδροσυστήματος σε ένα μοντέλο διγράφου, κάθε κλάδος του οποίου αντιστοιχεί σε μοναδική συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου. Η επίλυση του μοντέλου προϋποθέτει τον ορισμό ιδεατών τιμών παροχτευτικότητας και κόστους σε όλους τους κλάδους του, οι οποίες επικαιροποιούνται αυτόματα σε κάθε χρονικό βήμα. Ο ορισμός των ιδεατών τιμών κόστους γίνεται μέσω ενός αναδρομικού αλγορίθμου, με στόχο είτε να επιβάλει τη μεταφορά νερού μέσω κάποιου συγκεκριμένου κλάδου (οπότε το κόστος λαμβάνει αρνητική τιμή) είτε να την αποτρέψει (π.χ. περίπτωση υπερχειλίσσης).



Σχήμα 2: Μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση εφαρμοσμένο στον έλεγχο ενός υδροσυστήματος.

Στο Σχήμα 2 συνοψίζεται η προσέγγιση που ακολουθείται στο μοντέλο διαχείρισης υδροσυστημάτων, με βάση το μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση (Koutsoyiannis and Economou, 2003). Με εφαρμογή του στοχαστικού μοντέλου που περιγράφηκε στην ενότητα 2.2, γεννώνται συνθετικές εισροές των ταμιευτήρων που αποτελούν είσοδο του μοντέλου, μαζί με την τοπολογία, τα χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος και τους λειτουργικούς στόχους και περιορισμούς. Η διαχείριση του συστήματος υλοποιείται μέσω παραμετρικών κανόνων λειτουργίας, ήτοι μαθηματικών νόμων που καθορίζουν τις επιθυμητές

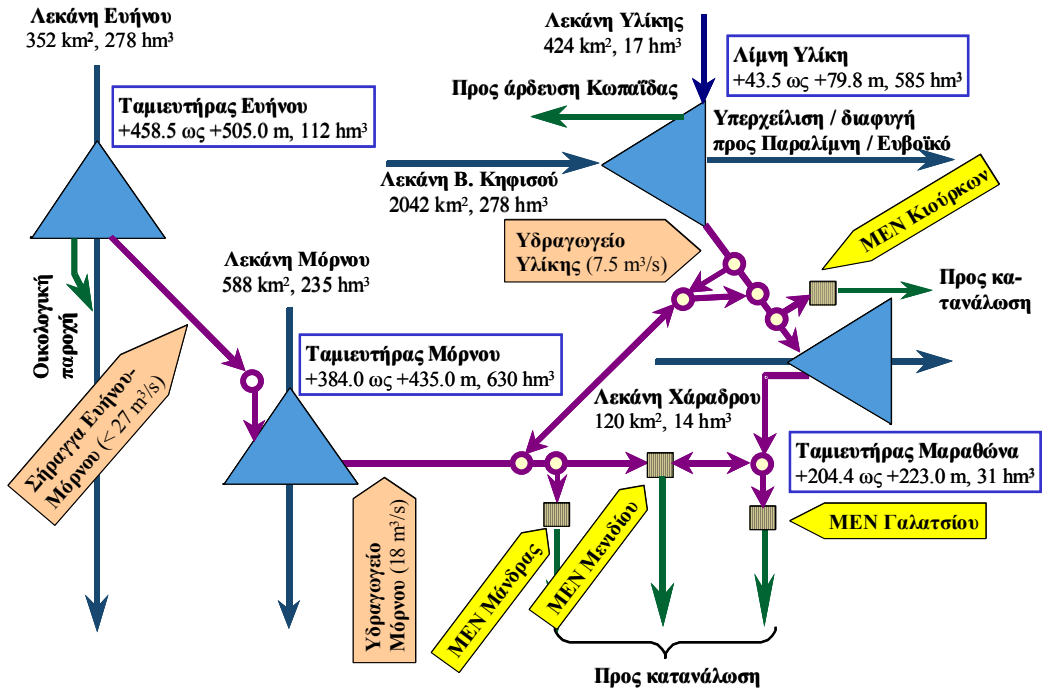
απολήψεις συναρτήσει των διαθέσιμων αποθεμάτων, χρησιμοποιώντας περιορισμένο αριθμό παραμέτρων. Οι εν λόγω παράμετροι συνιστούν τις μεταβλητές ελέγχου ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης, για την ταχεία και αξιόπιστη επίλυση του οποίου αναπτύχθηκαν εξελιγμένες υπολογιστικές τεχνικές (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2002). Η αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή το μέτρο επίδοσης του συστήματος, αποτιμάται μέσω προσομοίωσης. Το μοντέλο προσομοίωσης βασίζεται σε ένα σχήμα δικτυακού γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο εκτελείται σε κάθε χρονικό βήμα για να υπολογίσει τα πραγματικά μεγέθη του υδροσυστήματος (πραγματικές απολήψεις και κατανομή τους στο δίκτυο των υδραγωγείων). Έξοδος του μοντέλου είναι οι βελτιστοποιημένοι κανόνες λειτουργίας, καθώς και ένα πλήθος πληροφοριών σχετικά με την πρόγνωση της εξέλιξης των δυναμικών μεγεθών του υδροσυστήματος. Οι πληροφορίες αυτές υποστηρίζουν τους αρμόδιους χρήστες στη λήψη ορθολογικών αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση του συστήματος.

## **4. Εργαλεία λογισμικού για την εποπτεία και επιχειρησιακή διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας**

### **4.1 Περιγραφή του υδροδοτικού συστήματος**

Το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 3, είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο υδροσύστημα που αναπτύσσεται σε γεωγραφική έκταση 4000 km<sup>2</sup>. Περιλαμβάνει τέσσερις ταμιευτήρες συνολικής ωφέλιμης χωρητικότητας 1400 hm<sup>3</sup> (Μόρνος, Εύηνος, Υλίκη, Μαραθónας) και ένα πλήθος 100 περίπου υδρογεωτρήσεων θεωρητικής δυναμικότητας 90 hm<sup>3</sup>, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως εφεδρικοί πόροι. Η μεταφορά του νερού από τις πηγές προς τις τέσσερις μονάδες επεξεργασίας (Μενίδι, Γαλάτσι, Κιούρκα, Μάνδρα) γίνεται μέσω ενός εκτεταμένου δικτύου που περιλαμβάνει 350 km υδραγωγείων και περί τα 15 αντλιοστάσια. Το σύστημα τροφοδοτεί την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, όπου η κατανάλωση αυξάνει τα τελευταία χρόνια με ρυθμό της τάξης του 6% (415 hm<sup>3</sup> το 2001-02). Επιπλέον, εξυπηρετεί κι άλλες χρήσεις όπως περιβαλλοντικές (διατήρηση ελάχιστης παροχής κατάντη του φράγματος Ευήνου) και αρδευτικές (άντληση από Υλίκη). Διαχειριστής του υδροσυστήματος είναι η ΕΥΔΑΠ, η οποία λειτουργεί υπό καθεστώς Ανώνυμης Εταιρείας από το 1999.

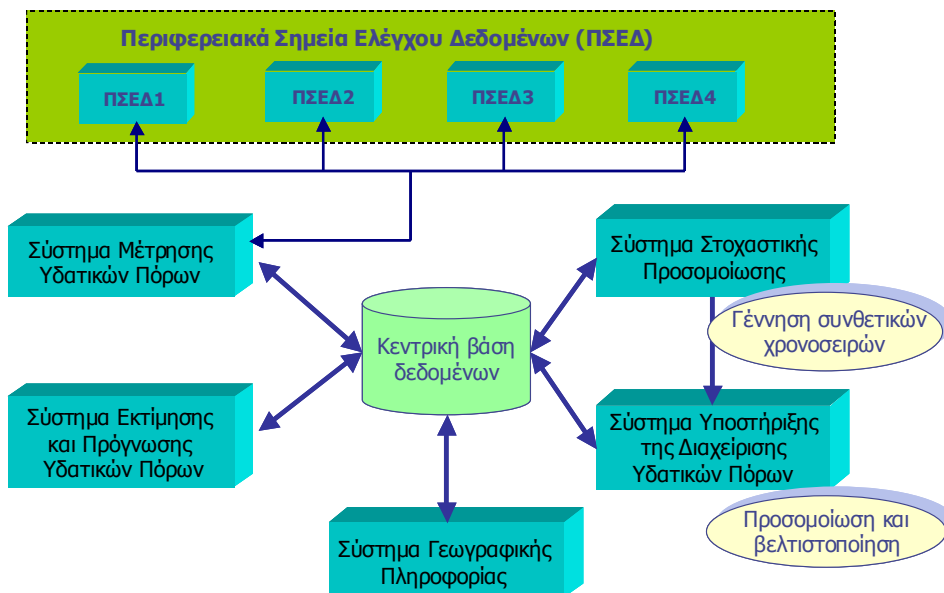
Ο έλεγχος του συστήματος προϋποθέτει ένα σύνολο αποφάσεων που σχετίζονται με την κατανομή των απολήψεων από τις πηγές και τον τρόπο μεταφοράς τους μέσω του δικτύου των υδραγωγείων. Η δυνατότητα πολλαπλών εναλλακτικών λύσεων εγείρει την ανάγκη επιλογής της καλύτερης κάθε φορά λύσης. Η βελτιστοποίηση της διαχείρισης αποσκοπεί στην αναζήτηση ορθολογικών, αποδοτικών και βιώσιμων πολιτικών διαχείρισης του υδροσυστήματος, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ποσότητα νερού με την απαιτούμενη αξιοπιστία, και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιείται το κόστος λειτουργίας του συστήματος που αναφέρεται, κατά μείζονα λόγο, στη χρήση ενεργοβόρων διατάξεων (αντλιοστάσια, γεωτρήσεις). Προφανώς, οι στόχοι βελτιστοποίησης της αξιοπιστίας και οικονομικότητας του συστήματος είναι αντικρουόμενοι. Κατά συνέπεια, αναζητείται η πλέον πρόσφορη διαχείριση, η οποία εξασφαλίζει μακροχρόνια επάρκεια των υδατικών πόρων, και μάλιστα υπό καθεστώς ποικίλων αβεβαιοτήτων που διέπουν το σύστημα.



Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας.

#### 4.2 Γενική διάταξη και συνιστώσες του ΣΥΑ για το υδροσύστημα της Αθήνας

Το σύστημα υποστήριξης της εποπτείας και διαχείρισης των υδατικών πόρων της Αθήνας είναι ένα εξελιγμένο ΣΥΑ, η γενική δομή του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4: Γενική διάταξη και συνιστώσες του ΣΥΑ.

Το ΣΥΑ περιλαμβάνει τις εξής συνιστώσες:

- Σύστημα μέτρησης των υδατικών πόρων, βασισμένο σε σύγχρονες τεχνικές μετρήσεων και τηλεμετρίας.

- Σύστημα διαχείρισης πληροφοριών, αποτελούμενο από ένα σύστημα διαχείρισης βάσεων δεδομένων (πρόγραμμα Υδρογνώμων) και ένα σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας.
- Υδρολογικά μοντέλα, και ειδικότερα ένα μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης για τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών (πρόγραμμα Κασταλία) και ένα μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου των λεκανών Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης.
- Μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της λειτουργίας του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας (πρόγραμμα Υδρονομέας).

Για την ανάπτυξη των παραπάνω συνιστωσών χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονες τεχνολογίες και μεθοδολογίες. Ειδικότερα, τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν είναι καινοτομικά προϊόντα, τόσο ως προς τη θεωρητική βάση τους όσο και ως προς την ολοκλήρωσή τους ως προϊόντων λογισμικού. Επιπλέον, για τις εφαρμογές χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονα εργαλεία ανάπτυξης και αντικειμενοστραφείς γλώσσες προγραμματισμού (Object Pascal-Delphi), ενώ δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση τόσο στην ταχύτητα των υπολογιστικών διαδικασιών (αλγορίθμων) όσο και στη φιλικότητα του γραφικού περιβάλλοντος εργασίας.

### 4.3 Μετρητικό δίκτυο

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθολογική διαχείριση ενός υδροδοτικού συστήματος είναι η διαθεσιμότητα επαρκών και αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με τους υδατικούς πόρους. Για αυτόν το λόγο, το υπάρχον μετρητικό δίκτυο της ΕΥΔΑΠ στις λεκάνες απορροής που συνδέονται με το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας (Ευήνου, Μόρνου, Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης και Μαραθώνα) συμπληρώθηκε από ένα τηλεμετρικό δίκτυο αυτόματων σταθμών, έτσι ώστε οι μετρήσεις να έχουν την απαιτούμενη αξιοπιστία, ακρίβεια και χρονική διακρίσιμότητα, να είναι διαθέσιμες σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο και οι βλάβες των οργάνων να εντοπίζονται σε σύντομο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα, έγινε 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 σταθμό μέτρησης στάθμης ποταμών) και (ζ) σύνδεση με άλλα μετρητικά συστήματα υδροφορέων που έχει αναπτύξει η ΕΥΔΑΠ.

### 4.4 Κεντρική βάση δεδομένων

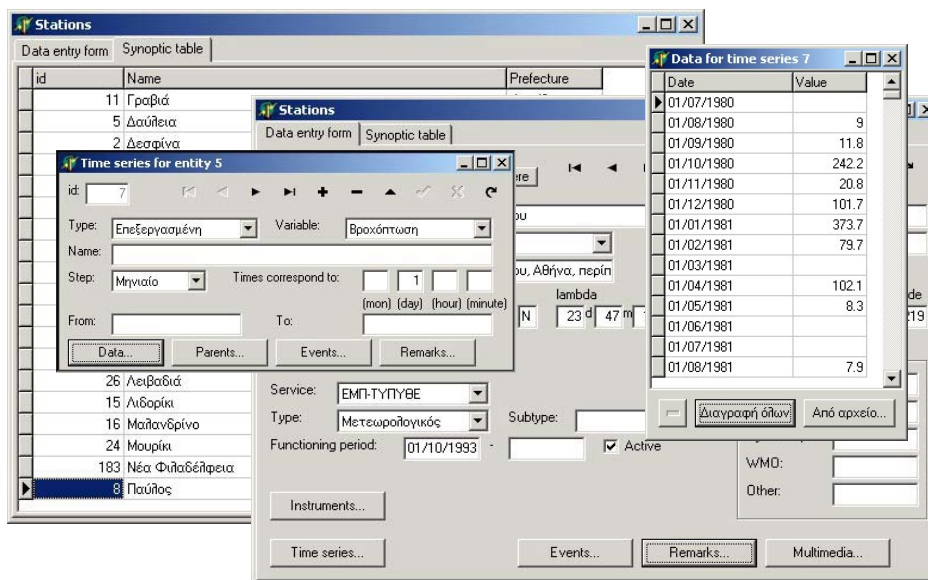
Η Κεντρική Βάση Δεδομένων (ΚΒΔ), η οποία αποτελεί το θεμέλιο του συνολικού πληροφοριακού συστήματος, αποθηκεύει το σύνολο των απαιτούμενων πληροφοριών που σχετίζονται με την εποπτεία και διαχείριση του υδροσυστήματος (υδρολογικών, γεωγραφικών, χειριστικών, κλπ.) και είναι το κύριο μέσο ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των διαφόρων επιμέρους συστημάτων. Η ΚΒΔ επιτελεί τις εξής λειτουργίες:

- Αποθήκευση και διαχείριση ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών·
- Αναπαράσταση και περιγραφή του «πραγματικού κόσμου»·
- Υποστήριξη συστήματος μετάδοσης υδρομετεωρολογικών δεδομένων·
- Υποστήριξη εφαρμογών και μοντέλων (αποθήκευση δεδομένων εισόδου και εξόδου).

Σημειώνεται ότι η ΚΒΔ είναι σχεδιασμένη για να μπορεί να προσπελάζεται από τον Παγκόσμιο Ιστό, απαντώντας έτσι στις σύγχρονες απαιτήσεις του Διαδικτύου.

#### 4.5 Διαχείριση και επεξεργασία υδρολογικών δεδομένων – Το πρόγραμμα Υδρογνώμων

Για τη διαχείριση και επεξεργασία των υδρολογικών δεδομένων αναπτύχθηκε μια εξειδικευμένη εφαρμογή λογισμικού, με την ονομασία Υδρογνώμων. Πρόκειται για ένα σύστημα πρόσβασης σε βάση υδρολογικών και μετεωρολογικών δεδομένων και διαχείρισης χρονοσειρών. Το πρόγραμμα υποστηρίζει τυπικούς ελέγχους και επεξεργασίες των υδρομετεωρολογικών δεδομένων (όπως συμπλήρωση κενών, συνάθροιση χρονοσειρών, επιφανειακή ολοκλήρωση, υπολογισμός ισοζυγίων ταμειυτήρων, κλπ.), ενώ σχεδιάστηκε ώστε να παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης με εφαρμογές όπως το ArcView και το Microsoft Excel, που μπορούν να κάνουν επιπλέον επεξεργασίες ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Στο Σχήμα 5 απεικονίζονται ορισμένες αντιπροσωπευτικές οθόνες του προγράμματος.



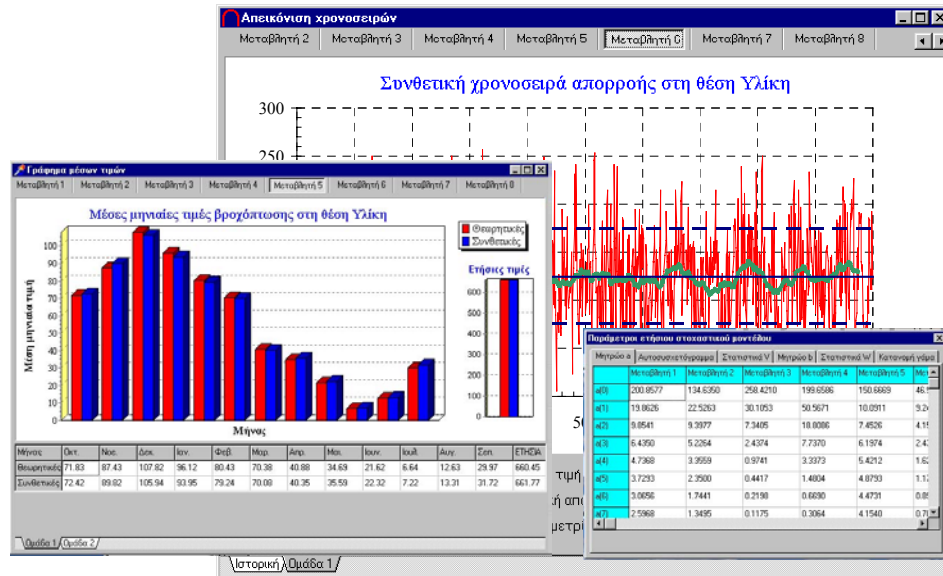
Σχήμα 5: Αντιπροσωπευτικές οθόνες του προγράμματος Υδρογνώμων.

#### 4.6 Στοχαστική προσομοίωση υδρολογικών μεταβλητών - Το πρόγραμμα Κασταλία

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που περιγράφηκε στην ενότητα 3.2 υλοποιήθηκε σε λογισμικό, με την ονομασία Κασταλία (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2000). Οι λειτουργίες που επιτελεί το πρόγραμμα είναι:

- Ανάκτηση ιστορικών και διαχείριση συνθετικών χρονοσειρών.
- Στατιστική ανάλυση ιστορικών δειγμάτων.
- Προσαρμογή (εκτίμηση παραμέτρων) στοχαστικών μοντέλων.
- Γέννηση ετήσιων και μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών σε πολλές θέσεις.
- Παρουσίαση, υπό μορφή πινάκων και γραφημάτων των χρονοσειρών, των στατιστικών μεγεθών τους και των παραμέτρων του μοντέλου.

Η Κασταλία υποστηρίζει τη λειτουργία του στοχαστικού μοντέλου τόσο υπό μορφή προσομοίωσης (παραγωγή χρονοσειρών πολύ μεγάλου μήκους, χωρίς αναφορά στις αρχικές συνθήκες) όσο και πρόγνωσης (παραγωγή πολλών σειρών μικρού μήκους, λαμβάνοντας υπόψη της επίδραση των παρελθουσών τιμών). Στο Σχήμα 6 απεικονίζονται ορισμένες αντιπροσωπευτικές οθόνες του προγράμματος.



Σχήμα 6: Αντιπροσωπευτικές οθόνες του προγράμματος Κασταλία.

#### 4.7 Προσομοίωση υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού

Στα πλαίσια του έργου, αναπτύχθηκε ένα πολυκυτταρικό ημικατανεμημένο μοντέλο για την προσομοίωση των επιφανειακών και υπόγειων υδρολογικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής, το οποίο προσαρμόστηκε στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού και το υπόγειο καρστ αυτής. Το σύστημα των υδατικών πόρων (επιφανειακών και υπόγειων) της λεκάνης προμηθεύει νερό για τοπική αρδευτική χρήση καθώς και για ύδρευση της Αθήνας. Επιπλέον, η απορροή της λεκάνης, σημαντικό μέρος της οποίας προέρχεται από καρστικές πηγές, τροφοδοτεί τη λίμνη Υλίκη. Αυτό έχει ως συνέπεια οι πραγματοποιούμενες απολήψεις από τις γεωτρήσεις να επηρεάζουν τη δίαιτα των απορροών, μειώνοντας το επιφανειακό δυναμικό αυτής. Σημαντική συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης είναι και οι υπόγειες εκροές προς τη θάλασσα, οι οποίες πραγματοποιούνται κατά τρόπο ακανόνιστο μέσω ενός εκτεταμένου μετώπου στο ΒΑ της τμήμα. Στόχος του μοντέλου είναι η περιγραφή των παραπάνω διεργασιών, έτσι ώστε να καθίσταται πιο αξιόπιστη η πρόγνωση της εξέλιξης των εισροών της Υλίκης. Το παραπάνω υδρολογικό μοντέλο υλοποιήθηκε σε λογισμικό, το οποίο υποστηρίζει λειτουργίες πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του (Efstratiadis et al., 2003).

#### 4.8 Προσομοίωση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας συστημάτων υδατικών πόρων - Το πρόγραμμα Υδρονομέας

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που περιγράφηκε στην ενότητα 3.3 υλοποιήθηκε σε λογισμικό (Καραβοκυρός κ.ά., 2000· <http://www.itia.ntua.gr/hydronomeas>).



Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο υπολογιστικό σύστημα επιχειρησιακού προσανατολισμού που δίνει απαντήσεις σε ερωτήματα της μορφής:

- Ποια είναι η μέγιστη ετήσια δυνατότητα απόληξης νερού, για δεδομένο υδρολογικό καθεστώς και δεδομένη αξιοπιστία;
- Με ποια διαχειριστική πολιτική και με ποιο κόστος εξασφαλίζεται η παραπάνω απόληξη νερού;
- Ποια είναι η βέλτιστη πολιτική διαχείρισης για την κάλυψη δεδομένης ζήτησης, για δεδομένο υδρολογικό καθεστώς και δεδομένη αξιοπιστία;
- Ποιο είναι το ελαχιστοποιημένο κόστος της πολιτικής αυτής;
- Πώς θα εξελιχθεί η διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων κατά τους επόμενους μήνες, με βάση διάφορα υδρολογικά σενάρια;
- Ποια είναι η επίπτωση στο μέλλον (π.χ. σε ορίζοντα δεκαετίας) ενός συγκεκριμένου διαχειριστικού μέτρου;
- Ποιες είναι οι επιπτώσεις ενός νέου έργου, και ποιος είναι ο βέλτιστος χρόνος ένταξής του σύστημα;
- Ποιες είναι οι επιπτώσεις ενός αρνητικού κλιματικού σεναρίου (έμμομη ξηρασία, κλιματική αλλαγή) και πώς αυτό πρέπει να αντιμετωπιστεί;
- Πόσο επαρκή είναι τα υφιστάμενα έργα αξιοποίησης για την κάλυψη ειδικών συνθηκών (π.χ. απότομη αύξηση της κατανάλωσης) ή έκτακτων περιστατικών (π.χ. βλαβών), και με ποιον τρόπο αντιμετωπίζονται τα περιστατικά αυτά;

Το σύνολο των πληροφοριών που συνιστούν ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου συστημάτων υδατικών πόρων καλείται σενάριο διαχείρισης. Οι πληροφορίες αυτές, οι οποίες αποθηκεύονται στην ΚΒΔ, αναφέρονται στη δομή και τις συνιστώσες του συστήματος, τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, τους λειτουργικούς στόχους και περιορισμούς που θέτει ο χρήστης, καθώς και τα υδρολογικά σενάρια (ήτοι τις συνθετικές χρονοσειρές εισροών και απωλειών των ταμιευτήρων). Ο Υδρονομέας διαθέτει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο οργάνωσης των παραπάνω πληροφοριών, με χρήση κατάλληλων εργαλείων ελέγχου. Ειδικότερα, οι λειτουργικοί στόχοι και περιορισμοί αναφέρονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- απόληξη νερού για ύδρευση και άρδευση·
- διατήρηση της παροχής υδραγωγείου μεταξύ ενός κατώτατου και ενός ανώτατου ορίου ή παροχέτευση σταθερής ποσότητας νερού για ορισμένο χρονικό διάστημα·
- διατήρηση της στάθμης ταμιευτήρα μεταξύ ενός κατώτατου κι ενός ανώτατου ορίου·
- αποφυγή της υπερχείλισης ταμιευτήρα.

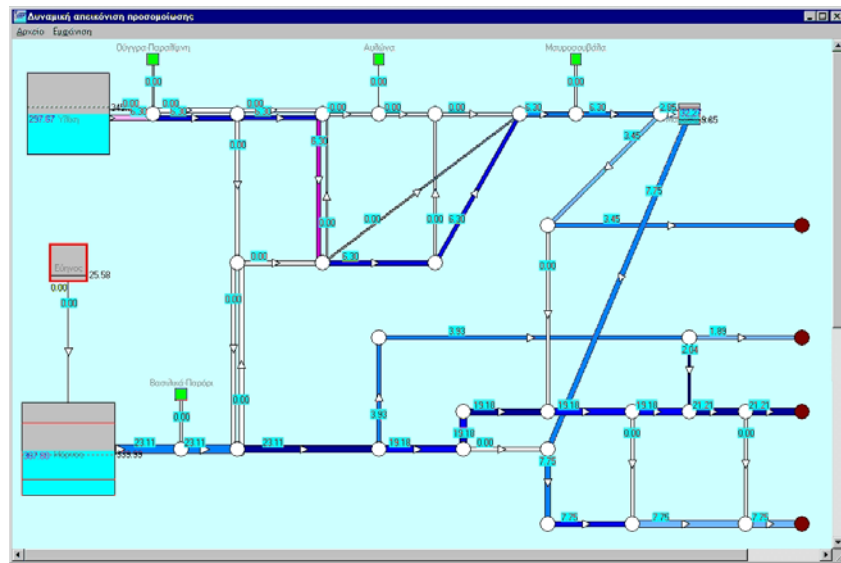
Σε κάθε στόχο ορίζεται μια μέγιστη επιτρεπόμενη πιθανότητα αστοχίας, ενώ η τιμή του στόχου μπορεί να μεταβάλλεται περιοδικά (από μήνα σε μήνα) ή και διαχρονικά.

Η εύρεση της πλέον πρόσφορης πολιτικής διαχείρισης προϋποθέτει τον καθορισμό ενός μέτρου επίδοσης, που σχετίζεται με την αξιοπιστία, οικονομικότητα ή ασφαλή απόληξη του συστήματος. Συγκεκριμένα, το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να διατυπωθεί με έναν από τους ακόλουθους τρεις τρόπους:

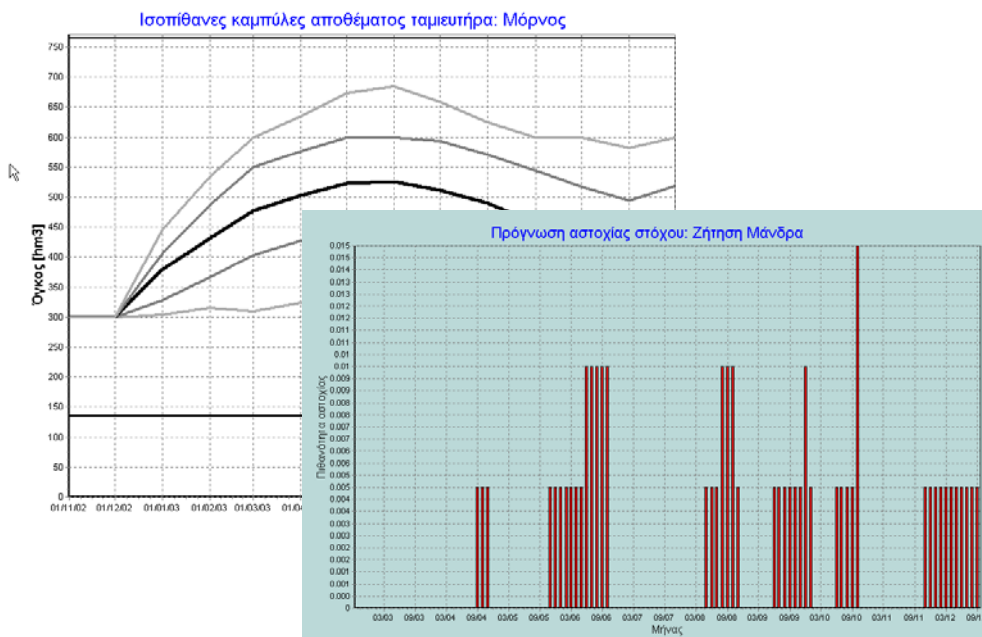
- ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος, για δεδομένες τιμές λειτουργικών στόχων και περιορισμών·
- ελαχιστοποίηση της μέσης ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας, για δεδομένη αξιοπιστία και δεδομένες τιμές λειτουργικών στόχων και περιορισμών·

- μεγιστοποίηση της ασφαλούς απόληξης του συστήματος, για δεδομένη αξιοπιστία και δεδομένες τιμές λειτουργικών στόχων και περιορισμών.

Ο Υδρονομέας υποστηρίζει δύο μορφές προσομοίωσης, μόνιμης κατάστασης και καταληκτική. Η προσομοίωση μόνιμης κατάστασης επιλέγεται για τη διερεύνηση της μακροχρόνιας επίδοσης ενός υδροσυστήματος ανεξαρτήτως αρχικών συνθηκών, με χρήση χρονοσειρών μεγάλου μήκους. Αντίθετα, η καταληκτική προσομοίωση εφαρμόζεται εφόσον εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος σε ορίζοντα λίγων ετών. Στην περίπτωση αυτή, διερευνώνται πολλαπλά σενάρια εξέλιξης των υδρολογικών εισροών, τα οποία προκύπτουν μέσω στοχαστικής πρόγνωσης. Ο χρήστης μπορεί να παρακολουθήσει σε πραγματικό χρόνο την εξέλιξη της προσομοίωσης, μέσω κατάλληλων οπτικών εφαρμογών (Σχήμα 7).



Σχήμα 7: Η οθόνη δυναμικής απεικόνισης της προσομοίωσης.



Σχήμα 8: Αντιπροσωπευτικές οθόνες αποτελεσμάτων του Υδρονομέα.

Στα αποτελέσματα ενός σεναρίου διαχείρισης περιλαμβάνονται οι βέλτιστοι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων (υπό μορφή εύχρηστων διαγραμμάτων, όπως του Σχήματος 1) καθώς και ένα ευρύ πλήθος πληροφοριών, όπως το μέσο ετήσιο υδατικό, ενεργειακό και οικονομικό ισοζύγιο του συστήματος, και η στατιστική πρόγνωση της εξέλιξης των αποθεμάτων των ταμιευτήρων, των παροχών στα υδραγωγεία και των πιθανοτήτων αστοχίας των λειτουργικών στόχων (Σχήμα 8).

## 5. Συμπεράσματα - Μελλοντικές προοπτικές

Τα ιδιαίτερα πολύπλοκα και απαιτητικά προβλήματα τεχνολογίας και διαχείρισης υδατικών πόρων αποτελούν ένα από τα προνομιακά πεδία εφαρμογής των ΣΥΑ. Ωστόσο, η χρήση ακόμη και των πιο σύγχρονων υπολογιστικών εργαλείων δεν συνεπάγεται αυτοματοποίηση των αποφάσεων, αλλά υποστήριξη στη λήψη τους. Πράγματι, σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να υποκατασταθεί η κρίση και εμπειρία του μελετητή, η οποία είναι απαραίτητη τόσο κατά τη φάση διατύπωσης των διαχειριστικών σεναρίων (σχηματοποίηση υδροσυστήματος, καθορισμός στόχων και περιορισμών, καθορισμός μέτρου επίδοσης) για την όσο και κατά τη φάση ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Η πολυετής συμβολή της ερευνητικής ομάδας του Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ, όπου ανήκουν και οι συγγραφείς, στην υλοποίηση πληροφοριακών συστημάτων υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων χαρακτηρίζεται από:

- ανάπτυξη πρωτότυπων μαθηματικών μοντέλων·
- χρήση προηγμένων τεχνολογιών·
- ολοκληρωμένη προσέγγιση·
- διαρκή βελτίωση των χρησιμοποιούμενων μεθοδολογιών και εργαλείων·
- αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της βασικής έρευνας προς επιχειρησιακή κατεύθυνση.

Ειδικότερα, το ΣΥΑ που αναπτύχθηκε για το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας έχει συμβάλει κατά τα τελευταία τρία έτη που χρησιμοποιείται επιχειρησιακά στη βελτίωση της διαχείρισής του, με έμφαση στο τρίπτυχο αξιοποίηση υδατικών πόρων - αξιοπιστία - οικονομικότητα.

Η ανάγκη ολοκληρωμένης προσέγγισης, την οποία επιβάλει πλέον και η Κοινοτική Οδηγία-Πλαίσιο 2000/60, δημιουργεί νέες τεχνολογικές ανάγκες για όλους τους φορείς που εμπλέκονται στη διαχείριση των υδατικών πόρων. Στην κατεύθυνση αυτή, έχει αναληφθεί η εκπόνηση ενός νέου έργου με την ονομασία ΟΔΥΣΣΕΥΣ (Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα), το οποίο εντάσσεται στο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανάπτυξης (ΕΠΑΝ) που συγχρηματοδοτείται από κοινοτικά και εθνικά κονδύλια. Το έργο αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος εργαλείων πληροφορικής, το οποίο σε συνδυασμό με ένα παράλληλο πλαίσιο μεθοδολογιών και προδιαγραφών, θα παρέχει την κατάλληλη υποδομή για την ορθολογική διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων σε ευρύ φάσμα κλιμάκων.

Τελικό παραδοτέο του έργου θα είναι μια δέσμη υπολογιστικών εργαλείων ανάλυσης, προσομοίωσης και διαχείρισης υδατικών πόρων (συνολικά 8 εφαρμογές λογισμικού, μεταξύ των οποίων υδρολογικά και στοχαστικά μοντέλα, μοντέλα εκτίμησης των υδατικών αναγκών, μοντέλα ποιότητας νερού και οικονομικής ανάλυσης σεναρίων διαχείρισης). Τα εργαλεία αυτά θα ολοκληρωθούν σε ένα ενιαίο πληροφοριακό σύστημα γενικής χρήσης, που αποσκοπεί στο να καλύψει την

ανεπάρκεια αντίστοιχης υποδομής στον ελληνικό χώρο. Πέραν της βασικής έρευνας, το έργο περιλαμβάνει και βιομηχανική έρευνα καθώς και την εμπορική προώθηση του προϊόντος που θα αναπτυχθεί, δραστηριότητες που έχουν αναληφθεί από συνεργαζόμενες ιδιωτικές εταιρίες. Στα πλαίσια του έργου θα πραγματοποιηθούν επίσης δύο πιλοτικές εφαρμογές σε υδροσυστήματα του ελληνικού χώρου με διαφορετικά χαρακτηριστικά από πλευράς υποδομών, κλιματικού καθεστώτος και θεσμικού πλαισίου διαχείρισης (περιοχή Καρδίτσας, Δωδεκάνησα). Οι εν λόγω εφαρμογές θα συμβάλουν αφενός στην αξιολόγηση του τελικού προϊόντος και αφετέρου στη διάχυση της γνώσης και την ευαισθητοποίηση του κοινού σε θέματα διαχείρισης και προστασίας υδατικών πόρων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ευστρατιάδης, Α., και Δ. Κουτσογιάννης, 2000. Κασταλία: Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τεύχος 9, 70 σελίδες, Αθήνα.
2. Ευστρατιάδης, Α., και Ν. Ζερβός, 1999. *Βέλτιστη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων - Εφαρμογή στο σύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, 181 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
3. Καραβοκυρός, Γ., Α. Ευστρατιάδης, και Δ. Κουτσογιάννης, 2000. Υδρονομείας (έκδοση 2): Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τεύχος 11, 84 σελίδες, Αθήνα.
4. Καραβοκυρός, Γ., Δ. Κουτσογιάννης, και Ν. Μανδέλλος, 1999. Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του υδροσυστήματος της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 3*, Τεύχος 40, 161 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
5. Κουτσογιάννης, Δ., Ι. Ναλμπάντης, και Ν. Μαμάσης, 1991. Υδρολογική διερεύνηση - Έκθεση, *Προμελέτη ενίσχυσης του υδατικού δυναμικού του ταμιευτήρα Μόρνου από τη λεκάνη του ποταμού Ευήνου, Εισαγωγικό μέρος*, Εργοδότης: Διεύθυνση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, ΟΤΜΕ, Υδροηλεκτρική, ΥΔΡΟΤΕΚ, Δ. Κωνσταντινίδης, Γ. Καραβοκύρης, Θ. Γκόφας και Συνεργάτες, 192 σελίδες, Αθήνα.
6. Ναλμπάντης, Ι., 1990. Μοντελοποίηση υδροδοτικού συστήματος, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 2*, Τεύχος 14, 133 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

7. Τσακαλίας, Γ., και Δ. Κουτσογιάννης, 1995. Πιλοτικό μοντέλο για τη διαχείριση του συστήματος ταμειωτήρων υδροδότησης της Αθήνας, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 2*, Τεύχος 14, 52 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
8. Dreyfus H., and S. Dreyfus, 1986. *Mind over Machine: The Power of Human Intuition and Expertise in the Era of the Computer*, Free Press.
9. Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, 2002. An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems, *Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, UK, July 2002, 1423-1428, International Association of Hydraulic Research, International Water Association, International Association of Hydrological Sciences.
10. Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, E. Rozos, and I. Nalbantis, 2003. Calibration of a conjunctive surface-groundwater simulation model using multiple responses, *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, Nice, April 2003, European Geophysical Society, American Geophysical Union.
11. Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, and D. Xenos, 2003. Minimising water cost in the water resource management of Athens, *Urban Water* (υπό έκδοση).
12. Eom, S. B., S. M. Lee, E. B. Kim, C. Somarajan, 1998. A survey of decision support system applications (1994-1998), *Journal of Operational Research*, 35(4), 109-120.
13. French, S., 2000. *Decision Analysis and Decision Support Systems*, 3rd draft edition.
14. Koutsoyiannis, D., 1999. Optimal decomposition of covariance matrices for multivariate stochastic models in hydrology, *Water Resources Research*, 35(4), 1219-1229.
15. Koutsoyiannis, D., 2000. A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series, *Water Resources Research*, 36(6), 1519-1533.
16. Koutsoyiannis, D., 2001. Coupling stochastic models of different time scales, *Water Resources Research*, 37(2), 379-392.
17. Koutsoyiannis, D., A. Efstratiadis, and G. Karavokiros, 2002. A decision support tool for the management of multi-reservoir systems, *Journal of the American Water Resources Association*, 38(4), 945-958.
18. Koutsoyiannis, D., and A. Economou, 2003. Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems, *Water Resources Research*, 39(6), 1170, 1-17.

19. Koutsoyiannis, D., and A. Manetas, 1996. Simple disaggregation by accurate adjusting procedures, *Water Resources Research*, 32(7), 2105-2117.
20. Koutsoyiannis, D., G. Karavokiros, A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Koukouvinos, and A. Christofides, 2003. A decision support system for the management of the water resource system of Athens, *Physics and Chemistry of the Earth* (υπό έκδοση).
21. Nalbantis, I., and D. Koutsoyiannis, 1997. A parametric rule for planning and management of multiple reservoir systems, *Water Resources Research*, 33(9), 2165-2177.
22. Sage, A. P., 1993. Associates systems for decision support, *Information and Decision Technologies*, 19, 165-184.
23. Sol, H. G., 1983. Processes and tools for decision support: Inferences for future developments, in *Processes and Tools for Decision Support*, (ed. Sol, H. G.), North Holland, Amsterdam, pp. 1-6.
24. Turban, E., and J. Aronson, 1998. *Decision Support Systems and Intelligent Systems*, Prentice-Hall, New Jersey.
25. Watkins, D. W., and D. C. McKinney, 1995. Recent developments associated with decision support systems in water resources, *U.S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991-1994*, Reviews of Geophysics, Vol. 33 Supplement 1995, American Geophysical Union.