

**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ,
ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ & ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ**
ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ
Δ/ΝΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ & ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ & ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

**MINISTRY OF ENVIRONMENT, REGIONAL
PLANNING & PUBLIC WORKS**
GENERAL SECRETARIAT OF PUBLIC WORKS
SECRETARIAT OF WATER SUPPLY & SEWAGE

**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS**

DIVISION OF WATER RESOURCES
HYDRAULIC & MARITIME ENGINEERING

**ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΟ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ
ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

ΦΑΣΗ Γ

ΤΕΥΧΟΣ 40

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ
ΥΔΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ
ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ
ΕΛΛΑΔΑΣ**

**RESEARCH PROJECT
EVALUATION AND MANAGEMENT
OF THE WATER RESOURCES
OF STEREA HELLAS**

PHASE C

VOLUME 40

**MODEL DEVELOPMENT FOR
SIMULATION AND
OPTIMISATION OF THE
EASTERN STEREA HELLAS
HYDROSYSTEM**

**ΣΥΝΤΑΞΗ: Γ.ΚΑΡΑΒΟΚΥΡΟΣ,
Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΗΣ, Ν. ΜΑΝΔΕΛΛΟΣ**

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ
ΚΥΡΙΟΣ ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ: Ι. ΝΑΛΜΠΑΝΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ - ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 1999

**BY: G. KARAVOKIROS,
D. KOUTSOYIANNIS, N. MANDELLOS**

SCIENTIFIC DIRECTOR: D. KOUTSOYIANNIS
PRINCIPAL INVESTIGATOR: I. NALBANTIS

ATHENS - JANUARY 1999

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	Εισαγωγή.....	9
1.1	Περιγραφή του ερευνητικού αντικειμένου.....	9
1.2	Στόχοι σχεδιασμού του υπολογιστικού συστήματος	10
1.3	Συνοπτική περιγραφή των βασικών λειτουργιών του Υδρονομέα.....	11
1.4	Σε ποια ερωτήματα δίνει απάντηση το υπολογιστικό σύστημα	13
2	Μοντέλο συστήματος προσομοίωσης - βελτιστοποίησης.....	14
2.1	Μοντέλο υδρολογικών συνιστωσών.....	14
2.1.1	Βασική εξίσωση υδατικού ισοζυγίου ταμειυτήρα.....	14
2.1.2	Απώλειες από υπόγειες διαφυγές	15
2.1.3	Διόρθωση απορροής - Υπόγειοι υδροφορείς.....	15
2.1.4	Περιορισμοί παροχής αγωγών.....	15
2.2	Μοντέλο ενεργειακών συνιστωσών.....	17
2.2.1	Υπολογισμοί ενεργειακού ισοζυγίου	18
2.2.2	Υπολογισμός της ποιότητας της παραγόμενης ενέργειας	19
2.3	Μοντέλο οικονομικών παραγόντων	20
2.4	Λειτουργική προσομοίωση του υδροσυστήματος.....	20
2.4.1	Εξυπηρέτηση στόχων χρήστη και αστοχία προσομοίωσης.....	22
2.4.1.1	Στόχοι προσομοίωσης	22
2.4.1.2	Η προσέγγιση στόχων προσομοίωσης.....	24
2.4.1.2.1	Αναζήτηση υπολείποντος όγκου.....	25
2.4.1.2.2	Προσέγγιση στόχου κατανάλωσης νερού	26
2.4.1.2.3	Διατήρηση των ορίων όγκου ταμειυτήρα.....	26
2.4.1.2.4	Προσέγγιση στόχων ελάχιστης ροής και περιβαλλοντικής διατήρησης	27
2.4.1.2.5	Προσέγγιση στόχου παραγωγής ενέργειας.....	27
2.4.1.3	Αστοχία συστήματος.....	27
2.4.2	Ο παραμετρικός κανόνας λειτουργίας.....	28
2.4.3	Αποφυγή υπερχειλίσεων	30
2.4.4	Περιορισμός στη χρήση αγωγών.....	30
2.5	Βελτιστοποίηση	30
2.5.1.1	Ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας	32
2.5.1.2	Μεγιστοποίηση της τιμής του στόχου.....	33
2.5.1.3	Μεγιστοποίηση της παραγόμενης πρωτεύουσας υδροηλεκτρικής ενέργειας.....	33
3	Σχεδιασμός του υπολογιστικού συστήματος.....	36
3.1	Βασικά συστατικά του Υδρονομέα	36
3.1.1	Υποσύστημα Οργάνωσης Δικτύου.....	36
3.1.2	Υποσύστημα Στοχαστικής Προσομοίωσης.....	36
3.1.3	Υποσύστημα Επιλογής Στόχων και Περιορισμών Προσομοίωσης.....	38
3.1.4	Υποσύστημα Εισαγωγής Δεδομένων	38
3.1.5	Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης	38
3.1.6	Υποσύστημα Βελτιστοποίησης.....	39
3.1.7	Υποσύστημα Δυναμικής Απεικόνισης Προσομοίωσης.....	39
3.1.8	Υποσύστημα Παρουσίασης Αποτελεσμάτων.....	40

3.2	Η Βάση δεδομένων	41
3.2.1	Σχεδιασμός της βάσης δεδομένων.....	41
3.2.2	Ιδιότητες οντοτήτων.....	44
3.2.2.1	Τρόπος παρουσίασης της βάσης δεδομένων και συμβολισμοί.....	44
3.2.2.2	Κόμβος.....	45
3.2.2.2.1	Διόρθωση απορροής κόμβου.....	46
3.2.2.2.2	Αντιστοιχίες στάθμης - όγκου - επιφάνειας ταμιευτήρα.....	46
3.2.2.2.3	Συντελεστές υπογείων διαφυγών ταμιευτήρα.....	47
3.2.2.3	Αγωγός.....	47
3.2.2.4	Περιορισμοί στη χρήση αγωγών.....	49
3.2.2.5	Αντιστοιχίες ύψους πτώσης - παροχευτικότητας.....	50
3.2.2.6	Στόχος.....	50
3.2.2.6.1	Χρονοσειρές στόχων.....	52
3.2.2.7	Μονάδα Ενεργειακής Μετατροπής.....	52
3.2.2.8	Αντιστοιχίες ύψους πτώσης - ειδικής ενέργειας - παροχής.....	54
3.2.2.9	Χάρτης.....	54
3.2.2.10	Κατάλογος χρονοσειρών βροχής - απορροής - εξάτμισης ταμιευτήρων.....	55
3.2.2.11	Χρονοσειρές βροχής - απορροής - εξάτμισης ταμιευτήρα.....	55
3.2.3	Υλοποίηση της βάσης δεδομένων.....	56
4	Σύνδεση σχεσιακών βάσεων δεδομένων Στερεάς Ελλάδας.....	57
4.1	Σχεδιασμός σύνδεσης βάσεων δεδομένων.....	58
4.1.1	Πίνακας σύνδεσης αντικειμένων.....	59
4.1.2	Αντιστοιχίες ιδιοτήτων.....	60
4.2	Επιλεκτική Ενημέρωση Βάσεων Δεδομένων.....	61
5	Εφαρμογή του Υδρονομέα στο υδροσύστημα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας.....	62
5.1	Περιγραφή του μοντέλου του υδροσυστήματος.....	62
5.2	Βελτιστοποίηση της διαχείρισης υδατικών πόρων.....	66
5.2.1	Σενάριο 1 - Εκτίμηση του υδατικού δυναμικού του υδροσυστήματος.....	66
5.2.2	Σενάριο 2 - Κανονική λειτουργία του δικτύου υδροδότησης.....	69
5.2.3	Σενάριο 3 - Αποκλεισμός της λίμνης Υλίκης.....	71
6	Συμπεράσματα.....	73
	Περαιτέρω έρευνα.....	74
	Αναγνωρίσεις.....	75
	Αναφορές.....	75
	Παράρτημα Α: Οδηγίες χρήσης του Υδρονομέα.....	77
	Εισαγωγή των δεδομένων από τη βάση.....	77
	Φόρμα Επιλογής Βάσης Δεδομένων.....	77
	Φόρμα Επιλογής Χάρτη.....	78
	Οργάνωση δικτύου.....	79
	Φόρμα Οργάνωσης Δικτύου.....	79
	Φόρμες τροποποίησης ιδιοτήτων.....	81
	Φόρμα Ενεργοποίησης Στοιχείων.....	83
	Κύρια Φόρμα.....	84

Επιλογή Στόχων και Περιορισμών Προσομοίωσης.....	88
Επιλογές Συστήματος.....	89
Σελίδα Επιλογών Βελτιστοποίησης	90
Σελίδα Επιλογών Προσομοίωσης	91
Σελίδα Επιλογών Ενεργειακών Παραγόντων.....	92
Σελίδα Επιλογών Οικονομικών Παραγόντων	92
Περιορισμοί ροής.....	93
Εκκίνηση λειτουργικής προσομοίωσης	95
Φόρμα Πληροφορίας Προσομοίωσης	95
Επιλεκτική προσομοίωση	96
Παρακολούθηση της διαδικασίας της προσομοίωσης	98
Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	100
Φόρμα Αστοχίας Συστήματος.....	100
Φόρμες Ισοζυγίων και Οικονομικών Μεγεθών	101
<i>Παράρτημα Β: Οδηγίες χρήσης για το Στοχαστικό Υδρολογικό Προσομοιωτή.....</i>	<i>104</i>
Δομή του πακέτου.....	104
Σενάριο	105
Βάση δεδομένων – τύπος δεδομένων	105
Το κύριο παράθυρο της εφαρμογής	106
Δημιουργία Σεναρίου	107
Επιλογή Σεναρίου.....	107
Εισαγωγή Δεδομένων χωρίς Ιστορικά Δεδομένα.....	108
Εισαγωγή στοιχείων με ιστορικά δεδομένα	109
Επιλογή των ζητούμενων ομάδων και πλήθους ετών για τις συνθετικές χρονοσειρές.....	110
Επισκόπηση του υπολογισμένου μητρώου b.....	111
Επισκόπηση Ιστορικών Χρονοσειρών	112
Ρυθμίσεις.....	112
Προσομοίωση.....	114
Γραφήματα.....	114
Αναφορές.....	116
<i>Παράρτημα Γ: Η Βάση δεδομένων της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας.....</i>	<i>117</i>
Πίνακας node	117
Πίνακας pipe	117
Πίνακας HD_ΕνΜο.....	118
Πίνακας Etrans.....	118
Πίνακας L_Mornos	119

Πίνακας L_Yliki	119
Πίνακας LVS_Evin.....	120
Πίνακας LVS_Mara	120
Πίνακας LVS_Morn.....	121
Πίνακας LVS_Ylik	121
Πίνακας Map	123
Πίνακας Restriction.....	123
Πίνακας StatCorrection.....	123
Πίνακας TargetData.....	123
Πίνακας target	124

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίν. 1:	Πίνακας κόμβου.....	45
Πίν. 2:	Πίνακας διόρθωσης απορροής κόμβου.....	46
Πίν. 3:	Πίνακας αντιστοιχιών στάθμης - όγκου - επιφάνειας ταμιευτήρα.....	46
Πίν. 4:	Πίνακας συντελεστών υπογείων διαφυγών.....	47
Πίν. 5:	Πίνακας Αγωγών.....	47
Πίν. 6:	Πίνακας περιορισμών στη χρήση αγωγών.....	49
Πίν. 7:	Πίνακας αντιστοιχιών ύψους πτώσης - παροχетеυτικότητας.....	50
Πίν. 8:	Πίνακας στόχων.....	50
Πίν. 9:	Πίνακας χρονοσειρών στόχων.....	52
Πίν. 10:	Πίνακας Μονάδων Ενεργειακής Μετατροπής.....	53
Πίν. 11:	Πίνακας αντιστοιχιών ύψους πτώσης - ειδικής ενέργειας - παροχής.....	54
Πίν. 12:	Πίνακας χαρτών.....	54
Πίν. 13:	Πίνακας καταλόγου χρονοσειρών.....	55
Πίν. 14:	Πίνακας χρονοσειρών.....	55
Πίν. 15:	Πίνακας σύνδεσης αντικειμένων.....	59
Πίν. 16:	Στοιχεία ταμιευτήρων υδροσυστήματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας.....	62
Πίν. 17:	Συντελεστής ανισοκατανομής της ζήτησης για την ύδρευση της μείζονος περιοχής Αθηνών σύμφωνα με την ζήτηση των ετών 1989-1997 (Στοιχεία ΕΥΔΑΠ).....	64
Πίν. 18:	Απολήψεις από τη λίμνη Υλίκη για την άρδευση της Κωπαΐδας (σε hm^3).....	64
Πίν. 19:	Αστοχία στόχων κατά την εφαρμογή του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας.....	67
Πίν. 20:	Συντελεστές b του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας.....	67
Πίν. 21:	Υδατικό ισοζύγιο βέλτιστου κανόνα λειτουργίας (σε hm^3).....	68
Πίν. 22:	Παροχетеυτικότητας αγωγών.....	70
Πίν. 23:	Κατανάλωση ενέργειας αντλιοστασίων ανά μονάδα όγκου που μεταφέρεται. (Στοιχεία ΕΥΔΑΠ, τιμές 1989).....	72
Πίν. 24:	Ρυθμίσεις του μοντέλου.....	113

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχ. 1:	Σχηματική παράσταση βασικών παραγόντων για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.....	19
Σχ. 2:	Βασικό διάγραμμα ροής του Υποσυστήματος Λειτουργικής Προσομοίωσης.....	21
Σχ. 3:	Αριθμός των κανόνων λειτουργίας με τους οποίους εκτελείται ο κύριος βρόχος λειτουργικής προσομοίωσης σε σχέση με τον αριθμό των ταμιευτήρων και την διακριτότητα του καννάβου.....	31
Σχ. 4:	Διάγραμμα ροής βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας P ενός ποσοτικά ορισμένου στόχου.....	32
Σχ. 5:	Διάγραμμα ροής αλγορίθμου μεγιστοποίησης της συνολικής παραγόμενης πρωτεύουσας υδροηλεκτρικής ενέργειας.....	34
Σχ. 6:	Γραφική απεικόνιση της σχέσης $SE_p = f(a)$	35
Σχ. 7:	Βασικά συστατικά του Υδρονομέα.....	37
Σχ. 8:	Βασικό διάγραμμα σχέσεων οντοτήτων (Entity-Relationship-Diagram) του Υδρονομέα.....	43
Σχ. 9:	Παράδειγμα πίνακα βάσης δεδομένων.....	44
Σχ. 10:	Σύνδεση Βάσεων δεδομένων της ΒΔΣΕ και του Υδρονομέα.....	58
Σχ. 11:	Διάγραμμα σχέσεων-οντοτήτων μεταξύ αντικειμένων της ΒΔΣΕ και της βάσης δεδομένων του Υδρονομέα.....	59
Σχ. 12:	Σχηματική παράσταση του υδατικού συστήματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας.....	65
Σχ. 13:	Γραφική παράσταση του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας.....	67
Σχ. 14:	Αντιστοιχίες ζήτησης-πιθανότητας αστοχίας κάλυψης ζήτησης για την ύδρευση Αθηνών.....	69
Σχ. 15:	Αντιστοιχίες ζήτησης-πιθανότητας αστοχίας κάλυψης ζήτησης για την ύδρευση της μείζονος περιοχής Αθηνών κατά τη λειτουργία του δικτύου σύμφωνα με το πρώτο και το δεύτερο σενάριο.....	71
Σχ. 16:	Αντιστοιχίες ζήτησης-πιθανότητας αστοχίας κάλυψης ζήτησης για την ύδρευση της μείζονος περιοχής Αθηνών κατά τη λειτουργία του δικτύου χωρίς τη χρήση του αποθέματος της λίμνης Υλίκης.....	72

ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α

Εικ. 1:	Πρώτη σελίδα της Φόρμας Επιλογής Βάσης Δεδομένων.....	77
Εικ. 2:	Δεύτερη σελίδα της Φόρμας Επιλογής Βάσης Δεδομένων	78
Εικ. 3:	Φόρμα Επιλογής Χάρτη	79
Εικ. 4:	Φόρμα Οργάνωσης Δικτύου.....	80
Εικ. 5:	Φόρμα Στοιχείων Κόμβου.....	81
Εικ. 6:	Φόρμα Στοιχείων Αγωγού.....	82
Εικ. 7:	Φόρμα Στοιχείων Μονάδας Ενεργειακής Μετατροπής.....	82
Εικ. 8:	Φόρμα Ενεργοποίησης Στοιχείων	84
Εικ. 9:	Κύρια Φόρμα Υδρονομέα.....	87
Εικ. 10:	Καμπύλες στάθμης-όγκου και στάθμης-επιφάνειας ταμιευτήρων	87
Εικ. 11:	Φόρμα Στόχων και Περιορισμών Προσομοίωσης.....	88
Εικ. 12:	Αλλαγή προτεραιότητας στόχου από τη 5 ^η στην 3 ^η θέση.....	88
Εικ. 13:	Βοηθητική φόρμα για την εισαγωγή εποχιακής και διαχρονικής μεταβολής της τιμής στόχου	89
Εικ. 14:	Επιλογές βελτιστοποίησης.....	91
Εικ. 15:	Επιλογές προσομοίωσης.....	92
Εικ. 16:	Επιλογές ενεργειακών παραγόντων.....	93
Εικ. 17:	Επιλογές οικονομικών παραγόντων	94
Εικ. 18:	Φόρμα Περιορισμών Χρήσης Αγωγών	94
Εικ. 19:	Φόρμα Πληροφορίας Προσομοίωσης	95
Εικ. 20:	Φόρμα Επιλεκτικής Προσομοίωσης.....	96
Εικ. 21:	Γραφική παράσταση κανόνων λειτουργίας	97
Εικ. 22:	Παράδειγμα ροών στους αγωγούς του συστήματος κατά την προσομοίωση της 4 ^{ης} χρονικής περιόδου	98
Εικ. 23:	Παρακολούθηση της διαδικασίας της προσομοίωσης με τη βοήθεια της Φόρμας Δυναμικής Απεικόνισης, της Φόρμας Επιλογών και του διαγράμματος όγκων των ταμιευτήρων	100
Εικ. 24:	Φόρμα Αστοχίας Συστήματος	101
Εικ. 25:	Σελίδα Αποτελεσμάτων Υδατικού Ισοζυγίου.....	102
Εικ. 26:	Σελίδα Αποτελεσμάτων Ενεργειακού Ισοζυγίου.....	102
Εικ. 27:	Σελίδα Αποτελεσμάτων Οικονομικών Μεγεθών.....	103
Εικ. 28:	Παράδειγμα αναλυτικού γραφήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	103

ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Β

Εικ. 29:	Χαρακτηριστικές εικόνες από το παραθυρικό περιβάλλον του SHyS	104
Εικ. 30:	Το κύριο παράθυρο της εφαρμογής.....	106
Εικ. 31:	Επιλογή νέου σεναρίου	107
Εικ. 32:	Ονομασία σεναρίου.....	107
Εικ. 33:	Επιλογή σεναρίου από μια λίστα.....	108
Εικ. 34:	Εισαγωγή δεδομένων στο σενάριο	108
Εικ. 35:	Φόρμα εισαγωγής δεδομένων.....	109
Εικ. 36:	Υπολογισμός των δεδομένων από ιστορικές χρονοσειρές που βρίσκονται στη βάση δεδομένων	110
Εικ. 37:	Επιλογή μεγέθους συνθετικών χρονοσειρών.....	111
Εικ. 38:	Μητρώο b.....	111
Εικ. 39:	Επισκόπηση των ιστορικών στοιχείων.....	112
Εικ. 40:	Μενού για προσομοίωση.....	112
Εικ. 41:	Ρυθμίσεις του μοντέλου	113
Εικ. 42:	Φόρμα για την επίδειξη της εξέλιξης των υπολογισμών.....	114
Εικ. 43:	Γραφήματα στατιστικών χαρακτηριστικών των αποτελεσμάτων	115
Εικ. 44:	Γράφημα τυπικών αποκλίσεων.....	115
Εικ. 45:	Γράφημα τυπικών αποκλίσεων (Επισκόπηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων.....	116

1 Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του ερευνητικού αντικειμένου

Το τεύχος αυτό περιγράφει το υπολογιστικό σύστημα προσομοίωσης και βελτιστοποίησης *Υδρονομέας* και την εφαρμογή του στο Υδροσύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Το έργο χρηματοδοτήθηκε από τη Διεύθυνση Ύδρευσης και Αποχέτευσης του ΥΠΕΧΩΔΕ και ολοκληρώθηκε στα πλαίσια της τρίτης φάσης του ερευνητικού έργου «Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας». Συγκεκριμένα η παρούσα εργασία ανταποκρίνεται στο εδάφιο της απόφασης ανάθεσης του ερευνητικού έργου που αναφέρεται στην *Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης υδροσυστήματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας* καθώς και μέρος του εδαφίου που αναφέρεται στη *Ολοκλήρωση και διασύνδεση πληροφορικών συστημάτων*.

Για την επίτευξη του σκοπού της προσομοίωσης και βελτιστοποίησης κρίθηκε σκόπιμος ο διαχωρισμός του έργου της ανάπτυξης ενός υπολογιστικού συστήματος από αυτόν της προσαρμογής και εφαρμογής του στο υδροσύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Το υπολογιστικό σύστημα που φέρει το όνομα *Υδρονομέας*, είναι σχεδιασμένο για να ανταποκρίνεται στο στόχο της υδροδότησης της πρωτεύουσας ο οποίος κυριαρχεί στο υδροσύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Παράλληλα ο σχεδιασμός του είναι τέτοιος ώστε να επιτρέπει την επίλυση μιας ευρείας κλάσης διαχειριστικών προβλημάτων πολλαπλών στόχων, ανεξαρτήτως τοπολογίας του δικτύου του υδροσυστήματος.

Η θεωρητική βάση του υπολογιστικού συστήματος καλύπτεται μόνο εν μέρει από τη βιβλιογραφία. Το μεγαλύτερο μέρος της αποτελεί πρωτότυπη εργασία της παρούσης φάσης καθώς και των προηγούμενων του ερευνητικού έργου. Περιλαμβάνει την πλήρη μαθηματική προσομοίωση συστήματος ταμιευτήρων και εξωτερικών υδραγωγείων, λαμβάνοντας υπόψη την παροχετευτικότητα και τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής των υδραγωγείων.

Το τεύχος αυτό συνοδεύεται από ένα σύνολο ηλεκτρονικών αρχείων που περιλαμβάνουν το υπολογιστικό σύστημα *Υδρονομέας* και τη βάση δεδομένων προσαρμοσμένη στο υδροσύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας.

Για την εφαρμογή του συστήματος στην Ανατολική Στερεά Ελλάδα αξιοποιήθηκαν οι πληροφορίες που συνελέγησαν από τη βιβλιογραφία και από αρμόδιους φορείς και καταγράφονται αναλυτικά στο τεύχος 36. Η οργάνωση των πληροφοριών στην ευρύτερη βάση δεδομένων της Στερεάς Ελλάδας περιγράφεται στο τεύχος 38. Η προσαρμογή των δεδομένων στο μοντέλο και η εφαρμογή του *Υδρονομέας* για την Ανατολική Στερεά Ελλάδα περιγράφεται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 5 του τεύχους αυτού.

1.2 Στόχοι σχεδιασμού του υπολογιστικού συστήματος

Η διαχείριση υδατικών πόρων για την εξοικονόμηση και την καλύτερη κατανομή τους βασίζεται στα έργα αξιοποίησης και κατά κύριο λόγο σε δίκτυα ταμιευτήρων και αγωγών μεταφοράς. Ο αποθηκευτικός όγκος των ταμιευτήρων σε συνδυασμό με τη δυνατότητα μεταφοράς του νερού μέσω υδραταγωγών αυξάνει και καθιστά περισσότερο αποδοτική την ικανότητα διαχείρισης του συστήματος. Οι δυνατότητες επιλογών διαχείρισης αυξάνουν όμως σημαντικά με τον αριθμό των έργων αξιοποίησης με συνέπεια να δυσχεραίνει το έργο της διαχείρισης. Το έργο αυτό δυσχεραίνεται επίσης και με την παρουσία ανταγωνισμού στόχων όπως η ύδρευση, η άρδευση, η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας κ.ά. ιδιαίτερα σε υδροσυστήματα με περιορισμένους υδατικούς πόρους. Η απάντηση σε ερωτήματα όπως η πρόβλεψη δυνατότητας κάλυψης ενός στόχου και η επιλογή του αποδοτικότερου συστήματος διαχείρισης αποτελούν αντικείμενο μελέτης, απαραίτητο εργαλείο του οποίου αποτελεί ένα μοντέλο προσομοίωσης και βέλτιστης διαχείρισης υδατικών πόρων.

Ο βασικότερος στόχος κατά τον σχεδιασμό του λογισμικού ήταν επομένως η ανάπτυξη ενός εργαλείου ικανού να υπολογίζει τον βέλτιστο κανόνα διαχείρισης και να προβλέπει τη δυνατότητα κάλυψης στόχων στο Υδροσύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας και κατά κύριο λόγο την ύδρευση της μείζονος περιοχής Αθηνών.

Στην πραγματικότητα όμως οι δυνατότητες του Υδρονομέα δεν περιορίζονται στην προσομοίωση ενός συγκεκριμένου υδροσυστήματος ή έστω και παραλλαγών του, αλλά προσφέρει στον χρήστη πλήρεις δυνατότητες σχεδιασμού ενός μοντέλου υδροσυστήματος. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει τα αντικείμενα του μοντέλου του υδροσυστήματος, να τους προσδώσει χαρακτηριστικά, να τα διασυνδέσει μεταξύ τους και να ορίσει τους στόχους προσομοίωσης. Καθώς οι κανόνες λειτουργίας του συστήματος προσομοίωσης είναι γενικού χαρακτήρα, μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ευρύ φάσμα υδροσυστημάτων.

Επιπρόσθετος στόχος κατά τον σχεδιασμό του λογισμικού ήταν η δυνατότητα εύκολης και γρήγορης προσαρμογής του υδροσυστήματος σε μελλοντικές ή φανταστικές συνθήκες, με αποτέλεσμα ο μελετητής να μπορεί να αποκτήσει επίγνωση των αποτελεσμάτων διαφόρων πραγματικών ή φανταστικών σεναρίων και να κατανοήσει καλύτερα τις επιπτώσεις των επιλογών του. Σε αυτό εντάσσεται η δυνατότητα τροποποίησης μιας σειράς από παράγοντες και παραμέτρους, όπως η δομή του δικτύου, οι τιμές των ιδιοτήτων των έργων αξιοποίησης, οι στόχοι και οι προτεραιότητες κατά την προσομοίωση, οι χρονοσειρές εισόδου κ.ά.

Παράλληλα με τον κύριο στόχο προσομοίωσης, άλλοι δευτερεύοντες στόχοι μπορούν να ληφθούν υπόψη στον Υδρονομέα, όπως π.χ. η άρδευση των εκτάσεων της Κωπαΐδας. Ο Υδρονομέας δίνει τη δυνατότητα στο μελετητή να ορίσει έναν συνδυασμό από στόχους προσομοίωσης, που μπορούν να είναι και ανταγωνιστικοί μεταξύ τους, εντάσσοντάς τους σε ένα σύστημα προτεραιοτήτων. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε κατά τον σχεδιασμό στον ενιαίο τρόπο αντιμετώπισης όλων των στόχων, ενώ από το μαθηματικό μοντέλο δεν προκύπτει κανένας περιορισμός ως προς τον αριθμό ή τον συνδυασμό στην επιλογή τους.

Οι πολλαπλοί τρόποι διαχείρισης των υδατικών πόρων ενός υδροσυστήματος επιβάλλουν στο λογισμικό να διαθέτει την ικανότητα επιλογής μεταξύ περισσότερων δυνατοτήτων, δίνοντας του χαρακτηριστικά έμπειρου συστήματος. Άλλα υπολογιστικά συστήματα αρκούνται στη

λειτουργία της προσομοίωσης με περιορισμένες δυνατότητες αναζήτησης της βέλτιστης διαχείρισης. Το σύστημα βελτιστοποίησης του Υδρονομέα προσομοιώνει το υδροσύστημα πολλές φορές με διαφορετικούς κανόνες λειτουργίας και επιλέγει από τα αποτελέσματα τον πιο αποδοτικό διαχειριστικό κανόνα.

Πολλά από τα πιθανά σενάρια που προσομοιώνονται απαιτούν αρκετά μεγάλη αξιοπιστία στην πρόγνωση των αποτελεσμάτων, όπως στην περίπτωση του στόχου της υδροδότησης της πρωτεύουσας, όπου η αποδεκτή αστοχία μπορεί να είναι της τάξης της μίας φοράς στα εκατό έτη. Αυτό προϋποθέτει την προσομοίωση μιας χρονικής περιόδου χιλιάδων ετών. Οι ιστορικές χρονοσειρές βροχής, απορροής και εξάτμισης που διατίθενται όμως δεν ξεπερνούν τις λίγες δεκαετίες. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη η ενσωμάτωση στον Υδρονομέα και η παραπέρα ανάπτυξη ενός μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης το οποίο στηρίζεται σε θεωρητική ανάλυση που έγινε στην προηγούμενη φάση του ερευνητικού έργου. Το μοντέλο αυτό παράγει από ιστορικές χρονοσειρές συνθετικές, μεγάλης χρονικής διάρκειας με τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά με αυτά των ιστορικών.

Η σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων από το μελετητή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εξαγωγή των κατάλληλων συμπερασμάτων. Για τον λόγο αυτό επιδίωξη κατά τον σχεδιασμό του Υδρονομέα ήταν η λεπτομερής και κατατοπιστική παρουσίασή των αποτελεσμάτων. Σε αυτό συμβάλουν τόσο η πρόβλεψη κάλυψης των στόχων προσομοίωσης με όρους πιθανότητας, όσο και οι αναλυτικοί πίνακες ισοζυγίων που περιλαμβάνονται στα αποτελέσματα του Υδρονομέα.

Έμφαση δόθηκε τέλος κατά τον σχεδιασμό του υπολογιστικού συστήματος και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του λογισμικού. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι το αντικειμενοστραφές, δομημένο λογισμικό που αναπτύχθηκε προσφέρεται για πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις του μοντέλου, πράγμα που ευνοεί τη μακροβιότητα του υπολογιστικού συστήματος. Το σύστημα λειτουργεί σε παραθυρικό περιβάλλον φιλικό προς τον χρήστη.

1.3 Συνοπτική περιγραφή των βασικών λειτουργιών του Υδρονομέα

Το πρόγραμμα Υδρονομέας εγκαθίσταται με τη βάση δεδομένων του σε περιβάλλον MS-Windows 95/98/NT. Σε μια τυπική session ο χρήστης επιλέγει από τη βάση δεδομένων το υδροσύστημα που θέλει να προσομοιώσει και το χάρτη που θα χρησιμοποιηθεί ως φόντο, ευθύς μετά την έναρξη του προγράμματος. Το σύστημα επιβεβαιώνει την εισαγωγή των δεδομένων αναφέροντας την ονομασία και άλλα χρήσιμα στοιχεία του υδροσυστήματος.

Αμέσως μετά ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εμφανίσει στην οθόνη το μοντέλο του δικτύου και της γεωγραφικής περιοχής στο οποίο εντάσσεται. Με το *Υποσύστημα Οργάνωσης Δικτύου* που βασίζεται σε εύχρηστες και φιλικές προς τον χρήστη μάσκες εισαγωγής δεδομένων, έχει τη δυνατότητα να απενεργοποιήσει, να επανενεργοποιήσει, να προσθέσει καινούργια και να διαγράψει μέρη του δικτύου καθώς και να μεταβάλει τις ιδιότητες των αντικειμένων που το απαρτίζουν, σύμφωνα με το σενάριο που ακολουθείται. Έτσι μπορεί για παράδειγμα να αναπροσαρμόσει τον αρχικό όγκο και τις παραμέτρους των υπογείων διαφυγών στους ταμιευτήρες ή τη διάρκεια χρήσης και την κατεύθυνση ροής στους αγωγούς.

Με το *Υποσύστημα Επιλογής Στόχων Προσομοίωσης* ο χρήστης μπορεί να θέσει πολλαπλούς στόχους που αφορούν την κάλυψη της ζήτησης σε νερό, τη διατήρηση της στάθμης κάτω από ένα ανώτατο ή κατώτατο επιτρεπτό όριο στους ταμιευτήρες, την ελάχιστη ροή σε αγωγούς και την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Όλους τους στόχους τους εντάσσει σε μια σειρά προτεραιοτήτων σύμφωνα με την σπουδαιότητα του στόχου και επιλέγει την ανώτατη αποδεκτή αστοχία για κάθε έναν από αυτούς. Η εποχιακή μεταβολή των στόχων, όπως η ανώτατη στάθμη διατήρησης πλημμυρικού όγκου ταμιευτήρων καθώς και η πρόβλεψη διαχρονικής αύξησης της τιμής των στόχων, λαμβάνονται υπόψη κατά την προσομοίωση. Οι αλλαγές του συστήματος επιλογής στόχων διαχείρισης μπορούν να αποθηκευτούν κατ' επιλογήν και στη βάση δεδομένων για μετέπειτα χρήση.

Στη βάση δεδομένων είναι αποθηκευμένα τα δεδομένα ιστορικών χρονοσειρών βροχής, απορροής και εξάτμισης στους κόμβους των ταμιευτήρων. Το *Υποσύστημα Στοχαστικής Προσομοίωσης* μπορεί να δημιουργήσει από τα στατιστικά χαρακτηριστικά ιστορικών χρονοσειρών συνθετικές χρονοσειρές πολύ μεγαλύτερης διάρκειας και ίδιων στατιστικών χαρακτηριστικών, πράγμα που είναι απαραίτητο για την προσομοίωση στόχων όπως αυτού της ύδρευσης.

Ο χρήστης προετοιμάζοντας τις συνθήκες προσομοίωσης/βελτιστοποίησης επιλέγει κατόπιν τούτου τιμές για τις παραμέτρους του λειτουργικού συστήματος, όπως για παράδειγμα την ακρίβεια των υπολογισμών ή το είδος της αστοχίας που λαμβάνεται υπόψη κατά την βελτιστοποίηση. Κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης/βελτιστοποίησης εισάγονται στο *Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης* οι συνθετικές χρονοσειρές που αντιστοιχούν σε χιλιάδες χρόνια προσομοίωσης μαζί με το δίκτυο και τους στόχους του σεναρίου.

Κατά την βελτιστοποίηση προσομοιώνεται το ίδιο σενάριο με διαφορετικούς κανόνες λειτουργίας κάθε φορά με σκοπό την ανεύρεση του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας. Ο κανόνας αυτός, λαμβάνει υπόψη του το συνολικό όγκο του συστήματος στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, την κατανομή του στους ταμιευτήρες, τη ζήτηση που δημιουργούν οι στόχοι προσομοίωσης, την παροχετευτικότητα των αγωγών και άλλους παράγοντες και αποφασίζει για τις απολήψεις από τους ταμιευτήρες και τις ροές μέσα στο σύστημα. Καθώς πρόκειται για παραμετρικό κανόνα λειτουργίας, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει έναν συγκεκριμένο κανόνα λειτουργίας δίνοντας τιμές στις παραμέτρους του κανόνα από την ειδικά γι' αυτόν τον σκοπό σχεδιασμένη φόρμα.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ο χρήστης μπορεί να περάσει στο *Υποσύστημα Δυναμικής Απεικόνισης* και να παρακολουθήσει βήμα προς βήμα τις μεταβολές των όγκων στους ταμιευτήρες και τις ροές που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο. Για να κατανοήσει καλύτερα τις αλλαγές αυτές, έχει τη δυνατότητα να σταματήσει την προσομοίωση σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, να εμφανίσει στη οθόνη του υπολογιστή χαρακτηριστικές τιμές των ταμιευτήρων (επίκαιρος όγκος, όγκος-στόχος, νεκρός όγκος, πλημμυρικός όγκος), των αγωγών (επίκαιρη ροή, παροχετευτικότητα, ύψος πτώσης) και των μονάδων ενεργειακής μετατροπής (ενέργεια που παρήχθη/καταναλώθηκε) και να διαπιστώσει τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος και τα αίτια της αστοχίας κάλυψης στόχων.

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης αναφέρονται στην πιθανότητα αστοχίας του συστήματος και του εκάστοτε στόχου που έχει θέσει ο χρήστης ξεχωριστά, κατά την εφαρμογή του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας. Πέρα από την πιθανότητα αστοχίας ως προς τη χρονική περίοδο (έτη αστοχίας προς το σύνολο των προσομοιωμένων ετών), υπολογίζεται η πιθανότητα αστοχίας χρονικού βήματος (μήνες) όπως και η αστοχία κάλυψης του όγκου (σε μερικούς μόνο στόχους, βλ. κεφ. 2.4.1.3). Τα αποτελέσματα αυτά συνοδεύονται από λεπτομερείς πίνακες υδατικού και ενεργειακού ισοζυγίου όπως και οικονομικού ισολογισμού που αναφέρονται σε ετήσιες μέσες τιμές της βέλτιστης λύσης.

1.4 Σε ποια ερωτήματα δίνει απάντηση το υπολογιστικό σύστημα

Το υπολογιστικό σύστημα μπορεί να δώσει απάντηση σε μία σειρά από ερωτήματα όπως τα ακόλουθα που αφορούν το σύστημα ταμειυτήρων και εξωτερικών υδραγωγείων τροφοδοσίας της Αθήνας:

- Το υδrosύστημα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας παρέχει τη δυνατότητα κάλυψης ζήτησης 600 hm^3 για την ύδρευση της Αθήνας με παράλληλη χρήση 50 hm^3 ετησίως από την Υλίκη για την άρδευση της Κωπαΐδας;
- Ποια η αστοχία κάλυψης αυτής της ζήτησης;
- Ποια η μέγιστη ζήτηση ύδρευσης που μπορεί να καλυφθεί με αστοχία το πολύ 1%;
- Με ποιο κανόνα διαχείρισης μπορεί να επιτευχθεί αυτό;
- Πώς διαφοροποιούνται τα μεγέθη σε περίπτωση μη χρησιμοποίησης της λίμνης Υλίκης και της υπολεκάνης της;
- Πώς διαφοροποιούνται τα μεγέθη σε περίπτωση που λάβουμε υπόψη την πραγματική παροχτευτικότητα των αγωγών;

2 Μοντέλο συστήματος προσομοίωσης - βελτιστοποίησης

2.1 Μοντέλο υδρολογικών συνιστωσών

2.1.1 Βασική εξίσωση υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρα

Για κάθε κόμβο του συστήματος με αύξοντα αριθμό i ισχύει η βασική εξίσωση υδατικού ισοζυγίου

$$S_i^{t+1} = S_i^t + QS_i^t + QR_i^t + QN_i^t - D_i^t - R_i^t - SP_i^t - L_i^t - EV_i^t \quad (1)$$

$$t=1,\dots,M \quad i=1,\dots,N$$

όπου για το χρονικό βήμα t , M ο συνολικός αριθμός προσομοιωμένων χρονικών βημάτων (μηνών), N ο αύξων αριθμός των κόμβων του δικτύου, S_i^t το απόθεμα του κόμβου-ταμιευτήρα i , QS_i^t οι εισροές στον κόμβο από την υπολεκάνη του κόμβου-ταμιευτήρα i , QR_i^t ο όγκος νερού που προέρχεται από βροχόπτωση στην επιφάνεια του κόμβου-ταμιευτήρα i , QN_i^t οι εισροές στον κόμβο i από άλλα σημεία του δικτύου μέσω υδραγωγείων, D_i^t οι απολήψεις από τον κόμβο i για την κάλυψη ζήτησης, R_i^t οι εκροές από τον κόμβο i προς άλλα σημεία του δικτύου μέσω υδραγωγείων, SP_i^t ο όγκος που διαφεύγει λόγω έλλειψης αποθηκευτικής ικανότητας στον κόμβο i (π.χ. περίπτωση υπερχειλίσης ταμιευτήρα), L_i^t οι απώλειες από υπόγειες διαφυγές στον κόμβο-ταμιευτήρα i και EV_i^t οι απώλειες εξάτμισης από τον κόμβο-ταμιευτήρα i

Στην περίπτωση κόμβων που δεν είναι ταμιευτήρες και δεν διαθέτουν αποθηκευτικό χώρο ή λεκάνη απορροής, από την εξίσωση (1) συνεπάγεται:

$$QN_i^t = D_i^t + R_i^t + SP_i^t \quad (2)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, ζήτηση νερού D_i^t στον κόμβο i μπορεί να υπάρξει ακόμα και αν ο κόμβος δεν διαθέτει αποθηκευτικό χώρο. Το υπολογιστικό σύστημα φροντίζει για την κάλυψη του ζητούμενου όγκου από τα αποθέματα που βρίσκονται ανάντη. Επίσης σε ειδικές περιπτώσεις είναι επιβεβλημένη η εισροή όγκου στον κόμβο, π.χ. για λόγους περιβαλλοντικής διατήρησης στον ανάντη αγωγό, χωρίς να είναι δυνατή η αποθήκευση ή η διοχέτευση του όγκου κατάντη, παρά μόνο η υπερχειλίση προς φυσικά υδατορεύματα. Ο όγκος αυτός SP_i^t χάνεται από το δίκτυο.

2.1.2 Απώλειες από υπόγειες διαφυγές

Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει τις απώλειες ενός ταμιευτήρα από υπόγειες διαφυγές είναι συνάρτηση της στάθμης και προσεγγίζεται από ένα κυβικό πολυώνυμο με τυχαίο όρο σφάλματος, δηλαδή:

$$L_{t,y} = A_t Z_{t,y}^3 + B_t Z_{t,y}^2 + C_t Z_{t,y} + E_t + W_{t,y} \quad (3)$$

όπου $L_{t,y}$ είναι οι υπόγειες διαφυγές στο χρονικό βήμα t της χρονικής περιόδου y , A_t, B_t, C_t, E_t οι συντελεστές της εξίσωσης στο χρονικό βήμα t , $Z_{t,y}$ η στάθμη στον ταμιευτήρα στην αρχή του χρονικού βήματος t της χρονικής περιόδου y και $W_{t,y}$ ο όρος σφάλματος που ακολουθεί κατανομή $N(0, \sigma_t)$.

Αφού προσαρμοστούν κατάλληλα οι συντελεστές A_t, B_t, C_t, E_t καθώς και η τυπική απόκλιση σ_t , ο Υδρονομέας προσομοιώνει τις προβλεπόμενες υπόγειες διαφυγές των ταμιευτήρων λαμβάνοντας υπόψη του εκτός από τη στάθμη του ταμιευτήρα και τις εποχιακές διακυμάνσεις που παρατηρούνται στα φαινόμενα αυτά.

2.1.3 Διόρθωση απορροής - Υπόγειοι υδροφορείς

Η ασάφεια υδρογεωλογικών καταστάσεων και η φύση των υπογείων υδροφορέων δυσχεραίνει την αποτελεσματική προσομοίωση τους. Η τακτική όμως των απολήψεων υδατικών πόρων από υπόγειους υδροφορείς που βρίσκονται στην υπολεκάνη ενός ταμιευτήρα επηρεάζει και την απορροή που αποτελεί βασικό παράγοντα του υδατικού ισοζυγίου. Ως εκ τούτου οι αντλήσεις υπογείων υδάτων που βρίσκονται στην υπολεκάνη του υδροσυστήματος δεν μπορούν να παραλειφθούν από το μοντέλο.

Το σκεπτικό με το οποίο επιχειρήθηκε ο συνυπολογισμός των απολήψεων είναι το εξής: Καθώς οι μετρήσεις των απορροών στους ταμιευτήρες περιλαμβάνουν μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο και τακτική απολήψεων, μελλοντικά σενάρια προσομοίωσης που βασίζονται στις μετρήσεις αυτές πρέπει να λάβουν υπόψη τους τις τυχόν διαφοροποιήσεις από εκείνη την τακτική απολήψεων. Για αυτόν τον λόγο στον Υδρονομέα είναι ενσωματωμένη η δυνατότητα διόρθωσης της καταχωρημένης απορροής στον ταμιευτήρα όταν αυτή κρίνεται επιβεβλημένη, δηλαδή στην περίπτωση που εξετάζονται σενάρια με διαφοροποιημένες χρήσεις των υπόγειων υδροφορέων από αυτές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Οι μεταβολές της απορροής σε σχέση με τις υπάρχουσες χρονοσειρές απορροών από την υπολεκάνη του ταμιευτήρα δίνονται από τον επαναληπτικό τύπο:

$$\Delta QS_t = (1-\alpha)\Delta QS_{t-1} + \alpha\beta\Delta D_t \quad \text{και} \quad \Delta QS_0 = 0 \quad (4)$$

όπου ΔQS_t η διόρθωση της απορροής στο χρονικό βήμα t , ΔD_t η διαφορά μεταξύ της προβλεπόμενης απόληψης από τον υπόγειο υδροφορέα και της απόληψης με την οποία υπολογίστηκε η χρονοσειρά απορροής στο χρονικό βήμα t και α και β οι παράμετροι διόρθωσης.

2.1.4 Περιορισμοί παροχής αγωγών

Πέραν τούτου του σύστημα τηρεί την αρχή της διατήρησης του όγκου κατά τη μεταφορά του μέσα στο σύστημα. Αν υποθέσουμε πως

$$R_i^t = \sum_{j=1}^m r_{i,j}^t \quad \text{και} \quad QN_i^t = \sum_{j=1}^n q_{i,j}^t \quad (5)$$

όπου n είναι ο αριθμός των αγωγών που καταλήγουν στον κόμβο i , m ο αριθμός των αγωγών που τροφοδοτούνται από τον κόμβο i , $r_{i,j}^k$ οι εκροές το χρονικό βήμα t από τον κόμβο i μέσω του υδραγωγείου j και $q_{i,j}^k$ οι εισροές το χρονικό βήμα t στον κόμβο i μέσω του υδραγωγείου j , τότε είναι φανερό πως σε κάθε εκροή $r_{i,j}^k$ από κάποιον κόμβο l του δικτύου υπάρχει και η αντίστοιχη εισροή $q_{i,j}^k$ σε κάποιον άλλο κόμβο i ($i \neq l$), έτσι ώστε

$$r_{i,j}^k = q_{i,j}^k \quad (6)$$

Η ροή σε έναν αγωγό δεν μπορεί να υπερβεί την παροχετευτικότητά του στο ίδιο χρονικό βήμα. Για κάθε αγωγό μίας κατευθύνσεως και για κάθε χρονικό βήμα t πρέπει συνεπώς να ισχύει:

$$Q_t \leq C \text{ DC}_t \quad (7)$$

όπου Q_t η ροή στο χρονικό βήμα t , C ο συντελεστής χρήσης του αγωγού κατά την κανονική φορά ροής και DC_t η παροχετευτικότητα στο χρονικό βήμα t . Ο συντελεστής C δέχεται τιμές από 0 μέχρι 1 όπου 1 αντιστοιχεί στην απρόσκοπτη δυνατότητα χρήσης του αγωγού σε όλη διάρκεια του χρονικού βήματος.

Σε περίπτωση που ο αγωγός είναι αμφίδρομης ροής πρέπει να ισχύει αντίστοιχα και ο περιορισμός:

$$Q'_t \leq C' \text{ DC}'_t \quad (8)$$

όπου Q'_t η ανάστροφη ροή στο χρονικό βήμα t , C' ο συντελεστής χρήσης του αγωγού κατά την ανάστροφη φορά ροής και DC'_t η παροχετευτικότητα ανάστροφης ροής στο χρονικό βήμα t που ορίζεται από την ικανότητα άντλησης του συνδεδεμένου αντλιοστασίου.

Με τους συντελεστές C και C' τίθενται κανόνες που περιορίζουν τη δυνατότητα χρήσης ενός αγωγού σε μέρος μόνο της συνολικής διάρκειας του χρονικού βήματος. Η επιλογή αυτή βρίσκει π.χ. χρησιμότητα στους αγωγούς αμφίδρομης ροής οι οποίοι συνδέονται με μονάδες ενεργειακής μετατροπής και λειτουργούν σε ώρες αιχμής παράγοντας πρωτεύουσα ηλεκτρική ενέργεια και μεταφέροντας νερό από ανάντη προς κατόντη, ενώ στις νυχτερινές μόνο ώρες λειτουργούν ως αντλιοστάσια και μεταφέρουν νερό στην αντίθετη κατεύθυνση καταναλώνοντας δευτερεύουσα ενέργεια.

Τέλος σε κάθε περίπτωση ισχύει η σχέση

$$Q_t / \text{DC}_t + Q'_t / \text{DC}'_t \leq 1 \quad (9)$$

η οποία περιορίζει τη συνολική ροή και στις δύο κατευθύνσεις στον αγωγό κατά το ίδιο χρονικό βήμα.

2.2 Μοντέλο ενεργειακών συνιστωσών

Σκοπός της εισαγωγής ενεργειακών συνιστωσών στον Υδρονομέα αποτελεί αφ' ενός η επιδίωξη στόχων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά την προσομοίωση/βελτιστοποίηση, εντάσσοντάς τους σε ένα πλαίσιο προτεραιοτήτων με τους υπόλοιπους μη ενεργειακούς στόχους και αφ' ετέρου η παρουσίαση ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού ισοζυγίου της βέλτιστης διαχείρισης υδατικών πόρων.

Οι ενεργειακοί παράγοντες μοντελοποιούνται στον Υδρονομέα από **Μονάδες Ενεργειακής Μετατροπής (MEM)** και ανάλογα με τον τύπο της μονάδας παράγουν ή καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- **Στρόβιλοι Παραγωγής Υδροηλεκτρικής Ενέργειας** που παράγουν υδροηλεκτρική ενέργεια κατά τη μεταφορά νερού από ανάντη προς κατόντη
- **Αντλιοστάσια** τα οποία καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια μεταφέροντας νερό από κατόντη προς ανάντη
- **Αντλιοστρόβιλοι** οι οποίοι έχουν την ικανότητα να λειτουργούν αμφίδρομα ανάλογα με τις ανάγκες του υδροσυστήματος καταναλώνοντας ή παράγοντας υδροηλεκτρική ενέργεια

Μια μονάδα ενεργειακής μετατροπής συνδέεται πάντοτε με έναν αγωγό ο οποίος έχει δεδομένα σημεία υδροληψίας και εξαγωγής. Ο ίδιος ο αγωγός με τον οποίο συνδέεται η MEM μπορεί να έχει δυνατότητα μονής ή αμφίδρομης κατεύθυνσης ροής. Από τις ιδιότητες των αντικειμένων Αγωγός και MEM προκύπτουν οι ακόλουθες δυνατότητες συνδυασμών:

- Αγωγός μονής κατεύθυνσης χωρίς συνδεδεμένη μονάδα ενεργειακής μετατροπής
- Αγωγός μονής κατεύθυνσης με συνδεδεμένο αντλιοστάσιο
- Αγωγός μονής κατεύθυνσης με συνδεδεμένη μονάδα παραγωγής ενέργειας
- Αγωγός αμφίδρομης ροής με συνδεδεμένο αντλιοστάσιο.
- Αγωγός αμφίδρομης ροής με συνδεδεμένο αντλιοστρόβιλο

Οι αντίστοιχοι μη δυνατοί συνδυασμοί και οι διορθώσεις στις ιδιότητες των αντικειμένων που λαμβάνουν χώρα κατά την εισαγωγή των στοιχείων είναι οι ακόλουθοι:

- Αγωγός αμφίδρομης ροής χωρίς συνδεδεμένη μονάδα ενεργειακής μετατροπής. Ο αγωγός μετατρέπεται σε αγωγό μονής κατεύθυνσης
- Αγωγός αμφίδρομης ροής με συνδεδεμένη μονάδα παραγωγής ενέργειας. Ο αγωγός μετατρέπεται σε αγωγό μονής κατεύθυνσης
- Αγωγός μονής κατεύθυνσης με συνδεδεμένο αντλιοστρόβιλο. Ο αντλιοστρόβιλος μετατρέπεται σε μονάδα παραγωγής ενέργειας

Σε Μονάδες Παραγωγής Υδροηλεκτρικής Ενέργειας μπορούν να τεθούν ενεργειακοί στόχοι, η εξυπηρέτηση των οποίων επιδιώκεται κατά την προσομοίωση με τον τρόπο που περιγράφεται στο κεφ. 2.4.1.2.5.

2.2.1 Υπολογισμοί ενεργειακού ισοζυγίου

Για να υπολογιστεί η ενέργεια E που παράγεται ή καταναλώνεται από μία MEM χρησιμοποιείται η εξίσωση

$$E = \psi_h V_h h \quad (10)$$

όπου ψ_h είναι η ειδική ενέργεια σε GWh/hm^4 , που εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της μονάδας, όσο και από τις υδραυλικές συνθήκες, V_h ο όγκος νερού σε hm^3 και h το ολικό ύψος πτώσης σε hm που αντιστοιχεί στη διαφορά στάθμης νερού στα σημεία υδροληψίας και εξαγωγής του αγωγού με τον οποίο συνδέεται η μονάδα ενεργειακής μετατροπής. Απαραίτητη προϋπόθεση για να ισχύει ο παραπάνω τύπος είναι η μονοσήμαντη σχέση ύψους πτώσης και παροχής που διέρχεται από τη μονάδα. Μολονότι η λειτουργία μιας μονάδας ενεργειακής μετατροπής επιτρέπει ένα ευρύ φάσμα παροχών για δεδομένο ύψος πτώσης, λόγοι λειτουργικοί και οικονομικοί οδηγούν σε μονοσήμαντη σχέση, έτσι ώστε η εκτίμηση που γίνεται με την παραπάνω εξίσωση να θεωρείται ασφαλής.

Εφ' όσον ο αγωγός που συνδέεται με τον στρόβιλο μονάδας παραγωγής ενέργειας επιτρέπει την διέλευση παροχής μεγαλύτερης από αυτή που μπορεί να διέλθει από τον στρόβιλο, η πλεονάζουσα παροχή μέχρι της εξαντλήσεως της παροχεταιυτικότητάς του αγωγού μεταφέρεται με εκτροπή παρακάμπτοντας τον στρόβιλο (βλ Σχ. 1). Σε κάθε περίπτωση η παροχή που διέρχεται από τον στρόβιλο δεν μπορεί να υπερβεί την παροχεταιυτικότητα του αγωγού με τον οποίο συνδέεται, έτσι ώστε να ισχύει ο ακόλουθος τύπος:

$$Q_E = \max(Q_P, Q_T) \quad (11)$$

Q_E : Μέγιστη παροχή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας

Q_P : Παροχεταιυτικότητα αγωγού

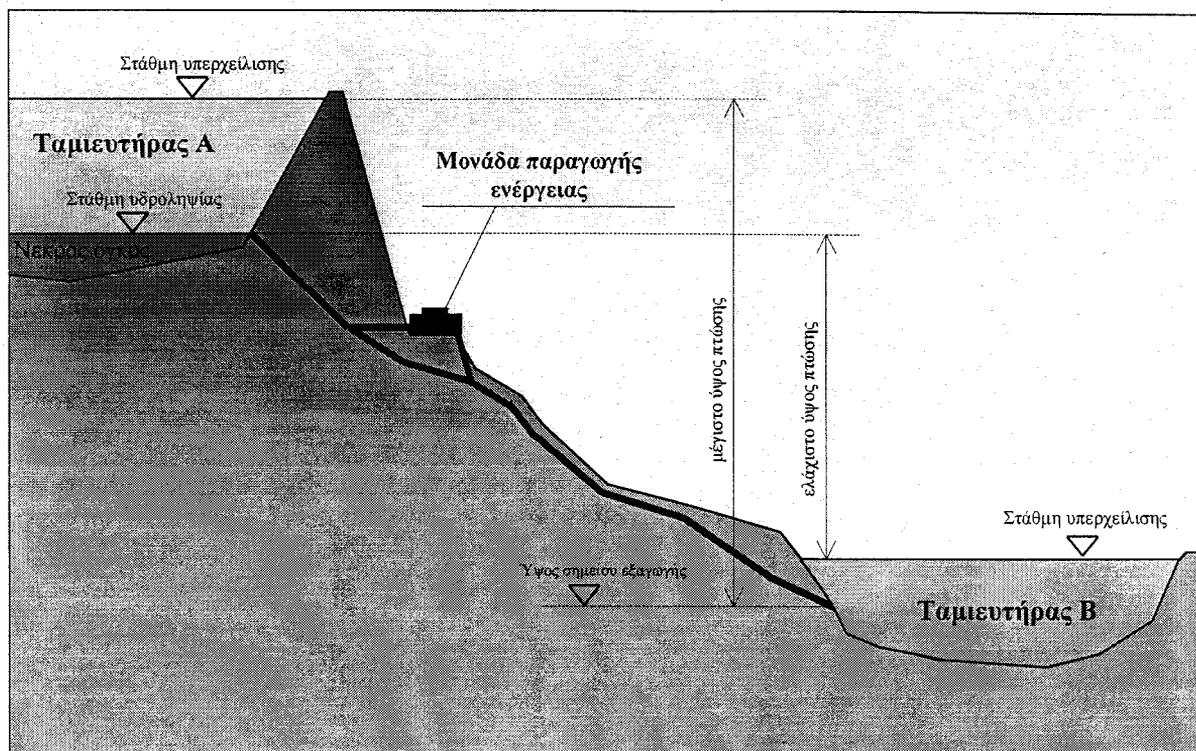
Q_T : Παροχεταιυτικότητα στρόβιλου

Αν υπάρχει δυνατότητα παράκαμψης της MEM, όπως στο Σχ. 1, αποσυνδέοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη λειτουργία του στρόβιλου από τη ροή νερού στον αγωγό, μπορούν να εξυπηρετηθούν από αυτόν στόχοι επιπλέον της παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα αποσυνδέεται η παροχεταιυτικότητα του αγωγού από την παραγωγή/κατανάλωση ενέργειας, πράγμα χρήσιμο για εφαρμογές που περιλαμβάνουν μελέτες σεναρίων με εναλλακτικές διατομές αγωγών.

Κατά την άντληση η παροχεταιυτικότητα του αγωγού εξισούται με τη μέγιστη δυνατότητα παροχής νερού του αντλιοστασίου με δεδομένο ύψος πτώσης.

Στην εξίσωση (10) η ενέργεια που παράγεται ή καταναλώνεται είναι συνάρτηση του ύψους πτώσης, το οποίο και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος. Κατά τη εκτέλεση της προσομοίωσης το ύψος πτώσης θεωρείται σταθερό για τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή σημαντικών σφαλμάτων στους υπολογισμούς της ενέργειας που παράγεται/καταναλώνεται ή του ζητούμενου όγκου νερού που πρέπει να μεταφερθεί για την κάλυψη ζήτησης σε υδροηλεκτρική ενέργεια. Ο περιορισμός των σφαλμάτων αυτών επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό με την εσωτερική και για

υπολογιστικούς λόγους μόνο υποδιαίρεση του χρονικού βήματος και τον υπολογισμό του ύψους πτώσης όλων των υδαταγωγών του δικτύου στο τέλος κάθε υποδιαίρεσης.



Σχ. 1: Σχηματική παράσταση βασικών παραγόντων για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας

2.2.2 Υπολογισμός της ποιότητας της παραγόμενης ενέργειας

Η Υδροηλεκτρική ενέργεια (ΥΗΕ) κατά την προσομοίωση υπολογίζεται άμεσα σε τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι στόχοι παραγωγής ΥΗΕ που έχουν τεθεί, διοχετεύοντας τους απαραίτητους όγκους νερού μέσα στους στροβίλους των MEM και έμμεσα με έναν από τους δύο παρακάτω τρόπους:

- Με την εξυπηρέτηση άλλων στόχων ανεξάρτητων της παραγωγής ενέργειας από τη συγκεκριμένη μονάδα, οι οποίοι έχουν σαν αποτέλεσμα την ροή όγκων νερού από μονάδες παραγωγής ενέργειας.
- Με την εφαρμογή των κανόνων λειτουργίας που στοχεύουν στην βέλτιστη διαχείριση του συστήματος και έχουν σαν αποτέλεσμα την ροή όγκων νερού από μονάδες παραγωγής ενέργειας.

Πρωτεύουσα ενέργεια μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας καλείται η ενέργεια που μπορεί εξασφαλισμένα να παραχθεί με ελάχιστες διακοπές κατά τη διάρκεια της συνολικής εξεταζόμενης χρονικής περιόδου και ως εκ τούτου μπορεί να παραχθεί με πολύ μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας. Είναι φανερό πως με δεδομένο βαθμό αξιοπιστίας, η πρωτεύουσα ενέργεια ενός υδροσυστήματος εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής και από τα χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος, όπως η τοπολογία, οι διαστάσεις και οι ιδιότητες των έργων αξιοποίησης, των υπολεκανών κλπ. Πέρα από αυτούς τους παράγοντες, άλλοι όπως οι

κανόνες λειτουργίας και διαχείρισης, οι στόχοι και οι προτεραιότητες κάλυψης των στόχων λειτουργίας του συστήματος παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της πρωτεύουσας ενέργειας. Ο βέλτιστος από ενεργειακής πλευράς τρόπος διαχείρισης των υδατικών πόρων εξασφαλίζει την μέγιστη δυνατή πρωτεύουσα ενέργεια.

Ιδιαίτερη σημασία για τις επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει η πρωτεύουσα ενέργεια που μπορεί να παραχθεί για την κάλυψη της αυξημένης ζήτησης σε ώρες αιχμής. Ο Υδρονομέας διακρίνει την πρωτεύουσα ενέργεια σε ενέργεια που παρήχθη σε ώρες αιχμής και μη αιχμής. Οι ώρες αιχμής ορίζονται από τον χρήστη.

Για τον υπολογισμό της πρωτεύουσας ενέργειας ο Υδρονομέας διακρίνει την προσομοιωμένη χρονική περίοδο σε χρονικά βήματα από τα οποία προκύπτει ένα σύνολο τιμών παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας E_i σε ώρες αιχμής για κάθε μία μονάδα παραγωγής ενέργειας. Η πρωτεύουσα ενέργεια είναι το x -ποσοστημόριο των τιμών αυτών, όπου το ποσοστό x λαμβάνεται πολύ υψηλό και αντιπροσωπεύει το βαθμό αξιοπιστίας πρωτεύουσας ενέργειας.

Δευτερεύουσα ενέργεια μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας καλείται η ενέργεια που παράγεται από την εν λόγω μονάδα επιπλέον της πρωτεύουσας ενέργειας.

Το άθροισμα της πρωτεύουσας ενέργειας όλων των μονάδων παραγωγής ενέργειας ενός συστήματος αποτελεί την πρωτεύουσα ενέργεια του συστήματος. Αντίστοιχα ορίζεται η δευτερεύουσα ενέργεια του συστήματος.

2.3 Μοντέλο οικονομικών παραγόντων

Στο οικονομικό μοντέλο συμπεριλαμβάνονται οι βασικοί οικονομικοί παράγοντες που είναι συνυφασμένοι με την παραγωγή και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες ενεργειακής μετατροπής του δικτύου. Άλλοι σημαντικοί οικονομικοί παράγοντες όπως η χρήση νερού για την ύδρευση, την άρδευση κλπ., το λειτουργικό κόστος, το κόστος συντήρησης των εγκαταστάσεων και πολύ περισσότερο παράγοντες που δεν συνδέονται άμεσα με τη λειτουργία του συστήματος, όπως το κόστος κατασκευής έργων αξιοποίησης νερού και οι συναφείς οικονομικές διαδικασίες (δανειοληψεία, απόσβεση), δεν συμπεριλαμβάνονται στο παρόν οικονομικό μοντέλο.

Τα οικονομικά μεγέθη που υπολογίζονται με βάση την τιμή μονάδας που ορίζεται από τον χρήστη είναι:

- Το όφελος από την παραγωγή πρωτεύουσας υδροηλεκτρικής ενέργειας
- Το όφελος από την παραγωγή δευτερεύουσας υδροηλεκτρικής ενέργειας
- Το κόστος κατανάλωσης ενέργειας αντλιοστασίων
- Το κόστος κατανάλωσης ενέργειας αντλιοστασίων που λειτουργούν με μειωμένη διατίμηση

2.4 Λειτουργική προσομοίωση του υδrosυστήματος

Κατά την λειτουργική προσομοίωση επιδιώκεται η κάλυψη των στόχων που έχει θέσει ο χρήστης για κάθε χρονικό βήμα της περιόδου που προσομοιώνεται. Παράλληλα επιδιώκεται η

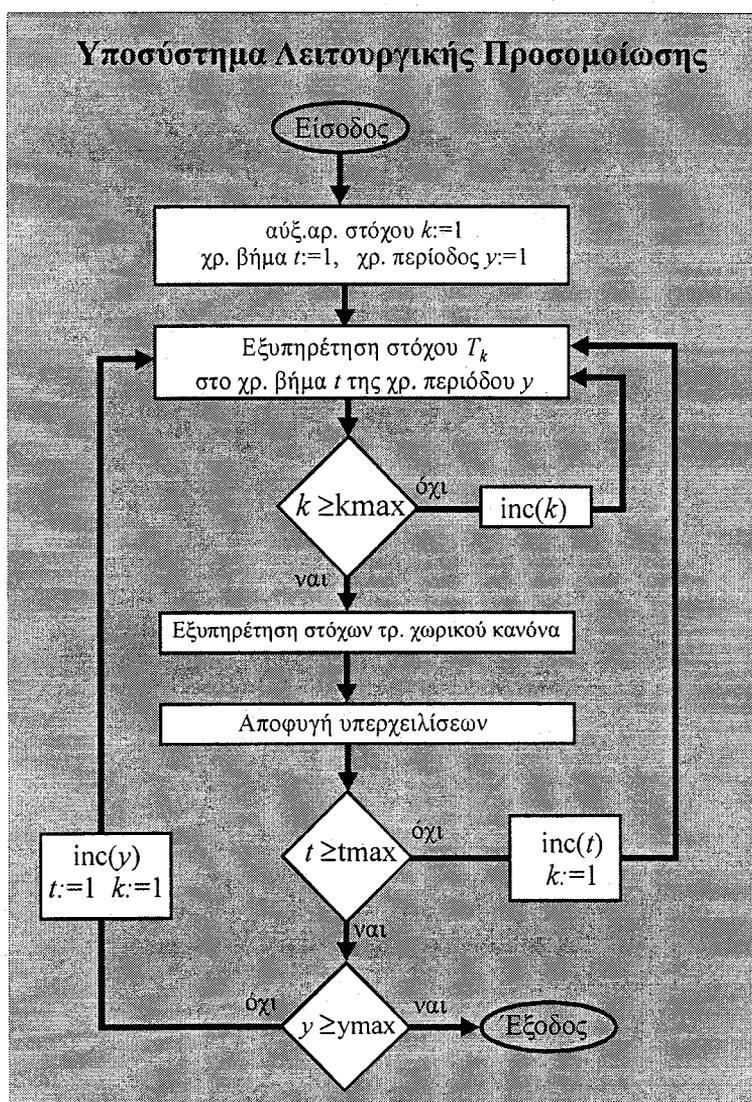
κατανομή των υδατικών πόρων μέσα στο υδροσύστημα με βάση τον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας. Το διάγραμμα ροής του Σχ. 2 αποδίδει σε γενικές γραμμές τη διαδικασία της λειτουργικής προσομοίωσης. Η συνάρτηση $inc(i)$ προσθέτει μια μονάδα στην τιμή της μεταβλητής i . Στο διάγραμμα διακρίνονται οι τρεις βασικές φάσεις της λειτουργικής προσομοίωσης:

1^η Φάση: Στον εσωτερικό βρόχο του διαγράμματος εξυπηρετούνται με σειρά προτεραιότητας οι στόχοι που έθεσε ο χρήστης

2^η Φάση: Εξυπηρέτηση των στόχων του τροποποιημένου χωρικού κανόνα

3^η Φάση: Μεταφορά όγκων από ανάντη προς κατόντη ταμειυτήρες με σκοπό την αποφυγή υπερχειλίσεων και την υπέρβαση του ορίου πλημμυρικού όγκου

Όλες οι φάσεις εκτελούνται για κάθε χρονικό βήμα (μήνας) και σε όλες τις χρονικές περιόδους (έτη) που προσομοιώνονται.



Σχ. 2: Βασικό διάγραμμα ροής του Υποσυστήματος Λειτουργικής Προσομοίωσης

Στο διάγραμμα ροής δεν συμπεριλαμβάνεται η δυνατότητα υποδιαίρεσης του χρονικού βήματος που μπορεί να ορίσει ο χρήστης για την ακριβέστερη προσομοίωση όπως στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Σε δίκτυα με αγωγούς μεταβλητής παροχευτικότητας η μεταβολή του ύψους πτώσης κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος μπορεί να είναι σημαντική. Θεωρώντας σταθερή την παροχευτικότητα κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή σφαλμάτων στους υπολογισμούς της παροχευτικότητας στο τρέχον χρονικό βήμα. Η υποδιαίρεση του χρονικού βήματος περιορίζει το σφάλμα αυτό.
- Η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται άμεσα από το ύψος πτώσης, η τιμή του οποίου μεταβάλλεται στη διάρκεια ενός χρονικού βήματος. Η μεταβολή αυτή είναι απρόβλεπτη στην αρχή του χρονικού βήματος. Εκτιμώντας στην αρχή του χρονικού βήματος τον όγκο που πρέπει να μεταφερθεί για την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας με σταθερό ύψος πτώσης από την εξίσωση (10), έχει σαν αποτέλεσμα την εσφαλμένη εκτίμηση του όγκου και αναντιστοιχία στόχου και πραγματικής παραγόμενης ενέργειας, χωρίς αυτό να οφείλεται σε κάποιον άλλον παράγοντα όπως η εξάντληση της παροχευτικότητας του αγωγού. Το σφάλμα περιορίζεται επίσης με την προσομοίωση υποδιαίρεσης του χρονικού βήματος.
- Καλύτερη κατανομή των υδατικών πόρων επιτυγχάνεται με την προσομοίωση υποδιαίρεσεων του χρονικού βήματος, καθώς αυξάνεται η συχνότητα με την οποία γίνεται η επανεκτίμηση της κατανομής νερού στο σύστημα και καθορίζεται ο τρόπος κάλυψης ελλειμμάτων και εξυπηρέτησης των στόχων.

Η προσομοίωση υποδιαίρεσεων του χρονικού βήματος έχει προφανώς το μειονέκτημα της μείωσης της ταχύτητας απόκρισης του συστήματος αναλογικά προς τον αριθμό των υποδιαίρεσεων στο χρονικό βήμα.

Στα ακόλουθα κεφάλαια περιγράφεται αναλυτικά η κάθε μία από τις φάσεις της λειτουργικής προσομοίωσης.

2.4.1 Εξυπηρέτηση στόχων χρήστη και αστοχία προσομοίωσης

2.4.1.1 Στόχοι προσομοίωσης

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να θέσει στο σύστημα μία σειρά από *στόχους προσομοίωσης* η κάλυψη των οποίων επιδιώκεται από το Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης. Οι κατηγορίες των στόχων που μπορεί να θέσει ο χρήστης συνοψίζονται στις ακόλουθες:

- **Η κατανάλωση νερού** από έναν κόμβο του υδροσυστήματος. Με τον όρο *κατανάλωση νερού* αναφερόμαστε μόνο στις χρήσεις νερού που αφαιρούν όγκο από το υδροσύστημα όπως η ύδρευση, η άρδευση κ.ά. Άλλες χρήσεις νερού που διατηρούν το νερό στο υδροσύστημα, ενδεχομένως μεταφέροντάς το από το ένα σημείο στο άλλο, δεν χαρακτηρίζονται ως στόχοι κατανάλωσης νερού.
- **Η ελάχιστη ροή** σε επιλεγμένους αγωγούς για λειτουργικούς λόγους
- **Η ροή περιβαλλοντικής διατήρησης** σε φυσικούς αγωγούς που ανήκουν στο υδροσύστημα

- Η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας από στροβίλους η οποία προβλέπεται για την κάλυψη της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Η διατήρηση του αποθέματος στον ταμιευτήρα πάνω από ένα ελάχιστο όριο ασφαλείας. Ο αποθηκευτικός ενεργός όγκος ενός ταμιευτήρα κατά κανόνα χρησιμοποιείται στο σύνολό του και μόνο ο νεκρός όγκος παραμένει αχρησιμοποίητος. Μπορεί όμως να καθοριστεί κάποιος άλλος μεγαλύτερος όγκος ασφαλείας, ο οποίος και μέχρι του ορίου του νεκρού όγκου θα χρησιμοποιείται για ώρες ανάγκης συγκεκριμένων μόνο στόχων όπως αυτός της ύδρευσης.
- Η διατήρηση του αποθέματος στον ταμιευτήρα κάτω από ένα όριο μέγιστου όγκου επιδιώκεται για λόγους ασφαλείας από ενδεχόμενα πλημμυρικά γεγονότα ιδιαίτερα μεγάλης έντασης

Εκτός από τον πρώτο στόχο, η κάλυψη του οποίου σημαίνει απαραίτητα και διαφυγή νερού από το σύστημα, όλοι οι υπόλοιποι στόχοι αναφέρονται στη διατήρηση ορίων ή στη μεταφορά όγκου νερού από έναν κόμβο σε έναν άλλο, χωρίς να χάνεται νερό από το σύστημα. Ως εκ τούτου θα μπορούσε ο ίδιος όγκος να επαναχρησιμοποιηθεί για την κάλυψη κάποιου άλλου στόχου.

Οι στόχοι προσομοιώνονται σε σειρά ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο έτσι ώστε να είναι δυνατή η απόδοση αστοχίας σε κάθε έναν ξεχωριστά σύμφωνα με τους ορισμούς του κεφ. 2.4.1.3. Για αυτόν τον λόγο εντάσσονται σε μια σειρά προτεραιότητας και με αυτήν την σειρά εξυπηρετούνται κατά την προσομοίωση. Η σειρά προτεραιότητας έχει μεγαλύτερη σημασία εάν ο χρήστης δεν επιλέξει την δυνατότητα υποδιαίρεσης του χρονικού βήματος. Σε αυτήν την περίπτωση οι στόχοι με την υψηλότερη προτεραιότητα εξυπηρετούνται πρώτοι στο σύνολό τους, καταναλώνοντας πόρους και χρησιμοποιώντας την υφιστάμενη παροχρηματοδότηση του δικτύου. Αντίθετα, με την επιλογή μιας υποδιαίρεσης του χρονικού βήματος ως ελαχίστου διαστήματος προσομοίωσης, μέρος του εκάστοτε στόχου εξυπηρετείται κάθε φορά που εκτελείται ο βασικός βρόχος της λειτουργικής προσομοίωσης. Αν εξετάσει κανείς μεγάλα χρονικά διαστήματα θα διαπιστώσει πως όσο πιο μικρό είναι το ελάχιστο χρονικό διάστημα προσομοίωσης τόσο περισσότερο τείνει το σύστημα να εξυπηρετεί τους στόχους «παράλληλα», ελαχιστοποιώντας την επίδραση της σειράς προτεραιότητας.

Κατά τον σχεδιασμό δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στον ενιαίο τρόπο με τον οποίο ο χρήστης θέτει και να χειρίζεται τους στόχους προσομοίωσης. Ο κάθε στόχος αναφέρεται σε κάποιο έργο αξιοποίησης, που μπορεί να είναι ταμιευτήρας, υδραγωγείο ή μονάδα παραγωγής ενέργειας, ανάλογα με το είδος του στόχου.

Στο ίδιο έργο αξιοποίησης μπορούν να τεθούν πολλαπλοί στόχοι ακόμη και του ίδιου είδους, εάν αυτό εξυπηρετεί το σενάριο που ακολουθείται. Στο παρακάτω παράδειγμα τίθενται στον ταμιευτήρα Α με σειρά προτεραιότητας τέσσερις στόχοι:

1. Ελάχιστος όγκος ασφαλείας V_l ταμιευτήρα Α
2. Κατανάλωση χ όγκου νερού για άρδευση από τον ταμιευτήρα Α
3. Ελάχιστος όγκος ασφαλείας $V_l + \Delta V$ ταμιευτήρα Α
4. Κατανάλωση ψ όγκου νερού για άρδευση από τον ταμιευτήρα Α

Σύμφωνα με τον 2ο στόχο καταναλώνεται μέχρι και χ όγκος νερού στο βαθμό που δεν παραβιάζεται το όριο ασφαλείας V_i του ταμιευτήρα A που αποτελεί και τον 1ο στόχο της προσομοίωσης. Ο 4ος στόχος που έχει τη χαμηλότερη προτεραιότητα μπορεί να εξασφαλίσει έναν επιπλέον όγκο νερού ψ για την άρδευση στο βαθμό που δεν παραβιάζεται το όριο $V_i + \Delta V$ του ταμιευτήρα του 3ου στόχου.

Ένας στόχος ορίζεται δίνοντάς του μια τιμή για κάθε χρονικό βήμα. Η τιμή του στόχου μπορεί να διαφοροποιείται εποχιακά. Η επιλογή αυτή είναι χρήσιμη εκτός από την περίπτωση καταναλωτικών στόχων που παρουσιάζουν έντονες εποχιακές διακυμάνσεις και σε άλλες κατηγορίες στόχων, όπως στην περίπτωση διατήρησης του αποθέματος στον ταμιευτήρα κάτω από ένα όριο μέγιστου όγκου. Ενώ σε περίοδο με αυξημένη βροχόπτωση το όριο τίθεται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου ένα καταστροφικό πλημμυρικό γεγονός είναι εξαιρετικά σπάνιο, ο ανώτατος όγκος ορίζεται σε υψηλότερα επίπεδα απ' ό,τι στο υπόλοιπο έτος, αυξάνοντας έτσι τη δυνατότητα αποθήκευσης του συστήματος.

Σε καταναλωτικούς στόχους δίνεται επιπλέον η δυνατότητα γραμμικής και εκθετικής αύξησης της τιμής του, έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στους προβλεπόμενους ρυθμούς αύξησης της ζήτησης. Οι εξισώσεις (13) και (14) δίνουν με αρχική τιμή D_y^1 την προβλεπόμενη τιμή ζήτησης στο χρόνο t :

$$D_y^t = D_y^1 + (t-1) D_c \quad (12)$$

$$D_y^t = D_y^1 (1 + d_c)^{t-1} \quad (13)$$

όπου D_y^t είναι η τιμή ζήτησης για κάθε έτος προσομοίωσης και D_c η ετήσια αύξηση θεωρούμενη σταθερή (εξ. 13) και d_c η ποσοστιαία ετήσια αύξηση θεωρούμενη σταθερή (εξ. 14).

Πέρα από την καταγραφή της αστοχίας οι στόχοι μπορούν να λειτουργήσουν και περιοριστικά στην αναζήτηση μιας αποδεκτής λύσης του προβλήματος διαχείρισης υδατικών πόρων. Για τον λόγο αυτό είναι δυνατή η εισαγωγή ενός ανώτατου αποδεκτού ορίου αστοχίας στόχου. Σε περίπτωση που το όριο αυτό κατά την προσομοίωση με κάποιον κανόνα λειτουργίας παραβιαστεί, η προσομοίωση διακόπτεται και ο συγκεκριμένος κανόνας λειτουργίας απορρίπτεται.

2.4.1.2 Η προσέγγιση στόχων προσομοίωσης

Οι στόχοι προσομοίωσης διακρίνονται σε αυτούς που προϋποθέτουν ροή νερού που μεταφέροντάι από το ένα σημείο του δικτύου σε κάποιο άλλο ή που αφαιρούνται από το δίκτυο, και σε εκείνους οι οποίοι στοχεύουν στην διατήρηση ορίων όγκου στους ταμιευτήρες. Η καταστρατήγηση αυτών των ορίων συνεπάγεται ενδεχόμενη μεταφορά όγκου.

Η λογική του σχεδιασμού του λογισμικού, σύμφωνα με την οποία μπορεί να προσομοιωθεί ένα ευρύ φάσμα δικτύων ανεξάρτητα από την τοπολογία τους, επιβάλλει τον ενιαίο τρόπο προσέγγισης στόχων με κατά το δυνατόν ελάχιστους περιορισμούς στην εφαρμογή. Είναι χαρακτηριστικά τα παραδείγματα δικτύων με αγωγούς αμφίδρομης ροής και οι εναλλακτικές δυνατότητες ροής νερού στο δίκτυο για την κάλυψη στόχου, που περιπλέκουν την αναζήτηση των αποδοτικότερων επιλογών. Επιπλέον η παροχετευτικότητα των αγωγών παίζει σημαντικό ρόλο στην δυνατότητα μετακίνησης νερού και σε πολλά πιθανά σενάρια δεν μπορεί να

παραβλεφθεί. Ο Υδρονομέας συνυπολογίζει τους κανόνες λειτουργίας και την παροχτευτικότητα ανοιχτών αλλά και κλειστών αγωγών που λειτουργούν υπό πίεση, ακόμα και αγωγών αμφίδρομης ροής για την κάλυψη των στόχων.

2.4.1.2.1 Αναζήτηση υπολείποντος όγκου

Για την εξυπηρέτηση των περισσότερων στόχων απαιτείται μεταφορά αποθηκευμένου όγκου από ανάντη ταμιευτήρες προς τον κόμβο στον οποίο δημιουργείται ζήτηση νερού. Καθώς σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν εναλλακτικές δυνατότητες για την κάλυψη του στόχου, το ερώτημα που τίθεται είναι από ποιους ανάντη ταμιευτήρες και με ποια κατανομή θα χρησιμοποιηθούν οι αναγκαίοι όγκοι.

Στον Υδρονομέα έχει υλοποιηθεί αλγόριθμος ο οποίος αναζητεί τον υπολείποντα όγκο σε όλους τους γεινιάζοντες ταμιευτήρες ανάντη του κόμβου στον οποίο δημιουργείται η ζήτηση. Η κατεύθυνση αναζήτησης είναι από κατάντη προς ανάντη έτσι ώστε σε αυτήν τη φάση να πραγματοποιείται η μεταφορά μόνο των απαραίτητων ποσοτήτων για την εξυπηρέτηση της ζήτησης από τους πιο κοντινούς ταμιευτήρες. Στο βαθμό που η αναζήτηση στους κοντινούς ταμιευτήρες αποβαίνει άκαρπη, η έρευνα προχωράει και σε περισσότερο απόμακρους ταμιευτήρες.

Σκοπός της τακτικής αυτής είναι:

- η απαραίτητη κάλυψη της ζήτησης εφ' όσον υδατικοί πόροι είναι διαθέσιμοι
- ο περιορισμός της σπατάλης πολύτιμων πόρων κατά την προσομοίωση και ο περιορισμός άσκοπων ροών, πράγμα που θα επέφερε δυσμενέστερα αποτελέσματα αστοχίας
- η κατανομή της αναγκαίας απόληψης από τους ανάντη ταμιευτήρες με τέτοιο τρόπο που να ανταποκρίνεται κατά το δυνατόν στους στόχους του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας (βλ. κεφ. 2.4.2)

Η αναζήτηση νερού προχωράει και σε αγωγούς που συνδέονται με αντλιοστάσια, όπου η ροή πραγματοποιείται υπό πίεση, παρ' όλο που δεν βρίσκονται ανάντη του κόμβου στον οποίον δημιουργείται η ζήτηση, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψή της. Εάν αυτό δεν είναι στις προθέσεις του χρήστη, το σύστημα επιδέχεται τον επιλεκτικό αποκλεισμό φοράς ροής αγωγών από τη συγκεκριμένη φάση της προσομοίωσης (βλ. κεφ. 3.2.2.4).

Για την κάλυψη της ζήτησης κατάντη αναζητείται κατά πρώτον λόγο ο *πλεονάζων μεταφερόμενος όγκος*. Ο όγκος αυτός αντιστοιχεί στον όγκο που μπορεί να εξοικονομηθεί από τους ανάντη ταμιευτήρες, χρησιμοποιώντας μόνο τα πλεονάζοντα αποθέματα του εκάστοτε ταμιευτήρα σε σχέση με τον όγκο-στόχο που έχει τεθεί από τον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας, συνυπολογίζοντας την υπολείπουσα δυνατότητα παροχής των αγωγών μέχρι τον κόμβο ζήτησης κατά το τρέχον χρονικό βήμα.

Εφ' όσον δεν είναι δυνατή η κάλυψη της ζήτησης από τον πλεονάζοντα μεταφερόμενο όγκο χρησιμοποιείται στη συνέχεια ο *ωφέλιμος μεταφερόμενος όγκος*, που αντιστοιχεί στο σύνολο του αποθέματος των ανάντη ταμιευτήρων. Ο όγκος αυτός μπορεί να μεταφερθεί μέχρι τον κόμβο ζήτησης στο τρέχον χρονικό βήμα.

Ο αλγόριθμος προωθεί την αναζήτηση όγκου από τους ανάντη ταμιευτήρες με τον ίδιο αναδρομικό τρόπο που πραγματοποιείται μια αναζήτηση σε γραφήματα με δενδροειδή μορφή, ξεκινώντας από τη ρίζα του γραφήματος και προχωρώντας στα κλαδιά του, χωρίς να έχει σημασία η προτεραιότητα των διαδρομών. Επειδή κατά την αναζήτηση ακολουθείται επανειλημμένα η ίδια διαδρομή χρησιμοποιώντας κάθε φορά μόνο μέρος του απολήξιμου όγκου, επιτυγχάνεται τελικά εκτός από την εξυπηρέτηση του στόχου που έθεσε ο χρήστης και η προσέγγιση του όγκου-στόχου του παραμετρικού κανόνα. Επιτυγχάνεται επίσης και η ισοκατανομή τυχών αποκλίσεων από τον όγκο-στόχο στους γειτνιάζοντες ταμιευτήρες.

Για τη μεταφορά όγκων συνυπολογίζεται πάντοτε η τρέχουσα υπολείπουσα παροχетеυτικότητα των αγωγών. Όπως προαναφέρθηκε το σφάλμα ακρίβειας υπολογισμών στους αγωγούς μεταβλητής παροχетеυτικότητας μπορεί να περιοριστεί σε ικανοποιητικά επίπεδα προσομοιώνοντας υποδιαίρεσεις χρονικού βήματος και αναπροσαρμόζοντας την παροχетеυτικότητα μετά από κάθε υποδιαίρεση.

Ανάλογα με το είδος του στόχου η αναζήτηση όγκου για την κάλυψη ζήτησης διαφοροποιείται σύμφωνα με τα παρακάτω.

2.4.1.2.2 Προσέγγιση στόχου κατανάλωσης νερού

Ο στόχος κατανάλωσης νερού δημιουργεί ζήτηση που συνδέεται με έναν κόμβο του υδροσυστήματος. Σε περίπτωση που ο κόμβος αυτός είναι ταμιευτήρας και που μπορεί να καλύψει τη ζήτηση, η αναζήτηση υδατικών πόρων τερματίζεται σε αυτό το σημείο. Διαφορετικά ξεκινάει διαδικασία αναζήτησης του υπολείποντος όγκου από τον αποθηκευμένο όγκο στους ανάντη ταμιευτήρες με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω. Ο όγκος που μεταφέρθηκε αφαιρείται από το σύστημα και συνυπολογίζεται στο υδατικό ισοζύγιο ως μέρος του όγκου που χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη στόχου.

2.4.1.2.3 Διατήρηση των ορίων όγκου ταμιευτήρα

Ο έλεγχος των ανώτατων και κατώτατων ορίων των ταμιευτήρων πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Σε περίπτωση που είναι απαραίτητη η μεταφορά όγκου από ανάντη ταμιευτήρες, για την εξασφάλιση του αποθηκευτικού όγκου ασφαλείας, η αναζήτηση και μεταφορά νερού πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως κατά την ζήτηση κατανάλωσης νερού, με τη διαφορά πως ο όγκος που μεταφέρθηκε δεν χάνεται από το σύστημα, αλλά προστίθεται στο απόθεμα του κατάντη ταμιευτήρα. Η απόληψη νερού από έναν ταμιευτήρα πέρα από το όριο ασφαλείας για την κάλυψη κάποιου άλλου στόχου που έχει θέσει ο χρήστης π.χ. η ύδρευση, πραγματοποιείται μόνο εάν ο τελευταίος έχει καταχωρηθεί με ανώτερη προτεραιότητα. Άλλοι λόγοι όπως οι απώλειες από υπόγειες διαφυγές και η εξάτμιση νερού από τους ταμιευτήρες με κατώτατο όριο αποθέματος μπορούν να συμβάλλουν στην αστοχία του περιορισμού αυτού.

Στην περίπτωση που είναι αναγκαία η μεταφορά όγκου από έναν ταμιευτήρα προς τους κατάντη ταμιευτήρες με σκοπό τη διατήρηση του αντιπλημμυρικού όγκου, τότε το νερό μεταφέρεται μέχρι τον αμέσως επόμενο ταμιευτήρα όπου και αποθηκεύεται στον βαθμό που ο κατάντη ταμιευτήρας έχει ανεκμετάλλευτη αποθηκευτική ικανότητα. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η αποθήκευση του νερού με όσο το δυνατόν λιγότερη απώλεια δυναμικής

ενέργειας. Ο όγκος νερού για τον οποίο δεν υπάρχει σε όλη τη διαδρομή μέχρι τον τελικό κόμβο επαρκής αποθηκευτικός χώρος, χάνεται από το σύστημα.

2.4.1.2.4 Προσέγγιση στόχων ελάχιστης ροής και περιβαλλοντικής διατήρησης

Οι στόχοι ελάχιστης ροής αγωγού και περιβαλλοντικής διατήρησης ανάγονται σε στόχο κατανάλωσης νερού αφού δημιουργούν ζήτηση νερού στον ανάντη κόμβο του φυσικού ή τεχνητού αγωγού με τον οποίον συνδέεται ο στόχος. Διαφοροποιούνται όμως από τον στόχο κατανάλωσης στο ότι ο όγκος νερού παραμένει κατ' αρχήν στο υδροσύστημα και μεταφέρεται στον κατάντη κόμβο του αγωγού εφ' όσον το επιτρέπει η παροχετευτικότητά του. Για την εξυπηρέτηση των στόχων ελάχιστης ροής και περιβαλλοντικής διατήρησης συνυπολογίζονται και οι μεταφορές όγκου που πραγματοποιήθηκαν μέσω του αγωγού για την επίτευξη άλλων στόχων στο ίδιο χρονικό βήμα.

2.4.1.2.5 Προσέγγιση στόχου παραγωγής ενέργειας

Η μονάδα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας στην οποία έχει τεθεί ο στόχος, συνδέεται με έναν αγωγό προσαγωγής. Για την παραγωγή της ζητούμενης ενέργειας υπολογίζεται από τον τύπο (10) η παροχή που πρέπει να περάσει από το στρόβιλο της μονάδας. Το υπολογιστικό σύστημα προϋποθέτει ότι η συνολική παροχή του αγωγού προσαγωγής, μέχρι του ορίου πληρότητας των στροβίλων, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας, ανεξάρτητα από τον λόγο για τον οποίο πραγματοποιήθηκε η ροή. Είναι καταφανές πως το πρόβλημα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας ανάγεται πλέον σε ένα πρόβλημα ελάχιστης ροής από τον αγωγό.

2.4.1.3 Αστοχία συστήματος

Για την αξιολόγηση των κανόνων λειτουργίας είναι απαραίτητη η προσομοίωση μιας μακράς χρονικής περιόδου, η διάρκεια της οποίας εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής και τη λεπτομέρεια των αναμενόμενων αποτελεσμάτων. Κατά την προσομοίωση εξετάζεται η δυνατότητα κάλυψης των στόχων ως προς τη χρονική διάρκεια και το ύψος της τιμής του στόχου:

Αστοχία ως προς τη χρονική περίοδο

Στις περισσότερες των περιπτώσεων διαχείρισης υδατικών πόρων αναζητείται η δυνατότητα κάλυψης της ζήτησης που δημιουργεί ο στόχος στη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου που συνήθως αντιστοιχεί σε ένα έτος. Η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος ως προς τη χρονική περίοδο (αστοχία χρονικής περιόδου a_1) ορίζεται από το λόγο των χρονικών περιόδων με αστοχία προς το σύνολο των προσομοιωμένων χρονικών περιόδων. Η χρονική περίοδος διακρίνεται σε χρονικά βήματα που συνήθως αντιστοιχούν σε μήνες του έτους. Καθώς η ζήτηση πρέπει να καλύπτεται σε όλη τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου, αστοχία του συστήματος ως προς τη χρονική περίοδο διαπιστώνεται κατά την αστοχία ενός τουλάχιστον χρονικού βήματος της περιόδου.

Αστοχία ως προς το χρονικό βήμα

Σε περίπτωση που κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος δεν επιτευχθεί κάποιος στόχος διαπιστώνεται αστοχία συστήματος ως προς το εν λόγω χρονικό βήμα και στόχο. Η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος ως προς το χρονικό βήμα (αστοχία χρονικού βήματος

α₂) δίνεται από το λόγο των άστοχων χρονικών βημάτων προς τον συνολικό αριθμό χρονικών βημάτων. Η αστοχία χρονικού βήματος σημαίνει απαραίτητα και αστοχία της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου και ισχύει η σχέση $a_2 \leq a_1$.

Όταν το υπολογιστικό σύστημα προσομοιώνει υποδιαίρεσεις χρονικού βήματος για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών, η αναλογία της τιμής στόχου πρέπει να καλύπτεται σε όλες τις υποδιαίρεσεις του χρονικού βήματος. Εξαιρέση αποτελεί ο στόχος ελάχιστου και πλημμυρικού όγκου των ταμιευτήρων, ο οποίος εξετάζεται μόνο στο τέλος του χρονικού βήματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα στο λειτουργικό σύστημα να προσεγγίσει σταδιακά απότομες μεταβολές στάθμης-στόχου.

Αστοχία κάλυψης όγκου

Για καταναλωτικούς στόχους όπως η ζήτηση νερού για την ύδρευση ή την άρδευση είναι χρήσιμη η πληροφορία της αστοχίας κάλυψης ζήτησης a_3 που ορίζεται ως ο λόγος του ελλείμματος κάλυψης ζήτησης προς την συνολική ζήτηση στην προσομοιωμένη χρονική περίοδο.

Το υπολογιστικό σύστημα μπορεί κατά την βελτιστοποίηση να αναζητήσει την ελάχιστη πιθανότητα αστοχίας ενός από τους τρεις παραπάνω όρους. Πέραν τούτου ο χρήστης του συστήματος μπορεί να καθορίσει ανώτατες τιμές αστοχίας χρονικής περιόδου για κάθε έναν από τους στόχους, οι οποίες λειτουργούν περιοριστικά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης: Όταν διαπιστώνεται υπέρβαση των ορίων αστοχίας ο κανόνας λειτουργίας απορρίπτεται. Το πρόβλημα δεν έχει λύση όταν δεν υπάρχει κάποιος κανόνας λειτουργίας που να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς αστοχίας που έχουν τεθεί.

2.4.2 Ο παραμετρικός κανόνας λειτουργίας

Το λειτουργικό σύστημα μετακινεί κατά την προσομοίωση σε μια πρώτη φάση μόνο τους όγκους νερού που είναι απαραίτητοι για την κάλυψη των στόχων που έχει θέσει ο χρήστης. Με τους εναπομείναντες υδατικούς πόρους και την υπολείπουσα παροχρητευτικότητα των αγωγών μπορούν να προσομοιωθούν επιπλέον μεταφορές όγκων μεταξύ των ταμιευτήρων στο ίδιο χρονικό βήμα, βελτιώνοντας έτσι την συνολική του ικανότητά να ανταποκριθεί και σε μελλοντικούς στόχους. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι ένας κανόνας λειτουργίας για αυτήν τη δεύτερη φάση της λειτουργικής προσομοίωσης.

Στο υπολογιστικό σύστημα Υδρονομίας έχει υλοποιηθεί ένας παραμετρικός κανόνας λειτουργίας γνωστός ως *τροποποιημένος χωρικός κανόνας*, η θεωρητική ανάπτυξη του οποίου δίνεται από τους Nalbantis and Koutsoyiannis [1995]. Ο κανόνας αυτός είναι της μορφής $S_i = a_i + b_i V$, όπου S_i το απόθεμα του i ταμιευτήρα και V ο συνολικός ωφέλιμος όγκος του συστήματος. Ο κανόνας καθορίζει το απόθεμα-στόχος για κάθε ταμιευτήρα συναρτήσει του συνολικού ωφέλιμου όγκου του συστήματος. Εξαιτίας των περιορισμών χωρητικότητας απαιτείται διόρθωση των γραμμικών εξισώσεων του παραμετρικού κανόνα και η τελική μορφή των κανόνων λειτουργίας είναι μη γραμμική. Σε διερεύνηση που έχει πραγματοποιηθεί για απλά υδροσυστήματα, έχει αποδειχθεί ότι η ευαισθησία του μοντέλου ως προς τις παραμέτρους a_i είναι πολύ περιορισμένη. Έτσι συνοπτικά ο κανόνας περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$T_i^* = \begin{cases} 0 & 1 + \phi(1 - T_i / K_i) < 0 \\ b_i V & 0 \leq 1 + \phi(1 - T_i / K_i) \leq K_i / T_i \\ K_i & 1 + \phi(1 - T_i / K_i) > K_i / T_i \end{cases} \quad (14)$$

όπου

$$T_i = \begin{cases} 0 & bV < 0 \\ b_i V & 0 \leq bV \leq K_i \\ K_i & bV > K_i \end{cases} \quad (15)$$

και

V ο συνολικός όγκος στο σύστημα ταμειυτήρων που συμμετέχουν στον παραμετρικό κανόνα μια δεδομένη χρονική στιγμή.

T_i^* το διορθωμένο απόθεμα-στόχος για τον ταμειυτήρα i

T_i η αρχική εκτίμηση του αποθέματος-στόχου για τον ταμειυτήρα i

K_i η καθαρή χωρητικότητα του ταμειυτήρα i

b_i οι παράμετροι του κανόνα απόληξης που τηρούν τον περιορισμό :

$$\sum_{i=1}^N b_i = 1 \quad (16)$$

ϕ ο συντελεστής διόρθωσης που δίνεται από τον τύπο :

$$\phi = \frac{V - \sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N T_i (1 - T_i / K_i)} \quad (17)$$

έτσι ώστε να τηρείται ο περιορισμός:

$$\sum_{i=1}^N T_i = V \quad (18)$$

Περιοριστικά στην επίτευξη του αποθέματος-στόχου λειτουργεί η παροχτευτικότητα των αγωγών του δικτύου. Επίσης διατηρούνται τα ανώτατα και κατώτατα όρια των ταμειυτήρων που έχουν τεθεί έτσι ώστε η εφαρμογή του τροποποιημένου χωρικού κανόνα να μην αυξάνει την πιθανότητα αστοχίας στους στόχους που έχει θέσει ο χρήστης.

Αποτέλεσμα των παραπάνω περιορισμών είναι η αναπόφευκτη δημιουργία τοπικών πλεονασμάτων και ελλειμμάτων μεταξύ του πραγματικού όγκου και του αποθέματος-στόχου των ταμειυτήρων. Το λειτουργικό σύστημα προσομοίωσης χρησιμοποιεί την τακτική ισοκατανομής τυχόν τοπικών πλεονασμάτων ή ελλειμμάτων έτσι ώστε να ελαττώνονται οι υπέρμετρες διαφορές και να προσεγγίζονται κατά το δυνατόν τα αποθέματα-στόχοι.

2.4.3 Αποφυγή υπερχειλίσεων

Κατά τις δύο πρώτες φάσεις της προσομοίωσης το λειτουργικό σύστημα μετακινεί όγκους νερού για την εξυπηρέτηση των στόχων που έθεσε ο χρήστης και για την εξυπηρέτηση των στόχων του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας. Οι μετακινήσεις αυτές διεξάγονται είτε εξ ολοκλήρου μέσα στο υδросύστημα, από τον έναν ταμιευτήρα στον άλλον, είτε μεταφέροντας νερό εκτός δικτύου για την κάλυψη κάποιας ζήτησης.

Ένας άλλος λόγος για τον οποίο χάνεται πολύτιμο νερό από το σύστημα είναι η περίπτωση όπου οι εισροές σε έναν ταμιευτήρα ξεπερνάνε τη χωρητικότητά του και κατά συνέπεια θα υπερχειλίζουν τον ταμιευτήρα. Στην τρίτη φάση της λειτουργικής προσομοίωσης το υπολογιστικό σύστημα επιδιώκει την ελαχιστοποίηση των υπερχειλίσεων με τη μεταφορά του πλεονάζοντος όγκου στους κατάντη ταμιευτήρες με διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο. Απαραίτητη προϋπόθεση γι' αυτό είναι να μην έχει εξαντληθεί η παροχευτικότητα στους αγωγούς μεταφοράς από τη χρήση τους στις δύο πρώτες φάσεις της λειτουργικής προσομοίωσης. Στο βαθμό που δεν έχει εξαντληθεί η παροχευτικότητα των αγωγών και που υπάρχει διαθέσιμος αποθηκευτικός χώρος στους ταμιευτήρες κατάντη, ο πλεονάζων όγκος μεταφέρεται και διατηρείται στο σύστημα για μελλοντική χρήση.

2.4.4 Περιορισμός στη χρήση αγωγών

Η χρήση των αγωγών του δικτύου επιτρέπεται στον Υδρονομέα κατά κανόνα χωρίς περιορισμό σε όλες τις φάσεις της λειτουργικής προσομοίωσης. Σε ειδικές περιπτώσεις όμως είναι σκόπιμη η χρήση ορισμένων αγωγών μόνο σε επιλεγμένες φάσεις προσομοίωσης. Ένας υδροηλεκτρικός σταθμός με δυνατότητα άντλησης για παράδειγμα, αντλεί όγκο νερού από τον κατάντη ταμιευτήρα τις νυχτερινές ώρες για να παράγει με αυτόν ενέργεια σε ώρες αιχμής. Η χρήση του υδροηλεκτρικού σταθμού με την ανάστροφη φορά ροής εξυπηρετεί μόνο ενεργειακούς στόχους που προσομοιώνονται στην πρώτη φάση της λειτουργικής προσομοίωσης. Στις υπόλοιπες δύο φάσεις (εξυπηρέτηση των στόχων του παραμετρικού κανόνα και η αποφυγή υπερχειλίσεων) η άντληση νερού δεν είναι σκόπιμη. Αντίθετα σε άλλες περιπτώσεις η χρήση της αντλίας ενός αντλιοστρόβιλου μπορεί να στοχεύει στην μεταφορά όγκων νερού μέσα στο δίκτυο χωρίς αυτό να εξυπηρετεί άμεσα κάποιον στόχο προσομοίωσης και θα έπρεπε να επιτραπεί μόνο στην δεύτερη φάση της λειτουργικής προσομοίωσης.

Τα δύο αυτά παραδείγματα κάνουν κατανοητή την αναγκαιότητα για περισσότερη ευελιξία στη χρήση των αγωγών. Ο Υδρονομέας δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει αγωγούς του δικτύου στους οποίους θα απαγορεύεται η χρήση συγκεκριμένης φοράς ροής για κάποια φάση της λειτουργικής προσομοίωσης.

2.5 Βελτιστοποίηση

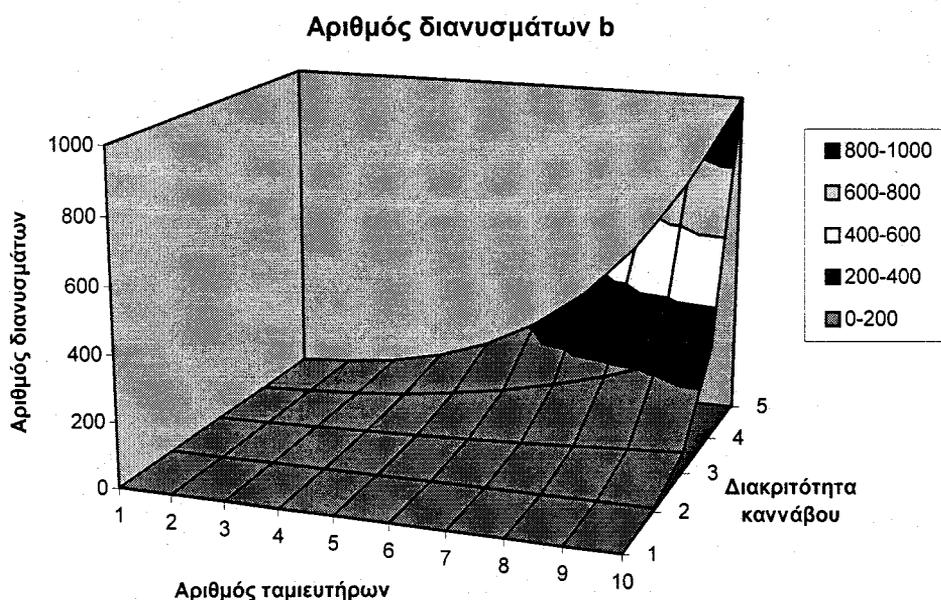
Ο Υδρονομέας πέρα από την προσομοίωση με έναν συγκεκριμένο κανόνα λειτουργίας πραγματοποιεί βελτιστοποίηση της διαχείρισης των υδατικών πόρων ως προς έναν από τους παρακάτω στόχους:

- **Ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας ενός στόχου που έχει θέσει ο χρήστης**

- **Μεγιστοποίηση της τιμής ενός στόχου** που έχει θέσει ο χρήστης με προκαθορισμένη την ανώτατη αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας
- **Μεγιστοποίηση της παραγόμενης πρωτεύουσας υδροηλεκτρικής ενέργειας**

Η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται με διαδοχικές προσομοιώσεις, διαφοροποιώντας κάθε φορά τις παραμέτρους του τροποποιημένου χωρικού κανόνα και/ή τους στόχους προσομοίωσης, σύμφωνα με τον στόχο ο οποίος καθορίζει την *αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης*. Η αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ενώ διατηρούνται μόνο τα αποτελέσματα του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας. Ένας κανόνας λειτουργίας αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο διάνυσμα παραμέτρων a και b . Η βελτιστοποίηση απαιτεί τη διακριτοποίηση του πεδίου τιμών των παραμέτρων a και b και την προσομοίωση με κάθε έναν συνδυασμό. Έτσι δημιουργείται ένας κανάβος τιμών η πυκνότητά του οποίου εξαρτάται από το βήμα διακριτοποίησης. Σε βελτιστοποιήσεις όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια τιμών των παραμέτρων είναι δυνατή και η χρησιμοποίηση έως και τρίτου σταδίου υποδιαίρεσης του καννάβου.

Πολλοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν το χρόνο βελτιστοποίησης. Ο αριθμός των ταμειυτήρων που διαχειριζόμαστε με βάση τον τροποποιημένο χωρικό κανόνα και το βήμα διακριτοποίησης του καννάβου των παραμέτρων είναι δύο από τους σημαντικότερους. Ο αριθμός των διανυσμάτων, για τους οποίους εκτελείται ο βασικός βρόχος λειτουργικής προσομοίωσης, αυξάνεται εκθετικά προς τον αριθμό των ταμειυτήρων που συμμετέχουν στον τροποποιημένο χωρικό κανόνα και προς τη διακριτότητα του καννάβου όπως φαίνεται στο Σχ. 3.



Σχ. 3: Αριθμός των κανόνων λειτουργίας με τους οποίους εκτελείται ο κύριος βρόχος λειτουργικής προσομοίωσης σε σχέση με τον αριθμό των ταμειυτήρων και την διακριτότητα του καννάβου

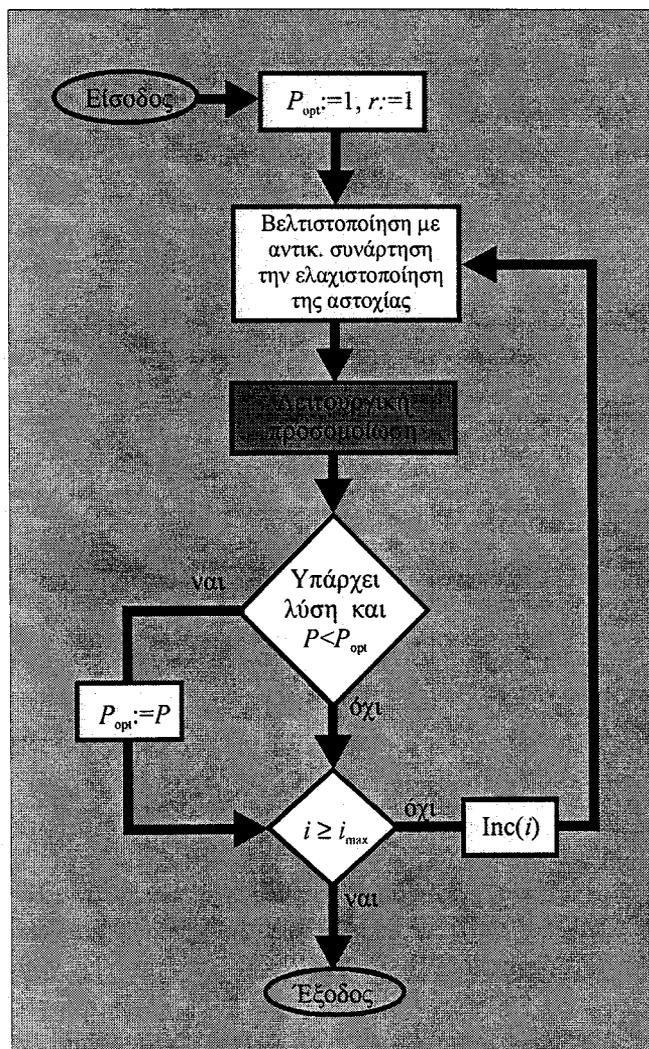
Είναι φανερό ότι ένας από τους βασικότερους τρόπους περιορισμού του χρόνου προσομοίωσης αποτελεί ο αποκλεισμός συγκεκριμένων ταμειυτήρων ελάσσονος σημασίας από τον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας. Σε αυτήν την περίπτωση τίθεται από τον χρήστη σταθερός

όγκος-στόχος T_i^* . Ο αποκλεισμός ταμειυτήρων από τον παραμετρικό κανόνα περιορίζει αντίστοιχα και την τιμή V του συνολικού όγκου των ταμειυτήρων που συμμετέχουν σε αυτόν. Η επιλογή των ταμειυτήρων που εξαιρούνται της βελτιστοποίησης καθώς και ο σταθερός όγκος-στόχος για τους ταμειυτήρες αυτούς αποτελούν ευθύνη του έμπειρου μελετητή.

Στα επόμενα κεφάλαια αναλύονται οι στόχοι βελτιστοποίησης του Υδρονομέα.

2.5.1.1 Ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας

Κατά την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας ενός ποσοτικά ορισμένου στόχου προσομοίωσης (στόχος-ερώτημα) υπάρχει σαφής και μοναδικός στόχος βελτιστοποίησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του είδους βελτιστοποίησης στο υδροσύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας αποτελεί ο υπολογισμός του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας για την κάλυψη της ζήτησης που δημιουργεί η ύδρευση της πρωτεύουσας. Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του Σχ. 4 το υποσύστημα εκτελεί επανειλημμένα με διαφορετικό κανόνα λειτουργίας κάθε φορά το βασικό βρόχο λειτουργικής προσομοίωσης. Ο βέλτιστος κανόνας λειτουργίας που θα επιλεγεί είναι εκείνος που θα έχει την μικρότερη αστοχία.



Σχ. 4: Διάγραμμα ροής βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας P ενός ποσοτικά ορισμένου στόχου

Ο στόχος- ερώτημα δεν είναι απαραίτητο να εξυπηρετείται σε πρώτη προτεραιότητα κατά τη διάρκεια της λειτουργικής προσομοίωσης. Κάλλιιστα θα μπορούσε στο παράδειγμα του υδροσυστήματος της Α. Στερεάς να αναζητηθεί η πιθανότητα αστοχίας συγκεκριμένης ζήτησης για την άρδευση στην Κοπαΐδα, έχοντας πάντοτε ως πρώτη προτεραιότητα την ύδρευση της μείζονος περιοχής Αθηνών. Οι στόχοι της προσομοίωσης δεν αλλάζουν και εξυπηρετούνται με τη σειρά που έχει ορίσει ο χρήστης.

2.5.1.2 Μειστοποίηση της τιμής του στόχου

Με την επιλογή αυτή επιδιώκεται η μειστοποίηση της τιμής ενός στόχου προσομοίωσης, που αναφέρεται και ως στόχος-ερώτημα, για καθορισμένο ανώτατο όριο αστοχίας. Η βελτιστοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί για όλα τα είδη στόχων που έχει θέσει ο χρήστης εκτός από τους στόχους που θέτουν όρια στο απόθεμα των ταμιευτήρων.

Η προσέγγιση του στόχου βελτιστοποίησης πραγματοποιείται σε δύο ξεχωριστές φάσεις. Στην πρώτη φάση χρησιμοποιείται μια αρχική τιμή του στόχου-ερωτήματος για να αναζητηθεί ο βέλτιστος κανόνας λειτουργίας σύμφωνα με τη διαδικασία του διαγράμματος ροής στο Σχ. 4. Η ανάλυση της τιμής του στόχου σε χρονικά βήματα (μήνες) θα πρέπει να ακολουθεί την αναμενόμενη κατανομή.

Ακολούθως ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί τους συντελεστές του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας που έχει προκύψει και προσομοιώνει επανειλημμένα το υδροσύστημα αναπροσαρμόζοντας κάθε φορά την τιμή του στόχου-ερωτήματος, ενώ ως προς τα χρονικά βήματα διατηρεί την αρχική κατανομή στην τιμή του στόχου. Η τιμή του στόχου αυξάνεται βαθμιαία κάθε φορά που κατά την λειτουργική προσομοίωση υπολογίζεται πιθανότητα αστοχίας κάτω από το ανώτατο αποδεκτό όριο. Εάν αντίθετα η τιμή του στόχου αποδειχθεί πολύ υψηλή με αποτέλεσμα η λειτουργική προσομοίωση να μην αποφέρει αποδεκτή λύση τότε η τιμή του στόχου μειώνεται. Η διαδικασία εξακολουθεί μέχρι να μην διαφοροποιείται σημαντικά η τιμή του στόχου.

2.5.1.3 Μειστοποίηση της παραγόμενης πρωτεύουσας υδροηλεκτρικής ενέργειας

Όπως οι όγκοι των ταμιευτήρων, έτσι και οι πρωτεύουσες ενέργειες E_p των υδροηλεκτρικών σταθμών μπορούν να εκφραστούν παραμετρικά, συναρτήσσει της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος P^{inst} :

$$E_p (GWh) = e_p \cdot \lambda \cdot P^{inst} \quad (19)$$

όπου p ο αύξων αριθμός του σταθμού, λ ο συντελεστής αναγωγής των μονάδων μέτρησης και e_p η παράμετρος του ενεργειακού στόχου. Λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές συνθήκες, η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί κυμαίνεται για κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό μεταξύ δύο ορίων που αποτελούν ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος:

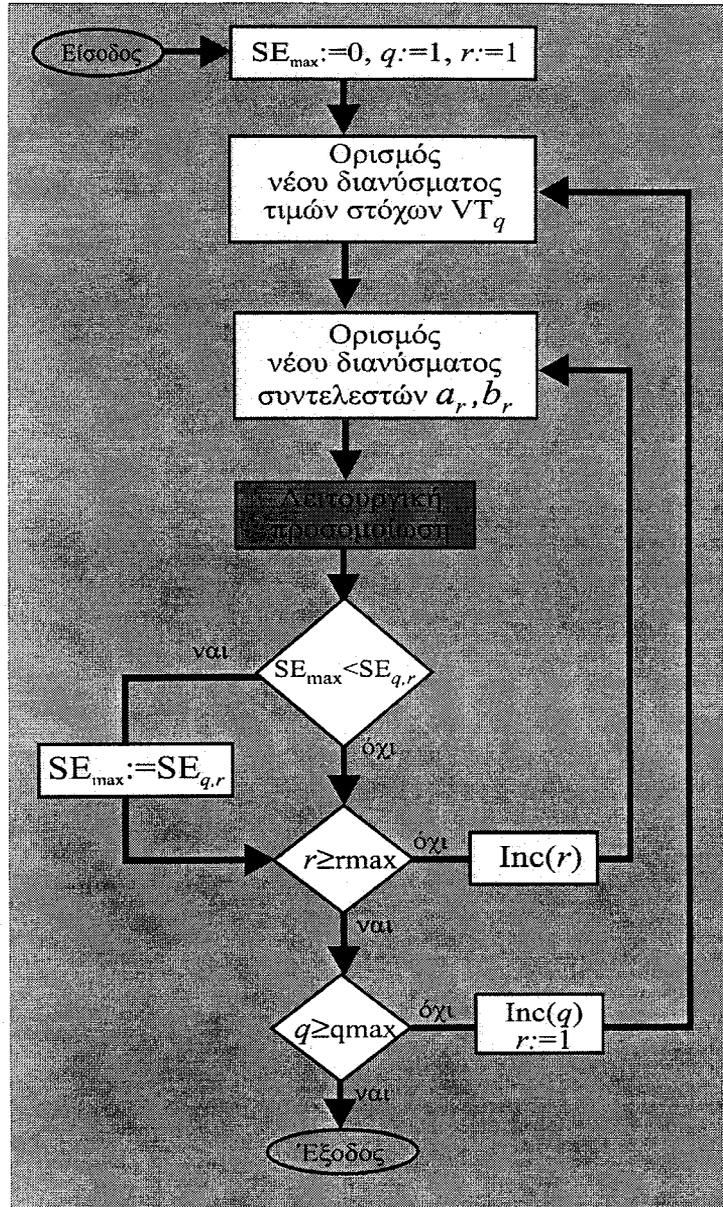
$$e_{\min} \leq e_p \leq e_{\max} \quad (20)$$

Ως στόχος βελτιστοποίησης τίθεται η *συνολική παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας* SE_p . Η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης συνεπώς ορίζεται:

$$SE_p = E\left[\sum_{p=1}^m E_p\right] \quad (21)$$

όπου N ο αριθμός των υδροηλεκτρικών σταθμών και με $E[\]$ συμβολίζεται η αναμενόμενη τιμή.

Ο Υδρονομέας αναζητεί τον βέλτιστο συνδυασμό των e_p που μεγιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση με κάποιο αποδεκτό επίπεδο αστοχίας. Η επίλυση του προβλήματος γίνεται με δοκιμές, σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του Σχ. 5.



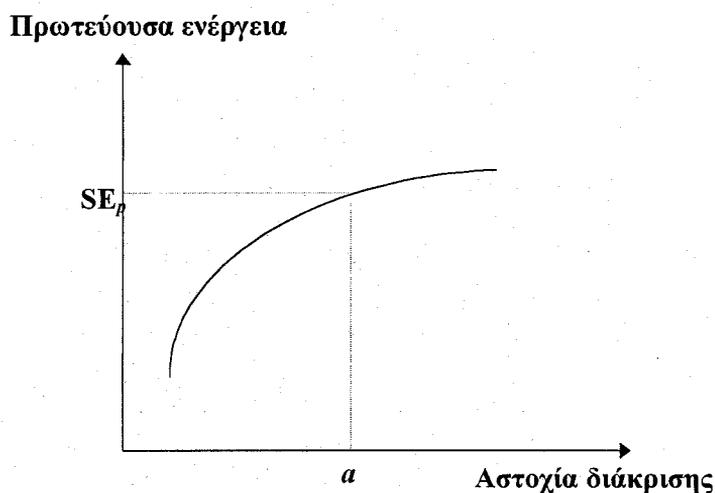
Σχ. 5: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου μεγιστοποίησης της συνολικής παραγόμενης πρωτεύουσας υδροηλεκτρικής ενέργειας

Στο πρόγραμμα ενσωματώνεται μια ρουτίνα παραγωγής συνδυασμών των e_p , ξεκινώντας από το άνω όριο για κάθε σταθμό. Με τον τρόπο αυτό ορίζονται ενεργειακοί στόχοι t_i για όλες τις υδροηλεκτρικές μονάδες. Η σειρά ικανοποίησης των στόχων είναι ανάλογη είτε της εγκατεστημένης ισχύος, γεγονός που συνεπάγεται σταθερή προτεραιότητα στόχων για

οποιοδήποτε συνδυασμό παραμέτρων, είτε της ζητούμενης παραγωγής ενέργειας. Οι επιμέρους ενεργειακοί στόχοι ικανοποιούνται χωρίς περιορισμό ως προς την πιθανότητα αστοχίας. Συνεπώς το σύστημα παράγει ενέργειες σύμφωνα με τη σειρά προτεραιότητας που έχει δοθεί, χωρίς να απορρίπτει λύσεις λόγω υπέρβασης του ορίου αστοχίας στους ενεργειακούς περιορισμούς.

Οι υπόλοιποι στόχοι του συστήματος (καταναλωτικοί και περιβαλλοντικοί) τίθενται σε μικρότερη προτεραιότητα. Για τους στόχους αυτούς μπορεί να τεθεί όριο αστοχίας μικρότερο της μονάδας.

Με δεδομένη την χρονική διαθεσιμότητα πρωτεύουσας ενέργειας, για κάθε συνδυασμό ενεργειακών στόχων, εκτελείται ο αλγόριθμος προσομοίωσης-βελτιστοποίησης και προκύπτει η μέγιστη τιμή της συνολικής παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν ζεύγη τιμών παραγόμενης ενέργειας και αστοχίας διάκρισης πρωτεύουσας από τη δευτερεύουσα ενέργεια a . Η γραφική τους απεικόνιση φαίνεται στο Σχ. 6.



Σχ. 6: Γραφική απεικόνιση της σχέσης $SE_p=f(a)$

3 Σχεδιασμός του υπολογιστικού συστήματος

3.1 Βασικά συστατικά του Υδρονομέα

Μια απλουστευμένη αλλά κατατοπιστική εικόνα των βασικών συστατικών του Υδρονομέα και των αλληλοεπιδράσεών τους φαίνεται στο Σχ. 7. Στο σχήμα αυτό δεν συμπεριλαμβάνεται η επίδραση του χρήστη, ο οποίος μπορεί να επέμβει σε όλα τα υποσυστήματα πραγματοποιώντας τις απαραίτητες επιλογές και δίνοντας εντολές στα υποσυστήματα μέσα από τις ειδικές φόρμες που περιγράφονται στο παράρτημα Α.

Τα συστατικά του Υδρονομέα παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

3.1.1 Υποσύστημα Οργάνωσης Δικτύου

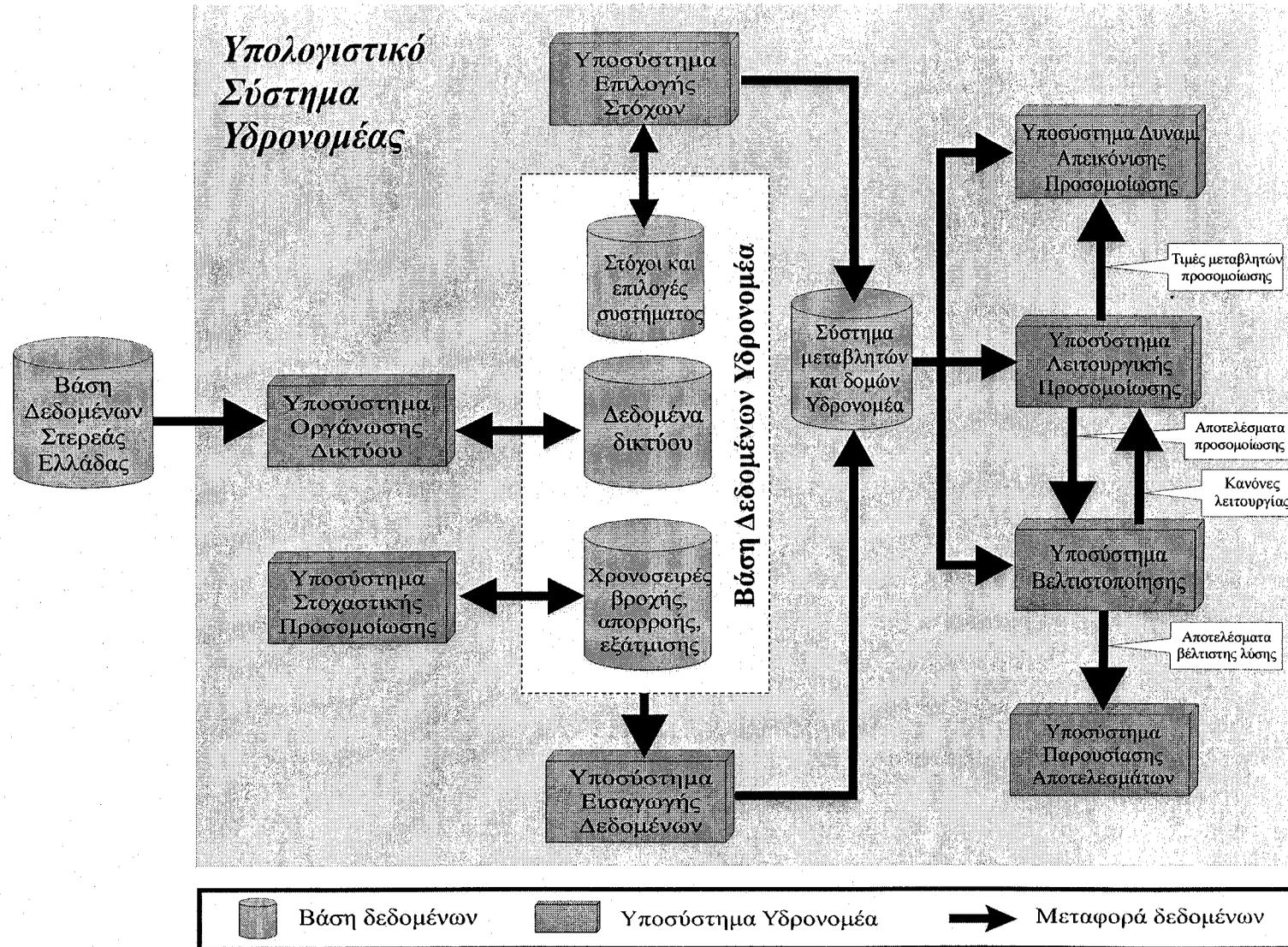
Το Υποσύστημα Οργάνωσης Δικτύου παρέχει τις απαραίτητες λειτουργίες για τη δημιουργία και τροποποίηση της δομής και των τιμών των ιδιοτήτων των στοιχείων του δικτύου. Η εισαγωγή των δεδομένων γίνεται από τον χρήστη κατ' ευθείαν από το πληκτρολόγιο του υπολογιστή και το υποσύστημα ενημερώνει για οποιεσδήποτε αλλαγές άμεσα τη Βάση Δεδομένων του Υδρονομέα. Τα στοιχεία που μπορούν να τροποποιηθούν κατ' αυτόν τον τρόπο αντιστοιχούν σε αυτά των κόμβων, των αγωγών και των μονάδων ενεργειακής μετατροπής της Βάσης Δεδομένων του Υδρονομέα που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.2. Επίσης είναι δυνατή η επιλεκτική ενεργοποίηση και απενεργοποίηση στοιχείων του δικτύου. Ορισμένα δεδομένα μπορούν να εισαχθούν από την ευρύτερη βάση δεδομένων της Στερεάς Ελλάδας με τον τρόπο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4. Το μορφοποιημένο δίκτυο που αποτελείται από Κόμβους, Αγωγούς, Μονάδες Ενεργειακής Μετατροπής καθώς και οι χρονοσειρές εισόδου αποθηκεύονται στη Βάση Δεδομένων του Υδρονομέα απ' όπου μπορεί να εισαχθούν πάλι στο ίδιο ή σε άλλα υποσυστήματα για παραπέρα επεξεργασία.

3.1.2 Υποσύστημα Στοχαστικής Προσομοίωσης

Το Υποσύστημα Στοχαστικής Προσομοίωσης χρησιμοποιεί ιστορικές χρονοσειρές βροχής, απορροής και εξάτμισης για να δημιουργήσει συνθετικές χρονοσειρές μεγάλης χρονικής διάρκειας με ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά όπως αυτά των ιστορικών χρονοσειρών. Τόσο οι χρονοσειρές εισαγωγής όσο και αυτές εξαγωγής αποθηκεύονται στη Βάση Δεδομένων του Υδρονομέα και έχουν ενιαία μορφή που αναγνωρίζεται από το Υποσύστημα Εισαγωγής Δεδομένων.

Καθώς το Υποσύστημα Στοχαστικής Προσομοίωσης δεν χρησιμοποιεί μεταβλητές, δομές ή ρουτίνες άλλων υποσυστημάτων, αποτελεί ουσιαστικά ένα αυτόνομο πρόγραμμα που θα μπορούσε να λειτουργήσει και ανεξάρτητα από τον Υδρονομέα.

Το Υποσύστημα Στοχαστικής Προσομοίωσης περιγράφεται αναλυτικά στο παράρτημα Β.



Σχ. 7: Βασικά συστατικά του Υδρονομείας

3.1.3 Υποσύστημα Επιλογής Στόχων και Περιορισμών Προσομοίωσης

Με το Υποσύστημα Επιλογής Στόχων και Περιορισμών ο χρήστης δημιουργεί τους στόχους της προσομοίωσης και τους συνδέει με μία συνιστώσα του δικτύου. Όλοι οι στόχοι εντάσσονται σε ένα κατάλογο προτεραιοτήτων. Η συνιστώσα μπορεί να είναι ένας από τους κόμβους, τους αγωγούς ή τους στροβίλους του δικτύου ανάλογα με το είδος του στόχου όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.4.1.1. Εάν ένας στόχος καθορίζει ένα ανώτατο αποδεκτό όριο αστοχίας μικρότερο της μονάδας ο στόχος αυτός λειτουργεί περιοριστικά στην εύρεση μιας αποδεκτής λύσης.

Το Υποσύστημα επικοινωνεί με τη Βάση Δεδομένων του Υδρονομέα, όπου αποθηκεύεται ο κατάλογος των στόχων. Το υποσύστημα δεν ενημερώνει αυτόματα τη βάση δεδομένων για τυχόν τροποποιήσεις στους στόχους παρά μόνον εάν η ενημέρωση είναι επιθυμητή από το χρήστη, έτσι ώστε να αποθηκεύσει τις αλλαγές που έχει κάνει για μετέπειτα χρήση. Ο λόγος για τον οποίο δεν ενημερώνεται άμεσα η βάση δεδομένων είναι η διευκόλυνση του χρήστη στην πραγματοποίηση δοκιμαστικού χαρακτήρα μετατροπών στους στόχους με παράλληλες δοκιμαστικές προσομοιώσεις, διατηρώντας όμως τις αρχικές τιμές στη βάση δεδομένων.

3.1.4 Υποσύστημα Εισαγωγής Δεδομένων

Το Υποσύστημα Εισαγωγής Δεδομένων λειτουργεί ως διεπιφάνεια ανάμεσα στη Βάση Δεδομένων και στο εσωτερικό σύστημα καθολικών μεταβλητών και δομών δεδομένων του Υδρονομέα. Οι αρμοδιότητες του Υποσυστήματος περιλαμβάνουν:

- Εισαγωγή των δεδομένων του δικτύου, των στόχων, των χρονοσειρών κλπ. από τη Βάση Δεδομένων του Υδρονομέα
- Έλεγχο των δεδομένων και ενημέρωση του χρήστη για τυχόν λογικά σφάλματα και υπερβάσεις ορίων που παρατηρήθηκαν στα δεδομένα εισόδου χωρίς να διακόπτεται η ομαλή λειτουργία του προγράμματος. Επίσης παρέχει στο χρήστη πρόσθετες πληροφορίες, χρήσιμες για την αξιολόγηση των δεδομένων.
- Δημιουργία αντικειμένων πληροφορίας και προσαρμογή των εσωτερικών δομών δεδομένων και μεταβλητών του Υδρονομέα σύμφωνα με τις πληροφορίες που εισήχθησαν.

Το παρόν Υποσύστημα Εισαγωγής Δεδομένων μπορεί εύκολα να προσαρμοσθεί ή να αντικατασταθεί μελλοντικά από κάποιο άλλο εάν τροποποιηθεί ο σχεδιασμός εισαγωγής δεδομένων π.χ. εάν επιλεγεί η αποθήκευση δεδομένων σε μια κατανεμημένη βάση. Κατ' αυτόν τον τρόπο αποσυνδέεται το υπολογιστικό σύστημα του Υδρονομέα από την μορφή της βάσης δεδομένων. Επιπλέον η εισαγωγή των δεδομένων στις εσωτερικές δομές του Υδρονομέα, σε συνδυασμό με τις ρουτίνες διαχείρισης δεδομένων που αναπτύχθηκαν, παρέχουν στο λειτουργικό σύστημα έναν περισσότερο ευέλικτο τρόπο πρόσβασης στα δεδομένα δικτύου, καθιστώντας τη διαδικασία προσομοίωσης ταχύτερη.

3.1.5 Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης

Το Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης χρησιμοποιεί τις εσωτερικές δομές και τις καθολικές μεταβλητές του Υδρονομέα στις οποίες είναι καταχωρημένο το ομοίωμα του

υδροσυστήματος, οι επιλογές του χρήστη και οι χρονοσειρές εισόδου. Για την εκτέλεση της προσομοίωσης είναι απαραίτητος και ένας κανόνας λειτουργίας ο οποίος δίνεται κατά την ενεργοποίησή του υποσυστήματος με έναν από τους ακόλουθους δύο τρόπους:

- Από τον χρήστη ο οποίος ορίζει από τη Φόρμα Επιλεκτικής Προσομοίωσης τις τιμές των συντελεστών του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας σε κάθε έναν ταμιευτήρα που συμμετέχει στη διαδικασία διαχείρισης με βάση τον τροποποιημένο χωρικό κανόνα.
- Από το Υποσύστημα Βελτιστοποίησης το οποίο στα πλαίσια της διαδικασίας της βελτιστοποίησης τροφοδοτεί το Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης με έναν κανόνα λειτουργίας

Μετά την προσομοίωση της συνολικής προβλεπόμενης περιόδου με τον τρόπο που περιγράφεται στο κεφ. 2.4, το Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης επιστρέφει τα εξής αποτελέσματα:

- Το σύνολο των χρονικών βημάτων και χρονικών περιόδων στα οποία 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 υπερχειλίση, και τις υπόγειες διαφυγές.
- Την κατανάλωση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε χρονικό βήμα και για κάθε μονάδα ενεργειακής μετατροπής του υδροσυστήματος. 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 αντικειμένων 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.

3.1.6 Υποσύστημα Βελτιστοποίησης

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

3.1.7 Υποσύστημα Δυναμικής Απεικόνισης Προσομοίωσης

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 τη διαδικασία της προσομοίωσης σε κάθε της φάση παρέχοντάς του τις παρακάτω πληροφορίες:

Ταμειυτήρες

Ονομασία ταμειυτήρα

Στάθμη νεκρού όγκου

Στάθμη όγκου-στόχου εάν έχει τεθεί από το χρήστη

Επίκαιρη στάθμη όγκου-στόχου του χωρικού κανόνα

Επίκαιρη στάθμη

Δείκτης αστοχίας στόχων που συνδέονται με τον ταμειυτήρα

Αγωγοί

Ονομασία αγωγού

Επίκαιρη παροχή

Δείκτης αστοχίας στόχων που συνδέονται με τον αγωγό

Μονάδες Ενεργειακής Μετατροπής

Επίκαιρη Ενέργεια που παράγεται/καταναλώνεται

Δείκτης αστοχίας στόχων που συνδέονται με τον αγωγό

3.1.8 Υποσύστημα Παρουσίασης Αποτελεσμάτων

Το Υποσύστημα Παρουσίασης Αποτελεσμάτων επεξεργάζεται τα πρωτογενή αποτελέσματα της προσομοίωσης για να τα παρουσιάσει σε κατάλληλη μορφή στο χρήστη. Συγκεκριμένα παρέχει τις ακόλουθες πληροφορίες για τον βέλτιστο κανόνα λειτουργίας :

- 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 αναλυτικό ενεργειακό ισοζύγιο ετήσιων μέσων όρων για κάθε μονάδα ενεργειακής μετατροπής συνυπολογίζοντας την ποσοστιαία χρονική διαθεσιμότητα πρωτεύουσας ενέργειας που έθεσε ο χρήστης
- Τα οικονομικά μεγέθη που προκύπτουν από την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας

3.2 Η Βάση δεδομένων

3.2.1 Σχεδιασμός της βάσης δεδομένων

Η σχεσιακή βάση δεδομένων του υδροσυστήματος βασίστηκε στο μοντέλο διαγραμμάτων σχέσεων-οντοτήτων (Entity-Relationship diagram, ER-diagram), όπως περιγράφεται από τον Sommerville, I., (1996). Αποτέλεσμα του σχεδιασμού είναι το διάγραμμα του Σχ. 8. Στο σχήμα αυτό, πέρα από τις κλάσεις οντοτήτων και τις δυνατές σχέσεις μεταξύ τους, αναγράφεται και ο πληθάρθρωμος εξόδου (output cardinality) της σχέσης, ενώ ο πληθάρθρωμος εισόδου (input cardinality) θεωρείται πάντοτε η μονάδα. Για λόγους έλλειψης χώρου περιλαμβάνεται μόνο μια μικρή επιλογή από τις ιδιότητες των οντοτήτων. Ο πλήρης κατάλογος των ιδιοτήτων παρατίθεται στα επόμενα κεφάλαια.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχ. 8 το δίκτυο του υδατικού συστήματος αποτελείται από **κόμβους** και **αγωγούς** μεταφοράς νερού. Κάθε αγωγός ορίζεται από δύο κόμβους που καθορίζουν και την κατεύθυνση ροής στους αγωγούς μίας κατευθύνσεως, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα αμφίδρομης ροής σε αγωγό που συνδέεται με αντλιοστάσιο. Ο κάθε κόμβος μπορεί να συνδέεται με έναν απεριόριστο αριθμό αγωγών ανάντη ή κατάντη. Η δομή του δικτύου αποτελούμενη από κόμβους και αγωγούς μπορεί να έχει θεωρητικά οποιαδήποτε μορφή. Επιτρεπτές είναι ακόμα και οι κυκλικές ροές στο δίκτυο σε συνδυασμό με τη λειτουργία αντλιοστασίων. Σε περίπτωση που ένας κόμβος διαθέτει αποθηκευτική δυνατότητα, ονομάζεται **ταμιευτήρας** και διαθέτει επιπρόσθετες ιδιότητες (χωρητικότητα, καμπύλες στάθμης-όγκου-επιφάνειας κ.ά.). Ένας κοινός κόμβος, χωρίς αποθηκευτικό χώρο, χρησιμοποιείται είτε σαν σύνδεσμος μεταξύ δύο ή περισσότερων αγωγών είτε σαν αρχικός ή τελικός κόμβος με τον οποίο συνδέεται παροχή ή ζήτηση νερού.

Για την προσομοίωση των αντλιοστασίων και μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται η κλάση **μετατροπής ενέργειας**. Η ίδια κλάση χρησιμοποιείται και για μονάδες που λειτουργούν αμφίδρομα, πότε σαν μονάδες παραγωγής ενέργειας και πότε σαν αντλιοστάσια ανάλογα με τις ανάγκες του λειτουργικού συστήματος. Κάθε μετατροπέας ενέργειας συνδέεται με έναν αγωγό. Ένας αγωγός έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με το πολύ μια μονάδα μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας. Καμπύλες αντιστοιχίας ύψους πτώσης - ειδικής ενέργειας - παροχής χρησιμοποιούνται τόσο κατά τον υπολογισμό της παραγωγής, όσο και της κατανάλωσης ενέργειας. Για τον υπολογισμό του ύψους πτώσης χρησιμοποιούνται ιδιότητες και μεταβλητές των ταμιευτήρων ανάντη και κατάντη του αγωγού (επίκαιρη στάθμη, σημείο εξαγωγής) με τον οποίο είναι συνδεδεμένη η μονάδα ενεργειακής μετατροπής.

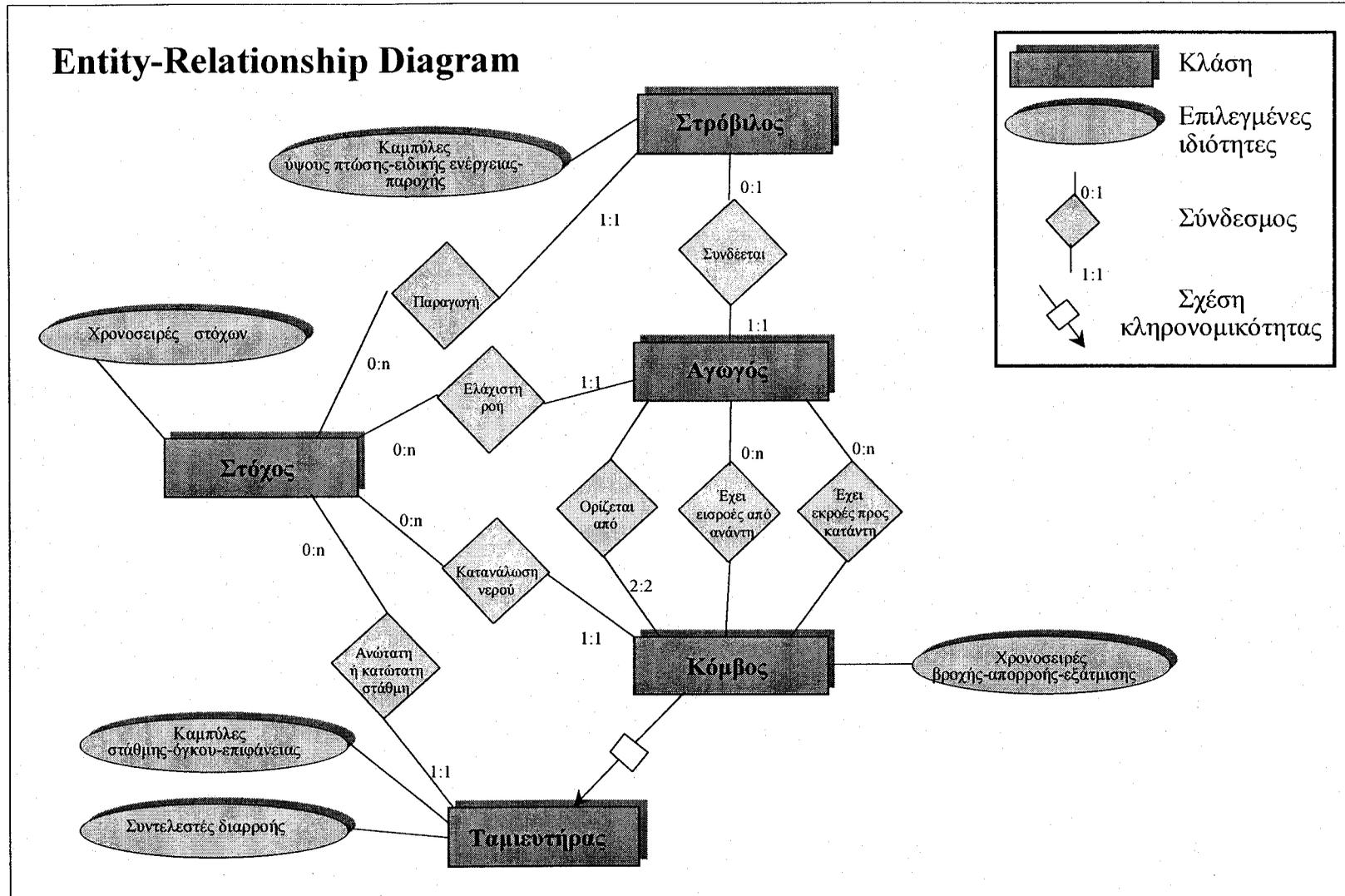
Ο κάθε **στόχος** ανάλογα με το είδος του συνδέεται με ακριβώς μία οντότητα από τις κλάσεις αγωγός, κόμβος, ταμιευτήρας και στρόβιλος και έχει μία από τις ακόλουθες ερμηνείες:

- Στόχος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Στόχος ελάχιστης ροής νερού στον αγωγό
- Στόχος κατανάλωσης νερού από κόμβο
- Στόχος ανώτατης ή κατώτατης στάθμης σε ταμιευτήρα

Οι στόχοι αναφέρονται πάντοτε σε ένα χρονικό βήμα και η τιμή τους μπορεί να μεταβάλλεται εποχιακά. Διαχρονικά μπορεί να αυξάνεται γραμμικά ή εκθετικά σύμφωνα με τις επιθυμίες του χρήστη.

Για την διευκόλυνση του χρήστη στην προσομοίωση διαφόρων σεναρίων συμπεριλαμβανομένων και παραλλαγών της ίδιας της δομής του δικτύου, τα αντικείμενα κόμβος, αγωγός, μονάδα παραγωγής ενέργειας και στόχος διαθέτουν μια ιδιότητα η οποία ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί το εκάστοτε αντικείμενο. Η απενεργοποίηση ενός αντικειμένου προκαλεί το ίδιο αποτέλεσμα και στα αντικείμενα που εξαρτώνται από αυτό. Κατ' αυτόν τον τρόπο η απενεργοποίηση ενός κόμβου π.χ. προκαλεί την απενεργοποίηση όλων των αγωγών που συμβάλλουν ή ξεκινούν από αυτόν καθώς και όλων των στόχων που συνδέονται με αντικείμενα που δεν είναι πλέον ενεργά.

Οι **χρονοσειρές** βροχής-απορροής-εξάτμισης ταμειυτήρα που δίνονται είναι ιστορικές ή συνθετικές, αποτέλεσμα της στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών. Όλες οι χρονοσειρές χωρίζονται σε χρονικές περιόδους και αυτές πάλι σε χρονικά βήματα. Μια χρονική περίοδος αντιστοιχεί συνήθως σε ένα έτος, ενώ ένα χρονικό βήμα αντιστοιχεί σε ένα μήνα, του έτους χωρίς αυτό να προκαθορίζεται από το υπολογιστικό σύστημα.



Σχ. 8: Βασικό διάγραμμα σχέσεων οντοτήτων (Entity-Relationship-Diagram) του Υδρονομέα

3.2.2 Ιδιότητες οντοτήτων

3.2.2.1 Τρόπος παρουσίασης της βάσης δεδομένων και συμβολισμοί

Η σχεσιακή βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε μπορεί να περιγραφεί σαν ένα σύνολο από πίνακες. Οι πίνακες περιλαμβάνουν τις κλάσεις με τις ιδιότητές τους, και δείκτες σε άλλους πίνακες. Ο τρόπος περιγραφής των πινάκων της βάσης δεδομένων που επιλέχθηκε εδώ είναι ο ακόλουθος και περιλαμβάνει πέρα από την ονομασία των ιδιοτήτων επιπλέον τον τύπο, το μέγεθος, την μονάδα μέτρησης καθώς και μια σύντομη περιγραφή της ιδιότητας:

Ονομασία Πίνακα			
Ονομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
Ιδιότητα 1	Τύπος/Μεγ. ιδιότ. 1	Μονάδα ιδιότ. 1	Περιγραφή ιδιότητας 1
Ιδιότητα 2	Τύπος/Μεγ. ιδιότ. 2	Μονάδα ιδιότ. 2	Περιγραφή ιδιότητας 2
.....

Σχ. 9: Παράδειγμα πίνακα βάσης δεδομένων

Το σύμβολο (*) δίπλα στο όνομα μιας ιδιότητας υποδηλώνει ότι η ιδιότητα αυτή χρησιμοποιείται για την αναγνώριση της οντότητας και κατά συνέπεια αποτελεί κλειδί της κλάσης.

Με έντονο τρόπο στη στήλη της περιγραφής μιας ιδιότητας είναι γραμμένες οι λέξεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσια ως τιμή της ιδιότητας.

Οι τύποι της ιδιότητας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι ακόλουθοι:

A[x] : Συμβολοσειρά αποτελούμενη από το πολύ x αλφαριθμητικά σύμβολα

N : Πραγματικός αριθμός

I : Ακέραιος αριθμός

Στο παράρτημα Γ παρατίθενται οι πίνακες που απαρτίζουν τη βάση δεδομένων της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας.

3.2.2.2 Κόμβος

Πίν. 1: Πίνακας κόμβου

Node			
Όνομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
NAME (*)	A[20]	-	Όνομασία κόμβου
ACTIVE	A[1]	-	Το πεδίο μπορεί να λάβει τις εξής δύο τιμές: Y: Ο κόμβος είναι ενεργός N: Ο κόμβος είναι ανενεργός
TYPE	A[20]	-	Ο Υδρονομέας διακρίνει τις εξής κατηγορίες κόμβων: node: Κόμβος δίχως αποθηκευτική ικανότητα reservoir: Ταμιευτήρας
MAXSTORAGE	N	hm ³	Χωρητικότητα ταμιευτήρα που αντιστοιχεί στη στάθμη υπερχειλίσης (αναφέρεται μόνο σε κόμβο του τύπου reservoir)
MINVOLUME	N	hm ³	Νεκρός όγκος (αναφέρεται μόνο σε κόμβο του τύπου reservoir)
INITIALVOLUME	N	hm ³	Αρχική τιμή όγκου στον ταμιευτήρα κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης (αναφέρεται μόνο σε κόμβο του τύπου reservoir)
SUBC_AREA	N	km ²	Επιφάνεια υπολεκάνης απορροής στον κόμβο
MANAGE	A[1]	-	Σε περίπτωση που ο κόμβος έχει αποθηκευτική ικανότητα (TYPE=reservoir) Το πεδίο μπορεί να λάβει τις εξής δύο τιμές: Y: Ο ταμιευτήρας συμμετέχει στον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας N: Ο κόμβος εξαιρείται από τον παραμετρικό κανόνα κατά και έχει σταθερό στόχο αποθέματος κατά την προσομοίωση
TARGETVOLUME	N	hm ³	Απόθεμα-στόχος ταμιευτήρα που κατά την προσομοίωση εξαιρείται από τον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας (MANAGE=N)
X_COORD	I		Γεωγραφική τετμημένη στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87)
Y_COORD	I		Γεωγραφική τεταγμένη στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87)
IO	A[20]	-	Πίνακας βροχοπτώσεων, απορροών και εξατμίσεων ανά χρονικό βήμα και περίοδο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση. Σε περίπτωση που ο κόμβος δεν δέχεται τέτοια στοιχεία η τιμή της παραμέτρου πρέπει να είναι nil.
LVS	A[20]	-	Όνομασία πίνακα με αντιστοιχίες στάθμης - όγκου - επιφάνειας.
LEAKAGE	A[20]	-	Όνομασία πίνακα συντελεστών υπολογισμού υπογείων διαφυγών

Στον πίνακα TimeSer καταχωρούνται οι δυνατές επιλογές πινάκων ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών βροχοπτώσεων, απορροών και εξατμίσεων για τον εκάστοτε κόμβο. Η καταχώριση στο πεδίο SUBC_AREA είναι προαιρετική ενώ καταχώριση στα πεδία MAXSTORAGE, MINVOLUME, INITIALVOLUME, LVS και LEAKAGE λαμβάνεται υπόψη μόνο στην περίπτωση που ο κόμβος είναι και ταμιευτήρας (TYPE=reservoir) οπότε και η καταχώριση είναι υποχρεωτική, εκτός από αυτή του πεδίου LEAKAGE.

3.2.2.2.1 Διόρθωση απορροής κόμβου

Η εξίσωση που περιγράφει τη διόρθωση της απορροής σε κάποιον κόμβο δίνεται στο κεφάλαιο 2.1.3

Πίν. 2: Πίνακας διόρθωσης απορροής κόμβου

StatCorrection			
Όνομασία	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
NODE	N	-	Όνομασία κόμβου
A	N	-	Παράμετρος α
B	N	-	Παράμετρος β
D1	N	hm ³ / Step	Η διαφορά μεταξύ της προβλεπόμενης απόληψης από τον υπόγειο υδροφόρα και της απόληψης με την οποία υπολογίστηκε η χρονοσειρά απορροής στο 1ο χρονικό βήμα
D2	N	hm ³ / Step	Η διαφορά μεταξύ της προβλεπόμενης απόληψης από τον υπόγειο υδροφόρα και της απόληψης με την οποία υπολογίστηκε η χρονοσειρά απορροής στο 2ο χρονικό βήμα
.....

3.2.2.2.2 Αντιστοιχίες στάθμης - όγκου - επιφάνειας ταμιευτήρα

Η ονομασία του πίνακα δίνεται από την ιδιότητα LVS του πίνακα Node και περιλαμβάνει έναν θεωρητικά απεριόριστα μεγάλο αριθμό αντιστοιχιών. Οι ενδιάμεσες τιμές υπολογίζονται με λογαριθμική παρεμβολή.

Πίν. 3: Πίνακας αντιστοιχιών στάθμης - όγκου - επιφάνειας ταμιευτήρα

Όνομασία	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
LEVEL	N	m	Στάθμη νερού στον ταμιευτήρα
VOLUME	N	hm ³	Όγκος ταμιευτήρα στην αντίστοιχη στάθμη
SURFACE	N	km ²	Εμβαδόν επιφάνειας ταμιευτήρα στην αντίστοιχη στάθμη

3.2.2.3 Συντελεστές υπογείων διαφυγών ταμιευτήρα

Η ονομασία του πίνακα δίνεται από την ιδιότητα LEAKAGE του κόμβου.

Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει τις υπόγειες διαφυγές G_{ij} ενός ταμιευτήρα παρατίθεται στο κεφάλαιο 2.1.2. Οι άγνωστοι δίνονται από τον ακόλουθο πίνακα:

Πίν. 4: Πίνακας συντελεστών υπογείων διαφυγών

Συντελεστής	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
A	N	hm ³ / Step m ³	Συντελεστής A _i
B	N	hm ³ / Step m ²	Συντελεστής B _i
C	N	hm ³ / Step m	Συντελεστής C _i
E	N	hm ³ /Step	Συντελεστής E _i
SIGMA	N		Τυπική απόκλιση σ

Κάθε σειρά αναφέρεται σε ένα χρονικό βήμα. Ο αριθμός των σειρών του πίνακα είναι ίσος με τον αριθμό των χρονικών βημάτων μιας χρονικής περιόδου

3.2.2.3 Αγωγός

Πίν. 5: Πίνακας Αγωγών

Pipe			
Ονομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
NAME (*)	A[20]	-	Ονομασία αγωγού
ACTIVE	A[1]	-	Το πεδίο μπορεί να λάβει τις εξής δύο τιμές: Y: Ο αγωγός είναι ενεργός N: Ο αγωγός είναι ανενεργός
DIRECTION	A[20]	-	Η παράμετρος δίνει τις δυνατές κατευθύνσεις ροής στον αγωγό και μπορεί να πάρει τις εξής τιμές: oneway: Ο αγωγός λειτουργεί μόνο προς μία κατεύθυνση, από τον ανάντη προς τον κατάντη κόμβο. bidirectional: Ο αγωγός έχει δυνατότητα αμφίδρομης ροής
TYPE	A[20]	-	Για τις ανάγκες της προσομοίωσης οι τύποι των αγωγών διακρίνονται στους εξής: constflow: Αγωγός σταθερής παροχαρακτηριστικότητας varflow: Αγωγός του οποίου η παροχαρακτηριστικότητα εξαρτάται από το ύψος πτώσης
NODE_UP	A[20]	-	Ονομασία ανάντη κόμβου
NODE_DOWN	A[20]	-	Ονομασία κατάντη κόμβου

Pipe (συνέχεια)			
Όνομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης.	Περιγραφή
INLET_LEVEL	N	m	Στάθμη σημείου τροφοδοσίας του αγωγού. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ύψους πτώσης.
OUTLET_LEVEL	N	m	Στάθμη στο σημείο εξαγωγής του αγωγού. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ύψους πτώσης
OUTLET_TYPE	A[20]	-	Ως προς το σημείο εξαγωγής ο αγωγός διακρίνεται στις εξής κατηγορίες: constout: Για τον υπολογισμό του ύψους πτώσης θεωρείται σταθερή η στάθμη στο σημείο εξαγωγής varout: Το σημείο εξαγωγής του αγωγού βρίσκεται κάτω από τη στάθμη αποθέματος του κατάντη ταμιευτήρα
RIVER	A[1]	-	Το πεδίο μπορεί να λάβει τις εξής δύο τιμές: Y: Οι υπερχειλίσεις του ταμιευτήρα ανάντη μεταφέρονται μέσω παράλληλου φυσικού αγωγού στον ταμιευτήρα κατάντη N: Οι υπερχειλίσεις του ανάντη ταμιευτήρα χάνονται από το σύστημα
CONST_DISCHARGE_CAPACITY	N	m ³ /s	Παροχетеυτικότητα αγωγού (Αναφέρεται μόνο σε αγωγούς τύπου constflow)
VAR_DISCHARGE_CAPACITY	A[20]	-	Όνομασία πίνακα με αντιστοιχίες ύψους πτώσης παροχетеυτικότητας (Αναφέρεται μόνο σε αγωγούς τύπου varflow)
USAGE_COEFF	N	-	Συντελεστής χρήσης αγωγού ως ποσοστό επί της συνολικής παροχетеυτικότητας. Παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1
R_USAGE_COEFF	N	-	Συντελεστής χρήσης ανάστροφης ροής αγωγού σαν ποσοστό επί της συνολικής παροχетеυτικότητας. Παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1. Η μεταβλητή αυτή έχει χρησιμότητα μόνο σε περίπτωση όπου DIRECTION=bidirectional

Αγωγός με αμφίδρομη ροή πρέπει να συνδέεται υποχρεωτικά με ένα αντλιοστάσιο, δηλ. με μια μονάδα ενεργειακής μετατροπής του τύπου OPERATION=rump ή OPERATION=multiple (βλ. κεφ. 3.2.2.7).

Ο κόμβος NODE_UP αντιστοιχεί στον ανάντη και ο NODE_DOWN στον κατάντη κόμβο σύμφωνα με την επιθυμητή ροή στον αγωγό και ανεξάρτητα από το εάν αυτή επιτυγχάνεται με τη βοήθεια αντλιοστασίου. Σε περίπτωση που ο αγωγός λειτουργεί αμφίδρομα, οι κόμβοι ανάντη και κατάντη ορίζονται σύμφωνα με τη φυσική ροή.

3.2.2.4 Περιορισμοί στη χρήση αγωγών

Ο πίνακας περιλαμβάνει όλους τους περιορισμούς στη χρήση επιλεγμένων αγωγών κατά την προσομοίωση ροής.

Πίν. 6: Πίνακας περιορισμών στη χρήση αγωγών

Restrict			
Όνομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
PIPE	A[20]	-	Όνομασία αγωγού στον οποίο αναφέρεται ο περιορισμός
USER	A[1]	-	Η παράμετρος καθορίζει τη χρήση του αγωγού στην κανονική φορά ροής για την εξυπηρέτηση των στόχων που έθεσε ο χρήστης (πρώτη φάση λειτουργικής προσομοίωσης) Y Η χρήση του αγωγού σε αυτήν τη φάση απαγορεύεται N Δεν υφίσταται περιορισμός σε αυτήν τη φάση
PAR_RULE	A[1]	-	Η παράμετρος καθορίζει τη χρήση του αγωγού στην κανονική φορά ροής για την εξυπηρέτηση των στόχων παραμετρικού κανόνα λειτουργίας (δεύτερη φάση λειτουργικής προσομοίωσης) Y Η χρήση του αγωγού σε αυτήν τη φάση απαγορεύεται N Δεν υφίσταται περιορισμός σε αυτήν τη φάση
OVERFLOW	A[1]	-	Η παράμετρος καθορίζει τη χρήση του αγωγού στην κανονική φορά ροής για την αποφυγή υπερχειλίσεων (τρίτη φάση λειτουργικής προσομοίωσης) Y Η χρήση του αγωγού σε αυτήν τη φάση απαγορεύεται N Δεν υφίσταται περιορισμός σε αυτήν τη φάση
R_USER	A[1]	-	Η παράμετρος καθορίζει τη χρήση του αγωγού στην ανάστροφη φορά ροής για την εξυπηρέτηση των στόχων που έθεσε ο χρήστης (πρώτη φάση λειτουργικής προσομοίωσης) Y Η χρήση του αγωγού σε αυτήν τη φάση απαγορεύεται N Δεν υφίσταται περιορισμός σε αυτήν τη φάση
R_PAR_RULE	A[1]	-	Η παράμετρος καθορίζει τη χρήση του αγωγού στην ανάστροφη φορά ροής για την εξυπηρέτηση των στόχων παραμετρικού κανόνα λειτουργίας (δεύτερη φάση λειτουργικής προσομοίωσης) Y Η χρήση του αγωγού σε αυτήν τη φάση απαγορεύεται N Δεν υφίσταται περιορισμός σε αυτήν τη φάση
R_OVERFLOW	A[1]	-	Η παράμετρος καθορίζει τη χρήση του αγωγού στην ανάστροφη φορά ροής για την αποφυγή υπερχειλίσεων (τρίτη φάση λειτουργικής προσομοίωσης) Y Η χρήση του αγωγού σε αυτήν τη φάση απαγορεύεται N Δεν υφίσταται περιορισμός σε αυτήν τη φάση

Σε αγωγούς του συστήματος που δεν συμπεριλαμβάνονται στον πίνακα δεν τίθεται ανάλογος περιορισμός στη χρήση τους.

3.2.2.5 Αντιστοιχίες ύψους πτώσης - παροχευευστικότητας

Η ονομασία του πίνακα ορίζεται από την ιδιότητα VAR_DISCHARGE CAPACITY του πίνακα pipe.

Πίν. 7: Πίνακας αντιστοιχιών ύψους πτώσης - παροχευευστικότητας

Ονομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
HEAD	N	m	Ύψος πτώσης
DISCHARGCA	N	hm ³ /Step	Παροχευευστικότητα αγωγού

Ο πίνακας αυτός συνδέει την παροχευευστικότητα ενός αγωγού με τη διαφορά στάθμης νερού στα σημεία υδροληψίας και εξαγωγής. Με δεδομένο το ύψος πτώσης στην αρχή του χρονικού βήματος και με τις καμπύλες ύψους πτώσης - παροχής που δίνονται από αυτόν τον πίνακα είναι δυνατός ο υπολογισμός του μέγιστου όγκου που μπορεί να μεταφερθεί από τον αγωγό στο τρέχον χρονικό βήμα.

Οι πίνακες με τις παραπάνω αντιστοιχίες αναφέρονται αποκλειστικά σε αγωγούς των οποίων ο ανάντη κόμβος είναι ταμειυτήρας.

3.2.2.6 Στόχος

Πίν. 8: Πίνακας στόχων

Target			
Ονομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
QUERY	A[1]	-	<p>Το πεδίο μπορεί να λάβει τις εξής δύο τιμές:</p> <p>Y: Η πιθανότητα αστοχίας ή η τιμή του στόχου αναζητείται και αποτελεί αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίησης</p> <p>N: Η μέγιστη πιθανότητα αστοχίας του στόχου αυτού είναι δεδομένη (βλ. PROBABILITY) και ο στόχος λειτουργεί περιοριστικά στον αριθμό των λύσεων</p> <p>Ερώτημα μπορεί να αποτελεί μόνο ένας από όλους τους στόχους και υποδεικνύεται με τον χαρακτήρα Y σε αυτό το πεδίο.</p>

Target (συνέχεια)			
Ονομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης.	Περιγραφή
ACTIVE	A[1]	-	Το πεδίο μπορεί να λάβει τις εξής δύο τιμές: Y: Ο στόχος είναι ενεργός N: Ο στόχος είναι ανενεργός
TYPE	A[20]	-	Το πεδίο δίνει τον τύπο του στόχου και μπορεί να λάβει τις εξής τιμές: cons: Στόχος κατανάλωσης νερού minflow, enflow: Στόχος ελάχιστης μεταφοράς νερού από τον ανάντη προς τον κατόντη αγωγό powergen: Στόχος παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας minvol: Στόχος κατώτατου όγκου ταμιευτήρα maxvol: Στόχος ανώτατου όγκου ταμιευτήρα
REFERENCE	A[20]	-	Το πεδίο δίνει την ονομασία του αντικειμένου στο οποίο αναφέρεται ο στόχος. Ανάλογα με την τιμή του πεδίου TYPE, το πεδίο REFERENCE δίνει το όνομα <ul style="list-style-type: none"> • ενός κόμβου, εάν ο στόχος είναι του τύπου cons, maxlevel, ή minlevel • ενός αγωγού, εάν ο στόχος είναι του τύπου minflow, ή enflow • ενός στροβίλου, εάν ο στόχος είναι του τύπου powergen
FAILURE_PROBABILITY	N	-	Μέγιστη τιμή αστοχίας στόχου-περιορισμού όπου QUERY=N. Το πεδίο παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1
PART	N	-	Μέρος του συνολικού στόχου που πρέπει να ικανοποιηθεί. Το πεδίο παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1
CHANGEVALUE	A[15]	-	Το πεδίο ορίζει εάν και με ποιο τρόπο μεταβάλλεται ο στόχος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σε σχέση με την αρχική τιμή. Οι τιμές που μπορεί να λάβει το πεδίο είναι οι εξής: no: καμία μεταβολή της τιμής του στόχου linear: γραμμική μεταβολή $D_y^t = D_y^1 + (t-1) D_c$ exponential: εκθετική μεταβολή $D_y^t = D_y^1 (1 + d_c)^{t-1}$ όπου D_y^1 είναι η τιμή ζήτησης για κάθε έτος προσομοίωσης και D_c η ετήσια αύξηση θεωρούμενη σταθερή και d_c η ποσοστιαία ετήσια αύξηση θεωρούμενη σταθερή
INCRCOEFF	N	-	Συντελεστής γραμμικής ή εκθετικής μεταβολής D_c (βλ. CHANGEVALUE)

Η προτεραιότητα των στόχων δίνεται με τη σειρά κατάταξης στον πίνακα

3.2.2.6.1 Χρονοσειρές στόχων

Ο πίνακας περιλαμβάνει τις τιμές των στόχων για κάθε χρονικό βήμα.

Πίν. 9: Πίνακας χρονοσειρών στόχων

TargetData			
Όνομασία	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
TARGETKEY (*)	A[50]	-	Σύνθετη ονομασία χρονοσειράς
STEP1	N	hm ³ /Step GWh m	Τιμή στόχου στο 1 ^ο χρονικό βήμα. Η μονάδα μέτρησης της χρονοσειράς εξαρτάται από τον τύπο του στόχου: <ul style="list-style-type: none"> • Για τους τύπους cons, minflow και envflow είναι hm³ όγκου νερού • Για τον τύπο powergen είναι ενέργεια σε GWh • Για τους τύπους minlevel και maxlevel μέτρα
STEP2
.....

3.2.2.7 Μονάδα Ενεργειακής Μετατροπής

Ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει όλες τις μονάδες ενεργειακής μετατροπής είτε αυτές λειτουργούν σαν αντλιοστάσια, είτε σαν μονάδες παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης περιλαμβάνει και τις μονάδες που λειτουργούν μεταφέροντας νερό αμφίδρομα πότε παράγοντας και πότε καταναλώνοντας ενέργεια (βλ. πεδίο OPERATION). Σε περίπτωση που ο μεταφερόμενος όγκος εξαρτάται από το ύψος πτώσης οι αντιστοιχίες τιμών δίνονται από πρόσθετο πίνακα.

Πίν. 10: Πίνακας Μονάδων Ενεργειακής Μετατροπής

ETrans			
Όνομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
NAME (*)	A[20]	-	Όνομασία μονάδας ενεργειακής μετατροπής
ACTIVE	A[1]	-	Το πεδίο μπορεί να λάβει τις εξής δύο τιμές: Y: Ο στόχος είναι ενεργός N: Ο στόχος είναι ανενεργός
PIPE	A[20]	-	Αγωγός με τον οποίο συνδέεται η μονάδα
OPERATION	A[10]	-	Το πεδίο μπορεί να λάβει τις εξής τιμές: turbine: Η μονάδα λειτουργεί παράγοντας ενέργεια και μεταφέροντας νερό από ανάντη προς κατάντη pump: Η μονάδα λειτουργεί ως αντλία καταναλώνοντας ενέργεια και μεταφέροντας νερό από κατάντη προς ανάντη multiple: Η μονάδα μπορεί να λειτουργεί αμφίδρομα Οι χαρακτηριστικές καμπύλες μονάδων μεταβλητής παροχής της κανονικής και ανάστροφης λειτουργίας δίνονται από τον πίνακα του πεδίου FILENAME
TYPE	A[10]	-	Το πεδίο μπορεί να λάβει τις εξής δύο τιμές: constant: Η μονάδα λειτουργεί με σταθερές τιμές παροχής νερού και παραγωγής ή κατανάλωσης ενέργειας (βλ. πεδία C_DISCH, C_ENERGY, R_C_DISCH, R_C_ENERGY) variable: Η μονάδα λειτουργεί με μεταβλητές τιμές παροχής νερού και παραγωγής ή κατανάλωσης ενέργειας (βλ. πεδίο FILENAME)
INSTCAPACI	N	MW	Εγκατεστημένη ισχύς
UNITS	N	-	Αριθμός στροβίλων στη μονάδα ενεργειακής μετατροπής
FILENAME	A[20]	-	Όνομασία πίνακα με αντιστοιχίες στάθμης - ειδικής ενέργειας - παροχής
C_DISCH	N	m ³ /s	Σταθερή παροχή νερού μονάδας που λειτουργεί παράγοντας ενέργεια (βλ. πεδία TYPE και OPERATION)
C_ENERGY	N	GWh/hm ³	Παραγωγή ενέργειας ανά μονάδα μεταφερόμενου όγκου (βλ. πεδία TYPE και OPERATION)
P_C_DISCH	N	m ³ /s	Σταθερή παροχή νερού μονάδας που λειτουργεί σαν αντλιοστάσιο (βλ. πεδία TYPE και OPERATION)
P_C_ENERGY	N	GWh/hm ³	Απόλυτη τιμή ενέργειας που καταναλώνεται από αντλιοστάσιο ανά μονάδα μεταφερόμενου όγκου (βλ. πεδία TYPE και OPERATION)
PUMP_TARIFF	A[5]	-	Η διατίμηση της ενέργειας που καταναλώνεται από το αντλιοστάσιο. Η τιμές που παίρνει η παράμετρος είναι DAY διατίμηση ημερήσιας λειτουργίας NIGHT μειωμένη διατίμηση νυχτερινής λειτουργίας

3.2.2.8 Αντιστοιχίες ύψους πτώσης - ειδικής ενέργειας - παροχής

Η ονομασία του πίνακα δίνεται από την ιδιότητα FILENAME του πίνακα μονάδας ενεργειακής μετατροπής.

Πίν. 11: Πίνακας αντιστοιχιών ύψους πτώσης - ειδικής ενέργειας - παροχής

Ονομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
HEAD	N	m	Ύψος πτώσης ή ύψος άντλησης, ανάλογα με τη λειτουργία της μονάδας. Η τιμή της παραμέτρου είναι πάντοτε θετική
PSI	N	GWh/hm ⁴	Ειδική ενέργεια (ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα ύψους πτώσης) κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
FLOW	N	m ³ /s	Παροχή νερού κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
PSI_PUMP	N	GWh/hm ⁴	Ειδική ενέργεια (ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα ύψους πτώσης) κατά την λειτουργία της μονάδας ως αντλία
FLOW_PUMP	N	m ³ /s	Παροχή νερού κατά την λειτουργία της μονάδας ως αντλία

3.2.2.9 Χάρτης

Ο πίνακας περιλαμβάνει τους χάρτες με τις αναγκαίες πληροφορίες για τη χρησιμοποίησή τους.

Πίν. 12: Πίνακας χαρτών

Map			
Ονομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
NAME (*)	A[20]	-	Ονομασία αρχείου χάρτη
X_TOPLEFT	A[20]	-	Γεωγραφική τετμημένη σύμφωνα με το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87) της άνω αριστερά γωνίας του χάρτη
Y_TOPLEFT	A[20]	-	Γεωγραφική τεταγμένη σύμφωνα με το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87) της άνω αριστερά γωνίας του χάρτη
X_BOTTOMLEFT	A[20]	-	Γεωγραφική τετμημένη σύμφωνα με το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87) της κάτω δεξιά γωνίας του χάρτη
Y_BOTTOMLEFT	A[20]	-	Γεωγραφική τεταγμένη σύμφωνα με το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87) της κάτω δεξιά γωνίας του χάρτη

3.2.2.10 Κατάλογος χρονοσειρών βροχής - απορροής - εξάτμισης ταμιευτήρων

Πίν. 13: Πίνακας καταλόγου χρονοσειρών

TimeSer			
Όνομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
NR (*)	A[20]	-	Κωδικός χρονοσειράς
NODE	A[20]	-	Όνομασία κόμβου στον οποίο αναφέρεται η χρονοσειρά
TYPE	A[1]		Ο τύπος της χρονοσειράς μπορεί να είναι: H: Χρονοσειρά με ιστορικές τιμές V: Συνθετική/φανταστική χρονοσειρά
FILENAME	A[20]		Όνομασία πίνακα που περιλαμβάνει τις τιμές της χρονοσειράς
SET	I		Αριθμός συνεχόμενων χρονικών περιόδων που σχηματίζουν μία ενότητα. Πρέπει να αποτελεί ακέραιο διαιρέτη του συνόλου χρονικών περιόδων
TEXT	A[255]		Επεξηγηματικό κείμενο

3.2.2.11 Χρονοσειρές βροχής - απορροής - εξάτμισης ταμιευτήρα

Η ονομασία του πίνακα δίνεται από την ιδιότητα IO του πίνακα Node καθώς και από την ιδιότητα FILENAME του πίνακα TimeSer. Ο πίνακας περιλαμβάνει τα ύψη βροχής, απορροής και εξάτμισης για όλα τα χρονικά βήματα όλων των εξεταζομένων χρονικών περιόδων.

Πίν. 14: Πίνακας χρονοσειρών

Όνομασία	Τύπος-Μέγεθος	Μονάδα μέτρησ.	Περιγραφή
PERIOD	N	-	Χρονική περίοδος π.χ. έτος
RAIN_1	N	mm	Ύψος βροχής στον ταμιευτήρα κατά το 1 ^ο χρονικό βήμα
INFL_1	N	mm	Ύψος απορροής στον ταμιευτήρα κατά το 1 ^ο χρονικό βήμα. Ανάγεται στην επιφάνεια της υπολεκάνης του ταμιευτήρα (βλ. SUBC_AREA)
EVAP_1	N	mm	Ύψος εξάτμισης από τον ταμιευτήρα κατά το 1 ^ο χρονικό βήμα
RAIN_2	N	mm	Ύψος βροχής στον ταμιευτήρα κατά το 2 ^ο χρονικό βήμα
.....

Ο τρόπος καταγραφής των τιμών είναι κοινός για όλες τις χρονοσειρές. Πληροφορίες που αναφέρονται στο είδος, τον τρόπο δημιουργίας των χρονοσειρών κ.ά. περιλαμβάνονται στον πίνακα TimeSer. Η καταχώρηση τιμών στα πεδία είναι προαιρετική. Η έλλειψη καταχώρησης στο πεδίο PERIOD δεν επηρεάζει την προσομοίωση, ενώ στα υπόλοιπα πεδία η τιμή σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται μηδενική.

3.2.3 Υλοποίηση της βάσης δεδομένων

Για την υλοποίηση κρίθηκε επαρκής η δημιουργία μιας τοπικής βάσης δεδομένων. Η μορφή του αρχείου που επιλέχθηκε τόσο για τη βάση δεδομένων του Υδρονομέα όσο και για την ευρύτερη βάση δεδομένων της Στερεάς Ελλάδας είναι MS-Access. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ένας ομοιογενής τρόπος πρόσβασης σε όλα τα δεδομένα με παράλληλα εύκολη και απλή δυνατότητα επισκόπησης, ανταλλαγής και τροποποίησης των δεδομένων με το ευρύτατα διαδεδομένο λογισμικό περιβάλλον MS-Access. Η πρόσβαση από το υπολογιστικό σύστημα πραγματοποιείται μέσω των κανόνων Open DataBase Connectivity (ODBC).

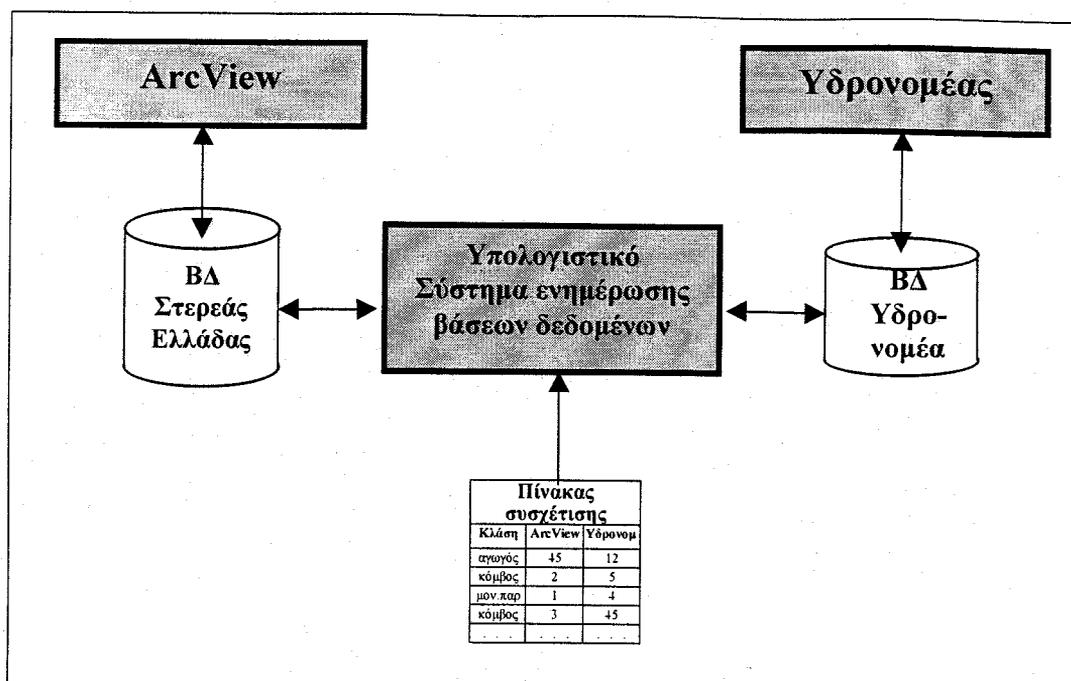
Η τροποποίηση των δεδομένων συνιστάται να γίνεται από τις προκαθορισμένες Φόρμες Οργάνωσης Δικτύου που φροντίζουν για την τήρηση της πληρότητας, της συνέπεια της βάσης, όπως και των ορίων στα πεδία τιμών των δεδομένων.

4 Σύνδεση σχεσιακών βάσεων δεδομένων Στερεάς Ελλάδας

Για τις ανάγκες του συστήματος προσομοίωσης και βελτιστοποίησης σχεδιάστηκε η βάση δεδομένων που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.1.6 και υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο MS-Access. Η πρόσβαση στη βάση αυτή με τη δυνατότητα τροποποίησης και επέκτασής της για λόγους προσαρμογής στην εκάστοτε εφαρμογή δίνεται μέσα από το ίδιο το λογισμικό πακέτο «Υδρονομέας». Είναι εύλογο ότι οι πληροφορίες που είναι καταχωρημένες σε αυτήν τη βάση δεδομένων να είναι και οι απαραίτητες για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης και μόνο. Περισσότερες πληροφορίες, χρήσιμες μεν σε άλλες εφαρμογές, άχρηστες δε στην συγκεκριμένη περίπτωση, έχουν παραλειφθεί χάριν ευελιξίας και εύκολης προσαρμοστικότητας. Πέραν τούτου στη βάση αυτή περιλαμβάνονται απλοποιήσεις και συμπυκνώσεις αντικειμένων του υδροσυστήματος προσαρμόζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το μοντέλο στις απαιτήσεις του υπολογιστικού συστήματος και περιορίζοντας την πολυπλοκότητα του μοντέλου.

Μια ευρύτερη βάση δεδομένων που περιλαμβάνει πέρα από τη λεπτομερειακή απεικόνιση του δικτύου και ιστορικά στοιχεία από μετρήσεις πάσης φύσεως όπως υδρομετεωρολογικά δεδομένα, δεδομένα άρδευσης κλπ., έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του ιδίου ερευνητικού έργου (τεύχος 38). Μια σειρά από αντίστοιχα δεδομένα είναι καταχωρημένα και στις δύο βάσεις και θα μπορούσαν να συσχετισθούν έτσι ώστε να ενημερώνεται η μία βάση από την άλλη. Η σύνδεση της Βάσης Δεδομένων της Στερεάς Ελλάδας (ΒΔΣΕ) με τη βάση προσομοίωσης του Υδρονομέα είναι για ευνόητους λόγους επιθυμητή και έχει για τούτο προβλεφθεί στις συμβατικές υποχρεώσεις του ερευνητικού έργου.

Η σύνδεση των δύο βάσεων με τη βοήθεια του Συστήματος Επιλεκτικής Ενημέρωσής παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχ. 10 και τα χαρακτηριστικά της περιγράφονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

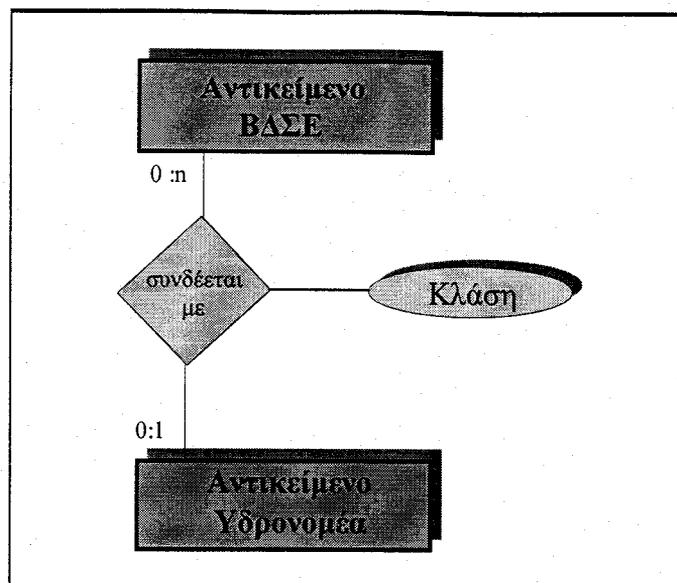


Σχ. 10: Σύνδεση Βάσεων δεδομένων της ΒΔΣΕ και του Υδρονομέα

4.1 Σχεδιασμός σύνδεσης βάσεων δεδομένων

Για την πραγματοποίηση της σύνδεσης της ΒΔΣΕ και του Υδρονομέα απαιτείται ο καθορισμός του τρόπου με τον οποίο πραγματοποιείται η συσχέτιση και η καταγραφή από τον χρήστη των συνδεδεμένων αντικειμένων. Τα προς συσχέτιση αντικείμενα πρέπει να υφίστανται και στις δύο βάσεις, δεδομένου ότι μια σειρά επιλογών στο μοντέλο προσομοίωσης, όπως π.χ. ο σχεδιασμός της τοπολογίας και οι κατάλληλες απλοποιήσεις, απαιτούν ειδικές γνώσεις του υπό εξέταση υδροσυστήματος και δεν είναι δυνατός ο απ' ευθείας σχεδιασμός από την ευρύτερη βάση της Στερεάς Ελλάδας.

Η σύνδεση αντικειμένων σχεδιάστηκε σύμφωνα με το διάγραμμα σχέσεων-οντοτήτων που απεικονίζεται στο Σχ. 11. Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό ένα αντικείμενο της ΒΔΣΕ μπορεί να συνδεθεί το ανώτατο με ένα αντικείμενο της βάσης του Υδρονομέα. Αντιστρόφως ένα αντικείμενο αυτής της βάσης μπορεί να συνδεθεί με περισσότερα αντικείμενα από τη ΒΔΣΕ που είναι και η λεπτομερέστερη από τις δύο. Η υλοποίηση γίνεται με τον πίνακα σύνδεσης αντικειμένων που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.1.1. Οι ιδιότητες των αντικειμένων που συσχετίζονται στις δύο βάσεις καθώς και το είδος συσχέτισης καταγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.1.2.



Σχ. 11: Διάγραμμα σχέσεων-οντοτήτων μεταξύ αντικειμένων της ΒΔΣΕ και της βάσης δεδομένων του Υδρονομέα

4.1.1 Πίνακας σύνδεσης αντικειμένων

Σε έναν πίνακα είναι καταχωρημένα τα αντικείμενα των δύο βάσεων που συνδέονται μεταξύ τους. Κάθε καταχώρηση περιλαμβάνει μια κλάση και δύο αντικείμενα της ίδιας κλάσης που ανήκουν το μεν στη ΒΔΣΕ και το δε στη βάση του Υδρονομέα. Οι ιδιότητες του πίνακα είναι οι ακόλουθες:

Πίν. 15: Πίνακας σύνδεσης αντικειμένων

Σύνδεση Αντικειμένων		
Ονομασία ιδιότητας	Τύπος-Μέγεθος	Περιγραφή
CLASS	A[20]	Κλάση συνδεδεμένων αντικειμένων. Οι τιμές που μπορεί να δεχθεί η ιδιότητα είναι οι ακόλουθες: node: Τα αντικείμενα είναι κόμβοι pipe: Τα αντικείμενα είναι αγωγοί etrans: Τα αντικείμενα είναι μονάδες ενεργειακής μετατροπής
GIS_ID	N	Κωδικός-κλειδί αντικειμένου της ΒΔΣΕ
YDRONOMEAS_ID	N	Κωδικός-κλειδί αντικειμένου του Υδρονομέα

Από πρακτικής απόψεως οι βάσεις ΒΔΣΕ και Υδρονομέα βρίσκονται σε δύο διαφορετικά αρχεία που θα διατηρούν από μόνα τους τη συνοχή των δεδομένων και θα μπορούν να

χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Ο πίνακας σύνδεσης αντικειμένων αποθηκεύεται στη βάση δεδομένων του Υδρονομέα

4.1.2 Αντιστοιχίες ιδιοτήτων

Τα αντικείμενα που επιλέγονται προς συσχέτιση ορίζονται με έναν πίνακα για κάθε εφαρμογή από το χρήστη. Αντίθετα οι ιδιότητες που μπορούν να συσχετιστούν καθώς και ο τρόπος συσχέτισης είναι για κάθε κλάση αντικειμένου δεδομένες. Οι ιδιότητες που εισάγονται από τη ΒΔΣΕ στη βάση του Υδρονομέα περιγράφονται στον παρακάτω κατάλογο.

Ιδιότητα	Πίνακες και Πεδία της ΒΔ του Υδρονομέα	Πίνακες και Πεδία της ΒΔΣΕ	Παρατηρήσεις
Κόμβος (Ταμιευτήρας)			
Έκταση λεκάνης απορροής	Node (SUBC_AREA)	tblWaterBasinData (Basinarea)	
Χωρητικότητα ταμιευτήρα	Node (MAXSTORAGE)	tblReservoirs (VolumeTotal)	
Νεκρός όγκος ταμιευτήρα	Node (MINVOLUME)	tblReservoirs (VolumeTotal, VolumeNet)	Η τιμή νεκρού όγκου υπολογίζεται από τις τιμές του συνολικού και ωφέλιμου όγκου
Αγωγός			
Υψόμετρο τροφοδοσίας	Pipe (INLET_LEVEL)	tblAqueductSubsections (StartInvertAltitude)	Χρησιμοποιείται το ύψος τροφοδοσίας του πρώτου αγωγού του πίνακα tblAqueductSubsections που συνδέεται με τον αγωγό του πίνακα Pipe
Υψόμετρο εξαγωγής	Pipe (OUTLET_LEVEL)	tblAqueductSubsections (EndInvertAltitude)	Χρησιμοποιείται το ύψος εξαγωγής του τελευταίου αγωγού του πίνακα tblAqueductSubsections που συνδέεται με τον αγωγό του πίνακα Pipe
Παροχευτικότητα υδραγωγείου με σταθερή τιμή παροχευτικότητας	Pipe (CONST_DISCHARGE_CAPACITY)	tblAqueductSubsections (DischargeCapacity)	Η τιμή της παροχευτικότητας ενός αγωγού στη βάση δεδομένων του Υδρονομέα καθορίζεται από την ελάχιστη παροχευτικότητα των αγωγών που τον απαρτίζουν στη ΒΔΣΕ

Μονάδα Ενεργειακής Μετατροπής			
Εγκατεστημένη ισχύς αντλιοστασίου	ETrans (INSTCAPACITY)	tblWaterSupplyPumping-Stations (Power)	Στη ΒΔ του Υδρονομέα ο πίνακας των MEM περιέχει τα
Εγκατεστημένη ισχύς αντλιοστασίου	ETrans (INSTCAPACITY)	tblHydropowerPlants (Power)	αντλιοστάσια και τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς

4.2 Επιλεκτική Ενημέρωση Βάσεων Δεδομένων

Καθώς οι βάσεις της ΒΔΣΕ και του Υδρονομέα μπορούν να υφίστανται και ανεξάρτητα η μία από την άλλη, είναι δυνατή η μεταβολή των τιμών των δεδομένων σε μία από αυτές χωρίς την ενημέρωση αντίστοιχων δεδομένων της άλλης. Η επιλογή αυτή αποδεικνύεται χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου επιβάλλεται η πραγματοποίηση διαδοχικών προσομοιώσεων με διαφορετικά πραγματικά ή φανταστικά σενάρια. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επέμβει κατ' ευθείαν στα δεδομένα της βάσης του Υδρονομέα μετατρέποντάς τα κατά βούληση χωρίς αυτό να χρειάζεται να αλλάζει τα δεδομένα της ΒΔΣΕ.

Άλλοτε πάλι μπορεί να φανεί σκόπιμο στο χρήστη του Υδρονομέα να επαναφέρει όλες ή μέρος των αρχικών τιμών από τη ΒΔΣΕ. Αυτή η δυνατότητα δίνεται με το σύστημα επιλεκτικής ενημέρωσης δεδομένων και συγκεκριμένα με τις εξής λειτουργίες:

- **Επιλεκτική ενημέρωση αντικειμένου:** Ενημέρωση όλων των ιδιοτήτων ενός αντικειμένου του υδροσυστήματος στη βάση δεδομένων του Υδρονομέα από τη ΒΔΣΕ.
- **Επιλεκτική ενημέρωση ιδιότητας:** Ενημέρωση μιας ιδιότητας ενός αντικειμένου του υδροσυστήματος στη βάση δεδομένων του Υδρονομέα από τη ΒΔΣΕ.

5 Εφαρμογή του Υδρονομέα στο υδροσύστημα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας

Σ' αυτό το κεφάλαιο του παρόντος τεύχους περιγράφεται η εφαρμογή του Υδρονομέα στο υδροσύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Το υδροσύστημα της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας αποτελεί αντικείμενο άλλης μελέτης που παρουσιάζεται στο τεύχος 39 του ίδιου ερευνητικού έργου. Τα περισσότερα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή της βάσης δεδομένων του Υδρονομέα αναφέρονται στην αναλυτική περιγραφή του υδροσυστήματος στο τεύχος 36. Παρακάτω περιγράφεται το μοντέλο του υδροσυστήματος, καθώς και οι προσαρμογές του υπολογιστικού συστήματος που έγιναν για τις ανάγκες της προσομοίωσης.

Η εφαρμογή που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό έχει καθαρά διερευνητικό χαρακτήρα και αποσκοπεί στον έλεγχο του συστήματος που αναπτύχθηκε. Δεν είναι κατάλληλη για εξαγωγή επιχειρησιακών συμπερασμάτων δεδομένου ότι δεν έχουν επαληθευτεί τα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί. Επιπλέον σημειώνεται ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα δοκιμαστική εφαρμογή του προγράμματος δεν είναι επικαιροποιημένα και προέρχονται από προγενέστερη φάση του ερευνητικού έργου.

5.1 Περιγραφή του μοντέλου του υδροσυστήματος

Το υδροσύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας περιλαμβάνει ένα σύστημα τεσσάρων ταμιευτήρων εκ των οποίων οι τρεις αποτελούν τεχνητούς ταμιευτήρες. Η λίμνη Υλίκη χρησιμοποιείται ως φυσικός ταμιευτήρας. Η συνολική ωφέλιμη χωρητικότητα του συστήματος είναι 1377 hm³ και κατανέμεται σύμφωνα με τον Πίν. 16.

Πίν. 16: Στοιχεία ταμιευτήρων υδροσυστήματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας

	Εύηνος	Μόρνος	Υλίκη	Μαραθώνας	Σύνολο
Χωρητικότητα [hm ³]	140	770	587	41	1538
Ωφέλιμη χωρητικότητα [hm ³]	113	643	587	34	1377

Σημειώνεται ότι προς το παρόν για τεχνικούς λόγους δεν χρησιμοποιείται η αποθηκευτική ικανότητα του ταμιευτήρα του Εύηνου. Η συνολική απορροή από την υπολεκάνη του Εύηνου διοχετεύεται άμεσα στον ταμιευτήρα του Μόρνου μέσω της σήραγγας Εύηνου-Μόρνου. Εν τούτοις, καθώς η σημερινή κατάσταση είναι μεταβατική, στα σενάρια της παρούσας μελέτης ο ταμιευτήρας του Εύηνου προσομοιώνεται μαζί με τον αποθηκευτικό του χώρο. Και οι τέσσερις ταμιευτήρες του συστήματος συμμετέχουν στον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας.

Ο ταμιευτήρας του Μόρνου και κυρίως η λίμνη Υλίκη παρουσιάζουν σημαντικές υπόγειες διαφυγές με εποχιακές διακυμάνσεις. Για την προσομοίωση των υπογείων διαφυγών

χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία από τη μελέτη των Ρώτη Σ., Ανυφάντη, Χ., (1992), επικαιροποιημένα με πρόσφατα στοιχεία.

Οι ταμιευτήρες του Εύηνου και του Μόρνου βρίσκονται σε σειρά όπως και η λίμνη Υλίκη με τον ταμιευτήρα του Μαραθώνα. Τα υδραγωγεία καταλήγουν στον κόμβο των Αθηνών ενώ ενδιάμεσα ενώνονται με το υδραγωγείο του Κιθαιρώνα. Το μοντέλο δεν περιλαμβάνει τη διανομή του νερού μετά τα διυλιστήρια. Η περιοχή των Αθηνών προσομοιάζεται σαν ένας τελικός κόμβος.

Όλοι οι αγωγοί του υδροσυστήματος λειτουργούν με σταθερή τιμή παροχетеυτικότητας, εκτός από τη σήραγγα Εύηνου-Μόρνου και είναι μονής κατεύθυνσης ροής εκτός από το ενωτικό υδραγωγείο του Κιθαιρώνα το οποίο διαθέτει τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής. Κατά την προσομοίωση δεν τίθεται κανένας περιορισμός στη χρήση των υδραγωγείων, τόσο στη χρονική διάρκεια χρήσης, όσο και στη χρήση των υδραγωγείων στις τρεις φάσεις της λειτουργικής προσομοίωσης. Εξαιρέση αποτελεί το ενωτικό υδραγωγείο του Κιθαιρώνα, η χρήση του οποίου στην ανάστροφη φορά ροής αποκλείεται από την πρώτη φάση της λειτουργικής προσομοίωσης.

Αντλιοστάσια χρησιμοποιούνται σε όλο το μήκος του υδραγωγείου Υλίκης-Μαραθώνα, καθώς η στάθμη της λίμνης Υλίκης βρίσκεται υψομετρικά χαμηλότερα από τη στάθμη του ταμιευτήρα του Μαραθώνα. Για την εκτίμηση της ενέργειας που καταναλώνεται από τα αντλιοστάσια χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία της μελέτης των Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλου., (1989). Στο υδραγωγείο Μόρνου-Κιθαιρώνα στο ύψος της Γκιώνας υπάρχει εγκατεστημένη μονάδα παραγωγής ενέργειας.

Στα σενάρια που λαμβάνουν υπόψη την πραγματική παροχетеυτικότητα του δικτύου, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από την ΕΥΔΑΠ και από τις μελέτες των *Κλεφτόγιαννη, (1998) και Κουτσογιάννη κ.ά. (1990)*. Στα υδραγωγεία που αποτελούνται από πολλά τμήματα με διαφορετική παροχетеυτικότητα το καθένα, η ελάχιστη τιμή ήταν καθοριστική για την εκτίμηση της συνολικής παροχетеυτικότητας του υδραγωγείου.

Όσον αφορά τα υδρολογικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν οι ιστορικές χρονοσειρές των τριών ταμιευτήρων Εύηνου, Μόρνου και Υλίκης που εκπονήθηκαν σε προηγούμενη φάση του έργου. Από αυτές δημιουργήθηκαν συνθετικές χρονοσειρές διάρκειας 5000 ετών με τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά. Οι συνθετικές χρονοσειρές χρησιμοποιήθηκαν τελικά σε όλες τις προσομοιώσεις. Στα σενάρια που προσομοιώθηκαν έγινε η παραδοχή ότι διατηρείται η ίδια τακτική απολήψεων από τους υπόγειους υδροφορείς όπως εκείνη της περιόδου μετρήσεων. Κατά συνέπεια δεν επιλέχθηκε η δυνατότητα διαφοροποίησης της τιμής της απορροής λόγω αυξημένων ή μειωμένων απολήψεων. Η απορροή στον ταμιευτήρα του Μαραθώνα δεν θεωρήθηκε αξιόλογη και δεν συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο.

Η διαχείριση νερού στο υδροσύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας εξυπηρετεί έναν βασικό στόχο, που είναι η ύδρευση της μείζονος περιοχής Αθηνών. Μετά την περίοδο ξηρασίας και την δραματική μείωση στην κατανάλωση νερού στα τέλη της δεκαετίας '80 και στις αρχές της δεκαετίας '90 που μείωσε κατά πολύ τη ζήτηση νερού, παρατηρείται τα τελευταία χρόνια εκ νέου μια αυξητική τάση (βλ. τεύχος 36). Σε όλα τα σενάρια που προσομοιώθηκαν χρησιμοποιήθηκε η ίδια κατανομή ζήτησης νερού στους μήνες με εκείνη του μέσου όρου των ετών 1989-1997. Ο συντελεστής ανισοκατανομής για κάθε μήνα δίνεται από τον Πίν. 17.

Πίν. 17: Συντελεστής ανισοκατανομής της ζήτησης για την ύδρευση της μείζονος περιοχής Αθηνών σύμφωνα με την ζήτηση των ετών 1989-1997 (Στοιχεία ΕΥΔΑΠ).

Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.	Οκτ.	Νοέμ.	Δεκ.
0.077	0.071	0.078	0.077	0.086	0.092	0.096	0.090	0.093	0.086	0.077	0.077

Από το ίδιο υδrosύστημα χρησιμοποιείται νερό και για την άρδευση της Κωπαΐδας. Από το σύστημα ταμιευτήρων και συγκεκριμένα από τη λίμνη Υλίκη αφαιρούνται μέχρι 50 hm³ ετησίως για αρδευτικούς σκοπούς, ενώ ένας ακαθόριστος όγκος από τα νερά του Βιωτικού Κηφισού και από τον υπόγειο υδροφορέα χρησιμοποιούνται για τις αρδευτικές ανάγκες. Η απόληψη από τη λίμνη Υλίκη που προσομοιάθηκε στα σενάρια, τα οποία συμπεριλαμβάνουν την άρδευση της Κωπαΐδας, ήταν σταθερή σε ετήσια βάση 50 hm³, κατανεμημένα σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα:

Πίν. 18: Απολήψεις από τη λίμνη Υλίκη για την άρδευση της Κωπαΐδας (σε hm³)

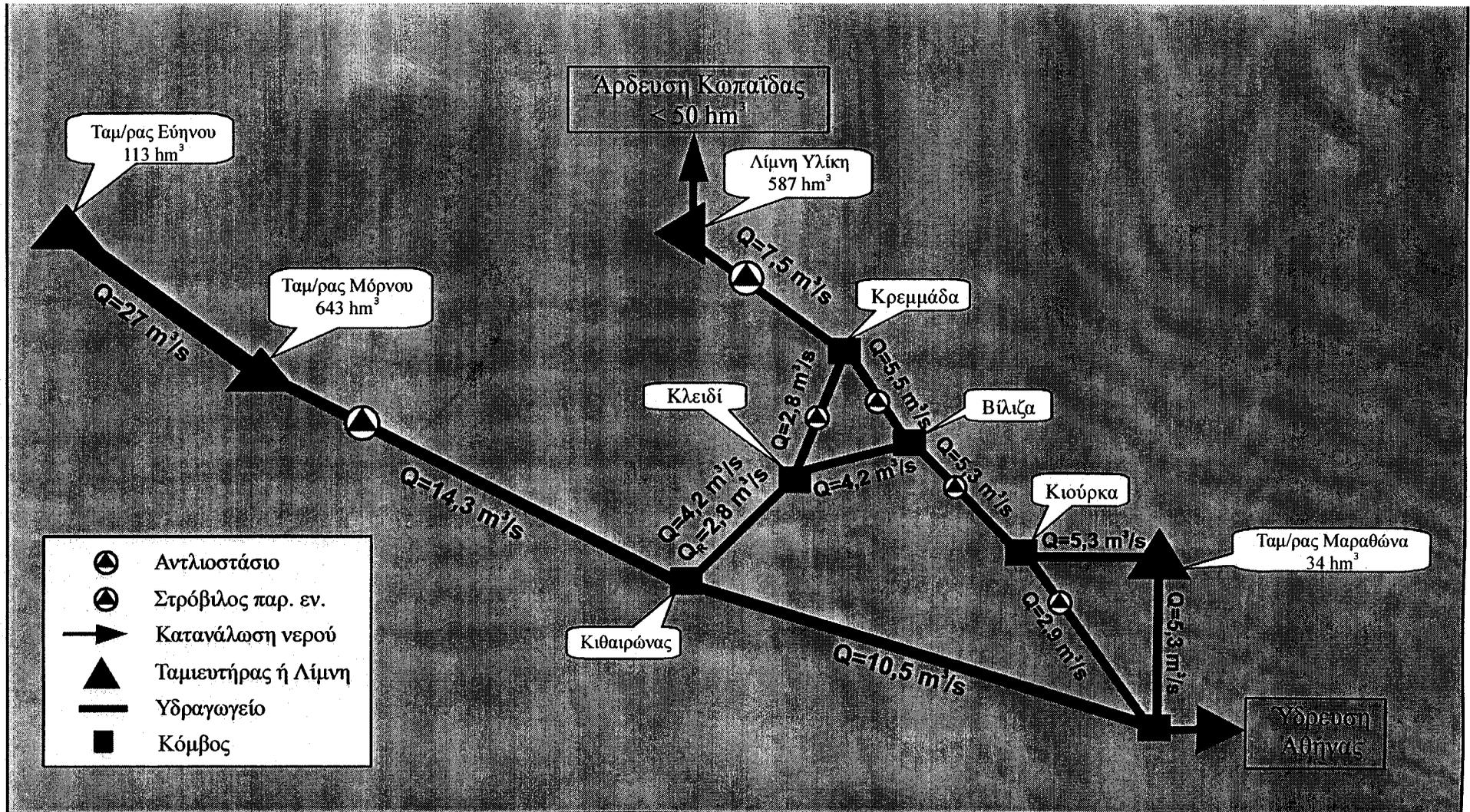
Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.	Οκτ.	Νοέμ.	Δεκ.
0	0	0	10	10	10	10	10	0	0	0	0

Άλλες χρήσεις νερού στο υδrosύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας δεν κρίθηκαν σημαντικές για να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης/βελτιστοποίησης.

Το χρονικό βήμα κατά την προσομοίωση όλων των σεναρίων είναι ο μήνας του έτους. Ο παραμετρικός κανόνας εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας μόνο τους συντελεστές b . Η διακριτοποίηση του καννάβου συντελεστών b έγινε με βήμα 1/10 για κάθε διάσταση. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε για τον κυρίως κάνναβο και την πρώτη υποδιαίρεση του, έτσι ώστε να λάβουμε ικανοποιητική ακρίβεια στις τιμές συντελεστών b .

Το μοντέλο του υδrosυστήματος δίνεται από το Σχ. 12. Σε αυτό αναγράφονται οι πραγματικές παροχετευτικότητες των υδραγωγείων όπως εκτιμώνται από τις μελέτες που επισκοπήθηκαν.

Το παράρτημα Γ περιλαμβάνει την βάση δεδομένων του Υδρονομέα προσαρμοσμένη στο υδrosύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, έτσι όπως περιγράφεται στο πρώτο σενάριο βελτιστοποίησης του κεφαλαίου 5.2.1. Οι διαφοροποιήσεις που έγιναν κατά την προσομοίωση των σεναρίων διευκρινίζονται στα αντίστοιχα κεφάλαια.



Σχ. 12: Σχηματική παράσταση του υδατικού συστήματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας

5.2 Βελτιστοποίηση της διαχείρισης υδατικών πόρων

5.2.1 Σενάριο 1 - Εκτίμηση του υδατικού δυναμικού του υδροσυστήματος

Κατά την πρώτη σειρά προσομοιώσεων αναζητήθηκε το δυναμικό του υδροσυστήματος σε υδατικούς πόρους ανεξάρτητα από την παροχетеυτικότητα των υδραγωγείων. Για τον λόγο αυτό ορίστηκε ως τιμή παροχетеυτικότητας σε όλους τους αγωγούς του συστήματος η εξωπραγματική τιμή των $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Αποτέλεσμα ήταν η παροχетеυτικότητα να μην αποτελεί πλέον περιοριστικό παράγοντα στην κάλυψη της ζήτησης. Επομένως η ζήτηση ήταν άμεσα εξαρτημένη από τα υδρολογικά δεδομένα, το σύστημα ταμιευτήρων και τον διαχειριστικό κανόνα λειτουργίας.

Στο λειτουργικό σύστημα τέθηκαν στόχοι προσομοίωσης με την ακόλουθη σειρά προτεραιότητας:

1. Κάλυψη της ζήτησης νερού για την ύδρευση στον κόμβο των Αθηνών. Η αρχική ετήσια ζήτηση ορίστηκε 700 hm^3 κατανεμημένη σε μήνες σύμφωνα με τον Πίν. 17. Δεν ορίστηκε ανώτατη αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας του στόχου καθότι η αστοχία αυτή ήταν αρχικά προς αναζήτηση.
2. Ο δεύτερος στόχος που τέθηκε ήταν η διατήρηση του αποθέματος στον ταμιευτήρα του Μαραθώνα πάνω από το όριο ασφαλείας των 30 hm^3 . Η αποτυχία κάλυψης αυτού του στόχου σε ένα από δέκα χρόνια ορίστηκε ως η ανώτατη αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας του στόχου.
3. Τέλος τέθηκε στόχος ετήσιας απόληψης από τη λίμνη Υλίκη 50 hm^3 για αρδευτικούς σκοπούς, σύμφωνα με την κατανομή του Πίν. 18. Όπως και στον δεύτερο στόχο έτσι και σε αυτόν ορίστηκε ως ανώτατη αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας η μη κάλυψη της ζήτησης σε μία στις δέκα χρονιές.

Σημειώνεται ότι η προτεραιότητα που δόθηκε στους στόχους επιτρέπει την απόληψη όγκου από τον ταμιευτήρα του Μαραθώνα για την κάλυψη της ζήτησης στην Αθήνα ακόμα και αν αυτό παραβιάζει το κατώτατο όριο αποθέματος του ταμιευτήρα του δεύτερου στόχου. Το υπολογιστικό σύστημα επιδιώκει κατά την λειτουργική προσομοίωση την αναπλήρωση τυχόν ελλείμματος από τους ανάντη ταμιευτήρες.

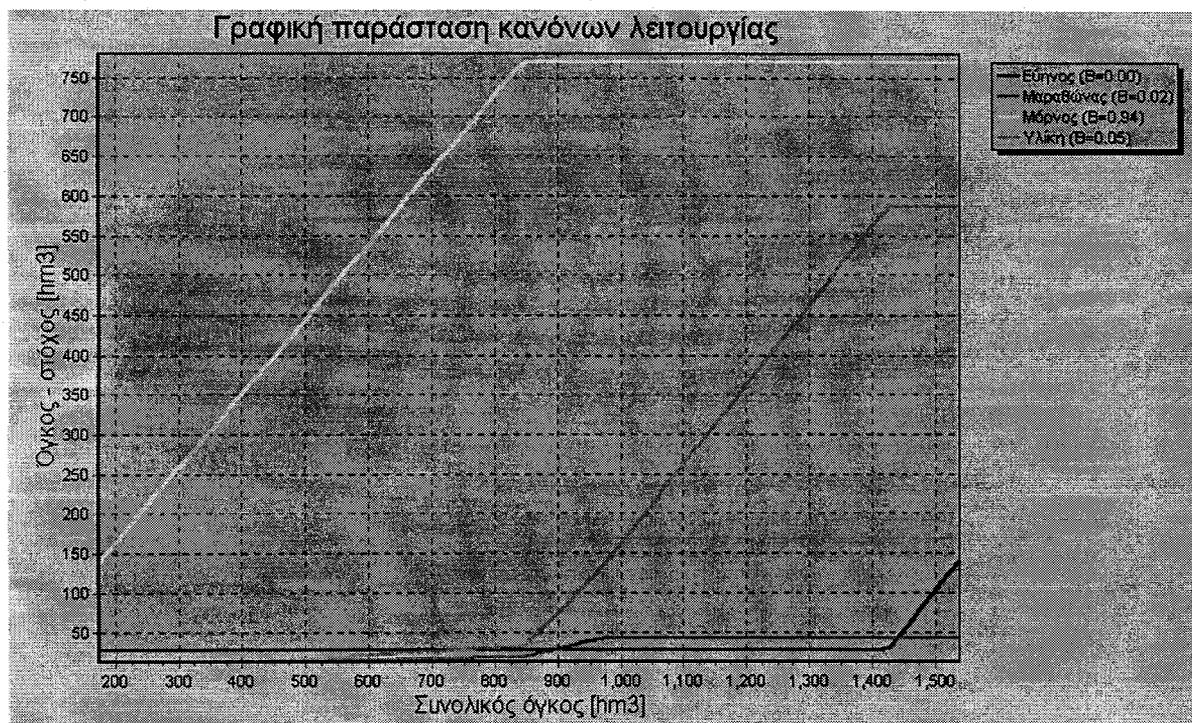
Μετά τον ορισμό του σεναρίου πραγματοποιήθηκε η βελτιστοποίηση με στόχο την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας της ζήτησης για την ύδρευση της μείζονος περιοχής Αθηνών. Τα αποτελέσματα για κάθε έναν από τους στόχους που τέθηκαν δίνονται από τον Πίν. 19. Οι συντελεστές b του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας που υπολογίστηκε δίνονται από τον Πίν. 20, ενώ το Σχ. 13 απεικονίζει τη γραφική παράσταση του κανόνα αυτού. Ο ετήσιος μέσος όρος του υδατικού ισοζυγίου των κόμβων του μοντέλου δίνεται από τον Πίν. 21.

Πίν. 19: Αστοχία στόχων κατά την εφαρμογή του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας

	Στόχος	Αστοχία χρ. περιόδου	Αστοχία χρ. βήματος	Αστοχία κάλυψης ζήτησης όγκου
1	Ετήσια κατανάλωση 700 hm ³ νερού στον κόμβο Αθηνών	0.2 %	0.03 %	0.016 %
2	Όριο ελάχιστου αποθέματος στον ταμιευτήρα του Μαραθώνα	0.3 %	0.04 %	—
3	Ετήσια κατανάλωση 50 hm ³ νερού από την λίμνη Υλίκη	4.2 %	0.7 %	1.2 %

Πίν. 20: Συντελεστές b του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας

Ταμιευτήρας	Τιμή συντελεστή b
Εύηνος	0.000
Μαραθώνας	0.016
Μόρνος	0.938
Υλίκη	0.046

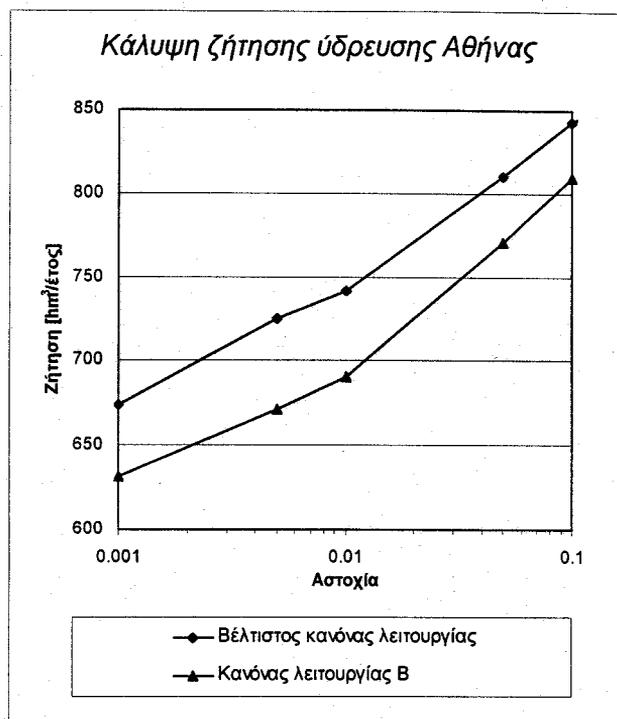


Σχ. 13: Γραφική παράσταση του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας

Πίν. 21: Υδατικό ισοζύγιο βέλτιστου κανόνα λειτουργίας (σε hm^3)

	Αθήνα	Βίλιστα	Εύηνος	Κιθαί- ρώνας	Κιούρκα	Κλειδί	Κρεμ- μάδα	Μαρα- θώνας	Μόρνος	Υλίκη	Σύνολο
Απορροή	0,00	0,00	321,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	310,24	346,63	977,89
Βροχόπτωση	0,00	0,00	3,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29,56	7,36	40,13
Εξάτμιση	0,00	0,00	-2,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-25,89	-23,86	-52,68
Υπόγειες διαφυγές	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-14,01	-73,91	-87,92
Εισροή από αγωγούς	756,81	448,13	-	550,44	447,92	379,34	206,58	111,21	306,98	-	3207,43
Απολήψεις	-699,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-49,41	-749,31
Εκροή	-	-447,93	-306,98	-550,44	-447,92	-379,34	-206,58	-111,21	-550,44	-206,58	-3207,43
Εξοδος από το σύστημα	-56,92	-0,2	-14,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-56,44	-0,24	-128,13
Χρήση αρχικού αποθέματος	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,02	0,02

Ακολούθως πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση με στόχο την αναζήτηση της μέγιστης τιμής ζήτησης σε νερό στην Αθήνα με ανώτατη πιθανότητα αστοχίας κάλυψης 1% χωρίς να υπολογίζεται η τιμή αστοχίας των υπόλοιπων στόχων. Η βελτιστοποίηση έδωσε τιμή 742 hm³. Πραγματοποιώντας διαδοχικές βελτιστοποιήσεις για διάφορες τιμές αστοχίας του στόχου ύδρευσης προκύπτουν ζεύγη τιμών ζήτησης-πιθανότητας αστοχίας κάλυψης, η γραφική απεικόνιση των οποίων δίνεται από το Σχ. 14.



Σχ. 14: Αντιστοιχίες ζήτησης-πιθανότητας αστοχίας κάλυψης ζήτησης για την ύδρευση Αθηνών

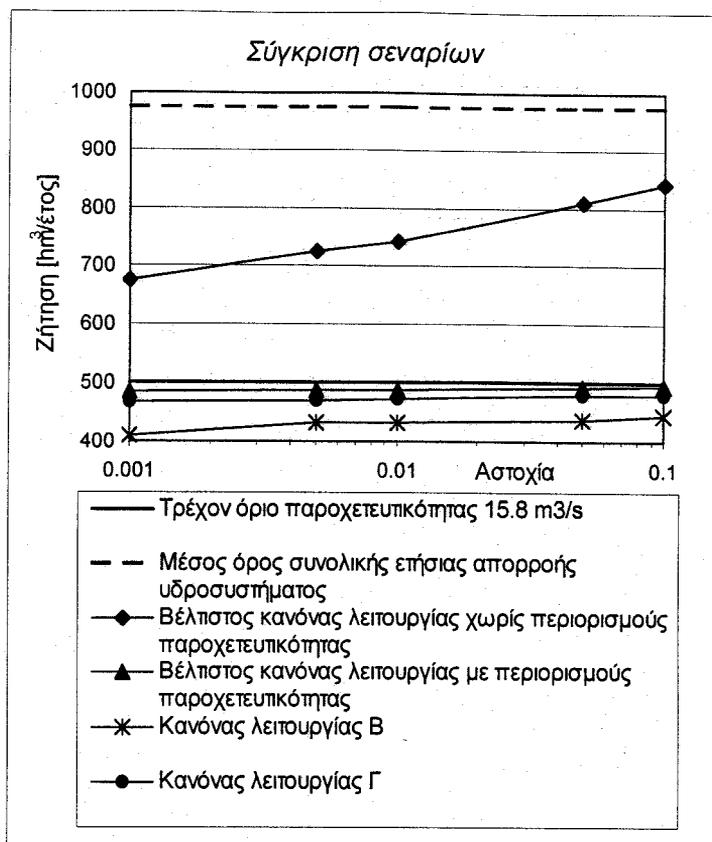
5.2.2 Σενάριο 2 - Κανονική λειτουργία του δικτύου υδροδότησης

Το δεύτερο σενάριο διαφοροποιείται σε σχέση με το πρώτο στο ότι ελήφθησαν υπόψη οι πραγματικές παροχετευτικότητες των αγωγών του συστήματος. Οι στόχοι προσομοίωσης, η τοπολογία του δικτύου και οι ιδιότητες των έργων αξιοποίησης παρέμειναν οι ίδιες. Οι παροχετευτικότητες των αγωγών, σύμφωνα με τις υπάρχουσες μελέτες (βλ. τεύχος 36), συνοψίζονται στον Πίν. 22.

Πίν. 22: Παροχετευτικότητες αγωγών

Αγωγός	Παροχετευτικότητα m^3/s
Εύηνος-Μόρνος	<27 (μεταβλ.)
Κιούρκα-Αθήνα	2,9
Κιούρκα-Μαραθώνας	5,3
Κιθαιρώνας-Αθήνα	10,5
Κιθαιρώνας-Κλειδί	4,2
Κλειδί-Βίλιζα	4,2
Κρεμμάδα-Κλειδί	2,8
Κρεμμάδα-Βίλιζα	5,5
Μαραθώνας-Αθήνα	5,2
Μόρνος-Κιθαιρώνας	14,3
Βίλιζα-Κιούρκα	5,3
Υλίκη-Κρεμμάδα	7,5

Κατά την προσομοίωση επιβεβαιώθηκε ότι η παροχετευτικότητα του υδραγωγείου Κιθαιρώνας-Αθήνα σε συνδυασμό με την παροχετευτικότητα του υδραγωγείου Υλίκης θέτουν ένα ανώτατο όριο παροχής για την κάλυψη της ζήτησης στην Αθήνα. Το απόθεμα του ταμιευτήρα του Μαραθώνα, ο οποίος δεν διαθέτει αξιόλογες απορροές, δεν αρκεί για να καλύψει τη ζήτηση πέρα από ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Η ζήτηση που μπορεί να καλυφθεί κατά την εφαρμογή του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας παραμένει πάντοτε κάτω από το όριο των $15,8 m^3/s$ που θέτει η συνολική παροχετευτικότητα των αγωγών. Το Σχ. 15 δίνει τα αποτελέσματα του δεύτερου σεναρίου συγκριτικά με εκείνα του πρώτου.



Σχ. 15: Αντιστοιχίες ζήτησης-πιθανότητας αστοχίας κάλυψης ζήτησης για την ύδρευση της μείζονος περιοχής Αθηνών κατά τη λειτουργία του δικτύου σύμφωνα με το πρώτο και το δεύτερο σενάριο.

5.2.3 Σενάριο 3 - Αποκλεισμός της λίμνης Υλίκης

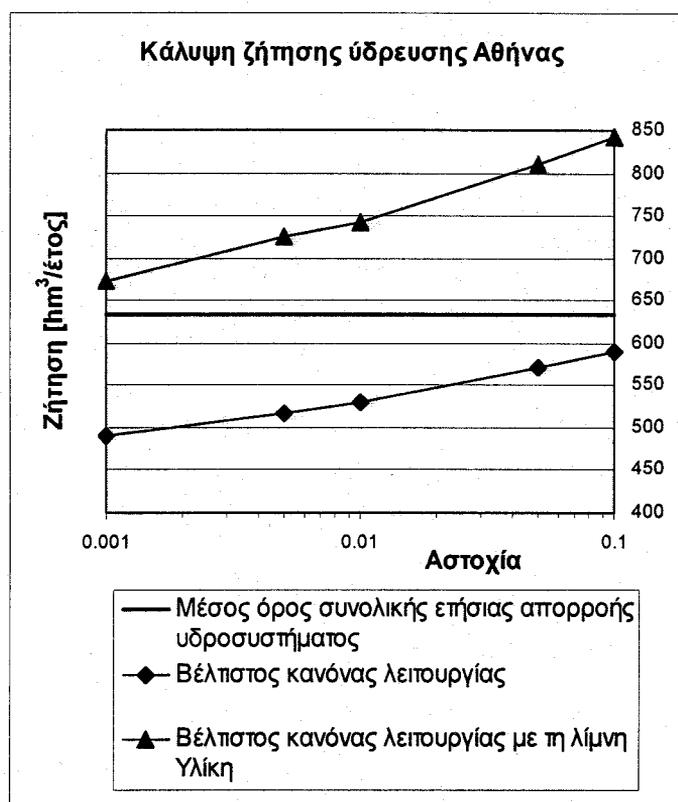
Η χρήση νερού από τη λίμνη Υλίκη για την κάλυψη της ζήτησης ύδρευσης στην Αθήνα συνδέεται με σημαντικό οικονομικό κόστος λόγω της μεγάλης υψομετρικής διαφοράς της λίμνης Υλίκης και του ταμιευτήρα του Μαραθώνα. Για τη μεταφορά του νερού λειτουργεί μια σειρά από αντλιοστάσια που είναι εγκατεστημένα κατά μήκος του υδραγωγείου Υλίκη-Μαραθώνας. Η κατανάλωση ενέργειας των αντλιοστασίων δίνεται από τον Πίν. 23.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι ο αποκλεισμός της λίμνης Υλίκης θα μείωνε σημαντικά το λειτουργικό κόστος του συστήματος υδροδότησης της μείζονος περιοχής Αθηνών. Το ερώτημα που τίθεται είναι σε ποιο βαθμό ο αποκλεισμός της λίμνης Υλίκης θα μείωνε και τη δυνατότητα κάλυψης της ζήτησης νερού στην Αθήνα.

Πίν. 23: Κατανάλωση ενέργειας αντλιοστασίων ανά μονάδα όγκου που μεταφέρεται. (Στοιχεία ΕΥΔΑΠ, τιμές 1989)

Αντλιοστάσιο	Αγωγός	Κατανάλωση Ενέργειας KWh/m ³
Υλίκης	Υλίκη-Κρεμμάδα	0.42
Ασωπού	Κρεμμάδα-Κλειδί	0.43
Βίλιζας	Κρεμμάδα-Βίλιζα	0.27
Βίλιζας Νο 3/4	Βίλιζα-Κιούρκα	0.27/0.04
Κιούρκων	Κιούρκα Αθήνα	0.51

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο υδροσυστήματος του πρώτου σεναρίου (χωρίς περιορισμούς παροχτετευτικότητας) από το οποίο αφαιρέθηκαν οι κόμβοι Υλίκη και Κρεμμάδα, οι αγωγοί Υλίκη-Κρεμμάδα, Κρεμμάδα-Κλειδί και Κρεμμάδα-Βίλιζα καθώς και τα αντλιοστάσια κατά μήκος των αγωγών αυτών. Τα συγκριτικά αποτελέσματα όσον αφορά τη σχέση κάλυψης ζήτησης-πιθανότητας αστοχίας, κατά την προσομοίωση με το βέλτιστο κανόνα διαχείρισης, δίνονται από τη γραφική παράσταση του Σχ. 16.



Σχ. 16: Αντιστοιχίες ζήτησης-πιθανότητας αστοχίας κάλυψης ζήτησης για την ύδρευση της μείζονος περιοχής Αθηνών κατά τη λειτουργία του δικτύου χωρίς τη χρήση του αποθέματος της λίμνης Υλίκης

6 Συμπεράσματα

Από τα πρώτα στάδια προσέγγισης του ερευνητικού στόχου επιλέχθηκε ο διαχωρισμός της ανάπτυξης ενός λογισμικού εργαλείου που θα έπρεπε να είναι ευρείας εφαρμογής και της βελτιστοποίησης της διαχείρισης του υδροσυστήματος της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Παρά το ότι ο διαχωρισμός αυτός προσέθεσε σε πολυπλοκότητα στις προδιαγραφές του λογισμικού και επέκτεινε την διάρκεια ανάπτυξής του, το αποτέλεσμα είναι τέτοιο ώστε η επιλογή αυτή να χαρακτηρίζεται επιτυχημένη. Όσον αφορά το υπολογιστικό σύστημα Υδρονομέας προέκυψαν τα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα:

- Ήδη από δοκιμαστικές εφαρμογές του Υδρονομέα τόσο στο υδροσύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας που υπολογίστηκε εδώ, όσο και σε άλλα υδροσυστήματα όπως αυτό της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας προέκυψε η καταλληλότητα του υπολογιστικού συστήματος για την επίλυση μίας ποικιλίας διαχειριστικών προβλημάτων. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι οι χρήσεις νερού στα υδροσυστήματα στα οποία εφαρμόστηκε ο Υδρονομέας διέφεραν ριζικά μεταξύ τους.
- Το υπολογιστικό σύστημα δεν θέτει κανενός είδους περιορισμό τόσο στο μέγεθος και στην τοπολογία του δικτύου που προσομοιώνεται όσο και στον αριθμό και το συνδυασμό των στόχων προσομοίωσης. Αυτό συνετέλεσε στο να αποδειχθεί ιδιαίτερα ευέλικτο και εύκολα προσαρμόσιμο στα διάφορα σενάρια που ακολουθήθηκαν.
- Αντίθετα από άλλα υπολογιστικά συστήματα κοινής χρήσης που προσομοιώνουν επιλεκτικά ορισμένες μόνο ιστορικές περιόδους, ο Υδρονομέας κάνει συνεχή προσομοίωση με βάση ιστορικές ή συνθετικές χρονοσειρές. Η λειτουργία αυτή της συνεχούς προσομοίωσης και ιδίως η χρήση συνθετικών χρονοσειρών αποδείχθηκε απαραίτητη κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των στόχων με ιδιαίτερα μικρή πιθανότητα αστοχίας όπως αυτός της ύδρευσης.
- Μια σειρά από λειτουργίες του Υδρονομέα βοήθησαν αποφασιστικά στην αναζήτηση του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας και στην εξαγωγή των κατάλληλων συμπερασμάτων. Σε αυτά συγκαταλέγονται η υλοποίηση παραμετρικών κανόνων βάσει των οποίων πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση, η δυναμική απεικόνιση της λειτουργίας της προσομοίωσης και ο τρόπος παρουσίασης των τελικών αποτελεσμάτων.
- Μειονέκτημα του συστήματος είναι το γεγονός ότι ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για τη βελτιστοποίηση είναι αρκετά μεγάλος, με αποτέλεσμα να καθίσταται δυσχερής στην παρούσα φάση του η επιχειρησιακή λειτουργία του. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη μέθοδο βελτιστοποίησης που ακολουθείται η οποία αντιστοιχεί σε εκθετικό χρόνο επίλυσης. Για αποφυγή του μειονεκτήματος αυτού έχει προγραμματιστεί, σε επόμενη έκδοσή του, η αλλαγή της μεθόδου βελτιστοποίησης καθώς και η διερεύνηση της δυνατότητας της τεχνολογίας παράλληλων επεξεργαστών.

Ο Υδρονομέας φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα ιδιαίτερα εύχρηστο και χρήσιμο λογισμικό εργαλείο στα χέρια του έμπειρου μελετητή. Ορισμένα πρώτα ενδεικτικά συμπεράσματα έχουν εξαχθεί από την εφαρμογή του στο υδροσύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Ειδικότερα, με πλήρη αξιοποίηση των υπάρχοντων τεσσάρων ταμιευτήρων και εάν αγνοήσει κανείς τον περιορισμό της παροχτευτικότητας των υδραγωγείων, η ετήσια δυνατότητα υδροδότησης της Αθήνας είναι θα ξεπερνούσε τα 700 hm^3 με ανώτατη πιθανότητα αστοχίας 1%. Στην πραγματικότητα βασικός παράγοντας περιορισμού της δυνατότητας υδροδότησης της πρωτεύουσας αποτελεί η περιορισμένη παροχτευτικότητα των υδραγωγείων Υλίκης-Μαραθώνα και Κιθαιρώνα-Αθήνα. Συνυπολογίζοντας την παροχτευτικότητα των αγωγών του δικτύου και με πλήρη αξιοποίηση των παρόντων ταμιευτήρων επιτυγχάνεται ετήσια μέγιστη δυνατότητα υδροδότησης χαμηλότερη των 500 hm^3 ετησίως.

Περαιτέρω έρευνα

Ο Υδρονομέας στην έκδοση 1.0 συνδέει εξελιγμένες τεχνολογίες στον τομέα της πληροφορικής με μία σειρά από πρωτότυπες θεωρητικές εργασίες που έχουν γίνει στον τομέα της προσομοίωσης και διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων. Το αποτέλεσμα που παρουσιάστηκε σε αυτό το τεύχος ανοίγει ένα ευρύ πεδίο σε παραπέρα έρευνα που μπορεί να συμπεριλαμβάνει τα ακόλουθα:

1. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης επιδέχεται βελτιώσεις, που θα απέφεραν σημαντική μείωση του χρόνου απόκρισης του συστήματος. Πολύ αποδοτική ως προς τον χρόνο απόκρισης κρίνεται και η προσαρμογή του Υδρονομέα στην τεχνολογία της παράλληλης και κατανεμημένης επεξεργασίας.
2. Η ιδέα της παραμετροποίησης που έχει εφαρμοστεί στον Υδρονομέα αποδείχθηκε ιδιαίτερα επιτυχής από πολλές απόψεις. Ωστόσο η εφαρμογή της έχει περιοριστεί στον χωρικό κανόνα λειτουργίας των ταμιευτήρων, ή και στην κατανομή των ενεργειακών στόχων, εφόσον υπάρχουν τέτοιοι. Εφόσον γίνει δυνατή η αισθητή μείωση του χρόνου απόκρισης, θα καταστεί δυνατό να γενικευτεί η παραμετροποίηση και σε άλλα στοιχεία του υδροσυστήματος, όπως στους κόμβους συμβολής αγωγών, με αναμενόμενο αποτέλεσμα να βελτιωθούν περαιτέρω τα τελικά αποτελέσματα του υπολογιστικού συστήματος.
3. Στα πλαίσια της επέκτασης του μαθηματικού μοντέλου θα μπορούσε να περιλαμβάνεται η εκπόνηση ενός πλήρους οικονομικού ισολογισμού, συμπεριλαμβανομένων όλων των παραγόντων κόστους και οφέλους που θα προέκυπταν από τη λειτουργία του συστήματος και την εκτέλεση της βελτιστοποίησης με οικονομικούς όρους και στόχους.
4. Ιδιαίτερα χρήσιμη θα ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας επιχειρησιακής λειτουργίας του Υδρονομέα. Προϋπόθεση γι' αυτή είναι εκτός από όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω και τα εξής επιπρόσθετα (μεταξύ άλλων):
 - Η τροποποίηση του στοχαστικού μοντέλου σε τρόπο ώστε να λειτουργεί με βάση τα τρέχοντα υδρολογικά δεδομένα εισόδου, σε συνδυασμό και με ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης των υδατικών πόρων.

- Η σύνδεση με μοντέλα υπόγειων νερών (για περιοχές που αυτά παρουσιάζουν ενδιαφέρον).
- Η ενσωμάτωση μέτρων ασφαλείας του συστήματος έναντι έκτακτων περιστατικών (π.χ. βλάβες), και η προσθήκη υπολογιστικών διαδικασιών για την υποβοήθηση της αντιμετώπισης των περιστατικών αυτών.
- Η ενσωμάτωση μοντέλου πρόγνωσης της εξέλιξης της ζήτησης (π.χ. υδρευτική, αρδευτική) με αντίστοιχη μετατροπή του τρόπου λειτουργίας του συστήματος σε τρόπο ώστε να μεταβάλλει τους κανόνες λειτουργίας σε διάφορους χρονικούς ορίζοντες.
- Η ενσωμάτωση ποιοτικών χαρακτηριστικών των υδατικών πόρων και των χρήσεων.

Αναγνωρίσεις

Πολύτιμη υπήρξε η συμβολή των φοιτητών Νίκου Ζερβού και Ανδρέα Ευστρατιάδη, οι οποίοι στα πλαίσια της διπλωματικής τους εργασίας ανέπτυξαν μέρη του Υδρονομέα.

Αναφορές

ΕΥΔΑΠ, Μητρώο Λειτουργίας και Εξοπλισμού Εγκαταστάσεων, ΕΥΔΑΠ, 1996.

Ευστρατιάδης, Α., Ζερβός, Ν., Βέλτιστη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων – Εφαρμογή στο σύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας, *Διπλωματική Εργασία* ΕΜΠ, Αθήνα, 1999.

Καλκάνη, Ε., Μαθήματα Υδροηλεκτρικών Έργων, ΕΜΠ Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλασσιών Έργων, 1991.

Κλεφτόγιαννης, Γ., VIMRO - Λογισμικό ελέγχου σεναρίων ανομοιόμορφης ροής υδραγωγείου Μόρνου, *Διπλωματική εργασία*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 1998.

Κουτσογιάννης, Δ., Ξανθόπουλος, Θ., Διερεύνηση προσφερόμενων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών, *Τεύχος 7, Τελική έκθεση Α' Μέρους, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων*, ΕΜΠ - Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλασσιών Έργων, 1989.

Κουτσογιάννης, Δ., Ξανθόπουλος Θ., και Αφτιάς, Ε., Διερεύνηση προσφερόμενων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών, *Ερευνητικό έργο, Τελική έκθεση*, ΥΠΕΧΩΔΕ - ΕΜΠ, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλασσιών Έργων, Αθήνα, 1990.

Ρώτη Σ., Ανυφαντή, Χ., Ισοζύγια ταμιευτήρων, Τεύχος 4 του ερευνητικού έργου *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, ΥΠΕΧΩΔΕ - ΕΜΠ - Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλασσίων Έργων, 1992.

Χριστοφίδης, Α., Μαμάσης, Ν., Επεξεργασία υδρομετεωρολογικών δεδομένων, Τεύχος 18 του ερευνητικού έργου *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, ΥΠΕΧΩΔΕ - ΕΜΠ - Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλασσίων Έργων, 1995.

Koutsoyiannis, D., Manetas, A., Simple disaggregation by accurate adjusting procedures, *Water Resources Research*, Vol. 32, No.7, pages 2105-2117, 1996.

Nalbantis, I., Koutsoyiannis, D., A parametric rule for planing and management of multiple-reservoir systems, *Water Resources Research*, Vol. 33, No.9, pages 2165-2177, 1997.

Sommerville, I., *Software Engineering*, Addison-Wesley Pub, 1993.

Παράρτημα Α: Οδηγίες χρήσης του Υδρονομέα

Οι παρούσες οδηγίες χρήσης του υπολογιστικού συστήματος Υδρονομέας περιγράφουν την έκδοση 1.0 (15/01/99). Οι οδηγίες αυτές δεν περιλαμβάνουν την περιγραφή του μοντέλου του Υδρονομέα ή του θεωρητικού του υπόβαθρου. Η χρήση του Υδρονομέα συνιστάται μόνο σε χρήστες που διαθέτουν γνώση του αντικειμένου μελέτης καθώς και του μοντέλου, έτσι ώστε να γίνεται σωστή εφαρμογή του υπολογιστικού συστήματος.

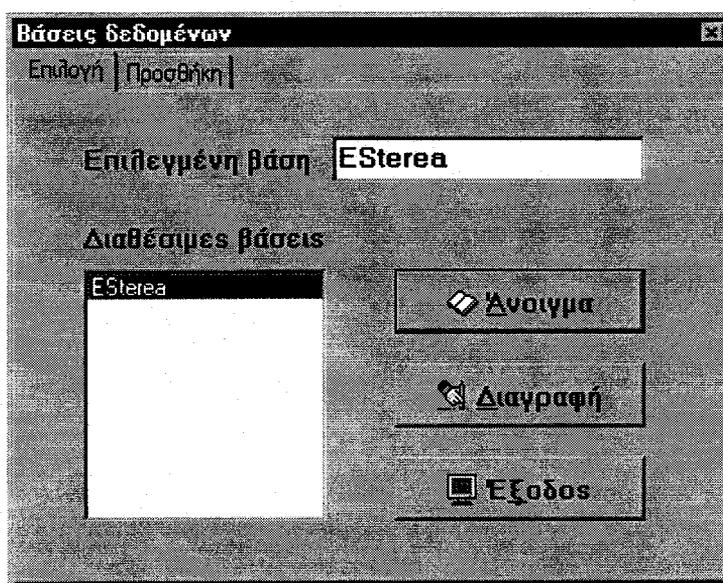
Στις παρακάτω οδηγίες χρήσης δεν περιλαμβάνεται το Υποσύστημα Στοχαστικής Προσομοίωσης που παρουσιάζεται στο παράρτημα Β.

Εισαγωγή των δεδομένων από τη βάση

Το πρόγραμμα Υδρονομέας παρουσιάζεται στο χρήστη με την Κύρια Φόρμα που απεικονίζεται στην Εικ. 9. Σε αυτήν την φάση δεν έχει γίνει ακόμα η εισαγωγή των δεδομένων του δικτύου και οι περισσότερες επιλογές είναι απενεργοποιημένες. Η εισαγωγή του δικτύου από τη Βάση Δεδομένων (ΒΔ) γίνεται με επιλογή από το μενού *Αρχείο/Εισαγωγή δικτύου*.

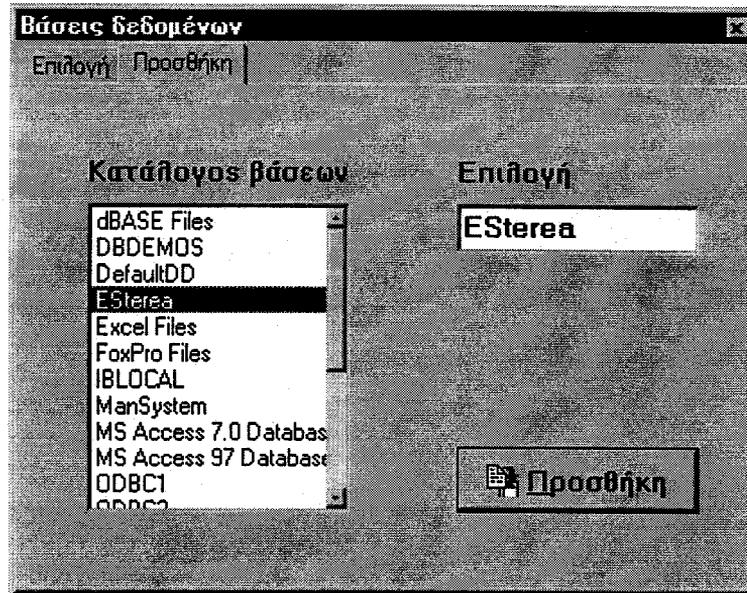
Φόρμα Επιλογής Βάσης Δεδομένων

Αφού γίνει η παραπάνω επιλογή και με τη φόρμα στην Εικ. 1 εμφανίζονται οι βάσεις δεδομένων που έχουν προεπιλεγεί και από τις οποίες μπορεί ο χρήστης να επιλέξει με το ποντίκι τη ΒΔ του υδροσυστήματός που τον ενδιαφέρει. Σημειώνεται ότι η ΒΔ που αναζητείται πρέπει να βρίσκεται τοπικά στον υπολογιστή, να έχει τη μορφή MS-Access και να περιέχει όλους τους πίνακες που είναι απαραίτητοι για την ορθή λειτουργία της προσομοίωσης και περιγράφονται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3.1.6.



Εικ. 1: Πρώτη σελίδα της Φόρμας Επιλογής Βάσης Δεδομένων

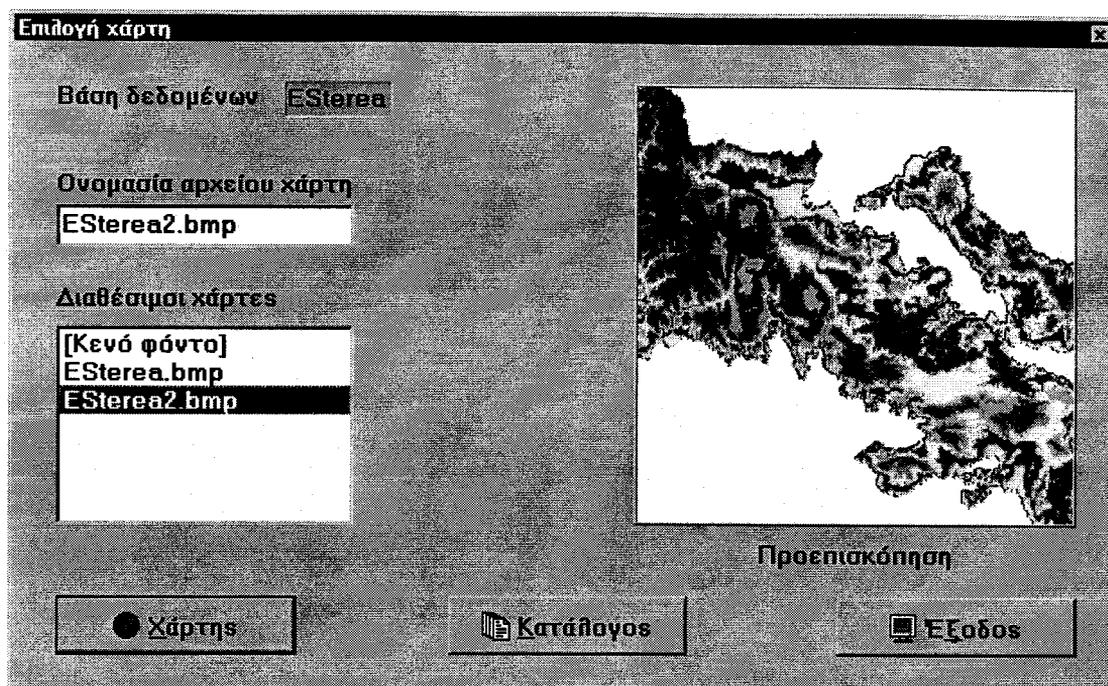
Πατώντας το κουμπί *Άνοιγμα* ανοίγετε τη ΒΔ και προχωράτε στην επιλογή του χάρτη της περιοχής. Εάν στη φόρμα των προεπιλεγμένων ΒΔ δεν βρείτε αυτήν που θέλετε να χρησιμοποιήσετε, τότε μπορείτε να την αναζητήσετε και να την προσθέσετε στις προεπιλεγμένες ΒΔ από τον κατάλογο των υπολοίπων ΒΔ που είναι γνωστές στο σύστημά σας, από τη σελίδα *Προσθήκη* της ίδιας φόρμας (βλ. Εικ. 2). Εάν τέλος η ΒΔ του υδροσυστήματός σας δεν συμπεριλαμβάνεται στον κατάλογο, αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι δεν έχει γνωστοποιηθεί στον υπολογιστή σας. Μπορείτε να γνωστοποιήσετε τη ΒΔ δηλώνοντας τη μορφή του (format), την ονομασία του αρχείου και τη διαδρομή αναζήτησης (path) με το εργαλείο 32 bit ODBC των MS-Windows.



Εικ. 2: Δεύτερη σελίδα της Φόρμας Επιλογής Βάσης Δεδομένων

Φόρμα Επιλογής Χάρτη

Με την φόρμα της Εικ. 3 επιλέγεται ένας από τους υπάρχοντες στη ΒΔ χάρτες της περιοχής που θα χρησιμοποιηθεί σαν φόντο κατά την απεικόνιση του μοντέλου του υδροσυστήματος και κατά την οπτικοποίηση της διαδικασίας της προσομοίωσης. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ή δεν επιλεγεί κάποιος χάρτης το μοντέλο του δικτύου θα παρουσιάζεται σε κενό φόντο, χωρίς αυτό να επηρεάζει κατά τα άλλα σε τίποτα τις υπόλοιπες λειτουργίες του Υδρονομέα.



Εικ. 3: Φόρμα Επιλογής Χάρτη

Με την επιλογή *Κατάλογος* μπορείτε να επισκοπήσετε και να τροποποιήσετε την ονομασία του αρχείου καθώς και τις συντεταγμένες στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ '87) της επάνω αριστερά και της κάτω δεξιά γωνίας του πλαισίου που ορίζει τον χάρτη.

Εάν επιλέξετε *Εξοδος* φορτώνεται τα στοιχεία του δικτύου από τη Βάση Δεδομένων με το χάρτη που επιλέξατε.

Με την επιλογή *Χάρτης* καλείτε το Υποσύστημα Οργάνωσης Δικτύου με το οποίο μπορείτε να τροποποιήσετε τη δομή του δικτύου και τις τιμές των δεδομένων πριν τις φορτώσετε από τη ΒΔ.

Οργάνωση δικτύου

Με το Υποσύστημα Οργάνωσης Δικτύου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαμορφώσει ένα πραγματικό ή φανταστικό σενάριο προσομοίωσης, τροποποιώντας τη δομή του δικτύου, ενεργοποιώντας και απενεργοποιώντας μέρη του και αλλάζοντας τις τιμές των ιδιοτήτων των έργων αξιοποίησης νερού κατά βούληση. Κάθε αλλαγή που γίνεται καταγράφεται αυτόματα και στη ΒΔ.

Φόρμα Οργάνωσης Δικτύου

Με το πάτημα του κουμπιού *Χάρτης* από τη Φόρμα Επιλογής Χάρτη ή με την επιλογή *Πληροφορίες δικτύου/Χάρτης και στοιχεία δικτύου* από την Κύρια Φόρμα, εμφανίζεται στην οθόνη η Φόρμα Οργάνωσης Δικτύου. Σε αυτήν απεικονίζεται ο τοπικός χάρτης που επιλέχθηκε μαζί με τα αντικείμενα που απαρτίζουν το δίκτυο στις θέσεις που καθορίζονται από τις συντεταγμένες που έχουν οριστεί (βλ. Εικ. 4). Το δίκτυο εμφανίζεται σε μια μορφή κατάλληλη για επισκόπηση και η φόρμα παρέχει στο χρήστη τις δυνατότητες για την τροποποίησή του.



Εικ. 4: Φόρμα Οργάνωσης Δικτύου

Από το μενού *Επιλογές* της Φόρμας Οργάνωσης Δικτύου ο χρήστης μπορεί να προχωρήσει σε ένα από τα ακόλουθα βήματα:

- *Επιλογή χάρτη*: Δυνατότητα επιλογής ενός νέου χάρτη του υδροσυστήματος
- *Εκτύπωση/Χάρτης*: Εκτύπωση του χάρτη μαζί με το δίκτυο στο βασικό εκτυπωτή
- *Εκτύπωση/Στοιχεία κόμβων* ή
- *Εκτύπωση/Στοιχεία αγωγών* ή
- *Εκτύπωση/Στοιχεία μονάδων ενέργειας*: Εκτύπωση των αντικειμένων του δικτύου με τις τιμές των ιδιοτήτων τους, όπως αυτές είναι αποθηκευμένες στη ΒΔ.
- *Εξόδος*: Τερματίζει τη λειτουργία του Υποσυστήματος Οργάνωσης Δικτύου

Από το μενού *Στοιχεία δικτύου* της Φόρμας Οργάνωσης Δικτύου μπορείτε να προσαρμόσετε τις τιμές των ιδιοτήτων των αντικειμένων και να ενεργοποιήσετε/απενεργοποιήσετε μέρη του δικτύου. Συγκεκριμένα δίνονται στο χρήστη οι ακόλουθες δυνατότητες:

- *Προσθήκη* ενός αντικειμένου του δικτύου
- *Διαγραφή* ενός αντικειμένου του δικτύου
- *Τροποποίηση* των ιδιοτήτων κάποιου αντικειμένου του δικτύου

Ένας άλλος τρόπος για να επιλέξετε ένα αντικείμενο του δικτύου, είναι να χρησιμοποιήσετε το ποντίκι, κάνοντας αριστερό κλικ επάνω στο αντικείμενο ή την ονομασία του αντικειμένου του οποίου τις ιδιότητες θέλετε να τροποποιήσετε.

Φόρμες τροποποίησης ιδιοτήτων

Με τις φόρμες που απεικονίζονται στην Εικ. 5 μέχρι και Εικ. 7 ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσαρμόσει τα στοιχεία των αντικειμένων του δικτύου σύμφωνα με τις απαιτήσεις του σεναρίου που θέλει να προσομοιάσει. Κάποια από τα στοιχεία που εμφανίζονται στη φόρμα αντικειμένου όπως οι χρονοσειρές βροχής, απορροής και εξάτμισης στους ταμιευτήρες ή οι αντιστοιχίες ύψους πτώσης-παροχτευτικότητας στους αγωγούς μεταβλητής παροχτευτικότητας, αφορούν επιπρόσθετους πίνακες με δεδομένα που μπορεί ο χρήστης να τα εμφανίσει και να τα τροποποιήσει.

Σε κάθε μία από τις φόρμες αντικειμένων απαιτείται το πάτημα του κουμπιού *Τροποποιήσεις* για να επιτραπεί η μετατροπή των τιμών. Κατόπιν τούτου οι αλλαγές που θα γίνουν μπορούν να αποθηκευτούν στη ΒΔ με το πάτημα του κουμπιού *Αποθήκευση* ή να ακυρωθούν στο σύνολό τους με το πάτημα του κουμπιού *Ακύρωση*.

Εικ. 5: Φόρμα Στοιχείων Κόμβου

Στοιχεία αγωγού

Όνομασία αγωγού: **Εύηνος-Μόρνος**

Φυσική ροή ποταμού παράλληλα στον αγωγό

Κόμβοι σύνδεσης

Ανάντη: **Εύηνος**

Κατόντη: **Μόρνος**

Διεύθυνση ροής

Μονόδρομη

Αμφίδρομη

Τύπος παροχευτικότητας

Σταθερή

Μεταβλητή

Παροχευτικότητα: **27** m³/sec

Καμπύλη ύψους πτώσης-παροχής: **HD_EvMo**

Υψόμετρα κόμβων

Τραποδοσία: **_____** m

Εξαγωγή: **455** m

Εξαγωγή στη στάθμη του κατόντη ταμειτήρα

Ημερήσια ποσοστά λειτουργίας

Ορθή ροή: **1**

Ανάστροφη ροή: **1**

Χάρτης

Τροποποιήσεις

Αποθήκευση

Ακύρωση

Στοιχεία βάσης δεδομένων Στερεάς Ελλάδας

Εικ. 6: Φόρμα Στοιχείων Αγωγού

Στοιχεία μονάδας μετατροπής ενέργειας

Όνομασία ΥΗΣ: **Μουρίκι**

Αγωγός σύνδεσης: **Υλίκη-Κρεμμάδα**

Λειτουργία μονάδας

Υδροστροβίλος

Αντλία

Αντλιοστροβίλος

Τύπος

Σταθερή παροχή και παραγωγή/κατανάλωση ενέργειας

Μεταβλητή παροχή και παραγωγή/κατανάλωση ενέργειας

Εγκατεστημένη ισχύς: **12.32** MW

Αριθμός εγκατεστημένων μονάδων: **1**

Καμπύλη ύψους πτώσης-ειδικής ενέργειας-παροχής: **_____**

Στοιχεία υδροστροβίλου

Παροχή: **_____** m³/sec

Παραγωγή ενέργειας: **_____** GWh/m³

Στοιχεία αντλίας

Παροχή: **30** m³/sec

Κατανάλωση ενέργειας: **0.42** GWh/m³

Χάρτης

Τροποποιήσεις

Αποθήκευση

Ακύρωση

Στοιχεία βάσης δεδομένων Στερεάς Ελλάδας

Εικ. 7: Φόρμα Στοιχείων Μονάδας Ενεργειακής Μετατροπής

Φόρμα Ενεργοποίησης Στοιχείων

Η Φόρμα Ενεργοποίησης Στοιχείων δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να προσομοιώσει ένα μέρος του δικτύου που βρίσκεται στη Βάση Δεδομένων απενεργοποιώντας προσωρινά κάποια από τα αντικείμενα της βάσης. Τα αντικείμενα που απενεργοποιούνται δεν πρέπει να είναι απαραίτητα συνεχόμενα μεταξύ τους και το ενεργό μέρος του δικτύου που τελικά θα προσομοιωθεί δεν πρέπει να σχηματίζει απαραίτητα ένα ενιαίο δίκτυο. Απενεργοποιώντας όμως κάποια από τα αντικείμενα του δικτύου μπορεί να προκαλέσει την αυτόματη απενεργοποίηση άλλων αντικειμένων που συνδέονται άμεσα με το πρώτο. Συγκεκριμένα αυτό αφορά τις ακόλουθες περιπτώσεις:

Με την απενεργοποίηση ενός αγωγού απενεργοποιούνται αυτόματα και όλες οι Μονάδες Ενεργειακής Μετατροπής που συνδέονται με τον αγωγό αυτόν

Με την απενεργοποίηση ενός κόμβου, απενεργοποιούνται αυτόματα και όλοι οι αγωγοί που ορίζονται από τον κόμβο αυτόν.

Σε περίπτωση που είναι καταχωρημένος στη ΒΔ κάποιος στόχος που συνδέεται με ένα αντικείμενο, η απενεργοποίησή του έχει ως συνέπεια την απενεργοποίηση και του στόχου.

Στην αριστερή πλευρά της Φόρμας Ενεργοποίησης Στοιχείων (βλ. Εικ. 8) αναγράφονται όλα τα αντικείμενα του δικτύου, ενώ στη δεξιά πλευρά μόνο τα ενεργά. Ο χρήστης μπορεί να μεταφέρει, μεμονωμένα ή συνολικά όλα τα αντικείμενα από τον έναν κατάλογο στον άλλο, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα κουμπιά της φόρμας.

Ορισμός ενεργών στοιχείων συστήματος

Κόμβοι

Κατάλογος	Ενεργοί
Αθήνα	Αθήνα
Βίλιζα	Βίλιζα
Εύηνος	Εύηνος
Κιθαιρώνας	Κιθαιρώνας
Κιούρκα	Κιούρκα
Κλειδί	Κλειδί
Κρεμμάδα	Κρεμμάδα
Μαραθώνας	Μαραθώνας
Μόρνος	Μόρνος

Αγωγοί

Κατάλογος	Ενεργοί
Βίλιζα-Κιούρκα	Βίλιζα-Κιούρκα
Εύηνος-Μόρνος	Εύηνος-Μόρνος
Κιθαιρώνας-Αθήνα	Κιθαιρώνας-Αθήνα
Κιθαιρώνας-Κλειδί	Κιθαιρώνας-Κλειδί
Κιούρκα-Αθήνα	Κιούρκα-Αθήνα
Κιούρκα-Μαραθώνας	Κιούρκα-Μαραθώνας
Κλειδί-Βίλιζα	Κλειδί-Βίλιζα
Κρεμμάδα-Βίλιζα	Κρεμμάδα-Βίλιζα
Κρεμμάδα-Κλειδί	Κρεμμάδα-Κλειδί

Μονάδες μετατροπής ενέργειας

Κατάλογος	Ενεργές
Ασωπός	Ασωπός
Ασωπός_Φ	Ασωπός_Φ
Βίλιζα1	Βίλιζα1
Βίλιζα2	Βίλιζα2
Γκιώνα	Γκιώνα
Κιούρκα	Κιούρκα
Μουρίκι	Μουρίκι

Επιστροφή

Εικ. 8: Φόρμα Ενεργοποίησης Στοιχείων

Κύρια Φόρμα

Αφού ολοκληρωθεί η εισαγωγή των δεδομένων από τη βάση, ο Υδρονομέας εμφανίζεται με την Κύρια Φόρμα της Εικ. 9. Στο επάνω δεξί μέρος της φόρμας παρουσιάζονται ορισμένα στατιστικά στοιχεία του δικτύου, ενώ από το μενού που εμφανίζεται στο επάνω μέρος της φόρμας ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μία από τις παρακάτω λειτουργίες:

Αρχείο

Οι επιλογές στην ενότητα αυτή αφορούν την επικοινωνία του Υδρονομέα με τη βάση δεδομένων και με άλλα προγράμματα καθώς και τον τερματισμό του Υδρονομέα.

- *Εισαγωγή δικτύου.* Κλείσιμο του παρόντος δικτύου και εισαγωγή ενός νέου από τη βάση
- *Επιλογή χάρτη.* Επιλογή ενός νέου χάρτη από τη βάση δεδομένων σε αντικατάσταση του παρόντος
- *Στοχαστική προσομοίωση.* Εκκίνηση του Υποσυστήματος Στοχαστικής Προσομοίωσης για τη δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών. Το υποσύστημα αυτό μπορεί να λειτουργήσει και ανεξάρτητα από τον Υδρονομέα. Στην παρούσα έκδοση η επιλογή αυτή έχει απενεργοποιηθεί και απαιτείται η αυτόνομη έναρξη του σχετικού προγράμματος.
- *Εξόδος.* Τερματισμός του Υδρονομέα

Πληροφορίες δικτύου

Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει επιλογές που βοηθούν το χρήστη να κατανοήσει καλύτερα το μοντέλο του δικτύου, να αναγνωρίσει τυχόν σφάλματα και να τα διορθώσει πριν ξεκινήσει τη διαδικασία της προσομοίωσης.

- *Χάρτης και στοιχεία δικτύου.* Εμφάνιση της Φόρμας Οργάνωσης Δικτύου, έτσι ώστε να τροποποιηθεί το δίκτυο σύμφωνα με το σενάριο που ακολουθείται
- *Δυναμικό σχήμα.* Εμφάνιση της Φόρμας Δυναμικού Σχήματος του δικτύου
- *Σχήμα του μοντέλου του υδροσυστήματος* εφ' όσον έχει καταχωρηθεί στη βάση δεδομένων του Υδρονομέα
- *Καμπύλες στάθμης-όγκου-επιφάνειας,* όπως εμφανίζονται στην Εικ. 10
- *Γενικές πληροφορίες συστήματος* που αφορούν σφάλματα και άλλες παρατηρήσεις για την δομή και τις ιδιότητες των αντικειμένων στο υδροσύστημα

Προσομοίωση

Οι επιλογές της ενότητας αυτής αφορούν τον έλεγχο της διαδικασίας προσομοίωσης και βελτιστοποίησης.

- *Στόχοι-περιορισμοί.* Εμφάνιση της Φόρμας Επιλογής Στόχων Προσομοίωσης
- *Επιλογές.* Εμφάνιση της Φόρμας Επιλογών Συστήματος
- *Βελτιστοποίηση.* Εκκίνηση της βελτιστοποίησης
- *Επιλεκτική προσομοίωση* Εμφάνιση της Φόρμας Επιλεκτικής Προσομοίωσης
- *Δυναμική απεικόνιση.* Εμφάνιση της Φόρμας Δυναμικής Απεικόνισης Προσομοίωσης

Αποτελέσματα

Οι επιλογές στην ενότητα αυτή δίνουν διάφορες μορφές αποτελεσμάτων της προσομοίωσης/βελτιστοποίησης

- *Πληροφορίες αστοχίας συστήματος.* Παραπέμπεται στη Φόρμα Αστοχίας Συστήματος.
- *Χρονική εξέλιξη αστοχίας.* (Η επιλογή αυτή είναι στην παρούσα έκδοση απενεργή)
- *Υδατικό ισοζύγιο.* Εμφάνιση της Φόρμας Ισοζυγίων/Οικονομικών Μεγεθών στη Σελίδα του Υδατικού Ισοζυγίου

- *Ενεργειακό ισοζύγιο.* Εμφάνιση της Φόρμας Ισοζυγίων/ Οικονομικών Μεγεθών στη Σελίδα του Ενεργειακού Ισοζυγίου
- *Οικονομικά μεγέθη.* Εμφάνιση της Φόρμας Ισοζυγίων/ Οικονομικών Μεγεθών στη Σελίδα του Οικονομικού Ισολογισμού
- *Κατανομή αστοχίας κανόνων λειτουργίας.* Σε περίπτωση που δεν έχει επιλεγεί η διακοπή της προσομοίωσης των μη βέλτιστων κανόνων λειτουργίας (βλ. επιλογές συστήματος), εμφανίζεται η φόρμα κατανομής της αστοχίας των κανόνων που προσομοιώθηκαν
- *Τιμές συντελεστών παραμετρικού κανόνα.* Εμφανίζεται η Φόρμα Επιλεκτικής Προσομοίωσης
- *Κανόνες λειτουργίας.* Εμφανίζεται η Φόρμα Γραφικής Παράστασης του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας
- *Προσομοιωμένοι όγκοι ταμειυτήρων.* Εμφανίζεται η Φόρμα Προσομοιωμένων Όγκων Ταμειυτήρων για τον βέλτιστο κανόνα λειτουργίας
- *Προσομοιωμένες ροές.* Εμφανίζεται η Φόρμα Προσομοιωμένων Ροών των αγωγών για τον βέλτιστο κανόνα λειτουργίας

Βοήθεια

Παρατίθενται χρήσιμες πληροφορίες για τον Υδρονομέα και οδηγίες χρήσεώς του.

- *Υπολογιστικό σύστημα.* Ενημερωτικές πληροφορίες για την έκδοση του Υδρονομέα
- *Οδηγίες για τη χρήση του Υδρονομέα*

Οι βασικότερες από τις παραπάνω λειτουργίες μπορούν για ευκολία να επιλεγούν και από τα κουμπιά που εμφανίζονται στο κάτω δεξί μέρος της φόρμας ή κάνοντας δεξιό κλικ με το ποντίκι του υπολογιστή επάνω σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας της Κύριας Φόρμας.

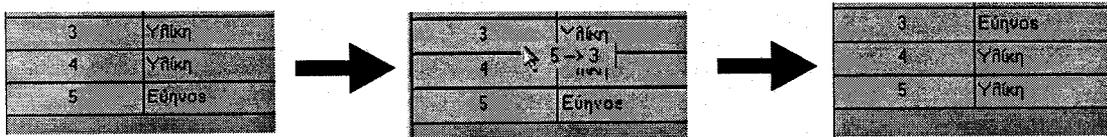
Επιλογή Στόχων και Περιορισμών Προσομοίωσης

Πριν ξεκινήσει η προσομοίωση ο χρήστης μπορεί να θέσει στόχους και περιορισμούς στην προσομοίωση σύμφωνα με το σενάριο του από τη Φόρμα Στόχων-Περιορισμών Προσομοίωσης της Εικ. 11. Ο καθορισμός ενός τουλάχιστον στόχου επιβάλλεται στην περίπτωση επιλογής της ελαχιστοποίησης της αστοχίας ή της μεγιστοποίησης της τιμής στόχου ως αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης. Στην περίπτωση αυτή ο στόχος βελτιστοποίησης που διακρίνεται με το σύμβολο x στο πεδίο *Ερώτημα* αναφέρεται ως στόχος-ερώτημα και είναι μοναδικός στο σύστημα στόχων-περιορισμών.

Στόχοι - περιορισμοί βελτιστοποίησης							
Προτεραιότητα	Συνιστώσα δικτύου	Στόχος	Ερώτημα	Ενεργός στόχος	Τιμή	Μέγιστη αστοχία	Ποσοστό
1	Αθήνα	Κατανάλωση νερού (hm ³)	X	Ναι	750.00		1.00
2	Μαραθιάνας	Ελάχιστος όγκος (hm ³)		Ναι	30.00	0.100	1.00
3	Υλίκη	Κατανάλωση νερού (hm ³)		Ναι	50.00	0.100	1.00
4	Υλίκη	Ελάχιστος όγκος (hm ³)		Όχι	100.00	1.000	1.00
5	Εύηνος	Μέγιστος όγκος (hm ³)		Όχι	100.00	1.000	1.00

Εικ. 11: Φόρμα Στόχων και Περιορισμών Προσομοίωσης

Οι στόχοι εντάσσονται στον κατάλογο της φόρμας με τη σειρά προτεραιότητας που εξυπηρετούνται κατά την προσομοίωση. Οι πρώτες τρεις στήλες αναφέρουν τον αριθμό προτεραιότητας, το αντικείμενο που συνδέεται με τον στόχο (*Συνιστώσα δικτύου*) και το είδος του στόχου. Για να αλλάξει η σειρά προτεραιότητας ενός από τους στόχους πατήστε το κουμπί *Αλλαγή προτεραιότητας*, κατόπιν κάντε με το ποντίκι αριστερό κλικ επάνω στον αριθμό προτεραιότητάς του και χωρίς να σηκώσετε το δάκτυλό σας μεταφέρετέ τον στη θέση που επιθυμείτε, όπως δείχνει το παράδειγμα της Εικ. 12.



Εικ. 12: Αλλαγή προτεραιότητας στόχου από τη 5^η στην 3^η θέση.

Τα πεδία στα οποία μπορεί ο χρήστης να επέμβει για να ορίσει κάποια τιμή διακρίνονται έχοντας διαφορετικό χρώμα από τα υπόλοιπα. Η αλλαγή του στόχου-ερωτήματος γίνεται από το χρήστη με αριστερό κλικ στη στήλη *Ερώτημα* και στη σειρά του νέου στόχου-ερωτήματος. Αυτομάτως μεταφέρεται το σύμβολο x σε αυτήν την θέση.

Το πεδίο *Τιμές* του στόχου-ερωτήματος παραμένει κενό σε περίπτωση επιλογής της μεγιστοποίησης της τιμής στόχου ως αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης από τη Φόρμα

Επιλογών Συστήματος. Αντίστοιχα παραμένει κενό το πεδίο *Μέγιστης αστοχίας* σε περίπτωση επιλογής της ελαχιστοποίησης της αστοχίας ως αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης.

Η στήλη *Τιμή* αναφέρεται στην συνολική τιμή στόχου κατανάλωσης, ελάχιστης ροής ή παραγωγής ενέργειας κατά την πρώτη χρονική περίοδο προσομοίωσης. Εφ' όσον ο στόχος είναι η διατήρηση κάποιων ορίων αποθέματος στους ταμιευτήρες, η τιμή αναφέρεται στον μέσο όρο της χρονικής περιόδου.

Εάν ο χρήστης κάνει με το ποντίκι αριστερό κλικ επάνω στην τιμή κάποιου στόχου, θα εμφανιστεί αμέσως η βοηθητική φόρμα για την εισαγωγή της εποχιακής και διαχρονικής μεταβολής της τιμής του, όπως φαίνεται στο παράδειγμα της Εικ. 13.

1	50.47
2	54.24
3	58.02
4	61.81
5	65.61
6	69.42
7	73.24
8	77.07
9	80.91
10	84.76
11	88.62
12	92.49

Εικ. 13: Βοηθητική φόρμα για την εισαγωγή εποχιακής και διαχρονικής μεταβολής της τιμής στόχου

Με τον καθορισμό της ανώτατης αστοχίας για κάθε στόχο στη στήλη *Μέγιστη αστοχία*, ο χρήστης περιορίζει τις αποδεκτές λύσεις σε αυτές που ικανοποιούν τον περιορισμό. Το πεδίο τιμών της παραμέτρου αυτής είναι από 0 (κανένας κανόνας λειτουργίας δεν γίνεται αποδεκτός πλην αυτού με αστοχία 0%), μέχρι 1 (δεν τίθεται περιορισμός στην αστοχία αυτού του στόχου η οποία απλώς καταγράφεται). Η αστοχία στη φόρμα αυτή αναφέρεται πάντοτε στην αστοχία χρονικών περιόδων, εκτός από αυτή του στόχου-ερωτήματος που καθορίζεται στη Φόρμα Επιλογών.

Η τιμή του πεδίου *Ποσοστό* που λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 1 χρησιμοποιείται ως συντελεστής στην τιμή του στόχου.

Στο κάτω μέρος της φόρμας τα κουμπιά *Προσθήκη*, *Διχοτόμηση*, *Διαγραφή* και *Αποθήκευση στη βάση* δίνουν πλήρης δυνατότητες διαχείρισης των παρόντων και δημιουργίας νέων στόχων.

Επιλογές Συστήματος

Με τη φόρμα αυτή ο χρήστης πραγματοποιεί επιλογές που αφορούν τον τρόπο λειτουργίας και εξαγωγής αποτελεσμάτων του Συστήματος Προσομοίωσης και Βελτιστοποίησης. Οι επιλογές αυτές δεν αφορούν κάποιο αντικείμενο του δικτύου ειδικά, αλλά θα χρησιμοποιηθούν κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης/βελτιστοποίησης και προϋποθέτουν από τον χρήστη να έχει επίγνωση των επιπτώσεων των επιλογών του. Η φόρμα είναι διαρρυθμισμένη σε μορφή σελίδων με ετικέτες (tabbed pages) που περιγράφονται λεπτομερειακά στα επόμενα κεφάλαια.

Στο κάτω μέρος της κάθε σελίδας εμφανίζεται η ονομασία του Υδροσυστήματος που μπορεί να αλλάξει από το χρήστη.

Σελίδα Επιλογών Βελτιστοποίησης

Στη σελίδα αυτή που φαίνεται στην Εικ. 14 ο χρήστης μπορεί να κάνει τις επιλογές που αφορούν την βελτιστοποίηση της διαχείρισης υδατικών πόρων και αναφέρονται συγκεκριμένα στην επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης και στην εφαρμογή του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας.

Εάν αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση της αστοχίας ή η μεγιστοποίησης της τιμής ενός στόχου αυτός ορίζεται ως στόχος-ερωτήμα από τη Φόρμα Επιλογής Στόχων και Περιορισμών Προσομοίωσης. Στην περίπτωση που αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί η αναζήτηση της μέγιστης τιμής στόχου, τότε ενεργοποιείται η δυνατότητα *Υπολογισμού σειράς τιμών στόχου-αστοχίας*. Εάν επιλεγεί η δυνατότητα αυτή, τότε αναζητείται η μέγιστη τιμή στόχου-ερωτήματος για τις προκαθορισμένες τιμές αστοχίας 0.001, 0.005, 0.01, 0.05 και 0.1.

Με την επιλογή *Αναζήτηση μόνο της βέλτιστης λύσης* το σύστημα βελτιστοποίησης διακόπτει την προσομοίωση και απορρίπτει κάθε κανόνα λειτουργίας όταν η αστοχία του στόχου-ερωτήματος ξεπεράσει την μέχρι τότε βέλτιστη. Η επιλογή αυτή είναι κατά κανόνα σε λειτουργία.

Με τον αριθμό των προσομοιωμένων κάρναβων και τη διακριτοποίηση των συντελεστών a και b του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας ο χρήστης καθορίζει τη λεπτομέρεια αναζήτησης της βέλτιστης λύσης και επηρεάζει παράλληλα σε σημαντικό βαθμό το χρόνο απόκρισης του συστήματος.

Επιλογές

Βελτιστοποίηση | Προσομοίωση | Ενεργειακά στοιχεία | Οικονομικά στοιχεία

Αντικειμενική συνάρτηση

- Ελάχιστοποίηση αστοχίας ποσοτικά ορισμένου στόχου
- Μεγιστοποίηση τιμής στόχου για καθορισμένο επίπεδο αστοχίας
- Μεγιστοποίηση συνολικής παραγωγής ενέργειας
- Μεγιστοποίηση συνολικού οικονομικού οφέλους

Υπολογισμός σειράς τιμών στόχου αστοχίας

Αναζήτηση μόνο της βέλτιστης λύσης

Προσομοιωμένοι κάρναβοι

- Κύριος κάρναβος
- Κύριος κάρναβος και 1η υποδιαίρεση
- Κύριος κάρναβος, 1η και 2η υποδιαίρεση

Συντελεστές παραμετρικού κανόνα

- Συντελεστές a και b
- Συντελεστές b μόνο

Διακριτοποίηση κάρναβου συντελεστών a

Διακριτοποίηση κάρναβου συντελεστών b

Υδατικό Σύστημα

Εικ. 14: Επιλογές βελτιστοποίησης

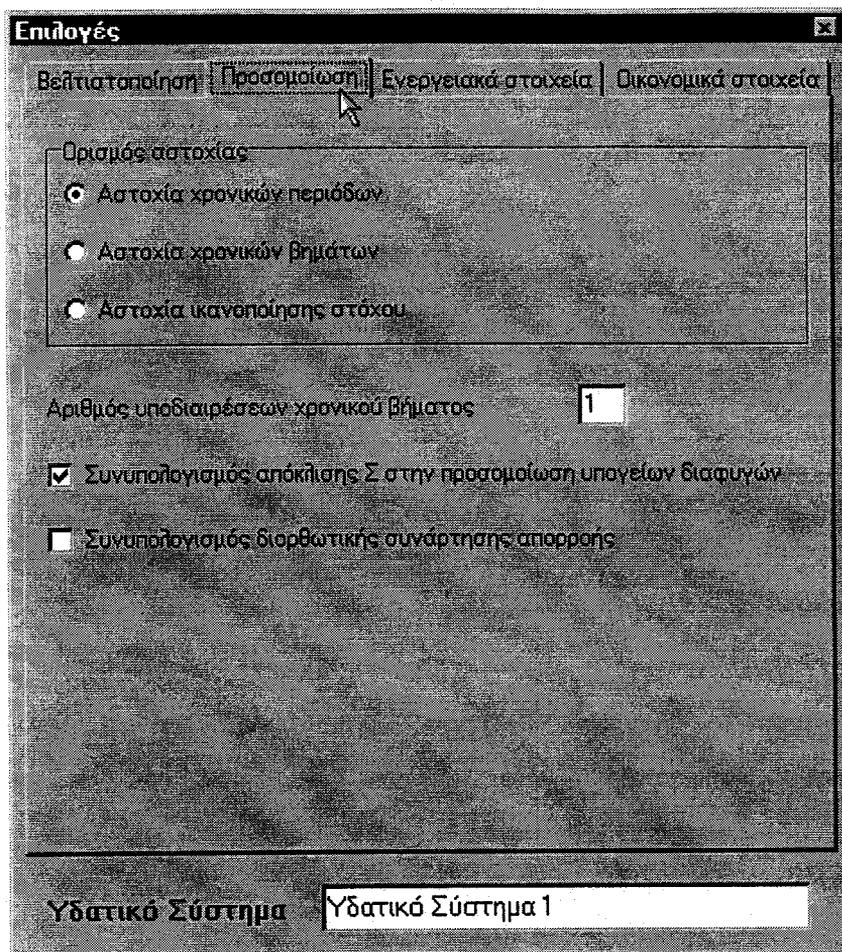
Σελίδα Επιλογών Προσομοίωσης

Ο ορισμός της αστοχίας στη Σελίδα Επιλογών Προσομοίωσης αναφέρεται μόνο στον στόχο-ερώτημα της Φόρμας Επιλογής Στόχων και Περιορισμών Προσομοίωσης.

Σε ορισμένα σενάρια και υδροσυστήματα κατά τα οποία η μεταβολή σημαντικών μεγεθών του συστήματος (ύψος πτώσης, παροχευετικότητα αγωγών) στη διάρκεια ενός χρονικού βήματος (συνήθως μήνα) είναι μεγάλη, επιβάλλεται η υποδιαίρεση του χρονικού βήματος.

Ο συνυπολογισμός της απόκλισης Σ στην προσομοίωση των υπογείων διαφυγών εισάγει ένα τυχαίο στοιχείο στον υπολογισμό που ο χρήστης μπορεί να θέλει να αποκλείσει.

Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να συμπεριλάβει ή να αποκλείσει από τον υπολογισμό τις διορθωτικές συναρτήσεις απορροής των ταμιευτήρων, ανταποκρινόμενος σύμφωνα με το σενάριό του στις προβλεπόμενες αλλαγές στις απορροές που οφείλονται στην μελλοντική αλλαγή της τακτικής απόληψης από τους υπόγειους υδροφορείς.



Εικ. 15: Επιλογές προσομοίωσης

Σελίδα Επιλογών Ενεργειακών Παραγόντων

Η σελίδα αυτή όπως φαίνεται στην Εικ. 16 περιλαμβάνει επιλογές ενεργειακών παραγόντων που χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση και τον υπολογισμό του ενεργειακού ισοζυγίου.

Σελίδα Επιλογών Οικονομικών Παραγόντων

Οι τιμές των οικονομικών παραγόντων που παρουσιάζονται στην Εικ. 17 χρησιμοποιούνται κατά την αναζήτηση του οικονομικά περισσότερο συμφέροντος διαχειριστικού κανόνα λειτουργίας και κατά την παρουσίαση των οικονομικών αποτελεσμάτων του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας.

Επιλογές

Βελτιστοποίηση | Προσομοίωση | **Ενεργειακά στοιχεία** | Οικονομικά στοιχεία

Εύρος απόδοσης συστήματος (ως προς την εγκατεστημένη ισχύ)

Ελάχιστος βαθμός απόδοσης

Μέγιστος βαθμός απόδοσης

Διακριτοποίηση μικρότερης μονάδας ενέργειας

Ποσοστιαία χρονική διαθεσιμότητα πρωτεύουσας ενέργειας

Ημερήσιος χρόνος παραγωγής ενέργειας αιχμής (ώρες)

Προτεραιότητα χρήσης αντλίας για παραγωγή ενέργειας σε αντίστροφο

<input type="checkbox"/> Οκτώβριος	<input type="checkbox"/> Δεκέμβριος
<input type="checkbox"/> Νοέμβριος	<input type="checkbox"/> Ιανουάριος
<input type="checkbox"/> Δεκέμβριος	<input type="checkbox"/> Φεβρουάριος
<input type="checkbox"/> Ιανουάριος	<input type="checkbox"/> Μάρτιος
<input type="checkbox"/> Απρίλιος	<input type="checkbox"/> Μάιος
<input type="checkbox"/> Μάιος	<input type="checkbox"/> Ιούνιος
<input type="checkbox"/> Ιούνιος	<input type="checkbox"/> Ιούλιος
<input type="checkbox"/> Ιούλιος	<input type="checkbox"/> Αύγουστος
<input type="checkbox"/> Αύγουστος	<input type="checkbox"/> Σεπτέμβριος

Υδατικό Σύστημα

Εικ. 16: Επιλογές ενεργειακών παραγόντων

Περιορισμοί ροής

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της προσομοίωσης/βελτιστοποίησης ο χρήστης μπορεί με τη Φόρμα Περιορισμών Χρήσης Αγωγών της Εικ. 18 να απαγορεύσει τη χρήση ορισμένων αγωγών σε κάποια από τις φάσεις της προσομοίωσης. Στη φόρμα διακρίνονται τρεις στήλες που αντιστοιχούν στις 3 φάσεις, στην ικανοποίηση στόχων του χρήστη, στην ικανοποίηση των στόχων του παραμετρικού κανόνα και στην μεταφορά των πλεονάζοντων όγκων. Σε κάθε μια από τις στήλες αυτές αναγράφονται οι αγωγοί του συστήματος. Η ανάστροφη φορά ροής των αγωγών αναγράφεται προσθέτοντας τα σύμβολα *_R* στο τέλος του ονόματος του αγωγού. Για να απαγορεύσει ο χρήστης τη ροή σε κάποια από τις φάσεις πρέπει να κάνει αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στο κουμπί (check box) του αγωγού σε μία από τις τρεις στήλες.

Επιλογές

Βελτιστοποίηση | Προσαρμογή | Ενεργειακά στοιχεία | **Οικονομικά στοιχεία**

Ενεργειακή χρήση

Τιμή μονάδας πρωτεύουσας ενέργειας [Δρχ./KWh]	10.90
Τιμή μονάδας δευτερεύουσας ενέργειας [Δρχ./KWh]	6.50
Τιμή μονάδας ενέργειας άντλησης [Δρχ./KWh]	10.90
Τιμή μονάδας ενέργειας άντλησης (νύχτα) [Δρχ./KWh]	6.50

Υδατικό Σύστημα: Υδατικό Σύστημα 1

Εικ. 17: Επιλογές οικονομικών παραγόντων

Περιορισμοί χρήσης αγωγών

Απαγόρευση ροής για ικανοποίηση στόχων χρήστη	Απαγόρευση ροής για ικανο- ποίηση παραμετρικού κανόνα	Απαγόρευση μεταφοράς πλεονάζοντων όγκων
<input type="checkbox"/> Εύηνος-Μόρνος <input type="checkbox"/> Κιθαιρώνας-Αθήνα <input type="checkbox"/> Κιθαιρώνας-Κλειδί <input type="checkbox"/> Κιούρκα-Αθήνα <input type="checkbox"/> Κιούρκα-Μαραθώνας <input type="checkbox"/> Κλειδί-Βίλιζα <input type="checkbox"/> Κρεμμάδα-Βίλιζα <input type="checkbox"/> Κρεμμάδα-Κλειδί <input type="checkbox"/> Μαραθώνας-Αθήνα <input type="checkbox"/> Μόρνος-Κιθαιρώνας <input type="checkbox"/> Υθίκη-Κρεμμάδα <input checked="" type="checkbox"/> Κιθαιρώνας-Κλειδί_R	<input type="checkbox"/> Εύηνος-Μόρνος <input type="checkbox"/> Κιθαιρώνας-Αθήνα <input type="checkbox"/> Κιθαιρώνας-Κλειδί <input type="checkbox"/> Κιούρκα-Αθήνα <input type="checkbox"/> Κιούρκα-Μαραθώνας <input type="checkbox"/> Κλειδί-Βίλιζα <input type="checkbox"/> Κρεμμάδα-Βίλιζα <input type="checkbox"/> Κρεμμάδα-Κλειδί <input type="checkbox"/> Μαραθώνας-Αθήνα <input type="checkbox"/> Μόρνος-Κιθαιρώνας <input type="checkbox"/> Υθίκη-Κρεμμάδα <input type="checkbox"/> Κιθαιρώνας-Κλειδί_R	<input type="checkbox"/> Εύηνος-Μόρνος <input type="checkbox"/> Κιθαιρώνας-Αθήνα <input type="checkbox"/> Κιθαιρώνας-Κλειδί <input type="checkbox"/> Κιούρκα-Αθήνα <input type="checkbox"/> Κιούρκα-Μαραθώνας <input type="checkbox"/> Κλειδί-Βίλιζα <input type="checkbox"/> Κρεμμάδα-Βίλιζα <input type="checkbox"/> Κρεμμάδα-Κλειδί <input type="checkbox"/> Μαραθώνας-Αθήνα <input type="checkbox"/> Μόρνος-Κιθαιρώνας <input type="checkbox"/> Υθίκη-Κρεμμάδα <input checked="" type="checkbox"/> Κιθαιρώνας-Κλειδί_R

Αποθήκευση στη βάση

Εξοδος

Εικ. 18: Φόρμα Περιορισμών Χρήσης Αγωγών

Εκκίνηση λειτουργικής προσομοίωσης

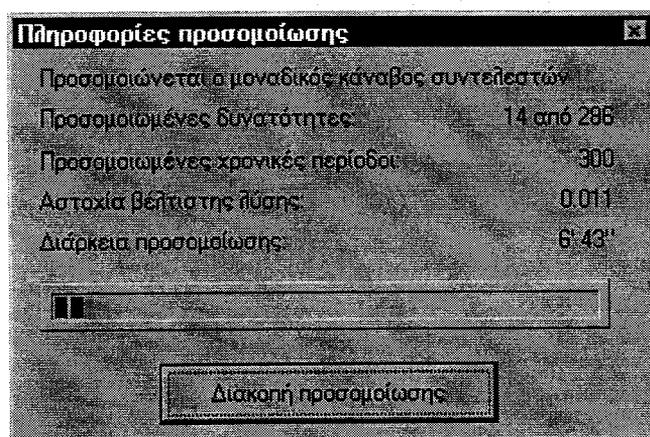
Αφού προσαρμόσει ο χρήστης το μοντέλο του υδροσυστήματος και τις επιλογές του συστήματος έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στο σενάριο του, μπορεί να προχωρήσει στην προσομοίωση ενός συγκεκριμένου κανόνα λειτουργίας (*Επιλεκτική Προσομοίωση*) ή μίας σειράς από κανόνες λειτουργίας, αφήνοντας τον Υδρονομέα να επιλέξει τον βέλτιστο από αυτούς (*Βελτιστοποίηση*). Ο χρήστης επιλέγει εκτελώντας μία από τις ακόλουθες ενέργειες:

- Πατώντας ένα από τα κουμπιά *Επιλεκτική προσομοίωση* ή *Βελτιστοποίηση* που βρίσκονται στην Κύρια Φόρμα
- Επιλέγοντας από το μενού *Προσομοίωση* της Κύριας Φόρμας
- Κάνοντας δεξιό κλικ με το ποντίκι πάνω σε κάποιο σημείο της επιφάνειας της Κύριας Φόρμας και επιλέγοντας από το μενού που εμφανίζεται.

Όταν ο Υδρονομέας βρίσκεται σε διαδικασία προσομοίωσης, οι περισσότερες λειτουργίες του υπολογιστικού συστήματος παραμένουν ενεργές και στην Κύρια Φόρμα κάτω από την ονομασία *Υδρονομέας* εμφανίζεται η πληροφορία *Ο Υδρονομέας προσομοιώνει το σύστημα*.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης μπορεί να είναι χρονοβόρα και παρακολουθείται κυρίως από τη Φόρμα Πληροφορίας Προσομοίωσης που εμφανίζεται ευθύς μετά την έναρξή της. Κατά τη διάρκειά της βελτιστοποίησης ενημερώνονται και οι φόρμες αποτελεσμάτων έτσι ώστε να είναι δυνατή η επισκόπηση των αποτελεσμάτων της τρέχουσας βέλτιστης λύσης.

Φόρμα Πληροφορίας Προσομοίωσης



Εικ. 19: Φόρμα Πληροφορίας Προσομοίωσης

Η Φόρμα Πληροφορίας Προσομοίωσης της Εικ. 19 παραμένει πάντα στο πρώτο πλάνο της οθόνης και δίνει επίκαιρες πληροφορίες για

- τον προσομοιωμένο κάρναβο συντελεστών του παραμετρικού κανόνα,
- τον αριθμό των μέχρι στιγμής προσομοιωμένων κανόνων λειτουργίας καθώς και τον αριθμό των υπόλοιπων κανόνων λειτουργίας μέχρι το τέλος της βελτιστοποίησης
- τις μέχρι στιγμής προσομοιωμένες χρονικές περιόδους του επίκαιρου κανόνα λειτουργίας

- την μέχρι στιγμής αστοχία του στόχου-ερωτήματος κατά την προσομοίωση του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας
- τη χρονική διάρκεια από την αρχή της προσομοίωσης

Ο χρήστης μπορεί να κλείσει τη φόρμα αυτή χωρίς να διακόψει την προσομοίωση κάνοντας με το ποντίκι αριστερό κλικ στο σύμβολο X στην επάνω δεξιά γωνία του παραθύρου. Τη φόρμα μπορεί να την επαναφέρει στην επιφάνεια πατώντας από την Κύρια Φόρμα το κουμπί *Πληροφορίες Προσομοίωσης*.

Ανά πάσα στιγμή ο χρήστης μπορεί να διακόψει την λειτουργία της προσομοίωσης, πατώντας το κουμπί *Διακοπή προσομοίωσης*. Τα αποτελέσματα της μέχρι εκείνη τη στιγμή βέλτιστης λύσης διατηρούνται στη μνήμη του υπολογιστή για επισκόπηση.

Επιλεκτική προσομοίωση

Εφ' όσον ο χρήστης επιθυμεί να προσομοιάσει κάποιον συγκεκριμένο κανόνα λειτουργίας, αυτό μπορεί να το πράξει από την φόρμα επιλεκτικής προσομοίωσης της Εικ. 20, ορίζοντας ο ίδιος τις τιμές στους συντελεστές του παραμετρικού κανόνα για κάθε έναν από τους ταμειυτήρες και πατώντας το κουμπί *Προσομοίωση αστοχίας*. Η αστοχία του στόχου-ερωτήματος θα εμφανιστεί μετά το τέλος των υπολογισμών στο κάτω αριστερό μέρος της φόρμας.

Σύμφωνα με τον τροποποιημένο χωρικό κανόνα το άθροισμα των συντελεστών b πρέπει να ισούται με τη μονάδα. Ο χρήστης μπορεί να επαναφέρει τις τιμές των συντελεστών του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας της τελευταίας βελτιστοποίησης πατώντας το κουμπί *Αναζήτηση βέλτιστου*.

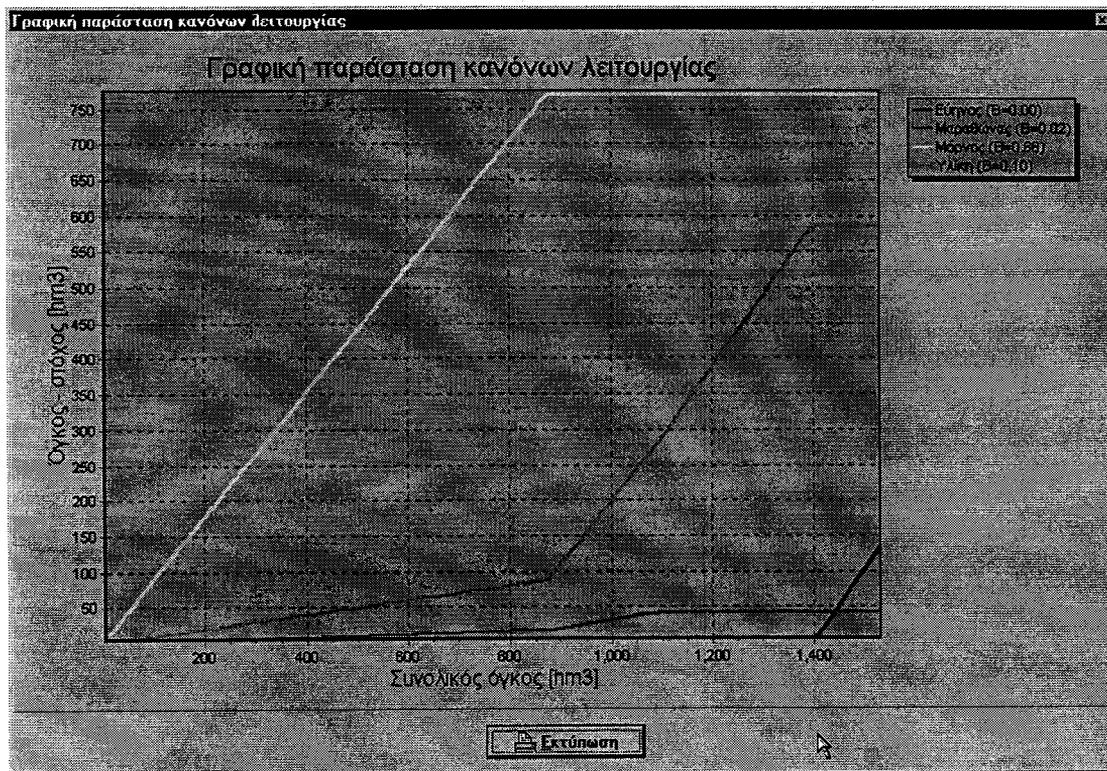
Συντελεστές παραμετρικού κανόνα		
Ταμειυτήρας	A	B
Εύηνος	0.00	0.00
Μαραθώνας	0.00	0.02
Μόρνος	0.00	0.98
Υλική	0.00	0.10

Αναζήτηση βέλτιστου	Προσομοίωση αστοχίας
Δυναμική απεικόνιση	Βέλτιστη τιμή
Όγκοι ταμειυτήρων	Κανόνες λειτουργίας
	Χρονοσειρές ραών

Εικ. 20: Φόρμα Επιλεκτικής Προσομοίωσης

Σε περίπτωση που αναζητείται η μέγιστη τιμή του στόχου-ερωτήματος για συγκεκριμένη αστοχία που έχει δοθεί από τη Φόρμα Επιλογής Στόχων Προσομοίωσης ο χρήστης πρέπει να πατήσει το κουμπί *Βέλτιστη τιμή*. Με το πάτημα του κουμπιού *Δυναμική απεικόνιση* εμφανίζεται η Φόρμα Δυναμικής Απεικόνισης Προσομοίωσης με την οποία ο χρήστης μπορεί να παρακολουθήσει τη διαδικασία της προσομοίωσης για τον συγκεκριμένο κανόνα λειτουργίας βήμα προς βήμα.

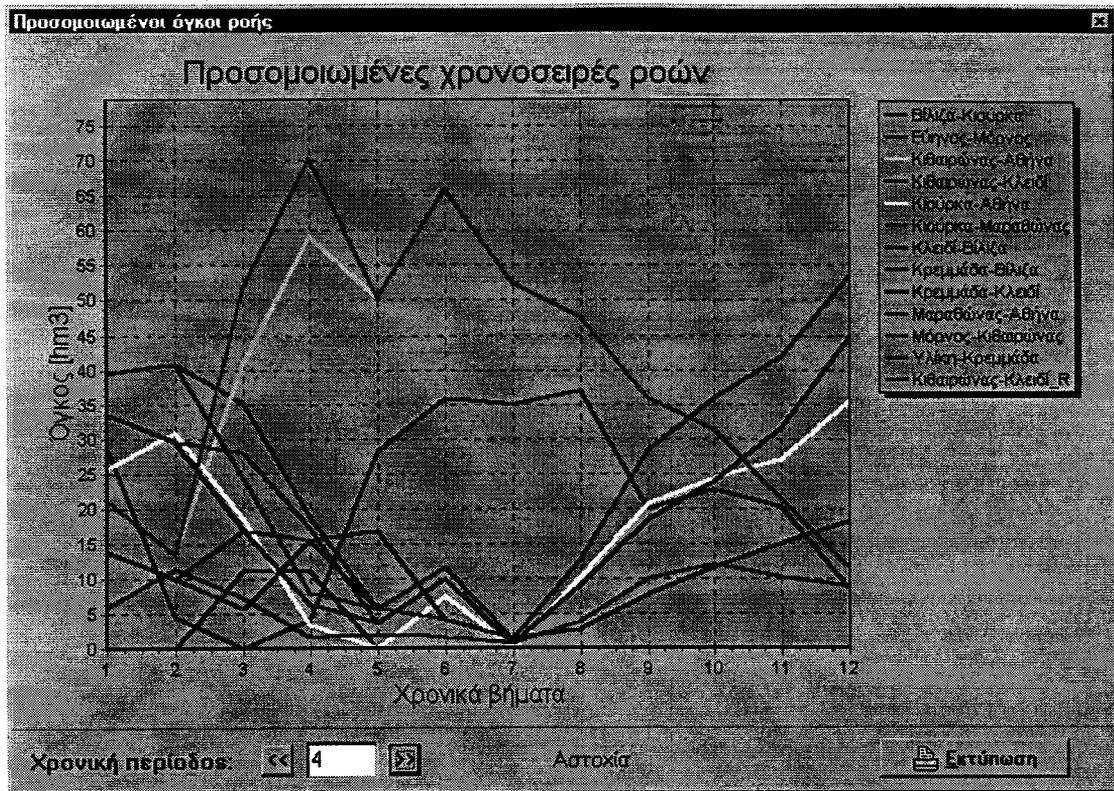
Με το κουμπί *Κανόνες λειτουργίας* ο χρήστης μπορεί να εμφανίσει τη γραφική παράσταση των κανόνων λειτουργίας για όλους τους ταμιευτήρες και για τις παραμέτρους που ορίστηκαν στη φόρμα, όπως δείχνει η Εικ. 21. Η γραφική παράσταση δίνει τον όγκο-στόχο του κάθε ταμιευτήρα κατά τη λειτουργική προσομοίωση σε σχέση με τον συνολικό ωφέλιμο όγκο του συστήματος ταμιευτήρων.



Εικ. 21: Γραφική παράσταση κανόνων λειτουργίας

Με τα κουμπιά *Χρονοσειρές ροών* και *Όγκοι ταμιευτήρων* ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει προσομοιώσεις και να εμφανίσει τα αντίστοιχα διαγράμματα για επιλεγμένες χρονικές περιόδους, όπως δείχνει το παράδειγμα της Εικ. 22.

Σημειώνεται πως ο χρήστης μπορεί να εξαιρέσει συγκεκριμένους ταμιευτήρες ελάχιστης σημασίας από την εφαρμογή του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας. Οι ταμιευτήρες αυτοί δεν εμφανίζονται στη Φόρμα Επιλεκτικής Προσομοίωσης.



Εικ. 22: Παράδειγμα ροών στους αγωγούς του συστήματος κατά την προσομοίωση της 4^{ης} χρονικής περιόδου

Παρακολούθηση της διαδικασίας της προσομοίωσης

Από την Κύρια Φόρμα και σε οποιαδήποτε στιγμή της προσομοίωσης ο χρήστης μπορεί να καλέσει το Υποσύστημα Δυναμικής Απεικόνισης Προσομοίωσης επιλέγοντας από το μενού *Προσομοίωση/Δυναμική απεικόνιση*. Η Φόρμα Δυναμικής Απεικόνισης της Εικ. 23 κατατοπίζει τον χρήστη για την κατάσταση των ταμιευτήρων και τις ροές που λαμβάνουν χώρα στο επίκαιρο χρονικό βήμα κατά την προσομοίωση.

Η διαβάθμιση του μπλε χρώματος κατά τις ροές στους αγωγούς χρησιμοποιείται για να παραστήσει τον όγκο νερού που μεταφέρθηκε από τους αγωγούς στο χρονικό βήμα σε σχέση με την τρέχουσα παροχτευτικότητα τους.

Το απόθεμα στους ταμιευτήρες παρουσιάζεται με γαλάζιο χρώμα. Η στάθμη που αντιστοιχεί στον όγκο-στόχο του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας απεικονίζεται με μια διακεκομμένη οριζόντια γραμμή, ενώ το όριο του νεκρού όγκου με μια συνεχής μαύρη γραμμή. Τα ανώτατα, ή κατώτατα όρια στους όγκους των ταμιευτήρων που έχει θέσει ο χρήστης απεικονίζονται με μια συνεχή κόκκινη γραμμή.

Σε περίπτωση που αστοχήσει κάποιος από τους στόχους που έθεσε ο χρήστης εμφανίζεται στη συνιστώσα του δικτύου που αστόχησε με κόκκινα γράμματα ο αριθμός του στόχου και στη συνέχεια η ένδειξη ΑΠ (αστοχία περιόδου) ή ΑΒ (αστοχία βήματος).

Στο δεξιό μέρος της οθόνης εμφανίζονται σε ξεχωριστή φόρμα οι επιλογές ελέγχου της διαδικασίας προσομοίωσης. Ο χρήστης μπορεί να διακόψει και να επανεκκινήσει τη διαδικασία

προσομοίωσης με τα κουμπιά *Κίνηση* χρονικής περιόδου (έτος) και χρονικού βήματος (μήνας). Επίσης μπορεί να διακόψει την προσομοίωση και να την προχωρήσει σταδιακά με τα κουμπιά που φέρουν τα σύμβολα >>, ενώ στην οθόνη εμφανίζεται το επίκαιρο χρονικό βήμα και η επίκαιρη χρονική περίοδος.

Εάν επιθυμεί ο χρήστης μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην οπτικοποίηση της διαδικασίας της προσομοίωσης κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος, μπορεί να διακόψει την προσομοίωση στο τέλος κάποιας από τις φάσεις του χρονικού βήματος χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα κουμπιά στο επάνω δεξιό μέρος της φόρμας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξετάσει πώς εξυπηρετείται ο κάθε ένας στόχος ξεχωριστά σε ένα οποιοδήποτε χρονικό βήμα ή σε κάποια υποδιαίρεσή του. Ο Υδρονομέας ενημερώνει το χρήστη για τη φάση που απεικονίζεται χρωματίζοντας με θαλασσί χρώμα το κουμπί της αντίστοιχης φάσης. Η φάση απεικόνισης διατηρείται μέχρις ότου ο χρήστης επιλέξει κάποια άλλη πατώντας το αντίστοιχο κουμπί.

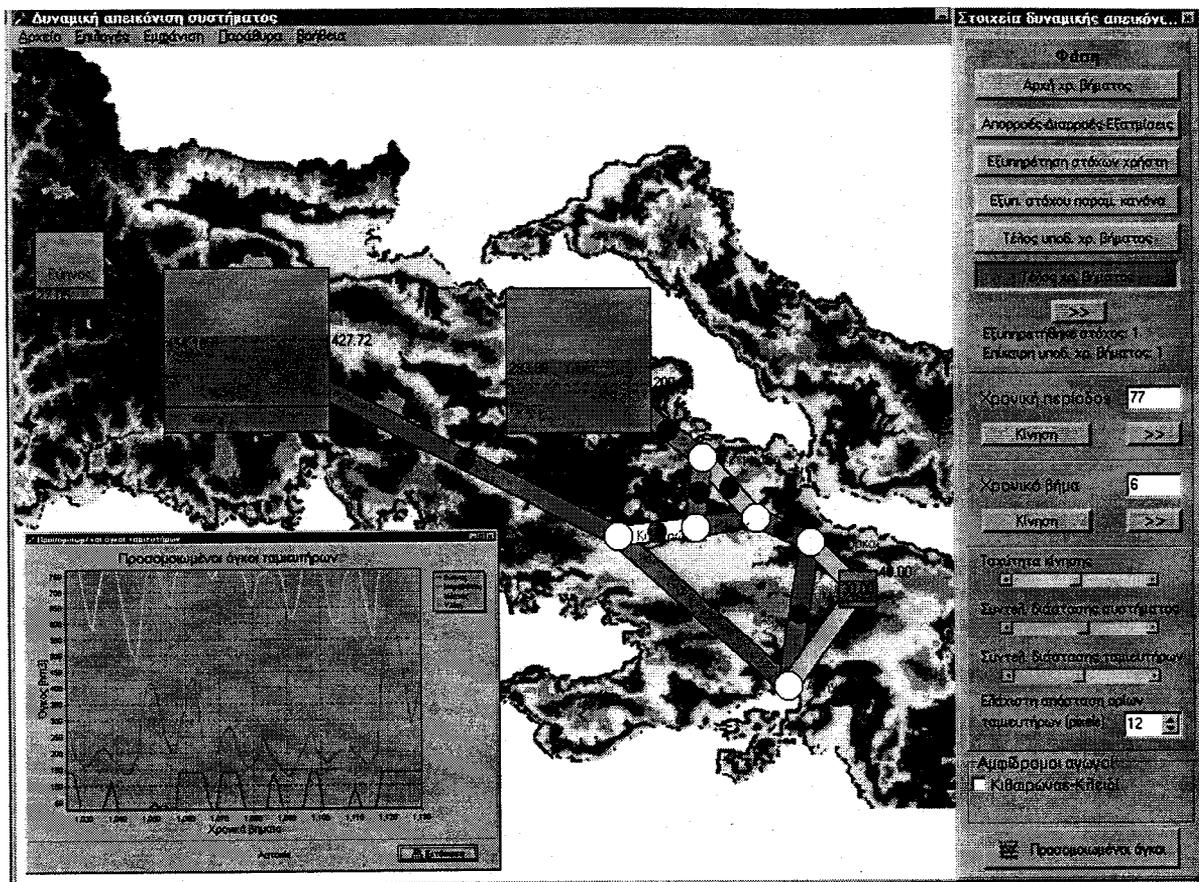
Στο κάτω μέρος της φόρμας επιλογών ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει τις ράβδους κύλισης για να επηρεάσει την ταχύτητα κίνησης κατά την προσομοίωση, τη διάσταση της εικόνας και τη διάσταση των ταμιευτήρων για καλύτερη οπτική απόδοση του συστήματος. Για τον ίδιο λόγο ο χρήστης μπορεί να μεταβάλει την ελάχιστη απόσταση των ορίων των ταμιευτήρων στην απεικόνιση του δικτύου, πράγμα χρήσιμο ιδιαίτερα όταν το δίκτυο είναι πυκνό.

Οι αγωγοί που επιτρέπουν αμφίδρομη κατεύθυνση ροής αναγράφονται στον κατάλογο στο κάτω δεξιό μέρος της φόρμας. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να απεικονίσει κατ' επιλογήν μία από τις δύο ροές. Για να εμφανίσει την αντίθετη από την εικονιζόμενη κατεύθυνση ροής σε κάποιον από τους αγωγούς πρέπει να κάνει με το ποντίκι αριστερό κλικ πάνω στην ονομασία του αγωγού.

Εάν ο χρήστης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης πατήσει το κουμπί *Προσομοιωμένοι όγκοι*, τότε θα εμφανιστεί το διάγραμμα με το απόθεμα των ταμιευτήρων για τις δέκα πιο πρόσφατες χρονικές περιόδους. Το διάγραμμα αυτό επικαιροποιεί συνεχώς όσο διαρκεί η προσομοίωση.

Τέλος, από το μενού της Φόρμας Δυναμικής Απεικόνισης μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες επιλογές:

- Αρχείο* Με την επιλογή αυτή ο χρήστης μπορεί να τυπώσει στον βασικό εκτυπωτή το δίκτυο ή να εγκαταλείψει τη φόρμα
- Επιλογές* Με αυτές τις επιλογές που αντιστοιχούν στα κουμπιά της φόρμας ο χρήστης μπορεί να επηρεάσει τη διαδικασία προσομοίωσης
- Εμφάνιση* Ο χρήστης μπορεί να εμφανίσει στην οθόνη ή να αποκρύψει ορισμένες πληροφορίες για τα αντικείμενα του δικτύου
- Παράθυρα* Με τη επιλογή αυτή μπορεί ο χρήστης να εμφανίσει φόρμες που βοηθούν στην κατανόηση της διαδικασίας προσομοίωσης και που περιγράφονται λεπτομερώς σε άλλα κεφάλαια



Εικ. 23: Παρακολούθηση της διαδικασίας της προσομοίωσης με τη βοήθεια της Φόρμας Δυναμικής Απεικόνισης, της Φόρμας Επιλογών και του διαγράμματος όγκων των ταμιευτήρων

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να επισκοπηθούν από το χρήστη με τη βοήθεια της Φόρμας Αστοχίας Συστήματος και της Φόρμας Ισοζυγίων που περιγράφονται παρακάτω.

Φόρμα Αστοχίας Συστήματος

Για κάθε έναν από τους ενεργούς στόχους η Φόρμα Αστοχίας Συστήματος της Εικ. 24 δίνει την αστοχία του στόχου ως προς τις προσομοιωμένες χρονικές περιόδους και τα προσομοιωμένα χρονικά βήματα του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας. Σε ορισμένα είδη στόχων εμφανίζεται και η αστοχία κάλυψης όγκου.

Η Φόρμα Αστοχίας Συστήματος μπορεί να κληθεί οποτεδήποτε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης/βελτιστοποίησης και επικαιροποιείται όταν κάποιος κανόνας λειτουργίας αποδειχθεί περισσότερο αποδοτικός από τον μέχρι τότε βέλτιστο.

Πληροφορίες αστοχίας συστήματος

Αστοχία Βέλτιστης Λύσης

Προσμοιωμένες δυνατότητες: 7 από 286 του κάρβαου No.1

Στόχος	Αστοχία χρονικών περιόδων	Αστοχία χρονικών βημάτων	Αστοχία κάλυψης όγκου
1) Αθήνα - Κατανάλωση νερού	0.012 [12 / 1000]	0.002 [20 / 12000]	0.001 [0.62 / 700.00]
2) Μαραθώνιας - Ελάχιστος όγκος	0.032 [32 / 1000]	0.008 [92 / 12000]	
3) Υάλη - Κατανάλωση νερού	0.019 [19 / 1000]	0.004 [44 / 12000]	0.008 [0.38 / 50.00]
4) Υάλη - Ελάχιστος όγκος	ανενεργός στόχος	ανενεργός στόχος	ανενεργός στόχος
5) Ευρύνος	ανενεργός στόχος	ανενεργός στόχος	ανενεργός στόχος

Εικ. 24: Φόρμα Αστοχίας Συστήματος

Φόρμες Ισοζυγίων και Οικονομικών Μεγεθών

Η Φόρμα αυτή αποτελείται από τρεις σελίδες και μπορεί να εμφανιστεί στην οθόνη πατώντας στην Κύρια Φόρμα το κουμπί *Ισοζύγια/Οικον. μεγέθη* ή από το μενού της Κυρίως Φόρμας ένα από τα *Αποτελέσματα/Υδατικό Ισοζύγιο*, *Αποτελέσματα/Ενεργειακό Ισοζύγιο* και *Αποτελέσματα/Οικονομικά Μεγέθη*.

Στην Εικ. 25 μέχρι και την Εικ. 27 παρουσιάζονται οι σελίδες της Φόρμας Ισοζυγίων και Οικονομικών Μεγεθών που αφορούν μέσους όρους χρονικών περιόδων του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας. Στη σελίδα Ενεργειακού Ισοζυγίου και Οικονομικών Μεγεθών καίριο ρόλο στη διαμόρφωση των αποτελεσμάτων παίζει η ποσοστιαία χρονική διαθεσιμότητα της πρωτεύουσας ενέργειας που μπορεί να τροποποιηθεί από το χρήστη αλλάζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τα μεγέθη στους πίνακες.

Κάνοντας αριστερό κλικ πάνω στην ονομασία μιας μονάδας παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας στη σελίδα Ενεργειακού Ισολογισμού έρχεται στην επιφάνεια το αναλυτικό γράφημα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή σωρευμένης στήλης κατά το παράδειγμα της Εικ. 28.

Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Υδατικό Ισοζύγιο | Ενεργειακό Ισοζύγιο | Οικονομικό Ισοζύγιο

Υδατικό Ισοζύγιο

(Μέσοι όροι χρονικών περιόδων βέλτιστης λύσης σε hm³)

	Καύρα	Κλειδί	Κρεμαστά	Μαροθίνιας	Μάρκος	Υψηλή	ΣΥΝΟΛΟ
Είσοδος από υποκατάληψη	0.000	0.000	0.000	0.000	310.333	345.626	975.870
Βροχόπτωση	0.000	0.000	0.000	0.000	26.489	7.301	36.999
Εξάτμιση	0.000	0.000	0.000	0.000	24.240	22.239	49.646
Υπόγειες διαφυγές	0.000	0.000	0.000	0.000	12.613	63.649	65.662
Υπερχειλίση	0.000	0.000	0.000	0.000	26.669	0.202	149.363
Εξυπηρέτηση στόλων χωράφι	0.000	0.000	0.000	0.000	526.939	277.320	748.396
Εξυπηρέτηση παραμετρικού κανάλι	0.000	0.000	0.000	0.000	73.758	0.000	0.000
Απορροφή υπερχειλίσεων	0.000	0.000	0.000	0.000	11.076	-1.595	0.000
Χρήση αραιού αποθέματος	0.000	0.000	0.000	0.000	0.069	0.077	0.168
Διαφορά	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	0.000
Όγκος ταμιευτήρα (hm ³)	0.000	0.000	0.000	29.906	675.773	224.922	
Στάθμη ταμιευτήρα (m)	0.000	0.000	0.000	217.992	429.186	61.144	
Συντελεστής A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Συντελεστής B	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	

Αποθήκευση στη βάση | Εκτύπωση | Έξοδος

Εικ. 25: Σελίδα Αποτελεσμάτων Υδατικού Ισοζυγίου

Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Υδατικό Ισοζύγιο | Ενεργειακό Ισοζύγιο | Οικονομικό Ισοζύγιο

Ενεργειακό Ισοζύγιο

(Μέσοι όροι χρονικών περιόδων βέλτιστης λύσης σε GWh)

	B(1) (α2)	B(2) (α2)	Καύρα	Κλειδί	Μαροθίνιας	ΣΥΝΟΛΟ
Στόχος παραγόμενες ενέργειες			0.00			0.00
Σταθερά παραγόμενες ενέργειες						
Παραγόμενες ενέργειες			9.24			9.24
Ανεπικερδέως ενέργειες			68.39			68.39
Συνολική ενέργεια	-18.98	-22.69	77.62	-95.95	-98.25	77.62
Ενέργεια άντλησης	-18.98	-22.69		-95.95	-98.25	-200.14
Χαλαστές παραγόμενες ενέργειες			0.00			0.00
Βεβαιότητα κατά βάση παραγόμενες ενέργειες						
Παραγόμενες ενέργειες			18.25			18.25
Ανεπικερδέως ενέργειες			69.37			69.37
Συνολική ενέργεια	-18.98	-22.69	77.62	-95.95	-98.25	77.62
Ενέργεια άντλησης	-18.98	-22.69		-95.95	-98.25	-200.14
Χαλαστές παραγόμενες ενέργειες			0.00			0.00

Ποσοστά χρονική διαθεσιμότητα παραγόμενες ενέργειες: 0.990

Επιαναπρογραμμασμός

Αποθήκευση στη βάση | Εκτύπωση | Έξοδος

Εικ. 26: Σελίδα Αποτελεσμάτων Ενεργειακού Ισοζυγίου

Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Υδατικό Ισοζύγιο | Ενεργειακό Ισοζύγιο | Οικονομικός Ισολογισμός

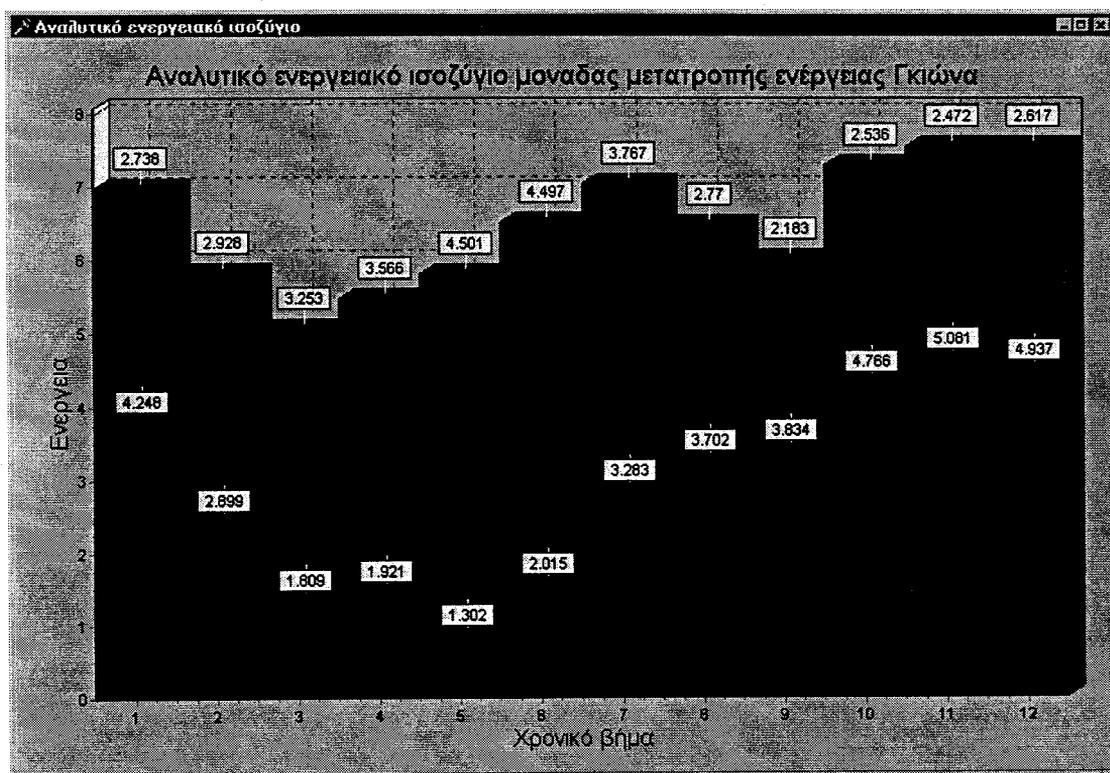
Οικονομικός ισολογισμός βέλτιστης λύσης

	Βασικά2	Γκώνα	Κούφρα	Μούρια	Σύνολο
Πρωτεύουσα ενέργεια		100.67			100.67
Δευτερεύουσα ενέργεια		444.53			444.53
Αντίληψη [Εκ. Δοκ./Α]	-247.19		-1045.62	-1038.20	3271.50
Αντίληψη νικτ. [Εκ. Δοκ.					0.00
Σύνολο [Εκ. Δοκ./Α]	-247.19	545.13	-1045.62	-1038.20	2726.30

[*] Αστοχία διάκρισης πρωτεύουσας ενέργειας από τη δευτερεύουσα : 0.010 Επαναπροσδιορισμός

Αποθήκευση στη βάση Εκτύπωση Έξοδος

Εικ. 27: Σελίδα Αποτελεσμάτων Οικονομικών Μεγεθών



Εικ. 28: Παράδειγμα αναλυτικού γραφήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

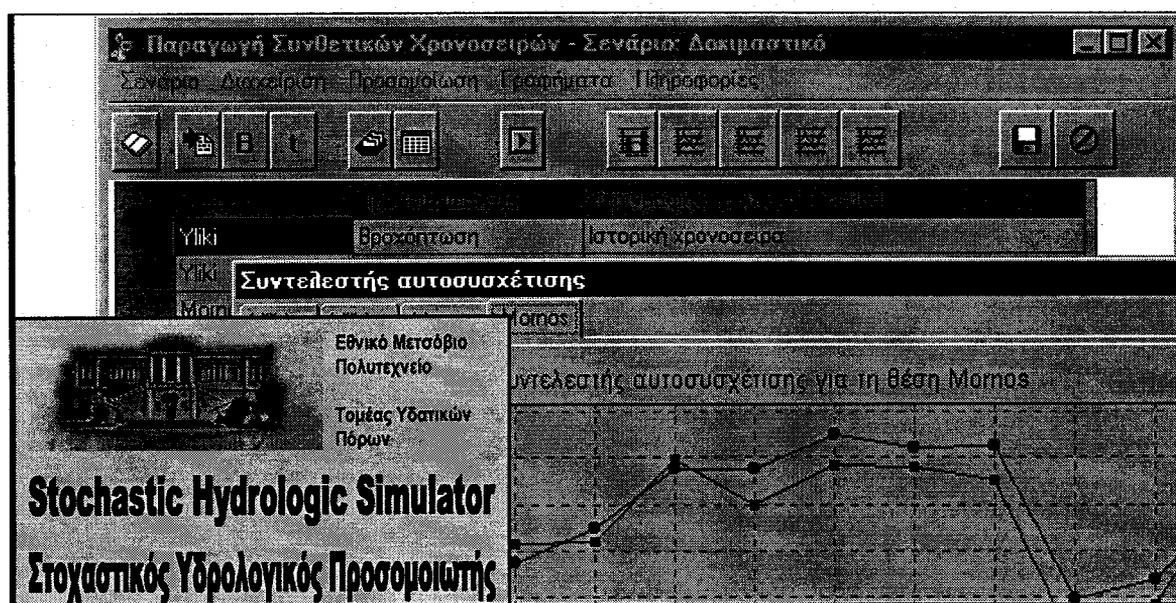
Παράρτημα Β: Οδηγίες χρήσης για το Στοχαστικό Υδρολογικό Προσομοιωτή

Ο Στοχαστικός Υδρολογικός Προσομοιωτής (Stochastic Hydrologic Simulator – SHyS) είναι ένα πακέτο λογισμικού που έχει σκοπό την κατασκευή συνθετικών χρονοσειρών για υδρολογικές μεταβλητές. Αποτελεί εξέλιξη, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όσο και σε προγραμματιστικό, ενός αντίστοιχου πακέτου που είχε αναπτυχθεί στην προηγούμενη φάση του έργου. Βασίζεται στις θεωρητικές εργασίες των Koutsoyiannis and Manetas (1996) και Koutsoyiannis (1999) στις οποίες και παραπέμπεται ο χρήστης για την κατανόηση των μεθοδολογιών και διαδικασιών που ακολουθούνται στο λογισμικό (Παράρτημα Δ). Έχει αναπτυχθεί λειτουργικό σύστημα Windows 95 χρησιμοποιώντας γλώσσα προγραμματισμού Pascal και αξιοποιώντας εργαλεία βάσης δεδομένων και γραφικών (Εικ. 29).

Δομή του πακέτου

Για την επίλυση του προβλήματος, δηλαδή την κατασκευή και τον έλεγχο των συνθετικών χρονοσειρών η λειτουργία του SHyS εκτελείται στις εξής τρεις κύριες φάσεις:

- Την οργάνωση των δεδομένων σε ένα γενικό πλαίσιο που το αποκαλούμε *σενάριο*, εντός του οποίου έχουμε κάθε δυνατότητα ελέγχου των δεδομένων.
- Την εκτέλεση των μαθηματικών υπολογισμών για τη σύνθεση των χρονοσειρών με βάση το μαθηματικό μοντέλο και την αποθήκευση των αποτελεσμάτων στη βάση δεδομένων
- Την επισκόπηση των αποτελεσμάτων, τη σύγκριση των ιδιοτήτων τους με οπτικό τρόπο (γραφήματα) αλλά και με την απευθείας σύγκριση σε αριθμητικό πλαίσιο.



Εικ. 29: Χαρακτηριστικές εικόνες από το παραθυρικό περιβάλλον του SHyS

Στην πρώτη φάση, δίνεται η δυνατότητα της ομαδοποίησης των δεδομένων σε ένα 'σενάριο', το οποίο φυλάσσεται στη βάση δεδομένων. Στις δυνατότητες αυτής της φάσης εντάσσονται και οι λειτουργίες της επισκόπησης των δεδομένων και ρύθμισης του μοντέλου

Η βασική λειτουργία της δεύτερης φάσης είναι η εκτέλεση των υπολογισμών του μοντέλου για το επιλεγμένο πρόβλημα. Εκτός όμως από τη λειτουργία αυτή έχουμε και τη δυνατότητα διόρθωσης των ενδιάμεσων υπολογισμών.

Τέλος αφού οι υπολογισμοί έχουν ολοκληρωθεί έρχεται να ολοκληρωθεί η διαδικασία με τις λειτουργίες της τρίτης φάσης, δηλαδή τον έλεγχο των αποτελεσμάτων μέσω πινάκων και γραφικών απεικονίσεων.

Σενάριο

Ως σενάριο ορίζουμε το σύνολο των δεδομένων και των κατάλληλων επεξηγήσεων που συνιστά ένα πλήρες πρόβλημα σύνθεσης χρονοσειρών. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τα εξής:

- Ονομασία του σεναρίου
- Συνοπτική περιγραφή του σεναρίου
- Ιστορικές χρονοσειρές του προβλήματος
- Αριθμός των ετών που περιλαμβάνουν οι συνθετικές χρονοσειρές (που ζητάμε να παραχθούν)
- Αριθμός ομάδων από διαφορετικές συνθετικές χρονοσειρές του προβλήματος (που ζητάμε να παραχθούν)
- Ρυθμίσεις του μοντέλου για το συγκεκριμένο πρόβλημα

Η δυνατότητα επιλογής, ελέγχου και δημιουργίας των παραπάνω παραμέτρων γίνεται με κατάλληλα γραφικά συστατικά του λογισμικού που δίνουν τη δυνατότητα πρόσβασης στη βάση δεδομένων, και για τα οποία θα αναπτυχθούν παρακάτω.

Βάση δεδομένων – τύπος δεδομένων

Η βάση δεδομένων περιέχει πίνακες για τις ιστορικές χρονοσειρές, πίνακες για τις συνθετικές χρονοσειρές, πίνακες για καταχώρηση των σεναρίων και πίνακες για τις ρυθμίσεις του μοντέλου.

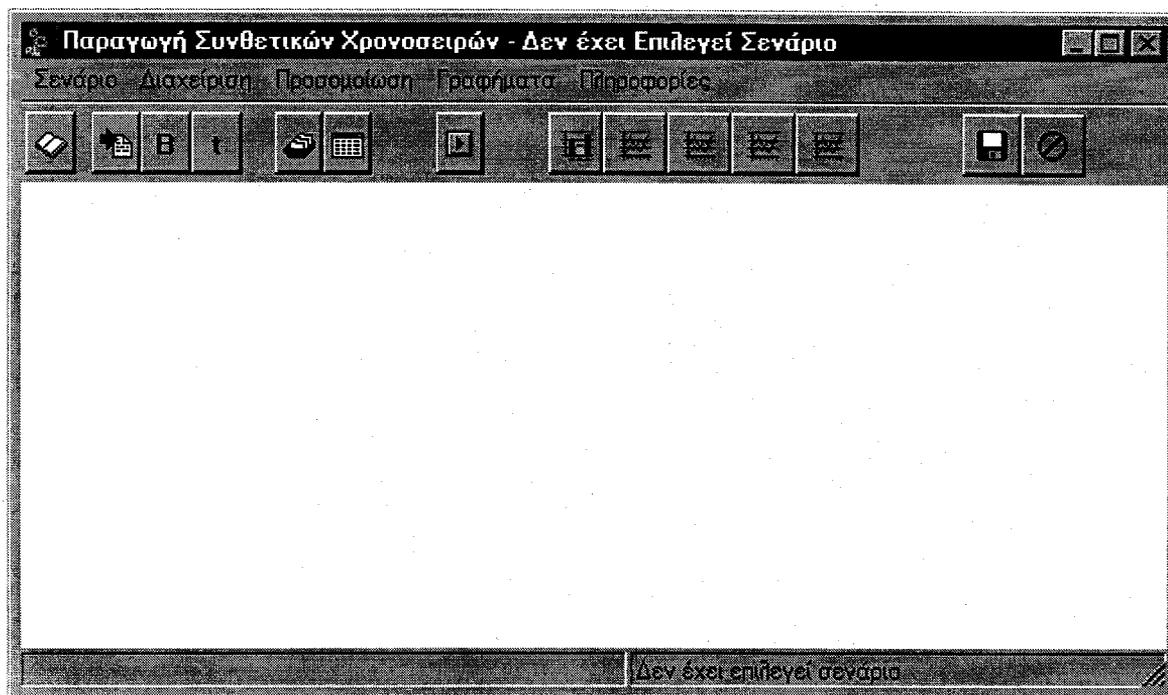
Οι πίνακες των ιστορικών χρονοσειρών περιέχουν στοιχεία για ένα πλήθος ετών τα οποία συνίσταται από δώδεκα μήνες με πρώτο μήνας κάθε έτους να θεωρείται ο Οκτώβριος. Κάθε πίνακας κρατά δεδομένα για μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Τα δεδομένα μπορεί να είναι ύψη βροχόπτωσης, απορροής και εξάτμισης της αντίστοιχης τοποθεσίας. Η λογική ένωση της τοποθεσίας και του είδους της μεταβλητής αναφέρεται στο πρόγραμμα ως «κόμβος».

Οι πίνακες των συνθετικών χρονοσειρών ακολουθούν τον ίδιο τρόπο αναγραφής με τον τρόπο αναγραφής των ιστορικών χρονοσειρών.

Ο πίνακας των ρυθμίσεων του μοντέλου κρατάει τις ρυθμίσεις που έχουν επιλεγεί κάθε φορά προτού εκτελεσθεί η διαδικασία αποθήκευσης. Οι ρυθμίσεις αυτές αφορούν κριτήρια σύγκλισης επαναληπτικών ρουτινών, αριθμό μέγιστων επαναλήψεων, καθώς και παραμέτρους βελτιστοποίησης.

Το κύριο παράθυρο της εφαρμογής

Το κύριο παράθυρο της εφαρμογής είναι και το παράθυρο που εμφανίζεται πρώτο με το τρέξιμο της εφαρμογής, όπως φαίνεται στην Εικ. 30.



Εικ. 30: Το κύριο παράθυρο της εφαρμογής

Στην πρώτη στήλη του μενού με την ονομασία «Σενάριο», παρουσιάζονται οι λειτουργίες δημιουργίας του σεναρίου και λειτουργίες που σχετίζονται με τη βάση δεδομένων.

Στη δεύτερη στήλη με την ονομασία «Διαχείριση» παρουσιάζονται οι λειτουργίες διαχείρισης των δεδομένων του σεναρίου, δηλαδή η επιλογή των κόμβων (εισαγωγή των δεδομένων), η επιλογή του αριθμού των ομάδων συνθετικών χρονοσειρών και του αριθμού των ετών καθεμιάς, και τέλος οι λειτουργίες επισκόπησης των ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών.

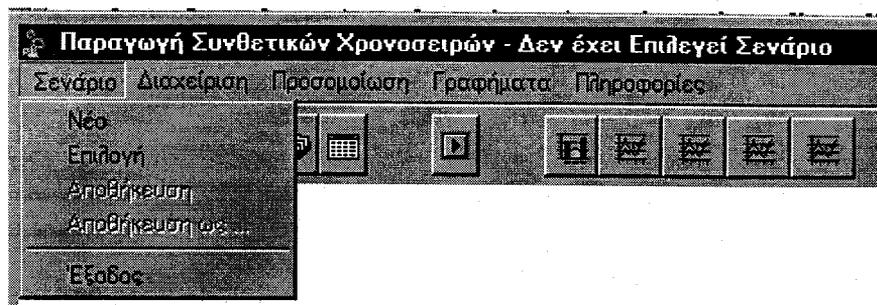
Στην τρίτη στήλη με την ονομασία «Προσομοίωση» εκτελείται και η βασική λειτουργία της εκτέλεσης των υπολογισμών του μοντέλου, καθώς και η δυνατότητα ρύθμισης του μοντέλου.

Στην τέταρτη στήλη με την ονομασία «Γραφήματα» παρουσιάζονται τα γραφήματα στατιστικών χαρακτηριστικών των ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών.

Και τέλος στην πέμπτη στήλη με την ονομασία «Πληροφορίες» παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικές με το πρόγραμμα και την ανάπτυξή του.

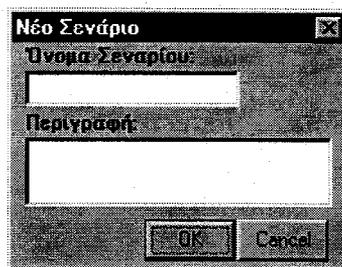
Δημιουργία Σεναρίου

Για τη δημιουργία ενός νέου σεναρίου ανοίγουμε τη στήλη του μενού «Σενάριο» και επιλέγουμε «Νέο Σενάριο» όπως φαίνεται και στην παρακάτω Εικ. 31.



Εικ. 31: Επιλογή νέου σεναρίου

Με την επιλογή αυτή εμφανίζεται νέα φόρμα στην οποία καταγράφουμε την ονομασία του σεναρίου καθώς και ένα μικρό συνοπτικό κείμενο. (Εικ. 32)



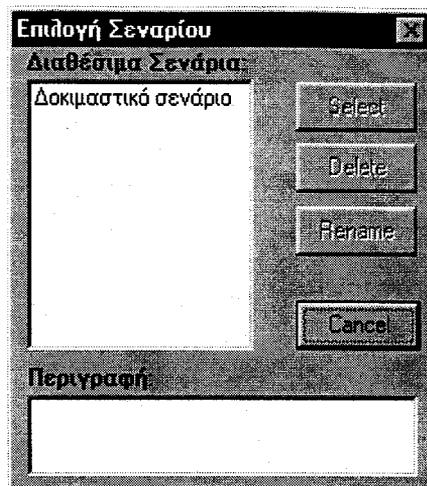
Εικ. 32: Ονομασία σεναρίου

Με την επιλογή του ονόματος έχουμε ουσιαστικά ορίσει το σενάριο, και μένει να συμπληρώσουμε τα υπόλοιπα στοιχεία που το στοιχειοθετούν, όπως αναγράφηκε στο σχετικό χωρίο.

Επιλογή Σεναρίου

Εναλλακτικά μπορούμε να επιλέξουμε σενάριο από τη λίστα των ήδη καταχωρημένων, επιλέγοντας στο μενού το «Επιλογή» και κάνοντας την κατάλληλη επιλογή από τη λίστα που εμφανίζεται (Εικ. 33).

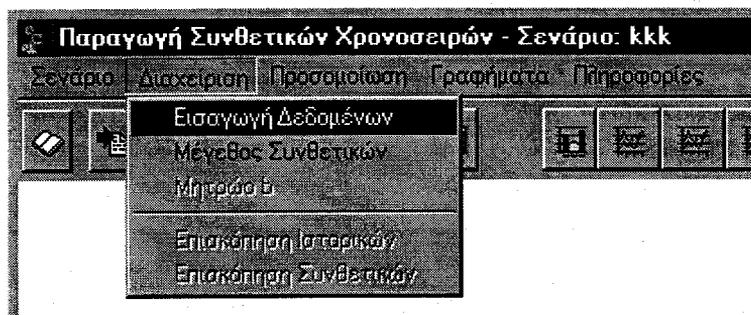
Έχουμε επίσης και τη δυνατότητα της αλλαγής του ονόματος ενός επιλεγμένου σεναρίου και το σβήσιμό του (ταυτόχρονα σβήνονται όλα τα στοιχεία τα οποία το αποτελούν από τη βάση δεδομένων)



Εικ. 33: Επιλογή σεναρίου από μια λίστα

Εισαγωγή Δεδομένων χωρίς Ιστορικά Δεδομένα

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών χωρίς αναγκαστικά να χρησιμοποιούνται τα ιστορικά δεδομένα καθεαυτά, αλλά τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους. Υποτίθεται, βέβαια, ότι υπάρχουν ιστορικά δεδομένα από τα οποία έχουν εκτιμηθεί προηγουμένως τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους. Για να εισάγουμε δεδομένα στο σενάριο επιλέγουμε από τη δεύτερη στήλη του μενού την «Εισαγωγή Δεδομένων» όπως φαίνεται και στην Εικ. 34. Με αυτή την επιλογή στο μενού εμφανίζεται η φόρμα της Εικ. 35. Στη φόρμα αυτή πρέπει να συμπληρώσουμε για κάθε μήνα τις τιμές των μητρώων των μέσων τιμών των ιστορικών χρονοσειρών και των μητρώων α , σ , γ , και φ . Οι διαστάσεις των μητρώων αυτών καθορίζονται από τον αριθμό διαφορετικών τοποθεσιών (κόμβων) που έχουμε στο σενάριο. Η προκαθορισμένη τιμή του αριθμού κόμβων είναι 2. Στην περίπτωση όμως που θέλουμε να συμπεριλάβουμε περισσότερους κόμβους στο πρόβλημα πρέπει να καθορίσουμε τον αριθμό των κόμβων πατώντας το πλήκτρο «Αλλαγή αριθμού κόμβων».



Εικ. 34: Εισαγωγή δεδομένων στο σενάριο

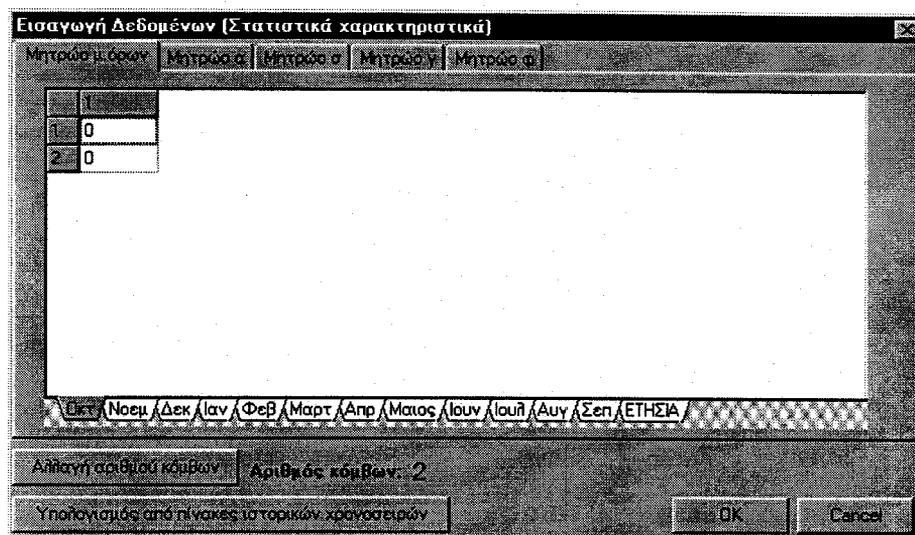
Η αλλαγή του επιλεγμένου αριθμού κόμβων μπορεί να έχει αποτέλεσμα να χαθούν ορισμένες πληροφορίες που ήδη έχουν εισαχθεί (περίπτωση που επιλέγουμε μικρότερο αριθμό).

Ο μέγιστος αριθμός κόμβων που μπορούν να επιλεγούν είναι δέκα.

Η συμπλήρωση των μητρώων αυτών είναι σειριακή, δηλαδή δεν μπορούμε να προχωρήσουμε σε συμπλήρωση νέου μητρώου αν δεν έχουμε συμπληρώσει πρώτα το παλιό. Έτσι π.χ., αν

επιχειρήσουμε να δούμε κάποιο άλλο μήνα μέσα στο μητρώο **a** χωρίς να έχουμε συμπληρώσει το παρόντα μήνα, τότε εμφανίζεται μήνυμα που αναγράφει ότι πρέπει οι τιμές να είναι μη μηδενικές. Αν επιχειρήσουμε να πατήσουμε το πλήκτρο OK (δίχως να έχουμε συμπληρώσει όλα τα πεδία) τότε εμφανίζεται μήνυμα που μας αναγράφει πόσα πεδία ακόμη είναι ασυμπλήρωτα.

Όταν έχουμε συμπληρώσει όλα τα πεδία, τότε υπολογίζεται αυτόματα το μητρώο **b** και μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε στην προσομοίωση.



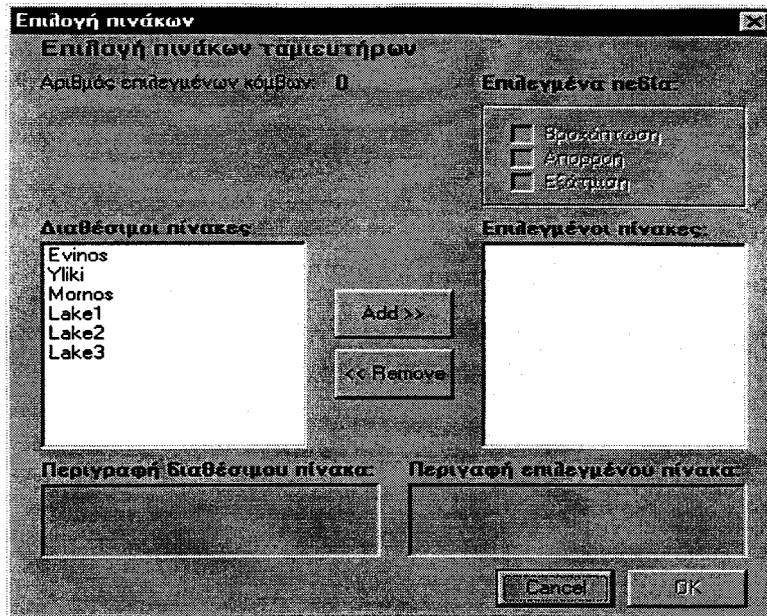
Εικ. 35: Φόρμα εισαγωγής δεδομένων

Εισαγωγή στοιχείων με ιστορικά δεδομένα

Στην περίπτωση που έχουμε δεδομένα ιστορικών χρονοσειρών, τότε δεν χρειάζεται να αναγράψουμε τίποτε στους πίνακες της φόρμας της Εικ. 35, αλλά να πατήσουμε το πλήκτρο «Υπολογισμός από πίνακες ιστορικών χρονοσειρών». Με το πάτημα του πλήκτρου εμφανίζεται η φόρμα της Εικ. 36. Η φόρμα αυτή αποτελείται από δυο λίστες. Η αριστερή λίστα περιέχει τις ονομασίες των «τοποθεσιών που είναι διαθέσιμες στη βάση δεδομένων, ενώ στη δεξιά λίστα τις ονομασίες των κόμβων που έχουμε επιλέξει.

Κάθε τοποθεσία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να περιέχει τριών ειδών χρονοσειρές που αναφέρονται σε ύψος βροχόπτωσης, απορροής και εξάτμισης. Π.χ, η τοποθεσία «mornos» μπορεί να περιέχει τα πεδία: βροχόπτωση, απορροή και εξάτμιση, και η επιλογή «mornos – βροχόπτωση» θεωρείται ως κόμβος.

Στο πάνω δεξιά σημείο της φόρμας βλέπουμε τα πεδία (είναι ανενεργά αν δεν έχει επιλεγεί κάποιος κόμβος) που μόλις προαναφέρθηκαν. Με την επιλογή τους καθορίζουμε τον αριθμό των κόμβων. Έτσι για κάθε τοποθεσία που έχουμε επιλέξει μπορούμε να έχουμε από ένα έως τρεις κόμβους (π.χ. mornos –βροχόπτωση, mornos – απορροή, mornos-εξάτμιση).



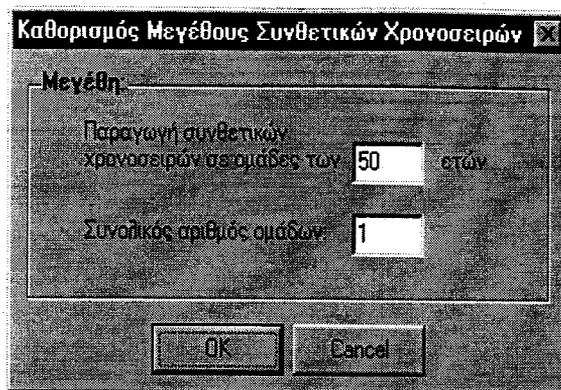
Εικ. 36: Υπολογισμός των δεδομένων από ιστορικές χρονοσειρές που βρίσκονται στη βάση δεδομένων

Ο μέγιστος αριθμός κόμβων σε ένα πρόβλημα είναι δέκα, έτσι πρέπει οι επιλογές μας να βασίζονται στον περιορισμό αυτό. Ο ελάχιστος αριθμός κόμβων σε ένα πρόβλημα είναι δύο, και μετά τη συμπλήρωση δυο κόμβων το πλήκτρο OK γίνεται ξανά ενεργό.

Όταν ολοκληρωθεί η επιλογή των κόμβων (και πατηθεί το πλήκτρο OK), γίνεται η ανάγνωση των ιστορικών χρονοσειρών, καθώς και η αυτόματη τοποθέτηση των τιμών στην φόρμα της Εικ. 35.

Επιλογή των ζητούμενων ομάδων και πλήθους ετών για τις συνθετικές χρονοσειρές

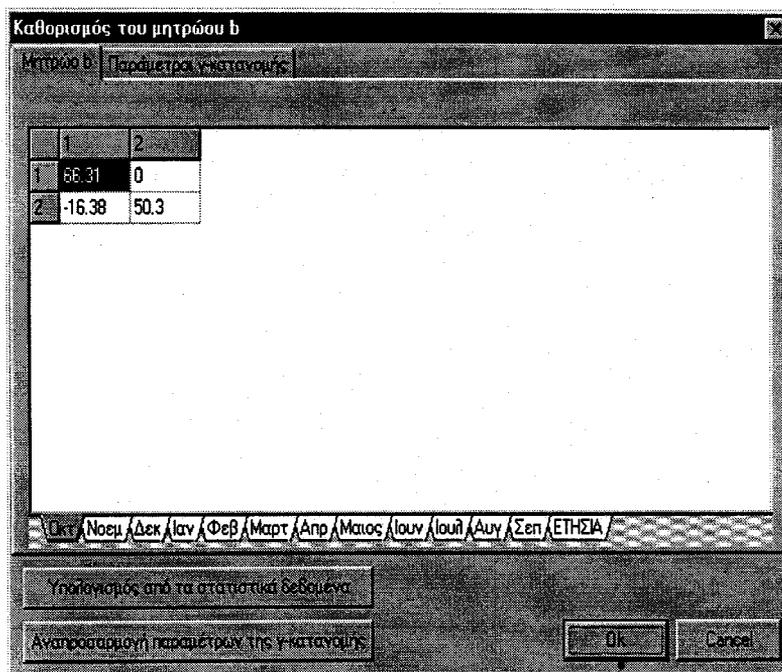
Αφού έχουμε ολοκληρώσει την εισαγωγή δεδομένων στο πρόβλημα πρέπει να καθορίσουμε και τις ομάδες των συνθετικών χρονοσειρών. Δηλαδή να ζητήσουμε να φτιαχτούν π.χ. δύο διαφορετικές ομάδες συνθετικών χρονοσειρών που να αποτελούνται από 50 χρόνια η καθεμία. Έτσι επιλέγουμε το «μέγεθος» από το μενού της Εικ. 34 και ανοίγει η φόρμα της Εικ. 37, από που θα εισαγάγουμε τον αριθμό των ομάδων και το πλήθος των ετών της κάθε ομάδας για τις συνθετικές χρονοσειρές που θέλουμε να δημιουργήσουμε. Οι προκαθορισμένες τιμές είναι μία ομάδα των 50 ετών. Μετά την επιλογή αυτή είμαστε πλέον σε θέση να εκτελέσουμε τους υπολογισμούς του μοντέλου.



Εικ. 37: Επιλογή μεγέθους συνθετικών χρονοσειρών

Επισκόπηση του υπολογισμένου μητρώου b

Στο στάδιο αυτό όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω είμαστε σε θέση να εκτελέσουμε τους υπολογισμούς για τις συνθετικές χρονοσειρές. Πριν από αυτό μπορούμε να ελέγξουμε το μητρώο b και τα μητρώα των παραμέτρων των κατανομών Γάμα (κ, λ και c). Επιλέγοντας από το μενού της Εικ. 34 το «Μητρώο b» εμφανίζεται η φόρμα της Εικ. 38. Στη φόρμα αυτή μπορούμε να ελέγξουμε τις τιμές των μητρώων b και των παραμέτρων της κατανομής, καθώς και να αλλάξουμε τις τιμές τους.



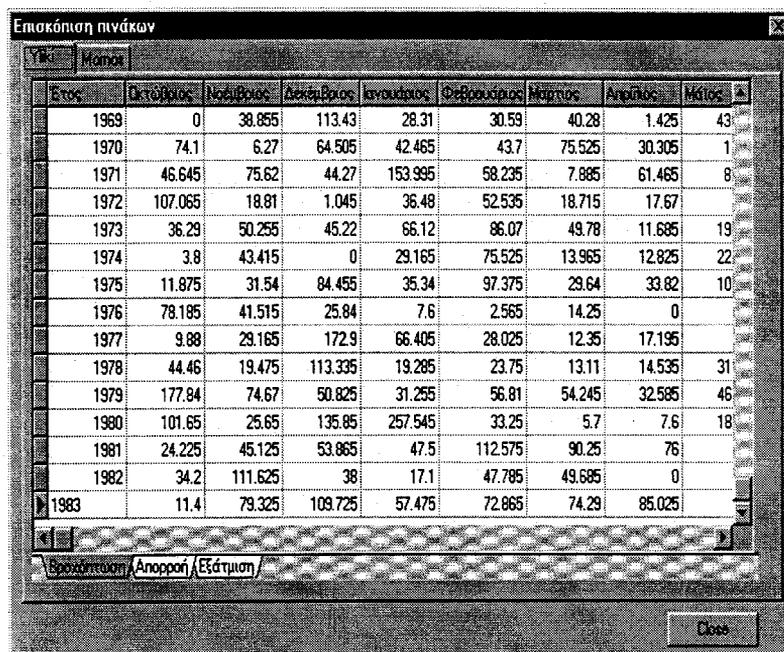
Εικ. 38: Μητρώο b

Εάν κάνουμε αλλαγές στις τιμές των παραπάνω μητρώων και θελήσουμε να επαναφέρουμε τις αρχικές τους τιμές, δεν έχουμε παρά να πατήσουμε το πλήκτρο «Υπολογισμός από τα στατιστικά δεδομένα».

Επίσης αν αλλάξουμε τις τιμές του μητρώου **b**, επειδή οι τιμές των παραμέτρων της κατανομής Γάμα εξαρτώνται από αυτό, πρέπει να επαναπροσδιοριστούν οι τιμές τους. Έτσι, πατάμε το πλήκτρο «Αναπροσαρμογή παραμέτρων της γ-κατανομής».

Επισκόπηση Ιστορικών Χρονοσειρών

Για να ελέγξουμε τις τιμές των ιστορικών χρονοσειρών που έχουμε επιλέξει μπορούμε να επιλέξουμε την «Επισκόπηση Ιστορικών» από το μενού της Εικ. 34. Έτσι θα εμφανιστεί η φόρμα της Εικ. 39. Στη φόρμα αυτή δεν εμφανίζονται μόνο τα πεδία που έχουν επιλεγεί για κάθε τοποθεσία, αλλά και όλα τα άλλα διαθέσιμα πεδία.

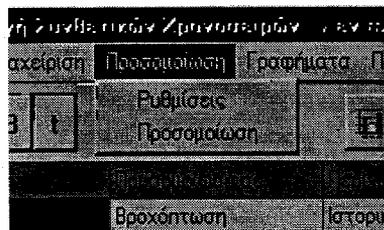


Έτος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος
1969	0	38.855	113.43	28.31	30.59	40.28	1.425	43
1970	74.1	6.27	64.505	42.465	43.7	75.525	30.305	1
1971	45.645	75.62	44.27	153.995	58.235	7.885	61.465	8
1972	107.065	18.81	1.045	36.48	52.535	18.715	17.67	
1973	36.29	50.255	45.22	66.12	86.07	49.78	11.685	19
1974	3.8	43.415	0	29.165	75.525	13.965	12.825	22
1975	11.875	31.54	84.455	35.34	97.375	29.64	33.82	10
1976	78.195	41.515	25.84	7.6	2.565	14.25	0	
1977	9.88	29.165	172.9	66.405	28.025	12.35	17.195	
1978	44.46	19.475	113.335	19.285	23.75	13.11	14.535	31
1979	177.84	74.67	50.825	31.255	56.81	54.245	32.585	46
1980	101.65	25.65	135.85	257.545	33.25	5.7	7.6	18
1981	24.225	45.125	53.865	47.5	112.575	90.25	76	
1982	34.2	111.625	38	17.1	47.785	49.685	0	
1983	11.4	79.325	109.725	57.475	72.865	74.29	85.025	

Εικ. 39: Επισκόπηση των ιστορικών στοιχείων.

Ρυθμίσεις

Αν θελήσουμε να ελέγξουμε απόλυτα τους υπολογισμούς, τότε θα πρέπει να επιλέξουμε από το μενού της Εικ. 40 το «Ρυθμίσεις»



Εικ. 40: Μενού για προσομοίωση.

Έτσι θα εμφανιστεί η φόρμα της Εικ. 41, από όπου μπορούμε να ρυθμίσουμε κριτήρια σύγκλισης για το μοντέλο, μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, καθώς και τις παραμέτρους βελτιστοποίησης.

Όπως παρατηρούμε στη φόρμα των ρυθμίσεων, μας δίνεται η δυνατότητα να επέμβουμε στον τρόπο υπολογισμού του μητρώου **b**, καθώς και στην προσομοίωση. Βέβαια, οι σχετικές ρυθμίσεις πρέπει να προηγηθούν του υπολογισμού του μητρώου **b** για να μπορέσουν να λάβουν χώρα οι αλλαγές.

Εικ. 41: Ρυθμίσεις του μοντέλου

Συνολικά οι παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίν. 24: Ρυθμίσεις του μοντέλου

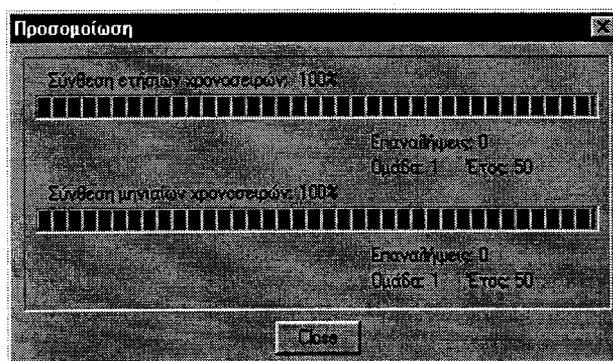
Παράμετρος της φόρμας της Εικ. 41	Η σημασία του πεδίου
Κριτήριο σύγκλισης του αλγόριθμου υπολογισμού του b	Η προσέγγιση της λύσης για το μητρώο b θεωρείται ότι είναι ικανοποιητική όταν η νόρμα αυτού της διαφοράς δύο διαδοχικών λύσεων είναι μικρότερη από την τιμή της παραμέτρου (στο παράδειγμα η τιμή είναι 0.1)
Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων στη ρουτίνα υπολογισμού του b	Ο υπολογισμός του μητρώου b γίνεται επαναληπτικά και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων καθορίζεται από αυτή την παράμετρο. Η εξάντληση των επαναλήψεων ουσιαστικά σημαίνει ότι δεν έχει ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης (στο παράδειγμα η τιμή είναι 100)
Παράμετροι βελτιστοποίησης ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, p$)	Οι παράμετροι αυτές λ_1, λ_2 και λ_3 ουσιαστικά καθορίζουν τη σχετική βαρύτητα της διατήρησης των συνδιασπορών, διασπορών και τρίτων ροπών που επιτυγχάνεται μέσω του μητρώου b · η παράμετρος p καθορίζει τη σημαντικότητα του μέγιστου συντελεστή ασυμμετρίας σε σχέση με το μέσο. Δεν συστήνεται η αλλαγή αυτών των παραμέτρων.
Κριτήριο σύγκλισης του αλγόριθμου υπολογισμού των μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών	Ο αλγόριθμος που εκτελείται για τη σύνθεση των υποπεριόδων (μηνιαίων τιμών) των συνθετικών χρονοσειρών, είναι επαναληπτικός. Κριτήριο τερματισμού των επαναλήψεων είναι η νόρμα των λόγων του αθροίσματος των μηνιαίων τιμών προς τις ετήσιες τιμές μικρότερη από την τιμή του κριτηρίου (στο παράδειγμα η τιμή είναι 2)
Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του αλγόριθμου υπολογισμού μηνιαίων	Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του αλγόριθμου που αναφέρθηκε στην προηγούμενη γραμμή του πίνακα

συνθετικών χρονοσειρών	(στο παράδειγμα η τιμή είναι 50)
Ελάχιστο στοιχείο διαγωνίου του τριγωνικού μητρώου b	Κατά τη διαδικασία εύρεσης αρχικής τιμής του μητρώου b για να προχωρήσει η διαδικασία επίλυσης, γίνεται μια διαδικασία τριγωνοποίησης,, από την οποία ζητούμε οι τιμές της διαγωνίου να είναι μεγαλύτερες η ίσες από την τιμή αυτή της παραμέτρου. Αν βρεθούν μικρότερες, τότε η τιμή τους τίθεται ίση με αυτή της παραμέτρου. (Στο παράδειγμα αυτό έχει την τιμή 0.5)

Οι αλλαγές στις ρυθμίσεις μπορεί να έχουν σοβαρές συνέπειες στη λειτουργία του προγράμματος: π.χ. αν κάποιος θέσει σε κάποια από τις παραπάνω επαναληπτικές ρουτίνες σαν μέγιστο αριθμό επαναλήψεων το 10000 με πάρα πολύ μικρό κριτήριο σύγκλισης, π.χ. $1E-7$, αυτό θα έχει αποτέλεσμα το μοντέλο να λειτουργεί τόσο αργά που να μην είναι σε θέση να ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί ούτε και μετά το πέρας αρκετών ωρών.

Προσομοίωση

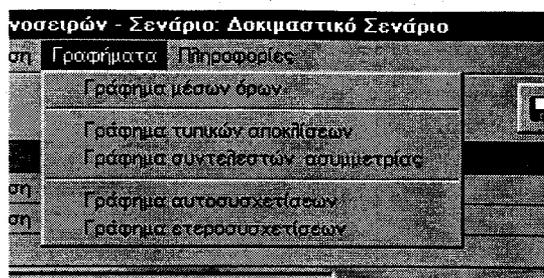
Αφού λοιπόν έχουμε ρυθμίσει το μοντέλο, μπορούμε να προχωρήσουμε στη διαδικασία της προσομοίωσης, δηλαδή της παραγωγής των συνθετικών χρονοσειρών. Έτσι επιλέγουμε το «Προσομοίωση» του μενού της Εικ. 40. Τότε θα εμφανιστεί μια φόρμα της μορφής της Εικ. 42, που θα μας παρουσιάζει την εξέλιξη των υπολογισμών. Εκτός από το ποσοστιαίο (%) μέγεθος της εξέλιξης των υπολογισμών, παρουσιάζονται και ο αριθμός των επαναλήψεων για κάθε κύκλο υπολογισμών, ο αριθμός του τρέχοντος έτους που υπολογίζεται, καθώς και η ομάδα στην οποία ανήκει.



Εικ. 42: Φόρμα για την επίδειξη της εξέλιξης των υπολογισμών

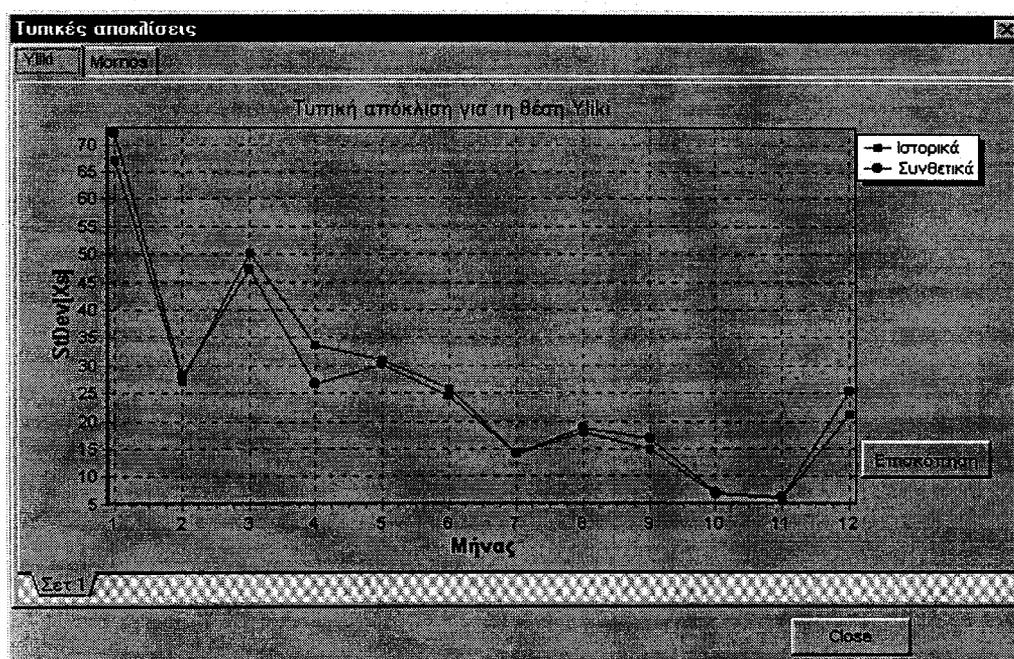
Γραφήματα

Στη θέση του μενού «Γραφήματα» έχουμε τη στήλη όλων των γραφημάτων που είναι απαραίτητα για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων (Εικ. 43).



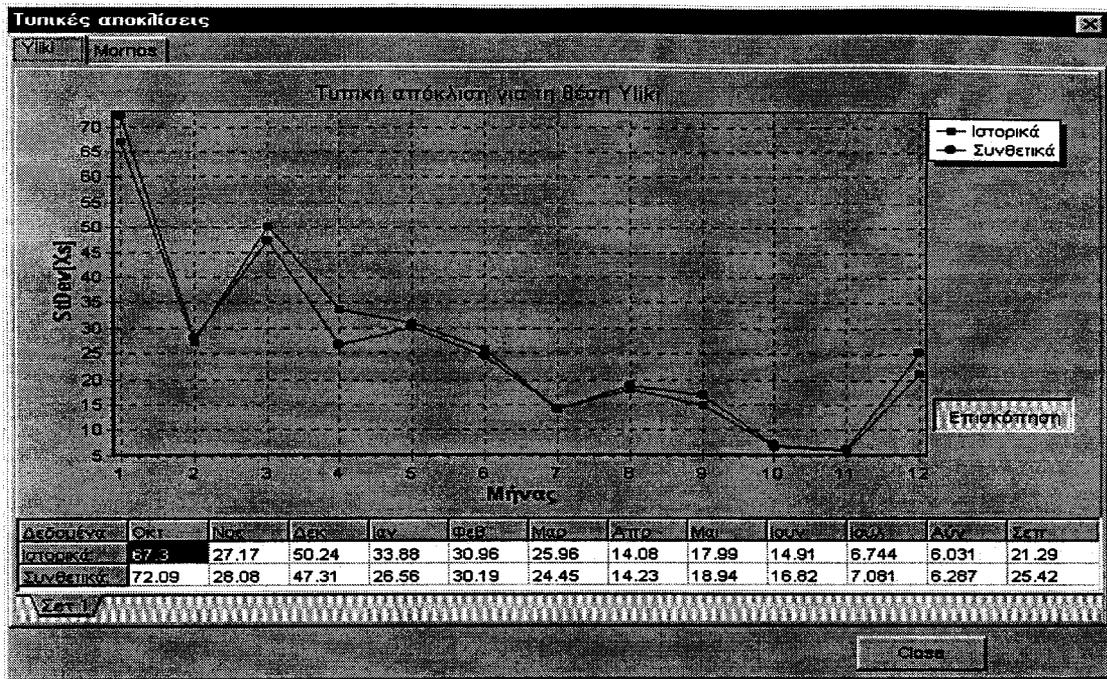
Εικ. 43: Γραφήματα στατιστικών χαρακτηριστικών των αποτελεσμάτων

Σε κάθε γράφημα από τους τύπους γραφημάτων που αναφέρονται στην Εικ. 43 έχουμε μια φόρμα της μορφής της Εικ. 44:



Εικ. 44: Γράφημα τυπικών αποκλίσεων

Με κόκκινη γραμμή παρουσιάζεται η τυπική απόκλιση των συνθετικών χρονοσειρών και με την πράσινη γραμμή η τυπική απόκλιση των ιστορικών. Στο κάτω μέρος της φόρμας έχουμε την επιλογή Σει 1. Αυτό δείχνει ότι παρατηρούμε την πρώτη ομάδα χρονοσειρών. Στο παράδειγμά μας έχουμε επιλέξει μόλις μία ομάδα χρονοσειρών και έτσι δεν εμφανίζεται δεύτερη. Στην περίπτωση που είχαμε δημιουργήσει σενάριο με περισσότερες ομάδες συνθετικών χρονοσειρών, τότε θα είχαμε τη δυνατότητα να επισκοπήσουμε και τις υπόλοιπες ομάδες αποτελεσμάτων. Τέλος αν πατηθεί το πλήκτρο «Επισκόπηση», τότε εμφανίζεται επιπλέον ένα πλέγμα αριθμητικών αποτελεσμάτων που αντιστοιχεί στο παραπάνω διάγραμμα (Εικ. 45).



Εικ. 45: Γράφημα τυπικών αποκλίσεων (Επισκόπηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων)

Αναφορές

- Koutsoyiannis, D., and A. Manetas, Simple disaggregation by accurate adjusting procedures, *Water Resources Research*, 32(7) 2105-2117, 1996.
- Koutsoyiannis, D., Optimal decomposition of covariance matrices for multivariate stochastic models in hydrology, *Water Resources Research* (in press), 1999.

Παράρτημα Γ: Η Βάση δεδομένων της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας

Οι πίνακες που παρατίθενται χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο σενάριο κατά το οποίο δεν συνυπολογίζεται ο περιορισμός που συνεπάγεται από την πραγματική παροχαρακτηριστικότητα των αγωγών και γι' αυτόν τον λόγο η τιμή της παροχαρακτηριστικότητας δεν είναι πραγματική.

Οι πίνακες στο παράρτημα αυτό δεν περιλαμβάνουν λόγω του όγκου τους τις χρονοσειρές βροχής, απορροής και εξάτμισης που παρατίθενται μαζί με τους υπόλοιπους πίνακες στο ηλεκτρονικό αρχείο της βάσης δεδομένων.

Πίνακας node

NAME	ACT	TYPE	MAXSTO	MINVOL	MAXVOL	INITIALV	SUBC_A	MANAGE	TARGETV	X_COORD	Y_COORD	IO	LVS	LEAKAGE
Αθήνα	Y	node						Y	0	476913	4205009			
Βίλιζα	Y	node						Y	0	464000	4238000			
Εύηνος	Y	reservoir	140	27	140	68	349	Y	50	313784	4281690	IOEv5000	LVS_Evin	
Κιθαιρώνας	Y	node						Y	0	440000	4230000			
Κιούρκα	Y	node						Y	0	476000	4230000			
Κλειδί	Y	node						Y	0	450000	4235000			
Κρεμμάδα	Y	node						Y	0	452000	4245000			
Μαραθώνας	Y	reservoir	41	7	41	30	120	Y	40	490820	4224200		LVS_Mara	
Μόρνος	Y	reservoir	770	127	770	747	557.5	Y	700	339718	4267462	IOMo5000	LVS_Morn	L_Mornos
Υλίκη	Y	reservoir	587	0	587	243	2090	Y	200	430000	4258000	IOYI5000	LVS_Ylik	L_Yliki

Πίνακας pipe

NAME	ACTIV	DIRECTION	TYPE	NODE_UP	NODE_DO	INLET_LE	OUTLET_TY	OUTLET_LE	CONST_DI	VAR_DISC	USAGE	C	R	USAGE
Βίλιζα-Κιούρκα	Y	oneway	constflow	Βίλιζα	Κιούρκα	241	constout	227	30	nil		1		1
Εύηνος-Μόρνος	Y	oneway	varflow	Εύηνος	Μόρνος	458	constout	455	27	HD_EvMo		1		1
Κιθαιρώνας-Αθήνα	Y	oneway	constflow	Κιθαιρώνας	Αθήνα	250	constout	50	30	nil		1		1
Κιθαιρώνας-Κλειδί	Y	bidirectional	constflow	Κιθαιρώνας	Κλειδί	250	constout	245	30	nil		1		1

Κιούρκα-Αθήνα	Y	oneway	constflow	Κιούρκα	Αθήνα	227	constout	50	30	nil	1	1
Κιούρκα-Μαραθώνας	Y	oneway	constflow	Κιούρκα	Μαραθώνας	227	constout	223	30	nil	1	1
Κλειδί-Βίλιζα	Y	oneway	constflow	Κλειδί	Βίλιζα	245	constout	241	30	nil	1	1
Κρεμμάδα-Βίλιζα	Y	oneway	constflow	Κρεμμάδα	Βίλιζα	250	constout	241	30	nil	1	1
Κρεμμάδα-Κλειδί	Y	oneway	constflow	Κρεμμάδα	Κλειδί	250	constout	245	30	nil	1	1
Μαραθώνας-Αθήνα	Y	oneway	constflow	Μαραθώνας	Αθήνα	186	constout	50	30	nil	1	1
Μόρνος-Κιθαιρώνας	Y	oneway	constflow	Μόρνος	Κιθαιρώνας	384	constout	350	30	nil	1	1
Υλίκη-Κρεμμάδα	Y	oneway	constflow	Υλίκη	Κρεμμάδα	40	constout	250	30	nil	1	1

Πίνακας HD_ΕνΜο

HEAD	DISCHARGCA
0	0
5	15
15	18.8
25	21.6
35	24.7
45	26.6

Πίνακας Etrans

NAME	ACTIVE	PIPE	OPERATIO	TYPE	INSTCAPACIT	UNITS	FILENAME	C_DISCH	C_ENERGY	P_C_DISCH	P_C_ENERG	PUMP_TARI
Ασωπός	Y	Κρεμμάδα-Κλειδί	pump	constant	4.4	1				30	0.43	DAY
Ασωπός_Φ	Y	Κιθαιρώνας-Κλειδί	pump	constant	0.0001	1				30	0.0001	DAY
Βίλιζα1	Y	Κρεμμάδα-Βίλιζα	pump	constant	5.42	1				30	0.27	DAY
Βίλιζα2	Y	Βίλιζα-Κιούρκα	pump	constant	1.93	1				30	0.1	DAY
Γκιώνα	Y	Μόρνος-Κιθαιρώνας	turbine	variable	8.67	1	Giona	30		30		DAY
Κιούρκα	Y	Κιούρκα-Αθήνα	pump	constant	5.4	1				30	0.51	DAY
Μουρίκι	Y	Υλίκη-Κρεμμάδα	pump	constant	12.32	1				30	0.42	DAY

Πίνακας LVS_Evin

LEVEL	VOLUME	SURFACE
412	0	0
420	0.6	0.197
440	11.1	0.854
460	34.4	1.575
480	74.1	2.419
500	131.4	3.446
512	178.2	4.221

Πίνακας LVS_Mara

LEVEL	VOLUME	SURFACE
186	0	0
195	3.385	1.5
196	3.91	1.57
197	4.49	1.62
198	5.11	1.68
199	5.79	1.73
200	6.51	1.77
201	7.28	1.81
202	8.1	1.85
203	8.98	1.89
204	9.91	1.92
205	10.9	1.96
206	11.95	1.99
207	13.07	2.02
208	14.25	2.05
209	15.5	2.08
210	16.82	2.1
211	18.19	2.13
212	19.64	2.155
213	21.15	2.18
214	22.73	2.2

215	24.4	2.22
216	26.13	2.245
217	27.96	2.265
218	29.88	2.285
219	31.9	2.305
220	34.01	2.32
221	36.22	2.34
222	38.52	2.36
223	40.91	2.38
224	43.41	2.4

Πίνακας LVS_Morn

LEVEL	VOLUME	SURFACE
320	0	0
330	0.65	0.13
340	4.19	0.58
350	14.71	1.53
360	34.13	2.36
370	64.6	3.74
380	112.02	5.75
390	178.92	7.63
400	265.88	9.76
410	375.62	12.19
420	509.84	14.66
430	672.57	17.89
440	872.89	22.18

Πίνακας LVS_Ylik

LEVEL	VOLUME	SURFACE
40	0	0
41	1	1
42	5	3.6
43	10	5.8

44	15	7.4
45	21.7	8.3
46	30	8.8
47	39.5	9.3
48	49	9.7
49	59	10.2
50	69	10.7
51	80	11.3
52	91	11.9
53	103.6	12.5
54	116.6	13.1
55	128.8	13.6
56	142.1	14.1
57	156.2	14.5
58	171	15
59	186.5	15.4
60	202.5	15.8
61	218.8	16.2
62	235.2	16.6
63	252	16.9
64	269	17.3
65	286.3	17.7
66	304.5	18
67	322.9	18.4
68	341.5	18.8
69	360.3	19.2
70	379.4	19.6
71	398.8	20
72	418.7	20.4
73	439.2	20.8
74	460.4	21.2
75	482.3	21.7
76	504.8	22.5
77	527.5	22.8
78	550.3	23.3

Πίνακας target

QUERY	ACTIVE	TYPE	REFERENCE	FAILURE_PRO	PART	CHANGEVALU	INCRCOEFF	SPLITNUMBER
Y	Y	cons	Αθήνα	0.010000000000	1	no	0	0
N	Y	minvol	Μαραθώνας	0.100000000000	1	no	0	0
N	Y	cons	Υλίκη	0.100000000000	1	no	0	0
N	N	minvol	Υλίκη	1	1	no	0	0
N	N	maxvol	Εύηνος	1	1	no	0	0

Παράρτημα Δ: Θεωρητικές εργασίες

Simple disaggregation by accurate adjusting procedures

Demetris Koutsoyiannis and Alexandros Manetas

Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, National Technical University, Athens, Greece

Abstract. A multivariate disaggregation method is developed for stochastic simulation of hydrologic series. The method is based on three simple ideas that have been proven effective. First, it starts using directly a typical PAR(1) model and keeps its formalism and parameter set, which is the most parsimonious among linear stochastic models. This model is run for the lower-level variables without any reference to the known higher-level variables. Second, it uses accurate adjusting procedures to allocate the error in the additive property, i.e., the departure of the sum of lower-level variables within a period from the corresponding higher-level variable. They are accurate in the sense that they preserve explicitly certain statistics or even the complete distribution of lower-level variables. Three such procedures have been developed and studied in this paper, both theoretically and empirically. Third, it uses repetitive sampling in order to improve the approximations of statistics that are not explicitly preserved by the adjusting procedures. The model, owing to the wide range of probability distributions it can handle (from bell-shaped to J-shaped) and to its multivariate framework, is useful for a plethora of hydrologic applications such as disaggregation of annual rainfall or runoff into monthly or weekly amounts, and disaggregation of event rainfall depths into partial amounts of hourly or even less duration. Such real-world hydrologic applications have been explored in this study to test the model performance, which has proven very satisfactory.

1. Introduction

The use of disaggregation techniques in hydrologic applications has become more and more widespread due to the ability of these techniques to increase the time or space resolution of certain hydrologic processes, such as rainfall and runoff. Several disaggregation models have been developed, which can divide known higher-level amounts (e.g., annual) into lower-level ones (e.g., monthly, daily, etc.). The higher-level amounts are usually derived by typical sequential linear models such as autoregressive (AR) or autoregressive moving average (ARMA) or by other types of models. The coupling of sequential models for the higher-level variables with disaggregation models results in a multiple-scale preservation of the stochastic structure of hydrologic processes.

The first developed disaggregation models were multivariate, i.e., performed a simultaneous disaggregation at several sites. Typical examples of such models are those by Valencia and Schaake [1972, 1973], Mejia and Rousselle [1976], Hoshi and Burges [1979], Stedinger and Vogel [1984], Tao and Delleur [1976] and Todini [1980]. These models express the vector containing all unknown lower-level variables as a linear function of the higher-level variables of all sites and some innovation variates. Thus they attempt to reproduce all covariance properties between lower-level variables as well as those between lower-level and higher-level variables among all sites and time steps. This results in a huge number of parameters because of the large number of cross correlations that they attempt to reproduce.

Different procedures reducing the required number of parameters have been developed. The staged disaggregation models [Lane, 1979, 1982; Salas et al., 1980; Stedinger and

Vogel, 1984; Grygier and Stedinger, 1988; Lane and Frevert, 1990] disaggregate higher-level variables at one or more sites to lower-level variables at those and other sites in two or more steps. The condensed disaggregation models [Lane, 1979, 1982; Pereira et al., 1984; Oliveira et al., 1988; Stedinger and Vogel, 1984; Stedinger et al., 1985; Grygier and Stedinger, 1988] reduce the number of required parameters by explicitly modeling fewer of the correlations among the lower-level variables. Stepwise disaggregation schemes [Santos and Salas, 1992; Salas, 1993, p. 19.34] perform the disaggregation always in two parts or two seasons. For example an annual value is disaggregated into 12 monthly values by first disaggregating the annual value into the first monthly and the sum of the remaining 11 months. Then the latter sum is disaggregated into the second monthly value and the sum of the remaining 10 values, and so on until all monthly values are obtained. Salas [1993, p. 19.36] notes that the Santos and Salas step model is very similar to the condensed algorithm of Stedinger et al. [1985].

Another stepwise disaggregation approach was proposed by Koutsoyiannis [1988] (see also Koutsoyiannis and Xanthopoulos [1990]) and further developed by Koutsoyiannis [1992]. This approach, called the dynamic disaggregation model (DDM), at each step disaggregates a given amount into two parts, the variable of the next period and the amount to be allocated (in subsequent steps) across the remaining periods. In this respect, DDM is very similar to the Santos and Salas stepwise disaggregation scheme. However, there are some differences between the two schemes. At each step, DDM uses a nonlinear generation module that disaggregates the given amount into two parts. This module adds notable mathematical complexity, but it is capable of preserving the third moments of the variables, if they are not normally distributed. Apart from that generation module, DDM has another module, which at each step determines the parameters required for the generation. This module is linear and is closely related to a seasonal AR(1)

Copyright 1996 by the American Geophysical Union.

Paper number 96WR00488.
0043-1397/96/96WR-00488\$09.00

(also known as PAR(1)) model. Thus the overall model uses exactly the same parameter set as the PAR(1) model, which involves the minimum number of parameters, significantly lower than direct (all-at-once) disaggregation schemes.

In this paper we present a new method that keeps some ideas of the DDM approach but is simpler. This method initially retains the formalism, the parameter set, and the generation routine of the PAR(1) model. Then it uses an adjusting procedure to achieve the consistency of lower-level and higher-level variables. The adjusting procedure modifies the values generated by the PAR(1) model to preserve the additive property. The idea of adjusting procedures is not new in the literature [see, e.g., Grygier and Stedinger, 1988, 1990; Lane and Frevert, 1990, p. V-22]. However, here we introduce some different procedures that have been proved, both theoretically and empirically, to be accurate in the sense that they preserve certain statistics (and in special cases the complete distribution function) of lower-level variables. Another idea that is used in the present method is repetition: Instead of running the generation routine of the PAR(1) model once for each period, we run it several times and choose that combination of generated values, which is in closer agreement with the known value of the higher-level variable. With this technique we can obtain good approximations of the statistics that are not explicitly preserved by the adjusting procedure. Overall, the three simple ideas of the developed approach, i.e., the PAR(1) formalism, the accurate adjusting procedures, and repetition, have proved very efficient, as will be shown throughout this paper.

The PAR(1) formalism was selected for the sake of parsimony of parameters. Apparently, the technique may also be coupled with other sequential linear models such as PARMA(p, q). In addition, the developed adjusting techniques and the repetition may be useful in other disaggregation models in case they do not explicitly preserve the additive property.

This paper is structured as follows. Section 2 introduces the notation and the general methodology. In section 3, which is the theoretical core of our model, we present three different adjusting procedures. In section 4 we discuss several computational issues for the application of the method. In section 5 we give some results of the method for real-world situations and in section 6 we draw some conclusions. In addition, there are two appendices where we give details of mathematical developments and proofs.

2. Notation and Methodology

We consider a specific higher-level time step or period (e.g., 1 year), denoted with an index $t = 1, 2, \dots$, and a subdivision of the period in k lower-level time steps or subperiods (e.g., 12 months), each denoted with an index $s = 1, \dots, k$. Let a specific hydrologic process (rainfall, runoff, etc.) be defined at n locations specified by an index $l = 1, \dots, n$. We denote this process with the symbols X and Z for the lower- and higher-level time step, respectively. Generally, we use uppercase letters for random variables, and lowercase letters for values, parameters, or constants. Furthermore, we use bold letters for arrays or vectors, and normal letters for their elements. In particular,

- X_s^l lower-level variable at period t , sub-period s and location l ;
- Z^l higher-level variable at period t and location l ;
- X_s vector of lower-level variables of sub-period s at all locations (size n);

X^l vector of lower-level variables of all sub-periods at location l (size k);

Z vector of higher-level variables at all locations (size n).

The vectors Z and X_s are related by the additive property, i.e.,

$$\sum_{s=1}^k X_s = Z \quad (1)$$

To simplify the notation, we can omit the subscript prefix of the higher- and lower-level variables that corresponds to the period t , as generally there is no ambiguity because we refer to a specific period. However, in some cases it is necessary to refer to lower-level variables of other periods that are close to the start or the end of the examined period t , i.e., the periods $t-1$ and $t+1$. In such a case we use the subperiod index 0 for the last subperiod in the previous period and alternatively denote the corresponding lower-level variable as $X_0^l := X_{t-1}^l$. Similarly, we denote the first subperiod of the next period as $X_{k+1}^l := X_{t+1}^l$. Extending this notation, the lower-level variables of the previous period are denoted as $X_{-k+1}^l, \dots, X_{-1}^l, X_0^l$ and those of the next period are denoted as $X_{k+1}^l, X_{k+2}^l, \dots, X_{2k}^l$.

The location index may be viewed in a wide manner; e.g., different values of l may describe different hydrologic processes (such as contemporary rainfall and runoff) at the same location. Also, l may be omitted if we refer to a single-site problem or, more generally, if there is no ambiguity. In that case there is only a scalar higher-level variable Z and a vector of lower level variables $X = [X_1, \dots, X_s, \dots, X_k]^T$, which contains the lower-level variables of a specific period at a single location. Overall, the notation is oriented toward multivariate temporal disaggregation, but it can be easily modified for spatial disaggregation.

We will study in detail in this paper the case where the lower-level variables are related by a contemporaneous seasonal AR(1) (or PAR(1)) model, i.e.,

$$X_s = a_s X_{s-1} + b_s V_s \quad (2)$$

where a_s is a $(n \times n)$ diagonal matrix, i.e., $a_s = \text{diag}(a_s^1, \dots, a_s^n)$; $b_s = [b_s^l]$ is a $(n \times n)$ matrix of coefficients; and $V_s = [V_s^1, \dots, V_s^n]^T$ is a vector of independent (both in time and location) random variates, not necessarily Gaussian. Equation (2) is not a structural constraint of the proposed method but rather is a simplification for mathematical convenience and parsimony of parameters. Higher-order PAR or PARMA can be used instead of (2) if necessary, and a more complex disaggregation model can be formed. However, as was explained above our objective in this study is to build a model as simple and parameter parsimonious as possible, and this objective is better attained by the PAR(1) model. The parameters that this specific model explicitly preserves are (1) the mean values of lower-level variables, i.e., the k vectors $\xi_s = E[X_s]$ of size n each; (2) the variances and lag-zero cross-covariances of lower-level variables, i.e., the k matrices $\sigma_{ss} = \text{Cov}[X_s, X_s] = E[(X_s - \xi_s)(X_s - \xi_s)^T]$ of size $(n \times n)$ each; (3) the lag-1 autocovariances of lower-level variables, i.e., the k vectors (i.e., one for each subperiod) $[Cov[X_s^l, X_{s-1}^l], l = 1, \dots, n] = [E[(X_s^l - \xi_s^l)(X_{s-1}^l - \xi_{s-1}^l)], l = 1, \dots, n]$ of size n each; and (4) the third moments of lower-level variables, i.e., the k vectors $\gamma_s = [E[(X_s^l - \xi_s^l)^3], l = 1, \dots, n]$ of size n each.

In a similar situation Koutsoyiannis [1992] showed that the total number of second-order parameters of this model con-

figuration (i.e., parameter groups of points 2 and 3 above) for all subperiods and locations is $kn(n+3)/2$. Also, he made a comparison with the total number of parameters in other disaggregation schemes, resulting that, for instance, when $k=12$ and $n=3$ the direct (all-at-once), condensed, and staged disaggregation schemes involve a number of parameters twice (for the staged scheme) to 20 times (for the Mejía-Rousselle scheme) more than that of the PAR(1) scheme. We note however, that the parsimony of parameters of the PAR(1) scheme involves some risk of leaving out important parameters of the long-term stochastic structure of the process.

The parameters \mathbf{a}_s and \mathbf{b}_s of (2) are related with parameter groups 2 and 3 above by

$$\begin{aligned} a_s^i &= \text{Cov}[X_s^i, X_{s-1}^i] / \text{Var}[X_{s-1}^i] \\ &= \text{Cov}[X_s^i, X_{s-1}^i] / \sigma_{s-1,s-1}^{\mu} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mathbf{b}_s \mathbf{b}_s^T = \boldsymbol{\sigma}_{ss} - \mathbf{a}_s \boldsymbol{\sigma}_{s-1,s-1} \mathbf{a}_s \quad (4)$$

These equations are extensions for the seasonal model of those for the stationary Markov model given by *Matalas and Wallis* [1976, p. 63]. They can also be obtained by simplifying the equations of the standard PAR(1) model [Salas et al., 1980, p. 381; Salas, 1993, p. 19.31] for diagonal \mathbf{a}_s . The matrix \mathbf{b}_s is obtained from $\mathbf{b}_s \mathbf{b}_s^T$ by decomposition, either triangular or singular value.

Furthermore, the statistics of the variates V_s^i that are needed for the complete determination of (2) are given by

$$E[\mathbf{V}_s] = \mathbf{b}_s^{-1} \{E[\mathbf{X}_s] - \mathbf{a}_s E[\mathbf{X}_{s-1}]\} \quad (5)$$

$$\text{Var}[\mathbf{V}_s^i] = 1 \quad (6)$$

$$\mu_3[\mathbf{V}_s] = (\mathbf{b}_s^{(3)})^{-1} (\boldsymbol{\gamma}_s - \mathbf{a}_s^{(3)} \boldsymbol{\gamma}_{s-1}) \quad (7)$$

where $\mu_3[\mathbf{V}_s]$ is the vector of third central moments of \mathbf{V}_s and the superscript (3) in a matrix indicates that this matrix has to be cubed element by element. Equation (5) indicates that the variables \mathbf{X}_s are not translated to have zero mean, and this happens also with \mathbf{V}_s . Other models assume variables with zero mean and avoid equation (5). However, in our model it is desirable to use the real quantities for \mathbf{X}_s , as certain adjusting procedures require the variables to be in this form (see sections 3.1 and 3.3). Equation (7) is a direct extension of that of the stationary Markov model given by *Matalas and Wallis* [1976, p. 64]. It is appropriate for the seasonal model and does not require the matrix \mathbf{b}_s to be lower triangular.

A case alternative to (2) which has also been examined in this study is the PAR(1) model for some nonlinear transformations of the lower-level variables, such as

$$\mathbf{X}_s^* := \ln(\mathbf{X}_s - \mathbf{c}_s) \quad (8)$$

where \mathbf{c}_s is a vector of parameters to be estimated in a manner that the elements of \mathbf{X}_s^* are Gaussian. Standard methods of the three-parameter lognormal distribution such as those described by *Kite* [1988, p. 72] and *Stedinger et al.* [1993, p. 18.15] (among others) can be utilized to estimate c_s^i for each location. In this case the PAR(1) model is

$$\mathbf{X}_s^* = \mathbf{a}_s \mathbf{X}_{s-1}^* + \mathbf{b}_s \mathbf{V}_s \quad (9)$$

The statistics of interest are similar to parameter groups 1–3 above, but now they are concerned with the transformed lower-level variables \mathbf{X}_s^* . The third moments (group 4) are now replaced with parameters κ_s . Equations (3)–(6) are still valid if

we replace \mathbf{X}_s with \mathbf{X}_s^* . Equation (7) is replaced by the assumption that \mathbf{V}_s is Gaussian (zero third moments).

The models defined by (2) and (8)–(9) are proper for sequential generation of \mathbf{X}_s but they do not take account of the known higher-level variables \mathbf{Z} and apparently are not disaggregation models. What disaggregation models typically do is to incorporate \mathbf{Z} into the model equations and perform a sort of conditional generation using the given values of the higher-level variables. The method presented here is different and much simpler. It consists of the following steps:

1. Use (2) or (8)–(9) to generate directly some $\tilde{\mathbf{X}}_s$ within a period ($s=1, \dots, k$) without reference to the given higher-level variables \mathbf{Z} of that period.

2. Calculate $\tilde{\mathbf{Z}} = \sum_{s=1}^k \tilde{\mathbf{X}}_s$ and the distance $\Delta Z = \|\mathbf{Z} - \tilde{\mathbf{Z}}\|$ considering all sites (see section 4 for details about this distance).

3. Repeat steps 1 and 2 until the distance ΔZ is less than an accepted limit, and choose the final set of $\tilde{\mathbf{X}}_s$ and $\tilde{\mathbf{Z}}$, which has the minimum distance (this step is optional; see section 4).

4. Apply an adjusting procedure to correct the chosen $\tilde{\mathbf{X}}_s$ and obtain \mathbf{X}_s such that $\sum_{s=1}^k \mathbf{X}_s = \mathbf{Z}$.

5. Repeat steps 1–4 for all periods that have given \mathbf{Z} .

An adjusting procedure may be viewed as a transformation or function

$$\mathbf{X}_s = f(\tilde{\mathbf{X}}_s, \tilde{\mathbf{Z}}, \mathbf{Z}, \text{statistics}) \quad (10)$$

which given its arguments returns the correct lower-level variables that satisfy (1). The easiest way to express it is to use n single-site equations, one for each location, which means that in each location the adjustment is done separately. Specific forms of that equation that preserve accurately certain statistics are studied in the next section.

3. Accurate Adjusting Procedures

In this section we will present three adjusting procedures along with their theoretical background. First is the proportional procedure that is appropriate for lower-level variables with gamma distributions that satisfy certain constraints. Second is the linear procedure, which is more general, as it can apply to any distribution and it can preserve the first and second moments regardless of the type of the distribution. Third is the power procedure, which is a modification of the linear one for positive lower-level variables and also incorporates, as a special case, the proportional procedure. Since all the examined procedures apply to each location separately, in this section we will use the single-site notation, omitting the location index for the sake of simplicity. It is emphasized that all the adjusting procedures studied can be used with any disaggregation model that needs adjustment for the variables it generates.

3.1. Preservation of Gamma Marginal Distributions (Proportional Adjusting Procedure)

In a recent paper [Koutsoyiannis, 1994] the following proposition was studied:

Proposition 1. Let $\tilde{\mathbf{X}}_s$ be independent variables with gamma distribution functions and parameters κ_s and λ ($s=1, \dots, k$). Let also \mathbf{Z} be a variable independent of $\tilde{\mathbf{X}}_s$ with gamma distribution and parameters

$$\kappa := \sum_{s=1}^k \kappa_s \quad (11)$$

and λ . Then the variables

$$X_s := \frac{\bar{X}_s}{\sum_{j=1}^k \bar{X}_j} Z \quad s = 1, \dots, k \quad (12)$$

are independent and have gamma distributions with parameters κ_s and λ .

The proof of this proposition is given by Koutsoyiannis [1994, Appendix B]. Note that the variables X_s have the same joint distribution function as their corresponding \bar{X}_s , and they add up to Z . Also, note that the attained result cannot be extended theoretically for gamma variables with different scale parameters or for normal variables even if they obey quite similar restrictions. This proposition gives rise to the adjusting procedure defined by

$$X_s = \frac{Z}{\bar{Z}} \bar{X}_s \quad (13)$$

where \bar{Z} denotes the sum of all \bar{X}_s . This is the well-known proportional adjusting procedure, which has been used in many other disaggregation models [e.g., Grygier and Stedinger, 1988; Lane and Frevert, 1990, p. V-22] because it provides the most natural way of transforming \bar{X}_s into X_s . The contribution of proposition 1 is that it reveals a set of conditions that make the procedure exact in a strict mathematical sense. Apparently, this set of conditions introduces severe limitations, i.e., (1) the variables X_s should be two-parameter gamma distributed, (2) they also should have common scale parameter, which requires that $E[X_s]/\text{Var}[X_s]$ be constant for all subperiods, and (3) all X_s should be mutually independent.

However, the proportional adjustment has been used in a wide range of cases not obeying the above severe limitations, with satisfactory results. Grygier and Stedinger [1988] provide an empirical investigation of its performance, also comparing it with other adjustment schemes. We note that their results may not be directly applicable in our model, which unlike other models does not assume an explicit dependence of lower- to higher-level variables. Koutsoyiannis [1994] after an empirical investigation proposed the following relaxed restrictions in order for the proportional adjusting procedure to give satisfactory results, when applied without explicit dependence of lower- to higher-level variables: (1) the variables X_s have a distribution approaching the two-parameter gamma (e.g., a three-parameter gamma distribution), (2) the statistics $E[X_s]/\text{Var}[X_s]$ are close to each other for different subperiods s , and (3) the variables X_s are correlated with $\text{Corr}[X_{s-1}, X_s]$ not too large (a value as high as 0.60–0.70 is preserved by the procedure without problems). All these relaxed restrictions are satisfied in the case of short-scale (e.g., hourly) rainfall series, and thus the procedure was used for the disaggregation of total amounts of rainfall events into hourly depths by coupling this procedure with a stationary AR(1) model.

3.2. Preservation of Second-Order Statistics in the General Case (Linear Adjusting Procedure)

The second adjusting procedure is based on the following proposition:

Proposition 2. Let \bar{X}_s ($s = 1, \dots, k$) be any random variables with mean values $\xi_s = E[\bar{X}_s]$ and variance-covariance matrix σ with elements $\sigma_{sj} = \text{Cov}[\bar{X}_s, \bar{X}_j] =$

$E[(\bar{X}_s - \xi_s)(\bar{X}_j - \xi_j)]$. Let also Z be a variable independent of \bar{X}_s with mean

$$\xi := E[Z] = \sum_{s=1}^k \xi_s \quad (14)$$

and variance

$$\sigma_{..} := \text{Var}[Z] = \sum_{s=1}^k \sum_{j=1}^k \sigma_{sj} \quad (15)$$

Then the variables

$$X_s := \bar{X}_s + \lambda_s \left(Z - \sum_{j=1}^k \bar{X}_j \right) \quad s = 1, \dots, k \quad (16)$$

have identical mean values and variance-covariance matrix with those of \bar{X}_s , if λ_s is defined properly, that is,

$$\lambda_s := \sigma_{s.}/\sigma_{..} \quad (17)$$

where

$$\sigma_{s.} := \sum_{j=1}^k \sigma_{sj} \quad (18)$$

The proof of this proposition is given in Appendix A. This gives rise to the adjusting procedure defined by

$$X_s = \bar{X}_s + \lambda_s(Z - \bar{Z}) \quad (19)$$

where \bar{Z} denotes the sum of all \bar{X}_s . This procedure will be referred to as the linear adjusting procedure.

It is obvious from (17), (18), and (15) that λ_s ($s = 1, \dots, k$) always add up to unity, which assures the preservation of the additive property by the procedure. Furthermore, as a direct consequence of the preservation of both the additive property and the variance-covariance matrix, $\sigma_{s.}$ equals the covariance of the lower-level variable X_s with the higher level variable Z . Indeed, by multiplying both sides of

$$Z - \xi = \sum_{j=1}^k (X_j - \xi_j) \quad (20)$$

by $(X_s - \xi_s)$ and then taking expected values, we obtain that the right-hand part of (18) equals $\text{Cov}[X_s, Z]$. Thus equation (17) may be alternatively written as $\lambda_s = \text{Cov}[X_s, Z]/\text{Var}[Z]$.

The linear adjusting procedure appears also in other disaggregation models [e.g., Grygier and Stedinger, 1988; Lane and Frevert, 1990, p. V-22], but with coefficients λ_s defined in terms of the standard deviations of the lower-level variables rather than covariances with the higher-level variables, as in (17). Using our notation with σ_{ss} denoting the variance of the lower-level variable X_s and $\sqrt{\sigma_{ss}}$ denoting its standard deviation, the adjusting coefficients used by those models, which are in proportion to the standard deviation, are

$$\lambda_s = \sqrt{\sigma_{ss}} / \sum_{j=1}^k \sqrt{\sigma_{jj}} \quad (21)$$

The difference between (21) and (17) is more obvious when X_s are independent, in which case (17) yields

$$\lambda_s = \sigma_{ss} / \sum_{j=1}^k \sigma_{sj} \quad (22)$$

That means that the adjusting coefficients λ_s for independent variables are proportional to the variances, not to the standard deviations. Interestingly, a result similar to (22) is obtained in another situation by the approach of *Pereira et al.* [1984]. This situation is concerned with the correction of negative flows, which are possibly generated by disaggregation models. *Pereira et al.* [1984] proposed an adjusting scheme based on the minimization of $\sum_{j=1}^k (X_j - \bar{X}_j)^2 / \sigma_{jj}$ (equation (21) of their paper). It can be shown that the solution of this problem results in adjustments proportional to the variances for those variables that are greater than zero.

We emphasize, though, that our linear adjustment scheme uses the coefficients λ_s as defined by (17) and not those given by (22). The latter are correct only in the special (and unusual) case that the lower-level variables are independent. Furthermore, we prove in Appendix A that the coefficients λ_s given by (17) are the only ones that preserve the variance-covariance matrix σ .

The linear procedure with adjusting coefficients defined by (17) is very general and can be applied regardless of the distribution function or the covariance structure of X_s . It preserves both the mean values and the variance-covariance matrix of the lower-level variables. Notably, the procedure involves only linear transformations of the variables, as (19) is linear. This leads to the preservation of the complete multivariate distribution function of the lower-level variables in single-site problems, if they are Gaussian. Indeed, if the higher-level variable Z and the initial lower-level variables \bar{X}_s have been generated with Gaussian distribution, then the adjusted variables will also have Gaussian distribution. Since the multivariate Gaussian distribution is completely determined by its mean values and the variance-covariance matrix, which are both preserved by the procedure, the complete multivariate distribution function will be preserved.

We clarify that the procedure must be applied for the real higher- and lower-level variables in order for (14) and (15) to be valid. If transformations (such as logarithmic) are applied to the variables, then the inverse transformation must be applied before the procedure is used.

In the above presentation of the procedure, we have not made any assumption about the covariance structure of the lower-level variables, which can be any kind. In the general case the procedure, as a stand-alone one, needs the covariances of the lower-level variables, with the higher-level variable to be specified. The historical covariances may be used for that purpose. However, if we assume a particular covariance structure of the lower-level variables, the covariances can be calculated using this structure, and there is no need to consider them as extra parameters estimated from the historical data. This is our case, since for the entire disaggregation scheme we have assumed that the covariance structure is described by a PAR(1) model. The independent parameters in the PAR(1) model are the lag-1 covariances only ($\sigma_{s,s-1}$). Any other covariance σ_{sj} for $j > s + 1$ can be computed by combining lag-1 covariances, i.e., using

$$\sigma_{sj} = \frac{\sigma_{s,s+1}\sigma_{s+1,s+2} \cdots \sigma_{j-1,j}}{\sigma_{s+1,s+1} \cdots \sigma_{j-1,j-1}} \quad (23)$$

which is consequence of the PAR(1) model. Similar (but more complex) relations can be written for other sequential models. After determining all σ_{sj} , we use (18) to determine the covariances $\sigma_{s..}$. If the PAR(1) model is a good choice, i.e., represents well the covariance structure, then the covariances $\sigma_{s..}$ will add up to the historical variance of the higher-level variable. Nevertheless, the procedure utilizes not the covariances $\sigma_{s..}$ but their ratios to $\sigma_{..}$, which are not anticipated to be seriously affected by a possible poor representation of the process by the PAR(1) model. Furthermore, once λ_s are determined by (17) with $\sigma_{..}$ determined as the sum given in (15), they will add up to unity even if there is some departure between $\sigma_{..}$ and the historical variance of the higher-level variable.

3.3. Modification for Positive Lower Level Variables (Power Adjusting Procedure)

A weakness of the linear procedure is that it may result in negative values of lower-level variables as we can observe in (19), while most hydrological values must be positive. The proportional procedure always results in positive variables, but as we have discussed above, it is strictly exact only in some special cases. Here we will combine both procedures to form a third one, which must (1) result in positive values only, (2) be identical to the proportional procedure if the related constraints are satisfied, and (3) be identical to the linear procedure in some area and preferably in the neighborhood of mean values, i.e., near $(X_s, Z, \bar{Z}) = (\xi_s, \xi_s, \xi_s)$.

We observe that both procedures 1 and 2 can be written in a common form

$$\frac{X_s}{\bar{X}_s} = f_s \left(\frac{Z}{\bar{Z}}, \frac{\bar{Z}}{\bar{X}_s} \right) \quad (24)$$

where

$$f_s(u, w) = u/w \quad (25)$$

for the first procedure, and

$$f_s(u, w) = 1 + \lambda_s(u - w) \quad (26)$$

for the second procedure.

By analogy we set for the new procedure

$$f_s(u, w) = u^{\mu_s} / w^{\nu_s} \quad (27)$$

where μ_s and ν_s are parameters to be estimated. This equation always results in positive lower-level values and it is more general than (25). If the lower-level values are independent and

$$\xi_s / \sigma_{ss} = \xi_s / \sigma_{..} \quad (28)$$

then consistency with (25) demands $\mu_s = \nu_s = 1$. To examine the consistency with (26), we linearize (27) in the neighborhood of the means, taking the first three terms of its Taylor series about the point $(u, w) = (1/\eta_s, 1/\eta_s)$, where $\eta_s = \xi_s/\xi_s$:

$$\begin{aligned} f_s(u, w) &\approx 1/\eta_s^{\mu_s - \nu_s} + (\mu_s/\eta_s^{\mu_s - \nu_s - 1})(u - 1/\eta_s) \\ &\quad - (\nu_s/\eta_s^{\mu_s - \nu_s - 1})(w - 1/\eta_s) \\ &\approx (1/\eta_s^{\mu_s - \nu_s})(1 - \mu_s + \nu_s + \mu_s \eta_s u - \nu_s \eta_s w) \end{aligned} \quad (29)$$

By comparison of (29) with (26) we directly obtain

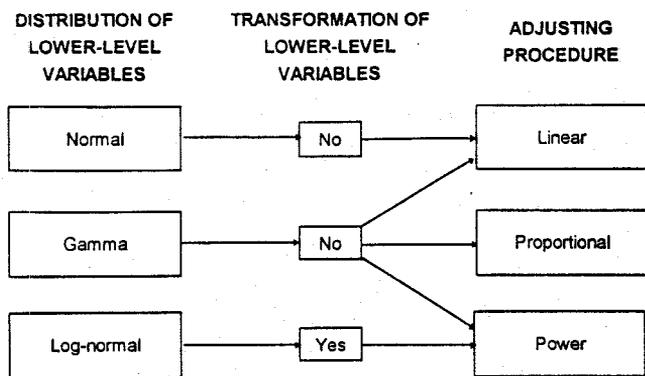


Figure 1. Suitability of adjusting procedures for the most common types of marginal distribution of the lower-level variables.

$$\mu_s = \nu_s = \lambda_s / \eta_s \tag{30}$$

For independent lower-level variables satisfying (28), (30) becomes

$$\mu_s = \nu_s = \frac{\lambda_s}{\eta_s} = \frac{\sigma_s \xi_s}{\sigma_{..} \xi_s} = \frac{\sigma_{ss} \xi_s}{\sigma_{..} \xi_s} = 1 \tag{31}$$

as was required. Hence

$$f_s(u, w) = (u/w)^{\lambda_s/\eta_s} = (u/w)^{(\sigma_s/\sigma_{..})(\xi_s/\xi_s)} \tag{32}$$

Finally, the adjusting procedure, which will be referred to as power adjusting procedure, is

$$X_s = \bar{X}_s (Z/\bar{Z})^{\lambda_s/\eta_s} = \bar{X}_s (Z/\bar{Z})^{(\sigma_s/\sigma_{..})(\xi_s/\xi_s)} \tag{33}$$

This adjusting procedure does not preserve the additive property at once. Thus its application must be iterative, until the calculated sum of the lower-level variables are equal to the given Z. Due to the iterative application and the approximations made for its development, the procedure is not exact in strict sense, except for special cases. However, the power adjusting procedure may be a useful approximate generalization of the proportional procedure retaining the advantage of returning positive values.

In case that X_s and Z have lower bounds c_s and c (≠ 0), respectively, (33) can be directly modified to

$$X_s - c_s = (\bar{X}_s - c_s) \left(\frac{Z - c}{\bar{Z} - c} \right)^{\lambda_s/\eta_s} \tag{34}$$

with η_s now defined as η_s = (ξ_s - c_s) / (ξ_s - c). Interestingly, if we take logarithms in (34) and denote X_s^{*} = ln(X_s - c_s), Z^{*} = ln(Z - c), etc., we obtain

$$X_s^* = \bar{X}_s^* + \lambda_s^* (Z^* - \bar{Z}^*) \tag{35}$$

with

$$\lambda_s^* := \frac{\lambda_s}{\eta_s} = \frac{\sigma_s \xi_s - c}{\sigma_{..} \xi_s - c_s} \tag{36}$$

Equation (35) will be referred to as linearized form of the power adjusting procedure. We must emphasize that λ_s^{*} depends on the moments (first and second order) of the untransformed variables and not those of the transformed variables. In case that the lower-level variables are assumed lognormal, the following equations of the literature [e.g., Bras and Rodriguez-

Iturbe, 1985, p. 121] can be used to determine the moments of the untransformed values given those of the transformed ones:

$$\xi_s - c_s = \exp(\xi_s^* + \sigma_{ss}^*/2) \tag{37}$$

$$\sigma_{sj} = \exp[\xi_s^* + \xi_j^* + (\sigma_{ss}^* + \sigma_{jj}^*)/2][\exp(\sigma_{sj}^*) - 1] \tag{38}$$

(where (38) is valid also for j = s). Then to evaluate λ_s^{*}, we calculate σ_{ss}^{*}, σ_{..}^{*}, and ξ_s^{*} from (18), (15), and (14), respectively.

4. Practical Issues

4.1. Selection of Adjusting Procedure

Selection of the appropriate adjusting procedure depends on the type of the distribution function of the lower-level variables (see Figure 1). For normal variables the best choice is the linear procedure, which preserves the entire multivariate normal distribution. If negative values are meaningless, any generated negative value is either rejected (and the generation repeated) or set equal to zero. In the latter case the produced error is corrected by reapplying any of the adjusting procedures. Particularly, if the linear procedure is chosen for that correction, it will require some iterations because each time it is executed it results again in a negative value. The iterations stop when the resulting negative value is very close to zero and can be neglected. The power adjusting procedure is also iterative, as was explained in the previous section. On the other hand, the proportional adjusting procedure performs the correction without iterations.

For two-parameter or three-parameter gamma distributed variables, all three procedures can be used. For such variables we have avoided approximate transformations, such as the Wilson-Hilferty, once our model can handle explicitly the skewness coefficients of the variables without transformations. If the constraints of the proportional adjusting procedure are satisfied (even in the relaxed version), then this procedure is the best and simplest choice. Otherwise, we can use one of the other procedures. The linear adjustment is a good choice if the probability of generating negative values is adequately small, which happens if the coefficients of variation of all variables are relatively low. The power adjusting procedure has no limitations and will work in any case. Its weaknesses are that it is not exact in a strict sense and that it requires iterations to fulfill the additive property and thus is slower than the other procedures.

For lognormal variables one could follow the same method as in the case of gamma variables and use either the linear or the power procedure. However, it is more reasonable to use the logarithmic transformation of variables and perform the generation of transformed variables. In that case we use the power procedure in its linear form (35).

Finally, for any other type of distribution, we can proceed as in the closest of the above three cases, entrusting the PAR(1) model the task to generate random variables from that specific distribution.

4.2. Repetition and Relevant Criteria

Until now we have not examined the preservation of the skewness of the variables, nor the cross-correlation coefficients among variables of different locations. The reason is that they are not preserved in a strict sense by the studied adjusting procedures, apart from very special cases. For example, the proportional procedure preserves the skewnesses for two-parameter gamma variables (as well as the entire distribution functions) if the relevant constraints are satisfied. Also, the

linear procedure preserves zero skewnesses. It can be shown that the cross correlations are preserved only in two extreme cases: (1) if the variables of different locations are independent (zero cross correlations) and (2) if the variables of different locations are fully dependent (all cross correlations equal to unity). In the general case the adjusting procedures give some approximations of these statistics, which tend to be lower than the correct values and may not be adequate. Specifically, if we consider the linear adjusting procedure given by (19), we observe that the initial variable \bar{X}_s will have the correct skewness for the subperiod s . The term $\lambda_s(Z - \bar{Z})$ will have much lower skewness as implied by the central limit theorem (in fact, this term is a linear combination of $2k$ variables X_s and \bar{X}_s). Thus the sum of the terms \bar{X}_s and $\lambda_s(Z - \bar{Z})$ will have skewness coefficient smaller than that of \bar{X}_s (consider again the central limit theorem).

However, we can improve the approximation of these statistics by repetition. The idea behind repetition is that of conditional sampling. The disaggregation problem may be viewed as the problem of generating vectors of lower-level variables \mathbf{X}_s conditional on a given vector of higher-level variables \mathbf{Z} such that $\sum_{s=1}^k \mathbf{X}_s = \mathbf{Z}$. An analytical solution to that problem would be the determination of the conditional distribution function

$$F\left(\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_k \mid \sum_{s=1}^k \mathbf{X}_s = \mathbf{Z}\right)$$

and the sampling of \mathbf{X}_s from that distribution. Such a solution is possible in limited simple cases only. Another solution is the repetitive generation of \mathbf{X}_s from their unconditional joint distribution function until their sum is equal to the given \mathbf{Z} . This apparently would require an infinite number of repetitions. The proposed alternative is to combine conditional sampling with adjusting, that is to generate \mathbf{X}_s from their unconditional joint distribution function until the error in the additive condition is small and to apply an adjusting procedure to allocate this error among the different subperiods. We anticipate that the smaller this error is, the lower is the bias in the statistics that are not explicitly preserved by the adjusting procedure. For the hypothetical case that the error is zero for all locations, no bias would be introduced to either the skewness coefficients or the cross-correlation coefficients among different locations.

Here we have adopted a very simple repetition scheme as described in section 2. This method has been proven efficient, as will be shown in section 5, where we give some indication of its performance. For each period we perform an unspecified number of generations through the PAR(1) model until the distance $\Delta Z := \|\mathbf{Z} - \bar{\mathbf{Z}}\|$ drops below a specified tolerance level. The tolerance level depends on the desired accuracy of the results. The lower the tolerance level is the greater is the accuracy of the results and, also, the number of repetitions. To avoid a huge number of repetitions for some periods, it is advisable to set also a maximum allowed number of repetitions.

The distance ΔZ can be defined as the Euclidean norm

$$\Delta Z = \sum_{l=1}^n (Z^l - \bar{Z}^l)^2 \quad (39)$$

However, it is preferable to determine the distance in a manner dimensionless and independent of the number of locations, such as

$$\Delta Z = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \frac{|Z^l - \bar{Z}^l|}{\sqrt{\text{Var}[Z^l]}} \quad (40)$$

which was finally used in our model.

Another problem that is met in almost all disaggregation models concerns the preservation of the correlation coefficient of the first variable of a period with the last variable of the previous period. This problem was first reported by Lane [1980, 1982] and discussed by Stedinger and Vogel [1984], while contributions to overcome it have been made by Lin [1990] and Koutsoyiannis [1992]. In our disaggregation method we do not use statistics such as lagged covariances between higher-level and lower-level variables, which are generally responsible for this problem [Stedinger and Vogel, 1984]. However, we still expect to have this problem. The situation with our method is the following: When we start the generation at the period t , we know the lower-level variables of all subperiods of the period $t - 1$. Then we use the lower-level variables of the last subperiod k of period $t - 1$ to generate with the PAR(1) model the lower-level variables of the first subperiod of period t . At this phase the correlation between these lower-level variables is preserved. However, application of the adjusting procedure affects only the lower-level variable of period t , thus introducing bias to its correlation with the variable of period $t - 1$. This bias may be transferred to the neighboring subperiods as well, but with a smaller magnitude. Repetition and minimization of the distance ΔZ is a simple solution to this problem also, although more sophisticated procedures could be formulated. In section 5 we will see that this problem is the most difficult to fix among the other problems discussed above.

4.3. Problems Associated With the PAR Model

There are two well-known potential problems associated with the PAR(1) model (as well as any other linear model): the difficulties in decomposition of the matrix $\mathbf{d}_s = \mathbf{b}_s \mathbf{b}_s^T$, and the potentially high coefficients of skewness of the auxiliary variables V_s . Here both problems have been fixed by weakening the off-diagonal elements of the variance-covariance matrix. Such a method is appropriate for the decomposition problem and can also fix the skewness problem because skewness coefficients are proportional to the inverse of matrix \mathbf{b}_s^2 (see equation (7)). Our method adapts an idea by Mejía and Millán [1974] quoted by Bras and Rodríguez-Iturbe [1985, p. 98]. Their idea is to strengthen the diagonal of the matrix by repeatedly adding a positive number (equal to the absolute value of the most negative eigenvalue) to each diagonal element of $\mathbf{b}_s \mathbf{b}_s^T$, until the modified matrix is positive definite.

Before describing our method to remedy these problems, we must quantify the requirements. For the first problem it is well known that \mathbf{d}_s must be positive semidefinite. For the second problem we must set an accepted upper bound to the coefficient of skewness of the auxiliary variables V_s . To this aim, we recall that in a finite sample of size N the coefficient of skewness C_s is upper bounded [Wallis et al., 1974; Kirby, 1974; Todini, 1980] by

$$C_{s_{\max}} = \frac{N-2}{\sqrt{N-1}} \approx \sqrt{N} \quad (41)$$

Thus an appropriate acceptable upper bound for the model would be

$$C_{s_{\text{acc}}} = \varepsilon C_{s_{\max}} \quad (42)$$

where $0 < \varepsilon < 1$ (e.g., $\varepsilon = 0.5-0.75$). A weakness of this bound is its dependence on the size, N of the sample that will be generated. However, it is sufficiently justified while any other bound would be arbitrary.

Now we can proceed to the algorithm of the method, which has the following steps:

1. Select a constant ε and calculate the accepted upper bound of the skewness coefficients of the auxiliary variables using (41) and (42) for N equal to the size of the synthetic sample that will be generated.
2. Select a constant ϕ close to (and less than) 1, e.g., $\phi = 0.99$.
3. Compute the eigenvalues of \mathbf{d}_s . If any eigenvalue is negative (which means that \mathbf{d}_s is not positive semidefinite), proceed to step 4; otherwise go to step 5.
4. Multiply all the off-diagonal items of \mathbf{d}_s by the constant ϕ and return to step 3.
5. Calculate \mathbf{b}_s using the singular value decomposition.
6. Calculate the skewness coefficients of V_s using (7). If any coefficient is greater (in absolute value) than the accepted bound, then return to step 4; otherwise go to step 7.
7. Done.

The singular value decomposition (step 5) has been preferred because it generally results in lower coefficients of skewness than triangular decomposition. We emphasize that the method does not modify the variances nor the coefficients of skewness of the lower-level variables. However, if step 4 is executed even once, the method results in a reduction of the lag-zero cross correlations between variables of different locations, but this is unavoidable. In our applications this happened very rarely, and when it happened, the problem was usually resolved in two to four iterations, which means an insignificant 2-4% reduction in cross correlations.

4.4. Random Number Generation

The model incorporates numerous exact random number generators, avoiding the use of approximate generators (such as the one based on the Wilson-Hilferty transformation). Thus for normal (and log-normal) variables the polar coordinates exact algorithm is used [Papoulis, 1990, p. 266]. For gamma variables we have used the Whittaker [1973] exact algorithm. We have also developed (see Appendix B) a new exact algorithm for the gamma distribution, which is very efficient, especially for very high coefficients of skewness. We note that both algorithms for gamma distribution are exact only for the variables that are directly generated, in our case the auxiliary variables V_s . This means that the strict exactness is lost when we add several variables to determine X_s . For the latter the model manages to preserve the first three moments and gives adequate approximations of the distribution function (see Figure 3). An alternative to preserve exactly the distribution of X_s is to use another class of models such as gamma autoregressive (GAR) or periodic gamma autoregressive (PAGAR, PM-GAR) models. Such models have theoretically studied for single-site stationary processes [Lawrance and Lewis, 1981] and single-site periodic processes [Fernandez and Salas, 1986] with gamma marginal distributions and have been applied for modeling of streamflows [e.g., Fernandez and Salas, 1990]. To the authors' knowledge, similar models have not been constructed for multivariate processes (for example, Salas [1993, pp. 19.22, 19.27] includes these models only in the sections about modeling of single time series), and thus they were not imple-

mented in our model that is oriented toward multivariate applications.

5. Applications

In this section we present three applications of the model indicating its performance in preserving the statistics of interest. Application 1 is involved with the simulation of monthly rainfall at three rain gauges, Aliartos, Mouriki, and Kallithea, located in the Lake Iliki basin near Athens, Greece. The mean annual rainfall depth for the three rain gauges ranges from about 420 mm to 610 mm, and the mean monthly distribution has a peak at December ranging from 70 to 100 mm and a minimum at July or August around 5 mm. The hydrologic year for this region is considered to start on October 1 (thus month 1 in Figure 2 is October). In the summer months the marginal distribution of rainfall is quite skewed (Figure 2b). The monthly cross-correlation coefficients reach a value of 0.8 for autumn and spring months (Figure 2d) while the lag-1 autocorrelation coefficients are low as usual for monthly rainfall (Figure 2c).

For this application we have adopted the gamma distribution function for both annual and monthly rainfall depths, an assumption consistent with the data (as verified by statistical tests and empirically; see example in Figure 3). We generated 8000 years of synthetic annual rainfall for the three rain gauges using a multivariate AR(1) model and then we disaggregated it into monthly amounts. The specific assumptions for the disaggregation are summarized in Table 1. To explore the two different model modes we performed two runs of the model, one without repetition (case 1.1) and one with repetition (case 1.2). In addition, we performed a run of the PAR(1) model without disaggregation for the sake of comparison (case 1.3). Some resulting statistics of the synthetic data for all three cases are depicted in Figure 2 in comparison with those of historical data. We observe that the model, even without repetition, approaches acceptably the statistics of interest. The model performance in preserving the coefficients of skewness and the cross-correlation coefficients is improved when we use repetition. Generally, the performance of the model with repetition is very close to that of the typical PAR(1) model (without disaggregation), which is a standard valid model for such purposes. Furthermore, in Figure 3 we compare graphically the empirical distribution of synthetic data for one location and one subperiod (March) with the corresponding empirical distribution of historical data and the assumed theoretical gamma distribution function. The results of the comparison are satisfactory. Notable is the reasonable behavior of the synthetic series at the tails, e.g., at probabilities of exceedance or non-exceedance less than 5% (or normalized values higher than 1.65 and less than -1.65, respectively). A departure appearing at the very end of the upper tail, i.e., at normalized value 3.66 (corresponding to empirical exceedance probability 1/8000), is caused by one point only, whose value is about 500 mm (the maximum generated value). The second in order point (corresponding to empirical exceedance probability 2/8000 and normalized value 3.48) is in well agreement with the theoretical distribution. The probability that one out of 8000 March rainfall depths exceeds or equals 500 mm was theoretically estimated to about 0.25, which means that it is not so unlikely to have one generated value of 500 mm.

Application 2 is involved with the simulation of monthly discharge of the river Nile at Aswan (one location). In a similar

situation, *Todini* [1980] studied this case thoroughly, using 105 years of naturalized discharges. His main objective was to preserve the skewness of monthly synthetic data generated by disaggregation models. From the tables and figures of that study we extracted the statistics of interest for our model. The mean monthly distribution of discharge has a peak of about 23,000 m³/s at September and a minimum of about 1,600 m³/s at May. The hydrologic year is considered to start on July 1 (thus month 1 in Figures 4 and 5 is July). During the months of low flows the coefficients of skewness are high, exceeding 2.0 for April and May (Figure 4b). The monthly lag-1 autocorrelation coefficients are very high, reaching a value of 0.939 for February and March (Figure 4c). As in the previous application, we have adopted the gamma distribution function and the linear adjusting procedure (see Table 1). We generated 10,000 years of synthetic annual and then monthly discharges for three cases, one by disaggregation without repetition (case 2.1), one by disaggregation with repetition (case 2.2), and one without disaggregation (for comparison; case 2.3). As depicted in Figure 4, the model performance is as satisfactory as in application 1. Repetition improves the model performance in preserving skewness (Figure 4b). Also, it reduces the departure of the synthetic value of the first lag-1 autocorrelation coefficient from the historical value (Figure 4c, at month 1), while increasing the departure from the historical value in month 2. However, this departure is still apparent in Figure 4c, while beyond the third subperiod the lines that represent the historical and synthetic values are indistinguishable. In a similar situation, *Koutsoyiannis* [1992, Figure 4] found after a numerical investigation that a value of this autocorrelation coefficient close to 0.5 is the most difficult to preserve, whereas values closer to zero or 1 are approximated better. Note that in application 2 the first lag-1 autocorrelation coefficient is about 0.5.

To explore the model performance under the logarithmic transformation of variables and the power adjusting procedure, we made another application (application 3; see Table 1), again for the Nile River at Aswan. This is similar to application 2 except that it assumes lognormal distribution of lower-level variables, uses the transformation (8), and applies the power adjusting procedure. This application must be viewed not as a real-world application but rather as an exercise of our method under some special conditions. As we did not have the historical record of discharges available, we used the method of moments to obtain the necessary statistics of the logarithms of discharges. For subperiods 2 and 3, whose skewnesses were almost zero or slightly negative, we set skewness equal to a small positive value (0.01). In Figure 5 we present the statistics of the logarithms of the generated data (8000 years) versus those of historical data. We observe that the disaggregation model without repetition does not perform as well as in the previous two applications. The reason for this lower achievement is the feature of the power adjusting procedure, which is not strictly exact, as was explained above. However, this situation is greatly improved when we use repetition, in which case we achieve performance similar to the previous application.

In conclusion, the above applications indicate a reasonable performance of the model in reproducing summary statistics and marginal distribution functions of the processes examined. We note, though, that only model verification was done; not validation. For example, the behavior of synthetic series in reproducing long-term droughts was not examined.

Finally, we refer to *Koutsoyiannis* [1994] for an application of a special case of the model using the proportional adjusting

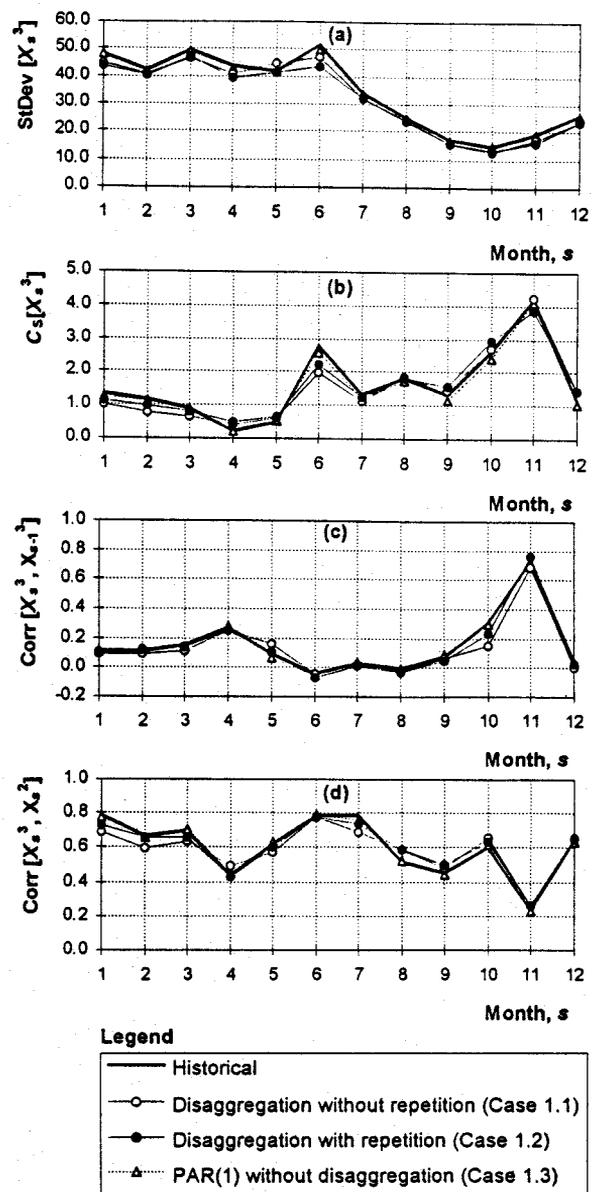


Figure 2. Comparison of various statistics of historic and generated monthly rainfall data at the Iliki basin (application 1; simulation period is 8000 years): (a) standard deviation for location 3, (b) coefficient of skewness for location 3, (c) lag-1 autocorrelation coefficient for location 3, and (d) lag-zero cross-correlation coefficient for locations 2 and 3.

procedure. This application is concerned with short-scale (hourly), one-dimensional temporal disaggregation of rainfall with J-shaped gamma distribution of lower-level variables.

6. Concluding Remarks

The developed disaggregation method is based on three simple ideas that have been proven effective. First, it starts using directly a sequential PAR(1) model and keeps its formalism and parameter set, which is the most parsimonious. This model is run for the lower-level variables without any reference to the known higher-level variables. Second, it uses accurate adjusting procedures to allocate the error in the additive property, i.e., the departure of the sum of lower-level

Table 1. Summary of Characteristics of the Model Applications

Case	Simulation Period, years	Assumed Marginal Distribution	Transformation Type	Adjusting Procedure	Procedure for Correction of Negative Values	Maximum Allowed Distance ΔZ^*	Maximum Allowed Repetitions
				<i>Application 1</i>			
1.1	8 000	gamma	none	linear	linear	...	1
1.2	8 000	gamma	none	linear	linear	0.4	1000
1.3	8 000	gamma	none	...	not applied
				<i>Application 2</i>			
2.1	10 000	gamma	none	linear	linear	...	1
2.2	10 000	gamma	none	linear	linear	0.01	3000
2.3	10 000	gamma	none	...	not applied
				<i>Application 3</i>			
3.1	8 000	lognormal	logarithmic	power	not necessary	...	1
3.2	8 000	lognormal	logarithmic	power	not necessary	0.0007	3000

Application 1 is a simulation of rainfall data from three rain gauges in the Iliki basin, Greece (historic record length, 38 years). Applications 2 and 3 simulate Nile River discharge at Aswan (historic data adapted from 105-year record of *Todini* [1980]).

*Following a previous version of the program, ΔZ was calculated in these applications by the expression $\Delta Z = \sum_{t=1}^T |Z^t - \bar{Z}^t|/Z^t$ instead of the more appropriate expression (40). The different order of magnitude of ΔZ in these three applications is due to the different magnitudes of standard deviations of the higher-level variables.

variables within a period from the corresponding higher-level variable. They are accurate in the sense that they preserve explicitly certain statistics of lower level variables (and in special cases the complete distribution). Three such procedures have been developed and studied in this paper both theoretically and empirically. Third, it uses repetition in order to improve the approximations of statistics that are not explicitly preserved by the adjusting procedures.

The model, owing to the wide range of probability distributions it can handle (from bell-shaped to J-shaped) and to its multivariate framework, is useful for a plethora of hydrologic applications such as disaggregation of annual rainfall or runoff into monthly or weekly amounts, or disaggregation of event rainfall depths into partial amounts of hourly or even less duration. Such real-world hydrologic applications have been explored in this study to test the model performance, which has been proven satisfactory.

The main advantages of the model are the simplicity, parsimony of parameters, and mathematical and computational convenience (due to the simplicity of equations and the reduc-

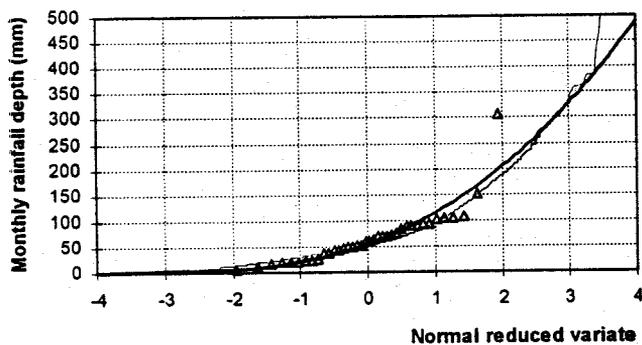


Figure 3. Theoretical gamma distribution function (thick solid line) and empirical distribution functions of historic data (triangles) and synthetic data obtained by disaggregation with repetition (thin line) for application 1 (case 1.2; simulation period is 8000 years), location 3, and subperiod 6.

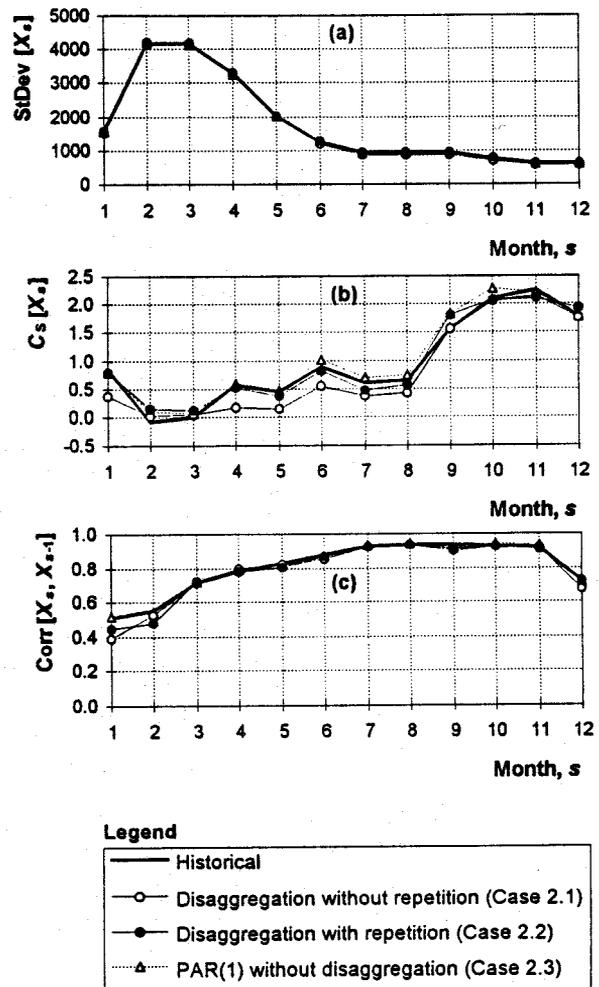


Figure 4. Comparison of various statistics of historic and generated monthly discharges for the Nile River (application 2; simulation period is 10,000 years): (a) standard deviation, (b) coefficient of skewness, and (c) lag-1 autocorrelation coefficient.

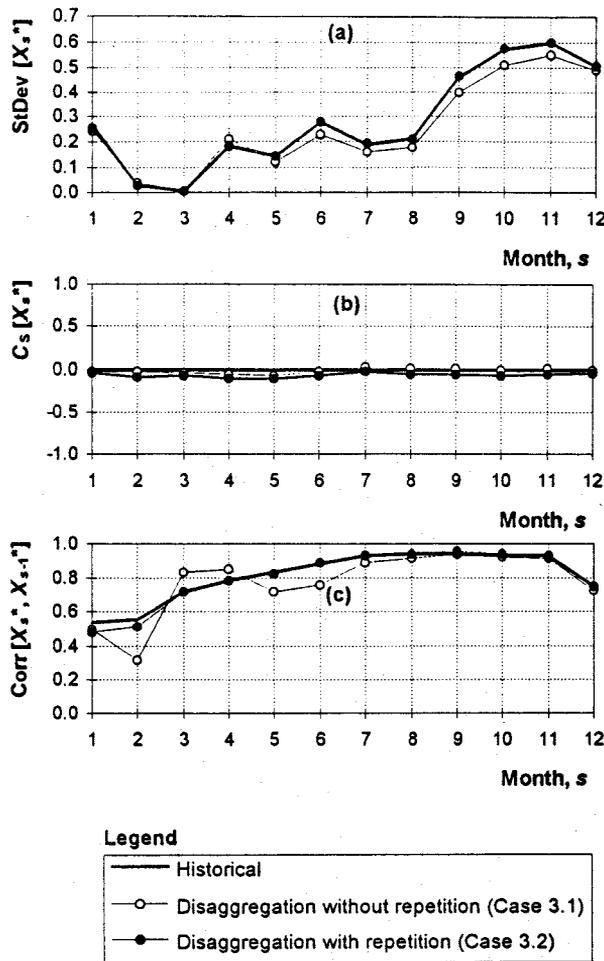


Figure 5. Comparison of various statistics of historic and generated monthly discharges for the Nile River using logarithmic transformation (application 3; simulation period is 8000 years): (a) standard deviation of logarithms, (b) coefficient of skewness of logarithms, and (c) lag-1 autocorrelation coefficient of logarithms.

tion in the size of matrices). Most of all, the model combines simple individual modules in a general framework. Certain items of the model can be easily modified or replaced to cover specific needs, without changing the framework. For example, the studied PAR(1) scheme can be directly replaced by a more complicated linear scheme (e.g., PARMA(p , q)) that maintains a greater set of statistics. In addition, certain modules of the method, such as the accurate adjusting procedures, can be incorporated in any other disaggregation model that makes use of adjustment.

As incidental contributions of the paper we mention here the algorithm for fixing the problems associated with the PAR(1) model (correction of nonpositive semidefinite matrices and of very high coefficients of skewness for the auxiliary variables) and a new algorithm for generation of random numbers with gamma distribution.

Finally, we wish to comment on two issues that may give rise to criticism. The first is the speed of the model. Indeed, repetition reduces the model speed. However, due to the overall simplicity of the model and the exponentially increasing speeds of computers, a typical 10,000-year run with repetition, such as

those we studied in section 5, takes only a few minutes to an hour on a modern (486) PC.

The second issue is the adequacy of the PAR(1) scheme in hydrologic problems. The adoption of the PAR(1) scheme has some advantages and some disadvantages. The advantages are the structural simplicity and the parsimony of parameters, which often lead to a more accurate estimation of parameters. The disadvantages are related with the risk of leaving out important explanatory variables and the misspecification of the long-term stochastic structure of the process. However, the incorporation of the PAR(1) module into a disaggregation scheme, whose higher-level variables are generated independently (possibly using a more complex model), reduces the effects of these disadvantages. The lower-level variables generated by the PAR(1) model are adjusted within the disaggregation scheme to agree with the higher-level variables. Thus we do not have accumulation of the possible errors due to model misspecification. Surely, there are situations where the PAR(1) model may not work well, such as snowmelt-dominated streamflows with a large time delay of the snowmelt. For such situations the adoption of another model, such as PARMA(p , q), for the lower-level variables will be more appropriate. As was discussed above, the PAR(1) module is not a structural constraint of the presented disaggregation framework and can be replaced.

Appendix A: Proof of Proposition 2

Taking expected values in (16) and using (14), we directly obtain

$$E[X_s] = E[\bar{X}_s] \quad (A1)$$

which proves the first part of the proposition that concerns the equality of the mean values. Thus using (14) and (A1), we can write (16) as

$$(X_s - E[X_s]) = (\bar{X}_s - E[\bar{X}_s]) + \lambda \left\{ (Z - E[Z]) - \sum_{j=1}^k (\bar{X}_j - E[\bar{X}_j]) \right\} \quad (A2)$$

Denoting $X'_s = X_s - E[X_s]$, $\bar{X}'_s = \bar{X}_s - E[\bar{X}_s]$, $Z' = Z - E[Z]$, and introducing the vectors $\mathbf{X}' = [X'_1, \dots, X'_k]^T$, $\bar{\mathbf{X}}' = [\bar{X}'_1, \dots, \bar{X}'_k]^T$, $\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \dots, \lambda_k]^T$ and $\boldsymbol{\varphi} = [1, \dots, 1]$ (a row vector with k elements) we can write (A2) in matrix notation as

$$\mathbf{X}' = \bar{\mathbf{X}}' - \boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\varphi}\bar{\mathbf{X}}' + Z'\boldsymbol{\lambda} \quad (A3)$$

Then transposing both parts of (A3) and postmultiplying with (A3), we get

$$\mathbf{X}'\mathbf{X}'^T = (\bar{\mathbf{X}}' - \boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\varphi}\bar{\mathbf{X}}' + Z'\boldsymbol{\lambda})(\bar{\mathbf{X}}'^T - \bar{\mathbf{X}}'^T\boldsymbol{\varphi}^T\boldsymbol{\lambda}^T + Z'^T\boldsymbol{\lambda}^T) \quad (A4)$$

After algebraic manipulations, (A4) becomes

$$\begin{aligned} \mathbf{X}'\mathbf{X}'^T = & \bar{\mathbf{X}}'\bar{\mathbf{X}}'^T - \bar{\mathbf{X}}'\bar{\mathbf{X}}'^T\boldsymbol{\varphi}^T\boldsymbol{\lambda}^T + Z'\bar{\mathbf{X}}'\boldsymbol{\lambda}^T - \boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\varphi}\bar{\mathbf{X}}'\bar{\mathbf{X}}'^T \\ & + \boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\varphi}\bar{\mathbf{X}}'\bar{\mathbf{X}}'^T\boldsymbol{\varphi}^T\boldsymbol{\lambda}^T - \boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\varphi}(Z'\bar{\mathbf{X}}')\boldsymbol{\lambda}^T + \boldsymbol{\lambda}(Z'\bar{\mathbf{X}}'^T) \\ & - \boldsymbol{\lambda}(Z'\bar{\mathbf{X}}'^T)\boldsymbol{\varphi}^T\boldsymbol{\lambda}^T + Z'^2\boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\lambda}^T \end{aligned} \quad (A5)$$

Taking expected values in (A5) and observing that $E[\bar{\mathbf{X}}'\bar{\mathbf{X}}'^T] = \boldsymbol{\sigma}$, $E[Z'\bar{\mathbf{X}}'] = \mathbf{0}$ (a vector with zero elements,

owing to the independence of \bar{X}_s and Z) and $E[Z'^2] = \sigma_{..}$, we find

$$E[X'X'^T] = \sigma - \sigma\varphi^T\lambda^T - \lambda\varphi\sigma + \lambda\varphi\sigma\varphi^T\lambda^T + \sigma_{..}\lambda\lambda^T \tag{A6}$$

The matrix $\varphi\sigma$ that appears in third term of the right-hand part of (A6) is

$$\varphi\sigma = [1 \ 1 \ \dots \ 1] \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1k} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1k} & \sigma_{2k} & \dots & \sigma_{kk} \end{bmatrix} = [\sigma_{.1} \ \sigma_{.2} \ \dots \ \sigma_{.k}] = \sigma_{..}\lambda^T \tag{A7}$$

For this derivation we have used equations (18) and (17), which define σ_s and λ_s , respectively. Because both σ and $\lambda\varphi\sigma$ are symmetrical, the second term of the right-hand part of (A6) equals the third term. Furthermore, the matrix $\varphi\sigma\varphi^T$ that appears in the fourth term of the right-hand part of (A6) is

$$\varphi\sigma\varphi^T = \sigma_{..}[\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_k] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \sigma_{..} \sum_{s=1}^k \lambda_s = \sigma_{..} \tag{A8}$$

Consequently, (A6) becomes

$$E[X'X'^T] = \sigma - \sigma_{..}\lambda\lambda^T - \sigma_{..}\lambda\lambda^T + \sigma_{..}\lambda\lambda^T + \sigma_{..}\lambda\lambda^T = \sigma \tag{A9}$$

which proves that the variance-covariance matrix of the variables X_s equals that of \bar{X}_s , i.e., the adjusting procedure does not affect the second-order statistics of the lower-level variables.

To prove that λ , as defined by (17), is unique (i.e., that no other λ can preserve simultaneously the additive property, the means, and the variance-covariance matrix), we square (A2) and take expected values. With the explanations given below (A5), we obtain

$$\text{Var}[X_s] = \text{Var}[\bar{X}_s] + 2\lambda_s^2 \text{Var}[\bar{Z}] - 2\lambda_s \text{Cov}[\bar{X}_s, \bar{Z}] \tag{A10}$$

Because we demand $\text{Var}[X_s] = \text{Var}[\bar{X}_s]$, (A10) becomes

$$\lambda_s^2 \sigma_{..} - \lambda_s \sigma_s = 0 \tag{A11}$$

Equation (A11) has two roots for λ_s . The trivial $\lambda_s = 0$ is rejected because it does not preserve the additive property. The other, $\lambda_s = \sigma_s / \sigma_{..}$, is the one defined by (17).

Appendix B: A New Random Number Generator for Gamma Distribution

Let X be a random variable having gamma density function with parameters $\kappa > 0$, $\lambda > 0$ and c , i.e.,

$$f(x) = \frac{\lambda^\kappa}{\Gamma(\kappa)} (x - c)^{\kappa-1} e^{-\lambda(x-c)} \tag{B1}$$

The objective is to establish a procedure to generate random numbers with this density. We will use the rejection method [Papoulis, 1990, pp. 261-263], which utilizes an auxiliary probability function $g(x)$. Without loss of generality we assume

that $\kappa < 1$. (If $\kappa \geq 1$, then we can split it in its integer and fractional part; the generation with integer κ is trivial).

We introduce the auxiliary density function

$$g(x) = \begin{cases} \beta(x - c)^{\kappa-1} & c \leq x \leq h \\ \beta\gamma e^{-\lambda(x-c)} & x > h \end{cases} \tag{B2}$$

where β and γ are constants and h is some number $> c$. The continuity of $g(x)$ demands that

$$(h - c)^{\kappa-1} = \gamma e^{-\lambda(h-c)} \tag{B3}$$

which yields

$$\gamma = (h - c)^{\kappa-1} e^{\lambda(h-c)} \tag{B4}$$

Because $g(\)$ is a probability density function,

$$\int_c^\infty g(x) dx = 1 \tag{B5}$$

which after algebraic manipulation results in

$$\beta = \frac{\kappa}{(h - c)^{\kappa-1}(h - c + \kappa/\lambda)} \tag{B6}$$

Consequently, (B2) becomes

$$g(x) = \begin{cases} \frac{\kappa}{h - c + \kappa/\lambda} \left(\frac{x - c}{h - c}\right)^{\kappa-1} & c \leq x \leq h \\ \frac{\kappa}{h - c + \kappa/\lambda} e^{-\lambda(x-h)} & x > h \end{cases} \tag{B7}$$

and the corresponding cumulative distribution function is

$$G(x) = \begin{cases} \frac{h - c}{h - c + \kappa/\lambda} \left(\frac{x - c}{h - c}\right)^\kappa & c \leq x \leq h \\ 1 - \frac{\kappa/\lambda}{h - c + \kappa/\lambda} e^{-\lambda(x-h)} & x > h \end{cases} \tag{B8}$$

$G(x)$ can be directly inverted, that is,

$$x(G) = \left[\frac{h - c + \kappa/\lambda}{h - c} G \right]^{1/\kappa} (h - c) + c$$

$$0 \leq G \leq \frac{h - c}{h - c + \kappa/\lambda} \tag{B9}$$

$$x(G) = -\frac{1}{\lambda} \ln \left[(1 - G) \frac{h - c + \kappa/\lambda}{\kappa/\lambda} \right] + h$$

$$G > \frac{h - c}{h - c + \kappa/\lambda}$$

and this facilitates the generation of random numbers from this distribution.

Now we form the function

$$r(x) = a \frac{f(x)}{g(x)} \tag{B10}$$

where a is a constant that must be chosen such that $\max[r(x)] = 1$. In our case,

$$a = \frac{\kappa\Gamma(\kappa)}{\lambda^\kappa(h - c + \kappa/\lambda)(h - c)^{\kappa-1}} \tag{B11}$$

and consequently

$$r(x) = \begin{cases} e^{-\lambda(x-c)} & c \leq x \leq h \\ e^{-\lambda(h-c)} \left(\frac{x-c}{h-c} \right)^{\kappa-1} & x > h \end{cases} \quad (\text{B12})$$

We observe that $r(x)$ is a decreasing function with $r(0) = 1$ and $r(\infty) = 0$.

Following the standard rejection method [Papoulis, 1990, pp. 261–263], we can now form the following generation procedure:

1. Generate two independent random numbers u_1 and u_2 from the uniform distribution in the interval $[0, 1]$.

2. Using (B9), calculate a random number $x = x(u_1)$ from the distribution function $G(x)$ (i.e., set $G = u_1$ in (B9) and calculate x).

3. Calculate $r(x)$.

4. If $u_2 \leq r(x)$, accept x as a random number of the gamma distribution function with density (B1). Otherwise, reject x and repeat the procedure.

For mathematical convenience we can choose h equal to the mean of x , i.e.,

$$h = E[X] = c + \kappa/\lambda \quad (\text{B13})$$

which simplifies all the above equations. We note that in this case the median of $g(x)$ equals h .

Acknowledgments. The research leading to this paper was performed within the framework of the project *Evaluation and Management of the Water Resources of Sterea Hellas*, project 8976701, funded by the Greek Ministry of Environment, Regional Planning and Public Works, Directorate of Water Supply and Sewage. We wish to thank the directors, I. Leontaritis and T. Bakopoulos, and the staff of this directorate for the support of this research. We also thank the project director, T. S. Xanthopoulos, for his interest and support throughout this work and Efi Foufoula-Georgiou for her detailed and constructive comments on a first draft of this study. The detailed comments of the Associate Editor and the anonymous reviewers are gratefully appreciated. Computer resources were provided by the Department of Water Resources, National Technical University.

References

- Bras, R. L., and I. Rodriguez-Iturbe, *Random Functions in Hydrology*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1985.
- Grygier, J. C., and J. R. Stedinger, Condensed disaggregation procedures and conservation corrections for stochastic hydrology, *Water Resour. Res.*, 24(10), 1574–1584, 1988.
- Grygier, J. C., and J. R. Stedinger, SPIGOT, A synthetic streamflow generation software package, Technical description, Version 2.5, Sch. of Civ. and Environ. Eng., Cornell Univ., Ithaca, N. Y., 1990.
- Fernandez, B., and J. D. Salas, Periodic gamma autoregressive processes for operational hydrology, *Water Resour. Res.*, 22(10), 1385–1396, 1986.
- Fernandez, B., and J. D. Salas, Gamma-autoregressive models for stream-flow simulation, *J. Hydraul. Eng.*, 116(11), 1403–1414, 1990.
- Hoshi, K., and S. J. Burges, Disaggregation of streamflow volumes, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 105(HY1), 27–41, 1979.
- Kirby, W., Algebraic boundness of sample statistics, *Water Resour. Res.*, 10(2), 220–222, 1974.
- Kite, G. W., *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*, Water Resour. Publ., Fort Collins, Colo., 1988.
- Koutsoyiannis, D., A point rainfall disaggregation model (in Greek) Ph.D. thesis, Natl. Tech. Univ., Athens, 1988.
- Koutsoyiannis, D., A nonlinear disaggregation model with a reduced parameter set for simulation of hydrologic series, *Water Resour. Res.*, 28(12), 3175–3191, 1992.
- Koutsoyiannis, D., A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis, *J. Hydrol.*, 156, 193–225, 1994.
- Koutsoyiannis, D., and T. Xanthopoulos, A dynamic model for short-scale rainfall disaggregation, *Hydrol. Sci. J.*, 35(3), 303–322, 1990.
- Lane, W. L., Applied stochastic techniques, User's manual, Bur. of Reclam., Eng. and Res. Cent., Denver, Colo., 1979.
- Lane, W. L., Corrected parameter estimates for disaggregation schemes, in *Statistical Analysis of Rainfall and Runoff*, edited by V. P. Singh, Water Resour. Publ., Fort Collins, Colo., 1982.
- Lane, W. L., and D. K. Frevert, Applied stochastic techniques, User's manual (first revision), Div. of Plann. Tech. Serv., Water and Power Resour. Serv., Denver, Colo., 1980.
- Lane, W. L., and D. K. Frevert, Applied stochastic techniques, User's manual, personal computer version, Eng. and Res. Cent., Bur. of Reclam., Denver, Colo., 1990.
- Lawrance, A. J., and P. A. W. Lewis, A new autoregressive time series model in exponential variables [NEAR(1)], *Adv. Appl. Prob.*, 13(4), 826–845, 1981.
- Lin, G.-F., Parameter estimation for seasonal to subseasonal disaggregation, *J. Hydrol.*, 120(1-4), 65–77, 1990.
- Matalas, N. C., and J. R. Wallis, Generation of synthetic flow sequences, in *Systems Approach to Water Management*, edited by A. K. Biswas, McGraw-Hill, New York, 1976.
- Mejía, J. M., and J. Millán, Una metodología para tratar el problema de matrices inconsistentes en la generación multivariada de series hidrológicas, paper presented at VI Congreso Latino americano de Hidráulica, Bogotá, Colombia, 1974.
- Mejía, J. M., and J. Rousselle, Disaggregation models in hydrology revisited, *Water Resour. Res.*, 12(2), 185–186, 1976.
- Oliveira, G. C., J. Kelman, M. V. F. Pereira, and J. R. Stedinger, Representation of spatial cross-correlation in a seasonal streamflow model, *Water Resour. Res.*, 24(5), 781–785, 1988.
- Papoulis, A., *Probability and Statistics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1990.
- Pereira, M. V. F., G. C. Oliveira, C. C. G. Costa, and J. Kelman, Stochastic streamflow models for hydroelectric systems, *Water Resour. Res.*, 20(3), 379–390, 1984.
- Salas, J. D., Analysis and modeling of hydrologic time series, in *Handbook of Hydrology*, edited by D. Maidment, chap. 19, McGraw-Hill, New York, 1993.
- Salas, J. D., J. W. Delleur, V. Yevjevich, and W. L. Lane, *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*, Water Resour. Publ., Fort Collins, Colo., 1980.
- Santos, E. G., and J. D. Salas, Stepwise disaggregation scheme for synthetic hydrology, *J. Hydraul. Eng.*, 118(5), 765–784, 1992.
- Stedinger, J. R., and R. M. Vogel, Disaggregation procedures for generating serially correlated flow vectors, *Water Resour. Res.*, 20(1), 47–56, 1984.
- Stedinger, J. R., D. Pei, and T. A. Cohn, A condensed disaggregation model for incorporating parameter uncertainty into monthly reservoir simulations, *Water Resour. Res.*, 21(5), 665–675, 1985.
- Stedinger, J. R., R. M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou, Frequency analysis of extreme events, in *Handbook of Hydrology*, edited by D. Maidment, chap. 18, McGraw-Hill, New York, 1993.
- Tao, P. C., and J. W. Delleur, Multistation, multiyear synthesis of hydrologic time series by disaggregation, *Water Resour. Res.*, 12(6), 1303–1312, 1976.
- Todini, E., The preservation of skewness in linear disaggregation schemes, *J. Hydrol.*, 47, 199–214, 1980.
- Valencia, D., and J. C. Schaake, A disaggregation model for time series analysis and synthesis, *Rep. 149*, R. M. Parsons Lab. for Water Resour. and Hydrodyn., Mass. Inst. of Technol., Cambridge, 1972.
- Valencia, D., and J. C. Schaake, Disaggregation processes in stochastic hydrology, *Water Resour. Res.*, 9(3), 211–219, 1973.
- Whittaker, J., A note on the generation of gamma random variables with non-integral shape parameter, in *Proceedings of the Second International Symposium on Hydrology*, pp. 591–594, Water Resour. Publ., Fort Collins, Colo., 1973.
- Wallis, J. R., N. Matalas, and J. R. Slack, Just a moment!, *Water Resour. Res.*, 10(2), 211–219, 1974.

D. Koutsoyiannis and A. Manetas, Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, National Technical University, 5 Iroon Polytechniou, GR-15700 Zografou, Greece. (e-mail: dk@hydro.civil.ntua.gr)

(Received November 8, 1995; revised February 8, 1996; accepted February 9, 1996.)

A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems

I. Nalbantis and D. Koutsoyiannis

Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, National Technical University, Athens, Greece

Abstract. A parametric rule for multireservoir system operation is formulated and tested. It is a generalization of the well-known space rule of simultaneously accounting for various system operating goals, in addition to the standard goal of avoiding unnecessary spills, including avoiding leakage losses, avoiding conveyance problems, taking into account the impacts of the reservoir system topology, and assuring satisfaction of secondary uses. Theoretical values of the rule's parameters for each one of these isolated goals are derived. In practice, parameters are evaluated to optimize one or more objective functions selected by the user. The rule is embedded in a simulation model so that optimization requires repeated simulations of the system operation with specific values of the parameters each time. The rule is tested on the case of the multireservoir water supply system of the city of Athens, Greece, which is driven by all of the operating goals listed above. Two problems at the system design level are tackled. First, the total release from the system is maximized for a selected level of failure probability. Second, the annual operating cost is minimized for given levels of water demand and failure probability. A detailed simulation model is used in the case study. Sensitivity analysis of the rule's parameters revealed a subset of insensitive parameters that allowed for rule simplification. Finally, the rule is validated through comparison with a number of heuristic rules also applied to the test case.

1. Introduction

Planning and management of multiple reservoir systems have been and continue to be the subject of numerous research works. This attention is due to the essential benefits arising from reservoir system operation (e.g., hydropower) in combination with the reduction of natural risks (e.g., flood control). The problem of reservoir planning and/or management is most often stated as an optimal control problem. Its solution is not an easy task because of the large number of variables involved, the nonlinearity of the system dynamics, the stochastic nature of future inflows, and other uncertainties of the system (e.g., leakage from reservoirs).

Stochastic dynamic programming (SDP) has been repeatedly used by many researchers to study the problem [e.g., *Su and Deininger*, 1972, 1974; *Askew*, 1974a, b; *Sniedovich*, 1979; 1980a, b; *Bras et al.*, 1983; *Stedinger et al.*, 1984]. SDP could be satisfactory if it did not require excessive amounts of computer time and storage. To increase the efficiency of the solution algorithm, some researchers have treated the inflows' stochasticity in an analytic way without state-space discretization and then applied efficient deterministic optimization methods [*Wassimi and Kitanidis*, 1983; *Loaiciga and Mariño*, 1985; *Georgakakos and Marks*, 1987]. For example, *Georgakakos and Marks* [1987] represented the reservoir system dynamics in a state-space form and proposed an extension of stochastic control theory, which they termed extended linear quadratic Gaussian (ELQG). In this way these authors obtained a very efficient algorithm at the expense of an accurate representation of the stochastic structure of inflows (i.e., only Gaussian independent

inflows were considered). In later studies [*Georgakakos*, 1989] the problem of the representation of the stochastic structure of inflows was effectively tackled. Other researchers continued their studies in the direction of stochastic dynamic programming with the purpose of remedying its deficiencies. Efficient interpolation schemes for dynamic programming (DP) algorithms are discussed by *Johnson et al.* [1993]. The problem of errors resulting from the state-space discretization in discrete dynamic programming was tackled [*Kitanidis and Fouloula-Georgiou*, 1987; *Fouloula-Georgiou and Kitanidis*, 1988; *Fouloula-Georgiou*, 1991]. These authors proposed gradient dynamic programming, which is based on an interpolation scheme of the cost-to-go function at each stage and reduces significantly the error due to discretization.

In spite of the large number of optimization techniques available in the literature, simulation models still remain the primary tool for reservoir planning and management studies in practice. The reason is that simulation models allow a more detailed and faithful representation of the system studied than optimization techniques do [*Loucks and Sigvaldason*, 1982]. Moreover, they can be easily combined with synthetically generated streamflow sequences [*Young*, 1967; *Loucks et al.*, 1981, p. 277]. The main drawback of simulation is that unlike optimization, it requires prior specification of the system operating policy. To remedy this problem, *Young* [1967] combined the use of synthetically generated annual inflows into a single reservoir with deterministic dynamic programming and inferred simple parametric rules for the operating policy using regression techniques. Other researches have employed optimization methods within simulation models [*Evenson and Moseley*, 1970; *Sigvaldason*, 1976; *Ginn and Houck*, 1989; *Johnson et al.*, 1991; *Tejada-Guibert et al.*, 1993]. *Tejada-Guibert et al.* [1993] compared two alternative approaches for defining the operation

Copyright 1997 by the American Geophysical Union.

Paper number 97WR01034.
0043-1397/97/97WR-01034\$09.00

policy of a multireservoir system: (1) interpolation in policy tables derived through SDP and (2) the use of SDP-derived value functions within simulation to optimize the operating policy each time a decision is sought; they found this second approach clearly superior. Johnson *et al.* [1991] used a simulation model, which includes heuristic operating rules that are optimized within the simulation for each period of operation. The optimization tries to drive the real storages as close to the target storages as possible.

Operators of reservoir systems have long used heuristic rules that define desired storage and release targets. The well-known space rule [Bower *et al.*, 1962] defines storage targets so that the empty space in each reservoir is proportional to the expected inflow; this rule is applicable to parallel reservoirs for water supply purposes. The NYC rule, used for the water supply of New York City, defines storage targets so that the probability of spill from each reservoir will be equal for all reservoirs [Clark, 1950, 1956]. Johnson *et al.* [1991] showed how heuristic operating policies, including the space rule, can be effectively used in optimization models.

The aim of this work is to propose and test a parametric operating rule for a system of reservoirs. The parameters of the rule are estimated by optimization, using simulation to evaluate the objective function value for each trial set of parameter values. The rule is a generalization of, and is motivated by, the space rule to simultaneously account for various goals: (1) avoiding unnecessary spills, (2) avoiding leakage losses, (3) avoiding conveyance problems, (4) taking into account the impacts associated with the reservoir system topology, and (5) assuring satisfaction of the secondary uses. These goals are achieved through parameterizing the rule and then optimizing its parameters. For each parameter set a series of simulations of the system operation allows system objectives to be evaluated and constraints to be satisfied. Parameters are optimized outside the simulation, or else, for each set of parameter values in the optimization a simulation is performed. The three-reservoir system used for the water supply of the greater Athens area, Greece, is selected as a test case. For validation purposes the operating rule is compared with a number of heuristic rules.

The paper is organized in four sections. In section 2 we present the proposed parametric operating rule; we derive theoretical values for its parameters in five special cases; we discuss other theoretical issues raised; and then we describe the optimization and the simulation model used. In section 3 we analyze an application of this rule for a real-world reservoir system, and we assess the capabilities of the proposed rule in comparison with heuristic operating rules. Section 4 summarizes the proposals and tests made and presents the final conclusions.

2. Parametric Rule

2.1. Description of the Rule

A system of N reservoirs is assumed for which an operating policy is sought. The policy is focused on consumptive water uses such as water supply for domestic and industrial use and irrigation. Other uses such as hydropower generation, recreation, or navigation are assumed absent or of secondary importance in this study. Our approach, however, can easily accommodate such nonconsumptive uses. The reservoirs are connected in series or in parallel to form a network with any topology. Water is withdrawn from all of them to meet a

common downstream target release D (equal to the water demand). The continuity equation for each reservoir i is given for a certain time period by

$$S_i = BS_i + Q_i - R_i - L_i - SP_i \quad (1)$$

where BS_i is the beginning-of-period storage for reservoir i (known); S_i is the end-of-period storage, which is unknown; Q_i is the inflow; R_i is the total release from the reservoir; L_i is the total loss due to evaporation and leakages, and SP_i is the reservoir spill. Reference to time interval is omitted for convenience.

Let V denote the total storage in the system at the end of the time period of interest. In the simple case of one reservoir, V is completely determined by (1), in which case we omit the subscript i and replace S with V . The operation of a system of N reservoirs is much more complicated as, this time, the state of the system is described by N variables S_i , satisfying

$$\sum_{i=1}^N S_i = V \quad (2)$$

Assuming that the target release is fulfilled and the inflows, losses, and spills from all reservoirs are estimated in some manner, the total end-of-period storage of the system is given by

$$V = \sum_{i=1}^N (BS_i + Q_i - L_i - SP_i) - D \quad (3)$$

Thereafter the problem is to determine the releases from all reservoirs such that their sum equals D . Equivalently, the problem is to distribute the total volume V into the N reservoirs such that (3) is satisfied. This can be done in numerous ways, as the problem has several degrees of freedom. We call a specific way to perform this distribution an operating rule. To avoid ambiguity, we express the operating rules by means of some quantities S_i^* , which stand for the target storage for the reservoir i at the end of the period. The real storage S_i is generally different from the target storage S_i^* because of the physical constraints that were not considered in the determination of S_i^* . We propose to distribute V according to the following rule:

$$S_i^* = a_i + b_i V \quad (4)$$

where a_i and b_i , $i \in \{1, \dots, N\}$, are unknown parameters.

There exist $2N$ parameters for a system of N reservoirs. We note that because of (2) we have two constraints on the parameters, i.e.,

$$\sum_{i=1}^N a_i = 0 \quad \sum_{i=1}^N b_i = 1 \quad (5)$$

and thus the number of unknown parameters is finally $2(N - 1)$. It will be shown in the next subsection that the rule specified by (4) is a generalization of the well-known space rule.

Having defined the operating rule in the linear form of (4) with parameters a_i and b_i obeying (5), we have introduced a convenient parameterization of the problem. This raises important issues regarding the validity of the rule proposed. These are related to (1) the ability of equation (4) to take into account various policies that result from different concerns

about the system, (2) the need for further mathematical development of the rule to take into account physical constraints of the system, and (3) parameter issues such as whether the linearity of (4) is appropriate and whether the number of parameters is sufficient. These issues are discussed in the following subsections.

2.2. Justification of the Rule's Form

In this subsection we study five particular operating policies, which result from different concerns about the system properties and objectives. In each case we deal with one isolated objective of the system such as the minimization of spills or losses. To be able to obtain the operating rule for each case as an analytical solution, based on a theoretical objective function, we do not consider all physical constraints of the system at this stage. At a later stage we will incorporate the physical constraints in the rule. The five cases examined do not exhaust all possible concerns about the reservoir system operation, but they are indicative of the form such policies can take. As we will see, in all cases the result is the linear rule (4) with the particular values of coefficients a_i and b_i dependent on the main concern chosen. This justifies the linear form of (4) as a generalization of various operating rules.

2.2.1. Restricting spills. Assume that the primary concern is to avoid unnecessary spills from one reservoir while others still have empty space. This rule is appropriate for the refill cycle of the reservoirs or, equivalently, for the wet season. Spills are more likely to be avoided when more empty space is left for the reservoirs with larger expected cumulated inflows up to the end of their refill cycle. It has been shown [Sand, 1984; Johnson et al., 1991] that the minimum expected value of the total spills of the system corresponds to the case in which the probability of spill is the same for each reservoir, i.e.,

$$\text{prob}(CQ_i \geq K_i - S_i) = \text{const} \quad \forall i \quad (6)$$

where CQ_i is the cumulative inflow to reservoir i from the end of the current period to the end of the refill cycle, K_i is the storage capacity of reservoir i , and $\text{prob}(\)$ denotes probability. Johnson et al. [1991] showed that under the assumption that the distribution of $CQ_i/E[CQ_i]$ (with $E[\]$ denoting expectation) is the same for each reservoir i , (6) results in

$$\frac{K_i - S_i^*}{E[CQ_i]} = \frac{\left(\sum_{j=1}^N K_j - V \right)}{\left(\sum_{j=1}^N E[CQ_j] \right)} \quad (7)$$

This is the well-known space rule, which consists in keeping equal for all reservoirs the ratio of the empty space to the expected cumulative inflow for the rest of the refill cycle. Equation (7) can be rewritten in the form of (4) for each i with values of parameters

$$a_i = K_i - b_i \sum_{j=1}^N K_j \quad b_i = \frac{E[CQ_i]}{\sum_{j=1}^N E[CQ_j]} \quad (8)$$

If the reservoirs are all located in a region with the same climatic regime, the ratios b_i of (8) do not vary significantly from one month to another as demonstrated in Figure 5 for the

case study. Thus quantities a_i and b_i of (8) can be considered as time invariant.

Furthermore, the assumption that the distribution of $CQ_i/E[CQ_i]$ is the same for all reservoirs is not obligatory to get the linear rule (4), as different assumptions can result in the same equation. For example, if all CQ_i have Gaussian distributions, one can easily obtain that (6) results again in (4) with a_i and b_i given by equations slightly different from (8).

2.2.2. Restricting losses. Very often the leakages from reservoirs are not negligible, especially if the reservoirs are natural lakes on a karstic background. It is also likely that evaporation losses are of main concern, especially if we consider natural shallow lakes. Thus let us assume that the losses due to leakage and evaporation are of much more importance when compared with spills. The losses due to leakage are commonly a function of water surface elevation, and those due to evaporation are a function of the surface area of the reservoir. Given the reservoir storage-elevation and area-elevation relationships, we can express the total losses of this kind as a function of storage, i.e.,

$$L_i = l_i(S_i) \quad (9)$$

If our concern is to minimize losses, using algebra and some rather general assumptions (functions $l_i(S_i)$ increasing and concave, which holds for almost any reservoir; see Appendix A1¹), we find that the most efficient rule is the one that stores all water V at the reservoir m whose value $l_m(V)$ is the minimum among those of other reservoirs $l_i(V)$. Mathematically, this is expressed again by the linear equation (4) but with coefficients $a_i = 0$ for all i , $b_m = 1$ for the specific reservoir m whose value $l_m(V)$ is the minimum among all other $l_i(V)$, and $b_i = 0$ for all other i (except for $i = m$).

2.2.3. Ensuring conveyance. A third rule will be considered for periods with low system storage. In such periods the main concern is not avoiding reservoir spill but making withdrawals so as not to drive one or more reservoirs empty while demand cannot be satisfied from the remaining reservoirs because of limited conveyance capacity. In such a case it is straightforward that the optimal distribution is such that the storage in each reservoir is proportional to the conveyance capacity of the relative aqueduct. This rule is expressed by the same linear rule (4) but with coefficients

$$a_i = 0, \quad b_i = \frac{C_i}{\sum_{j=1}^N C_j} \quad (10)$$

for all i , where C_i is the conveyance capacity of the aqueduct through which the release from reservoir i is made.

2.2.4. Taking into account the impacts of topology. In the above cases all reservoirs were assumed implicitly to be topologically equivalent; that is, each of them is located at a different river or branch of river, and they are all connected by separate aqueducts with the consumption location. However, in many cases there appear to be differences in the topology of the reservoir system that may affect greatly the operating rule. Let us consider, for example, the case where the reservoirs

¹Appendices are available on microfiche. Order from American Geophysical Union, 2000 Florida Avenue, N.W., Washington, DC 20009. Document 97WR01034M; \$2.50. Payment must accompany order.

form a cascade along the same river. In such a case the spills of all reservoirs but the most downstream one are not a loss for the system. Moreover, for energy-saving reasons (e.g., minimization of pumping) it may be a gain for the system to store the water as far upstream as possible. In addition it is always possible to move the water from upstream to downstream if necessary, while the opposite needs pumping. Thus a good operating rule for such a case would be to keep the water at the most upstream reservoir (if feasible), leaving the downstream reservoirs empty. Mathematically, this is expressed by the same linear rule (4) with coefficients $a_i = 0$ for all i , $b_m = 1$ for the most upstream reservoir m , and $b_i = 0$ for all other i (except for $i = m$).

2.2.5. Assuring satisfaction of secondary water uses. In many cases, apart from the main water use, there are some secondary water uses in the neighborhood of each reservoir (e.g., irrigation, satisfaction of environmental demands, etc.). In such cases we want to avoid situations where some reservoirs are almost empty, while others are almost full. Thus we can set a rule that stores the water proportionally to cumulative local water demand for consumptive use CLD_i in order to balance the satisfaction of all local uses. This leads again to the linear rule (4) with

$$a_i = 0, \quad b_i = \frac{E[CLD_i]}{\sum_{j=1}^N E[CLD_j]} \quad \forall i \quad (11)$$

We have seen that in each of the above simple situations the operation rule has always the linear form (4) with parameters a_i and b_i given by different simple equations for each case. In real-world situations we have to deal with more than one such concern (or goal) simultaneously. In these situations we can keep the formalism and parameterization of the linear rule, but the parameters a_i and b_i are no longer determined by simple equations such as the above because the objective function is not simple enough to be treated analytically. The parameterization of the rule allows for estimation of parameters using simulation via sampling and search procedures [Loucks *et al.*, 1981, p. 65]. Before we proceed to the description of the models for simulation and optimization it is necessary to incorporate physical constraints into the linear rule in order for it to be operational for real-world situations.

2.3. Further Development of the Rule and Parameter Issues

In introducing (4) we have ignored the physical constraints, which demand that the storage cannot be negative nor can it exceed the reservoir capacity. To correct this inconsistency, we modify (4) so that

$$S_i^* = \begin{cases} 0 & a_i + b_i V < 0 \\ a_i + b_i V & 0 \leq a_i + b_i V \leq K_i \\ K_i & a_i + b_i V > K_i \end{cases} \quad (12)$$

However, this creates another inconsistency as the quantities S_i^* defined by (12) may no longer add up to V . Several adjustment procedures can be used, the most refined being the transformation of straight lines of (4) into broken lines. Here we adopt another procedure that is computationally simpler. We distribute the departure $V - \sum_{j=1}^N S_j^*$ proportionally to the quantity $S_i^* (1 - S_i^*/K_i)$ so that $(S_i^* = 0)$ maps to

$(S_i^{**} = 0)$ and $(S_i^* = K_i)$ maps to $(S_i^{**} = K_i)$. In this way the adjustment procedure does not affect the cases where the reservoir i was found by (12) to be either empty or full. Thus we get the final target storage S_i^{**} by

$$S_i^{**} = S_i^* + \frac{S_i^*(1 - S_i^*/K_i)}{\sum_{j=1}^N S_j^*(1 - S_j^*/K_j)} \left(V - \sum_{j=1}^N S_j^* \right) \\ = S_i^* [1 + \phi(1 - S_i^*/K_i)] \quad (13)$$

with

$$\phi := \frac{V - \sum_{j=1}^N S_j^*}{\sum_{j=1}^N S_j^*(1 - S_j^*/K_j)} \quad (14)$$

We note that under certain circumstances (e.g., for ϕ lying outside of the interval $[-1, 1]$), (13) may lead to values of S_i^{**} that still violate the physical constraints. These circumstances are described in detail in the Appendix A2 along with an iterative algorithm to obtain S_i^{**} such that $0 \leq S_i^{**} \leq K_i$ in all cases. We emphasize that the final operating rule, expressed by means of S_i^{**} , is completely determined from the initial parameters a_i and b_i . An example of an initial rule expressed in terms of S_i^* along with its corresponding final rule expressed in terms of S_i^{**} are given in Figure 6 for the case study described in section 3.

Having introduced the full mathematical description of the rule proposed, several issues concerning the rule's parameters are raised: (1) Is the linear form (4) of the rule adequate, or do we need a more complicated nonlinear form? (2) Is the number of parameters in the rule (two parameters per reservoir) adequate, or do we need more or fewer parameters? (3) Do we need to introduce a seasonal variation of the parameters?

It is difficult to answer these questions in a strict mathematical sense. However, we will attempt to give some detailed but rather intuitive answers. The answer to question 1 is threefold. First, as we have shown in section 2.2, the linear form is justified for several simple cases. Second, the operational form of the rule is not strictly linear since the corrections (12) and (13) introduce strong nonlinearity as demonstrated in the example of Figure 6, where the final target storages and their initial values are compared. The initial linear form is, in fact, used as an efficient way to parameterize the problem using two parameters for each reservoir. Third, the physical constraints of a reservoir system strongly modify the form of any initial rule no matter which this specific form is. Different initial rules thus have very similar final operational forms. To demonstrate that numerically, we can experiment using a quadratic rule instead of the linear, i.e.,

$$S_i^* = a'_i + b'_i V + c'_i V^2 \quad (15)$$

where a'_i , b'_i , and c'_i are parameters for each reservoir i . Experimenting with different sets of parameters a_i and b_i of (4), we can find a parameter set of this linear rule such that the final rules (after introducing corrections for constraints) of both the linear and quadratic form are very close to each other. A comparison of the two rules (linear and quadratic) is illus-

trated in Appendix A3 for the quadratic rule with the highest possible curvature, where the final forms are almost indistinguishable (the overall root-mean-square error, normalized by the respective reservoir capacity, is less than 0.1%).

The above discussion already gives some indication of the adequacy of the number of parameters (question 2): the use of three parameters per reservoir instead of two essentially makes no difference. We could also consider reducing the number of parameters to one parameter per reservoir, thus formulating the rule as a homogeneous line of the form $S_i^* = b_i V$. To test this, we approximated a quadratic and a linear nonhomogeneous rule with a linear homogeneous rule (see Appendix A3). In both cases we obtained approximations of the final operational rules with overall root-mean-square error less than 10%, although the initial rules differed by as much as 100%. This suggests that the rule may be satisfactory for practical applications even in its reduced homogeneous form. However, to develop a clearer idea of the adequacy of the number of parameters, we must assess the sensitivity of the objective function to some parameters. As it will be shown in the section 3, in our test case we started by using two parameters per reservoir (a_i and b_i) and found that the optimum of the objective function was practically insensitive to a_i , which indicates that one parameter per reservoir suffices. This, however, cannot be transferred to any reservoir system without prior investigation.

Question 3 concerns another form of nonlinearity that can be introduced through seasonal variation of the parameters. First, we note that in systems consisting of reservoirs with very high capacities that perform overyear regulation, there is no reason to consider target storages dependent on the season, as the overyear variation of storage is more important than the within-the-year variation. In systems with smaller capacities it seems reasonable to have the target storages dependent on the season. However, the parametric rule implicitly contains such a dependence of the target storages on V . This is particularly true for reservoirs with considerable drawdown in the dry season. In such cases V takes large values only in the wet season. We note, though, that intermediate values of V are normally attained twice a year: once during the refill period and once during the drawdown period. It may be beneficial to distribute among the reservoirs the same total volume V in a different way in each of the two periods. This means that the use of two parameter sets for the rule, one for the refill and one for the drawdown period, may be advantageous. For simplicity the parameters a_i and b_i are considered in this study as time invariant and constant for each reservoir. However, the approach proposed can be directly modified to include two parameter sets, but this will require more computations because of the doubling of the number of parameters.

2.4. Optimization Model

As described above our proposal in this paper is to consider the coefficients a_i and b_i of the operating rule as unknown parameters and to determine them by optimization. Their values are optimized in the following way:

1. A simulation model of the reservoir system operation is built together with a multivariate stochastic model of the system's inflows. A long series of synthetic inflows is generated and is passed into the simulation model to evaluate the objective function of the optimization model described in point (2), below.

2. An optimization method is used to determine a_i and b_i . At each evaluation of the objective function one or more

simulations of the system operation (depending on the constraints of the optimization) for the whole operation period are performed. Thus, in our case, simulation is embedded in the optimization algorithm.

To formulate the objective function of the optimization model, we consider two typical problems. In the first problem the objective is to maximize the target release of the system for a given reliability level. For example, this is the objective in the first three simple cases examined in section 2.2, which can be represented by a common objective function. Mathematically, this is expressed by

$$\max D = f_1(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \quad (16)$$

where $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_N)^T$ and $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_N)^T$. The constraint for this optimization is related to a total reliability measure that the system should have, i.e.,

$$\text{prob} \left(\sum_{i=1}^N R_i = D \right) = \alpha \quad (17)$$

where α is the reliability level. For example, if $\alpha = 0.95$, the above equation means that in a simulated period of 2000 years the total release equals the target release D during 1900 years (95%), whereas we allow 100 years (5%) where the target release is not completely satisfied. The failure probability α' corresponds to the case of partial satisfaction of the demand and $\alpha' = 1 - \alpha$. Apparently, failure occurs in cases where release targets are not physically achievable.

In the second problem our concern is the cost of conveyance (or the profit, in cases of energy production). This is, for example, our concern for the fourth case examined in section 2.2. In this problem we can formulate the objective function as

$$\min E \left[\sum_{i=1}^N c_i(R_i) \right] = f_2(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \quad (18)$$

where $c_i(R_i)$ is the cost paid for conveying the quantity R_i to the consumption location (negative in cases of energy production) and expectation is taken over the releases. Equation (17) still remains a constraint for (18).

Other concerns of the system may lead to different objective functions (single or multivariate) or to different constraints. In this paper we consider only the above two problems with single-objective optimizations having the form of equations (16) and (18).

2.5. Simulation of the System Operation

As we have seen previously, the optimization process involves a certain number of simulations of the system operation. In each simulation, trial values of the parameters a_i and b_i are used. At each time period of simulation the following computations are performed:

1. The end-of-period storage in the system V is estimated from (3).

2. The target storages S_i^* are obtained from (4). Then, these are corrected according to (12) and (13) to give the final values of the target storages S_i^{**} .

3. The releases from each reservoir are determined so as to meet the target storages S_i^{**} while also satisfying

$$0 \leq R_i \leq C_i \quad (19)$$

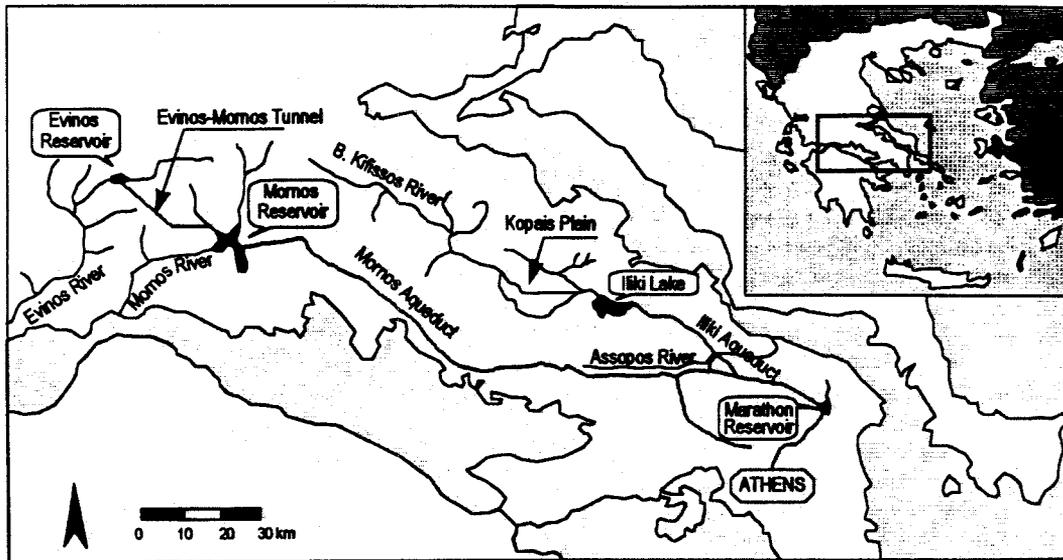


Figure 1. Layout of the Athens water supply system.

In case the releases R_i are outside the limits set by (19) they are set equal to these limits, and the remainder from the total target release is redistributed among the remaining reservoirs.

4. The spill from each reservoir i is given by

$$SP_i = \max \{0, (BS_i + Q_i - R_i - L_i - K_i)\} \quad (20)$$

In some cases this procedure may require an iteration. Initially, to estimate V in step (1), spills are assumed zero. If nonzero spills are derived from (20), V is reevaluated on the basis of those spills, and the whole procedure is repeated again. Finally, the simulation model may include other equations that determine leakages and safety storages. Examples are discussed in the next section in the presentation of the case study.

3. Case Study

3.1. The Reservoir System for Water Supply of the Greater Athens Area and Its Simulation

The reservoir system of greater Athens is used to supply water mainly for domestic and industrial use to the metropolitan area of Athens. It comprises two main reservoirs (Figure 1): (1) the Mornos Reservoir with an active storage capacity of 643 hm³ and (2) the natural Lake Iliki with a storage capacity of 587 hm³. A small reservoir near Athens, the Marathon Reservoir, with a storage capacity of 41 hm³, is also part of the system. This reservoir is considered full all the time for emergency situations. Major water transfer works are (1) the Mornos Aqueduct, some 200 km long, which carries water from the Mornos Reservoir to Athens and comprises a number of different hydraulic works, for example, 70 km of tunnels, and (2) the Iliki Aqueduct from Iliki to the Marathon Reservoir, which is some 60 km long. The growing water demand and the system's vulnerability to drought during the severe drought of 1989–1990, which was followed by 6 years with low flows except for 1990–1991 [Nalbantis *et al.*, 1994], led public authorities to decide to construct a new reservoir (Evinos) with a dam at the site of Aghios Dimitrios on the Evinos River just west of the Mornos River Basin. Water from the new reservoir will be diverted to the neighboring Mornos Reservoir and from there

to Athens via the Mornos Aqueduct. The storage capacity of the reservoir is small (104 hm³) as compared to that of the Mornos Reservoir. On the other hand, inflows to the new reservoir are of a magnitude comparable to that of the inflows to the Mornos Reservoir. As a result, the Mornos Reservoir will be the main storage work for the Evinos River flows as well. A map with the reservoir system is given in Figure 1, while a schematic layout is sketched in Figure 2, where, also, the technical characteristics of the system are annotated. Mean values, standard deviations, and lag-one autocorrelation coefficients for monthly inflows to the three main reservoirs (Evinos, Mornos, and Iliki) of the system are given in Table 1.

Water from the western part of the system (Evinos and Mornos reservoirs) flows to Athens via gravity. Contrary to this, water from Lake Iliki has to be pumped. Another important feature of the system is that Lake Iliki lies on a karstic geologic formation that causes significant leakages. These depend strongly on the water surface elevation of the lake and may equal half of the annual inflow for high elevations. Analysis of historical data established two distinct leakage-elevation relationships: a first one for the dry period (April through September) and a second one for the wet period (October through March). The relationship for the dry period is given by

$$L_L = 0.01242Z^2 - 0.999Z + 17.46 + e \quad (21)$$

where L_L is the monthly leakage in cubic hectometers and Z is the water elevation of the lake in meters. For the wet period the following relationship was found

$$L_L = 0.01242Z^2 - 0.999Z + 22.16 + e \quad (22)$$

In both (21) and (22) a random term e is added to account for discrepancies from the deterministic $L_L - Z$ relationship. For this term, $E[e] = 0$, while its standard deviation is $\sigma_e = 2.64$ hm³ for the dry period and $\sigma_e = 5.96$ hm³ for the wet period. These two statistics are used to produce simulated values of leakages through random generation of e that are added to the deterministic part in (21) and (22) during simulation.

The Mornos Reservoir leakages are concentrated in a limited area of the reservoir and are rather small compared to

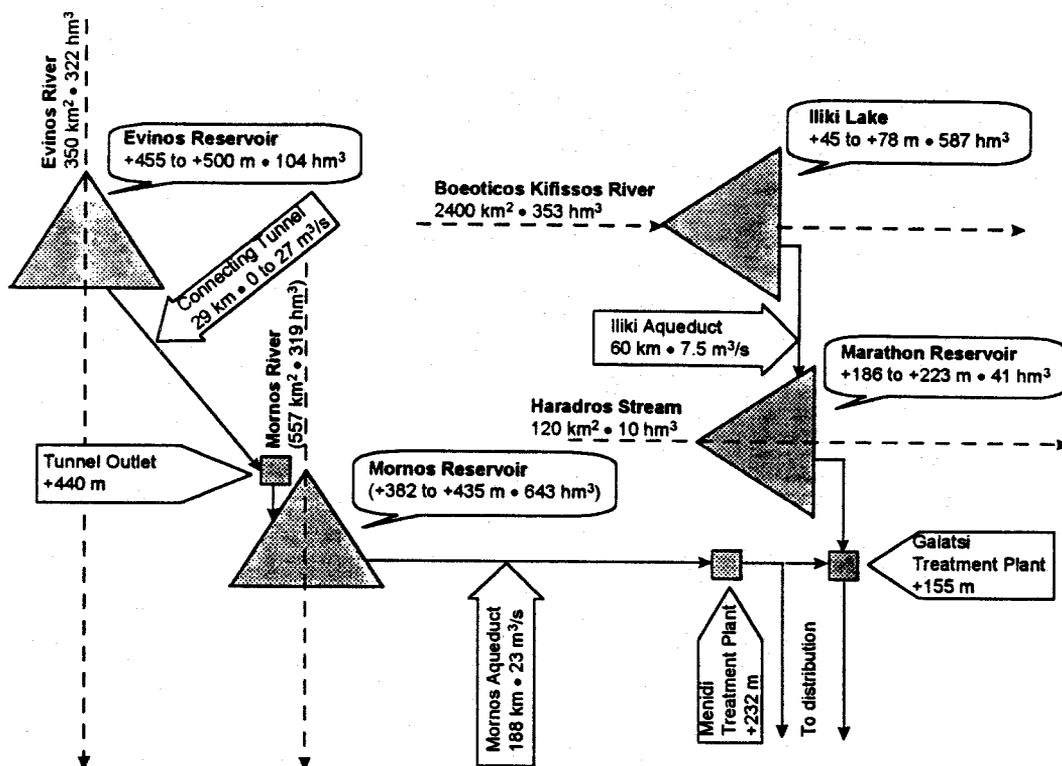


Figure 2. Schematic representation of the Athens water supply system. Characteristic data of the system are annotated: for rivers, the watershed area and the mean annual reservoir inflow; for reservoirs, the minimum and maximum water level and the active storage capacity; for aqueducts, the length and conveyance capacity; and for other components, the characteristic water levels.

those of Lake Iliki. They are effectively modeled via the following linear relationship:

$$L_L = 22.865 \times 10^{-3}(Z - 384.2) \quad Z \geq 384.2 \text{ m} \quad (23)$$

Apart from water supply to the greater Athens area, the system provides water for irrigation of the Kopais Plain in the

Boeotia district. This secondary water use is fixed by decree at 50 hm³/yr but may be reduced in case of water shortages in the water supply of Athens.

In the simulation model of the system operation an arrangement has been made for keeping safety storages in case of possible damages to the system aqueducts. For the case of

Table 1. Mean Values, Standard Deviations, and Lag-One Autocorrelation Coefficients of Monthly Inflows to the Reservoirs of the Athens Water Supply System

	Evinos			Mornos			Iliki§		
	<i>m</i> *	<i>s</i> †	<i>r</i> ‡	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>r</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>r</i>
October	7.2	6.5	0.32	12.2	13.9	0.16	20.1	10.1	0.59
November	30.4	23.5	0.17	31.0	22.9	0.32	25.3	9.4	0.65
December	60.0	47.1	0.49	48.8	28.1	0.01	44.3	37.5	0.46
January	48.3	34.6	0.19	51.9	32.3	0.25	52.5	28.5	0.60
February	56.4	32.0	0.75	48.1	25.8	0.31	53.1	20.7	0.59
March	47.8	27.1	0.0	39.9	14.3	0.23	63.3	18.3	0.26
April	34.0	12.2	0.29	33.4	9.7	0.73	40.4	21.5	0.78
May	18.5	7.1	0.60	24.1	10.5	0.78	18.9	14.5	0.80
June	8.2	3.1	0.73	13.5	5.9	0.48	3.8	5.4	0.45
July	4.7	1.5	0.81	6.4	3.8	0.0	0.4	1.0	0.54
August	3.1	0.8	0.68	5.3	3.1	0.20	1.3	2.6	0.47
September	2.9	0.9	0.11	4.8	2.9	0.75	9.9	6.8	0.56
Year	321.5	111.2	0.17	319.1	77.9	0.03	333.4	115.8	0.0

Where the record periods are defined as follows: Evinos, 1961–1963 and 1970–1988; Mornos, 1951–1956, 1963–1968, and 1979–1988; and Iliki, 1960–1964, 1968–1976, and 1977–1988.

*Mean value, in cubic hectometers.

†Standard deviation, in cubic hectometers.

‡Lag-one autocorrelation coefficient.

§Inflow from B. Kifissos River (not including inflow from Iliki's own basin)

Table 2. Monthly Water Demand Distribution Coefficients d_j ($j = 1, 2, \dots, 12$) for the Athens Water Supply System

	Water Supply of Athens, %	Irrigation of Kopais Plain, %
October	8.75	0.00
November	7.75	0.00
December	7.75	0.00
January	7.17	0.00
February	6.58	0.00
March	7.42	0.00
April	7.58	2.58
May	8.67	7.17
June	9.33	17.58
July	10.08	39.84
August	9.75	32.83
September	9.17	0.00
Annual sum	100.00	100.00

damage to the Mornos Aqueduct a sufficient volume of water is always kept in Lake Iliki to satisfy water demand of Athens and irrigation of the Kopais Plain for six months to come. Minimum inflow to Lake Iliki as well as the storage in the Marathon Reservoir are considered to contribute to safety storage. Owing to the large dead volume of the Mornos Reservoir (119 hm³), which can be pumped in emergency situations, and to the absence of local water uses from that reservoir, no such safety concern was necessary for the case of damage to the Iliki aqueduct.

The annual target release D is expressed in cubic hectometers per year. In the calculations this is first transformed into a monthly mean value $D_m (= D/12)$, which, in turn, is distributed throughout the months of the year via the water demand distribution coefficients

$$d_j = \frac{D_j}{D_m} \quad (24)$$

where d_j and D_j are the water demand distribution coefficient and the target release for month j ($j = 1, 2, 3, \dots, 12$), respectively. Water demand distribution coefficients for both the water supply of the greater Athens area and the irrigation of Kopais Plain are given in Table 2.

3.2. Brief Review of the Model Used for Synthetic Inflow Generation

A multivariate stochastic model was used for generation of inflows. The model generates the runoff of the three basins and the concurrent rainfall depths at the three reservoirs simultaneously. In addition, it generates the evaporation depths from the three reservoirs simultaneously but with no reference to the concurrent rainfall and runoff. These generations result in equivalent water depths, while the corresponding volume quantities are determined during the system simulation, given the variation of the reservoir areas. For each of the two cases (concurrent rainfall and runoff, and evaporation) we start with the generation of annual quantities, which is performed by a multivariate AR(1) model. Then these quantities are disaggregated into monthly depths as the monthly step was proven sufficient for the system simulation. The disaggregation is performed using the Dynamic Disaggregation Model (DDM) [Koutsoyiannis, 1992]. This model preserves the first three marginal moments of the lower level (monthly) variables, the lag-one autocorrelation coefficients, and the lag-zero cross-

correlation coefficients. We note that the test hydrologic system for the development of DDM was the same system as the present application, and thus the interested reader is referred to Koutsoyiannis [1992] for a detailed description of the model and its performance.

3.3. Results

The proposed method was applied in two real-world problems related to the water supply system of greater Athens. In the first problem (problem 1) the ultimate development of the system is studied. Specifically, the maximum possible system release is sought by taking no account of the operating cost (i.e., for pumping). In the second problem (problem 2) the system operation is studied for a level of development lower than the ultimate, considering this time the related economic aspects. Specifically, a target release level is assumed to be less than the maximum that is estimated in problem 1, and the minimization of the operating cost is sought.

In problem 1 the total target release from the system, D , is maximized for a selected level of failure probability. The objective function to be maximized is given by (16), while constraint (17) must also be satisfied. The adopted level of the probability of failure for the water supply system of greater Athens is $\alpha' = 1\%$ [Koutsoyiannis and Xanthopoulos, 1990], a value that provides a high level of security. So during the optimization process, the point (\mathbf{a} , \mathbf{b}) in the parameter space, which yields the maximum target release for $\alpha' = 1\%$ is sought. However, the simulation of the system operation for a specific set of parameter values yields α' for a given water demand D . To avoid an excessive number of simulations with large computing times, we followed a procedure with two steps. In step 1 a level of target release D is selected and parameters are estimated that minimize the probability of failure or, otherwise, maximize the system reliability

$$\max \text{prob} \left(\sum_{i=1}^N R_i = D \right) = f'_1(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \quad (25)$$

with the constraint

$$D = \text{const} \quad (26)$$

Step 2 simply involves finding a target release that gives the desired level of reliability with the parameter values already estimated in step 1. The basic hypothesis behind this two-step optimization lies in the fact that (16) and (17) can be interchanged as far as their role as objective function and constraint is concerned. This is reasonable when the assumed level of target release in step 1 does not differ significantly from the target release estimated in step 2, a condition that must be checked a posteriori.

All simulations are based on a synthetic data set for a period of 2000 hydrological years. Nine hydrological variables are simulated, i.e., three reservoirs (Evinos, Mornos, and Iliki) \times three variables (runoff, precipitation, and evaporation).

The main focus of this work is to explore the features of the approach associated with the parameterization of the proposed reservoir system operating rule and not to establish an efficient optimization algorithm. Our purpose is served better by using the uniform grid method of parameter optimization already described in classical texts [Loucks et al., 1981, pp. 65–68]. In this study the method is applied in the form of successive steps or iterations with grids that are nested to each other and

become progressively finer. In this method the objective function is evaluated via simulation at all the grid points of the parameter space that satisfy constraints (5). The algorithm starts by dividing the interval of variation $P_1(p)$ of each parameter p with an interval divider δ_1 to obtain the initial (coarsest) grid. Then, we construct a second grid with finer resolution by taking a smaller interval $P_2(p)$ of each parameter p only in the vicinity of the optimum and dividing it by a divider δ_2 . This is considered as the first iteration. The algorithm proceeds in this way for a number of iterations M until convergence to one or more optima. Note that simulation runs are performed for $M + 1$ grids. The convergence criterion depends on the objective function to be optimized. For (25), of step 1, iterations are stopped when maximum difference between failure probability values within a grid drops below the critical value $\varepsilon_1 = 0.002$. This is chosen as a small multiple of 0.0005, which is the minimum probability level that can be calculated for a period of simulation of 2000 years.

In our study the parameter set is six-dimensional, i.e., $(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3)$, where indexes 1, 2, and 3 correspond to Evinos, Mornos, and Iliki, respectively, but owing to (5), this is reduced to a four-dimensional problem. Preliminary tests showed little sensitivity to parameters a_i ($i = 1, 2, 3$). One example is given in Table 3 for a particular set of parameters $\mathbf{b} = (0.20, 0.80, 0.00)$ and $D = 700 \text{ hm}^3$. This table shows that results are insensitive to parameters \mathbf{a} , and the rule proposed was initially overparameterized, at least for our case study.

Given the results of the sensitivity analysis and the discussion of the number of parameters presented in section 2.3, we opted to proceed to the optimization of parameters b_i ($i = 1, 2, 3$) by selecting constant values for a_i , i.e., $a_i = 0$ ($i = 1, 2, 3$), or equivalently, to use the homogeneous instead of the complete linear rule. In this case the parameter space is initially three-dimensional with $0 \leq b_i \leq 1$ ($i = 1, 2, 3$) and is restricted to a two-dimensional parameter space given that (5) holds. The results are presented in Table 4. In Figure 3 we depict the results of the initial (coarsest) grid in contours with equal probability of failure for the space of parameters b_i that is mapped to an equilateral triangle. We observe that (1) the probability of failure follows a rather smooth and continuously curved surface; (2) this surface is not symmetrical with respect to the sides of the triangle, which is explained by the different

Table 3. Sensitivity Analysis of the Failure Probability α' of the Athens Water Supply System to Parameters α_i ($i = 1, 2, 3$) for Step 1 of the Optimization Process

Test	Parameters α_i			α' , %
	Evinos	Mornos	Iliki	
1	0	-500	500	1.40
2	0	-400	400	1.40
3	0	-300	300	1.40
4	0	-200	200	1.40
5	0	-100	100	1.40
6	0	0	0	1.40
7	100	-400	300	1.40
8	100	-300	200	1.40
9	100	-200	100	1.40
10	100	-100	0	1.40

In the case of maximization of the expected annual total release from the system (Problem 1). The annual target release is 700 hm^3 . Parameters b_i are held constant: $b_1 = 0.20$ for Evinos, $b_2 = 0.80$ for Mornos and $b_3 = 0.00$ for Iliki.

Table 4. Summary of Results of the Optimization Process for Problem 1 (Step 1) and Problem 2.

	Problem 1 (Step 1)	Problem 2
Mean annual target release, hm^3	700	600
Number of iterations, M	3	6
Initial interval for b_i	[0, 1]	[0, 1]
Interval divider δ_j , ($j = 1, \dots, M$)	2*	2
Critical value for stopping	0.002	0.005
Final failure probability, %	1.40	1.00
Mean annual abstraction from Lake Iliki $E[R_3]$, hm^3	182	104

*For all iterations except the first, where $\delta_1 = 5$.

conditions of the three reservoirs; (3) the lowest values of the surface correspond to $b_3 = 0$, which is explained by the high leakages of Lake Iliki (the zero value means that we withdraw water from Iliki as much as possible); (4) there is a flat area with minimum probability (equal to 1.4%) rather than a single point; and (5) further investigation of this area is needed for the selection of the final parameter set.

After three iterations we obtained the final grid. The flat area already detected in the initial grid was proved larger, and no probability less than 1.4% appears. The flat area is advantageous as it provides flexibility: any point with $\alpha' = 1.4\%$ could be chosen. The selection of the final parameter set was based on engineering criteria. We have chosen the point with the lowest value of b_1 , which corresponds to conveying as much water as possible from the Evinos to the Mornos Reservoir. The idea behind this is to store water as close to Athens as possible for safety reasons. Thus the final parameters set is $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = [(0, 0, 0)^T, (0.08, 0.88, 0.04)^T]$. In Table 4 we depict the main characteristics of the optimization process.

The optimization process for problem 1 is completed with

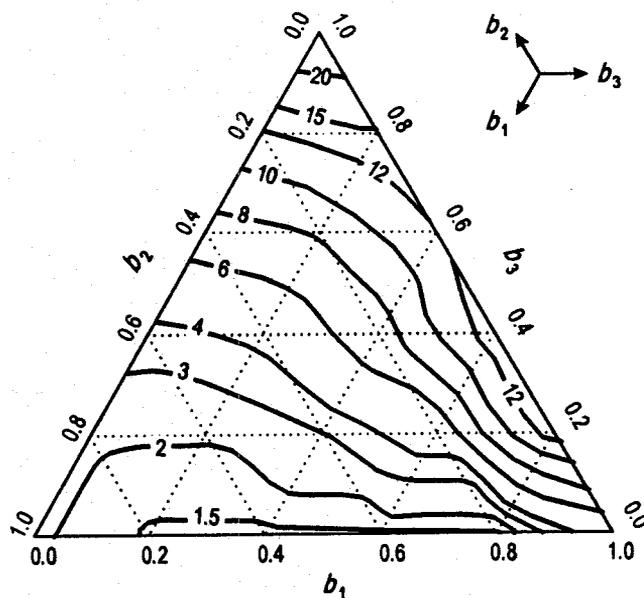


Figure 3. Contours of equal probability of failure α' (%) of the Athens water supply system for the first (coarsest) grid of step 1 of the optimization process of problem 1. The annual target release is 700 hm^3 . Parameters a_i are zero for all reservoirs.

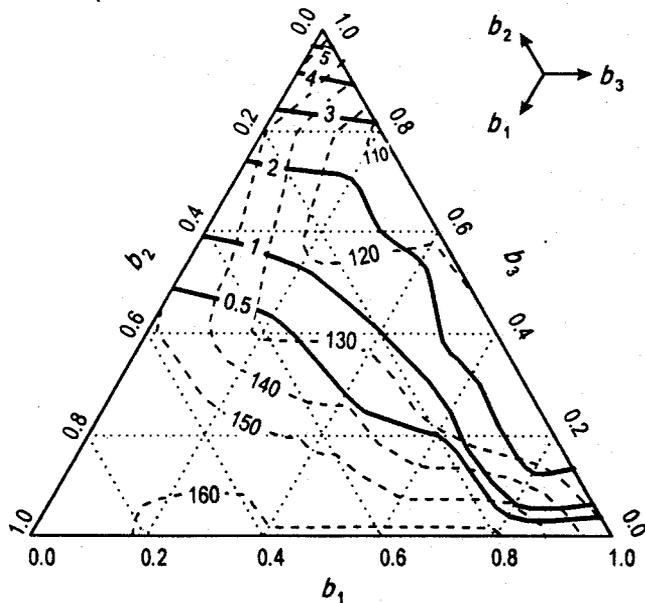


Figure 4. Contours of equal probability of failure α' (%) of the Athens water supply system (solid lines) and of equal mean annual abstraction from Lake Iliki $E[R_3]$ in cubic hectometers (dashed lines) for the first (coarsest) grid of the optimization process in problem 2. The annual target release is 600 hm^3 . Parameters a_i are zero for all reservoirs.

step 2 of the overall procedure. The final maximum target release for $\alpha' = 1.0\%$ is estimated at $690 \text{ hm}^3/\text{yr}$, a value very close to that of step 1 (700 hm^3).

Problem 2 involves minimizing operating costs for a given level of target release and a level of system reliability. The problem is formulated so as to optimize the objective function (18) with the constraints (17) and (26). Water from the western part of the system (the Evinos-Mornos subsystem) flows to Athens via gravity, while water from Iliki is pumped. Consequently, the operating cost of the Evinos and Mornos works can be neglected if compared to the cost from Iliki. Furthermore, the cost of pumping is a linear function of withdrawals R_3 from Iliki. So the objective function (18) becomes

$$\min E[R_3] = f_2(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \quad (27)$$

As in problem 1, the uniform grid method is applied with parameters $a_i = 0$ ($i = 1, 2, 3$) and parameters b_i satisfying (5). The procedure here tries, for a given target release D , to get a solution that is closer to satisfying constraint (17) while at the same time optimizing f_2 in (27).

The results are presented in Table 4. The values of the objective function for the initial (coarsest) grid are also shown in Figure 4, where we have drawn contours of equal probability of failure and of equal mean annual abstraction from Lake Iliki. We observe that the general shape of the surface of probability is quite similar to that of Figure 3 and has its minimum values in the same region (although the absolute values of probability are different in the two figures). Figure 4 allows us to localize the area where the contour with probability of failure 1% passes, i.e., where the constraint (17) is valid. Guided by this we constructed a finer grid and so on. The criterion to stop the iteration was to obtain improvements of the objective function that are less than a certain critical value ε_2 in relative terms. In our case $\varepsilon_2 = 0.005$. Table 4 summarizes

the results. The final set of optimal parameters is $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = [(0, 0, 0)^T, (0.106, 0.291, 0.603)^T]$. The value of the objective function is $E[R_3] = 104 \text{ hm}^3$. Note that this value is 78 hm^3 lower than the corresponding value for problem 1 (182 hm^3). We can also easily notice that the optimal parameter set of problem 2 is clearly different from that of problem 1.

To validate the rule proposed, we compared the above results with those obtained by heuristic rules with no parameters to be optimized. These are (1) the well-known space rule expressed by (8), (2) the leakage rule as described in section 2.2, and (3) the conveyance rule given by (10). We have tested all three rules applied throughout the year as well as combinations of them applied separately for the dry and wet season, as shown in Table 6 (except for three combinations that had no meaning).

The comparison is performed only for Problem 1 since in this problem we can find the maximum target release from the system that corresponds to a failure probability equal to 1%. The application of the above heuristic rules to Problem 2 is not possible because, in that case, there is no degree of freedom: once the target release is fixed the failure probability is also fixed and cannot be made equal to its desired level (1% in our case).

For each one of the three basic heuristic rules we estimated the values of the parameters in equation (4). First, the parameter values for the space rule are estimated. From Figure 5 we conclude that ratios $E[CO_i]/\sum_{j=1}^N E[CO_j]$ are nearly constant for all months with mean values 0.313, 0.297, and 0.390 for Evinos, Mornos, and Iliki, respectively. With these values we obtain from (8) the values of (\mathbf{a}, \mathbf{b}) shown in Table 5. The graphical representation of the space rule is given in Figure 6, in comparison with the optimized rules of problems 1 and 2. The parameter sets for all other heuristic rules, determined from the corresponding equations of section 2.2, as well as those obtained by optimizing the parametric rule for problems 1 and 2, are shown also in Table 5. We observe that (1) in all rules the parameters a_i are zero except for the space rule, (2) the parameter b_3 for Lake Iliki optimized for problem 1 (parametric rule) takes a value similar to that of the leakage rule, and (3) the parameters b_i for the Evinos and Mornos reser-

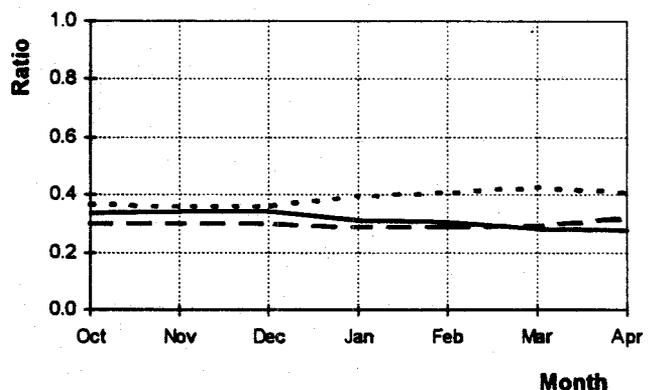


Figure 5. Ratios of cumulative monthly inflows into each one of the three reservoirs to the system cumulative monthly inflows (b_i in (8)). Cumulative inflows are considered up to the end of the refill cycle. Displayed values for the months of the refill cycle (October to April) are averages for the common period (for all reservoirs) of data availability (1979–1980 to 1987–1988). Continuous, dashed, and dotted lines correspond to the Evinos, Mornos, and Iliki reservoirs, respectively.

Table 5. Parameter Values for Various Heuristic Operating Rules and the Optimized Proposed Rule

Rule	Evinos		Mornos		Iliki	
	α_1 , hm ³	b_1	a_2 , hm ³	b_2	a_3 , hm ³	b_3
Space	-315	0.313	247	0.297	68	0.390
Leakage	0	1	0	0	0	0
Conveyance	0	0.377	0	0.377	0	0.246
Parametric, problem 1	0	0.080	0	0.880	0	0.040
Parametric, problem 2	0	0.106	0	0.291	0	0.603

voirs optimized for problem 1 are not well approximated by any one of the heuristic constant-parameter rules.

In Table 6 we depict the annual target release corresponding to the 1% failure probability for each one of the rules tested. These results allow us to make the following observations and interpretations. First, the space rule, applied throughout the year (case 1), gives a total annual release of 620 hm³, which is 70 hm³ less than that obtained by our method. This is expected since the avoidance of spills results in storing water mainly in the Mornos and Iliki reservoirs, thus leading to high leakage losses especially from Iliki. Second, the introduction of the

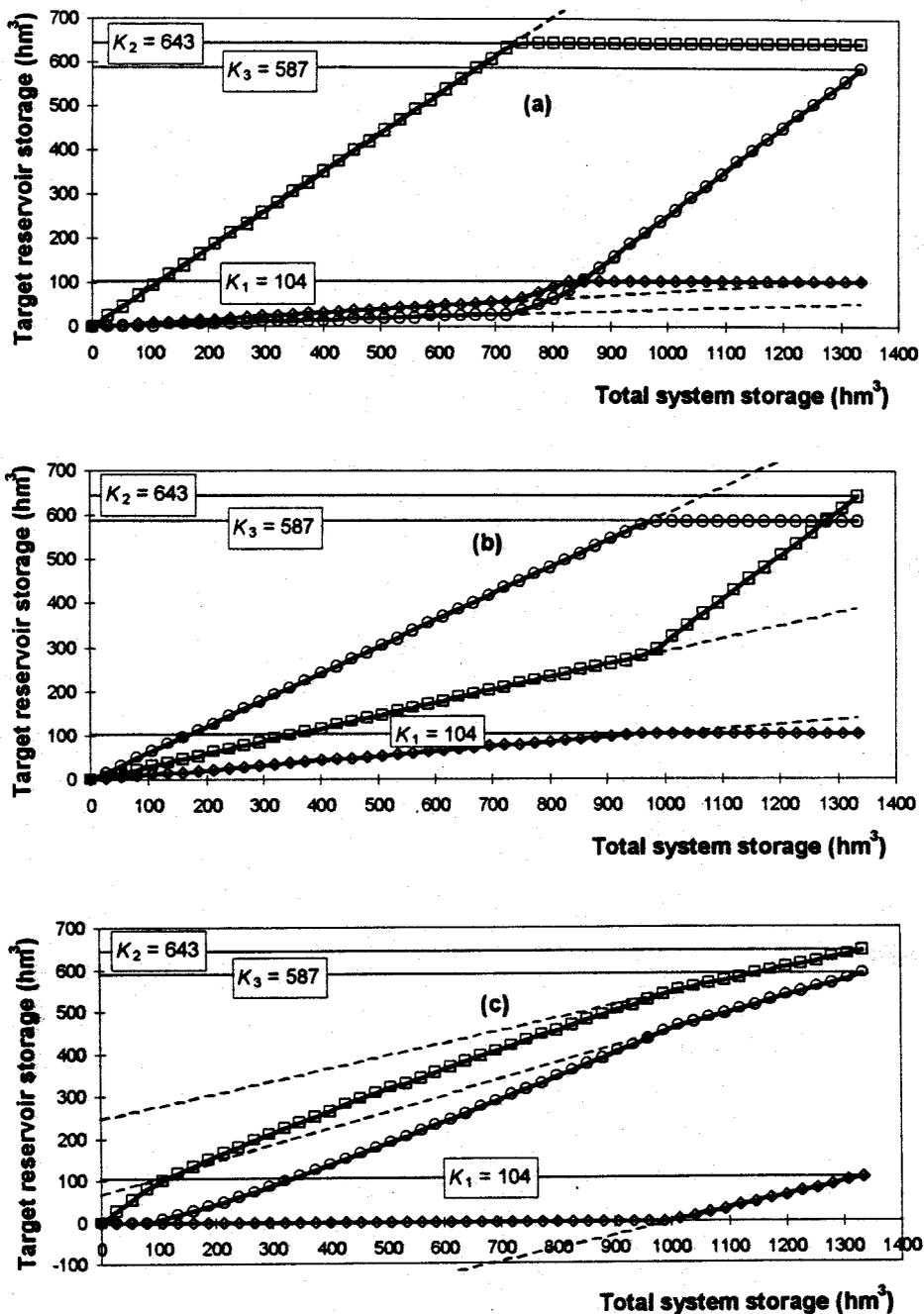


Figure 6. Graphical representation of operating rules for (a) the final parameter set of problem 1, (b) the final parameter set of problem 2, and (c) the parameter set of the space rule. Solid lines with rhombi, squares, and circles correspond to reservoirs 1, 2, and 3 (Evinos, Mornos, and Iliki), respectively, and represent the adjusted rule (equation (13)). Dashed lines represent the initial linear rule (equation (4)).

Table 6. Annual Target Release Satisfied With 1% Failure Probability for Various Heuristic Operating Rules and the Optimized Proposed Rule (problem 1)

Case	Rule		Annual Target Release, hm ³
	Throughout the Year	Wet Season Dry Season	
1	S		620
2		S L	620
3		S C	628
4	L		633
5		L C	635
6	C		652
7	P		690

The rules are applied throughout the year or by season.

S is the space rule; L is the leakage rule; C is the conveyance rule; and P is the parametric rule proposed.

leakage rule in the dry season while the space rule is still used in the wet season (case 2) does not improve the results. In this case the leakage rule tries to store all water of the dry season in the Evinos Reservoir, while in the previous wet period this was almost emptied by the space rule to keep empty space for the significant inflows from the Evinos basin. Because of the very low inflows in the dry season, no sensitivity to the introduction of the leakage rule is revealed. Third, the introduction of the conveyance rule in the dry season while the space rule is still used in the wet season (case 3) gives a small improvement of 8 hm³ with regard to the previous case. We note that the conveyance rule tries to store more water in the Evinos-Mornos subsystem, thus producing a beneficial result. Fourth, the leakage rule used throughout the year (case 4) performs better than the space rule and the combination of the latter with the leakage rule. In this case the leakage rule tries keep the Evinos Reservoir full for both seasons. In the wet season this is perfectly possible because of high inflows but is done at the expense of a significant risk of spillage. However, the Mornos reservoir is left relatively empty, although it does not leak significantly (as compared to Iliki). Fifth, the leakage rule used throughout the year (case 4) has a slightly better performance in comparison with the space rule combined with the conveyance rule (case 3). Again, here the introduction of the leakage rule in the wet season proved beneficial. Sixth, the performance of the leakage rule when combined with the conveyance rule in the dry season (case 5) improved very slightly in comparison with the leakage rule throughout the whole year (case 4). We notice the same beneficial result of the use of the conveyance rule in the dry season, although the improvement is minor. Seventh, the use of the conveyance rule throughout the year (case 6) has the maximum performance of all the other rules tested (cases 1–5). As said before, this rule tries to store more water in the Evinos-Mornos subsystem, which happens to have large conveyance capacity. Coincidentally, the same subsystem has also lower leakage losses. As a result, the two effects are combined to improve the performance, but this is undoubtedly a fortuitous situation.

Comparing the results from all six rules or combinations thereof (cases 1–6) with those of the parametric rule proposed (case 7), we observe that in all cases the parametric rule gives significantly better results. We note that our parametric rule tries to store water mainly in the Mornos Reservoir, leaving

small quantities to the other two reservoirs; this behavior is not encountered by any of the heuristic rules tested.

As mentioned above, the heuristic rules without parameters subject to optimization are not suitable for problems such as problem 2 examined here. However, for illustrative purposes we give results only for the space rule in this case. Simulations with this rule and a level of annual target release of 600 hm³ gave a probability of failure equal to 0.6% and a mean annual release from Iliki of 127 hm³.

4. Summary and Conclusions

A parametric rule for multireservoir system operation is formulated and tested. It can be considered a generalization of the well-known space rule, which aims at avoiding unnecessary spills in one reservoir while others still have empty space. The proposed rule is much more general in the sense that in addition to the spill-avoidance objective, it simultaneously accounts for various other system operating goals: avoiding leakage losses, avoiding conveyance problems, taking into account the impacts of the reservoir system topology, and assuring satisfaction of downstream secondary uses. The rule is parameterized so that it contains two parameters for each reservoir. Theoretical values of the parameters are derived for each one of the above isolated goals. Since many real-world problems involve more than one of these goals, parameters are evaluated numerically to optimize one or more objective functions that are selected by the user. The rule drives a simulation model of the reservoir system, which is embedded in a scheme that optimizes the rule's parameters.

The parametric rule proposed is tested on the case of the water supply system of the city of Athens, Greece, comprising three main reservoirs on three separate water basins. Its complexity and idiosyncrasies make the system ideal as a test system, since many of the operating goals examined theoretically appear in this case study. Two problems are tackled in this case study. First, the ultimate development of the system is considered, and the total release from the system is maximized for a selected level of system reliability. Second, an intermediate development of the system is sought, and the pumping cost is minimized for a given reliability and a given level of target release less than that obtained in the first problem. A detailed simulation model on a monthly timescale has been used in the analyses. This included a generation model of synthetic annual hydrological data and a model for disaggregation of annual values into monthly values. Also, it included models describing system losses such as leakages and evaporation. The system's operating details such as the maintenance of safety storages were also taken into consideration. It appears that the parametric rule proposed has proven satisfactory in tackling the problem of finding the capabilities of a reservoir system on a long-term basis. Through its parameterization it effectively accommodates various system operating goals into a single-objective function. Insensitivity to a subset of the parameters was revealed in the case study, which allowed further simplification of the rule and restriction of the dimension of the parameter space to half the initial value.

Finally, the rule proposed is validated through comparison with other heuristic rules that satisfy specific goals (avoidance of spills, leakage losses, and conveyance problems). In all cases the proposed parametric rule was superior in its performance. Of course, storage and release trajectories obtained are not "optimal" in the absolute mathematical sense as the trajectory

ries must comply with a simple parametric relation. Nevertheless, once optimized, the proposed rule is very simple, mathematically, to apply even for a nonexpert user and is therefore recommended for situations with long-term studies of reservoir systems.

Acknowledgments. The research leading to this paper was partly performed within the framework of the project Evaluation and Management of the Water Resources of Sterea Hellas, project 8976701, funded by the Greek Ministry of Environment, Regional Planning and Public Works, Directorate of Water Supply and Sewage. We wish to thank the directors I. Leontaritis and T. Bakopoulos and the staff of this directorate for the support of this research. We also thank the personnel of the Athens Water Supply and Sewage Corporation and the Public Power Corporation for providing the necessary data for the case study and N. Mamassis and C. Anifanti for assisting in the preparing and criticizing the historic data records. The project manager, T. S. Xanthopoulos, is warmly thanked for his support throughout this work. We are grateful to the reviewers K. Ponnambalam, S. A. Johnson, and J. R. Stedinger for their constructive comments on an initial manuscript submitted in April 1995. We also thank the Associate Editor, S. A. Johnson, and an anonymous reviewer for their comments on the final version of the paper.

References

- Askew, A., Chance-constrained dynamic programming and the optimization of water resource systems, *Water Resour. Res.*, 10(6), 1099–1106, 1974a.
- Askew, A., Optimum reservoir operating policies and the imposition of a reliability constraint, *Water Resour. Res.*, 10(1), 51–56, 1974b.
- Bower, B. T., M. M. Hufschmidt, and W. H. Reedy, Operating procedures: Their role in the design and implementation of water resource systems by simulation analysis, in *Design of Water Resource Systems*, edited by Maass et al., chap. 11, pp. 443–458, Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., 1962.
- Bras, R., R. Buchanan, and K. Curry, Real-time adaptive closed-loop control of reservoirs with the High Aswan Dam as a case study, *Water Resour. Res.*, 19(1), 33–52, 1983.
- Clark, E. J., New York control curves, *J. Am. Water Works Assoc.*, 42(9), 823–857, 1950.
- Clark, E. J., Impounding reservoirs, *J. Am. Water Works Assoc.*, 48(4), 349–354, 1956.
- Evenson, D. E., and J. C. Moseley, Simulation/optimization techniques for multi-basin water resource planning, *Water Resour. Bull.*, 6(5), 725–736, 1970.
- Foufoula-Georgiou, E., Convex Interpolation for gradient dynamic programming, *Water Resour. Res.*, 27(1), 31–36, 1991.
- Foufoula-Georgiou, E., and P. K. Kitanidis, Gradient dynamic programming for stochastic optimal control of multidimensional water resources systems, *Water Resour. Res.*, 24(8), 1345–1359, 1988.
- Georgakakos, A. P., Extended linear quadratic Gaussian control: Further extensions, *Water Resour. Res.*, 25(2), 191–201, 1989.
- Georgakakos, A. P., and D. H. Marks, A new method for the real-time operation of reservoir systems, *Water Resour. Res.*, 23(7), 1376–1390, 1987.
- Ginn, T. R., and M. H. Houck, Calibration of an objective function for the optimization of real-time reservoir operations, *Water Resour. Res.*, 25(4), 591–603, 1989.
- Johnson, S. A., J. R. Stedinger, and K. Staschus, Heuristic operating policies for reservoir system simulation, *Water Resour. Res.*, 27(5), 673–685, 1991.
- Johnson, S. A., J. R. Stedinger, C. A. Shoemaker, Y. Li, and J. A. Tejada-Guibert, Numerical solution of continuous-state dynamic programs using linear and spline interpolation, *Oper. Res.*, 41(3), 484–500, 1993.
- Kitanidis, P. K., and E. Foufoula-Georgiou, Error analysis of conventional discrete and gradient dynamic programming, *Water Resour. Res.*, 23(5), 845–858, 1987.
- Koutsoyiannis, D., A nonlinear disaggregation method with a reduced parameter set for simulation of hydrologic series, *Water Resour. Res.*, 28(12), 3175–3191, 1992.
- Koutsoyiannis, D., and T. Xanthopoulos, Reliability and safety of the Athens water supply system (in Greek) paper presented at the symposium of the Greek Committee for Water Resources Management, Athens, October 17, 1990.
- Loaiciga, H. A., and M. A. Mariño, An approach to parameter estimation and stochastic control in water resources with an application to reservoir operation, *Water Resour. Res.*, 21(11), 1575–1584, 1985.
- Loucks, D. P., and O. T. Sigvaldason, Multiple reservoir operation in North America, in *The Operation of Multiple Reservoir Systems*, edited by Z. Kaczmarck and J. Kindler, *ILASA Collab. Proc. Ser.*, CP-82-53, 1–103, 1982.
- Loucks, D. P., J. R. Stedinger, and D. A. Haith, *Water Resource Systems Planning and Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1981.
- Nalbantis, I., D. Koutsoyiannis, and T. Xanthopoulos, Modelling the Athens water supply system, *Water Res. Manage. Ser.*, 6, 57–67, 1992.
- Nalbantis, I., D. Koutsoyiannis, N. Mamassis, Le phénomène récent de secheresse persistante et l'alimentation en eau de la cité d'Athènes, in *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 6, edited by G. Maheras, Assoc. Int. de Climatol., Aix-en-Provence, France 1994.
- Sand, G. M., An analytical investigation of water supply reservoirs in parallel, Ph.D. thesis, Cornell Univ., Ithaca, N. Y., 1984.
- Sigvaldason, O. T., A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system, *Water Resour. Res.*, 12(2), 263–278, 1976.
- Snedovich, M., Reliability-constrained reservoir control problems, 1, Methodological issues, *Water Resour. Res.*, 15(6), 1573–1582, 1979.
- Snedovich, M., A variance-constraint reservoir control problem, *Water Resour. Res.*, 16(2), 271–274, 1980a.
- Snedovich, M., Analysis of a chance-constraint reservoir control model, *Water Resour. Res.*, 16(5), 849–853, 1980b.
- Stedinger, J. B., Sule, and D. Loucks, Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization, *Water Resour. Res.*, 20(2), 1499–1505, 1984.
- Su, S., and R. Deininger, Generalization of White's method of successive approximations to period Markovian decision processes, *Oper. Res.*, 20(2), 318–326, 1972.
- Su, S., and R. Deininger, Modeling the regulation of Lake Superior under uncertainty, *Water Resour. Res.*, 10(1), 11–25, 1974.
- Tejada-Guibert, J. A., S. A. Johnson, and J. R. Stedinger, Comparison of two approaches for implementing multireservoir operating policies derived using stochastic dynamic programming, *Water Resour. Res.*, 29(12), 3969–3980, 1993.
- Young, G. K., Finding reservoir operating rules, *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 93(HY6), 297–321, 1967.
- Wasimi, S., and P. K. Kitanidis, Real-time forecasting and daily operation of a multireservoir system during floods by linear quadratic Gaussian control, *Water Resour. Res.*, 19(6), 1511–1522, 1983.

D. Koutsoyiannis and I. Nalbantis, Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, National Technical University, 5 Iroon Polytechniou, GR-157 80 Zografou, Greece. (e-mail: nal@hydro.civil.ntua.gr)

(Received April 11, 1996; revised March 10, 1997; accepted April 4, 1997.)

Optimal decomposition of covariance matrices for multivariate stochastic models in hydrology

Demetris Koutsoyiannis

Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, National Technical University, Athens

Abstract. A new method is proposed for decomposing covariance matrices that appear in the parameter estimation phase of all multivariate stochastic models in hydrology. This method applies not only to positive definite covariance matrices (as do the typical methods of the literature) but to indefinite matrices, too, that often appear in stochastic hydrology. It is also appropriate for preserving the skewness coefficients of the model variables as it accounts for the resulting coefficients of skewness of the auxiliary (noise) variables used by the stochastic model, given that the latter coefficients are controlled by the decomposed matrix. The method is formulated in an optimization framework with the objective function being composed of three components aiming at (1) complete preservation of the variances of variables, (2) optimal approximation of the covariances of variables, in the case that complete preservation is not feasible due to inconsistent (i.e., not positive definite) structure of the covariance matrix, and (3) preservation of the skewness coefficients of the model variables by keeping the skewness of the auxiliary variables as low as possible. Analytical expressions of the derivatives of this objective function are derived, which allow the development of an effective nonlinear optimization algorithm using the steepest descent or the conjugate gradient methods. The method is illustrated and explored through a real world application, which indicates a very satisfactory performance of the method.

1. Introduction

In the parameter estimation phase of all multivariate models of stochastic hydrology, we confront the problem of decomposing a covariance matrix c into another matrix b such as $c = bb^T$ (also known as "taking the square root" of c). It is well known that this problem has an infinite number of solutions when c is positive definite and no (real) solution otherwise. In the era of the first development of the multivariate stochastic models in hydrology, *Matalas and Wallis* [1971] (see also *Matalas and Wallis* [1976]) first pointed out that multivariate stochastic models in hydrology may be inconsistent in the sense that their covariance matrix c , estimated by the historical hydrological data, may not be positive definite; in that case the "square root matrix" b , which is necessary to express the model itself, does not exist. As will be explained in section 2, such inconsistent matrices are encountered either when only a subset of the covariances among related variables are explicitly modeled or when missing data affect the parameter estimation. In real world applications, such situations are not infrequent (see *Grygier and Stedinger* [1990, p. 31] and section 5 below). Interestingly, *Slack* [1973] in his article with the emphatic title "I would if I could" showed that multivariate synthetic hydrological series may lead to an inconsistent (i.e., indefinite) covariance matrix c , even if those series were the output of a consistent and simple stochastic model (such as the bivariate Markovian model).

Hydrologists have not hesitated to provide approximate solutions in cases of inconsistent matrices. Various approximate techniques were presented in several works which could be

titled "I could if I should." Among them are those proposed by *Mejía and Millán* [1974] (also quoted by *Bras and Rodriguez-Iturbe* [1985, p. 98]), *Grygier and Stedinger* [1990, pp. 31-33], *Koutsoyiannis* [1992], and *Koutsoyiannis and Manetas* [1996]. These techniques are rather empirical and result in more or less significant alteration of the covariance matrix c . A more theoretical approach was devised by *Rasmussen et al.* [1996], who suggested determination of b by numerical constrained optimization, where the objective function is the squared difference between the observed covariance of the data and that produced by the estimated model, and the constraint is the requirement for a positive definite matrix c . This method was formulated for a two-site case (i.e., for a matrix c with size 2×2); in this case it is convenient to express the positive definiteness constraint analytically, but it may be difficult to expand to higher-dimensional problems.

Seeking for a more generalized theoretical basis for remedying inconsistent covariance matrices, we will assume that whatever the dimensionality of the problem is, there exists an optimal matrix b that results in the least significant alteration of c , or the best approximation of the original c . Then, the questions arise of (1) how we can objectively quantify the degree of approximation and (2) how we can search systematically to find the optimal solution.

In the case of a consistent (i.e., positive definite) covariance matrix c there exist two well-known algorithms for deriving two different solutions b (see, for example, *Bras and Rodriguez-Iturbe* [1985, p. 96]). The first and simpler algorithm, known as triangular or Cholesky decomposition, results in a lower triangular b . The second, known as singular value decomposition, results in a full b using the eigenvalues and eigenvectors of c . However, since it is known that there exists an infinite number of solutions b , the question arises whether there exists an

optimal solution, possibly different from these two. The answer to this question would be negative if we had no other concern apart from the determination of \mathbf{b} . In that case the computationally simpler lower triangular \mathbf{b} is the most preferable. However, as we will see, there are cases where other concerns must be considered and the answer to this question becomes positive. Then, the subsequent questions are (1) how we can quantify this optimality and (2) how we can search systematically to find the optimal solution. Again, we have about the same questions for consistent matrices as in the case of inconsistent matrices. This enables a unique treatment of the decomposition problem for consistent or inconsistent matrices.

Another frequent problem in multivariate stochastic models is encountered when we attempt to preserve the coefficients of skewness of the model variables. The auxiliary variables associated with the stochastic model, also known as noise variables or innovation variables, may potentially have very high coefficients of skewness that are practically unachievable. This was first reported by *Todini* [1980], who encountered a coefficient of skewness greater than 30 and was not in a position to preserve it. *Koutsoyiannis and Manetas* [1996] related the problem of high skewness to that of the determination of the matrix \mathbf{b} , since the skewness coefficients are proportional to the inverse of matrix $\mathbf{b}^{(3)}$, that is, the matrix whose elements are the cubes of \mathbf{b} . The close relation of these two problems can contribute to the quantification of the optimality of matrix \mathbf{b} in the case of either consistent or inconsistent \mathbf{c} . That is, we can set the requirement that the matrix \mathbf{b} must result in as small a coefficient of skewness of the auxiliary variables as possible.

The purpose of this study is the development of a systematic method to remedy all the above described parameter estimation problems for both consistent and inconsistent covariance matrices, also answering the questions set above. All problems are resolved in a unique manner at the grounds of an optimization framework. A single objective function incorporating all concerns about the matrix \mathbf{b} is proposed, and a procedure is developed for finding the optimal \mathbf{b} . This procedure is based on the nonlinear optimization theory and utilizes both the objective function and its partial derivatives with respect to \mathbf{b} , which are analytically derived in this paper.

The paper is organized in six sections. Section 2 is devoted to the clarification of notation and some introductory aspects of a generalized stochastic model that constitutes the basis for further analysis. In section 3 we formulate the conditions that determine an optimal matrix \mathbf{b} and develop the objective function. In section 4 we develop the numerical procedure for determining the optimal \mathbf{b} . In section 5 we present a case study to illustrate the method and investigate some practical issues. Section 6 is devoted to conclusions and discussion. In addition, there is an appendix where we have placed an essential part of the paper, that is, the analytical derivation of the derivatives of the objective function.

2. Stochastic Model

In the following analysis we will consider a general type of linear model which is typical in stochastic hydrology, that is,

$$\mathbf{Y} = \mathbf{a}\mathbf{Z} + \mathbf{b}\mathbf{V} \quad (1)$$

where \mathbf{Y} is a vector of n stochastic variables to be generated, \mathbf{Z} is a vector of m stochastic variables with known values (n and m may be equal or not), \mathbf{V} is a vector of n random variates with

unit variance, mutually independent, and also independent of \mathbf{Z} (often called noise, innovation, or auxiliary variables), and \mathbf{a} and \mathbf{b} are matrices of coefficients with sizes $n \times m$ and $m \times n$, respectively. (In this paper we use uppercase letters for random variables and lowercase letters for values of variables or coefficients; also we use bold letters for matrices or vectors and regular letters for scalars.) Generally, the elements of \mathbf{Y} represent specific hydrologic processes (rainfall, runoff, etc.) at some locations specified by an index $l = 1, \dots, n$, at a specific time period, whereas the elements of \mathbf{Z} represent the same or other related hydrologic processes at the same or other locations, generally at a previous time period. The variables \mathbf{Y} , \mathbf{Z} , and \mathbf{V} are not necessarily standardized to have zero mean and unit variance, although this is the case in most common models; however, \mathbf{V} has by definition unit variance. Also, the variables \mathbf{Y} , \mathbf{Z} , and \mathbf{V} are not necessarily Gaussian.

For example, in the case of the stationary AR(1) model we set $\mathbf{Y} \equiv \mathbf{X}^t$ and $\mathbf{Z} \equiv \mathbf{X}^{t-1}$, where \mathbf{X}^t represents hydrologic variables at n sites at the time period (typically year) t and (1) is written

$$\mathbf{X}^t = \mathbf{a}\mathbf{X}^{t-1} + \mathbf{b}\mathbf{V}^t \quad (2)$$

Similarly, in the case of the seasonal AR(1) (or PAR(1)) model, (1) is written

$$\mathbf{X}^s = \mathbf{a}^s\mathbf{X}^{s-1} + \mathbf{b}^s\mathbf{V}^s \quad (3)$$

where now the matrices of coefficients depend on the season (typically month) s . In both these examples the vectors \mathbf{Y} and \mathbf{Z} have the same dimension $n = m$. In case of the AR(2) we have $\mathbf{Y} \equiv \mathbf{X}^T$ and $\mathbf{Z} \equiv [(\mathbf{X}^{T-1})^T, (\mathbf{X}^{T-2})^T]^T$ (where the exponent T denotes the transpose of a matrix or vector), so that $m = 2n$. Similar is the situation for the PAR(2) model. In another example, *Valencia and Schaake's* [1972, 1973] disaggregation model, \mathbf{Y} represents the $n = 12m$ monthly hydrologic variables at m sites, whereas \mathbf{Z} represents the m annual values at the same locations. Some other disaggregation models can be also reduced in the form (1) after appropriate assignments of the variables \mathbf{Y} and \mathbf{Z} .

The model parameters \mathbf{a} and \mathbf{b} are typically determined by the moment estimators

$$\mathbf{a} = \text{Cov}[\mathbf{Y}, \mathbf{Z}]\{\text{Cov}[\mathbf{Z}, \mathbf{Z}]\}^{-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{b}\mathbf{b}^T = \text{Cov}[\mathbf{Y}, \mathbf{Y}] - \mathbf{a} \text{Cov}[\mathbf{Z}, \mathbf{Z}]\mathbf{a}^T \quad (5)$$

where $\text{Cov}[\mathbf{X}, \mathbf{Y}]$ denotes the covariance matrix of any two random vectors \mathbf{X} and \mathbf{Y} , that is, $\text{Cov}[\mathbf{X}, \mathbf{Y}] := E\{(\mathbf{X} - E[\mathbf{X}])(\mathbf{Y}^T - E[\mathbf{Y}]^T)\}$ with $E[\]$ denoting expected value (the symbol $:=$ stands for equality by definition). These equations are direct generalizations for the model (1) of the equations of the AR and PAR models given by *Matalas and Wallis* [1976, p. 63], *Salas et al.* [1988, p. 381], *Salas* [1993, p. 19.31], and *Koutsoyiannis and Manetas* [1996], among others.

Another group of model parameters are the moments of the auxiliary variables \mathbf{V} . The first moments (means) are directly obtained from (1) by taking expected values, that is,

$$E[\mathbf{V}] = \mathbf{b}^{-1}\{E[\mathbf{Y}] - \mathbf{a}E[\mathbf{Z}]\} \quad (6)$$

The variances are by definition 1, that is,

$$\text{Var}[\mathbf{V}] = [1, \dots, 1]^T \quad (7)$$

The third moments are obtained by cubing both sides of (1), where previously we have subtracted the means, and then

taking expected values. Observing that because of the independence of Z and V , joint third-order terms of $(Z_k - E[Z_k])$ and $(V_l - E[V_l])$ have zero expected values, and similarly, because of the mutual independence of V , joint third-order terms of $(V_k - E[V_k])$ and $(V_l - E[V_l])$ also have zero expected values, we get

$$\mu_3[V] = (\mathbf{b}^{(3)})^{-1} \{ \mu_3[Y] - \mu_3[\mathbf{a}Z] \} \quad (8)$$

where $\mu_3[\Xi]$ denotes the third central moments of any random vector Ξ , that is, $\mu_3[\Xi] := E\{(\Xi - E[\Xi])^3\}$ and $\mathbf{b}^{(3)}$ denotes the matrix whose elements are the cubes of \mathbf{b} . (Throughout this paper we will extend this notation, that is, $\mathbf{u}^{(k)}$ for any matrix or vector \mathbf{u} and any power k .) Equation (8) is a generalization of those given by *Matalas and Wallis* [1976, p. 64], *Todini* [1980], and *Koutsoyiannis and Manetas* [1996]. Moments of order greater than 3 are not used, nor can they be estimated in a similar manner.

The set of equations (4)–(8) completely determine the model parameters, with the exception of (5), which does not estimate the parameter matrix \mathbf{b} but the product $\mathbf{b}\mathbf{b}^T$. This has to be decomposed, as will be discussed in the next section. Generally, all parameter estimation equations involve only moments of the original variables Y and Z , either marginal of order 1 to 3, or joint of order 2. There is an exception in (8), which involves third moments of a linear combination of Z_k (i.e., $\mathbf{a}Z$) which cannot be estimated in terms of the marginal third moments of Z_k (in fact, third-order joint moments of Z_k are involved, which are impractical to use). Thus the solution is to estimate $\mu_3[\mathbf{a}Z]$ from the available data for Z after estimating \mathbf{a} and performing the linear transformation $\mathbf{a}Z$. However, this is an inconvenient situation that can be avoided only if each row of \mathbf{a} contains only one nonzero element (for $m \leq n$), in which case (8) reduces to

$$\mu_3[V] = (\mathbf{b}^{(3)})^{-1} \{ \mu_3[Y] - \mathbf{a}^{(3)} \mu_3[Z] \} \quad (9)$$

Apparently, (4) is not appropriate to construct such an \mathbf{a} (i.e., with one nonzero element in each row), and therefore it must be replaced by a simplified form so that if a_{ij} is the only nonzero element for row i , then

$$\begin{aligned} a_{ik} &= \text{Cov}[Y_i, Z_j] / \text{Var}[Z_j] & k = j \\ a_{ik} &= 0 & k \neq j \end{aligned} \quad (10)$$

As a consequence, covariances among Y and Z apart from $\text{Cov}[Y_i, Z_j]$ are not preserved in this case. All other parameter estimation equations are still valid in their form written above with (8) replaced by its simplified form (9). This special case is met, for example, in the so-called contemporaneous AR(1) and contemporaneous PAR(1) model [*Matalas and Wallis*, 1976, p. 63; *Salas*, 1993, p. 19.31]. In both these models, \mathbf{a} is diagonal; for example, in the latter model

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \text{diag} [\text{Cov}[X_1^*, X_1^{*-1}] / \text{Var}[X_1^{*-1}], \dots, \\ &\text{Cov}[X_n^*, X_n^{*-1}] / \text{Var}[X_n^{*-1}]] \end{aligned} \quad (11)$$

Having expressed all basic equations for parameter estimation, we can return to the discussion of the introduction (section 1) for the situations leading to inconsistent matrices $\mathbf{c} = \mathbf{b}\mathbf{b}^T$. We must emphasize that the model (1) with parameter estimators (4) and (5) and complete data sets for estimation always results in positive definite, that is, consistent, \mathbf{c} . The only cases in which inconsistencies may appear are (1) the trivial

case with one series of equal values (resulting in a covariance matrix column with all zeroes); (2) when different items of the covariance matrices are estimated using records of different lengths due to missing data; and (3) when a simplified form of the matrix \mathbf{a} is adopted, such as in (10) (instead of the complete form (4)). To case 2 we must incorporate a rather usual practice followed in AR models (e.g., when $Y \equiv X'$ and $Z \equiv X'^{-1}$), which may cause inconsistencies even in the case of using the complete form of \mathbf{a} and having no missing data: This occurs when the contemporaneous covariance matrices (e.g., $\text{Cov}[X', X']$) are estimated using the complete series of length k whereas lagged covariance matrices (e.g., $\text{Cov}[X', X'^{-1}]$) are estimated using (unavoidably) smaller lengths (e.g., $k - 1$).

Given all the above equations for the model parameters we will focus on the estimation of \mathbf{b} , which also affects both $E[V]$ and $\mu_3[V]$, as follows from (6)–(9).

3. Formulation of the Conditions Determining an Optimal Matrix \mathbf{b}

As stated in the introduction, the purpose of this paper is the quantification of the performance of the parameter matrix \mathbf{b} through an appropriate objective function that incorporates all concerns about that matrix. Given that objective function, we can then develop an algorithm to find an optimal \mathbf{b} .

As an initial step for a more convenient formulation of the method for determining an optimal matrix \mathbf{b} , we perform a standardization of \mathbf{b} and the other matrices and vectors associated with it. We call \mathbf{c} the known right-hand term of (5), that is,

$$\mathbf{c} := \text{Cov}[Y, Y] - \mathbf{a} \text{Cov}[Z, Z] \mathbf{a}^T \quad (12)$$

The matrix \mathbf{c} is, in fact, the variance-covariance matrix of the vector $Y - \mathbf{a}Z$, and thus all its diagonal elements are positive (they represent the variances of the vector components). Thus we can standardize \mathbf{c} using the diagonal matrix

$$\mathbf{h} := \text{diag} (1/\sqrt{c_{11}}, \dots, 1/\sqrt{c_{nn}}) \quad (13)$$

so that

$$\mathbf{c}' := \mathbf{h}\mathbf{c} \quad (14)$$

has all its diagonal elements equal to 1 and the off-diagonal elements between -1 and 1 . (The off-diagonal elements may slightly violate this rule if \mathbf{a} is constructed by (10) or (11) instead of (4).) If we define

$$\mathbf{b}' := \mathbf{h}\mathbf{b} \quad (15)$$

then it is easily shown that (5) becomes

$$\mathbf{b}'\mathbf{b}'^T = \mathbf{c}' \quad (16)$$

and if we also define the vectors

$$\boldsymbol{\varphi} := \mathbf{h}^{(3)} \{ \mu_3[Y] - \mu_3[\mathbf{a}Z] \} \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\xi} := \mu_3[V] \quad (18)$$

then (8) becomes

$$\boldsymbol{\xi} = (\mathbf{b}'^{(3)})^{-1} \boldsymbol{\varphi} \quad (19)$$

The matrices \mathbf{h} and \mathbf{c}' and the vector $\boldsymbol{\varphi}$ are known, whereas \mathbf{b}' and $\boldsymbol{\xi}$ have to be determined; specifically, $\boldsymbol{\xi}$ depends on \mathbf{b}' .

Equations (16) and (19) constitute the basis for the proposed method. Since (16) does not always have a real solution, we set

$$\mathbf{d} := \mathbf{b}'\mathbf{b}'^T - \mathbf{c}' \quad (20)$$

and demand that all elements of \mathbf{d} be as close to zero as possible. This requirement can be expressed mathematically as

$$\text{minimize } \|\mathbf{d}\|^2 := \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}^2 \quad (21)$$

Here we have used the notation $\|\mathbf{d}\|$ for the norm, as if \mathbf{d} were a vector rather than a matrix. (If it were a vector, then $\|\mathbf{d}\|$ would be its Euclidean or standard norm; see, for example, Marlow [1993, p. 59].) We have used the square of this norm $\|\mathbf{d}\|^2$, instead of $\|\mathbf{d}\|$, for two reasons: first, because the computations are simpler, as we will see in the next section, and second, because it was found that the convergence of the optimization procedure is faster for $\|\mathbf{d}\|^2$ than for $\|\mathbf{d}\|$.

In addition, we must set a restriction that all diagonal elements of \mathbf{d} should be exactly zero. To justify this requirement, we observe that if the diagonal elements of \mathbf{d} are zero, then all diagonal elements of $\mathbf{b}\mathbf{b}'^T$ will equal those of \mathbf{c} . In turn, this will result in preservation of the diagonal elements of $\text{Cov}[\mathbf{Y}, \mathbf{Y}]$ (as implied from (5) and (12)), that is, in preservation of the variances of all elements of \mathbf{Y} . The preservation of the variances must have priority over that of covariances because the former is related to the preservation of the marginal distribution functions of the components of \mathbf{Y} . To express this requirement mathematically, we introduce the diagonal matrix

$$\mathbf{d}^* := \text{diag}(d_{11}, \dots, d_{nn}) \quad (22)$$

and demand that

$$\|\mathbf{d}^*\|^2 = 0 \quad (23)$$

Another restriction arises when we consider the preservation of the coefficients of skewness of \mathbf{Y} . The coefficients of skewness of \mathbf{V} (i.e., ξ) that preserve the coefficients of skewness of \mathbf{Y} are those obtained by (19). However, (19) may result in arbitrarily high elements of ξ if no relevant provision for \mathbf{b} is sought. Nevertheless, in the model application phase (i.e., the generation of synthetic data), an arbitrarily high coefficient of skewness is hardly achievable. Specifically, it is well known that in a finite sample of size k the coefficient of skewness is bounded [Wallis et al., 1974; Kirby, 1974; Todini, 1980] between $-\xi_{ub}$ and ξ_{ub} , where

$$\xi_{ub} = \frac{k-2}{\sqrt{k-1}} \approx \sqrt{k} \quad (24)$$

In particular, a series of generated values ν_r ($r = 1, \dots, k$) will have skewness $\pm \xi_{ub}$ only if all but one value of the series are equal. Apparently, this is not an accepted arrangement of the generated series, and thus an acceptable coefficient of skewness ξ_{acc} must be much less than ξ_{ub} (e.g., $\xi_{acc} = 0.5\xi_{ub}$; for $k = 1000$, $\xi_{acc} = 0.5 \times 1000^{0.5} \approx 16$). Consequently, we must set the restriction that all n auxiliary variables V_i ($i = 1, \dots, n$) have coefficients of skewness less than ξ_{acc} , that is,

$$\max\{|\xi_i|, i = 1, \dots, n\} \leq \xi_{acc} \quad (25)$$

The handling of (25) in an optimization problem is not mathematically convenient, especially when we wish to calcu-

late derivatives, as is the case in the procedure that we will develop. However, we recall that if

$$\|\xi\|_p := \left(\sum_{i=1}^n |\xi_i|^p \right)^{1/p} \quad (26)$$

is the p th norm of ξ , then $\|\xi\|_p \rightarrow \max\{|\xi_i|, i = 1, \dots, n\}$ when $p \rightarrow \infty$ (see, for example, Marlow [1993, p. 59]). Therefore (25) can be replaced by

$$\|\xi\|_p^2 \leq \xi_{acc}^2 \quad (27)$$

where we have squared the norm as we already did in (21) and (23). To avoid the absolute values within the right-hand side of (26), it suffices to use an even p . Specifically, we have adopted the value $p = 8$, which it was numerically proven to be adequately high for $\|\xi\|_p$ to approach $\max\{|\xi_i|, i = 1, \dots, n\}$.

In this formulation the problem of determining \mathbf{b}' becomes a constrained optimization problem with three elements: (1) the objective function (21) to be minimized, (2) the equality constraint (23), and (3) the inequality constraint (27). Note that (27) is related to \mathbf{b}' through (19). In terms of the Lagrangian method, the objective function and the constraints can be combined into the unconstrained minimization problem

minimize $\theta^2(\mathbf{b}', \lambda_2, \lambda_3)$

$$:= \|\mathbf{d}(\mathbf{b}')\|^2 + \lambda_2 \|\mathbf{d}^*(\mathbf{b}')\|^2 + \lambda_3 (\|\xi(\mathbf{b}')\|_p^2 - \xi_{acc}^2) \quad (28)$$

where λ_2 and λ_3 are Lagrangian multipliers for the equality constraint (23) and the inequality constraint (27), respectively. A general theoretical framework for solving this problem might consist of two steps: In the first step we assume that $\lambda_3 = 0$ (i.e., ignore the inequality constraint) and determine \mathbf{b}' by minimizing $\theta^2(\mathbf{b}', \lambda_2, 0)$. (This step may be avoided if \mathbf{c}' is positive definite, in which case \mathbf{b}' can be determined by the typical decomposition methods.) If the solution \mathbf{b}' of this step satisfies (27), then this solution is the optimal one. Otherwise, we proceed to the second step, where we perform the optimization of the complete function (28) (i.e., with $\lambda_3 \neq 0$) to simultaneously determine \mathbf{b}' , λ_2 , and λ_3 . For this optimization the Kuhn-Tucker optimality conditions (see, for example, Marlow [1993, p. 271]) must be satisfied.

Apparently, due to the complexity of the problem equations, an analytical solution of equations is not attainable, and a numerical optimization scheme must be established. An initial attempt to establish a numerical procedure for (28) (using typical available solvers for multivariate constrained optimization) indicated that it is not easy to optimize it simultaneously for the parameters \mathbf{b}' and the Lagrange multipliers. Particularly, it was observed that the initially assumed values of the Lagrange multipliers do not advance toward an optimal solution but remain almost constant through the consecutive steps of numerical optimization. At the same time, the objective function itself has a decreasing trajectory through the consecutive steps, owing to the appropriate modification of parameters \mathbf{b}' . This indicates that the formulation of the problem in terms of (28) is not effective in practice.

A direct alternative is the introduction of penalties for the constraints [e.g., Pierre, 1986, pp. 21, 333-340]. This alternative is similar to the Lagrangian formulation as it combines the objective function and the constraints into a simple unconstrained objective function; as we will see, this function can be very similar to (28). The essential difference between the two

formulations is the fact that in the second method the coefficients λ_2 and λ_3 are preset weighting factors of the penalizing terms, no longer determined by the optimization procedure. However, given the preliminary numerical results discussed in the previous paragraph (i.e., the constancy of coefficients λ through consecutive steps), this difference does not have any practical meaning for the problem examined.

To formulate the problem in terms of penalty functions, we observe that the equality constraint (23) is easily incorporated into the objective function (21) by the addition of the penalty term $\lambda_2 \|\mathbf{d}^*\|^2$, where λ_2 is assigned a large value so that even a slight departure of $\|\mathbf{d}^*\|^2$ from zero results in a significant "penalty." The inequality constraint (27) can be treated in several ways, of which the simplest is the addition of the penalty term $\lambda_3 \|\xi\|_p^2$ into the objective function (21), where λ_3 is a weighting factor appropriately chosen so that the penalty term is small enough when $\|\xi\|_p \leq \xi_{acc}$. The resulting objective function in this case is

$$\text{minimize } \theta^2(\mathbf{b}') := \frac{\lambda_1}{n^2} \|\mathbf{d}(\mathbf{b}')\|^2 + \frac{\lambda_2}{n} \|\mathbf{d}^*(\mathbf{b}')\|^2 + \lambda_3 \|\xi(\mathbf{b}')\|_p^2 \quad (29)$$

Here, we have divided $\|\mathbf{d}\|^2$ by n^2 , the number of elements of \mathbf{d} , to convert the total "square error" $\|\mathbf{d}\|^2$ into an average square error for each element of \mathbf{d} ; similarly, we have divided $\|\mathbf{d}^*\|^2$ by n because \mathbf{d}^* is diagonal, so that the number of nonzero elements is n . The coefficient λ_1 in the first term of the right-hand side of (29) may be considered equal to 1 unless specified otherwise (see the case study in section 5). We observe that (29) is similar to (28) from a practical point of view: As discussed before, the theoretical difference that the parameters λ are preset constants in (29) has no practical implication; also the omission in (29) of ξ_{acc}^2 , which is a constant, apparently does not affect the minimization process.

A reasonable choice for λ_2 to ensure that $\|\mathbf{d}^*\|^2$ will be very close to zero (so that constraint (23) will hold) is $\lambda_2 = 10^3$; this value assigns a weight of the average square error of the diagonal elements 3 orders of magnitude higher than that of the off-diagonal ones. For the choice of an appropriate value of λ_3 let us assume that an acceptable value of $\|\mathbf{d}\|^2/n^2$ (the first term of the right-hand side of (29)) will be of the order of 10^{-3} (recall that c is standardized so that its off-diagonal elements are less than 1), whereas an acceptable value of $\lambda_3 \|\xi\|_p^2$, as results from (24) and the subsequent discussion, will be $(\lambda_3 k/4)$, where k is the size of the synthetic record to be generated. Assuming that the acceptable values of the first and the third term are of the same order of magnitude, so that both terms have about the same significance in the objective function (29), we conclude that $\lambda_3 k/4 \sim 10^{-3}$ or $\lambda_3 \sim 4 \times 10^{-3}/k$. We may assume that in typical generation problems of stochastic hydrology k does exceed 40, so that a maximum value of λ_3 must be about 10^{-4} . We may use a smaller value of λ_3 (e.g., 10^{-5} – 10^{-6}) either if the sample size is of a higher order of magnitude or if we wish to give a greater importance to the preservation of covariances rather than to that of the coefficients of skewness.

The establishment of a numerical procedure for minimizing the objective function (29) is given in the next section.

4. Optimization Procedure

To establish an effective optimization algorithm for (29), we need first to determine the partial derivatives of all compo-

nents of θ^2 with respect to the unknown parameters b'_{ij} . This may seem a difficult task to accomplish analytically. However, it is not at all intractable. For the convenience of the reader we have placed all calculations of the derivatives in the appendix, and we present here only the final results of the calculations, which are very simple. In these results, given any scalar a , we use the notation

$$\frac{d\alpha}{d\mathbf{b}'} := \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha}{\partial b'_{11}} & \frac{\partial \alpha}{\partial b'_{12}} & \cdots & \frac{\partial \alpha}{\partial b'_{1n}} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial b'_{21}} & \frac{\partial \alpha}{\partial b'_{22}} & \cdots & \frac{\partial \alpha}{\partial b'_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \alpha}{\partial b'_{n1}} & \frac{\partial \alpha}{\partial b'_{n2}} & \cdots & \frac{\partial \alpha}{\partial b'_{nn}} \end{bmatrix} \quad (30)$$

for the matrix of its partial derivatives with respect to all b'_{ij} ; this is an extension of the notation used for vectors [e.g., Marlow, 1993, p. 208].

As shown in the appendix, the derivatives of all components of θ^2 are

$$\frac{d\|\mathbf{d}\|^2}{d\mathbf{b}'} = 4\mathbf{d}\mathbf{b}' \quad (31)$$

$$\frac{d\|\mathbf{d}^*\|^2}{d\mathbf{b}'} = 4\mathbf{d}^*\mathbf{b}' \quad (32)$$

$$\frac{d\|\xi\|_p^2}{d\mathbf{b}'} = -6\|\xi\|_p^{2-p}\mathbf{w} \quad (33)$$

where \mathbf{w} is a matrix with elements

$$w_{ij} := b'^2_{ij} \xi_j \psi_i \quad (34)$$

and ψ is a vector defined by

$$\psi := [(\mathbf{b}'^{(3)})^{-1}]^T \xi^{(p-1)} \quad (35)$$

Thus the required matrix of derivatives of θ^2 with respect to the unknown parameters b'_{ij} is

$$\frac{d\theta^2}{d\mathbf{b}'} = \frac{4\lambda_1}{n^2} \mathbf{d}\mathbf{b}' + \frac{4\lambda_2}{n} \mathbf{d}^*\mathbf{b}' - 6\lambda_3 \|\xi\|_p^{2-p} \mathbf{w} \quad (36)$$

It is apparent from the objective function (29) and its derivatives (36) that we have a typical nonlinear optimization problem, whose solution can be achieved by iterations, starting with an initial matrix $\mathbf{b}'^{[0]}$. In the l th iteration we start with a known $\mathbf{b}'^{[l]}$ and we find an "improved" matrix $\mathbf{b}'^{[l+1]}$; we repeat this procedure until the solution converges. Several algorithms are known in the literature for advancing from $\mathbf{b}'^{[l]}$ to $\mathbf{b}'^{[l+1]}$ (see *Mays and Tung* [1996, p. 6.12], among others, who summarize the most common ones). Among them, the most suitable for our case are the steepest descent and Fletcher-Reeves conjugate gradient methods. These are chosen for their mathematical simplicity and convenience and their low memory requirements. Specifically, the mathematical formulation of both methods, which typically assume a vector arrangement of the unknown parameters, can be directly adapted for our case, which uses a matrix arrangement of the unknown parameters. Furthermore, the memory requirements are of great importance because in the problem examined the number of unknown parameters is large, that is, n^2 ; the amount of memory locations for both chosen methods is of the order of n^2 ,

Table 1. Sample Statistics of the Monthly Rainfall and Runoff Data Used for the Case Study for Subperiods $s = 8$ (May) and $s - 1 = 7$ (April)

Location	$i = 1$ (Evinos Runoff)	$i = 2$ (Evinos Rainfall)	$i = 3$ (Mornos Runoff)	$i = 4$ (Mornos Rainfall)	$i = 5$ (Yliki Runoff)	$i = 6$ (Yliki Rainfall)
Means						
$E[X_i^{s-1}]$	97.3	111.2	59.8	100.4	20.1	31.5
$E[X_i^s]$	53.1	69.5	43.2	65.3	9.4	19.3
Standard deviations						
StDev $[X_i^{s-1}]$	35.0	57.6	17.4	53.6	10.7	27.1
StDev $[X_i^s]$	20.2	30.8	18.8	26.5	7.2	14.4
Coefficients of skewness						
CS $[X_i^{s-1}]$	0.72	1.04	0.58	1.07	1.06	1.72
CS $[X_i^s]$	0.76	0.89	0.87	0.81	1.53	1.49
Cross-correlation coefficients						
Corr $[X_i^{s-1}, X_j^{s-1}]$						
$j = 1$	1.00	0.76	0.85	0.56	0.22	0.16
$j = 2$	0.76	1.00	0.67	0.90	0.30	0.43
$j = 3$	0.85	0.67	1.00	0.58	0.69	0.14
$j = 4$	0.56	0.90	0.58	1.00	0.37	0.50
$j = 5$	0.22	0.30	0.69	0.37	1.00	0.83
$j = 6$	0.16	0.43	0.14	0.50	0.83	1.00
Corr $[X_i^s, X_j^s]$						
$j = 1$	1.00	0.54	0.76	0.53	0.57	0.49
$j = 2$	0.54	1.00	0.29	0.81	0.15	0.67
$j = 3$	0.76	0.29	1.00	0.20	0.75	0.23
$j = 4$	0.53	0.81	0.20	1.00	0.27	0.45
$j = 5$	0.57	0.15	0.75	0.27	1.00	0.22
$j = 6$	0.49	0.67	0.23	0.45	0.22	1.00
Autocorrelation coefficients						
Corr $[X_i^s, X_i^{s-1}]$	0.60	0	0.78	0	0.80	0

whereas for other methods such as quasi-Newton methods it would be n^4 .

Both these methods are described by the following common expression, adapted from the typical expression given in the literature for vector-arranged variables [e.g., *Mays and Tung*, 1996, p. 6.12; *Press et al.*, 1992, p. 422],

$$\mathbf{b}^{[l+1]} = \mathbf{b}^{[l]} - \beta^{[l+1]} \left[\left(\frac{d\theta^2}{d\mathbf{b}'} \right)^{[l]} + \gamma^{[l]} \left(\frac{d\theta^2}{d\mathbf{b}'} \right)^{[l-1]} \right] \quad (37)$$

where $\gamma^{[l]} = 0$ for the steepest descent method,

$$\gamma^{[l]} = \left\| \left(\frac{d\theta^2}{d\mathbf{b}'} \right)^{[l]} \right\|^2 / \left\| \left(\frac{d\theta^2}{d\mathbf{b}'} \right)^{[l-1]} \right\|^2 \quad (38)$$

for the Fletcher-Reeves method, and $\beta^{[l+1]}$ is a scalar whose value is obtained by a line search algorithm for each iteration l . For $l = 0$ (first step) the Fletcher-Reeves method cannot be used because $(d\theta^2/d\mathbf{b}')^{[l-1]}$ is not defined and thus we must use the steepest descent method (i.e., $\gamma^{[0]} = 0$). For the other steps, the numerical applications have indicated that the Fletcher-Reeves method is faster and thus preferable. However, it was observed that in some instances during the iteration procedure the Fletcher-Reeves method may become too slow; in such instances the procedure is accelerated if we perform one iteration with the steepest descent method and then continue again with the Fletcher-Reeves method.

What remains is a procedure to construct an initial matrix $\mathbf{b}'^{[0]}$. This is not so important because, as demonstrated in the case study below (section 5), the method is very fast in the first phase of the iteration procedure. Even if we start with a $\mathbf{b}'^{[0]}$ leading to an unrealistically high value of the objective function, this value is dramatically reduced in the first few iterations. The general idea for the construction of the initial matrix

$\mathbf{b}'^{[0]}$ is to start decomposing the matrix \mathbf{c}' by triangular decomposition, which is the simplest of all procedures [*Press et al.*, 1992, p. 97], and occasionally performing some corrections when this procedure fails. This will be demonstrated more clearly in the case study below (section 5).

5. Case Study

To illustrate the developed method, we present a part of a real world case study. This case study aims at the generation of simultaneous monthly rainfall and runoff at three basins, namely, Evinos, Mornos, and Yliki, supplying water to Athens, Greece [*Nalbantis and Koutsoyiannis*, 1997]. This constitutes a multivariate generation problem with six locations (two variables \times three basins). As a general framework for the generation, the simple disaggregation model [*Koutsoyiannis and Manetas*, 1996] was adopted. Specifically, as a first step the annual variables for all locations are generated using a multivariate AR(1) model. Then the annual quantities are disaggregated into monthly ones, using a combination of a multivariate contemporaneous seasonal AR(1) (or PAR(1)) model and an accurate adjusting procedure, as described by *Koutsoyiannis and Manetas* [1996]. Here we focus on the PAR(1) model, described by (3), which generates the vector of random variables \mathbf{X}^s at the six locations for each month s , given those of the previous month \mathbf{X}^{s-1} . The model parameters are given by (11), (5), (6), (7), and (9), in which \mathbf{Y} and \mathbf{Z} must be replaced with \mathbf{X}^s and \mathbf{X}^{s-1} , respectively.

In Table 1 we display the sample statistics of the monthly rainfall and runoff data that are necessary for estimating the contemporaneous PAR(1) model parameters for subperiod (month) $s = 8$ (May; note that the hydrologic year starts in October). These are the first three marginal moments at all

locations (represented by the means, standard deviations, and coefficients of skewness) and the matrices of cross correlations for all locations for both subperiods $s = 8$ and $s - 1 = 7$; the autocorrelations among subperiods $s = 8$ and $s - 1 = 7$ for each location are also needed and given in Table 1. Note that the autocorrelation of rainfall was found statistically insignificant and thus the autocorrelation coefficients were set to zero; on the contrary, the autocorrelation of runoff is significant for all three basins. To increase readability and understandability of the data, the form of the statistics given in Table 1 differs from that displayed in the equations (e.g., coefficients of skewness instead of third moments; matrices of correlation coefficients instead of covariance matrices); the transformation between the two forms is direct and given in textbooks.

There seems to be nothing strange about the statistics given in Table 1 as the cross correlations and autocorrelations are not too high; the skewnesses are not zero and also are not too high (they do not exceed 1.75). However, the matrix c of (12) (and c' of (14)) is not positive definite, and thus there does not exist an exact solution for b (or b'). Notably, the absence of positive definiteness occurs in 10 out of 12 cases (months) for the monthly PAR(1) model as well as in the annual AR(1) model, in the case study examined. This indicates that the problem studied in this paper might be quite frequent in multivariate stochastic simulation problems.

To start remedying the problem for $s = 8$, we need an initial solution $b^{(0)}$. To this end we apply Lane's [1979] procedure, which is appropriate for positive semidefinite matrices (see also Salas et al. [1988, p. 87] and Lane and Frevert [1990, p. V-15]). This procedure derives a lower triangular b' given the matrix c' , first calculating the first matrix column, then the second, third, etc. When the matrix c' is not positive definite (as in our case), at some column (in our case at column 5) the procedure assigns all matrix elements equal to zero and, besides, the estimated matrix b' no longer obeys $b'b'^T = c'$. Furthermore, a zero column within b' is also transferred in $b^{(3)}$ so that $(b^{(3)})^{-1}$, which appears in (19), does not exist. Thus the vector of the skewness coefficients of the auxiliary variables, ξ , becomes infinite. To avoid this, it suffices to set the diagonal element of the column with zero elements equal to some arbitrary value b'_{\min} (so that $0 < b'_{\min} < 1$). There is no reason to investigate thoroughly what would be the most appropriate value of b'_{\min} because this is used to establish an initial solution only; this initial solution is then modified by the optimization procedure. Here we have used $b'_{\min} = 0.05$, and the derived solution is thereafter referred to as initial solution 0. The elements of b' for that solution are shown graphically in Figure 1a. The resulting values of the objective function and its three components are shown in Table 2, where for the sake of readability we display the square roots of the components). We observe that for the initial solution 0 the maximum coefficient of skewness of the auxiliary variables is extremely high, that is, $\max_j(\xi_j) \sim \|\xi\| = 29,089.50$. Apparently, such skewness cannot be reached in any generated sample. Also, we observe that $\|d\|$ is not zero and it could not be so because c' is not positive definite; also $\|d^*\|$ is not zero.

For comparison we have also determined another initial solution referred to as initial solution 0a, and also shown graphically in Figure 1b. For this solution we have used a more complicated procedure outlined by Koutsoyiannis [1992]. This procedure imposes a lower limit in each diagonal element of b' to avoid extremely high skewness coefficients, assures the preservation of the diagonal elements of c' (so that $\|d^*\| \approx 0$), and

also attempts to preserve the highest cross-correlation coefficient in each matrix row, simultaneously reducing the other cross-correlation coefficients. As shown in Table 2, the maximum coefficient of skewness of the initial solution 0a has been reduced to 18.31, a value much less than the 29,089.50 of the initial solution 0; $\|d^*\|$ is almost zero in the initial solution 0a, whereas $\|d\|$ unavoidably remains positive.

Given the initial solutions 0 and 0a, we can directly proceed to the optimization procedure described in section 4. To this end we use the objective function (29) and its derivatives (36) with weights $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 10^3$, and $\lambda_3 = 10^{-5}$ as explained in section 3. The evolution of the objective function and its three components for the first 40 iterations are shown in Figure 2 for both initial solutions 0 and 0a. We observe in Figure 2 that the unreasonable value of $\|\xi\| = 29,089.50$ of the initial solution 0 decreases rapidly in the first 5–10 iterations toward more reasonable values. Also the positive value of $\|d^*\|$ of the initial solution 0 decreases rapidly in the first four iterations to a value close to zero. As expected, the performance of the evolution of the initial solution 0a seems better than that of the initial solution 0 at the same iteration number. However, the finally obtained values of the objective function and its components are the same for both initial solutions. This indicates that there is no need to use a complicated procedure to obtain an initial solution $b^{(0)}$. It suffices to use the simple Lane [1979] procedure with the modification that the diagonal elements of b' are not allowed to take values smaller than b'_{\min} . In the initial solution 0 of this example we assumed that $b'_{\min} = 0.05$; however, we suggest a much higher value, e.g., $b'_{\min} = 0.5$, to avoid unreasonably high initial skewness coefficients and accelerate convergence.

The final solutions b' , referred to as final solutions 1 and 1a, which were obtained by the optimization procedure starting with the initial solutions 0 and 0a, respectively, are shown graphically in Figures 1c and 1d. They are almost indistinguishable, but they are not exactly the same. The resulting values of the objective function and its components, shown in Table 2, are the same for both final solutions 1 and 1a (for normal computer precision). This may mean that there are (at least) two close local minima of the objective function. It may also be interpreted differently, that is, both obtained solutions are approximations of a single global minimum that cannot be located exactly due to computer precision limitations. Nevertheless, the exact theoretical meaning of the nature of the two solutions is not important; what is important is that we have one or more reasonable matrices b' and other related parameters that can be used directly for stochastic simulation. This simulation will preserve the variances of the variables because $\|d^*\| = 0$, as well as their coefficients of skewness, because the obtained $\max_j(\xi_j) = 5.37$ is low enough to be achieved for the auxiliary variables (assuming that the synthetic sample size will have length greater than about 50). However, the simulation will not preserve exactly the cross-correlation coefficients (since $\|d\| = 0.1404 > 0$), but this is an unavoidable consequence of the absence of positive definiteness of c' . To have an indication of how large the errors in preserving these cross-correlation coefficients are, we have performed the inverse calculations, that is, given b' we solved (12) for $\text{Cov}[Y, Y]$ (where $Y \equiv X'$), also replacing c with $(b^{-1}b'b'^Tb^{-1})$. The resulting cross-correlation coefficients are shown in Table 3 among with their differences from the "correct" values of Table 1, as the latter were estimated from the historical data. We observe that errors are almost negligible (i.e., within ± 0.03).

KOUTSOYIANNIS: OPTIMAL DECOMPOSITION OF COVARIANCE MATRICES

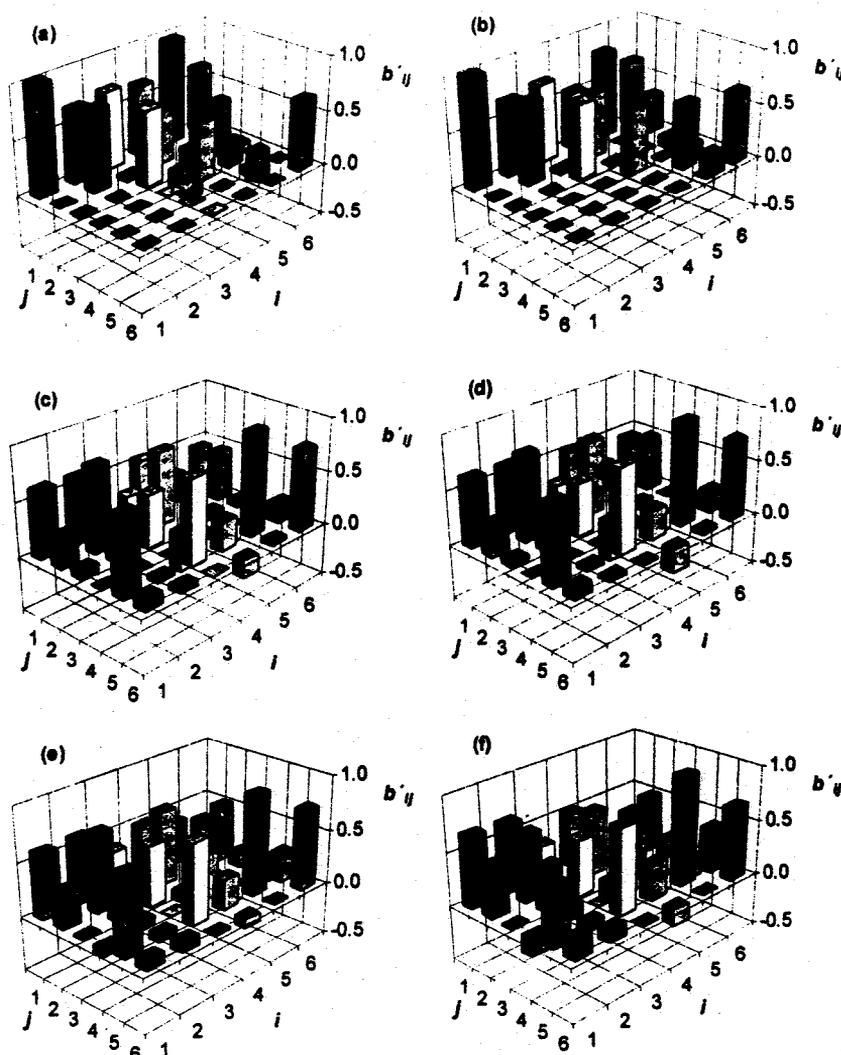


Figure 1. Plots of the elements of matrices b' for the various solutions examined in the case study: (a) initial solution 0; (b) initial solution 0a; (c) final solution 1; (d) final solution 1a; (e) final solution 2; (f) final solution 3 (see text).

To acquire an indication of how low the error in preserving the cross correlations could ultimately be if we ignore completely the preservation of skewness, we performed another optimization, setting $\lambda_3 = 0$ in the objective function. The resulting final solution 2 is shown graphically in Figure 1e, and the relevant values of the objective function and its components are shown in Table 2. We observe that the further reduction in $\|d\|$ is not impressive ($\|d\| = 0.1386$ against $\|d\| = 0.1404$ of final solution 1).

As a further investigation, we also assessed the ultimate lowest value of the coefficient of skewness $\max_j(\xi_j)$ by ignoring the error in preserving cross covariances. Thus we performed another minimization of the objective function, setting $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 10^3$, and $\lambda_3 = 10^{-5}$. The resulting final solution 3 is shown graphically in Figure 1f, and the relevant values of the objective function and its components are shown in Table 2. Again, the further reduction in $\max_j(\xi_j)$ is not impressive ($\max_j(\xi_j) = 4.57$ against $\max_j(\xi_j) = 5.37$ of final solution 1).

Table 2. Values of the Square Root of the Objective Function θ and Its Three Components $\|d\|$, $\|d^*\|$, and $\|\xi\|$ (Also, in Comparison With $\max_j(\xi_j)$) for the Initial and Final Solutions of the Case Study Examined

	Initial Solution 0	Initial Solution 0a	Final Solutions 1 and 1a*	Final Solution 2†	Final Solution 3‡
$\ d^*\ $	0.3238	0.0012	0.0000	0.0000	0.0000
$\ d\ $	0.3297	0.6394	0.1404	0.1386	0.8136
$\ \xi\ $	29,089.50	18.31	5.50	7.94	4.58
$\max_j(\xi_j)$	29,089.50	18.31	5.37	7.19	4.57
θ	4.1806	0.1076	0.0292	0.0231	0.0145

*Optimum for the combination of $\|d\|$ and $\|\xi\|_p$ ($\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 10^3$, $\lambda_3 = 10^{-5}$).

†Optimum for $\|d\|$ ($\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 10^3$, $\lambda_3 = 0$).

‡Optimum for $\|\xi\|_p$ ($\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 10^3$, $\lambda_3 = 10^{-5}$).

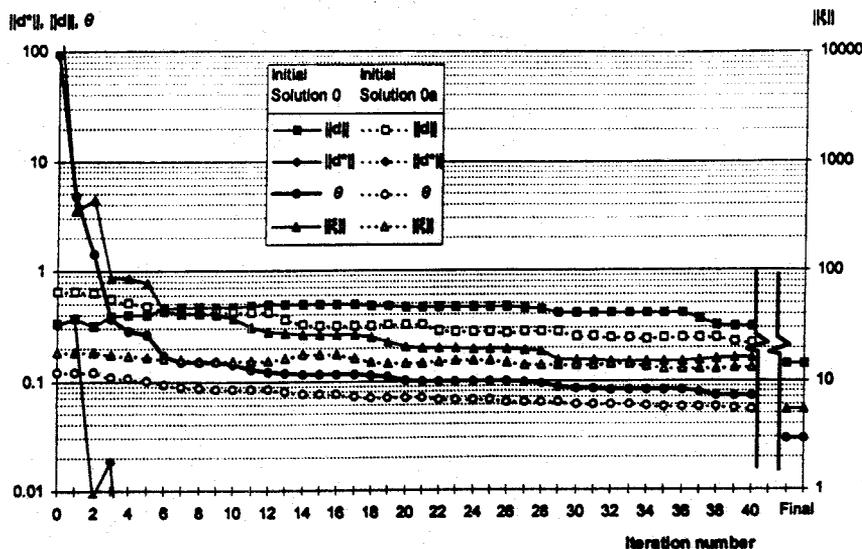


Figure 2. Evolution of the value of the square root of the objective function θ and its three components $\|d\|$, $\|d^*\|$, and $\|\xi\|$ for the first 40 iterations of the optimization procedure starting with initial solutions 0 and 0a (see text).

The results of the above investigations indicate that there is no strong conflict between the objectives of preserving the coefficient of skewness and the cross-correlation coefficients. The same indication is also acquired from Figure 1, where we observe that all final solutions 1, 1a, 2, and 3 are similar to each other, although they differ significantly from the initial solutions 0 and 0a.

6. Summary, Conclusions, and Discussion

A new method is proposed for decomposing covariance matrices that appear in the parameter estimation phase of all multivariate stochastic models in hydrology. This method applies not only to positive definite covariance matrices (as do the typical methods of the literature) but to indefinite matrices, too, that often appear in stochastic hydrology. It is also appropriate for preserving the skewness coefficients of the model variables as it accounts for the resulting coefficients of skewness of the auxiliary (noise) variables used by the stochastic model. The method is formulated in an optimization framework with the objective function being composed of three components aiming at (1) complete preservation of the variances of variables, (2) optimal approximation of the covariances of variables, in the case that complete preservation is not feasible due to inconsistent (i.e., not positive definite) structure of the covariance matrix, and (3) preservation of the skewness

coefficients of the model variables by keeping the skewness of the auxiliary variables as low as possible. Analytical expressions for the derivatives of this objective function are derived, which allow the development of an effective nonlinear optimization algorithm using the steepest descent or the conjugate gradient methods.

An advantage of the method is its unique formulation, applicable for both positive definite or indefinite matrices, and symmetric or skewed distributions of variables. Besides, the weighting factors incorporated in the objective function allow for giving more or less emphasis to each one of its three components. In the case of a consistent (positive definite) covariance matrix of variables having symmetric (e.g., Gaussian) distributions, the method will result in the triangular decomposition of the matrix, which is the simplest among all solutions. If the covariance matrix is indefinite while the variables still have symmetric distributions, the method will result in a decomposed (square root) matrix, which corresponds to the least significant alteration, or the best approximation, of the original covariance matrix. If the distributions of variables are skewed, then the method solution (either for consistent or inconsistent covariance matrices) will be appropriately modified to simultaneously account for avoiding too high coefficients of skewness of the auxiliary variables.

The real world application examined for the sake of illus-

Table 3. Cross-Correlation Coefficients $\text{Corr}[X_i^j, X_j^i]$ Resulting from b' of the Final Solution 1a

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$
$j = 1$	1.00 (0.00)	0.51 (-0.03)	0.77 (0.01)	0.54 (0.01)	0.54 (-0.03)	0.49 (0.00)
$j = 2$	0.51 (-0.03)	1.00 (0.00)	0.28 (-0.01)	0.80 (-0.01)	0.17 (0.02)	0.67 (0.00)
$j = 3$	0.77 (0.01)	0.28 (-0.01)	1.00 (0.00)	0.20 (0.00)	0.74 (-0.01)	0.23 (0.00)
$j = 4$	0.54 (0.01)	0.80 (-0.01)	0.20 (0.00)	1.00 (0.00)	0.26 (-0.01)	0.45 (0.00)
$j = 5$	0.54 (-0.03)	0.17 (0.02)	0.74 (-0.01)	0.26 (-0.01)	1.00 (0.00)	0.22 (0.00)
$j = 6$	0.49 (0.00)	0.67 (0.00)	0.23 (0.00)	0.45 (0.00)	0.22 (0.00)	1.00 (0.00)

The values in parentheses are the differences from the corresponding values of Table 1.

tration and numerical exploration of the method indicates its very satisfactory performance both in approaching the covariances of an inconsistent matrix and in yielding low coefficients of skewness of the auxiliary variables, although the initial coefficients of skewness were extremely and unreasonably high. Moreover, it reveals that there is no strong conflict between the objectives of preserving the covariances and the coefficients of skewness. Finally, it indicates a stable behavior of the optimizing algorithm.

The stochastic model that was used as a grounds for the development of the method (section 2) is generalized so as to represent many of the typical models of the literature. However, it does not cover explicitly all possible multivariate models, for example, the ARMA and PARMA models [e.g., *Stedinger et al.*, 1985; *Salas*, 1993]. In these types of models the problem of decomposing covariance matrices still appears [*Salas*, 1993, pp. 19.29–19.30], and the proposed method may also be used. Some adaptations of the equations are needed, mainly those regarding the coefficients of skewness. Generally, the method allows for adaptations not only in cases of different types of models but also in situations where different conditions arise for the solution matrix. As a simplified example for a conditional rearrangement of the method, let us consider the case where the model variable of one location has a known value (e.g., given as an output of another model). Obviously, this implies a linear constraint for the elements of a single row of the decomposed matrix. This constraint can be easily incorporated in the optimization framework, the simplest way being the appending of a penalty term into the objective function.

Appendix: Proof of (31)–(33)

From (20) we have

$$d_{kl} = \sum_{r=1}^n b'_{kr} b'_r - c'_{kl} \quad (\text{A1})$$

so that

$$\frac{\partial d_{kl}}{\partial b'_{ij}} = \sum_{r=1}^n b'_{kr} \frac{\partial b'_r}{\partial b'_{ij}} + \sum_{r=1}^n \frac{\partial b'_{kr}}{\partial b'_{ij}} b'_r \quad (\text{A2})$$

Clearly,

$$\frac{\partial b'_r}{\partial b'_{ij}} = \delta_{ij} \delta_{rj} \quad (\text{A3})$$

where

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &:= 0 & i &\neq j \\ \delta_{ij} &:= 1 & i &= j \end{aligned} \quad (\text{A4})$$

Therefore,

$$\frac{\partial d_{kl}}{\partial b'_{ij}} = \sum_{r=1}^n b'_{kr} \delta_{ij} \delta_{rj} + \sum_{r=1}^n b'_r \delta_{ij} \delta_{kr} \quad (\text{A5})$$

which results in

$$\frac{\partial d_{kl}}{\partial b'_{ij}} = b'_{kj} \delta_{il} + b'_{ij} \delta_{kl} \quad (\text{A6})$$

The partial derivative of $\|\mathbf{d}\|^2$ with respect to b'_{ij} will be

$$\frac{\partial \|\mathbf{d}\|^2}{\partial b'_{ij}} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n 2d_{kl} \frac{\partial d_{kl}}{\partial b'_{ij}} = 2 \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n d_{kl} (b'_{kj} \delta_{il} + b'_{ij} \delta_{kl}) \quad (\text{A7})$$

or

$$\frac{\partial \|\mathbf{d}\|^2}{\partial b'_{ij}} = 2 \sum_{k=1}^n d_{kj} b'_{ij} + 2 \sum_{l=1}^n d_{il} b'_{ij} \quad (\text{A8})$$

and, because \mathbf{d} is symmetric,

$$\frac{\partial \|\mathbf{d}\|^2}{\partial b'_{ij}} = 4 \sum_{k=1}^n d_{ik} b'_{kj} \quad (\text{A9})$$

We observe that the sum on the right-hand side of (A9) is the (i, j) th element of the matrix $\mathbf{d}\mathbf{b}$, and thus this proves (31).

In a similar manner (and also considering (22)), the partial derivative of $\|\mathbf{d}^*\|^2$ with respect to b'_{ij} is

$$\begin{aligned} \frac{\partial \|\mathbf{d}^*\|^2}{\partial b'_{ij}} &= \sum_{k=1}^n 2d_{kk} \frac{\partial d_{kk}}{\partial b'_{ij}} = 2 \sum_{k=1}^n d_{kk} (b'_{kj} \delta_{ki} + b'_{ij} \delta_{kk}) \\ &= 4 \sum_{k=1}^n d_{kk} b'_{kj} \delta_{ki} = 4d_{ij} b'_{ij} \end{aligned} \quad (\text{A10})$$

which proves (32).

To determine the partial derivatives of $\|\xi\|_p^2$, we must first find the partial derivatives of ξ . We denote

$$\mathbf{g} := (\mathbf{b}'^{(3)})^{-1} \quad (\text{A11})$$

so that (19) becomes

$$\xi = \mathbf{g}\varphi \quad (\text{A12})$$

Since φ is a vector of constants we have

$$\frac{\partial \xi}{\partial b'_{ij}} = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial b'_{ij}} \varphi \quad (\text{A13})$$

Equation (A11) can be written as

$$\mathbf{g}\mathbf{b}'^{(3)} = \mathbf{I} \quad (\text{A14})$$

where \mathbf{I} is the identity matrix. Therefore

$$\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial b'_{ij}} \mathbf{b}'^{(3)} + \mathbf{g} \frac{\partial \mathbf{b}'^{(3)}}{\partial b'_{ij}} = \mathbf{0} \quad (\text{A15})$$

where $\mathbf{0}$ is the zero matrix (i.e., with all its elements zero), and thus

$$\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial b'_{ij}} = -\mathbf{g} \frac{\partial \mathbf{b}'^{(3)}}{\partial b'_{ij}} (\mathbf{b}'^{(3)})^{-1} = -\mathbf{g} \frac{\partial \mathbf{b}'^{(3)}}{\partial b'_{ij}} \mathbf{g} \quad (\text{A16})$$

Combining (A13), (A16), and (A12), we get

$$\frac{\partial \xi}{\partial b'_{ij}} = -\mathbf{g} \frac{\partial \mathbf{b}'^{(3)}}{\partial b'_{ij}} \mathbf{g}\varphi = -\mathbf{g} \frac{\partial \mathbf{b}'^{(3)}}{\partial b'_{ij}} \xi \quad (\text{A17})$$

Consequently,

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial b'_{ij}} = - \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n g_{kr} \frac{\partial b'_{rs}}{\partial b'_{ij}} \xi_r \quad (\text{A18})$$

and since

$$\frac{\partial b'_{ir}}{\partial b'_{ij}} = 3b'_{ir}{}^2 \delta_{ir} \delta_{ij} \quad (\text{A19})$$

we get

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial b'_{ij}} = -3 \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^n g_{kr} b'_{ir}{}^2 \delta_{rs} \delta_{ij} \xi_r \quad (\text{A20})$$

or

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial b'_{ij}} = -3 \sum_{r=1}^n g_{kr} b'_{ir}{}^2 \delta_{ij} \xi_r \quad (\text{A21})$$

and finally,

$$\frac{\partial \xi_k}{\partial b'_{ij}} = -3g_{ki} b'_{ij}{}^2 \xi_j \quad (\text{A22})$$

Now we can proceed to the calculation of the derivatives of $\|\xi\|_p^2$. Assuming that p is even, (26) can be written

$$\|\xi\|_p^2 = \left(\sum_{k=1}^n \xi_k \right)^{2p} \quad (\text{A23})$$

so that

$$\frac{\partial \|\xi\|_p^2}{\partial b'_{ij}} = \frac{2}{p} \left(\sum_{k=1}^n \xi_k \right)^{2p-1} \frac{\partial}{\partial b'_{ij}} \sum_{k=1}^n \xi_k = \frac{2}{p} \|\xi\|_p^{2-p} \sum_{k=1}^n \xi_k^{-1} \frac{\partial \xi_k}{\partial b'_{ij}} \quad (\text{A24})$$

Combining (A22) and (A24) we get

$$\frac{\partial \|\xi\|_p^2}{\partial b'_{ij}} = -6 \|\xi\|_p^{2-p} b'_{ij}{}^2 \xi_j \sum_{k=1}^n \xi_k^{-1} g_{ki} \quad (\text{A25})$$

whereas combining (A11) and (35) we have

$$\sum_{k=1}^n \xi_k^{-1} g_{ki} = \psi_i \quad (\text{A26})$$

Also considering (34) we get

$$b'_{ij}{}^2 \xi_j \sum_{k=1}^n \xi_k^{-1} g_{ki} = b'_{ij}{}^2 \xi_j \psi_i = w_{ij} \quad (\text{A27})$$

so that, finally,

$$\frac{\partial \|\xi\|_p^2}{\partial b'_{ij}} = -6 \|\xi\|_p^{2-p} w_{ij} \quad (\text{A28})$$

which proves (33).

Acknowledgments. The research leading to this paper was performed within the framework of the project Evaluation and Management of the Water Resources of Sterea Hellas, Phase 3, project 9476702, funded by the Greek Ministry of Environment, Regional Planning and Public Works, Directorate of Water Supply and Sewage. The author wishes to thank the director T. Bakopoulos, the staff of this directorate, and E. Tiligadas of Directorate D7 for the support of this research. Thanks are also due to I. Kioustelidis for his helpful suggestions and I. Nalbantis for his comments. Finally, the author is grateful to the Associate Editor P. Rasmussen and the reviewer E. Todini for their constructive comments that were very helpful for an improved, more complete, and more accurate presentation.

References

- Bras, R. L., and I. Rodriguez-Iturbe, *Random Functions in Hydrology*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1985.
- Grygier, J. C., and J. R. Stedinger, SPIGOT, A synthetic streamflow generation software package, technical description, version 2.5, Sch. of Civ. and Environ. Eng., Cornell Univ., Ithaca, N. Y., 1990.
- Kirby, W., Algebraic boundness of sample statistics, *Water Resour. Res.*, 10, 220-222, 1974.
- Koutsoyiannis, D., A nonlinear disaggregation model with a reduced parameter set for simulation of hydrologic series, *Water Resour. Res.*, 28, 3175-3191, 1992.
- Koutsoyiannis, D., and A. Manetas, Simple disaggregation by accurate adjusting procedures, *Water Resour. Res.*, 32, 2105-2117, 1996.
- Lane, W. L., *Applied stochastic techniques, user's manual*, Eng. and Res. Cent., Bur. of Reclamation, Denver, Colo., 1979.
- Lane, W. L., and D. K. Frevert, *Applied stochastic techniques, user's manual, personal computer version*, Eng. and Res. Cent., Bur. of Reclamation, Denver, Colo., 1990.
- Marlow, W. H., *Mathematics for Operations Research*, Dover, New York, 1993.
- Matalas, N. C., and J. R. Wallis, Correlation constraints for generating processes, paper presented at the International Symposium on Mathematical Models in Hydrology, Warsaw, Poland, July 1971.
- Matalas, N. C., and J. R. Wallis, Generation of synthetic flow sequences, in *Systems Approach to Water Management*, edited by A. K. Biswas, McGraw-Hill, New York, 1976.
- Mays, L. W., and Y.-K. Tung, Systems analysis, in *Water Resources Handbook*, edited by L. W. Mays, McGraw-Hill, New York, 1996.
- Mejía, J. M., and J. Millán, Una metodología para tratar el problema de matrices inconsistentes en la generación multivariada de series hidrológicas, paper presented at VI Congreso Latino Americano de Hidráulica, Bogotá, Colombia, 1974.
- Nalbantis, I., and D. Koutsoyiannis, A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems, *Water Resour. Res.*, 33, 2165-2177, 1997.
- Pierre, D. P., *Optimization Theory With Applications*, Dover, New York, 1986.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, Cambridge Univ. Press, New York, 1992.
- Rasmussen, P. F., J. D. Salas, L. Fagherazzi, J.-C. Rasmussen, and B. Bobée, Estimation and validation of contemporaneous PARMA models for streamflow simulation, *Water Resour. Res.*, 32, 3151-3160, 1996.
- Salas, J. D., Analysis and modeling of hydrologic time series, in *Handbook of Hydrology*, edited by D. Maidment, chap. 19, McGraw-Hill, New York, 1993.
- Salas, J. D., J. W. Delleur, V. Yevjevich, and W. L. Lane, *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*, Water Resour. Publ., Littleton, Colo., 1988.
- Slack, J. R., I would if I could (self-denial by conditional models), *Water Resour. Res.*, 9, 247-249, 1973.
- Stedinger, J. R., D. P. Lettenmaier, and R. M. Vogel, Multisite ARMA(1, 1) and disaggregation models for annual streamflow generation, *Water Resour. Res.*, 21, 497-509, 1985.
- Todini, E., The preservation of skewness in linear disaggregation schemes, *J. Hydrol.*, 47, 199-214, 1980.
- Valencia, D., and J. C. Schaake, A disaggregation model for time series analysis and synthesis, *Rep. 149*, Ralph M. Parsons Lab. for Water Resour. and Hydrodyn., Mass. Inst. of Technol., Cambridge, 1972.
- Valencia, D., and J. C. Schaake, Disaggregation processes in stochastic hydrology, *Water Resour. Res.*, 9, 211-219, 1973.
- Wallis, J. R., N. Matalas, and J. R. Slack, Just a moment!, *Water Resour. Res.*, 10, 211-219, 1974.

D. Koutsoyiannis, Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, National Technical University, Heron Polytechniou 5, GR-157 80 Zografou, Athens, Greece. (dk@hydro.ntua.gr)

(Received March 26, 1998; revised November 13, 1998; accepted November 13, 1998.)