



ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΚΑΙ
ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑΣ
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών
και Θαλάσσιων Έργων

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

Τεύχος 24:

Υδρονομέας (έκδοση 3.2)

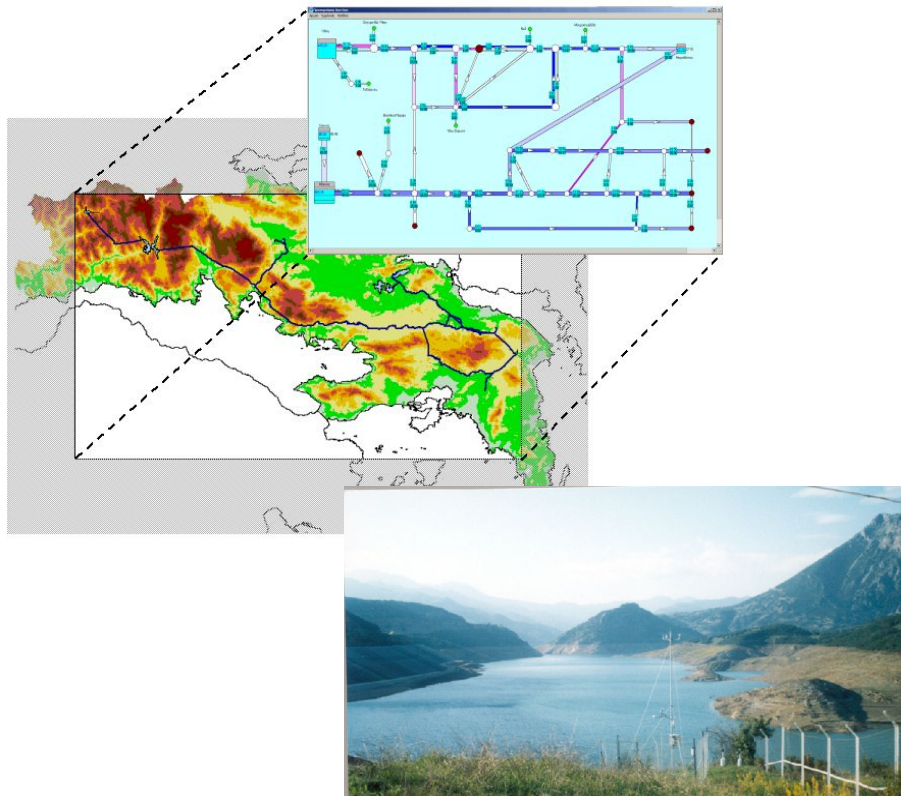
Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων

Επιστημονικός
υπεύθυνος:

Δ. Κουτσογιάννης,
Αν. Καθηγητής

Σύνταξη:

Γ. Καραβοκυρός,
Α. Ευστρατιάδης,
Δ. Κουτσογιάννης



Αθήνα, Ιανουάριος 2004

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου “Έκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας”, αναπτύχθηκε το υπολογιστικό σύστημα *Υδρονομέας* (έκδοση 3.2), με σκοπό την υποστήριξη της ΕΥΔΑΠ στη διαχείριση υδατικών πόρων. Η μεθοδολογία που υλοποιείται (παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση) βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε πρωτότυπη θεωρητική εργασία. Το μαθηματικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται επιτρέπει την κατανομή της ζήτησης νερού στους υδατικούς πόρους βάσει ενός μικρού αριθμού μεταβλητών απόφασης, πράγμα που κάνει εφικτή την προσομοίωση και βελτιστοποίηση πολύπλοκων υδροσυστημάτων όπως αυτό που εξετάζεται στο παρόν έργο. Κατά την προσομοίωση με συγκεκριμένο κανόνα λειτουργίας, μπορούν να τεθούν με σειρά προτεραιότητας πολλαπλοί ανταγωνιστικοί μεταξύ τους στόχοι και περιορισμοί οι οποίοι αφορούν μεταξύ άλλων και τα αποδεκτά όρια αξιοπιστίας του συστήματος. Πραγματοποιώντας βελτιστοποίηση της διαχείρισης ο χρήστης επιλέγει μεταξύ τριών αντικειμενικών συναρτήσεων: α) την ελαχιστοποίηση της μέσης πιθανότητας αστοχίας, β) την ελαχιστοποίηση του μέσου κόστους λειτουργίας και γ) τη μεγιστοποίηση της εγγυημένης απόδοσης του συστήματος για δεδομένο αποδεκτό επίπεδο αστοχίας. Το μοντέλο χρησιμοποιεί ιστορικές ή συνθετικές υδρολογικές χρονοσειρές, ενώ στα αποτελέσματα που δίνονται με πιθανοτικούς όρους συμπεριλαμβάνονται η πιθανότητα αστοχίας του εκάστοτε στόχου, το αναλυτικό υδατικό ισοζύγιο και πρόβλεψη των αποθεμάτων των ταμιευτήρων, το ισοζύγιο ροών και πρόβλεψη των παροχών των υδραγωγείων και οικονομικά στοιχεία.

ABSTRACT

Within the framework of the project entitled “Updating of the supervision and management of the Athens water supply resources system”, a software system named *Hydronomeas* (version 3.2) has been developed to support the water resources management by EYDAP. The methodology implemented (parameterisation-simulation-optimisation) is based mainly on an original theoretical work. The mathematical framework used allows the allocation of the water demand to the different system components, keeping the number of control variables small. This enables the simulation and optimisation of complex hydrosystems such as the one in this project. For the simulation process with a given operating rule, multiple, competitive targets and constraints with specified priorities can be set, which are concerned among others, with the acceptable limits for the system reliability. In performing optimisation, users can select between three objective functions: a) the minimisation of the average failure, b) the minimisation of the overall average operational cost and c) the maximisation of the overall guaranteed yield of the system for a given acceptable failure level. The model uses as input historic hydrological time series or synthetic time series. The results are given in probabilistic terms and include the probability of failure for each target, the analytical water balance and the storage forecast for reservoirs and the flow balance and discharge forecast for aqueducts.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Περιγραφή του ερευνητικού αντικειμένου	1
1.2	Στόχοι ανάπτυξης του Υδρονομία	1
1.2.1	Δεύτερη έκδοση	1
1.2.2	Τρίτη έκδοση	2
1.3	Λειτουργίες του υπολογιστικού συστήματος	3
1.4	Οριοθέτηση και περιγραφή του περιεχομένου του τεύχους	4
2	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	6
2.1	Θεμελιώδεις έννοιες ανάλυσης υδροσυστημάτων	6
2.1.1	Ορισμοί	6
2.1.2	Η έννοια της αξιοπιστίας σε συστήματα υδατικών πόρων	7
2.1.3	Υδρολογική αβεβαιότητα και ποσοτικοποίησή της	8
2.1.4	Συνιστώσες στοχαστικής προσομοίωσης υδροσυστημάτων	9
2.1.5	Τύποι προσομοίωσης – Η έννοια της στοχαστικής πρόγνωσης	11
2.2	Μεθοδολογικό πλαίσιο βέλτιστης διαχείρισης υδροσυστημάτων	11
2.2.1	Η έννοια της ολοκληρωμένης διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων	11
2.2.2	Τοποθέτηση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου υδροσυστημάτων	12
2.2.3	Αντιμετώπιση του προβλήματος με τεχνικές βελτιστοποίησης	13
2.2.4	Προσομοίωση υδροσυστημάτων με χρήση κανόνων λειτουργίας	14
2.2.5	Το μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση	15
2.3	Συνιστώσες υδροσυστήματος	17
2.3.1	Σχηματοποίηση μοντέλου υδροσυστήματος	17
2.3.2	Κόμβοι	18
2.3.3	Ταμιευτήρες	18
2.3.4	Γεωτρήσεις	20
2.3.5	Υδραγωγεία	20
2.3.6	Στόχοι	21
2.4	Παραμετροποίηση υδροσυστήματος	22
2.4.1	Γενικά	22
2.4.2	Κανόνες λειτουργίας ταμιευτήρων	23
2.4.3	Γενίκευση κανόνων με ενσωμάτωση περιορισμών αποθέματος	25
2.4.4	Κανόνες λειτουργίας γεωτρήσεων	26
2.5	Μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης	27
2.5.1	Τοποθέτηση του προβλήματος	27
2.5.2	Γενική περιγραφή του προβλήματος μεταφόρτωσης	28
2.5.3	Σχηματοποίηση μοντέλου διγράφου	30
2.5.4	Προσομοίωση διαρροών υδραγωγείων	33
2.5.5	Επικαιροποίηση ιδιοτήτων διγράφου	35
2.5.6	Αλγόριθμος προσομοίωσης	38

2.5.7	Μέτρα επίδοσης υδροσυστήματος	40
2.6	Εύρεση βέλτιστης πολιτικής διαχείρισης.....	43
2.6.1	Περιγραφή της διαδικασίας βελτιστοποίησης.....	43
2.6.2	Τύποι αντικειμενικής συνάρτησης	45
2.7	Μεθοδολογία βελτιστοποίησης	47
2.7.1	Τοποθέτηση του προβλήματος.....	47
2.7.2	Θεμελιώδεις έννοιες σχήματος βελτιστοποίησης.....	48
2.7.3	Περιγραφή του αλγορίθμου.....	50
3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	53
3.1	Υποσυστήματα του Υδρονομέα.....	54
3.1.1	Υποσύστημα Διαχείρισης της Βάσης Δεδομένων.....	54
3.1.2	Υποσύστημα Σχεδιασμού Δικτύου.....	54
3.1.3	Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης.....	55
3.1.4	Υποσύστημα Βελτιστοποίησης	55
3.1.5	Υποσύστημα Δυναμικής Απεικόνισης Προσομοίωσης.....	55
3.1.6	Υποσύστημα Παρουσίασης Αποτελεσμάτων.....	56
3.2	Διάγραμμα μετάβασης κατάστασης.....	56
3.3	Στοιχεία ενός έργου	59
3.4	Σχεδιασμός του Συστήματος Μεταβλητών και Δομών	60
3.4.1	Το έργο	61
3.4.2	Οι συνιστώσες ενός έργου.....	61
3.5	Διεπιφάνεια με άλλα συστήματα.....	63
4	ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ	65
4.1	Εισαγωγή.....	65
4.1.1	Διαφορές στην έκδοση 3.2 του Υδρονομέα	65
4.1.2	Βασικές λειτουργίες	66
4.2	Ταυτοποίηση χρηστών.....	67
4.3	Η Κύρια Φόρμα του Υδρονομέα	68
4.3.1	Το βασικό μενού επιλογών.....	68
4.3.2	Η γραμμή εργαλείων της Κύριας Φόρμας.....	71
4.3.3	Οι γραμμές κατάστασης	71
4.4	Σχεδιασμός του δικτύου.....	72
4.4.1	Γραφική υποστήριξη σχεδίασης του δικτύου.....	72
4.4.2	Φόρμες συνιστωσών δικτύου	76
4.5	Διαμόρφωση υδρολογικού σεναρίου.....	87
4.5.1	Επιλογή χρονοσειρών.....	89
4.5.2	Επιλογή υδρολογικού σεναρίου	92
4.6	Καθορισμός στόχων και περιορισμών προσομοίωσης.....	94

4.6.1	Εισαγωγή στόχου	95
4.6.2	Προτεραιότητες στόχων	96
4.6.3	Τροποποίηση ιδιοτήτων στόχου.....	98
4.6.4	Διαγραφή στόχου	98
4.7	Επιλογές έργου.....	98
4.7.1	Ονομασία και περιγραφή.....	98
4.7.2	Κανόνες λειτουργίας	99
4.7.3	Επιλογές προσομοίωσης.....	100
4.7.4	Επιλογές βελτιστοποίησης	101
4.7.5	Επιλογές χρονοσειρών.....	102
4.8	Εκτέλεση προσομοίωσης	104
4.8.1	Επιλογή κανόνα λειτουργίας	104
4.8.2	Ανάλυση κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων.....	105
4.8.3	Παρακολούθηση της διαδικασίας προσομοίωσης.....	108
4.9	Εκτέλεση βελτιστοποίησης.....	112
4.9.1	Η διαδικασία της βελτιστοποίησης	112
4.9.2	Παρακολούθηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης	112
4.10	Επισκόπηση αποτελεσμάτων.....	114
4.10.1	Κανόνες λειτουργίας ταμιευτήρων.....	114
4.10.2	Πρόγνωση αστοχίας στόχων και περιορισμών.....	114
4.10.3	Ισοζύγια	117
4.10.4	Πρόγνωση αποθέματος.....	122
4.10.5	Πρόγνωση παροχής.....	124
4.11	Διαχείριση έργων.....	126
4.11.1	Εισαγωγή έργου.....	126
4.11.2	Αποθήκευση έργου.....	127
4.11.3	Διαγραφή έργου.....	128
5	ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	129
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	131

Σχήματα

Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των συνιστωσών ενός σχήματος στοχαστικής προσομοίωσης συστημάτων υδατικών πόρων.	10
Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ροής μεθοδολογικού σχήματος παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση.	16
Σχήμα 2.3: Παράδειγμα σχηματοποίησης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας.	18
Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συστημάτων ταμιευτήρων και υδραγωγείων, που εξυπηρετούν μια κατάντη ζήτηση, d	22
Σχήμα 2.5: Γραφική παράσταση των κανόνων λειτουργίας τριών υποθετικών ταμιευτήρων. Με λεπτή γραμμή απεικονίζεται η ωφέλιμη χωρητικότητα κάθε ταμιευτήρα, με παχιά γραμμή η τελική μορφή των κανόνων λειτουργίας, ενώ με διακεκομμένη η αρχική (γραμμική) τους μορφή.	25
Σχήμα 2.6: Υποθετικό μοντέλο δικτυακού γραμμικού προγραμματισμού. Εντός παρενθέσεως αναγράφονται η διερχόμενη παροχή, η μεταφορική ικανότητα και το μοναδιαίο κόστος των τόξων.	30
Σχήμα 2.7: Παράδειγμα μετασχηματισμού των συνιστωσών ενός πραγματικού υδροσυστήματος σε συνιστώσες του μοντέλου διγράφου. Ο κόμβος θ είναι ο σωρευτικός, ενώ οι κόμβοι a , b , c προσομοιώνουν την λειτουργία του ταμιευτήρα. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν πραγματικά υδραγωγεία, ενώ οι διακεκομμένες αντιπροσωπεύουν εικονικά τόξα που αναφέρονται στους σχετικούς περιορισμούς. Σε παρένθεση δίνονται η μεταφορική ικανότητα και το μοναδιαίο κόστος κάθε τόξου.	31
Σχήμα 2.8: Μετασχηματισμός υδραγωγείου με διαρροές σε συνιστώσες μοντέλου διγράφου.	34
Σχήμα 2.9: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου προσομοίωσης.	39
Σχήμα 2.10: Γραφική απεικόνιση, σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα, του μειωτικού συντελεστή, π_k , για διάφορες τιμές της παραμέτρου κλίμακας λ	41
Σχήμα 2.11: Γραφική απεικόνιση των καμπυλών μέσης ετήσιας απόληψης (λεπτή γραμμή) και ελαχιστοποιημένης αστοχίας (παχιά γραμμή), συναρτήσει της ετήσιας ζήτησης, d , για ένα σύστημα υδατικών πόρων που μελετάται μέσω στοχαστικής προσομοίωσης.	43
Σχήμα 2.12: Διάγραμμα ροής διαδικασίας βελτιστοποίησης.	44
Σχήμα 2.13: Δυνατές κινήσεις του απλόκου για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης στον χώρο των τριών διαστάσεων: (α) αρχικό σχήμα, (β) ανάκλαση της χειρότερης κορυφής (σημείο μεγίστου) περί το κεντροειδές των υπόλοιπων κορυφών, (γ) επέκταση κατά μήκος της διεύθυνσης ανάκλασης, (δ) εσωτερική συμπίεση, και (ε) συρρίκνωση γύρω από την καλύτερη κορυφή (σημείο ελαχίστου).	49
Σχήμα 3.1: Κύκλος ανάπτυξης λογισμικού.	53
Σχήμα 3.2: Τα βασικά συστατικά του <i>Υδρονομέα</i> και οι αλληλοεπιδράσεις τους.	54
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα μετάβασης κατάστασης του υπολογιστικού συστήματος <i>Υδρονομέας</i>	58
Σχήμα 3.4: Πρώτο διάγραμμα Οντοτήτων-Συσχετισμών του <i>Υδρονομέα</i> - Διασυνδέσεις της οντότητας <i>Εργο</i>	61
Σχήμα 3.5: Δεύτερο διάγραμμα Οντοτήτων-Συσχετισμών του <i>Υδρονομέα</i> - Διασυνδέσεις των συνιστωσών ενός έργου.	62
Σχήμα 3.6: Επεξεργασία και χρήση υδρολογικών δεδομένων.	64
Σχήμα 4.1: Οι βασικές διαδικασίες που ακολουθούνται σε μια τυπική σύνοδο του <i>Υδρονομέα</i>	67
Σχήμα 4.2: Φόρμα Ταυτοποίησης Χρήστη.	68
Σχήμα 4.3: Κύρια Φόρμα του <i>Υδρονομέα</i>	68
Σχήμα 4.4: Παράδειγμα γραμμών κατάστασης.	72
Σχήμα 4.5: Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου.	73
Σχήμα 4.6: Επιλογή προσθήκης νέου κόμβου/ νέου ταμιευτήρα.	73

Σχήμα 4.7: Επιλογή προσθήκης νέου υδραγωγείου.....	74
Σχήμα 4.8: Επιλογή προσθήκης νέας γεώτρησης.....	74
Σχήμα 4.9: Βοηθήματα μετακίνησης γραφικής παράστασης.....	75
Σχήμα 4.10: Επιλογή προσθήκης νέας γεώτρησης.....	75
Σχήμα 4.11: Αναδρομική διαγραφή συνιστωσών δικτύου με βάση το παράδειγμα της διαγραφής του κόμβου «Μεριστής Κιθαιρώνα».....	75
Σχήμα 4.12: Φόρμα διαλόγου για την επιβεβαίωση διαγραφής στόχων.....	76
Σχήμα 4.13: Φόρμα Νέου Κόμβου.....	76
Σχήμα 4.14: Φόρμα Νέου Ταμιευτήρα.....	77
Σχήμα 4.15: Καμπύλη στάθμης-όγκου ταμιευτήρα Υλίκης.....	78
Σχήμα 4.16: Φόρμα Παραμέτρων Υπόγειων Διαφυγών Ταμιευτήρα.....	79
Σχήμα 4.17: Φύλλα της Φόρμας Ιδιοτήτων Κόμβου/Ταμιευτήρα.....	80
Σχήμα 4.18: Φόρμα Νέου Υδραγωγείου.....	81
Σχήμα 4.19: Φόρμα Καταχώρησης Στοιχείων Παροχής.....	81
Σχήμα 4.20: Παράδειγμα μεταβλητής παροχευτικότητας συναρτήσει του χρόνου.....	82
Σχήμα 4.21: Παράδειγμα μεταβλητής παροχευτικότητας συναρτήσει του ύψους πτώσης.....	83
Σχήμα 4.22: Παράδειγμα συντελεστή διαρροής υδραγωγείου συναρτήσει του χρόνου.....	83
Σχήμα 4.23: Φόρμα Τροποποίησης Ιδιοτήτων Υδραγωγείου.....	84
Σχήμα 4.24: Φόρμα Νέας Γεώτρησης.....	85
Σχήμα 4.25: Φόρμα Τροποποίησης Ιδιοτήτων Γεώτρησης.....	87
Σχήμα 4.26: Χρονοσειρές επιλέξιμες από τον <i>Υδρονομέα</i>	88
Σχήμα 4.27: Φόρμα Χρονοσειρών πριν από την επιλογή χρονοσειρών.....	89
Σχήμα 4.28: Φόρμα Χρονοσειρών κατόπιν επιλογής χρονοσειρών.....	89
Σχήμα 4.29: Φόρμα Επιλογής Χρονοσειρών.....	91
Σχήμα 4.30: Πίνακας τιμών χρονοσειράς.....	92
Σχήμα 4.31: Φόρμα Επιλογής Υδρολογικού Σεναρίου.....	93
Σχήμα 4.32: Φόρμα Πληροφορίας Υδρολογικών Σεναρίων και Μεταβλητών.....	94
Σχήμα 4.33: Παράδειγμα Φόρμας Στόχου.....	95
Σχήμα 4.34: Φόρμα Προτεραιότητας Στόχων.....	97
Σχήμα 4.35: Φύλλο Βασικών Στοιχείων Έργου της Φόρμας Επιλογών Έργου.....	99
Σχήμα 4.36: Φύλλο Κανόνων Λειτουργίας της Φόρμας Επιλογών Έργου.....	100
Σχήμα 4.37: Φύλλο Προσομοίωσης της Φόρμας Επιλογών Έργου.....	101
Σχήμα 4.38: Φύλλο Βελτιστοποίησης της Φόρμας Επιλογών Έργου.....	102
Σχήμα 4.39: Επισήμανση σφαλμάτων στο Φύλλο Χρονοσειρών της Φόρμας Επιλογών Έργου.....	103
Σχήμα 4.40: Αποδοχή χρονοσειρών στο Φύλλο Χρονοσειρών της Φόρμας Επιλογών Έργου.....	103
Σχήμα 4.41: Φύλλο Γνωστών Κανόνων της Φόρμας Κανόνων Λειτουργίας.....	104
Σχήμα 4.42: Φύλλο Μεταβλητών Ελέγχου της Φόρμας Κανόνων Λειτουργίας.....	105
Σχήμα 4.43: Φύλλο γραφικής παράστασης κανόνων λειτουργίας της Φόρμας Κανόνων Λειτουργίας Ταμιευτήρων.....	106
Σχήμα 4.44: Φύλλο πίνακα αντιστοίχισης αποθεμάτων της Φόρμας Κανόνων Λειτουργίας Ταμιευτήρων.....	107
Σχήμα 4.45: Φύλλο επιλογών της Φόρμας Κανόνων Λειτουργίας Ταμιευτήρων.....	108
Σχήμα 4.46: Φύλλο επιδόσεων της Φόρμας Κατάστασης Προσομοίωσης.....	108
Σχήμα 4.47: Δυναμική απεικόνιση της προσομοίωσης στη βάση του μοντέλου του συστήματος υδροδότησης της Αθήνας.....	109
Σχήμα 4.48: Επεξήγηση του μοντέλου ταμιευτήρα.....	110
Σχήμα 4.49: Υπόμνημα της Φόρμας Δυναμικής Απεικόνισης.....	111
Σχήμα 4.50: Φόρμα Ελέγχου Προσομοίωσης.....	112

Σχήμα 4.51: Φύλλο επιδόσεων της Φόρμας Κατάστασης Βελτιστοποίησης.....	113
Σχήμα 4.52: Φύλλο Μεταβλητών Ελέγχου της Φόρμας Κατάστασης Βελτιστοποίησης.....	113
Σχήμα 4.53: Φόρμα Αστοχίας Συστήματος.....	115
Σχήμα 4.54: Χρονική κατανομή πιθανότητας αστοχίας στόχου.....	116
Σχήμα 4.55: Κατανομή αστοχίας κάλυψης ζήτησης νερού σε ελλειμματικό όγκο.....	116
Σχήμα 4.56: Κατανομή αστοχίας κάλυψης ζήτησης νερού στο ποσοστό ελλειμματικού όγκου νερού σε σχέση με τη ζήτηση νερού.....	117
Σχήμα 4.57: Παράδειγμα επιλογής περιόδου εμφάνισης αποτελεσμάτων ισοζυγίων.....	118
Σχήμα 4.58: Φύλλο Ισοζυγίου Ταμειυτήρων της Φόρμας Ισοζυγίων.....	119
Σχήμα 4.59: Γραφική παράσταση εισόδων-εξόδων ταμειυτήρα.....	119
Σχήμα 4.60: Φύλλο Ισοζυγίου Κόμβων της Φόρμας Ισοζυγίων.....	120
Σχήμα 4.61: Φύλλο Ισοζυγίου Υδραγωγείων της Φόρμας Ισοζυγίων.....	121
Σχήμα 4.62: Φύλλο Ενεργειακού Ισοζυγίου της Φόρμας Ισοζυγίων.....	122
Σχήμα 4.63: Παράδειγμα ισοπίθανων καμπύλων αποθέματος του υδατικού συστήματος.....	123
Σχήμα 4.64: Παράδειγμα ισοπίθανων καμπύλων στάθμης της λίμνης Υλίκη.....	124
Σχήμα 4.65: Παράδειγμα πρόβλεψης παροχής του υδραγωγείου Σήραγγας Κιθαιρώνα στη βάση ισοπίθανων καμπυλών.....	125
Σχήμα 4.66: Παράδειγμα πρόβλεψης παροχής της γεώτρησης Ούγγρα-Παραλίμνη στη βάση ισοπίθανων καμπυλών.....	126
Σχήμα 4.67: Φύλλο εισαγωγής της Φόρμας Διαχείρισης Έργων.....	127
Σχήμα 4.68: Φύλλο αποθήκευσης της Φόρμας Διαχείρισης Έργων.....	127
Σχήμα 4.69: Φύλλο διαγραφής της Φόρμας Διαχείρισης Έργων.....	128

1 Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του ερευνητικού αντικειμένου

Το παρόν τεύχος περιγράφει το υπολογιστικό σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης υδατικών πόρων *Υδρονομέας* στην έκδοση 3.2. Το υπολογιστικό σύστημα αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας* και σχεδιάστηκε με σκοπό την υποστήριξη της ΕΥΔΑΠ στη διαδικασία λήψης σχετικών αποφάσεων.

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

1.2 Στόχοι ανάπτυξης του Υδρονομέα

1.2.1 Δεύτερη έκδοση

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

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

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

Παράλληλα, έγινε αναγωγή του προβλήματος της εύρεσης του βέλτιστου κανόνα διαχείρισης του συστήματος, σύμφωνα με τους *Nalbantis and Koutsoyiannis* (1997), σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα.

Εδώ, βασικός στόχος του παρόντος ερευνητικού έργου ήταν η επιλογή, ύστερα από δοκιμές, ενός αξιόπιστου και αποδοτικού αλγορίθμου επίλυσης αναλόγων προβλημάτων και η προσαρμογή του στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

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

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

1.2.2 Τρίτη έκδοση

Η τρίτη έκδοση του Υδρονομέα αναπτύχθηκε στη 2^η φάση του ερευνητικού έργου και συγκεκριμένα την περίοδο Ιανουαρίου 2001-Δεκεμβρίου 2003. Αποτελεί την επιχειρησιακή έκδοση του Συστήματος Υποστήριξης της Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και συγκεντρώνει όλη την εμπειρία που αποκομίστηκε σε όλη τη διάρκεια αυτής της περιόδου από τη λειτουργία του ως βασικού λογισμικού της ΕΥΔΑΠ για την εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας.

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

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

Ως προς το μοντέλο, η τρίτη έκδοση του Υδρονομέα διακρίνεται από την δυνατότητα ακριβέστερης προσομοίωσης του υδροσυστήματος και των ιδιοτήτων του. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης παρέχει τη δυνατότητα εποχιακής μεταβολής των συντελεστών των κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων με αποτέλεσμα την καλύτερη προσέγγιση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος διαχείρισης. Επίσης το υπολογιστικό σύστημα λαμβάνει υπόψη όλες τις αλλαγές στο δίκτυο (υποθετικές ή πραγματικές) που προβλέπονται από το σενάριο διαχείρισης να επέλθουν κατά τη

διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου (επέκταση δικτύου, παροδική βλάβη ορισμένων συνιστωσών, αύξηση παροχτευτικότητας υδραγωγείων, λειτουργία νέου ταμιευτήρα κλπ.).

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

Στο εδάφιο 4.1.1 αναφέρονται αναλυτικά οι διαφορές της επίκαιρης έκδοσης του Υδρονομέα από την έκδοση 2.0.

1.3 Λειτουργίες του υπολογιστικού συστήματος

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

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

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

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

- Την κάλυψη ζήτησης ύδρευσης ή άρδευσης.
- Τη διακύμανση της στάθμης ταμιευτήρων μέσα σε εποχιακά διαφοροποιημένα ανώτατα και κατώτατα όρια και την αποφυγή υπερχείλισής τους. Οι στόχοι αυτοί αφενός εξασφαλίζουν ένα ελάχιστο απόθεμα νερού και αφετέρου περιορίζουν τον κίνδυνο υπερχείλισης όπως π.χ. στον ταμιευτήρα του Μαραθώνα.
- Την ελάχιστη, μέγιστη ή σταθερή ροή σε επιλεγμένους αγωγούς του δικτύου.

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

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

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

Αρχικά, οι βέλτιστοι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων ενός υδροσυστήματος δεν είναι γνωστοί. Κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης το υπολογιστικό σύστημα υπολογίζει με βάση μια αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση που έχει ορίσει ο χρήστης τον πλέον αποδοτικό κανόνα λειτουργίας πραγματοποιώντας διαδοχικές προσομοιώσεις και συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Οι δυνατές αντικειμενικές συναρτήσεις είναι οι ακόλουθες:

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

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

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

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

1.4 Οριοθέτηση και περιγραφή του περιεχομένου του τεύχους

Το παρόν τεύχος χωρίζεται σε πέντε κεφάλαια, το πρώτο από τα οποία αποτελεί την παρούσα εισαγωγή. Το δεύτερο κεφάλαιο παραθέτει το μαθηματικό υπόβαθρο του υπολογιστικού συστήματος στο οποίο περιγράφεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στον Υδρονομέα, η απεικόνιση των συνιστωσών του υδροσυστήματος στο μοντέλο, και η διαδικασία της παραμετροποίησης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στο σχεδιασμό του Υδρονομέα περιγράφοντας τα υποσυστήματα που το απαρτίζουν, το μοντέλο μετάβασης κατάστασης και το διάγραμμα οντοτήτων-συσχετίσεων. Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στις οδηγίες χρήσης του υπολογιστικού συστήματος και συγκεκριμένα στην έκδοση 3.2 του Υδρονομέα. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα από την ανάπτυξη του Υδρονομέα και από την εμπειρία της έως τώρα λειτουργίας.

Στα παραδοτέα τεύχη της 1^{ης} και 2^{ης} φάσης του παρόντος έργου συμπεριλαμβάνονται επιπρόσθετες πληροφορίες που σχετίζονται με την ανάπτυξη και εφαρμογή του Υδρονομέα. Συγκεκριμένα, στο τεύχος 1 (*Καραβοκυρός κ.ά., 2000b*) περιγράφονται λεπτομερειακά και με τεχνικούς όρους οι απαιτήσεις από το υπολογιστικό σύστημα όπως προκύπτουν με βάση τις συμβατικές υποχρεώσεις. Οι απαιτήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν ως κείμενο αναφοράς από τους σχεδιαστές του υπολογιστικού συστήματος. Η εφαρμογή του Υδρονομέα στο σύστημα υδροδότησης της ΕΥΔΑΠ κατά την εκπόνηση των Διαχειριστικών Σχεδίων για τα υδρολογικά έτη 2000-01 έως 2002-03 συμπεριλαμβάνονται στα τεύχη 5 (*Κουτσογιάννης κ.ά., 2000b*), 13 (*Κουτσογιάννης κ.ά., 2001*) και 14 (*Κουτσογιάννης κ.ά., 2002*). Το τεύχος 19 (*Παπακώστας, 2003*) περιγράφει την Κεντρική Βάση Δεδομένων του έργου που χρησιμοποιείται από τον Υδρονομέα. Οι συνθετικές υδρολογικές χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση διαφόρων σεναρίων προέκυψαν ύστερα από στοχαστική προσομοίωση με το υπολογιστικό σύστημα *Κασταλία* που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ίδιου έργου και περιγράφεται στο τεύχος 23 (*Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2003*). Τέλος, στο τεύχος 20 (*Καραβοκυρός και Κοζάνης, 2003*) παρουσιάζεται ένα λογισμικό εργαλείο με το οποίο δίνεται η δυνατότητα αυτόματης εκτύπωσης εκθέσεων έργων του Υδρονομέα.

2 Μαθηματικό υπόβαθρο

2.1 Θεμελιώδεις έννοιες ανάλυσης υδροσυστημάτων

2.1.1 Ορισμοί

Ως *σύστημα* νοείται ένα σύνολο ανεξάρτητων μεταξύ τους στοιχείων, το οποίο χαρακτηρίζεται από: (α) ένα σύνορο που καθορίζει αν το στοιχείο ανήκει στο σύστημα ή το περιβάλλον, (β) αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον (είσοδοι και έξοδοι), και (γ) σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του και των εισόδων και εξόδων (*Mays and Tung*, 1992, σ. 8).

Προσομοίωση (simulation) είναι η τεχνική μίμησης ενός πραγματικού συστήματος, όπως αυτό εξελίσσεται στον χρόνο (*Winston*, 1994, σ. 23).

Μοντέλο προσομοίωσης (simulation model) είναι ένα σύνολο υποθέσεων σχετικά με την δυναμική λειτουργία ενός συστήματος, εκφρασμένων υπό μορφή μαθηματικών ή λογικών σχέσεων και κωδικοποιημένων, συνήθως, σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού (*Κουτσογιάννης*, 2000a). Θεωρητικά, ένα τέλειο μοντέλο, δεχόμενο τις διεγέρσεις του πραγματικού συστήματος, οφείλει να παράγει παρόμοια απόκριση με αυτό. Στην πράξη ωστόσο, η προσομοιωμένη απόκριση του μοντέλου αποκλίνει πάντοτε από την απόκριση του πραγματικού συστήματος, εξαιτίας σφαλμάτων που οφείλονται: (α) στη δομή του μοντέλου, που είναι προφανώς πολύ απλούστερη της δομής του πραγματικού συστήματος, (β) στις παραμέτρους του μοντέλου, ήτοι τα χαρακτηριστικά μεγέθη των συνιστωσών του, και (γ) στην αναπαράσταση, ήτοι μαθηματική περιγραφή βάσει μετρήσεων, των εξωτερικών διεγέρσεων. Αν σε ένα μοντέλο προσομοίωσης εισάγονται οι προβλεπόμενες μελλοντικές διεγέρσεις, με σκοπό την αναπαράσταση της μελλοντικής απόκρισης του πραγματικού συστήματος, τότε το μοντέλο λειτουργεί υπό μορφή *πρόγνωσης* (forecast).

Ένα μοντέλο ονομάζεται *προσδιοριστικό* ή *ντετερμινιστικό* εφόσον τόσο οι παράμετροί του όσο και οι εξωτερικές του διεγέρσεις θεωρούνται γνωστές. Ένα ντετερμινιστικό μοντέλο παράγει εξ ορισμού μία και μοναδική απόκριση για κάθε διεύρεση.

Ένα μοντέλο ονομάζεται *στοχαστικό* (stochastic) όταν οι παράμετροι ή και οι εξωτερικές του διεγέρσεις θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές, περιγράφονται δηλαδή από κατανομές πιθανοτήτων. Η θεώρηση αυτή επιτρέπει την ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων που διέπουν ένα μοντέλο προσομοίωσης, ιδιαίτερα όταν το τελευταίο χρησιμοποιείται και για πρόγνωση. Εξ ορισμού, ένα στοχαστικό μοντέλο παράγει αποκρίσεις που είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές.

Ο όρος *στοχαστική προσομοίωση* (stochastic simulation) αναφέρεται σε υπολογιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούν τεχνικές δειγματοληψίας, ήτοι τυχαίους αριθμούς, για την επίλυση προβλημάτων στα οποία η εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων είναι αδύνατη ή ιδιαίτερα δυσχερής. Η μεθοδολογία είναι πολύ γενική, και χρησιμοποιείται ακόμη και σε καθαρά μαθηματικές εφαρμογές, όπως ο υπολογισμός ολοκληρωμάτων πολλών μεταβλητών. Στη βιβλιογραφία, η στοχαστική προσομοίωση απαντά και ως *μέθοδος Monte Carlo*.

Η ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων που διέπονται από αβεβαιότητες αποτελεί τυπικό πεδίο εφαρμογής της στοχαστικής προσομοίωσης. Η γενική μεθοδολογία έγκειται στην προσομοίωση του συστήματος με συνθετικά δεδομένα εισόδου, ήτοι συνθετικά σενάρια παραμέτρων ή εξωτερικών

διεγέρσεων, οπότε προκύπτει ένα δείγμα εφικτών αποκρίσεων του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή, το δείγμα των προσομοιωμένων αποκρίσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την στατιστική περιγραφή των αποκρίσεων του πραγματικού συστήματος. Κατά συνέπεια, η στοχαστική προσομοίωση μπορεί να θεωρηθεί και ως ένα «μαθηματικό πείραμα» που εκτελείται στον υπολογιστή (Ripley, 1987, σ. 2).

Τονίζεται ότι για να έχει νόημα η παραπάνω διαδικασία, θα πρέπει τα συνθετικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου να έχουν παραχθεί με κάποιον συστηματικό τρόπο, ώστε να είναι συνεπή με την πραγματικότητα. Για παράδειγμα, αν για κάποια παράμετρο είναι διαθέσιμη μια αντιπροσωπευτική τιμή και ένα σύνθετος εύρος διακύμανσης (που μπορούν να θεωρηθούν ως εκτιμήτριες της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης της παραμέτρου), τότε η κατασκευή ενός συνθετικού δείγματος τιμών της γίνεται παράγοντας τυχαίους κανονικούς αριθμούς που έχουν την ίδια μέση τιμή και την ίδια τυπική απόκλιση. Προφανώς, όσο περισσότερα συνθετικά σενάρια διερευνώνται τόσο αυξάνει το δείγμα των προσομοιωμένων αποκρίσεων, και, συνεπώς, τόσο πιο αξιόπιστα θεωρούνται τα συμπεράσματα από την στατιστική ανάλυση αυτού.

2.1.2 Η έννοια της αξιοπιστίας σε συστήματα υδατικών πόρων

Ως *υδροσύστημα* (hydrosystem) νοείται ένα σύστημα αποτελούμενο από φυσικά υδάτινα σώματα και τεχνικά έργα, που συνεργαζόμενα εξυπηρετούν έναν ή περισσότερους σκοπούς, οι οποίοι αναφέρονται τόσο στην *αξιοποίηση* του νερού ως φυσικού πόρου, όσο και στην *προστασία* από την καταστροφική δράση του νερού ως φυσικού κινδύνου. Ο όρος *σύστημα υδατικών πόρων* (water resource system) έχει συνήθως στενότερη έννοια, καθώς δεν περιλαμβάνει τα έργα ελέγχου πλημμυρών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1997, σ. 4, 33). Στη συνέχεια, οι παραπάνω όροι θα θεωρούνται ταυτόσημοι, και θα αναφέρονται στον κύκλο προσφορά, αποθήκευση, μεταφορά, επεξεργασία και κατανάλωση νερού, που περιλαμβάνει τις φυσικές συνιστώσες (λεκάνες απορροής, υδροφορείς, κλπ) και τα σχετιζόμενα υδραυλικά έργα (ταμιευτήρες, υδραγωγεία, αντλιοστάσια, μονάδες επεξεργασίας νερού, κλπ).

Ένα εξαιρετικά κρίσιμο χαρακτηριστικό ενός συστήματος υδατικών πόρων είναι η *αξιοπιστία* (reliability), ορίζεται ως η πιθανότητα επίτευξης μιας συγκεκριμένης επίδοσης για καθορισμένο χρονικό διάστημα και καθορισμένες συνθήκες (Chow et al., 1988, σ. 434). Συμπληρωματική της έννοιας της αξιοπιστίας είναι η *πιθανότητα αστοχίας* που ορίζεται ως:

$$\alpha = P(X < x^*) \quad (2.1)$$

όπου X τυχαία μεταβλητή που εκφράζει την *επίδοση* (yield) του υδροσυστήματος (π.χ. απόληψη, παραγωγή ενέργειας) και x^* η επιθυμητή τιμή (τιμή-στόχος) της εν λόγω επίδοσης. Τονίζεται ότι η επίδοση του συστήματος θεωρείται τυχαία μεταβλητή, καθώς είναι συνάρτηση των υδρολογικών εισροών, που είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές (Koutsoyiannis, 2004a).

Σε ορισμένες απλές περιπτώσεις, η εκτίμηση της αξιοπιστίας ενός υδροσυστήματος είναι δυνατή με άμεσες μεθόδους, π.χ. με στατιστική ανάλυση των ιστορικών χρονοσειρών απόκρισης αυτού. Ωστόσο, σε ένα σύστημα ταμιευτήρων όπως αυτό της Αθήνας κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ταμιευτήρες και το δίκτυο των υδραγωγείων διαταράσσουν το φυσικό καθεστώς υδροφορίας, ρυθμίζοντας την απορροή των λεκανών τόσο χρονικά (αποθήκευση νερού και απόδοσή του μεταγενέστερα) όσο και χωρικά (μεταφορά νερού μεταξύ ταμιευτήρων). Συνεπώς, σε πολύπλοκα υδροσυστήματα, η εκτίμηση της αξιοπιστίας ή, ισοδύναμα, της πιθανότητας αστοχίας είναι δυνατή μόνο μέσω προσομοίωσης. Εισάγονται δηλαδή ως εξωτερικές διεγέρσεις χρονοσειρές εισροών και ζήτησης και παράγονται προσομοιωμένες χρονοσειρές απολήψεων, που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την εμπειρική εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος, ήτοι:

$$\alpha = \frac{n'}{n} \quad (2.2)$$

όπου n' το πλήθος των ετών κατά τα οποία δεν επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή x^* και n το σύνολο των προσομοιωμένων ετών, ήτοι το μήκος της προσομοίωσης. Χαρακτηριστικό είναι ότι η πιθανότητα αστοχίας, εφόσον εκτιμάται εμπειρικά, μέσω προσομοίωσης, λαμβάνει μόνο διακριτές τιμές από το σύνολο $\{0, 1/n, \dots, 1\}$.

Μια εναλλακτική διατύπωση ενός μέτρου αστοχίας είναι με βάση το μέσο ποσοστιαίο έλλειμμα (ογκομετρικό μέτρο αστοχίας), που ορίζεται ως:

$$\alpha_V = 1 - \frac{E[X]}{x^*} \quad (2.3)$$

όπου η παράσταση $E[X]$ υποδηλώνει την αναμενόμενη τιμή της επίδοσης του συστήματος, X , που εκτιμάται ως ο ετήσιος μέσος όρος των πραγματοποιήσεων της. Ισχύει πάντοτε:

$$\alpha \geq \alpha_V \quad (2.4)$$

Κατά συνέπεια, η εμπειρική εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας με βάση τον ορισμό (2.2) είναι πιο αυστηρή σε σχέση με τον ορισμό (2.3).

Τονίζεται ότι ένα σύστημα υδατικών πόρων, και ειδικότερα ένα σύστημα που εξυπηρετεί κατά κύριο λόγο υδρευτικές χρήσεις όπως αυτό της Αθήνας, οφείλει να λειτουργεί με πολύ υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας ή, ισοδύναμα, με πολύ μικρή πιθανότητα αστοχίας. Πράγματι, τυχόν αδυναμία στην ικανοποίηση της ζήτησης νερού στην Αθήνα αναμένεται να έχει δραματικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις και σε καμία περίπτωση δεν είναι αποδεκτή. Για τον λόγο αυτό, έχει θεσπιστεί ως επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας του συστήματος η τιμή 99%, εκφρασμένη σε ετήσια βάση. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται, κατά μέσο όρο, η πλήρης ικανοποίηση της ζήτησης νερού στα 99 από τα 100 έτη λειτουργίας του συστήματος. Συνεπώς, για την εμπειρική εκτίμηση της αξιοπιστίας του υδροσυστήματος της Αθήνας απαιτείται η ύπαρξη ενός εκτενούς δείγματος χρονοσειρών εισροών, πολύ μεγαλύτερου των 100 ετών. Με βάση ορισμένες παραδοχές, ικανοποιητικά ακριβής εκτίμηση της αξιοπιστίας επιτυγχάνεται με χρονοσειρές μήκους τουλάχιστον 2000 ετών.

Είναι προφανές ότι το δείγμα των ιστορικών εισροών σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί επαρκές για την προσομοίωση ενός υδροσυστήματος που οφείλει να λειτουργεί με υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας, δεδομένου ότι ένα τέτοιο δείγμα αδυνατεί να αναπαράγει ακραίες τιμές μιας κατανομής πιθανοτήτων (*Philbrick and Kitaniadis, 1999*). Ο περιορισμός αυτός καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση μεθοδολογιών στοχαστικής προσομοίωσης για την ανάλυση τέτοιων συστημάτων. Το γενικό σχήμα στοχαστικής προσομοίωσης υδροσυστημάτων περιγράφεται στο εδάφιο 2.1.4.

2.1.3 Υδρολογική αβεβαιότητα και ποσοτικοποίησή της

Από την πληθώρα των πηγών αβεβαιότητας που διέπει την λειτουργία ενός υδροσυστήματος, σημαντικότερη ασφαλώς είναι η υδρολογική. Αυτή οφείλεται στην αδυναμία πρόβλεψης της εξέλιξης των υδρομετεωρολογικών διεργασιών, η χαοτική συμπεριφορά των οποίων καθιστά ανέφικτη την πραγματοποίηση ασφαλών προγνώσεων για χρονικό ορίζοντα πέρα των λίγων ημερών. Ωστόσο, η χρονική αυτή κλίμακα είναι απολύτως ανεπαρκής, δεδομένου ότι η ανάγκη υπερετήσιας ρύθμισης ενός υδροσυστήματος προϋποθέτει την προσομοίωση της λειτουργίας του για χρονικό ορίζοντα πολλών ετών.

Η αδυναμία πρόγνωσης των υδρομετεωρολογικών διεργασιών με την χρήση προσδιοριστικών μοντέλων οδήγησε στην εναλλακτική θεώρησή τους ως τυχαίων μεταβλητών και την αντιμετώπισή τους με τη θεωρία των στοχαστικών ανεξίτητων. Στις αρχές της εν λόγω θεωρίας βασίζονται τα λεγόμενα *στοχαστικά υδρολογικά μοντέλα*, που περιγράφουν στατιστικά τις χρονικές και χωρικές συσχετίσεις των υδρολογικών διεργασιών, ποσοτικοποιώντας την αβεβαιότητα γύρω από την εξέλιξή τους.

Τα στοχαστικά υδρολογικά μοντέλα εφαρμόζονται για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών, οι οποίες αναπαράγουν την στατιστική δομή και τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων υδρολογικών διεργασιών. Το πλέον σημαντικό πλεονέκτημα των συνθετικών δειγμάτων είναι η απουσία περιορισμού ως προς το μήκος τους, κάτι που καθιστά δυνατή την χρήση τους για την εκτίμηση ακραίων επιπέδων αξιοπιστίας.

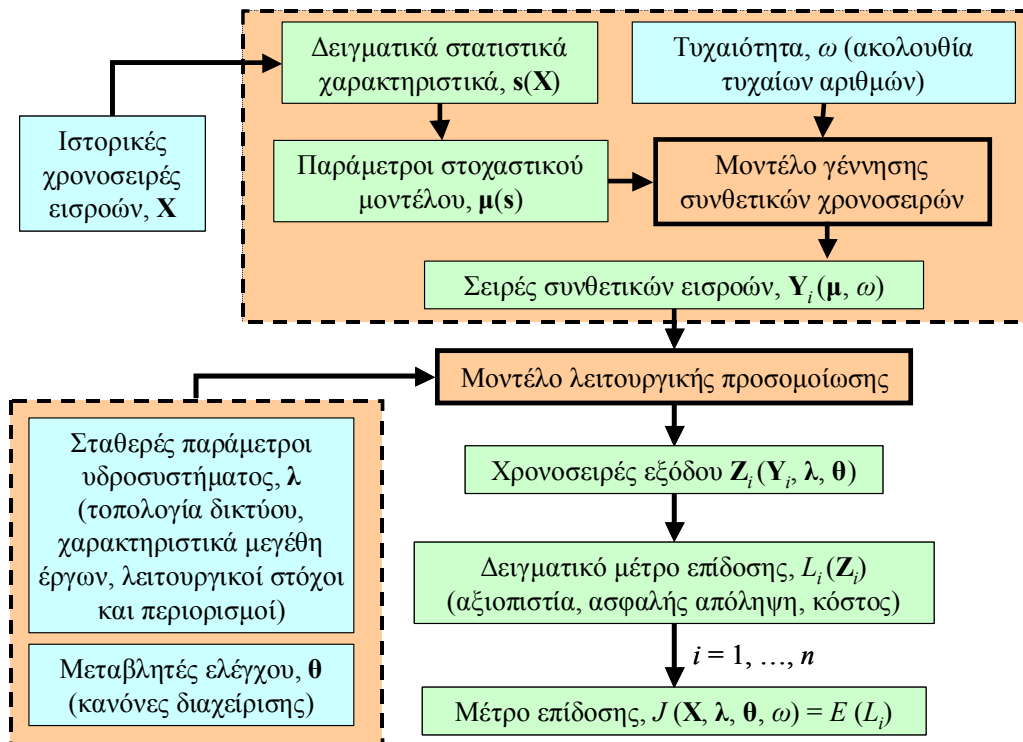
2.1.4 Συνιστώσες στοχαστικής προσομοίωσης υδροσυστημάτων

Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται οι συνιστώσες και τα υπολογιστικά βήματα ενός γενικού σχήματος στοχαστικής προσομοίωσης συστημάτων υδατικών πόρων (Koutsoyiannis, 2004). Η υπολογιστική διαδικασία περιλαμβάνει δύο βασικά μοντέλα, τα οποία απεικονίζονται με παχιά γραμμή. Το πρώτο είναι το στοχαστικό υδρολογικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιείται για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών. Στοιχεία εισόδου του μοντέλου είναι ένα σύνολο παραμέτρων, μ , και ένας όρος τυχαιότητας, ω , που εκφράζεται από ένα σύνολο τυχαίων αριθμών, που παράγονται αυτόματα μέσω του υπολογιστή¹. Οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμώνται συναρτήσει ορισμένων δειγματικών στατιστικών χαρακτηριστικών, $s(\mathbf{X})$, όπου με \mathbf{X} συμβολίζονται οι ιστορικές χρονοσειρές εισροών. Οι εν λόγω παράμετροι ορίζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αναπαράγουν τα παραπάνω στατιστικά χαρακτηριστικά. Επισημαίνεται ότι η αξιοπιστία ενός στοχαστικού υδρολογικού μοντέλου εξαρτάται από δύο παράγοντες: (α) την ποιότητα της διαθέσιμης υδρολογικής πληροφορίας, και (β) την ακρίβεια εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως συμβαίνει και στο στοχαστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, ο υπολογισμός ορισμένων τουλάχιστον εκ των παραμέτρων, μ , συναρτήσει των στατιστικών χαρακτηριστικών, s , δεν μπορεί να γίνει με αναλυτικές μεθόδους, οπότε χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές τεχνικές (αριθμητικά μοντέλα ή μοντέλα βελτιστοποίησης). Μια άλλη επισήμανση σχετίζεται με την ασυμπτωτική συμπεριφορά των στοχαστικών μοντέλων. Θεωρητικά, τα μοντέλα αυτά αναπαράγουν ακριβώς τα δειγματικά στατιστικά χαρακτηριστικά για άπειρο μήκος προσομοίωσης (ήτοι άπειρο μήκος συνθετικών χρονοσειρών). Στην πράξη, τα μήκη των συνθετικών χρονοσειρών είναι της τάξης των εκατοντάδων ή χιλιάδων τιμών, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεροληψία στην αναπαραγωγή των στατιστικών μεγεθών. Έξοδοι του στοχαστικού μοντέλου είναι οι συνθετικές χρονοσειρές εισροών, $\mathbf{Y}_i(\mu, \omega)$, που στην γενική περίπτωση μπορούν να θεωρηθούν ως n στοχαστικά ανεξάρτητες σειρές με την ίδια πιθανότητα πραγματοποίησης, εφόσον η διαδικασία γέννησης επαναλαμβάνεται πολλές φορές με διαφορετικές αρχικές συνθήκες (διαφορετική τιμή της ακολουθίας τυχαίων αριθμών).

Η δεύτερη βασική συνιστώσα του σχήματος στοχαστικής προσομοίωσης είναι το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης του υδροσυστήματος. Το εν λόγω μοντέλο χρησιμοποιεί ως στοιχεία εισόδου τις παραμέτρους του συστήματος και τις συνθετικές χρονοσειρές εισροών που παράγονται από το στοχαστικό υδρολογικό μοντέλο. Οι παράμετροι του υδροσυστήματος διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: (α) σταθερές παράμετροι, που συμβολίζονται με λ , και αναφέρονται στην τοπολογία του δικτύου, τα χαρακτηριστικά μεγέθη των υδραυλικών έργων και τους λειτουργικούς στόχους και περιορισμούς, και (β) παράμετροι διαχείρισης, που συμβολίζονται με θ , και αναφέρονται στον τρόπο λειτουργίας του υδροσυστήματος. Το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης αναπαριστά την λειτουργία του υδροσυστήματος, τηρώντας τους φυσικούς περιορισμούς του προβλήματος και προσπαθώντας να ικανοποιήσει τους λειτουργικούς περιορισμούς και στόχους, με βάση την πολιτική διαχείρισης, θ . Έξοδοι του μοντέλου είναι n σεναρία απολήψεων $\mathbf{Z}_i(\mathbf{Y}_i, \lambda, \theta)$, κάθε ένα από τα οποία

¹ Στην πραγματικότητα, οι τυχαίοι αριθμοί στον υπολογιστή γεννώνται βάσει ενός αυστηρά προσδιοριστικού αλγορίθμου, ο οποίος οδηγεί στην ίδια ακολουθία αριθμών αν ξεκινήσει με την ίδια αρχική τιμή, που είναι γνωστή και ως σπόρος (seed). Για τον λόγο αυτό, οι τυχαίοι αριθμοί που παράγονται καθ' αυτόν τον τρόπο είναι αναφέρονται και ως ψευδοτυχαίοι (pseudorandom).

συνιστά την απόκριση του συστήματος έναντι του αντίστοιχου σεναρίου εισροών, Y_i . Για κάθε σενάριο απολήψεων, Z_i , ελέγχεται η επίδοση του υδροσυστήματος, με βάση ένα αριθμητικό μέτρο, L_i , που συναρτάται με ποσοτικά κριτήρια όπως η αξιοπιστία, η εγγυημένη απόληψη, η παραγωγή ενέργειας, το κόστος λειτουργίας, το οικονομικό όφελος από την πώληση του νερού, κλπ.



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των συνιστωσών ενός σχήματος στοχαστικής προσομοίωσης συστημάτων υδατικών πόρων.

Η υδρολογική αβεβαιότητα οδηγεί σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα ισοπίθανων συνθηκών υδροφορίας και αντίστοιχων αποκρίσεων του συστήματος, οπότε η τιμή κάθε μεμονωμένου (δειγματικού) μέτρου, L_i , δεν έχει ιδιαίτερο νόημα. Συνεπώς, ως τελικό μέτρο επίδοσης του συστήματος, J , λαμβάνεται η αναμενόμενη (μέση) τιμή των επιμέρους δειγματικών μέτρων, μέσω της οποίας αποτιμάται η αποτελεσματικότητα της πολιτικής διαχείρισης που περιγράφεται μέσω των παραμέτρων, θ .

Το σχήμα που περιγράφηκε παραπάνω προϋποθέτει ότι η διαχείριση του υδροσυστήματος είναι εκ των προτέρων καθορισμένη, είναι δηλαδή γνωστές οι τιμές του διανύσματος θ . Εναλλακτικά, οι διαχειριστικές παράμετροι εκτιμώνται μέσω βελτιστοποίησης. Η *βελτιστοποίηση* (optimisation) είναι μια υπολογιστική διαδικασία συστηματικής αναζήτησης των μεταβλητών μιας πραγματικής συνάρτησης, η οποία καλείται *αντικειμενική συνάρτηση* (objective function) και εκφράζει την επίδοση του συστήματος. Στην περίπτωση του μοντέλου λειτουργικής προσομοίωσης υδροσυστημάτων, αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης ταυτίζεται με το μέτρο επίδοσης, J , ενώ μεταβλητές της συνάρτησης είναι οι παράμετροι θ .

Το παρόν τεύχος εστιάζεται στην αναλυτική περιγραφή της δεύτερης συνιστώσας του σχήματος στοχαστικής προσομοίωσης, ήτοι του μοντέλου λειτουργικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης υδροσυστημάτων, το οποίο υλοποιήθηκε μέσω του υπολογιστικού συστήματος *Υδρονομέας*. Η πρώτη συνιστώσα, ήτοι στο στοχαστικό υδρολογικό μοντέλο που υλοποιήθηκε μέσω του υπολογιστικού συστήματος *Κασταλία*, αποτελεί αντικείμενο άλλου τεύχους (*Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2003*).

2.1.5 Τύποι προσομοίωσης – Η έννοια της στοχαστικής πρόγνωσης

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2.1.4, το μέτρο επίδοσης ενός συστήματος υδατικών πόρων, εκτιμώμενο με την μέθοδο της στοχαστικής προσομοίωσης, εξαρτάται από τρεις παράγοντες: (α) τις παραμέτρους του στοχαστικού μοντέλου, μ , (β) τα χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος, λ , και (γ) τις διαχειριστικές παραμέτρους, θ . Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, οι παράμετροι μ προκύπτουν συναρτήσει του ιστορικού δείγματος, X . Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η ακρίβεια και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της στοχαστικής προσομοίωσης είναι άμεσα εξαρτώμενη από την ποσότητα καθώς και ποιότητα της διαθέσιμης υδρολογικής πληροφορίας.

Σε μελέτες σχεδιασμού ή στρατηγικής διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων, όπου ζητούμενο είναι η αποτίμηση της μακροχρόνιας επίδοσης του συστήματος, η εν λόγω επίδοση θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες εκκίνησης του μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης, ήτοι το αρχικό καθεστώς υδροφορίας και αποθεμάτων. Επιπλέον, όλα τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου του συστήματος, όπως η διάταξη και τα χαρακτηριστικά των έργων και η ετήσια ζήτηση νερού, θεωρούνται σταθερά και ανεξάρτητα του χρόνου. Ο τύπος αυτός της προσομοίωσης ονομάζεται *μόνιμης κατάστασης* (steady-state). Κατά την προσομοίωση μόνιμης κατάστασης, οι επιμέρους σειρές εισροών μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμα μιας μεμονωμένης χρονοσειράς μεγάλου (θεωρητικά άπειρου) μήκους.

Αντίθετα, η επιχειρησιακή διαχείριση ενός υδροσυστήματος, ήτοι η διαχείρισή του σε πραγματικό χρόνο, επιβάλλει την ενσωμάτωση των αρχικών συνθηκών στο μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης. Στην περίπτωση αυτή, η βραχυχρόνια και πιθανόν μεσοπρόθεσμη επίδοση του συστήματος ενδέχεται να εξαρτάται καθοριστικά τόσο από το επίκαιρο καθεστώς υδροφορίας όσο και από τα επίκαιρα αποθέματα νερού. Επιπλέον, οι παράμετροι του υδροσυστήματος είναι συνήθως μεταβαλλόμενες στον χρόνο, λόγω της βλάβης ή της ένταξης νέων έργων στο σύστημα, της εισαγωγής νέων περιορισμών, της αύξησης της ζήτησης, κλπ. Στην περίπτωση αυτή ακολουθείται μια διαφορετική προσέγγιση, με εφαρμογή μιας διαδικασίας που ονομάζεται *καταληκτική* (terminating) προσομοίωση (Winston, 1994, σ. 1220). Στην καταληκτική προσομοίωση, παράγονται πολλές αλλά μικρού, κατά κανόνα, μήκους σειρές εισροών, με κατάλληλη προσαρμογή του στοχαστικού μοντέλου ώστε να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων αλλά και την ακολουθία των ιστορικών τιμών, και ιδιαίτερα των πλέον πρόσφατων. Η λειτουργία αυτή του μοντέλου ονομάζεται *στοχαστική πρόγνωση*. Στην συνέχεια, επαναλαμβάνεται το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης με διαφορετικό κάθε φορά σενάριο εισροών, αλλά με τις ίδιες αρχικές συνθήκες αποθεμάτων, τις ίδιες συνθήκες μεταβολής παραμέτρων (εφόσον το σύστημα χαρακτηρίζεται από μη στασιμότητα), και την ίδια συνθήκη τερματισμού (χρονικός ορίζοντας ελέγχου).

2.2 Μεθοδολογικό πλαίσιο βέλτιστης διαχείρισης υδροσυστημάτων

2.2.1 Η έννοια της ολοκληρωμένης διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων

Ο βέλτιστος έλεγχος ενός υδροσυστήματος, και ειδικότερα ενός υδροσυστήματος μεγάλης κλίμακας, προϋποθέτει ολιστική προσέγγιση, με στόχο την ποσοτικά αξιόπιστη, ποιοτικά και περιβαλλοντικά ασφαλή, και οικονομικά πρόσφορη κάλυψη των υδατικών αναγκών, μέσω κατάλληλης αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων. Οι επιζητούμενοι τρόποι διαχείρισης πρέπει να χαρακτηρίζονται από ορθολογικότητα, δηλαδή να είναι επιστημονικά θεμελιωμένοι, αποδοτικότητα, δηλαδή να αξιοποιούν τους υδατικούς πόρους στο μέγιστο δυνατό βαθμό, και βιωσιμότητα, δηλαδή να μην δημιουργούν πρόβλημα εξάντλησης των υδατικών πόρων στο μέλλον για την κάλυψη των σημερινών αναγκών.

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις, υλοποιήθηκε ένα γενικευμένο μεθοδολογικό πλαίσιο διαχείρισης πολύπλοκων συστημάτων υδατικών πόρων, όπως είναι το σύστημα υδροδότησης της Αθήνας. Το εν λόγω πλαίσιο βασίζεται σε πρωτότυπη ερευνητική εργασία, που έχει ή πρόκειται να δημοσιευτεί σε κορυφαία επιστημονικά περιοδικά (*Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997· Koutsoyiannis et al., 2002· Koutsoyiannis and Economou, 2003· Koutsoyiannis et al., 2003· Efstratiadis et al., 2003*). Στόχος του είναι αφενός η ακριβής αναπαράσταση των βασικών διεργασιών που σχετίζονται με την λειτουργία ενός συστήματος υδατικών πόρων και αφετέρου η εύρεση πρόσφορων πολιτικών διαχείρισης, που βελτιστοποιούν την επίδοση του συστήματος.

Στην παρούσα ενότητα εισάγεται το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου συστημάτων ταμιευτήρων και περιγράφεται το γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε, το οποίο βασίζεται στο πρότυπο σχήμα *παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση*. Λεπτομέρειες σχετικά με τις επιμέρους συνιστώσες του εν λόγω σχήματος δίνονται στα επόμενα εδάφια.

2.2.2 Τοποθέτηση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου υδροσυστημάτων

Έστω σύστημα υδατικών πόρων αποτελούμενο από ταμιευτήρες και αγωγούς μεταφοράς νερού, του οποίου αναζητείται η βέλτιστη πολιτική διαχείρισης. Το σύστημα θεωρείται ότι εξυπηρετεί πολλαπλές χρήσεις ύδατος, όπως ύδρευση, άρδευση, παραγωγή ενέργειας, περιβαλλοντική διατήρηση, αντιπλημμυρική προστασία κλπ. Οι ταμιευτήρες συνδέονται είτε εν σειρά είτε παράλληλα, διαμορφώνοντας ένα δίκτυο οποιασδήποτε τοπολογίας.

Η δυναμική του συστήματος περιγράφεται από τις εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου, οι οποίες διατυπώνονται σε όλα τα σημεία ελέγχου (κόμβοι και ταμιευτήρες). Στην γενική περίπτωση, αυτές διατυπώνονται ως διαφορικές εξισώσεις της μορφής:

$$\frac{ds(t)}{dt} = i'(t) - r'(t) \quad (2.5)$$

όπου $s(t)$ το απόθεμα, $i'(t)$ ο ρυθμός μεταβολής των υδρολογικών εισροών και $r'(t)$ ο ρυθμός μεταβολής των ρυθμιζόμενων εκροών (απολήψεων) ύδατος. Επισημαίνεται ότι τα μεγέθη $i'(t)$ και $r'(t)$ εκφράζονται σε μονάδες παροχής. Για πρακτικούς λόγους, η εξίσωση ισοζυγίου διατυπώνεται σε διακριτή μορφή, χωρίζοντας τον χρονικό ορίζοντα ελέγχου σε ισομήκη διαστήματα Δt . Σε συνήθη προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων, το διάστημα Δt αντιστοιχεί σε έναν μήνα. Με βάση τα παραπάνω, η εξίσωση ισοζυγίου γράφεται:

$$s(t+1) = s(t) + i(t) - r(t) \quad (2.6)$$

όπου, πλέον, οι εισροές $i(t)$ και οι εκροές $r(t)$ εκφράζονται σε μονάδες όγκου. Για δεδομένες χρονοσειρές εισροών και απωλειών και δεδομένη αρχική αποθήκευση, $s(0)$, ο άγνωστος της εξίσωσης ισοζυγίου είναι η απόληψη, $r(t)$. Συνεπώς, αν n είναι το πλήθος των ταμιευτήρων και T το πλήθος των χρονικών βημάτων, τότε οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος είναι $n \times T$. Επιπλέον, αν υπάρχουν εναλλακτικές διαδρομές νερού από τις πηγές (ταμιευτήρες) στις θέσεις ζήτησης νερού, τότε προκύπτουν περαιτέρω βαθμοί ελευθερίας, που σχετίζονται με την κατανομή των απολήψεων στο δίκτυο των υδραγωγείων σε κάθε χρονικό βήμα, t .

Το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος περιλαμβάνει και δύο κατηγορίες περιορισμών, και συγκεκριμένα:

- *φυσικούς περιορισμούς*, οι οποίοι προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τεχνικών έργων (ελάχιστη στάθμη υδροληψίας και χωρητικότητα ταμιευτήρων, παροχετευτικότητα υδραγωγείων, εγκατεστημένη ισχύς στροβίλων και αντλιοστασίων κλπ)·
- *λειτουργικούς περιορισμούς ή αλλιώς στόχους*, οι οποίοι επιβάλλονται από τον αρμόδιο φορέα και σχετίζονται με τις χρήσεις του νερού και την διαχείριση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Στους φυσικούς περιορισμούς του συστήματος μπορούν να ενταχθούν και οι εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου, ως περιορισμοί τύπου ισότητας. Από μαθηματική σκοπιά, οι φυσικοί περιορισμοί είναι *δεσμευτικοί*, επιβάλλεται δηλαδή να τηρούνται πάντοτε από το μοντέλο. Αντίθετα, οι λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος δεν μπορούν να είναι δεσμευτικοί. Δεδομένου ότι οι υδρολογικές εισροές είναι, έστω και μερικώς, μη ελεγχόμενες και συνεπώς τυχαίες, οι αποφάσεις που σχετίζονται με την ικανοποίηση των εν λόγω περιορισμών, ήτοι οι απολήψεις, είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές. Κατά συνέπεια, οι σχετικοί περιορισμοί ικανοποιούνται όχι στο σύνολο του χρονικού ορίζοντα ελέγχου αλλά σε ένα ποσοστό αυτού, το οποίο αποτελεί μέτρο της *αξιοπιστίας* επίτευξης του συγκεκριμένου στόχου (ReVelle, 1999, σ. 116-118).

Στο σύστημα ορίζεται ένα μέτρο επίδοσης, μέσω του οποίου αξιολογείται η διαχείρισή του. Το μέτρο επίδοσης μπορεί να θεωρηθεί ως η αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης (βλ. 2.1.4). Μεταβλητές ελέγχου της συνάρτησης είναι οι άγνωστες παράμετροι της διαχείρισης, ήτοι οι απολήψεις και η κατανομή τους στο δίκτυο, σε κάθε χρονικό βήμα. Η αντικειμενική συνάρτηση, που σημειωτέον είναι μη γραμμική ως προς τις μεταβλητές ελέγχου, μαζί με τους φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς, συνιστούν το μοντέλο βέλτιστου ελέγχου του υδροσυστήματος.

2.2.3 Αντιμετώπιση του προβλήματος με τεχνικές βελτιστοποίησης

Θεωρητικά, το μοντέλο βέλτιστου ελέγχου που περιγράφηκε παραπάνω προϋποθέτει την αναλυτική διατύπωση των εξισώσεων ισοζυγίου και των περιορισμών για κάθε χρονικό βήμα. Στην πράξη, η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος με μεθόδους μη γραμμικής βελτιστοποίησης είναι αδύνατη, εξαιτίας της λεγόμενης *κατάρας της διαστατικότητας* (curse of dimensionality), ήτοι της εκθετικής αύξησης του υπολογιστικού φόρτου με την αύξηση του πλήθους των μεταβλητών ελέγχου και περιορισμών. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, τόσο οι μεταβλητές ελέγχου όσο και οι περιορισμοί είναι ανάλογοι του χρονικού ορίζοντα της προσομοίωσης. Από την άλλη πλευρά, ο εν λόγω χρονικός ορίζοντας είναι αναγκαστικά πολύ μεγάλος, δεδομένου ότι για την εκτίμηση της αξιοπιστίας απαιτείται η χρήση συνθετικών χρονοσειρών της τάξης των χιλιάδων ετών. Συνδυάζοντας τα παραπάνω προκύπτει ότι η διάσταση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι της τάξης των εκατοντάδων χιλιάδων ή ακόμη και εκατομμυρίων.

Μια εναλλακτική, πολυδιάστατη πάντοτε, προσέγγιση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου υδροσυστημάτων είναι η χρήση τυπικών μεθόδων *ανάλυσης συστημάτων*, όπως τεχνικές γραμμικού, δυναμικού ή στοχαστικού δυναμικού προγραμματισμού (Loucks et al., 1981· Mays and Tung, 1996). Πρόκειται για ειδικά διατυπωμένα μοντέλα βελτιστοποίησης, που επειδή επιλύονται αναλυτικά, απαιτούν πολύ μικρότερο υπολογιστικό φόρτο σε σχέση με την μη γραμμική προσέγγιση. Ωστόσο, η εφαρμογή τους προϋποθέτει σημαντικές απλοποιήσεις στην μαθηματική περιγραφή του προβλήματος, όπως γραμμικοποίηση των εξισώσεων δυναμικής ή διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού των παραμέτρων, με αποτέλεσμα να προκύπτουν λύσεις μειωμένης ακρίβειας.

Εκτός από τις υπολογιστικές ή τεχνικές δυσχέρειες, ένα εξαιρετικά σημαντικό μειονέκτημα όλων των παραπάνω προσεγγίσεων είναι η εξάρτηση της βέλτιστης λύσης από τις τιμές των εισροών. Με άλλα λόγια, ένα μοντέλο βελτιστοποίησης με μεταβλητές ελέγχου τις απολήψεις λαμβάνει αποφάσεις με βάση την ακολουθία των μελλοντικών εισροών, που είναι προφανώς αβέβαιη. Συνεπώς, η εν λόγω προσέγγιση οδηγεί σε *υπερεκτίμηση* της επίδοσης του συστήματος, καθώς καμία πολιτική διαχείρισης δεν μπορεί να πετύχει αντίστοιχη επίδοση εξαιτίας της υδρολογικής αβεβαιότητας, ήτοι της ατελούς γνώσης των μελλοντικών εισροών.

2.2.4 Προσομοίωση υδροσυστημάτων με χρήση κανόνων λειτουργίας

Πολλοί ερευνητές συμφωνούν ότι η τεχνική της προσομοίωσης εξακολουθεί να θεωρείται η πλέον κατάλληλη για μελέτες σχεδιασμού και διαχείρισης υδατικών πόρων (Lund and Guzman, 1999). Γενικά, τα μοντέλα προσομοίωσης επιτρέπουν πολύ πιο ακριβή αναπαράσταση της διαχείρισης ενός πραγματικού συστήματος σε σχέση με τα μοντέλα βελτιστοποίησης, καθώς δεν τίθενται περιορισμοί ως προς την διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος (Loucks and Sigvaldason, 1982). Επιπλέον, μπορούν εύκολα να κάνουν χρήση συνθετικών χρονοσειρών εισροών, κάτι που, όπως προαναφέρθηκε, σε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης θεωρείται ανέφικτο εξαιτίας της κατάρας των διαστάσεων (Loucks et al., 1981, p. 277).

Τα μοντέλα προσομοίωσης προϋποθέτουν εκ των προτέρων προσδιορισμό του τρόπου διαχείρισης των απολήψεων και της κατανομής τους στο δίκτυο, κάτι που συνήθως γίνεται μέσω κανόνων λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό, το πρόβλημα παύει να έχει βαθμούς ελευθερίας και συνεπώς δεν υπάρχει δυνατότητα βελτιστοποίησης.

Ως κανόνας λειτουργίας (operation rule) νοείται ένα σύνολο εξισώσεων ή απλών νομογραφημάτων που καθορίζουν την κατανομή των υδατικών πόρων συναρτήσει της επίκαιρης κατάστασης και των παραμέτρων του συστήματος (ReVelle, 1999, p. 14). Συνήθως, οι κανόνες λειτουργίας διατυπώνονται με την μορφή εμπειρικών ή ευρετικών σχέσεων υπολογισμού των επιθυμητών απολήψεων από τους ταμιευτήρες, συναρτήσει των διαθέσιμων αποθεμάτων και της ζήτησης νερού (Johnson et al., 1993· Oliveira and Loucks, 1997· Lund and Guzman, 1999). Η γενική τους μορφή είναι:

$$\mathbf{r}^*(t) = \mathbf{g}(\mathbf{s}(t), d(t), \lambda) \quad (2.7)$$

όπου $\mathbf{r}^*(t)$ το διάνυσμα των επιθυμητών απολήψεων από τους ταμιευτήρες του συστήματος κατά το χρονικό βήμα t , $\mathbf{s}(t)$ το διάνυσμα των επίκαιρων αποθεμάτων, $d(t)$ η ζήτηση νερού και λ χαρακτηριστικά μεγέθη του υδροσυστήματος, που σχετίζονται με τη διαχείριση των ταμιευτήρων (π.χ. νεκρός όγκος, αποθηκευτική ικανότητα).

Για απλά συστήματα ταμιευτήρων, όπως ταμιευτήρες σειριακής ή παράλληλης διάταξης, και χωρίς περιορισμούς όσον αφορά το δίκτυο των υδραγωγείων, υπάρχουν κανόνες λειτουργίας που είναι θεωρητικά βέλτιστοι. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι ο λεγόμενος κανόνας της Νέας Υόρκης (Clark, 1950, 1956) και ο παρεμφερής του χωρικός κανόνας (Bower et al., 1962), που υποθέτει ότι τα επιθυμητά αποθέματα των ταμιευτήρων κατανέμονται με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα υπερχειλίσεως. Κατά τη περίοδο υψηλής υδροφορίας (περίοδος φόρτισης ταμιευτήρων) μπορεί να επιτευχθεί περιορισμός των ανεπιθύμητων υπερχειλίσεων, εφόσον διατηρείται χαμηλό το απόθεμα των ταμιευτήρων με τις μεγαλύτερες αναμενόμενες εισροές. Ο χωρικός κανόνας ορίζει σταθερό λόγο ελεύθερου όγκου ταμιευτήρα και αθροιστικών εισροών κατά τη διάρκεια του υδρολογικού κύκλου. Η μαθηματική του διατύπωση είναι:

$$\frac{k_i - s_i^*}{E[Q_i]} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i - s}{\sum_{i=1}^n E[Q_i]} \quad (2.8)$$

όπου s_i^* το επιθυμητό απόθεμα του ταμιευτήρα i , k_i η αποθηκευτική ικανότητα του εν λόγω ταμιευτήρα, $E[Q_i]$ η αναμενόμενη (μέση) καθαρή εισροή στον ταμιευτήρα από το τέλος της τρέχουσας περιόδου μέχρι το τέλος της περιόδου πλήρωσης, s το συνολικό ωφέλιμο απόθεμα του συστήματος (δηλαδή το άθροισμα των s_i^*), και n το πλήθος των ταμιευτήρων. Συνεπώς, ο χωρικός κανόνας επιβάλλει να αφήνεται ελεύθερο περιθώριο στους ταμιευτήρες που είναι ανάλογο των αναμενόμενων εισροών.

Τονίζεται ότι οι κανόνες λειτουργίας αναφέρονται πάντοτε σε *επιθυμητά* και όχι σε πραγματικά μεγέθη απολήψεων. Με τον τρόπο αυτόν, δεν επιβάλλονται περιορισμοί στο μαθηματικό μοντέλο του υδροσυστήματος, καθώς ο χειρισμός των τελευταίων γίνεται μέσω της διαδικασίας προσομοίωσης. Από την άλλη πλευρά, σε ένα σύστημα ταμειυτήρων πολύπλοκης τοπολογίας, η εφαρμογή ενός συγκεκριμένου κανόνα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των πραγματικών και θεωρητικών (επιθυμητών) μεγεθών, κάτι που καθιστά την χρήση του κανόνα μη πρακτική για τον διαχειριστή του συστήματος. Όπως προαναφέρθηκε, οι εμπειρικοί κανόνες έχουν διαμορφωθεί με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, π.χ. την ελαχιστοποίηση των υπερχειλίσεων. Σε άλλα υδροσυστήματα, τα κριτήρια διαχείρισης μπορεί να διαφέρουν, οπότε δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της βέλτιστης πολιτικής διαχείρισης. Αναγκαστικά λοιπόν, στα μοντέλα προσομοίωσης, χρησιμοποιούνται προκαθορισμένοι εμπειρικοί κανόνες από ένα μικρό σχετικά φάσμα διαθέσιμων επιλογών, που δεν ανταποκρίνονται πλήρως στις ιδιαιτερότητες του συγκεκριμένου προβλήματος και οδηγούν, συνεπώς, σε *υποεκτίμηση* της επίδοσης του συστήματος.

2.2.5 Το μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση

Το σχήμα παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση είναι μια γενική μεθοδολογία αντιμετώπισης προβλημάτων βέλτιστου ελέγχου υδροσυστημάτων, που παρουσιάζει σημαντικά θεωρητικά, τεχνικά και πρακτικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών τεχνικών που αναφέρθηκαν στα εδάφια 2.2.3 και 2.2.4 (Οικονόμου, 2000· Koutsogiannis and Economou, 2003). Η κεντρική ιδέα συνίσταται στην παραμετρική διατύπωση των κανόνων διαχείρισης των υδροσυστημάτων, ώστε να περιορίζεται δραστικά το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του μοντέλου, χωρίς ωστόσο να μηδενίζεται. Με τον τρόπο αυτό, επιδιώκεται η σύζευξη των μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, ώστε να επιτυγχάνεται ακριβής αναπαράσταση της λειτουργίας του συστήματος και να εντοπίζεται η αντικειμενικά καλύτερη πολιτική διαχείρισης, με λογικό υπολογιστικό φόρτο.

Το μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση, το διάγραμμα ροής του οποίου απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2, περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1ο: Ορίζονται τα δεδομένα εισόδου του μαθηματικού μοντέλου του υδροσυστήματος, δηλαδή η δομή του συστήματος (συνιστώσες δικτύου, διάταξη αυτών και χαρακτηριστικά τους μεγέθη), οι λειτουργικοί στόχοι, το μέτρο επίδοσης του συστήματος και οι χρονοσειρές εισροών. Οι τελευταίες είτε είναι οι ιστορικές είτε συνθετικές, οπότε γεννώνται μέσω ενός στοχαστικού μοντέλου που αναπαράγει τα στατιστικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων ιστορικών δειγμάτων. Η παραπάνω διαδικασία είναι γνωστή και ως *σχηματοποίηση* του υδροσυστήματος.

Βήμα 2ο: Ορίζονται οι κανόνες λειτουργίας που περιγράφουν την διαχείριση του υδροσυστήματος, οι οποίοι διατυπώνονται στην μορφή:

$$\mathbf{r}^*(t) = \mathbf{g}(\mathbf{s}(t), d(t), \lambda, \boldsymbol{\theta}) \quad (2.9)$$

όπου $\boldsymbol{\theta}$ διάνυσμα παραμέτρων, που ορίζουν τη μαθηματική μορφή των κανόνων. Τονίζεται ότι το μέγεθος του διανύσματος $\boldsymbol{\theta}$, ήτοι το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος, θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν μικρό, έτσι ώστε να διευκολύνεται η υπολογιστική διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης.

Βήμα 3ο: Ορίζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης, με αντικειμενική συνάρτηση το μέτρο επίδοσης του συστήματος και μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους, $\boldsymbol{\theta}$, των κανόνων λειτουργίας. Επιπλέον, διατυπώνονται μαθηματικοί περιορισμοί συναρτήσει των χαρακτηριστικών μεγεθών του συστήματος και των στόχων που έχει θέσει ο χρήστης, χωρίς ωστόσο να εισάγονται στο μοντέλο βελτιστοποίησης.

Βήμα 4ο: Για δεδομένη διαχειριστική πολιτική, ήτοι δεδομένες τιμές παραμέτρων, καλείται το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης που επιλύει το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος, ήτοι τις

εξισώσεις δυναμικής και τους μαθηματικούς περιορισμούς, για το σύνολο του ορίζοντα ελέγχου. Η επίλυση γίνεται βήμα προς βήμα, διατυπώνοντας κάθε φορά το εν λόγω μοντέλο ως πρόβλημα δικτυακής βελτιστοποίησης. Με τον τρόπο αυτό, η υπολογιστική διαδικασία επιταχύνεται σημαντικά, καθώς η επίλυση γίνεται με αναλυτικές τεχνικές, όπως ο αλγόριθμος simplex. Έξοδος του μοντέλου είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, ήτοι η επίδοση του συστήματος έναντι της συγκεκριμένης διαχειριστικής πολιτικής. Για την μεγιστοποίηση του μέτρου επίδοσης, εισάγεται μια εξωτερική διαδικασία βελτιστοποίησης, σε κάθε δοκιμή της οποίας ορίζονται νέες τιμές παραμέτρων, βάσει των οποίων επαναλαμβάνεται η προσομοίωση του συστήματος. Η διαδικασία σταματά όταν επέλθει σύγκλιση στην βέλτιστη λύση. Επειδή το μοντέλο βελτιστοποίησης είναι έντονα μη γραμμικό, αντιμετωπίζεται με εξελιγμένες υπολογιστικές μεθόδους.

Βήμα 5ο: Εντοπίζεται η βέλτιστη λύση του προβλήματος, που περιλαμβάνει τους κανόνες λειτουργίας και ένα πλήθος πληροφοριών που αναφέρονται στην εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας των λειτουργικών περιορισμών και την πρόγνωση των μεταβλητών του υδροσυστήματος.

Βήμα 6ο: Τα αποτελέσματα της βέλτιστης λύσης αξιοποιούνται από τους αρμόδιους φορείς για την λήψη αποφάσεων, τόσο σε επίπεδο στρατηγικού σχεδιασμού όσο και επιχειρησιακής διαχείρισης. Εφόσον αυτό κρίνεται αναγκαίο, επαναλαμβάνεται η όλη διαδικασία με τροποποίηση τόσο των δεδομένων εισόδου του μοντέλου όσο και των κριτηρίων βελτιστοποίησης.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ροής μεθοδολογικού σχήματος παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση.

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

- Με την παραμετροποίηση του μαθηματικού μοντέλου του υδροσυστήματος επιτυγχάνεται δραστικός περιορισμός του πλήθους των βαθμών ελευθερίας, και κατά συνέπεια μειώνεται ο υπολογιστικός φόρτος της διαδικασίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης σε εφικτά επίπεδα.
- Οι μαθηματικοί περιορισμοί του συστήματος, φυσικοί και λειτουργικοί, όσοι και αν είναι, αντιμετωπίζονται σχεδόν αποκλειστικά μέσω της προσομοίωσης. Κατά συνέπεια, το πρόβλημα

βελτιστοποίησης της επίδοσης του συστήματος διατυπώνεται χωρίς πολλούς περιορισμούς, κάτι που διευκολύνει σημαντικά την επίλυσή του.

- Η δραστική μείωση του υπολογιστικού φόρτου επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου στοχαστικής προσομοίωσης, ήτοι την χρήση συνθετικών χρονοσειρών μεγάλου μήκους, κάτι που αποτελεί προϋπόθεση για την εκτίμηση της αξιοπιστίας του υδροσυστήματος με ικανοποιητική ακρίβεια.
- Επειδή ζητούμενο του προβλήματος είναι οι βελτιστοποιημένοι κανόνες λειτουργίας του συστήματος, που εξαρτώνται μόνο από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των εισροών, και όχι οι βήμα προς βήμα απολήψεις, που εξαρτώνται από την ακολουθία των εισροών, η διαχείριση του υδροσυστήματος μπορεί να γίνεται βάσει των συγκεκριμένων κανόνων, χωρίς να απαιτείται επικαιροποίηση του μοντέλου, εφόσον δεν μεταβάλλονται ουσιαστικά οι συνθήκες λειτουργίας του υδροσυστήματος.

Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφεται αναλυτικά η υλοποίηση του μεθοδολογικού σχήματος παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση στο μοντέλο που αναπτύχθηκε για την υποστήριξη της διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας.

2.3 Συνιστώσες υδροσυστήματος

2.3.1 Σχηματοποίηση μοντέλου υδροσυστήματος

Σχηματοποίηση καλείται η διαδικασία μετασχηματισμού των συνιστωσών του φυσικού συστήματος σε συνιστώσες του μοντέλου προσομοίωσης. Η εν λόγω διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Karavokiros et al., 2002):

Αφαίρεση: Η αφαίρεση έχει ως στόχο τον περιορισμό της πολυπλοκότητας του φυσικού συστήματος, ώστε να λαμβάνονται υπόψη μόνο τα απολύτως αναγκαία στοιχεία ή συνιστώσες που αφορούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Προφανώς, το επίπεδο λεπτομέρειας που επιλέγεται εξαρτάται από την φύση του προβλήματος που εξετάζεται. Για παράδειγμα, στο υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας δεν ενδιαφέρουν οι συνιστώσες εκείνες που αναφέρονται στη διανομή του νερού.

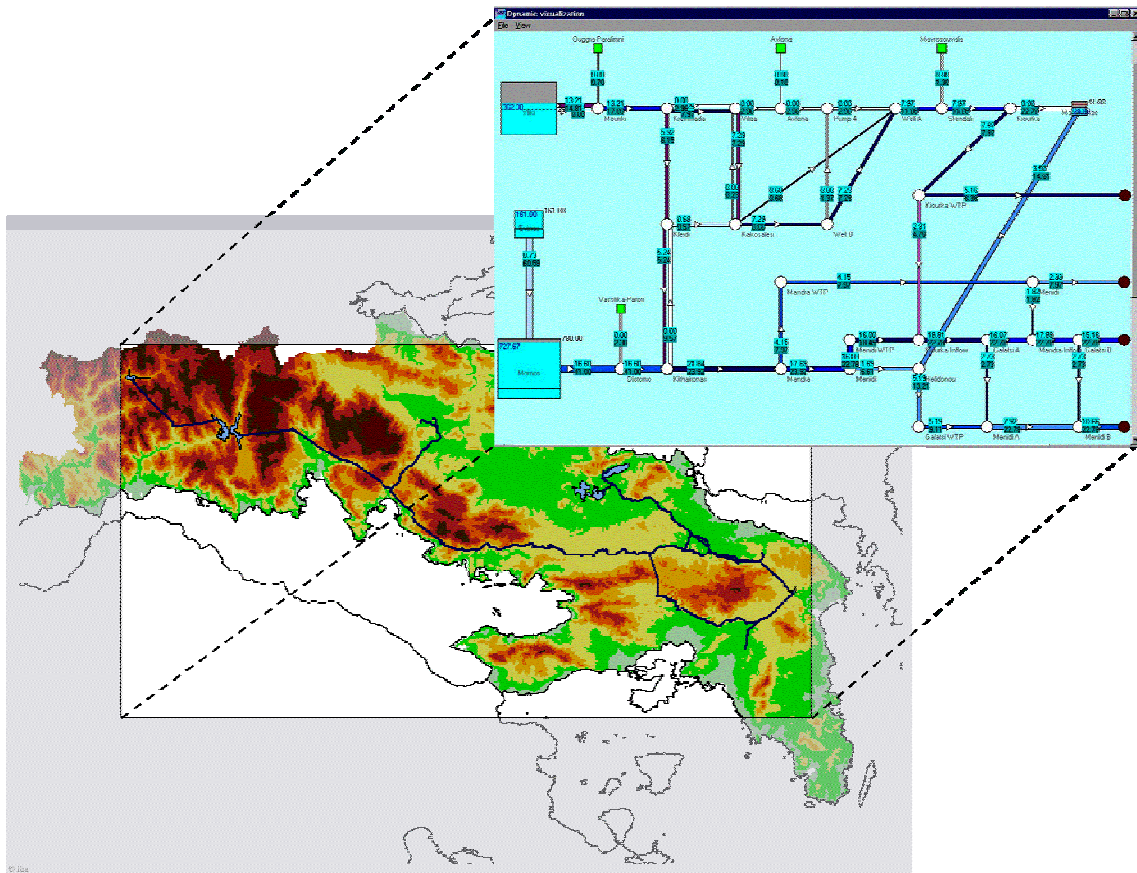
Τυποποίηση: Η τυποποίηση έχει ως στόχο την ενοποίηση στοιχείων με παρόμοια χαρακτηριστικά σε εννοιολογικά αντικείμενα (συνιστώσες) του μαθηματικού μοντέλου που έχουν κοινές ιδιότητες. Για παράδειγμα, φυσικά υδατορεύματα, αγωγοί με βαρύτητα και καταθλιπτικοί αγωγοί μπορούν να θεωρηθούν ως ένα αντικείμενο, ήτοι στοιχεία μεταφοράς νερού.

Απλοποίηση: Η απλοποίηση συνίσταται στην σύμπτυξη περισσότερων συνιστωσών του συστήματος σε μία, εφόσον οι επιμέρους διαφορές στα χαρακτηριστικά τους δεν επηρεάζουν την λειτουργία του μοντέλου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η θεώρηση των εκατοντάδων κλάδων του καναλιού του Μόρνου ως ένα μοναδικό υδραγωγείο, με παροχευτικότητα ίση με την ελάχιστη των επιμέρους τμημάτων του.

Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται η σχηματοποίηση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, και πιο συγκεκριμένα η διάταξη των συνιστωσών του δικτύου, μέσω του *Υδρονομέα*. Οι συνιστώσες που υποστηρίζει το πρόγραμμα και υλοποιήθηκαν στο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι:

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

Στη συνέχεια, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη και οι εξισώσεις κάθε συνιστώσας του υδροσυστήματος.



Σχήμα 2.3: Παράδειγμα σχηματοποίησης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας.

2.3.2 Κόμβοι

Ως *κόμβος* νοείται η εννοιολογική οντότητα που αντιπροσωπεύει ένα σημείο του δικτύου, χωρίς δυνατότητα προσφοράς ή αποθήκευσης νερού. Έστω ο κόμβος i , στον οποίον συντρέχουν m υδραγωγεία. Η εξίσωση δυναμικής σε κάθε χρονικό βήμα t γράφεται ως:

$$\sum_j [1 - \delta_{ji}(t)] q_{ji}(t) - \sum_j q_{ij}(t) - w_i(t) = 0 \quad (2.10)$$

όπου $q_{ji}(t)$ ο όγκος νερού που εξέρχεται από τον ανάντη κόμβο j με κατεύθυνση προς τον κόμβο i , $\delta_{ji}(t)$ συντελεστής γραμμικών απωλειών παροχής κατά τη διαδρομή $j \rightarrow i$ (βλ. 2.3.5), $q_{ij}(t)$ ο όγκος νερού που εξέρχεται από τον κόμβο i με κατεύθυνση τον κατάντη κόμβο j , και $w_i(t)$ η απώληση νερού, που έχει νόημα μόνο εφόσον ο κόμβος αντιπροσωπεύει θέση ζήτησης. Χαρακτηριστικό μέγεθος του κόμβου είναι το απόλυτο υψόμετρο, z_i , που είναι, προφανώς, σταθερό.

2.3.3 Ταμιευτήρες

Ως *ταμιευτήρας* νοείται το εννοιολογικό αντικείμενο που αντιπροσωπεύει ένα τεχνικό έργο αποθήκευσης επιφανειακών υδατικών πόρων με επαρκή χωρητικότητα, ώστε να επιτυγχάνεται ρύθμιση της ροής για χρονικό ορίζοντα μεγαλύτερο του μήνα, που είναι και η συμβατική χρονική διακριτότητα του μοντέλου προσομοίωσης.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των ταμιευτήρων είναι:

- η σχέση στάθμης-αποθέματος $s_i = f_1(z_i)$, που κατασκευάζεται με λογαριθμική παρεμβολή μεταξύ γνωστών ζευγών τιμών (z_i, s_i) .
- η σχέση στάθμης-επιφάνειας $a_i = f_2(z_i)$, που κατασκευάζεται με λογαριθμική παρεμβολή μεταξύ γνωστών ζευγών τιμών (z_i, a_i) .
- η κατώτατη και ανώτατη στάθμη υδροληψίας, z_i^{\min} και z_i^{\max} , αντίστοιχα.

Παράγωγα μεγέθη των δύο τελευταίων είναι ο νεκρός όγκος, dn_i , και η αποθηκευτική ικανότητα, k_i , που προκύπτουν άμεσα από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} dn_i &= f_1(z_i^{\min}) \\ k_i &= f_1(z_i^{\max}) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Σημειώνεται ότι η ποσότητα $k_i - dn_i$ καλείται *ωφέλιμη χωρητικότητα*, και εκφράζει τον μέγιστο αξιοποιήσιμο όγκο νερού του ταμιευτήρα. Ομοίως, η ποσότητα $s_i - dn_i$ καλείται *ωφέλιμο απόθεμα*, και εκφράζει τον επίκαιρο αξιοποιήσιμο όγκο νερού.

Στο μαθηματικό μοντέλο του συστήματος, η δυναμική κάθε ταμιευτήρα i σε κάθε χρονικό βήμα t περιγράφεται από την εξίσωση υδατικού ισοζυγίου, που γράφεται ως:

$$s_i(t+1) = \max \{ \min [k_i, s_i(t) + i_i(t) - r_i(t)], 0 \} \quad (2.12)$$

όπου $s_i(t)$ το απόθεμα στην αρχή του χρονικού βήματος t , $s_i(t+1)$ το απόθεμα το τέλος του χρονικού βήματος t , $i_i(t)$ οι καθαρές υδρολογικές εισροές, και $r_i(t)$ οι καθαρές απολήψεις.

Οι καθαρές υδρολογικές εισροές περιλαμβάνουν την απορροή της ανάντη υπολεκάνης, $q_i(t)$, και την βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, $p_i(t)$, μείον την εξάτμιση, $e_i(t)$, και τις υπόγειες διαφυγές, $l_i(t)$, ήτοι:

$$i_i(t) = q_i(t) + p_i(t) - e_i(t) - l_i(t) \quad (2.13)$$

Τα δεδομένα απορροής, βροχόπτωσης και εξάτμισης θεωρούνται γνωστά, και εισάγονται στο μοντέλο με την μορφή χρονοσειρών ισοδύναμων υψών νερού και ανάγονται σε όγκους μέσω των σχέσεων:

$$\begin{aligned} q_i(t) &= \tilde{q}_i(t) [a_i^0 - a_i(t)] \\ p_i(t) &= \tilde{p}_i(t) a_i(t) \\ e_i(t) &= \tilde{e}_i(t) a_i(t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

όπου $\tilde{q}_i(t)$ το ύψος απορροής της ανάντη υπολεκάνης, $\tilde{p}_i(t)$ το ύψος βροχόπτωσης, $\tilde{e}_i(t)$ το ύψος εξάτμισης, $a_i(t)$ το εμβαδόν της επιφάνειας του ταμιευτήρα στην αρχή του χρονικού βήματος και a_i^0 η έκταση της ανάντη του φράγματος υπολεκάνης.

Οι υπόγειες διαφυγές, οι οποίες περιλαμβάνουν τις πάσης φύσεως απώλειες νερού από τον πυθμένα, τα πρανή και το φράγμα, θεωρούνται συνάρτηση της στάθμης του ταμιευτήρα στην αρχή του χρονικού βήματος, $z_i(t)$, και εκτιμώνται μέσω μιας πολυωνυμικής εξίσωσης της μορφής:

$$l_i(t) = \alpha_{it} z_i^3(t) + \beta_{it} z_i^2(t) + \gamma_{it} z_i(t) + \varepsilon_{it} + \zeta_i(t) \quad (2.15)$$

όπου α_{it} , β_{it} , γ_{it} και ε_{it} μηνιαίοι συντελεστές και $\zeta_i(t)$ τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή, με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση σ_{it} . Ο τυχαίος όρος εισάγεται ώστε να προσομοιώσει την αβεβαιότητα εκτίμησης των υπόγειων διαφυγών με χρήση μοντέλων παλινδρόμησης που βασίζονται σε ανάλυση των ιστορικών δεδομένων στάθμης και διαφυγών. Ο δείκτης τ που αναφέρεται στον επίκαιρο μήνα προκύπτει από την σχέση:

$$\tau = (t - 1) \bmod 12 + 1 \quad (2.16)$$

Ως *καθαρή απόληψη* νοείται το σύνολο των ρυθμιζόμενων ροών, ήτοι των εκροών που ικανοποιούν τοπικές υδατικές ανάγκες ή διοχετεύονται προς το κατάντη δίκτυο υδραγωγείων, μείον τις εισροές από το ανάντη δίκτυο, δηλαδή:

$$r_i(t) = w_i(t) - \sum_j [1 - \delta_{ji}(t)] q_{ji}(t) \quad (2.17)$$

Προφανώς, στην περίπτωση απλού κόμβου χωρίς αποθηκευτική ικανότητα, η καθαρή απόληψη είναι ίση με μηδέν (βλ. 2.3.2).

Στο μαθηματικό μοντέλο ενός ταμιευτήρα ισχύει ο περιορισμός αποθέματος:

$$0 \leq s_i(t) \leq k_i \quad (2.18)$$

Διατυπώνοντας την εξίσωση ισοζυγίου με την μορφή (2.12), ο εν λόγω περιορισμός λαμβάνεται εξ ορισμού υπόψη κατά την προσομοίωση.

Σημειώνεται ότι, από λειτουργική άποψη, το κατώτατο όριο του αποθέματος ενός ταμιευτήρα ισούται με τον νεκρό του όγκο dn_i , δεδομένου ότι δεν υπάρχει δυνατότητα υδροληψίας σε χαμηλότερη στάθμη. Ωστόσο, το απόθεμα $s_i(t)$ μπορεί να κατέβει και κάτω από τη στάθμη του νεκρού όγκου, εφόσον οι απώλειες λόγω εξάτμισης και υπόγειων διαφυγών ξεπεράσουν τις υδρολογικές εισροές. Αντίθετα, αν στο τρέχον απόθεμα προστεθούν καθαρές εισροές που ξεπερνούν την αποθηκευτική ικανότητα του ταμιευτήρα αλλά λόγω ανεπαρκούς παροχρητευτικότητας του δικτύου δεν μπορούν να διοχετευτούν κατάντη, προκύπτει πλεόνασμα αποθέματος που εκρέει ως υπερχειλίση $sp_i(t)$, ήτοι:

$$sp_i(t) = \max \{0, s_i(t) + i_i(t) - r_i(t) - k_i\} \quad (2.19)$$

Τονίζεται ότι η υπερχειλίση θεωρείται απώλεια του συστήματος, καθώς δεν μπορεί να διοχετευτεί στο δίκτυο ώστε να αξιοποιηθεί για την εξυπηρέτηση άλλων χρήσεων νερού.

2.3.4 Γεωτρήσεις

Ως *γεώτρηση* νοείται ένα εννοιολογικό αντικείμενο, που περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα έργα υδροληψίας από υπόγειους υδροφορείς.

Κάθε γεώτρηση αναφέρεται σε συγκεκριμένο κόμβο i , όπου η διαθεσιμότητα νερού θεωρείται γνωστή και ίση με $g_i(t)$. Η τιμή αυτή προκύπτει είτε από τη δυναμικότητα του υδροφορέα ή από την δυναμικότητα του αντλιοστασίου. Προφανώς, η απόληψη από μια γεώτρηση περιορίζεται στο εύρος:

$$0 \leq w_i(t) \leq g_i(t) \quad (2.20)$$

Σε κάθε γεώτρηση ορίζεται μια τιμή μοναδιαίου κόστους k_i , που αναφέρεται σε μονάδες *ειδικής ενέργειας*, ήτοι καταναλισκόμενης ενέργειας ανά μονάδα αντλούμενου όγκου νερού (π.χ., GWh/hm³). Στην τιμή αυτή θεωρείται ότι περιλαμβάνεται τόσο το κόστος λειτουργίας των ανυψωτικών αντλιοστασίων όσο και το κόστος μεταφοράς του αντλούμενου νερού στο δίκτυο.

2.3.5 Υδραγωγεία

Ως *υδραγωγείο* νοείται το εννοιολογικό αντικείμενο που συνδέει έναν κόμβο μεγαλύτερου ενεργειακού υψομέτρου (ανάντη κόμβος) με έναν κόμβο μικρότερου ενεργειακού υψομέτρου (κατάντη κόμβος), καθορίζοντας έτσι μονοσήμαντα την φορά ροής του νερού.

Το χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε υδραγωγείου (i, j) , όπου i ο ανάντη και j ο κατάντη κόμβος, είναι η *ονομαστική παροχρητευτικότητα*, π_{ij} , που εκφράζεται σε μονάδες παροχής (m³/s). Η παροχρητευτικότητα εξαρτάται από τη διαφορά ενεργειακού υψομέτρου, ήτοι το *ύψος πτώσης* $h_{ij}(t) = z_i(t) - z_j(t)$, μεταξύ των κόμβων που συνδέει το εν λόγω υδραγωγείο, ενώ αν υπάρχει εγκατεστημένο αντλιοστάσιο στον αγωγό, εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του αντλιοστασίου (συντελεστής απόδοσης αντλίας,

υδραυλικές απώλειες, μανομετρικό ύψος). Η σχέση μεταβολής της παροχεταιυτικότητας περιγράφεται από μια καμπύλη $\pi_{ij} = f_3(h_{ij})$, που κατασκευάζεται με λογαριθμική παρεμβολή μεταξύ γνωστών ζευγών τιμών (h_{ij}, π_{ij}) .

Η ονομαστική παροχεταιυτικότητα ανάγεται σε μηνιαίο μέγεθος, $c_{ij}(t)$, πολλαπλασιαζόμενη με κατάλληλο συντελεστή που εξαρτάται από τον αριθμό των ημερών κάθε μήνα. Κατά συνέπεια, ο διερχόμενος όγκος σε κάθε χρονικό βήμα υπόκειται στον φυσικό περιορισμό:

$$0 \leq q_{ij}(t) \leq (1 - \psi_{ij}) c_{ij}(t) \quad (2.21)$$

όπου $\psi_{ij} \leq 1$ μειωτικός συντελεστής που εκφράζει χρονικούς περιορισμούς στην χρήση του υδραγωγείου και την επίδραση της χρονικής διακύμανσης της παροχής εντός του χρονικού βήματος.

Παρόμοια με τις γεωτρήσεις, και στα υδραγωγεία ορίζεται μια τιμή μοναδιαίου κόστους κ_{ij} , εκφρασμένη και αυτή σε μονάδες ειδικής ενέργειας. Άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος του υδραγωγείου είναι ο συντελεστής διαρροών, $\delta_{ij}(t) \leq 1$, που θεωρείται μεταβλητός στον χρόνο και εκφράζει τις πάσης φύσεως γραμμικές απώλειες μεταξύ του ανάντη και κατόντη κόμβου.

2.3.6 Στόχοι

Με τον όρο *στόχος* νοείται μια λειτουργική απαίτηση που ορίζει ο διαχειριστής του συστήματος. Κάθε στόχος ορίζεται σε συγκεκριμένη συνιστώσα του συστήματος, και αναφέρεται σε μία από τις ακόλουθες κατηγορίες:

- επιθυμητή απόληψη νερού για άρδευση, ύδρευση ή άλλη χρήση, που αναφέρεται σε συγκεκριμένο κόμβο ή ταμιευτήρα, i , και συμβολίζεται με $d_i(t)$.
- αποφυγή απωλειών νερού λόγω υπερχειλίσης, που αναφέρεται σε συγκεκριμένο ταμιευτήρα, i .
- διατήρηση του αποθέματος μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης επιθυμητής τιμής, που αναφέρονται σε συγκεκριμένο ταμιευτήρα, i , και συμβολίζονται με $s_i^{\min}(t)$ και $s_i^{\max}(t)$, αντίστοιχα, όπου προφανώς $s_i^{\min}(t) > d_i$ και $s_i^{\max}(t) < k_i$.
- διατήρηση παροχής μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης επιθυμητής τιμής, που αναφέρονται σε συγκεκριμένο υδραγωγείο, (i, j) , και συμβολίζονται με $q_{ij}^{\min}(t)$ και $q_{ij}^{\max}(t)$, αντίστοιχα.

Οι στόχοι ορίζονται κατά σειρά προτεραιότητας και οι τιμές τους μπορούν να μεταβάλλονται σε κάθε χρονικό βήμα t . Οι στόχοι απόληξης εισάγουν επιπλέον περιορισμούς της μορφής:

$$w_i(t) \leq d_i(t) \quad (2.22)$$

Όπως εξηγήθηκε στο εδάφιο 2.1.2, η επίτευξη της επιθυμητής τιμής ενός στόχου εξαρτάται τόσο από πληθώρα παραμέτρων όπως οι υδρολογικές εισροές, η διαχείριση των αποθεμάτων και οι φυσικοί περιορισμοί του συστήματος. Για τον λόγο αυτόν, εισάγεται η έννοια της πιθανότητας αστοχίας, α_k , η εκτίμηση της οποίας γίνεται σε ετήσια βάση, μέσω της εμπειρικής σχέσης (2.2).

Χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε στόχου k είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη πιθανότητα αστοχίας, α_k^{\max} . Ο σχετικός περιορισμός διατυπώνεται ως:

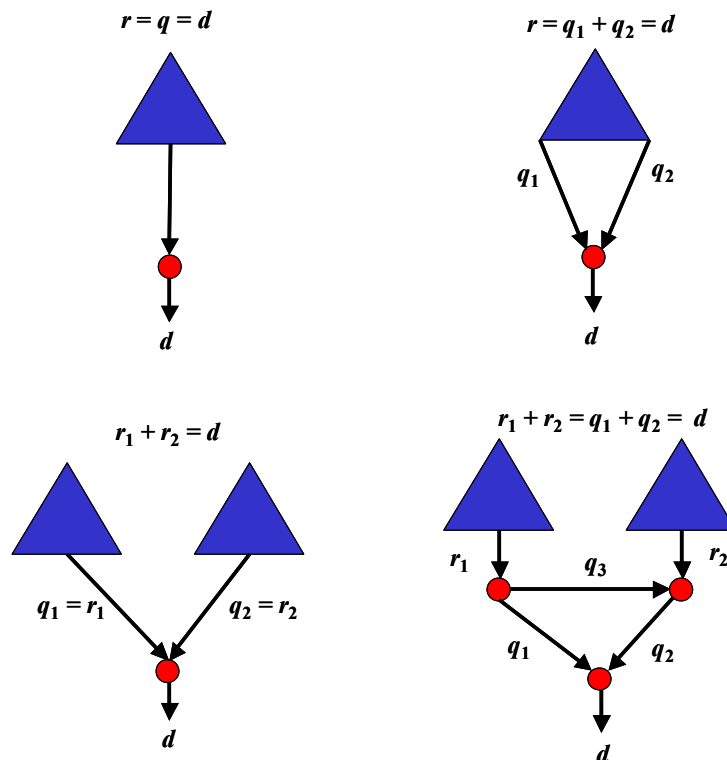
$$\alpha_k \leq \alpha_k^{\max} \quad (2.23)$$

Τονίζεται ότι οι περιορισμοί αστοχίας είναι έντονα μη γραμμικοί, κι επιπλέον δεν είναι δυνατός ο απευθείας χειρισμός τους μέσω ενός μοντέλου προσομοίωσης. Για τον λόγο αυτό, ενσωματώνονται στο μέτρο επίδοσης του συστήματος υπό μορφή μαθηματικών ποινών, ώστε να λαμβάνονται έμμεσα υπόψη. Η ενσωμάτωσή τους γίνεται μέσω αδιάστατων συντελεστών βάρους, ω_k , που εκφράζουν την σχετική σημασία κάθε περιορισμού.

2.4 Παραμετροποίηση υδροσυστήματος

2.4.1 Γενικά

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



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συστημάτων ταμιευτήρων και υδραγωγείων, που εξυπηρετούν μια καταντή ζήτηση, d .

Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζονται τέσσερα χαρακτηριστικά παραδείγματα συστημάτων ταμιευτήρων και υδραγωγείων, που εξυπηρετούν μια καταντή ζήτηση, d . Στην πρώτη περίπτωση (πάνω αριστερά), υπάρχει ένας μοναδικός ταμιευτήρας και ένα μοναδικό υδραγωγείο, με συνέπεια να μην υπάρχουν βαθμοί ελευθερίας και να μην υπάρχουν εναλλακτικές επιλογές διαχείρισης, καθώς η απόληψη, r , η παροχή, q , και η ζήτηση, d , ταυτίζονται. Στην δεύτερη περίπτωση (κάτω αριστερά), υπάρχουν δύο παράλληλοι ταμιευτήρες και μιας μοναδική διαδρομή νερού, οπότε προκύπτει ένας βαθμός ελευθερίας που σχετίζεται με την κατανομή των απολήψεων, r_1 και r_2 . Στην τρίτη περίπτωση (πάνω δεξιά), υπάρχει ένας ταμιευτήρας και δύο εναλλακτικές διαδρομές νερού, οπότε προκύπτει ένας βαθμός ελευθερίας που σχετίζεται με την κατανομή της απόληψης στο δίκτυο των υδραγωγείων, ήτοι των παροχών q_1 και q_2 . Στην τελευταία περίπτωση (κάτω δεξιά), υπάρχουν δύο παράλληλοι ταμιευτήρες και δύο εναλλακτικές διαδρομές νερού, οπότε προκύπτουν δύο βαθμοί ελευθερίας, που ο ένας αναφέρεται στην κατανομή των αποθεμάτων και ο άλλος στην κατανομή των απολήψεων.

2.4.2 Κανόνες λειτουργίας ταμιευτήρων

Η μεθοδολογία που περιγράφεται προτάθηκε από τους *Nalbantis and Koutsoyiannis* (1997) για τον βέλτιστο έλεγχο συστημάτων ταμιευτήρων πολλαπλού σκοπού.

Έστω σύστημα n ταμιευτήρων τυχαίας διάταξης και έστω $s(t)$ το συνολικό ωφέλιμο απόθεμα του συστήματος κατά το χρονικό βήμα t . Αν $s_i(t)$ το ωφέλιμο απόθεμα του i ταμιευτήρα, τότε ισχύει:

$$\sum_{i=1}^n s_i(t) = s(t) \quad (2.24)$$

Θεωρώντας ότι οι απολήψεις επιφανειακών υδατικών πόρων ικανοποιούν επακριβώς την κατάντη ζήτηση, $d(t)$, και θεωρώντας γνωστές τις καθαρές υδρολογικές εισροές κάθε ταμιευτήρα, ο συνολικός ωφέλιμος όγκος του συστήματος στο τέλος του χρονικού βήματος t ισούται με:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n s_i(t-1) + \sum_{i=1}^n i_i(t) - d(t) \quad (2.25)$$

Ζητούμενο του προβλήματος είναι ο βέλτιστος καθορισμός των επιφανειακών απολήψεων, $r_i(t)$, ώστε να ικανοποιείται η κατάντη ζήτηση, ήτοι:

$$\sum_{i=1}^n r_i(t) = d(t) \quad (2.26)$$

Ισοδύναμα, το πρόβλημα συνίσταται στην βέλτιστη κατανομή του συνολικού όγκου $v(t)$ στους ταμιευτήρες ώστε να ικανοποιείται ο περιορισμός (2.24). Το σύστημα που προκύπτει είναι αόριστο, καθώς υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί λύσεων $s_i(t)$ που το επαληθεύουν. Πράγματι, αν n είναι το πλήθος των ταμιευτήρων, τότε το πλήθος των βαθμών ελευθερίας σε κάθε χρονικό βήμα t είναι $n-1$, ενώ αν T είναι το πλήθος των χρονικών βημάτων, ήτοι το μήκος της προσομοίωσης, τότε ο συνολικός αριθμός των μεταβλητών του προβλήματος ανέρχεται σε $T \times (n-1)$.

Μια εναλλακτική διατύπωση του προβλήματος κατανομής των αποθεμάτων είναι με την μορφή κανόνων λειτουργίας. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2.2.4, οι κανόνες αυτοί, που στην προκειμένη περίπτωση είναι παραμετρικοί, καθορίζουν τα επιθυμητά μεγέθη διαχείρισης των ταμιευτήρων (δηλαδή τα αποθέματα ή τις απολήψεις) συναρτήσει της επίκαιρης κατάστασης του συστήματος. Θεωρώντας ότι η τελευταία ορίζεται πλήρως από το αναμενόμενο συνολικό απόθεμα, $s(t)$, στο τέλος του χρονικού βήματος, μια εφικτή μαθηματική διατύπωση κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων (όπου ο δείκτης του χρονικού βήματος παραλείπεται για λόγους απλούστευσης) είναι:

$$s_i^* = k_i - a_i k + b_i s \quad (2.27)$$

όπου k_i η ωφέλιμη χωρητικότητα του i ταμιευτήρα, k η ολική ωφέλιμη χωρητικότητα του συστήματος, a_i και b_i παράμετροι που λαμβάνουν τιμές στο διάστημα $[0, 1]$, και s_i^* το επιθυμητό απόθεμα ή απόθεμα-στόχος στο τέλος του χρονικού βήματος. Σημειώνεται ότι η σχέση (2.27) είναι ελαφρά τροποποιημένη σε σχέση με την αυθεντική των *Nalbantis and Koutsoyiannis* (1997), ώστε οι παράμετροι της εξίσωσης να είναι αδιάστατες. Επιπλέον, έχουν παραλειφθεί οι περιορισμοί που αφορούν στο άθροισμα των a_i και b_i , και οι οποίοι εξασφαλίζουν, υπό προϋποθέσεις, την ισχύ της συνθήκης (2.24).

Αποδεικνύεται ότι ο κανόνας (2.27), ειδική περίπτωση του οποίου είναι ο χωρικός κανόνας που αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.2.4, είναι βέλτιστος για ένα εύρος διατάξεων ταμιευτήρων και κριτηρίων διαχείρισης (*Nalbantis and Koutsoyiannis*, 1997). Στις ειδικές αυτές περιπτώσεις, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων υπολογίζονται θεωρητικά. Γενικά όμως, οι τιμές των παραμέτρων δεν είναι γνωστές, μπορούν ωστόσο να εκτιμηθούν μέσω βελτιστοποίησης που, στην περίπτωση αυτή, είναι σχετικά

εύκολη στην εφαρμογή της λόγω του μικρού αριθμού των μεταβλητών ελέγχου. Πράγματι, με την παραμετροποίηση των κανόνων λειτουργίας, το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος περιορίζεται δραστικά, καθώς ισούται με $2 \times n$, ήτοι δύο παράμετροι ανά ταμειυτήρα. Με τον τρόπο αυτό, μάλιστα, καθίσταται ανεξάρτητο του χρονικού ορίζοντα της προσομοίωσης, T .

Οι παράμετροι a_i και b_i μπορούν να θεωρηθούν σταθερές ή να μεταβάλλονται ανάλογα με την εποχή. Μια απλοποιημένη μορφή του κανόνα (2.27) είναι:

$$s_i^* = b_i s \quad (2.28)$$

Η εξίσωση (2.28) συνιστά τον λεγόμενο *ομογενή* κανόνα, ο οποίος προκύπτει από την (2.27) με θεώρηση σταθερών τιμών των παραμέτρων a_i , ίσων με:

$$a_i = \frac{k_i}{k} \quad (2.29)$$

Στην γραμμική σχέση (2.27) ή την (2.28) δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι φυσικοί περιορισμοί του προβλήματος, ήτοι οι περιορισμοί ωφέλιμης χωρητικότητας. Για τον λόγο αυτό, τα αποθέματα-στόχοι που υπολογίζονται από την (2.27) διορθώνονται ώστε:

$$s_i'^* = \max \{ \min [k_i, k_i - a_i k + b_i s], 0 \} \quad (2.30)$$

Μετά την (2.30) ακολουθεί μια επόμενη διόρθωση, ώστε να ικανοποιείται και ο περιορισμός (2.24), ήτοι να μηδενίζεται το σφάλμα:

$$\Delta s = s - \sum_{i=1}^n s_i'^* \quad (2.31)$$

Πρόκειται για μια διαδικασία αναγωγής, βάσει της οποίας το σφάλμα Δs κατανέμεται ανάλογα με την ποσότητα $s_i'^* (1 - s_i'^* / k_i)$, ώστε η συνθήκη ($s_i'^* = 0$) να αντιστοιχεί στη συνθήκη ($s_i''^* = 0$), ενώ η συνθήκη ($s_i'^* = k_i$) να αντιστοιχεί στη συνθήκη ($s_i''^* = k_i$). Με τον τρόπο αυτό, δεν επηρεάζονται οι περιπτώσεις κατά τις οποίες προκύπτει η απαίτηση άδειου ή γεμάτου ταμειυτήρα. Σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση, τα τελικά αποθέματα-στόχοι $s_i''^*$ υπολογίζονται από την σχέση:

$$s_i''^* = s_i'^* [1 + \varphi (1 - s_i'^* / k_i)] \quad (2.32)$$

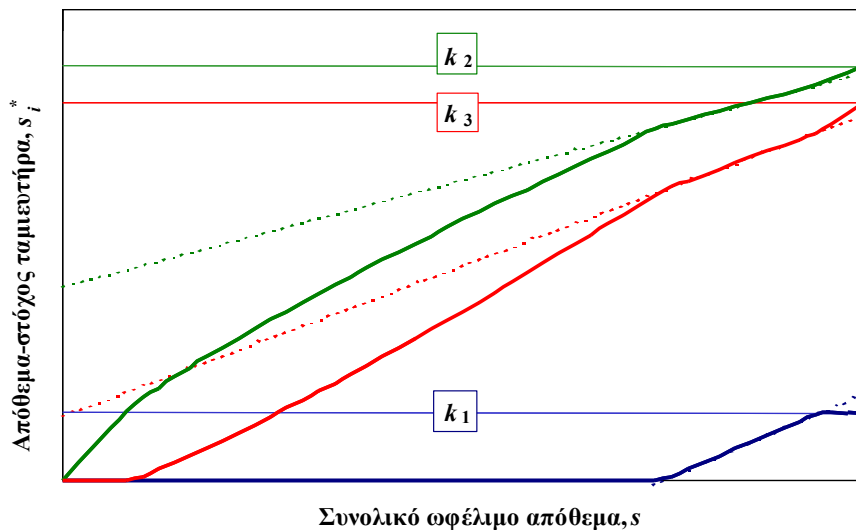
όπου:

$$\varphi = \frac{\Delta s}{\sum_{j=1}^n s_j'^* (1 - s_j'^* / k_j)} \quad (2.33)$$

Επισημαίνεται ότι για τιμές του φ εκτός του διαστήματος $[-1, 1]$, η σχέση αναγωγής (2.32) μπορεί να δώσει τιμές αποθεμάτων-στόχων που εξακολουθούν να παραβιάζουν τους φυσικούς περιορισμούς. Στην περίπτωση αυτή, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, διορθώνοντας τα αποθέματα βάσει της (2.30) και εφαρμόζοντας εκ νέου την διαδικασία αναγωγής (2.32), ώσπου να επέλθει σύγκλιση.

Ανεξαρτήτως των διορθώσεων, η μαθηματική διατύπωση των κανόνων λειτουργίας καθορίζεται πλήρως από τις τιμές των παραμέτρων a_i και b_i . Μάλιστα, λόγω των σχέσεων (2.30) και (2.32), η τελική μορφή των κανόνων είναι μη γραμμική. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζονται οι κανόνες λειτουργίας για τρεις υποθετικούς ταμειυτήρες. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται το συνολικό ωφέλιμο απόθεμα του συστήματος, ενώ στον κατακόρυφο άξονα φαίνεται το απόθεμα-στόχος κάθε ταμειυτήρα. Με λεπτή οριζόντια γραμμή απεικονίζεται η ωφέλιμη χωρητικότητα κάθε ταμειυτήρα, που αποτελεί το φυσικό άνω όριο του αντίστοιχου αποθέματος. Με διακεκομμένη απεικονίζονται οι αρχικοί κανόνες, όπως προκύπτουν από τη σχέση (2.27), ενώ με συνεχή γραμμή απεικονίζονται οι κανόνες στην τελική τους μορφή, που είναι έντονα μη γραμμική. Το νομογράφημα αυτό αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο για τη

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



Σχήμα 2.5: Γραφική παράσταση των κανόνων λειτουργίας τριών υποθετικών ταμιευτήρων. Με λεπτή γραμμή απεικονίζεται η ωφέλιμη χωρητικότητα κάθε ταμιευτήρα, με παχιά γραμμή η τελική μορφή των κανόνων λειτουργίας, ενώ με διακεκομμένη η αρχική (γραμμική) τους μορφή.

2.4.3 Γενίκευση κανόνων με ενσωμάτωση περιορισμών αποθέματος

Οι μεταβλητές των κανόνων λειτουργίας, ήτοι τα αποθέματα και οι χωρητικότητες, αναφέρονται σε καθαρά ή αλλιώς ωφέλιμα μεγέθη. Συνεπώς, για την εφαρμογή των κανόνων απαιτείται αναγωγή της μικτής χωρητικότητας κάθε ταμιευτήρα σε ωφέλιμη, ήτοι:

$$k_i \rightarrow k_i - dv_i \quad (2.34)$$

Στη συνέχεια, αφού υπολογιστούν τα επιθυμητά ωφέλιμα αποθέματα, η αναγωγή τους σε μικτά γίνεται προσθέτοντας τον αντίστοιχο νεκρό όγκο, ήτοι:

$$s_i^* \rightarrow s_i^* + dv_i \quad (2.35)$$

Στην περίπτωση ωστόσο που εκτός του περιορισμού του νεκρού όγκου, dv_i , τίθενται και λειτουργικοί περιορισμοί ελάχιστου και μέγιστου αποθέματος, αυτοί ενσωματώνονται στους κανόνες λειτουργίας θεωρώντας ότι η καθαρή χωρητικότητα κάθε ταμιευτήρα είναι πλέον συνάρτηση του χρονικού βήματος t (αφού οι στόχοι δύνανται να μεταβάλλονται διαχρονικά) και ορίζεται ως η διαφορά:

$$k_i(t) = s_i^{\max}(t) - s_i^{\min}(t) \quad (2.36)$$

Εφαρμόζοντας τους κανόνες λειτουργίας κατά τα γνωστά, η διαχείριση των συνολικών επιφανειακών αποθεμάτων του συστήματος καθορίζεται πλήρως στο διάστημα:

$$\left(\sum_{i=1}^n s_i^{\min}, \sum_{i=1}^n s_i^{\max} \right) \quad (2.37)$$

Στην παραπάνω σχέση όπως και σε όλες τις επόμενες, ο δείκτης του χρονικού βήματος παραλείπεται για λόγους απλούστευσης. Η διαχείριση των αποθεμάτων εκτός του διαστήματος (2.37) καθορίζεται από τις τιμές των στόχων ελάχιστου και μέγιστου όγκου καθώς και την σχετική τους προτεραιότητα. Η λογική που ακολουθείται έχει ως εξής: Αρχικά γεμίζει ο ταμειυτήρας του οποίου ο στόχος ελάχιστου αποθέματος βρίσκεται στην υψηλότερη προτεραιότητα. Στην συνέχεια γεμίζει ο ταμειυτήρας του οποίου ο στόχος ελάχιστου αποθέματος βρίσκεται στην επόμενη προτεραιότητα, κοκ. Κατά συνέπεια, θεωρώντας ότι ο δείκτης i εκφράζει την σειρά προτεραιότητας των περιορισμών ελάχιστου αποθέματος, η μαθηματική διατύπωση των αποθεμάτων-στόχων είναι:

$$s_i^* = \begin{cases} s_i^{\min} & i < j \\ s - \sum_{i=1}^{j-1} s_i^{\min} & i = j \\ dv_i & i > j \end{cases} \quad (2.38)$$

όπου όλα τα μεγέθη θεωρούνται πλέον *μικτά*. Η παραπάνω σχέση ισχύει για συνολικό μικτό απόθεμα:

$$\sum_{i=1}^j s_i^{\min} \leq s \leq \sum_{i=1}^{j-1} s_i^{\min} \quad (2.39)$$

Παρόμοια είναι η λογική που ακολουθείται για την ικανοποίηση των λειτουργικών περιορισμών μέγιστου αποθέματος. Στην περίπτωση αυτή, παραβιάζεται τελευταίος ο στόχος μέγιστου αποθέματος που βρίσκεται στην υψηλότερη προτεραιότητα, προτελευταίος αυτός που βρίσκεται στην επόμενη προτεραιότητα, κοκ. Κατά συνέπεια, θεωρώντας τώρα ότι ο δείκτης i εκφράζει την σειρά προτεραιότητας των περιορισμών μέγιστου αποθέματος, η μαθηματική διατύπωση των αποθεμάτων-στόχων των ταμειυτήρων είναι:

$$s_i^* = \begin{cases} s_i^{\max} & i < j \\ s - \sum_{i=1}^{j-1} s_i^{\max} - \sum_{i=j}^n k_i & i = j \\ k_i & i > j \end{cases} \quad (2.40)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για συνολικό μικτό απόθεμα στο διάστημα:

$$\sum_{i=1}^j s_i^{\max} + \sum_{i=j+1}^n k_i \leq s \leq \sum_{i=1}^{j-1} s_i^{\max} + \sum_{i=j}^n k_i \quad (2.41)$$

Η ενσωμάτωση των στόχων ελάχιστου και μέγιστου αποθέματος στους κανόνες λειτουργίας, τους καθιστά πιο ρεαλιστικούς αλλά και πιο φιλικούς για τον διαχειριστή του συστήματος.

2.4.4 Κανόνες λειτουργίας γεωτρήσεων

Στο σύστημα υδροδότησης της Αθήνας, τα υπόγεια νερά θεωρούνται ως εφεδρικοί υδατικοί πόροι. Κατά συνέπεια, η διαχείρισή τους συνίσταται, κατά κύριο λόγο, στην ενεργοποίηση ή όχι των γεωτρήσεων μέσω των οποίων πραγματοποιούνται οι υπόγειες απολήψεις. Με βάση το σκεπτικό αυτό, σε κάθε γεώτρηση i του μοντέλου του υδροσυστήματος ορίζονται δυο κατώφλια b_i^{up} και b_i^{down} , που ορίζονται ως ποσοστά επί του συνολικού ωφέλιμου όγκου του συστήματος, s . Εφόσον το απολήψιμο δυναμικό των ταμειυτήρων βρίσκεται πάνω από το πρώτο κατώφλι b_i^{up} , απαγορεύεται η

χρήση της γεώτρησης (αυτό γίνεται εφόσον δεν παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί που θέτει ο διαχειριστής του συστήματος), ενώ όταν βρεθεί κάτω από το δεύτερο κατώφλι b_i^{down} , η γεώτρηση χρησιμοποιείται κατά προτεραιότητα σε σχέση με τα επιφανειακά νερά. Τέλος, για ενδιάμεσες τιμές, η γεώτρηση χρησιμοποιείται μόνο εφόσον η λειτουργία της προκύπτει οικονομικότερη σε σχέση με τις λοιπές εναλλακτικές λύσεις (βλ. 2.5.5).

2.5 Μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης

2.5.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Η προσομοίωση είναι η διαδικασία αναπαράστασης των φυσικών διεργασιών που σχετίζονται με την διαχείριση των αποθεμάτων και την μεταφορά νερού από τις πηγές (ταμιευτήρες, γεωτρήσεις) στην κατανάλωση. Η προσομοίωση εκτελείται σε μηνιαία χρονικά βήματα, τα οποία ομαδοποιούνται σε χρονικές περιόδους (έτη). Είσοδος του μοντέλου προσομοίωσης είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη και η τοπολογία των συνιστωσών του υδροσυστήματος, οι υδρολογικές χρονοσειρές, οι λειτουργικοί περιορισμοί καθώς και οι παράμετροι των κανόνων λειτουργίας. Έξοδος του μοντέλου είναι οι προσομοιωμένες χρονοσειρές απολήψεων και κατανομής τους στα υδραγωγεία, βάσει των οποίων εκτιμάται η επίδοση του συστήματος (βλ. 2.6).

Στην αρχή κάθε χρονικού βήματος είναι γνωστά ή μπορούν να υπολογιστούν τα ακόλουθα μεγέθη:

- το τρέχον απόθεμα κάθε ταμιευτήρα, s_i , και το διαθέσιμο δυναμικό κάθε γεώτρησης, g_i ·
- οι καθαρές υδρολογικές εισροές κάθε ταμιευτήρα, i_i ·
- οι παροχετευτικότητες των υδραγωγείων, c_{ij} , που είτε είναι σταθερές ή εξαρτώνται από το τρέχον ύψος πτώσης, h_{ij} ·
- οι τιμές των λειτουργικών περιορισμών.

Θεωρητικά, η διαχείριση των αποθεμάτων των ταμιευτήρων γίνεται με βήμα προς βήμα εφαρμογή των κανόνων λειτουργίας τους. Συγκεκριμένα, το συνολικό ωφέλιμο απόθεμα του συστήματος στο τέλος του χρονικού βήματος, s , εκτιμάται μέσω της (2.25), όπου η συνολική ζήτηση, d , υπολογίζεται αθροίζοντας τις τιμές των επιμέρους στόχων απόληψης, d_i . Κατά τον υπολογισμό του αναμενόμενου αποθέματος, δεν λαμβάνονται υπόψη οι τυχόν απώλειες λόγω υπερχειλίσις, sr_i , που προφανώς δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθούν εκ των προτέρων. Για δεδομένες τιμές των παραμέτρων a_i και b_i υπολογίζεται το επιθυμητό απόθεμα, s_i^* , κάθε ταμιευτήρα, και στην συνέχεια, επιλύοντας την εξίσωση ισοζυγίου ως προς την αντίστοιχη *επιθυμητή* απόληψη, r_i^* , προκύπτει:

$$r_i^* = \max(0, s_i + i_i - s_i^*) \quad (2.42)$$

Επισημαίνεται ότι στην παραπάνω σχέση το μέγεθος s_i αναφέρεται στο τρέχον απόθεμα του ταμιευτήρα, ενώ η ποσότητα s_i^* στο *επιθυμητό* απόθεμα στο τέλος του χρονικού βήματος. Κατά συνέπεια, η ποσότητα $s_i + i_i$ εκφράζει το διαθέσιμο υδατικό δυναμικό του ταμιευτήρα, που προκύπτει με προσθήκη των καθαρών υδρολογικών εισροών στο τρέχον απόθεμα, s_i .

Ωστόσο, η γνώση των επιθυμητών απολήψεων, r_i^* , δεν είναι πάντοτε επαρκής για τον προσδιορισμό όλων των μεταβλητών του υδροσυστήματος, ήτοι των πραγματικών απολήψεων και της κατανομής τους στα υδραγωγεία, εφόσον ισχύει μία τουλάχιστον από τις ακόλουθες συνθήκες:

- οι επιθυμητές απολήψεις από τους ταμιευτήρες δεν μπορούν να διοχετευτούν κατάντη εξαιτίας των φυσικών περιορισμών του δικτύου (π.χ. παροχετευτικότητες αγωγών, δυναμικότητες αντλιοστασίων, χωρητικότητα μονάδων επεξεργασίας νερού, κλπ.)·
- ο τρόπος μεταφοράς των απολήψεων από τους ταμιευτήρες δεν είναι μονοσήμαντος, αλλά προκύπτουν εναλλακτικές διαδρομές νερού και, μάλιστα, με διαφορετικό κόστος·

- πολλαπλοί και αντικρουόμενοι στόχοι πρέπει να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα·
- η συνολική ζήτηση νερού είναι μεγαλύτερη από την συνολική προσφορά του συστήματος.

Συνεπώς, προκύπτει ένα σύνθετο πρόβλημα διαχείρισης, που επιβάλλει τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- αυστηρή ικανοποίηση το συνόλου των φυσικών περιορισμών του υδροσυστήματος·
- ικανοποίηση των λειτουργικών περιορισμών σύμφωνα με την σειρά προτεραιότητας που έχει οριστεί, εφόσον βεβαίως δεν παραβιάζονται οι φυσικοί περιορισμοί·
- ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ πραγματικών και επιθυμητών απολήψεων, ώστε να τηρείται κατά το δυνατόν πιστότερα η πολιτική διαχείρισης που επιβάλουν οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων·
- ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς νερού, εκφρασμένου σε όρους ενέργειας άντλησης.

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, όλες οι παραπάνω απαιτήσεις περιγράφονται μαθηματικά μέσω ενός σχήματος γραμμικής βελτιστοποίησης, το οποίο διατυπώνεται σε μια ειδική μορφή που είναι γνωστή ως *δικτυακός προγραμματισμός*, που λαμβάνει, πιο συγκεκριμένα, τη μορφή του γνωστού από την επιχειρησιακή έρευνα *προβλήματος μεταφόρτωσης* (βλ. 2.5.2). Ως μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος βελτιστοποίησης θεωρείται το σύνολο των μεταβλητών υδατικού ισοζυγίου για το σύνολο των συνιστωσών του μοντέλου του υδροσυστήματος. Το πρόβλημα επιλύεται σε κάθε χρονικό βήμα, t , ενώ τα αποτελέσματα του εκάστοτε βήματος χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για το επόμενο. Κατά συνέπεια, αν T είναι το πλήθος των χρονικών βημάτων, η προσομοίωση του υδροσυστήματος συνίσταται στην *σειριακή* επίλυση αντίστοιχου αριθμού μοντέλων δικτυακού γραμμικού προγραμματισμού. Το πλεονέκτημα της παραπάνω διατύπωσης είναι η ύπαρξη εξαιρετικά γρήγορων αλγορίθμων επίλυσης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται πιστή αναπαράσταση των διεργασιών που σχετίζονται με την λειτουργία του υδροσυστήματος, με σχετικά περιορισμένο υπολογιστικό φόρτο.

Επισημαίνεται ότι μοντέλα που βασίζονται στον δικτυακό προγραμματισμό έχουν χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων σχεδιασμού και διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων. Στην πλειονότητά τους είναι μοντέλα προσομοίωσης, που σε κάθε χρονικό βήμα υπολογίζουν την κατανομή των υδατικών πόρων, ελαχιστοποιώντας το κόστος μεταφοράς σε υδροσυστήματα δικτυακής μορφής (Graham et al., 1986· Labadie, 1995· Fredericks et al., 1998· Israel and Lund, 1999· Dai and Labadie, 2001). Η βελτιστοποίηση βασίζεται είτε σε πραγματικά οικονομικά κριτήρια είτε σε ιδεατά κόστη, τα οποία ορίζονται ώστε να εξασφαλίζεται συμβατότητα με τους περιορισμούς του συστήματος. Άλλα μοντέλα, όπως αυτό που ανέπτυξε ο Kuczera (1989), είναι καθαρά μοντέλα βελτιστοποίησης, στα οποία ο χειρισμός των οριακών συνθηκών μεταξύ των διαδοχικών χρονικών βημάτων γίνεται μέσω εικονικών κλάδων μεταφοράς νερού.

Το προτεινόμενο μοντέλο είναι πιο ολοκληρωμένο, καθώς χειρίζεται οποιαδήποτε τοπολογία συστημάτων και πληθώρα περιορισμών, ενώ είναι άμεσα προσαρμόσιμο στο μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση. Η αναλυτική περιγραφή του γίνεται στο εδάφιο 2.5.3, ενώ στο 2.5.5 εξηγείται ο τρόπος καθορισμού των χαρακτηριστικών μεγεθών του διγράφου, και ιδιαίτερα του ιδεατού κόστους των κλάδων, που θεωρείται κομβικό σημείο του μοντέλου.

2.5.2 Γενική περιγραφή του προβλήματος μεταφόρτωσης

Το *πρόβλημα μεταφόρτωσης* (transshipment problem) είναι γνωστό από την θεωρία γράφων (Deo, 1974· Smith, 1982). Ο *γράφος* (graph) είναι μια μαθηματική οντότητα, οριζόμενη ως ένα σύνολο που αποτελείται από διατεταγμένα ζεύγη σημείων. Κάθε γράφος μπορεί να παρασταθεί με τη μορφή (N, A) , όπου N ένα σύνολο σημείων που ονομάζονται *κόμβοι*, και A ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών που ονομάζονται *τόξα* ή *ακμές*. *Διγράφος* (digraph) καλείται ο γράφος του οποίου τα τόξα έχουν

προσανατολισμένη φορά, ενώ *δίκτυο* (network) είναι ένας γράφος, στα στοιχεία του οποίου (κόμβοι και τόξα) αντιστοιχούν κάποιες ιδιότητες.

Η τοπολογία ενός γράφου που αποτελείται από n κόμβους και m τόξα περιγράφεται μαθηματικά μέσω του $n \times m$ *μητρώου πρόσπτωσης* (incidence matrix), με τιμές $a_{ij} = 1$ αν η φορά είναι από τον κόμβο i προς το τόξο j , $a_{ij} = -1$ αν η φορά είναι ανάστροφη και $a_{ij} = 0$ αν δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ του κόμβου i και του τόξου k .

Το πρόβλημα μεταφόρτωσης έγκειται στην ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς μιας ποσότητας από κάποιους κόμβους που καλούνται *πηγές* (sources) στους κόμβους *κατανάλωσης* (sinks), μέσω ενός δικτύου αποτελούμενου από n κόμβους και m τόξα. Κόμβοι στους οποίους δεν υπάρχει ούτε προσφορά ούτε ζήτηση καλούνται *ενδιάμεσοι* (intermediate).

Στο πρόβλημα μεταφόρτωσης γίνονται οι ακόλουθες υποθέσεις:

- η συνολική προσφορά ισούται με την συνολική ζήτηση·
- σε κάθε κόμβο, η συνολική εισερχόμενη ποσότητα ισούται με την συνολική εξερχόμενη μείον την καταναλισκόμενη (εξίσωση συνέχειας)·
- σε κάθε τόξο j , η μεταφερόμενη ποσότητα x_j είναι θετική και δεν μπορεί να ξεπεράσει την μεταφορική ικανότητα, u_j .

Στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται η πρώτη απαίτηση, θεωρείται ένας εικονικός κόμβος, που απορροφά το πλεόνασμα της προσφοράς. Με τον τρόπο αυτό, ισχύει πάντοτε η συνθήκη:

$$\sum_{i=1}^n y_i = 0 \quad (2.43)$$

όπου y_i η τιμή της ζήτησης ή προσφοράς στον κόμβο i , με θετικό ή αρνητικό πρόσημο, αντίστοιχα.

Η εξίσωση συνέχειας γράφεται στην μορφή:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

όπου a_{ij} το στοιχείο (i, j) του μητρώου πρόσπτωσης, όπου i ο δείκτης του κόμβου και j ο δείκτης του διασυνδεδεμένου τόξου.

Τέλος, οι περιορισμοί παροχτευτικότητας γράφονται στη μορφή:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_m \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_m \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Θεωρώντας σε κάθε τόξο j ένα μοναδιαίο κόστος μεταφοράς, c_j , η κατανομή της προσφοράς y_i στα m τόξα του δικτύου, ήτοι ο υπολογισμός των μεταφερόμενων ποσοτήτων, x_j , διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, η αντικειμενική συνάρτηση του οποίου είναι:

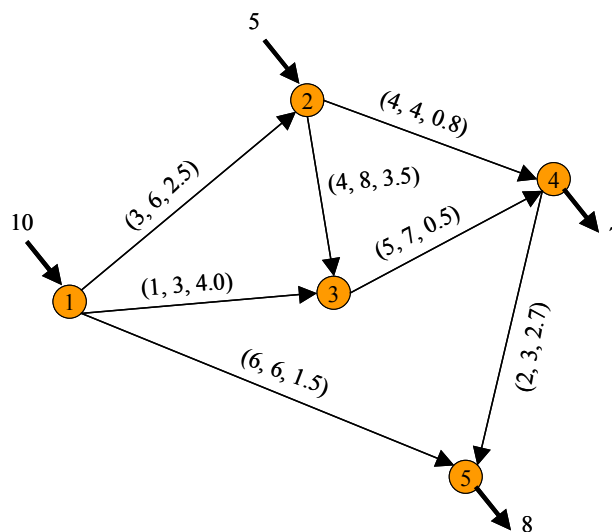
$$f(x_1, \dots, x_m) = \sum_{j=1}^m c_j x_j \quad (2.46)$$

Η μητρική διατύπωση του προβλήματος είναι:

$$\begin{aligned} & \text{minimise } f(\mathbf{x}) = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \text{έτσι ώστε } \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{y} \\ & \mathbf{0} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned} \quad (2.47)$$

όπου \mathbf{x} το διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου, ήτοι των μεταφερόμενων ποσοτήτων, \mathbf{c} το διάνυσμα τιμών μοναδιαίου κόστους, \mathbf{A} το μητρώο πρόσπτωσης, \mathbf{y} το διάνυσμα προσφοράς και ζήτησης, $\mathbf{0}$ το μηδενικό διάνυσμα, και \mathbf{u} το διάνυσμα χωρητικότητας.

Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται ένα υποθετικό δίκτυο. Στους κόμβους 1 και 2 πραγματοποιείται η προσφορά, που είναι ίση με 10 και 5 μονάδες αντίστοιχα. Ο κόμβος 3 είναι ενδιάμεσος, ενώ στους κόμβους 4 και 5 πραγματοποιείται η ζήτηση, που είναι ίση με 7 και 8 μονάδες αντίστοιχα. Σε κάθε τόξο αναγράφονται, κατά σειρά, η μεταφερόμενη ποσότητα, η μεταφορική ικανότητα και το μοναδιαίο κόστος.



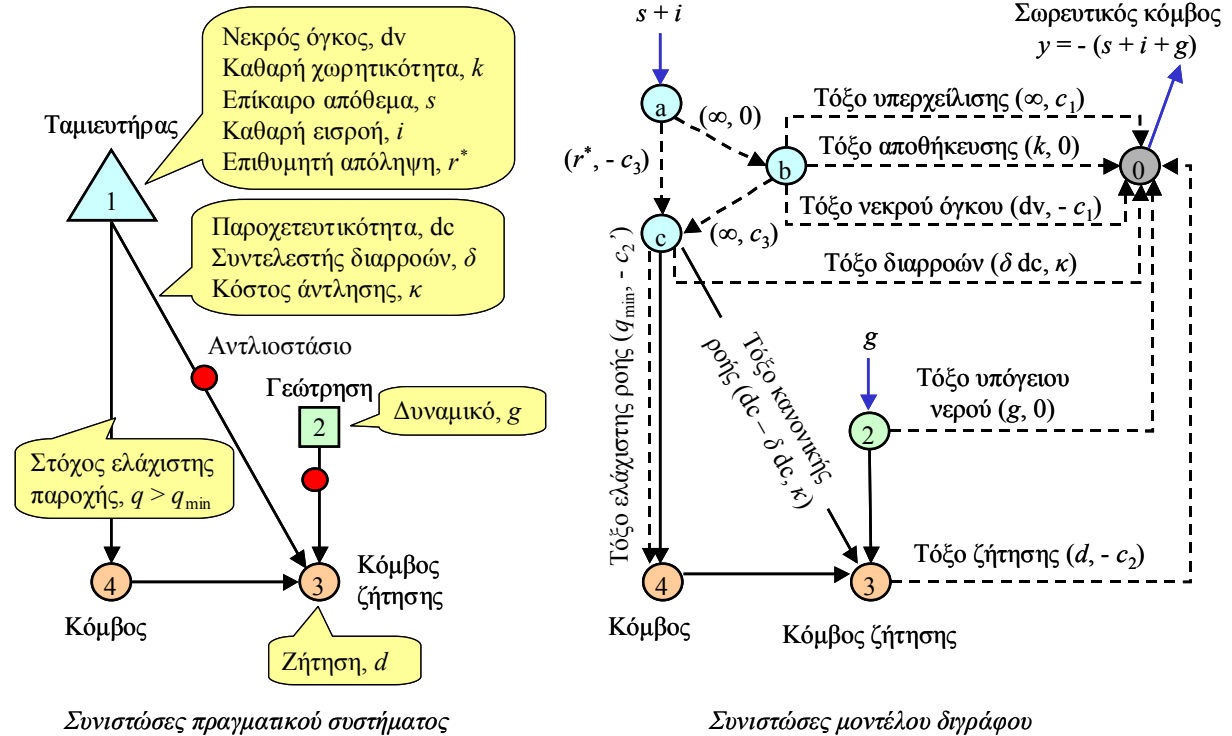
Σχήμα 2.6: Υποθετικό μοντέλο δικτυακού γραμμικού προγραμματισμού. Εντός παρενθέσεως αναγράφονται η διερχόμενη παροχή, η μεταφορική ικανότητα και το μοναδιαίο κόστος των τόξων.

Το σύστημα (2.47) ορίζει ένα πρόβλημα *δικτυακού προγραμματισμού* (network optimisation), το οποίο μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά είτε με τον τυπικό αλγόριθμο simplex είτε με μια εξειδικευμένη παραλλαγή αυτού, την λεγόμενη *δικτυακή simplex* (Chvatal, 1983, σ. 291-319). Η δικτυακή simplex επιλύει μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού στα οποία οι συντελεστές των περιορισμών λαμβάνουν τιμές 1, -1 ή 0. Ο αλγόριθμος πλεονεκτεί σημαντικά ως προς την ταχύτητα επίλυσης, που μπορεί να είναι έως και δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη σε σχέση με την τυπική μέθοδο simplex.

2.5.3 Σχηματοποίηση μοντέλου διγράφου

Έστω σύστημα υδατικών πόρων, το μαθηματικό μοντέλο του οποίου αποτελείται από τις συνιστώσες που αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 2.3, ήτοι κόμβους, ταμειυτήρες, γεωτρήσεις, υδραγωγεία και λειτουργικούς περιορισμούς. Η βασική ιδέα συνίσταται στην αναπαράσταση του συνόλου των συνιστωσών των εξισώσεων δυναμικής του υδροσυστήματος μέσω ενός ιδεατού διγράφου, με τρόπο ώστε όλες οι μεταβλητές που εκφράζουν αποθήκευση, μεταφορά ή απόληψη νερού να αντιστοιχούν στις μεταβλητές ελέγχου, x_j , ενός προβλήματος μεταφόρτωσης. Επισημαίνεται ότι το μοντέλο διγράφου διατηρεί την τοπολογία του πραγματικού συστήματος, δηλαδή όλες τις δυνατές διαδρομές του νερού. Με τον τρόπο αυτό, η βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων υδατικών πόρων στις επιμέρους συνιστώσες του συστήματος διατυπώνεται ως πρόβλημα μεταφόρτωσης. Η ικανοποίηση των

τεσσάρων απαιτήσεων που τέθηκαν στο εδάφιο 2.5.1 εξασφαλίζεται με τον ορισμό κατάλληλων τιμών προσφοράς και ζήτησης, y_i , στους κόμβους, και κατάλληλων τιμών παρεχόμενης ποσότητας, u_j , και μοναδιαίου κόστους, c_j , στα τόξα του διγράφου. Ειδικότερα, το μοναδιαίο κόστος είναι θετικό, δηλαδή εκφράζει ποινή, όταν ζητούμενο είναι η απαγόρευση της συγκεκριμένης μεταφοράς νερού (π.χ. αποφυγή υπερχειλίσεων) και αρνητικό όταν ζητούμενο είναι η επιβολή της συγκεκριμένης μεταφοράς νερού (π.χ. ικανοποίηση στόχου κατανάλωσης).



Σχήμα 2.7: Παράδειγμα μετασχηματισμού των συνιστωσών ενός πραγματικού υδροσυστήματος σε συνιστώσες του μοντέλου διγράφου. Ο κόμβος 0 είναι ο σωρευτικός, ενώ οι κόμβοι a, b, c προσομοιώνουν την λειτουργία του ταμιευτήρα. Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν πραγματικά υδραγωγεία, ενώ οι διακεκομμένες αντιπροσωπεύουν εικονικά τόξα που αναφέρονται στους σχετικούς περιορισμούς. Σε παρένθεση δίνονται η μεταφορική ικανότητα και το μοναδιαίο κόστος κάθε τόξου.

Η σχηματοποίηση του διγράφου, ήτοι η διαμόρφωση των ιδεατών κόμβων και τόξων, γίνεται πριν την έναρξη των υπολογιστικών διαδικασιών. Στο Σχήμα 2.7 δίνεται ένα παράδειγμα σχηματοποίησης του μοντέλου για ένα υποθετικό σύστημα αποτελούμενο από τέσσερις κόμβους και τέσσερα υδραγωγεία. Συγκεκριμένα, ο κόμβος 1 αντιστοιχεί σε ταμιευτήρα, ο κόμβος 2 σε γεώτρηση, ο κόμβος 3 σε θέση ζήτησης και ο κόμβος 4 σε θέση αλλαγής της γεωμετρίας του δικτύου. Κατάντη του ταμιευτήρα, επιβάλλεται, υπό μορφή λειτουργικού περιορισμού, η διατήρησης μιας ελάχιστης παροχής στο αντίστοιχο υδραγωγείο. Όπως είναι φανερό, οι πραγματικοί κόμβοι και τα υδραγωγεία αποτελούν μέρος μόνο των συνιστωσών του διγράφου. Πέρα από τις πραγματικές συνιστώσες, ορίζονται εικονικές συνιστώσες που απεικονίζονται με διακεκομμένη γραμμή. Συγκεκριμένα:

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

Η λειτουργία του ταμιευτήρα αναπαρίσταται μέσω τριών εικονικών κόμβων, στους οποίους πραγματοποιούνται η προσφορά, η απόληψη και η αποθήκευση νερού (οι εν λόγω κόμβοι συμβολίζονται με a , b και c , αντίστοιχα). Ειδικότερα, η προσφορά νερού περιλαμβάνει το απόθεμα του ταμιευτήρα στην αρχή του χρονικού βήματος, στο οποίο προστίθενται οι καθαρές υδρολογικές εισροές. Έξι εικονικά τόξα προσομοιώνουν τις διεργασίες που σχετίζονται με την λειτουργία του ταμιευτήρα. Το πρώτο τόξο ($a-c$) συνδέει τον κόμβο προσφοράς με τον κόμβο απόληξης και «μεταφέρει» την επιθυμητή απόληψη, r^* , όπως αυτή υπολογίζεται με εφαρμογή του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας. Η μεταφορική ικανότητα του εν λόγω τόξου τίθεται ίση με την επιθυμητή απόληψη, ενώ εισάγεται αρνητικό μοναδιαίο κόστος ίσο με $-c_3$, ώστε να επιβάλλει την απόληψη ακριβώς της επιθυμητής ποσότητας, ήτοι την ικανοποίηση του κανόνα λειτουργίας, εφόσον βεβαίως κάτι τέτοιο δεν παραβιάζει τους λοιπούς περιορισμούς του συστήματος. Το δεύτερο τόξο ($a-b$), το οποίο έχει μηδενικό μοναδιαίο κόστος και απεριόριστη μεταφορική ικανότητα, συνδέει τον κόμβο προσφοράς με τον κόμβο αποθήκευσης, «μεταφέρει» νερό που μπορεί, δυνητικά, να αποθηκευτεί στον ταμιευτήρα, εφόσον δεν παραβιάζονται οι φυσικοί και λειτουργικοί περιορισμοί. Το τρίτο τόξο ($b-c$) συνδέει τον κόμβο προσφοράς με τον κόμβο απόληξης και «μεταφέρει» νερό πέραν την επιθυμητής απόληξης, r^* . Προκειμένου να μην παραβιάζεται άσκοπα ο κανόνας λειτουργίας του ταμιευτήρα, στο εν λόγω τόξο, που θεωρείται ότι έχει απεριόριστη μεταφορική ικανότητα, τίθεται μοναδιαίο κόστος ίσο με c_3 . Τα υπόλοιπα τρία τόξα συνδέουν τον κόμβο αποθήκευσης με τον σωρευτικό κόμβο του διγράφου. Το πρώτο «γεμίζει» υποχρεωτικά τον ταμιευτήρα μέχρι τον νεκρό του όγκο, dv . Η ικανοποίηση του εν λόγω φυσικού περιορισμού εξασφαλίζεται με την επιβολή ενός πολύ μεγάλου αρνητικού μοναδιαίου κόστους, ίσου με $-c_1$, που είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο του κόστους εφαρμογής του παραμετρικού κανόνα, δηλαδή $c_1 \gg c_3$. Το επόμενο τόξο, που έχει μηδενικό κόστος, γεμίζει τον ταμιευτήρα το πολύ μέχρι την ωφέλιμη χωρητικότητα αυτού, k . Το τελευταίο τόξο, που έχει απεριόριστη μεταφορική ικανότητα, «μεταφέρει» την υπερχειλίση του ταμιευτήρα. Στην περίπτωση που η τελευταία δεν είναι επιθυμητή, δηλαδή έχει τεθεί ως λειτουργικός περιορισμός η αποφυγή των υπερχειλίσεων στον συγκεκριμένο ταμιευτήρα, ορίζεται ένα πολύ μεγάλο μοναδιαίο κόστος, ίσο, κατ' απόλυτη τιμή, με το κόστος παραβίασης του περιορισμού νεκρού όγκου, c_1 .

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

Ο κόμβος ζήτησης συνδέεται με τον σωρευτικό κόμβο του μοντέλου μέσω ενός ιδεατού τόξου μεταφορικής ικανότητας d , που αντιπροσωπεύει την κατανάλωση νερού που προφανώς δεν μπορεί να ξεπεράσει την αντίστοιχη ζήτηση. Στο τόξο τίθεται αρνητικό μοναδιαίο κόστος $-c_2$, ώστε να επιβάλει την απόληψη νερού για ικανοποίηση του σχετικού λειτουργικού περιορισμού. Μεταξύ των απόλυτων τιμών c_1 , c_2 και c_3 ισχύει η σχέση $c_1 \gg c_2 \gg c_3$, που σημαίνει πρακτικά ότι η ικανοποίηση των φυσικών περιορισμών προηγείται της ικανοποίησης των λειτουργικών περιορισμών που, ε την σειρά της, προηγείται της ικανοποίησης του παραμετρικού κανόνα, όπως ακριβώς επιβάλλουν οι απαιτήσεις του μοντέλου προσομοίωσης (βλ. 2.5.1).

Τα υδραγωγεία αντιπροσωπεύονται από τόξα που έχουν μεταφορική ικανότητα ίση με την πραγματική τους παροχευτικότητα, dc , και μοναδιαίο κόστος ίσο με το πραγματικό κόστος μεταφοράς νερού, κ . Με βάση τις υποθέσεις του μαθηματικού μοντέλου του υδροσυστήματος (βλ. 2.3.5), το τελευταίο εκφράζεται σε μονάδες ειδικής ενέργειας και είναι τάξεις μεγέθους μικρότερο από τα λοιπά εικονικά κόστη που εισάγονται για την ικανοποίηση των περιορισμών του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι η

ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης είναι τελευταία σε σειρά προτεραιότητας, όπως ακριβώς επιβάλλουν οι απαιτήσεις του μοντέλου προσομοίωσης (βλ. 2.5.1).

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

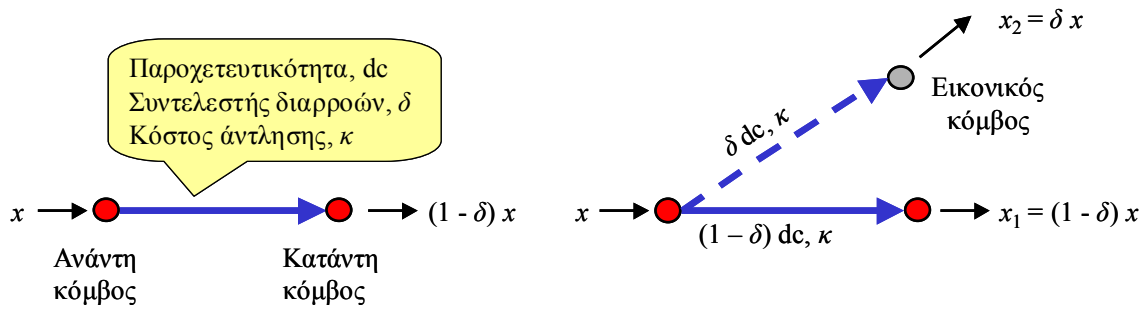
Ο *στόχος ελάχιστης παροχής*, q_{\min} , προσομοιώνεται επιμερίζοντας το σχετικό υδραγωγείο σε δύο παράλληλα τόξα μεταφορικής ικανότητας q_{\min} και $dc - q_{\min}$, αντίστοιχα. Στο πρώτο τόξο τίθεται αρνητικό μοναδιαίο κόστος $-c_2'$, ώστε να επιβάλει την μεταφορά νερού για ικανοποίηση του σχετικού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

Γενικά, για κάθε λειτουργική απαίτηση (στόχο) του συστήματος εισάγεται στο μοντέλο διγράφου ένα εικονικό τόξο, το μοναδιαίο κόστος του οποίου εξαρτάται από τη σειρά προτεραιότητας του αντίστοιχου στόχου. Ειδικότερα, στην περίπτωση στόχων απόληψης και περιορισμών ελάχιστης παροχής ή ελάχιστου αποθέματος, το κόστος είναι αρνητικό ώστε να υποχρεώσει την μεταφορά νερού. Αντίθετα, στην περίπτωση περιορισμών μέγιστης παροχής ή μέγιστου αποθέματος, το κόστος είναι θετικό ώστε να επιβάλει ποινή στην παραβίαση του εν λόγω περιορισμού. Γενικά, τα κόστη αυτά είναι, κατ' απόλυτη τιμή, μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερα την ποινής που σχετίζεται με την ικανοποίηση του κανόνα λειτουργίας και μια τάξη μεγέθους μικρότερα την ποινής που σχετίζεται με την ικανοποίηση των φυσικών περιορισμών. Λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο καθορισμού των τιμών κόστους δίνονται στο εδάφιο 2.5.5.

2.5.4 Προσομοίωση διαρροών υδραγωγείων

Με βάση τις παραδοχές του προηγούμενου εδαφίου, ένα υδросύστημα αποτελούμενο από n_1 ταμειυτήρες, n_2 γεωτρήσεις, n_3 απλούς κόμβους, n_4 υδραγωγεία χωρίς διαρροές, n_5 υδραγωγεία με διαρροές και n_6 στόχους μετασχηματίζεται σε ένα μοντέλο διγράφου, που συνίσταται από $\mu = 3n_1 + n_2 + n_3 + 1$ κόμβους και $\nu = 6n_1 + 2n_4 + 2n_5 + n_6$ τόξα. Οι άγνωστοι του μοντέλου είναι οι μεταφερόμενες ποσότητες νερού μέσω κάθε τόξου, πραγματικού ή εικονικού. Κατά συνέπεια, το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου του προβλήματος είναι ίσο με το πλήθος των τόξων του διγράφου, ν .

Αν δεν υπάρχουν διαρροές στα υδραγωγεία ($n_5 = 0$), η τοπολογία του δικτύου περιγράφεται πλήρως από το μητρώο πρόσπτωσης \mathbf{A} (βλ. 2.5.2), η διάσταση του οποίου είναι $\mu \times \nu$. Συνεπώς, προκύπτει ένα τυπικό πρόβλημα δικτυακού προγραμματισμού, το πλήθος των περιορισμών του οποίου είναι $\mu + \nu$, ήτοι μ εξισώσεις συνέχειας στους κόμβους και ν περιορισμοί μεταφορικής ικανότητας στα τόξα. Το μητρώο πρόσπτωσης ορίζεται άπαξ, ενώ οι περιορισμοί μεταφορικής ικανότητας, καθώς και τα ιδεατά κόστη, επικαιροποιούνται σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης.



Σχήμα 2.8: Μετασχηματισμός υδραγωγείου με διαρροές σε συνιστώσες μοντέλου διγράφου.

Στην περίπτωση ωστόσο που στο υδросύστημα περιλαμβάνει και υδραγωγεία με διαρροές, η δομή του προβλήματος καθίσταται πιο πολύπλοκη, καθώς εισάγονται n_5 επιπλέον περιορισμοί. Έστω υδραγωγείο με συντελεστή διαρροών, δ , στο οποίο εισέρχεται ποσότητα νερού x . Αν x_1 η ποσότητα νερού που καταλήγει στον κατάντη κόμβο και x_2 οι απώλειες λόγω διαρροών, ισχύουν οι ακόλουθες προφανείς σχέσεις (βλ. Σχήμα 2.8):

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 &= x \\ x_1 &= (1 - \delta) x \\ x_2 &= \delta x \end{aligned} \quad (2.48)$$

Με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων, προκύπτει ο φυσικός περιορισμός:

$$(1 - \delta) x_2 - \delta x_1 = 0 \quad (2.49)$$

που σε μητρική μορφή γράφεται:

$$\mathbf{B} \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (2.50)$$

όπου \mathbf{B} μητρώο διάστασης $n_5 \times n$ (όπου n_5 το πλήθος των υδραγωγείων με διαρροές), με στοιχεία $\beta_{ij} = -\delta$ για $j = 6n_1 + n_4 + i$ και $\beta_{ij} = 1 - \delta_i$ για $j = 6n_1 + n_4 + i + 1$, όπου $i = 1, \dots, n_5$. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του μητρώου \mathbf{B} είναι μηδενικά¹. Παρόλο που η σχέση (2.49) εξακολουθεί να είναι γραμμική, οι συντελεστές της, ήτοι τα στοιχεία β_{ij} , δεν λαμβάνουν πλέον τιμές από το σύνολο $\{-1, 1, 0\}$, όπως συμβαίνει με τα στοιχεία του μητρώου πρόσπτωσης, a_{ij} . Συνεπώς, δεν ισχύουν πλέον οι υποθέσεις του προβλήματος μεταφόρτωσης και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η δικτυακή μέθοδος simplex για την επίλυση του προβλήματος. Συνεπώς, χρησιμοποιείται αναγκαστικά ο τυπικός αλγόριθμος simplex, που αν και δύο τάξεις μεγέθους πιο αργός από την δικτυακή του παραλλαγή, εξακολουθεί να θεωρείται ικανοποιητικά ταχύς για τις ανάγκες της εφαρμογής που εξετάζεται².

¹ Ο συμβολισμός υποδηλώνει ότι στο διάνυσμα \mathbf{x} κατατάσσονται πρώτα τα τόξα που προσομοιώνουν τις διεργασίες των n_1 ταμιευτήρων του υδросυστήματος, στη συνέχεια τα τόξα που προσομοιώνουν την μεταφορά νερού χωρίς γραμμικές απώλειες (n_4 το πλήθος υδραγωγεία) και ακολούθως τα τόξα που προσομοιώνουν την μεταφορά νερού μέσω των υδραγωγείων με γραμμικές απώλειες (n_5 το πλήθος υδραγωγεία).

² Ο αλγόριθμος simplex που χρησιμοποιείται στον *Υδρονομέα* έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Frontline Systems (www.solver.com) και είναι ειδικά σχεδιασμένος ώστε να χειρίζεται αραιά (sparse) μητρώα, ήτοι μητρώα με μεγάλο ποσοστό μηδενικών στοιχείων, γεγονός που επιταχύνει σημαντικά την υπολογιστική διαδικασία. Σημειώνεται ότι σε ένα τυπικό δίκτυο υδραγωγείων χαρακτηρίζεται από αρκετά απλή δομή, καθώς σπανίζουν οι πολύπλοκες διακλαδώσεις, που θα είχαν ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση μητρώων πρόσπτωσης με αρκετά μη μηδενικά στοιχεία.

2.5.5 Επικαιροποίηση ιδιοτήτων διγράφου

Πριν την έναρξη των υπολογιστικών διαδικασιών του μοντέλου προσομοίωσης, διαμορφώνεται το μητρώο πρόσπτωσης, \mathbf{A} , ήτοι οι συντελεστές a_{ij} των εξισώσεων συνέχειας στους κόμβους του διγράφου. Αντίθετα, μέρος τουλάχιστον των υπόλοιπων στοιχείων εισόδου του μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού υπολογίζονται στην αρχή κάθε χρονικού βήματος. Με βάση τον συμβολισμό του εδαφίου 2.5.4, πρόκειται για:

- το $n_s \times n$ μητρώο περιορισμών διαρροών, \mathbf{B} .
- το μ -διάστατο διάνυσμα προσφοράς και ζήτησης, \mathbf{y} .
- το n -διάστατο διάνυσμα μεταφορικής ικανότητας, \mathbf{u} .
- το n -διάστατο διάνυσμα μοναδιαίου κόστους, \mathbf{c} .

Η διαμόρφωση του μητρώου \mathbf{B} γίνεται με βάση τις επίκαιρες τιμές των συντελεστών διαρροής των υδραγωγείων, καθώς οι τελευταίες θεωρούνται μεταβλητές στον χρόνο (βλ. 2.3.5).

Τα στοιχεία του διανύσματος προσφοράς και ζήτησης, \mathbf{y} , για κάθε κόμβο του διγράφου πλην του εικονικού, ήτοι για κάθε $i < \mu$, υπολογίζονται ως:

$$y_i = \begin{cases} s_i + i_i & \text{αν ο κόμβος } i \text{ προσομοιώνει προσφορά νερού σε ταμιευτήρα} \\ g_i & \text{αν ο κόμβος } i \text{ προσομοιώνει προσφορά νερού σε γεώτρηση} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (2.51)$$

Στον εικονικό κόμβο $i = \mu$ τίθεται ως ζήτηση το σύνολο της προσφοράς νερού στο σύστημα, οπότε η τιμή του στοιχείου y_μ είναι:

$$y_\mu = - \sum_{i=1}^{n_1} s_i + i_i - \sum_{i=1}^{n_2} g_i \quad (2.52)$$

Μέσω της παραπάνω σχέσης, ικανοποιείται η αναγκαία συνθήκη (2.43).

Οι χωρητικότητες των εικονικών τόξων του διγράφου αντιστοιχούν είτε σε πραγματικά μεγέθη, ήτοι χωρητικότητες ταμιευτήρων, δυναμικότητες γεωτρήσεων και παροχετευτικότητες υδραγωγείων, είτε σε επιθυμητά, όπως επιθυμητές απολήψεις, στόχοι ζήτησης, άνω και κάτω όρια αποθεμάτων ή παροχών, κλπ. Κατά συνέπεια, οι τιμές των στοιχείων του διανύσματος \mathbf{u} ορίζονται με βάση τις επίκαιρες τιμές των φυσικών και λειτουργικών περιορισμών του συστήματος (βλ. 2.5.3). Εξαίρεση αποτελούν τα τόξα άπειρης μεταφορικής ικανότητας, όπως αυτά που προσομοιώνουν «μεταφορά» υπερχειλίσεων. Η απεριόριστη μεταφορική ικανότητα εκφράζεται αριθμητικά μέσω ενός μεγάλου θετικού αριθμού, M , που οφείλει να είναι μεγαλύτερος από την μέγιστη μηνιαία εισροή στο σύστημα.

Ο τρόπος καθορισμού των τιμών του διανύσματος μοναδιαίου κόστους, \mathbf{c} , συνιστά ένα εξαιρετικά σημαντικό όσο και πρωτότυπο σημείο του μοντέλου που αναπτύχθηκε, καθώς εξασφαλίζει την ικανοποίηση των τεσσάρων συνθηκών που τέθηκαν στο εδάφιο 2.5.1. Υπενθυμίζεται ότι ζητούμενο του μοντέλου προσομοίωσης είναι, με την ακόλουθη σειρά προτεραιότητας, η ικανοποίηση των φυσικών περιορισμών, η ιεραρχική ικανοποίηση των λειτουργικών περιορισμών, η ικανοποίηση του κανόνα λειτουργίας και, τέλος, η ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς νερού. Για τον λόγο αυτό, τα μοναδιαία κόστη ομαδοποιούνται σε κατηγορίες κόστους, με τρόπο ώστε το μοναδιαίο κόστος κάθε τόξου που ανήκει στην κατηγορία k να ξεπερνά το αθροιστικό κόστος όλων των τόξων των προηγούμενων κατηγοριών, ήτοι:

$$|c|^{[k]} > \sigma^{[k]} = \sum_{j=1}^{n(k)} |c_j| \quad (2.53)$$

όπου $n(k)$ το πλήθος των τόξων του διγράφου που κατατάσσονται έως την k κατηγορία κόστους. Άμεση συνέπεια της (2.53) είναι αφενός η ανεξάρτητη ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κάθε κατηγορίας και αφετέρου η κατά προτεραιότητα ελαχιστοποίηση των τιμών κόστους που ανήκουν σε υψηλότερες κατηγορίες.

Στο μοντέλο διγράφου, κάθε τόξο προσομοιώνει μια συγκεκριμένη διεργασία με μηδενικό, αρνητικό ή θετικό μοναδιαίο κόστος, ανάλογα με τον αν η πραγματοποίησή της είναι αδιάφορη, επιθυμητή ή ανεπιθύμητη, αντίστοιχα. Όπως εξηγείται στο εδάφιο 2.5.3, χωρίς κόστος πραγματοποιούνται η μεταφορά των εισροών των ταμιευτήρων, η αποθήκευση νερού στους ταμιευτήρες καθώς και η μη εξάντληση του απολήψιμου δυναμικού των γεωτρήσεων. Κάθε άλλη διεργασία ή, ισοδύναμα, κάθε άλλος τύπος τόξου κατατάσσεται στην σχετική κατηγορία κόστους που φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Με τον τρόπο αυτό, η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους «μεταφοράς» νερού μέσω των τόξων του διγράφου εξασφαλίζει πρώτα την ικανοποίηση των περιορισμών πλήρωσης του νεκρού όγκου και αποφυγής των ανεπιθύμητων υπερχειλίσεων (κατηγορία 1), μετά την ικανοποίηση των λειτουργικών περιορισμών (κατηγορία 2), έπειτα την τήρηση του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας, ήτοι την ικανοποίηση των επιθυμητών απολήψεων (κατηγορία 3) και τέλος την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς νερού μέσω του δικτύου των υδραγωγείων και γεωτρήσεων, ήτοι της ενέργειας άντλησης (κατηγορία 4). Αυτό σημαίνει ότι η οικονομικότητα της διαχείρισης δεν επηρεάζει τον τρόπο λειτουργίας των ταμιευτήρων (δηλαδή δεν παραβιάζεται ο κανόνας λειτουργίας ώστε να επιβληθούν λιγότερες αντλήσεις) και, αντίστοιχα, ο τρόπος λειτουργίας των ταμιευτήρων δεν επηρεάζει τους περιορισμούς του συστήματος (δηλαδή δεν παραβιάζονται οι στόχοι που θέτει ο διαχειριστής του συστήματος ώστε να τηρηθεί επακριβώς ο κανόνας λειτουργίας των ταμιευτήρων).

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες μοναδιαίου κόστους και σχετικές διεργασίες που πραγματοποιούνται μέσω των εικονικών τόξων του μοντέλου διγράφου.

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

Για τον προσδιορισμό των τιμών μοναδιαίου κόστους ακολουθείται ένας αναδρομικός αλγόριθμος, που ξεκινά από τα κόστη χαμηλότερης προτεραιότητας. Πρώτα ορίζονται τα μοναδιαία κόστη των τόξων που προσομοιώνουν την μεταφορά νερού μέσω των υδραγωγείων και των γεωτρήσεων, που τίθενται ίσα με την αντίστοιχη τιμή της ειδικής ενέργειας. Ακόμη και στα τόξα που προσομοιώνουν την μεταφορά νερού χωρίς άντληση τίθεται ένα πολύ μικρό μοναδιαίο κόστος, ϵ , ώστε να εμποδίζεται η άσκοπη μεταφορά ή ανακύκλωση του νερού μέσω του δικτύου σε βάρος της αποθήκευσης αυτού στους ταμιευτήρες. Η τιμή του ϵ οφείλει να είναι μικρότερη από την μικρότερη τιμή της ειδικής ενέργειας των συνιστωσών του δικτύου.

Σημειώνεται ότι στα τόξα που προσομοιώνουν απόληψη νερού από γεωτρήσεις τίθεται το αντίστοιχο πραγματικό κόστος (υπό μορφή ειδικής ενέργειας) μόνο εφόσον το ποσοστό πλήρωσης των ταμιευτήρων βρίσκεται εντός των ορίων που επιβάλλει ο κανόνας λειτουργίας τους, δηλαδή:

$$b_j^{\text{down}} \leq \frac{\sum_{i=j}^{n_1} s_i - dv_i}{\sum_{i=j}^{n_1} k_i - dv_i} \leq b_j^{\text{up}} \quad (2.54)$$

Εφόσον δεν ισχύει η παραπάνω συνθήκη, τότε υπολογίζεται το συνολικό μοναδιαίο κόστος χρήσης των γεωτρήσεων, που είναι ίσο με:

$$c_G = \sum_{j=1}^{n_2} \kappa_j \quad (2.55)$$

όπου κ_j η ειδική ενέργεια της γεώτρησης j . Στην περίπτωση που το ποσοστό πλήρωσης των ταμιευτήρων δεν ξεπερνά το ποσοστό b_j^{down} , τότε η απόληψη υπόγειου νερού θεωρείται ότι γίνεται με αρνητικό μοναδιαίο κόστος, ίσο με $-c_G$. Με τον τρόπο αυτό δίνεται προτεραιότητα στην χρήση εφεδρικών υδατικών πόρων στην περίπτωση μείωσης των επιφανειακών αποθεμάτων νερού κάτω από τον όριο b_j^{down} . Ομοίως, αν το ποσοστό πλήρωσης των ταμιευτήρων ξεπερνά το ποσοστό b_j^{up} , τότε η απόληψη υπόγειου νερού θεωρείται ότι γίνεται με κόστος c_G . Με τον τρόπο αυτό, εμποδίζεται η χρήση εφεδρικών υδατικών πόρων στην περίπτωση που τα επιφανειακά αποθέματα ξεπερνούν τον όριο b_j^{up} . Από τα παραπάνω προκύπτει ότι σε αντίθεση με τα υπόλοιπα τόξα του γράφου, το μοναδιαίο κόστος των τόξων μεταφοράς των απολήψεων από γεωτρήσεις δεν είναι σταθερό αλλά επικαιροποιείται σε κάθε χρονικό βήμα, ανάλογα με το τρέχον καθεστώς των αποθεμάτων.

Με βάση τα παραπάνω, το αθροιστικό κόστος της κατηγορίας 4 είναι ίσο με:

$$\sigma^{[4]} = \sum_{j=1}^{n_2+n_4+n_5} \kappa_j + \sum_{j=1}^{n_2+n_4+n_5} \varepsilon \quad (2.56)$$

Στην συνέχεια ορίζονται τα μοναδιαία κόστη των τόξων που προσομοιώνουν τις επιφανειακές απολήψεις νερού και είναι κοινά για όλους τους ταμιευτήρες. Ειδικότερα, το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς της επιθυμητής απόληψης είναι αρνητικό, ενώ το ίσο, κατ' απόλυτη τιμή, μοναδιαίο κόστος μεταφοράς της επιπλέον απόληψης είναι θετικό. Αυτό σημαίνει ότι η παραβίαση του παραμετρικού κανόνα είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω έχει την ίδια ακριβώς επίπτωση στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού. Συνεπώς, το μοναδιαίο κόστος της κατηγορίας 3 είναι, κατ' απόλυτη τιμή ίσο, με:

$$c^{[3]} = \sigma^{[4]} + \varepsilon \quad (2.57)$$

ενώ το αθροιστικό κόστος αυτής είναι:

$$\sigma^{[3]} = \sigma^{[4]} + \sum_{i=1}^{2n_1} c^{[3]} \quad (2.58)$$

Ακολούθως ορίζονται τα μοναδιαία κόστη των τόξων που σχετίζονται με τους λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος. Ως γνωστόν, οι εν λόγω περιορισμοί οφείλουν να ικανοποιούνται σύμφωνα με την σειρά προτεραιότητας που επιβάλλει ο διαχειριστής του συστήματος. Αν k είναι η σειρά προτεραιότητας του σχετικού περιορισμού και n_6 το πλήθος των λειτουργικών περιορισμών του συστήματος, τότε το αντίστοιχο μοναδιαίο κόστος είναι, κατ' απόλυτη τιμή ίσο, με:

$$c_k^{[2]} = 2^{n_6-k} (\sigma^{[3]} + \varepsilon) \quad (2.59)$$

Το αθροιστικό κόστος της κατηγορίας 2 είναι ίσο με:

$$\sigma^{[2]} = \sigma^{[3]} + \sum_{k=1}^{n_6} c_k^{[2]} \quad (2.60)$$

Τέλος, υπολογίζονται τα κοινά μοναδιαία κόστη των τόξων που προσομοιώνουν είτε την μεταφορά ανεπιθύμητων υπερχειλίσεων ή την πλήρωση των ταμιευτήρων μέχρι τον νεκρό τους όγκο (αρνητικά κόστη), με απόλυτη τιμή:

$$c^{[1]} = \sigma^{[2]} + \varepsilon \quad (2.61)$$

Συνεπώς, η τήρηση των σχετικών περιορισμών που είναι πραγματικοί (φυσικοί) και όχι επιθυμητοί (λειτουργικοί) γίνεται κατ' απόλυτη προτεραιότητα. Με τον τρόπο αυτό, το μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού πρώτα επιβάλλει την πλήρωση όλων των ταμιευτήρων μέχρι τον νεκρό τους όγκο, ενώ πραγματοποιεί υπερχειλίσεις μόνο αν ακόμη και η παραβίαση των λειτουργικών περιορισμών (ήτοι η παραβίαση των στόχων μέγιστου αποθέματος στους ταμιευτήρες και μέγιστης παροχής στα υδραγωγεία) δεν επαρκεί για την επιφανειακή αποθήκευση της συνολικής προσφοράς νερού. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που η υπερχειλίση ενός ταμιευτήρα θεωρείται αδιάφορη, τότε αντί της πολύ μεγάλης, και συνεπώς αποτρεπτικής, τιμής $c^{[1]}$ τίθεται το ελάχιστο μοναδιαίο κόστος του μοντέλου, ήτοι η τιμή ε .

2.5.6 Αλγόριθμος προσομοίωσης

Το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου προσομοίωσης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.9. Το εν λόγω διάγραμμα αναφέρεται στην γενική περίπτωση της καταληκτικής προσομοίωσης (βλ. 2.1.5), όπου εξετάζονται ρ υδρολογικά σενάρια με κοινή ημερομηνία εκκίνησης και μήκους τ μηνών έκαστο, ώστε το σύνολο των προσομοιωμένων χρονικών βημάτων να ισούται με $n = \rho \times \tau$. Η προσομοίωση μόνιμης κατάστασης μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση της καταληκτικής, θεωρώντας $\rho = 1$. Οι σχετικές υπολογιστικές διαδικασίες εκτελούνται σε μηνιαία χρονικά βήματα.

Στοιχεία εισόδου του αλγορίθμου είναι σχηματοποίηση του υδροσυστήματος και οι τιμές των παραμέτρων των κανόνων λειτουργίας των ταμιευτήρων και γεωτρήσεων. Πριν την έναρξη της προσομοίωσης, διαμορφώνεται το μοντέλο διγράφου, ήτοι το μητρώο πρόσπτωσης που περιγράφει την διάταξη των ιδεατών κόμβων και τόξων (βλ. 2.5.3). Επιπλέον, ορίζονται τα σταθερά χαρακτηριστικά μεγέθη του μοντέλου, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2.5.5.

Η προσομοίωση εκτελείται σε δύο βρόχους. Ο εξωτερικός βρόχος αναφέρεται στα υδρολογικά σενάρια, ενώ ο εσωτερικός στην προσομοίωση των διεργασιών κάθε σεναρίου. Πριν την εκτέλεση κάθε σεναρίου επαναφέρονται οι συνθήκες εκκίνησης, ήτοι οι αρχικές στάθμες των ταμιευτήρων, ενώ μετά την ολοκλήρωση των υπολογιστικών διαδικασιών εκτιμάται το αντίστοιχο δειγματικό μέτρο επίδοσης (βλ. 2.6). Το αθροιστικό μέτρο επίδοσης του συστήματος, που συνιστά και την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, προκύπτει μετά την προσομοίωση του συνόλου των υδρολογικών σεναρίων.

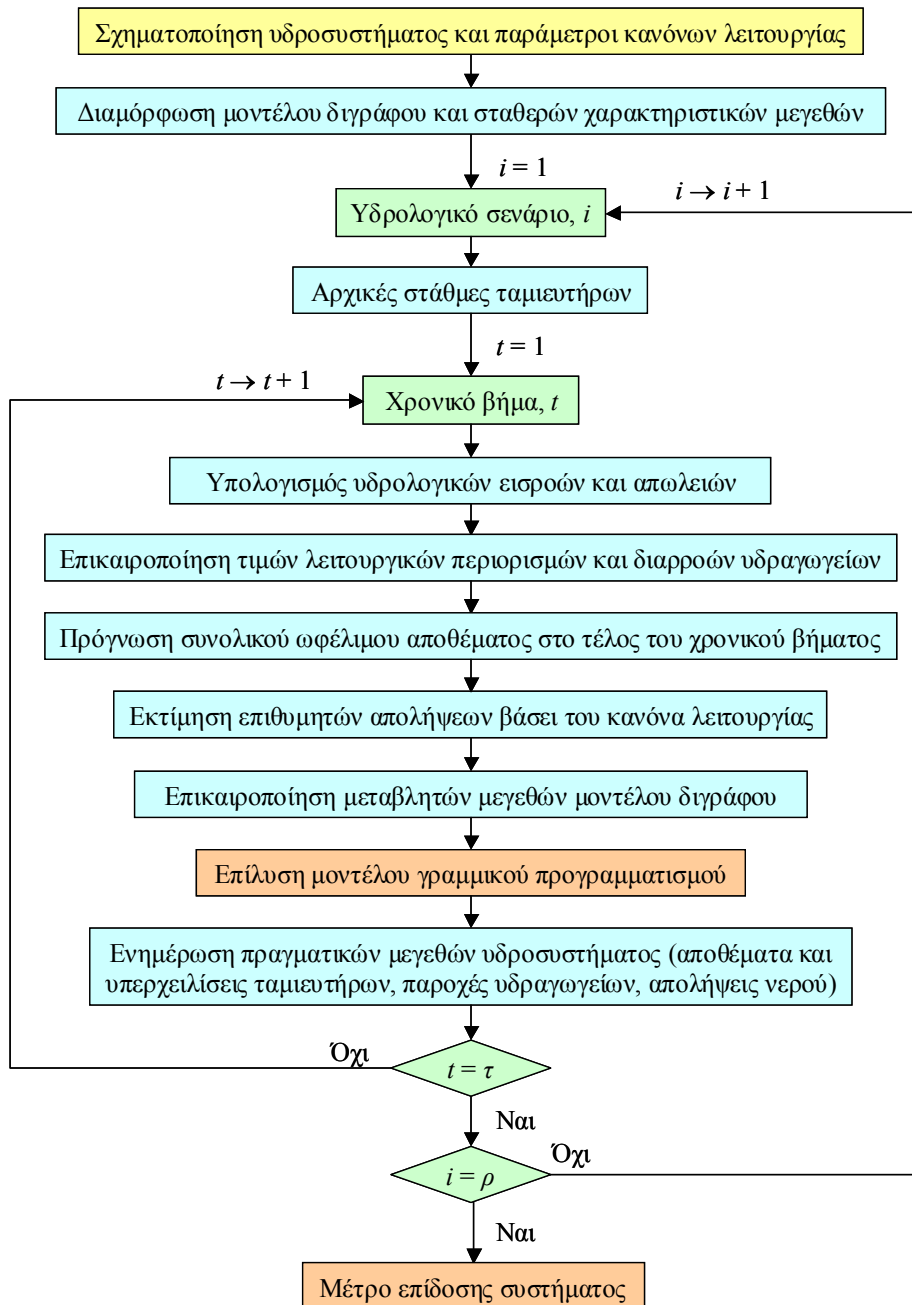
Οι υπολογιστικές διαδικασίες κάθε χρονικού βήματος είναι:

Βήμα 1ο: Υπολογίζονται οι υδρολογικές καθαρές εισροές των ταμιευτήρων, με βάση τις τιμές απορροής, βροχόπτωσης, εξάτμισης και υπόγειων διαφυγών. Η προσομοίωση των τελευταίων γίνεται παράγοντας τυχαίους κανονικούς αριθμούς και εφαρμόζοντας τη σχέση (2.15).

Βήμα 2ο: Επικαιροποιούνται οι τιμές των λειτουργικών περιορισμών, ήτοι των στόχων ζήτησης και των ορίων παροχής και αποθέματος, καθώς και των συντελεστών διαρροής στα υδραγωγεία.

Βήμα 3ο: Με βάση τα τρέχοντα αποθέματα νερού, τις τιμές των καθαρών εισροών στους ταμιευτήρες και τους στόχους ζήτησης νερού, εκτιμάται το αναμενόμενο συνολικό ωφέλιμο απόθεμα στο τέλος του χρονικού βήματος.

Βήμα 4ο: Με βάση τον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας υπολογίζονται τα αποθέματα-στόχοι των ταμιευτήρων και, συναρτήσει αυτών, οι αντίστοιχες επιθυμητές απολήψεις.



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου προσομοίωσης.

Βήμα 5ο: Επικαιροποιούνται όλα τα μεταβλητά χαρακτηριστικά μεγέθη του μοντέλου διγράφου, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2.5.5.

Βήμα 6ο: Επιλύεται το μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού και επιστρέφονται οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών ελέγχου, x_j , που ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος του δικτύου (πραγματικό και εικονικό).

Βήμα 7ο: Οι μεταβλητές ελέγχου x_j αντιστοιχίζονται στις μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου του υδροσυστήματος, ώστε να εκφράζουν πραγματικά και όχι ιδεατά μεγέθη (αποθέματα και υπερχειλίσεις ταμιευτήρων, παροχές υδραγωγείων, απολήψεις νερού).

Βήμα 8ο: επικαιροποιούνται το υδρολογικό και ενεργειακό ισοζύγιο του υδροσυστήματος, και εν γένει όλα τα προσομοιωμένα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέτρου επίδοσης του συστήματος (βλ. 2.5.7).

2.5.7 Μέτρα επίδοσης υδροσυστήματος

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

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

Η επίδοση του συστήματος αποτιμάται μετά την ολοκλήρωση των υπολογιστικών διαδικασιών του αλγορίθμου προσομοίωσης (βλ. 2.5.6).

Ετήσια πιθανότητα αστοχίας

Έστω σύστημα υδατικών πόρων στο οποίο εισάγονται n_k λειτουργικοί περιορισμοί και έστω n το πλήθος των προσομοιωμένων μηνιαίων χρονικών βημάτων. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2.3.6, για κάθε περιορισμό k ορίζεται μια μέγιστη πιθανότητα αστοχίας, α_k^{\max} , και ένας συντελεστής βάρους, ω_k . Αν στο χρονικό βήμα t η επιτευχθείσα τιμή του σχετικού περιορισμού, $x_k(t)$, διαφέρει¹ της αντίστοιχης επιθυμητής, $x_k^*(t)$, τότε θεωρείται ότι κατά το υδρολογικό έτος:

$$y = (t \text{ div } 12) + 1 \quad (2.62)$$

καταγράφεται ετήσια αστοχία ως προς την επίτευξη του περιορισμού k . Συνεπώς, αν έστω και ένας μήνας του υδρολογικού έτους παρουσιάζει έλλειμμα, τότε θεωρείται ότι αστοχεί όλο το έτος. Ο λόγος των ετών που αστόχησαν προς το σύνολο των προσομοιωμένων ετών συνιστά τον *δείκτη ετήσιας αστοχίας*, α_k (βλ. 2.1.2).

Το μέσο ετήσιο ποσοστιαίο έλλειμμα (ή πλεόνασμα, εφόσον αναφερόμαστε σε περιορισμό μεγίστου), υπολογίζεται ως:

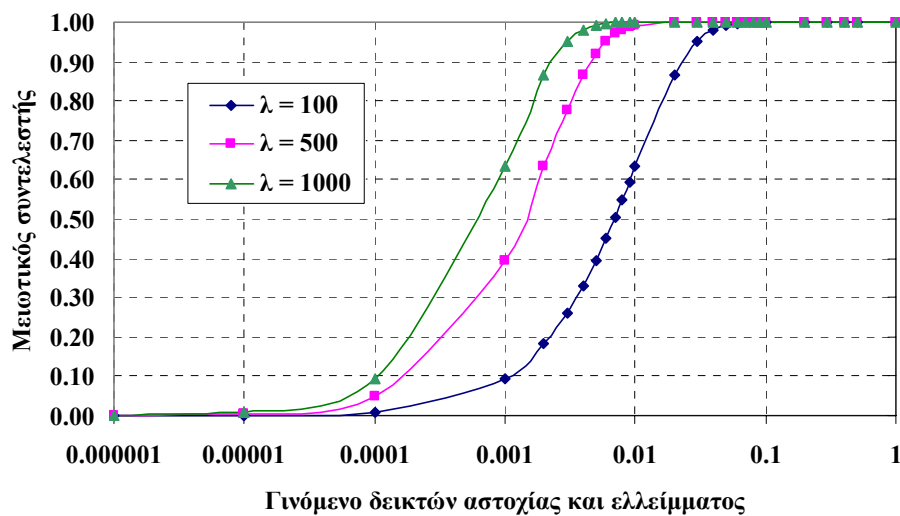
$$\beta_k = 12 \frac{\sum_{t=1}^n |x_k^*(t) - x_k(t)|}{\sum_{t=1}^n x_k^*(t)} \quad (2.63)$$

Είναι προφανές ότι ο δείκτης α_k δεν είναι απόλυτα αντιπροσωπευτικός των επιπτώσεων της αστοχίας ενός περιορισμού, στην περίπτωση που η αστοχία είναι οριακή, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής και της επιτευχθείσας τιμής είναι πολύ μικρή. Για τον λόγο αυτό, ο δείκτης αστοχίας πολλαπλασιάζεται με έναν μειωτικό συντελεστή που ορίζεται ως:

$$\pi_k = \begin{cases} 1 - \exp(-\lambda \beta_k \alpha_k) & \alpha_k > 0 \\ 0 & \alpha_k = 0 \end{cases} \quad (2.64)$$

¹ Εφόσον ο περιορισμός αναφέρεται στην απόληψη συγκεκριμένης ποσότητας ή την τήρηση ελάχιστων ορίων αποθέματος σε ταμιευτήρα ή παροχής σε υδραγωγείο, τότε ως αστοχία νοείται η περίπτωση ελλείμματος, ήτοι $x_k(t) < x_k^*(t)$. Αντίθετα, αν ο περιορισμός αναφέρεται στην τήρηση μέγιστων ορίων αποθέματος ή παροχής, τότε ως αστοχία νοείται η περίπτωση πλεονάσματος, ήτοι $x_k(t) > x_k^*(t)$.

όπου λ παράμετρος κλίμακας. Ο όρος ποιής υποδηλώνει ότι αν είτε ο δείκτης ετήσιας αστοχίας, α_k , είτε ο δείκτης ετήσιου ελλείμματος, β_k , είτε το γινόμενο τους είναι πολύ μικρά, τότε ο συντελεστής π_k τείνει προς το μηδέν. Στο Σχήμα 2.10 απεικονίζεται η γραφική παράσταση του π_k συναρτήσει του γινομένου $\alpha_k \beta_k$, για χαρακτηριστικές τιμές της παραμέτρου λ . Σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα, το γράφημα έχει την χαρακτηριστική μορφή μιας καμπύλης τύπου «S», που σημαίνει ότι τείνει γρήγορα προς το μηδέν για σχετικά μικρές τιμές του γινομένου $\alpha_k \beta_k$, ενώ τείνει γρήγορα προς την μονάδα για σχετικά μεγάλες τιμές της ποσότητας $\alpha_k \beta_k$. Για ενδιάμεσες τιμές, ο συντελεστής π_k μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά μεταξύ των οριακών τιμών 0 και 1. Η ασυμπτωτική συμπεριφορά της καμπύλης εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου λ . Όσο μικρότερη είναι η τιμή του εν λόγω συντελεστή, τόσο πιο ομαλό είναι το σχήμα της καμπύλης. Αντίθετα, όσο αυξάνει η τιμή του λ τόσο πιο γρήγορα τείνει η τιμή του π_k στην μονάδα. Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιείται η τιμή $\lambda = 500$, που σημαίνει, πρακτικά, ότι ο συντελεστής π_k αρχίζει να μειώνεται για γινόμενο $\alpha_k \beta_k$ της τάξης του 1%.



Σχήμα 2.10: Γραφική απεικόνιση, σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα, του μειωτικού συντελεστή, π_k , για διάφορες τιμές της παραμέτρου κλίμακας λ .

Με βάση τα παραπάνω, το καθολικό μέτρο αστοχίας υπολογίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα:

$$\alpha = \frac{\sum_{k=1}^{n_6} \omega_k \pi_k \alpha_k}{\sum_{k=1}^{n_6} \omega_k} \quad (2.65)$$

και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1.

Μέσο ετήσιο μέτρο αστοχίας

Στην προσομοίωση μόνιμης κατάστασης, όπου αναπαρίσταται η λειτουργία ενός συστήματος υδατικών πόρων για θεωρητικά άπειρο χρονικό ορίζοντα ελέγχου, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην μακροχρόνια επίδοση αυτού, η οποία ενδιαφέρει σε επίπεδο σχεδιασμού ή στρατηγικής διαχείρισης των σχετικών έργων αξιοποίησης. Στην περίπτωση αυτή εισάγεται μια ενιαία συνθετική χρονοσειρά εισροών πολύ μεγάλου μήκους, και η πιθανότητα αστοχίας υπολογίζεται ως το σύνολο των ελλειμματικών προς το σύνολο των προσομοιωμένων υδρολογικών ετών.

Στην καταληκτική προσομοίωση, η οποία εφαρμόζεται σε επίπεδο επιχειρησιακής διαχείρισης, χρησιμοποιείται όχι μια ενιαία χρονοσειρά αλλά ένα σύνολο ρ ισοπίθανων σεναρίων πρόγνωσης, με

κοινή ημερομηνία έναρξης και κοινό μήκος τ , βάσει των οποίων διερευνάται η επίδοση του συστήματος για χρονικό ορίζοντα λίγων μόνο ετών. Στην περίπτωση αυτή, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην πιθανότητα αστοχίας, α_{ky} , κάθε περιορισμού k για κάθε υδρολογικό έτος, y , ξεχωριστά. Η τελευταία προκύπτει ως το σύνολο των σεναρίων εισροών στα οποία παρατηρήθηκε έλλειμμα κατά το συγκεκριμένο έτος προς το πλήθος των σεναρίων, ρ . Με βάση τον παραπάνω ορισμό, το μέσο ετήσιο μέτρο αστοχίας κάθε στόχου υπολογίζεται ως:

$$\alpha_k' = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{y=1}^{\tau} \alpha_{ky}^2} \quad (2.66)$$

Η υιοθέτηση του παραπάνω δείκτη λαμβάνει υπόψη την περίπτωση τα ελλείμματα να μην κατανέμονται ομοιόμορφα στην περίοδο ελέγχου, τ , αλλά να συγκεντρώνονται σε περιορισμένο τμήμα αυτής.

Αντίστοιχα, το καθολικό μέσο ετήσιο μέτρο αστοχίας υπολογίζεται ως το σταθμισμένο άθροισμα:

$$\alpha' = \frac{\sum_{k=1}^{n_6} \omega_k \pi_k \alpha_k'}{\sum_{k=1}^{n_6} \omega_k} \quad (2.67)$$

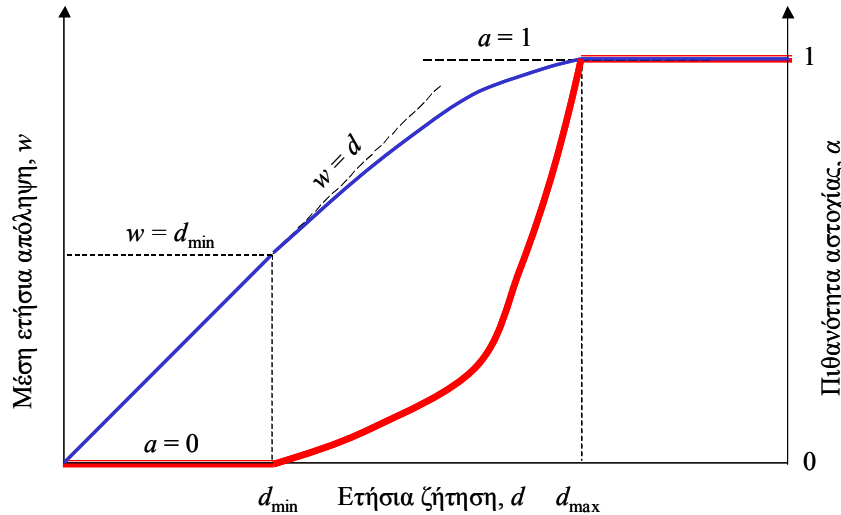
Ετήσια ασφαλής απόληψη

Έστω X τυχαία μεταβλητή που εκφράζει την ετήσια απόληψη νερού από ένα σύστημα υδατικών πόρων. Ως *ασφαλής* ή *εγγυημένη* απόληψη, x^* , νοείται η μέγιστη ετήσια ζήτηση που επιτυγχάνεται για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας, ή, ισοδύναμα, για δεδομένη (και προφανώς μικρή) πιθανότητα αστοχίας, α , ήτοι η τιμή x^* για την οποία ισχύει:

$$P(X = x^*) = 1 - \alpha \quad (2.68)$$

Ο παραπάνω ορισμός υποδηλώνει ότι η ετήσια ζήτηση οφείλει να είναι σταθερή, διαφορετικά δεν έχει νόημα η έννοια της ασφαλούς απόληψης. Για δεδομένη ασφαλή απόληψη, υπάρχει μια συγκεκριμένη πολιτική διαχείρισης, με την οποία επιτυγχάνεται η ελάχιστη πιθανότητα αστοχίας. Κατά συνέπεια, αν d είναι η συνολική ετήσια ζήτηση του συστήματος και α_{\min} η αντίστοιχη ελαχιστοποιημένη πιθανότητα αστοχίας, όπως αυτή ορίζεται στην (2.65), τότε η ποσότητα $x^* = d$ θεωρείται ως η ασφαλής απόληψη του συστήματος για επίπεδο αξιοπιστίας $1 - \alpha_{\min}$.

Επειδή οι απολήψεις ενός υδροσυστήματος είναι συνεχώς τυχαίες μεταβλητές, οι κατανομή που ακολουθούν είναι ασυμπτωτική. Αυτό σημαίνει ότι, θεωρητικά, ακόμη και μια ελάχιστη ζήτηση έχει μη μηδενική πιθανότητα αστοχίας, όπως και μια εξαιρετικά υψηλή ζήτηση έχει πιθανότητα αστοχίας μικρότερη της μονάδας. Στην πράξη βεβαίως, δεδομένου ότι η στοχαστική προσομοίωση είναι μια προσεγγιστική μέθοδος εκτίμησης της εν λόγω πιθανότητας, από την εφαρμογή του μοντέλου προκύπτουν μέτρα αστοχίας με τιμές μηδέν και ένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Με βάση την παραδοχή αυτή, υπάρχει πάντοτε ένα όριο d_{\min} κάτω από το οποίο η μέση ετήσια απόληψη ταυτίζεται με την ετήσια ζήτηση και, συνεπώς, με την ετήσια ασφαλή απόληψη ενός συστήματος υδατικών πόρων. Αυτό σημαίνει ότι για ζήτηση $d < d_{\min}$ η πιθανότητα αστοχίας, α , καθώς και το μέσο ετήσιο ποσοστιαίο έλλειμμα, β , είναι μηδέν. Για $d > d_{\min}$, η μέση ετήσια απόληψη υπολείπεται της ζήτησης, και συνεπώς η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Μετά από ένα όριο d_{\max} , η πιθανότητα αστοχίας γίνεται ίση με την μονάδα, η μέση ετήσια απόληψη δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω και το μέσο ποσοστιαίο έλλειμμα τείνει ασυμπτωτικά προς την μονάδα.



Σχήμα 2.11: Γραφική απεικόνιση των καμπυλών μέσης ετήσιας απόληψης (λεπτή γραμμή) και ελαχιστοποιημένης αστοχίας (παχιά γραμμή), συναρτήσεως της ετήσιας ζήτησης, d , για ένα σύστημα υδατικών πόρων που μελετάται μέσω στοχαστικής προσομοίωσης.

Μέσο ετήσιο κόστος λειτουργίας

Το μέσο ετήσιο κόστος λειτουργίας, εκφραζόμενο σε όρους κατανάλωσης ενέργειας, περιλαμβάνει την ενέργεια που καταναλώνεται από τα ωστικά και ανυψωτικά αντλιοστάσια του δικτύου σε μέση ετήσια βάση, ήτοι:

$$\kappa = \frac{12}{n} \sum_{t=1}^n \left(\sum_{i=1}^{n_2} \kappa_i w_i(t) + \sum_{j=1}^{n_4+n_5} \kappa_j q_j(t) \right) \quad (2.69)$$

όπου $w_i(t)$ η μηνιαία απόληψη από την γεώτρηση, i , στην οποία αντιστοιχεί ένα ανυψωτικό αντλιοστάσιο ειδικής ενέργειας κ_i , n_2 το πλήθος των γεωτρήσεων, $q_j(t)$ η διερχόμενη ποσότητα νερού μέσω του υδραγωγείου j , στο οποίο αντιστοιχεί ένα ωστικό αντλιοστάσιο ειδικής ενέργειας κ_j , και n_4 και n_5 το πλήθος των υδραγωγείων χωρίς και με διαρροές, αντίστοιχα.

2.6 Εύρεση βέλτιστης πολιτικής διαχείρισης

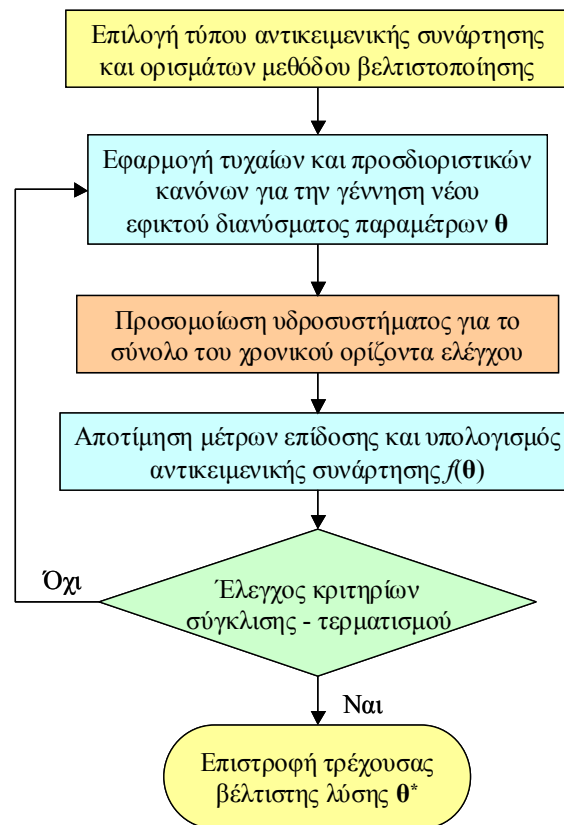
2.6.1 Περιγραφή της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Η πολιτική διαχείρισης του συστήματος εκφράζεται μέσω των κανόνων λειτουργίας των ταμιευτήρων και των γεωτρήσεων, η μαθηματική διατύπωση των οποίων γίνεται παραμετρικά. Συγκεκριμένα, οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων ορίζονται συναρτήσεως των παραμέτρων a_i και b_i , που είναι δύο ανά ταμιευτήρα (ή μόνο μία, εφόσον θεωρηθεί ο ομογενής κανόνας 2.28) και μπορεί να μεταβάλλονται ανάλογα με την εποχή του έτους (βλ. 2.4.2). Κατά κανόνα, το υδρολογικό έτος χωρίζεται σε μια περίοδο πλήρωσης (χειμώνας και άνοιξη), κατά την οποία ο ρυθμός των εισροών υπερβαίνει τον ρυθμό των εκφορτίσεων (απολήψεων), και σε μια περίοδο εκκένωσης (καλοκαίρι και φθινόπωρο), κατά την οποία συμβαίνει το αντίθετο. Από την άλλη πλευρά, οι κανόνες λειτουργίας των γεωτρήσεων ορίζονται συναρτήσεως των ορίων b_i^{up} και b_i^{down} , που μπορεί να είναι κοινά για όλες τις γεωτρήσεις (βλ. 2.4.4). Σημειώνεται ότι οι παράμετροι λειτουργίας του συστήματος, οι οποίες συμβολίζονται ως ένα διάνυσμα $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$, είναι αδιάστατα μεγέθη, λαμβάνουν δηλαδή τιμές στο διάστημα $[0, 1]$.

Στην περίπτωση που οι παράμετροι θ θεωρούνται γνωστές, η επίδοση του συστήματος αποτιμάται μέσω του μοντέλου προσομοίωσης. Διαφορετικά, οι τιμές των παραμέτρων προκύπτουν με δοκιμές,

χρησιμοποιώντας π.χ. κάποιο από τα μέτρα επίδοσης που αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2.5.7 για την αξιολόγηση των εναλλακτικών πολιτικών διαχείρισης και επιλέγοντας το σύνολο παραμέτρων που μεγιστοποιεί το εν λόγω μέτρο. Αν και η παραπάνω διαδικασία αναζήτησης μπορεί να γίνει με το «χέρυ», είναι πολύ πιο αποτελεσματικό να χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες τεχνικές, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τους τον συστηματικό τρόπο μεταβολής της τιμής του μέτρου επίδοσης συναρτήσει των τιμών των παραμέτρων. Η συστηματική διαδικασία αναζήτησης των παραμέτρων καλείται *βελτιστοποίηση* (optimisation), ενώ το εν λόγω μέτρο επίδοσης καλείται *αντικειμενική συνάρτηση* (objective function), και συμβολίζεται με $f(\theta)$.

Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε υποστηρίζει εναλλακτικούς τύπους αντικειμενικών συναρτήσεων, στις οποίες συνδυάζονται οι δείκτες επίδοσης που αναφέρθηκαν προηγουμένως (2.6.2). Επιπλέον, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου αναπτύχθηκε ένας νέος αλγόριθμος, που εφαρμόζεται τόσο για την βελτιστοποίηση της πολιτικής διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας όσο και για την βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού (Ευστρατιάδης κ.ά., 2003). Το σχετικό μεθοδολογικό πλαίσιο αναπτύσσεται στο υποκεφάλαιο 2.7.



Σχήμα 2.12: Διάγραμμα ροής διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Στο Σχήμα 2.12 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Για την εκκίνηση της διαδικασίας απαιτείται ο προσδιορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης και ο καθορισμός ορισμένων ορισμάτων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, που σχετίζονται με την διαδικασία αναζήτησης καθώς και τα κριτήρια σύγκλισης και τερματισμού (βλ. 2.7.3). Σε κάθε επαναληπτικό κύκλο, ο αλγόριθμος γεννά ένα νέο διάνυσμα παραμέτρων, θ , που εκφράζει την συγκεκριμένη πολιτική διαχείρισης του συστήματος. Στην συνέχεια καλείται ο αλγόριθμος προσομοίωσης και υπολογίζεται η επίδοση της επίκαιρης πολιτικής διαχείρισης, ήτοι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, $f(\theta)$. Η γέννηση κάθε νέου συνδυασμού παραμέτρων βασίζεται στους ήδη ελεγμένους συνδυασμούς, και γίνεται με εφαρμογή ενός συνδυασμού προσδιοριστικών και τυχαίων μαθηματικών

κανόνων. Εφόσον ικανοποιούνται τα κριτήρια σύγκλισης ή τερματισμού, τα οποία ορίζει ο χρήστης, ο αλγόριθμος διακόπτεται και επιστρέφει την καλύτερη από τις λύσεις που έχουν διερευνηθεί μέχρι εκείνο το σημείο, η οποία εκλαμβάνεται ως η βέλτιστη του προβλήματος και συμβολίζεται με θ^* .

2.6.2 Τύποι αντικειμενικής συνάρτησης

Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για την υποστήριξη της διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας υποστηρίζει τους ακόλουθους τύπους αντικειμενικών συναρτήσεων:

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

Η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος για δεδομένες τιμές λειτουργικών περιορισμών διατυπώνεται μαθηματικά ως:

$$\min a \quad (2.70)$$

Στην περίπτωση καταληκτικής προσομοίωσης, ο δείκτης ετήσιας πιθανότητας αστοχίας, a , που προφανώς εξαρτάται από τις παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος, θ , αντικαθίσταται από τον αντίστοιχό του, a' .

Η μεγιστοποίηση της ασφαλούς απόληψης του συστήματος για δεδομένη αξιοπιστία ή, ισοδύναμα, δεδομένη πιθανότητα αστοχίας των στόχων κατανάλωσης νερού διατυπώνεται μαθηματικά ως:

$$\max d \quad (2.71)$$

έτσι ώστε $a_k = a_k^{\max}$

Στην περίπτωση αυτή, εισάγεται μια επιπλέον παράμετρος στο πρόβλημα, ήτοι η συνολική ετήσια ζήτηση, d , η οποία θεωρείται σταθερή στον χρόνο. Επειδή ο χειρισμός των περιορισμών $a_k = a_k^{\max}$, όπου a_k η επιτευχθείσα και a_k^{\max} η επιθυμητή πιθανότητα αστοχίας κάθε στόχου ζήτησης, k , είναι εξαιρετικά δυσχερής, το παραπάνω πρόβλημα μεγιστοποίησης της ασφαλούς ετήσιας απόληψης, d , διατυπώνεται ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης της μορφής:

$$\min \pi_d d' \quad (2.72)$$

όπου π_d όρος ποινής και d' η αδιάστατη ετήσια ζήτηση, που εκφράζεται ως ποσοστό μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής, ήτοι:

$$d' = \frac{d - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (2.73)$$

Ο όρος ποινής υπολογίζεται ως:

$$\pi_d = \frac{\sum_{k=1}^{n_d} \pi_{dk}}{\sum_{k=1}^{n_d} \omega_k} \quad (2.74)$$

όπου n_d το πλήθος των επιμέρους στόχων ζήτησης νερού και π_{dk} η ποινή που εισάγεται για κάθε στόχο ξεχωριστά, και η οποία υπολογίζεται ως:

$$\pi_{dk} = \begin{cases} \omega_k \pi_k \alpha_k / \alpha_k^{\max} & \alpha_k > \alpha_k^{\max} \\ -\omega_k & \alpha_k \leq \alpha_k^{\max} \end{cases} \quad (2.75)$$

Με βάση τον παραπάνω ορισμό, αν η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος ξεπερνά την επιθυμητή, η τρέχουσα ζήτηση, d , υπερβαίνει την ασφαλή απόληψη, d^* , και ο όρος ποινής είναι μεγαλύτερος της μονάδας ($\pi_d > 1$), οπότε η ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (2.72) είναι η μηδενική. Η εν λόγω τιμή επιτυγχάνεται για μηδενική ζήτηση, κάτι που προφανώς είναι άτοπο. Από την άλλη πλευρά, αν η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος είναι μικρότερη της επιθυμητής, η τρέχουσα ζήτηση υπολείπεται της ασφαλούς απόληξης ($d < d^*$) και ο όρος ποινής είναι εξ ορισμού μονάδα ($\pi_d = 1$). Συνεπώς, η ελαχιστοποίηση της (2.72) απαιτεί αύξηση της τιμής της ζήτησης, ώσπου η τελευταία να εξισωθεί με την ζητούμενη ασφαλή απόληξη του συστήματος.

Τέλος, η ελαχιστοποίηση της μέσης ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας, για δεδομένη αξιοπιστία και δεδομένες τιμές λειτουργικών περιορισμών, ήτοι το υπό περιορισμούς πρόβλημα:

$$\begin{aligned} \min \kappa \\ \text{έτσι ώστε } \alpha_k = \alpha_k^{\max} \end{aligned} \quad (2.76)$$

μετασχηματίζεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς της μορφής:

$$\min \pi_\kappa (\kappa_{\max} - \kappa) \quad (2.77)$$

όπου π_κ όρος ποινής αντίστοιχος με τον π_d , με την διαφορά ότι περιέχει το σύνολο των λειτουργικών περιορισμών του συστήματος και όχι μόνο τους στόχους ζήτησης, και κ_{\max} ένας μεγάλος θετικός αριθμός, τέτοιος ώστε $\kappa_{\max} \gg \kappa$.

Όμοια, αν η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος ξεπερνά την επιθυμητή ($\pi_\kappa > 1$), η κατανάλωση ενέργειας, κ , και, συνεπακόλουθα, η πολιτική που επιβάλλουν οι κανόνες λειτουργίας δεν επαρκεί για την ικανοποίηση των λειτουργικών περιορισμών του συστήματος, ισχύει δηλαδή $\kappa < \kappa^*$. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (2.77) είναι πάντοτε θετική, και αυξάνει όσο μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας, καθώς αυξάνει τόσο ο όρος ποινής όσο και η διαφορά $\kappa_{\max} - \kappa$. Κατά συνέπεια, η συνάρτηση (2.77) τείνει ασυμπτωτικά προς την θεωρητικά μέγιστη τιμή της, που είναι η κ_{\max} , ενώ παρουσιάζει άλμα στην βέλτιστη τιμή $\kappa = \kappa^*$. Από την άλλη πλευρά, αν η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος είναι μικρότερη της επιθυμητής ($\pi_\kappa = 1$), η διαχειριστική πολιτική που επιβάλλουν οι κανόνες λειτουργίας είναι αντιοικονομική, καθώς καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια από όση απαιτείται ώστε να ικανοποιούνται οι λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος με την απαιτούμενη αξιοπιστία, ισχύει δηλαδή $\kappa > \kappa^*$. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή της συνάρτησης (2.77) είναι πάντοτε αρνητική, και μειώνεται όσο μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας, καθώς αυξάνει η διαφορά $\kappa - \kappa_{\max}$. Συνεπώς, η ελαχιστοποίηση της (2.77) απαιτεί οικονομικότερη πολιτική διαχείρισης, ήτοι μείωση της τιμής της μέσης καταναλισκόμενης ενέργειας, ώσπου οι λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος να ικανοποιούνται με την απαιτούμενη αξιοπιστία.

Τονίζεται ότι όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις αναφέρονται σε προσομοίωση μόνιμης κατάστασης. Η βελτιστοποίηση της διαχείρισης του συστήματος σε καταληκτική προσομοίωση αντιμετωπίζεται με παρόμοιο τρόπο, αντικαθιστώντας, όπου αυτό είναι αναγκαίο, τον δείκτη αστοχίας κάθε στόχου, α_k , με τον αντίστοιχο του α_k' .

2.7 Μεθοδολογία βελτιστοποίησης

2.7.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Τα μοντέλα που ορίστηκαν στο εδάφιο 2.6.2 μπορούν να διατυπωθούν ως προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης της μορφής:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x}^{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{\max} \end{aligned} \quad (2.78)$$

όπου f η αντικειμενική συνάρτηση, $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n)$ το διάνυσμα των παραμέτρων (μεταβλητών ελέγχου), n η διάσταση του προβλήματος (πλήθος παραμέτρων), και \mathbf{x}^{\min} , \mathbf{x}^{\max} τα όρια διακύμανσης των παραμέτρων (εφικτός χώρος), που στην συγκεκριμένη περίπτωση θεωρούνται αδιάστατα μεγέθη, με $\mathbf{x}^{\min} = (0, \dots, 0)$ και $\mathbf{x}^{\max} = (1, \dots, 1)$.

Στα περισσότερα προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης ο χώρος αναζήτησης, ήτοι η επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι μη κυρτός, γεγονός που έχει ως συνέπεια την ύπαρξη πολλών τοπικών ακροτάτων¹. Οι τυπικές δυσχέρειες που απαντώνται σε τέτοια προβλήματα είναι:

- ο εγκλωβισμός της διαδικασίας αναζήτησης σε τοπικό ακρότατο·
- το μεγάλο πλήθος δοκιμών που απαιτείται για τον εντοπισμό του ολικού ακροτάτου, δεδομένου ότι για την αποφυγή των τοπικών ακροτάτων απαιτείται λεπτομερής διερεύνηση του χώρου αναζήτησης·
- η κατάρα της διαστατικότητας, ήτοι η εκθετική αύξηση του απαιτούμενου πλήθους δοκιμών με την αύξηση του πλήθους των μεταβλητών ελέγχου.

Ειδικότερα, η βελτιστοποίηση μοντέλων διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων συνιστά ένα από τα πλέον απαιτητικά προβλήματα, εξαιτίας την ιδιομορφίας του χώρου αναζήτησης που οφείλεται στην θεώρηση των επιθυμητών και όχι των πραγματικών μεγεθών ως μεταβλητών ελέγχου (Ευστρατιάδης, 2001). Αυτό σημαίνει ότι η ευαισθησία του μοντέλου ως προς τις παραμέτρους του είναι πολύ μικρή, καθώς δεν είναι τόσο αυτές που καθορίζουν την διαχείριση του συστήματος όσο οι πάσης φύσεως περιορισμοί του υδροσυστήματος. Για παράδειγμα, στο υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας και σε συνθήκες λειτουργίας χωρίς το ενωτικό υδραγωγείο, η πολυπλοκότητα των περιορισμών είναι τέτοια που καθιστά σχεδόν μονοσήμαντη την διαχείρισή του, ενώ ο ρόλος των κανόνων λειτουργίας των ταμιευτήρων είναι δευτερεύων. Συνέπεια αυτού είναι η ύπαρξη πληθώρας εναλλακτικών κανόνων διαχείρισης, η διαφοροποίηση των οποίων στην τιμή του μέτρου επίδοσης του συστήματος είναι ελάχιστη. Μαθηματικά, αυτό έχει ως συνέπεια την ύπαρξη σχεδόν επίπεδων επιφανειών απόκρισης, με πολλά αλλά εξαιρετικά μικρής κλίμακας τοπικά ακρότατα. Η διαδικασία αναζήτησης σε τέτοιους χώρους είναι πολύ δύσκολη, και θα μπορούσε να παρομοιαστεί με την προσπάθεια του νερού να βρει διόδους διαφυγής σε πρακτικά οριζόντιες επιφάνειες. Η δυσκολία του προβλήματος επιτείνεται εξαιτίας του μεγάλου υπολογιστικού φόρτου που απαιτείται για την αποτίμηση της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία προϋποθέτει ολοκληρωμένη προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος, και μάλιστα με χρήση συνθετικών χρονοσειρών πολύ μεγάλου μήκους. Συνεπώς, το ζητούμενο στην πράξη ενός τέτοιου προβλήματος δεν είναι η εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης (κάτι που προϋποθέτει άπειρες, θεωρητικά, δοκιμές εναλλακτικών παραμέτρων) αλλά η εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης, σε λογικό χρόνο.

Για την επίλυση δυσχερών προβλημάτων ολικής βελτιστοποίησης έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο φάσμα μεθοδολογιών, εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση των οποίων γίνεται από τον Ευστρατιάδη

¹ Εξαιτίας της ύπαρξης πολλών ακροτάτων εκ των οποίων ζητείται η εύρεση του ολικά βέλτιστου εξ αυτών, η βελτιστοποίηση μη γραμμικών συναρτήσεων είναι γνωστή και ως *ολική βελτιστοποίηση* (global optimisation).

(2001). Η πλέον σύγχρονη τάση συνίσταται στην ανάπτυξη υβριδικών αλγοριθμικών σχημάτων, τα οποία συνδυάζουν στοιχεία από διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις ώστε να εκμεταλλευτούν τα ισχυρά χαρακτηριστικά τους. Μια τέτοια προσέγγιση είναι η μέθοδος της *ανασηματιζόμενης σύνθετης εξέλιξης* (shuffled complex evolution), η οποία αναπτύχθηκε από ομάδα ερευνητών του Πανεπιστημίου της Αριζόνα (Duan et al., 1992) και αποτελεί σήμερα την πλέον διαδομένη μέθοδο σε προβλήματα βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων. Αν και η μέθοδος θεωρείται ευρέως καταξιωμένη, οι ιδιαιτερότητες των προβλημάτων βελτιστοποίησης που προέκυψαν στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου ώθησαν στην αναζήτηση ακόμη πιο βελτιωμένων σχημάτων, όπως αυτό που περιγράφεται στο εδάφιο που ακολουθεί.

2.7.2 Θεμελιώδεις έννοιες σχήματος βελτιστοποίησης

Ο *εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτωσης-απλόκου* είναι μια ευρετική τεχνική ολικής βελτιστοποίησης, στην οποία επιχειρείται σύζευξη διαφορετικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων και ορισμένων πρωτότυπων στοιχείων (Eustratiádis, 2001· Efstatiadis and Koutsoyiannis, 2002). Το υπόβαθρο του αλγορίθμου βασίζεται σε τρεις θεμελιώδεις έννοιες:

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

Πριν την περιγραφή του αλγορίθμου, δίνεται μια συνοπτική περιγραφή των παραπάνω θεμελιωδών εννοιών.

Η έννοια της εξελικτικής αναζήτησης

Η *εξελικτική αναζήτηση* (evolutionary search) είναι μια γενική στρατηγική, η οποία αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό των περισσότερων σύγχρονων μεθόδων ολικής βελτιστοποίησης. Συνίσταται στην διερεύνηση του χώρου αναζήτησης πάνω στη βάση ενός προκαθορισμένου πλήθους σημείων που καλείται *πληθυσμός* (population). Ο πληθυσμός γεννάται τυχαία στον εφικτό χώρο και στην συνέχεια εξελίσσεται βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά του, όπως αυτά εκφράζονται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος. Για την εξέλιξη του πληθυσμού χρησιμοποιούνται κανόνες που βασίζονται σε πιθανοτικά ή προσδιοριστικά κριτήρια ή συνδυασμούς αυτών. Σταδιακά, ο πληθυσμός συγκλίνει προς μια μεμονωμένη λύση, η οποία θεωρείται ως η ολικά βέλτιστη του προβλήματος.

Ο πλέον διαδεδομένος εκπρόσωπος των εξελικτικών μεθόδων είναι οι *γενετικοί αλγόριθμοι* (genetic algorithms), οι οποίοι χρησιμοποιούν το πρότυπο των φυσικών εξελικτικών διαδικασιών για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι τεχνικές αυτές έχουν ως κοινή εννοιολογική βάση την προσομοίωση της εξέλιξης ατόμων-λύσεων μέσω διαδικασιών που είναι εμπνευσμένες από τη φυσική διαλογή και την αναπαραγωγή (Goldberg, 1989· Michalewicz, 1992).

Η μέθοδος κατερχόμενου απλόκου

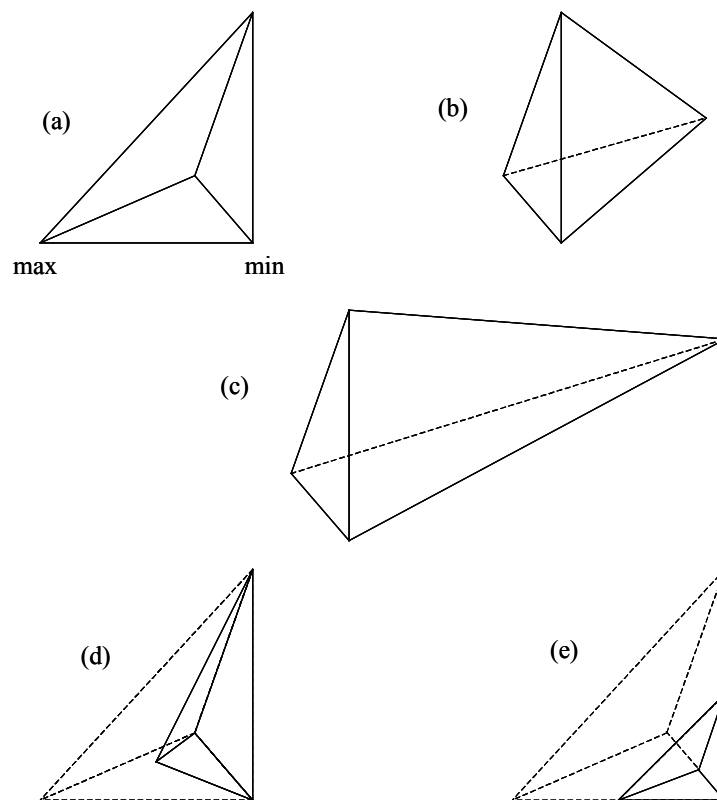
Η μέθοδος *κατερχόμενου απλόκου*¹ (downhill simplex) αποτελεί μια από τις πλέον κλασικές τεχνικές αναζήτησης τοπικών ακροτάτων και έχει αναπτυχθεί από τους Nelder and Mead (1965). Βάσει της μεθόδου αυτής, η αναζήτηση γίνεται μέσω $n + 1$ γραμμικά ανεξάρτητων σημείων, τα οποία συνιστούν

¹ Η ονομασία *άπλοκο* (simplex) προέρχεται από το ομώνυμο γεωμετρικό σχήμα, ήτοι ένα πολύεδρο $n + 1$ κορυφών στον n -διάστατο χώρο. Η εν λόγω τεχνική δεν θα πρέπει να συγχέεται με την ομώνυμη μέθοδο επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού.

ένα άπλοκο σχήμα που διερευνά τον εφικτό χώρο εκτελώντας τις τεσσάρων ειδών κινήσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13:

- ανάκλαση της τρέχουσας χειρότερης κορυφής ως προς το κεντροειδές του απλόκου·
- επέκταση κατά μήκος της διεύθυνσης ανάκλασης·
- συμπίεση αντίθετα προς την διεύθυνση ανάκλασης·
- συρρίκνωση όλων των κορυφών γύρω από το καλύτερο σημείο.

Αποδεικνύεται ότι με κατάλληλη αλληλουχία των παραπάνω κινήσεων το άπλοκο συγκλίνει πάντα προς το πλησιέστερο τοπικό ακρότατο, προσαρμόζοντας το σχήμα του στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας απόκρισης της συνάρτησης. Σε περίπτωση έντονης μεταβολής του αναγλύφου, η κίνηση του απλόκου είναι πολύ γρήγορη, ενώ αντίθετα η κίνηση γίνεται πολύ αργά όταν το ανάγλυφο είναι σχεδόν επίπεδο. Σημειώνεται ότι σε κάθε βήμα το σχήμα του απλόκου καθορίζεται πλήρως από τις συντεταγμένες των κορυφών του προηγούμενου σχήματος και την σχετική διάταξη των τιμών της συνάρτησης, χωρίς να λαμβάνει υπόψη του τις ίδιες τις τιμές.



Σχήμα 2.13: Δυνατές κινήσεις του απλόκου για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης στον χώρο των τριών διαστάσεων: (α) αρχικό σχήμα, (β) ανάκλαση της χειρότερης κορυφής (σημείο μεγίστου) περί το κεντροειδές των υπόλοιπων κορυφών, (γ) επέκταση κατά μήκος της διεύθυνσης ανάκλασης, (δ) εσωτερική συμπίεση, και (ε) συρρίκνωση γύρω από την καλύτερη κορυφή (σημείο ελαχίστου).

Προσομοιωμένη ανόπτηση

Ανόπτηση (annealing) καλείται η διαδικασία ανακατανομής των ατόμων κατά την σταδιακή ψύξη ενός μετάλλου (ή υγρού). Καθώς ένα μέταλλο ψύχεται, η θερμική κινητικότητα των μορίων του περιορίζεται, ενώ όταν η θερμοκρασία μειωθεί αρκετά, τα άτομα στοιχίζονται και δημιουργούν καθαρούς κρυστάλλους. Η κρυσταλλική μορφή αποτελεί την κατάσταση ελάχιστης ενέργειας του συστήματος. Απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία κρυστάλλων είναι ο αργός ρυθμός ψύξης.

Εφόσον η ψύξη πραγματοποιηθεί γρήγορα, το σύστημα καταλήγει σε μια πολυκρυσταλλική ή άμορφη δομή, η οποία έχει μεγαλύτερη ενέργεια.

Η περιγραφή της παραπάνω διεργασίας γίνεται με νόμους της στατιστικής μηχανικής. Η ενέργεια E ενός συστήματος που βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και έχει θερμοκρασία T θεωρείται τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κατανομή πιθανότητας Boltzman, δηλαδή:

$$p(E) \sim \exp\left(-\frac{E}{\kappa T}\right) \quad (2.79)$$

όπου κ η σταθερά του Boltzman. Η σχέση υποδηλώνει ότι, ακόμη και σε χαμηλή θερμοκρασία, υπάρχει έστω και μικρή πιθανότητα κατά την ψύξη του μετάλλου να επιτευχθεί κατάσταση υψηλότερης ενέργειας. Με τον τρόπο αυτόν δίνεται στο σύστημα η ευκαιρία να εξέλθει από ένα τοπικό ενεργειακό ελάχιστο και να βρεθεί σε μια ισορροπία χαμηλότερης ενέργειας. Κατά την πορεία ψύξης η ενέργεια μπορεί είτε να μειωθεί είτε να αυξηθεί, αλλά καθώς μειώνεται η θερμοκρασία περιορίζεται η πιθανότητα να επιτευχθεί αύξηση της ενέργειας.

Η *προσομοιωμένη ανόπτηση* (simulated annealing) είναι μια γενική μεθοδολογία ολικής βελτιστοποίησης εμπνευσμένη από την ομώνυμη θερμοδυναμική διεργασία, η οποία εισήχθη από τους *Kirkpatrick et al.* (1983). Με τον όρο περιγράφονται σχήματα αναζήτησης που χρησιμοποιούν πιθανοτικά κριτήρια αντίστοιχα με την (2.79), βάσει των οποίων δίνεται η δυνατότητα “αναρρίχησης” (θεωρώντας πάντα ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης) ώστε να είναι εφικτή η διαφυγή από τοπικά ελάχιστα. Στα εν λόγω σχήματα εισάγεται μια παράμετρος ελέγχου αντίστοιχη της θερμοκρασίας και ένα *χρονοδιάγραμμα ανόπτησης* (annealing cooling schedule), το οποίο περιγράφει την στρατηγική μείωσης της θερμοκρασίας.

Αποδεικνύεται ότι με τη θεώρηση μιας υψηλής τιμής της αρχικής θερμοκρασίας και την υιοθέτηση ενός κατάλληλου χρονοδιαγράμματος ανόπτησης, μια διαδικασία προσομοιωμένης ανόπτησης συγκλίνει ασυμπτωτικά προς την ολικά βέλτιστη λύση. Κατά συνέπεια, αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν την παραπάνω στρατηγική ενδείκνυνται για δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης, καθώς μπορούν να διαφεύγουν εύκολα από περιοχές έλξης τοπικών ακροτάτων. Ωστόσο, τέτοιοι αλγόριθμοι είναι συνήθως πολύ αργοί, δεδομένου ότι η μέθοδος εγγυάται την εύρεση του ολικού ακροτάτου μετά από θεωρητικά άπειρο πλήθος δοκιμών. Η ταχύτητα σύγκλισης εξαρτάται από τον ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας. Όσο πιο αργά μειώνεται η θερμοκρασία, τόσο πιο αργή είναι η σύγκλιση αλλά και τόσο πιο πιθανή είναι η εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης.

Γενικά, η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης έχει βρει εφαρμογή σε προβλήματα ακέραιων τιμών, ενώ σχετικά περιορισμένες είναι οι αναφορές της βιβλιογραφίας για προβλήματα συνεχών τιμών, όπως είναι ένα πρόβλημα βαθμονόμησης παραμέτρων (*Press et al.*, 1992, pp. 444-455).

2.7.3 Περιγραφή του αλγορίθμου

Ο εξελικτικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε συνδυάζει την ευρωστία της προσομοιωμένης ανόπτησης σε τραχέα προβλήματα βελτιστοποίησης, με την αποτελεσματικότητα των μεθόδων κλίσης σε απλούς χώρους αναζήτησης. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τέσσερις παραμέτρους, ήτοι το μέγεθος του πληθυσμού, m , δύο παραμέτρους του χρονοδιαγράμματος ανόπτησης, ξ και ψ , και την πιθανότητα μετάλλαξης¹, p_m . Αρχικά παράγεται ένας πληθυσμός $m \geq n + 1$ τυχαίων σημείων, ομοιόμορφα κατανομημένων στον εφικτό χώρο που ορίζεται από τα διανύσματα \mathbf{x}^{\min} και \mathbf{x}^{\max} (όρια διακύμανσης παραμέτρων). Οι συντεταγμένες των σημείων γεννώνται μέσω της σχέσης:

¹ Η ονομασία *μετάλλαξη* (mutation) προέρχεται από την ορολογία των γενετικών αλγορίθμων και υποδηλώνει λύσεις που γεννώνται με εντελώς τυχαίο τρόπο.

$$x_i = x_i^{\min} + u (x_i^{\max} - x_i^{\min}), \text{ για κάθε } i = 1, \dots, n \quad (2.80)$$

όπου u τυχαίος αριθμός που παράγεται από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, 1]$. Ο πληθυσμός αυτός εξελίσσεται σταδιακά, μέχρι να συγκλίνει στην ολικά βέλτιστη λύση του προβλήματος. Σε κάθε επαναληπτικό κύκλο, ορισμένα (κατά κανόνα ένα) μέλη του πληθυσμού αντικαθίσταται από νέα σημεία. Ο αλγόριθμος αναζητά βελτιωμένες λύσεις, αν όμως δεν μπορεί να βρει τέτοιες επιδιώκει να διερευνήσει νέες περιοχές του εφικτού χώρου, αποδεχόμενος λύσεις που μπορεί να είναι χειρότερες από τις προηγούμενες. Η πιθανότητα αποδοχής τέτοιων λύσεων ρυθμίζεται μέσω του χρονοδιαγράμματος ανόπτησης.

Ένας τυπικός επαναληπτικός κύκλος του αλγορίθμου περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1ο: Εντοπίζονται τα σημεία με την καλύτερη (ελάχιστη) και χειρότερη (μέγιστη) τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και επαναπροσδιορίζεται η θερμοκρασία T του συστήματος ώστε να μην ξεπερνά την τιμή $\zeta (f_{\max} - f_{\min})$, όπου $\zeta \geq 1$ η πρώτη παράμετρος του χρονοδιαγράμματος ανόπτησης. Ο εν λόγω περιορισμός εμποδίζει την θερμοκρασία να λάβει υπερβολικά υψηλές τιμές, κάτι που θα επιβράδυνε σημαντικά τον αλγόριθμο καθώς η διαδικασία αναζήτησης θα γινόταν υπερβολικά τυχαία.

Βήμα 2ο: Διαμορφώνεται ένα άπλοκο $S = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{n+1}\}$ με τυχαία επιλογή των κορυφών από τον τρέχοντα πληθυσμό, όπου η κορυφή \mathbf{x}_1 αντιστοιχεί στην καλύτερη (μικρότερη) και \mathbf{x}_{n+1} στην χειρότερη (υψηλότερη) τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Βήμα 3ο: Από το υποσύνολο $\{\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{n+1}\}$, επιλέγεται μια κορυφή \mathbf{w} ως υποψήφια για να αντικατασταθεί. Πρόκειται για το σημείο που μεγιστοποιεί το κριτήριο επιλογής:

$$g(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + u T \quad (2.81)$$

όπου u τυχαίος αριθμός που παράγεται από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, 1]$. Στην πραγματικότητα, το κριτήριο επιλογής είναι η αντικειμενική συνάρτηση στην οποία προστίθεται ένας τυχαίος όρος που εξαρτάται από την τιμή της επίκαιρης θερμοκρασίας. Στα αρχικά στάδια της αναζήτησης, ο βαθμός τυχειότητας κατά την επιλογή του μέλους που αντικαθίσταται είναι σημαντικός, καθώς η θερμοκρασία είναι υψηλή. Σταδιακά, η θερμοκρασία μειώνεται οπότε μειώνεται και η επίδραση του τυχαίου όρου.

Βήμα 4ο: Γεννάται ένα νέο σημείο \mathbf{r} ανακλώντας το άπλοκο ως προς την κορυφή \mathbf{w} , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{r} = \mathbf{g} + (0.5 + u) (\mathbf{g} - \mathbf{w}) \quad (2.82)$$

όπου \mathbf{g} το κεντροειδές του υποσυνόλου $S - \{\mathbf{w}\}$.

Βήμα 5ο: Εφόσον $f(\mathbf{r}) < f(\mathbf{w})$, το νέο σημείο \mathbf{r} αντικαθιστά την κορυφή \mathbf{w} . Στη συνέχεια, προκύπτουν δύο περιπτώσεις. Αν $f(\mathbf{r}) < f(\mathbf{x}_1)$, δηλαδή το νέο σημείο είναι καλύτερο από την βέλτιστη κορυφή του απλόκου, η διαφορά $\mathbf{r} - \mathbf{g}$ υποδηλώνει την διεύθυνση της κλίσης, ή ισοδύναμα την κατεύθυνση ελαχιστοποίησης της συνάρτησης. Το γεγονός αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς επιτρέπει στον αλγόριθμο να κατευθυνθεί προς ένα τοπικό ακρότατο. Γενικά, ο εντοπισμός της κλίσης σε μια μη ομαλή επιφάνεια απόκρισης είναι δύσκολος, ειδικά όταν το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου είναι μεγάλο. Εφόσον ο αλγόριθμος εντοπίσει την κλίση της συνάρτησης, πραγματοποιείται μια ακολουθία βημάτων επέκτασης στην κατεύθυνσή της, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{g} + \varphi[s] (\mathbf{r} - \mathbf{g}) \quad (2.83)$$

όπου $\varphi[s] = \varphi[s - 1] + u$, με $\varphi[0] = 1$. Η επέκταση του απλόκου συνεχίζεται όσο βελτιώνεται η τιμή της συνάρτησης, επιταχύνοντας έτσι σημαντικά την διαδικασία αναζήτησης.

Η δεύτερη περίπτωση προκύπτει όταν $f(\mathbf{r}) > f(\mathbf{x}_1)$, οπότε το άπλοκο συμπιέζεται εξωτερικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{g} + (0.25 + 0.5 u) (\mathbf{r} - \mathbf{g}) \quad (2.84)$$

Εφόσον επιτευχθεί βελτίωση της συνάρτησης, το σημείο \mathbf{x}_{new} αντικαθιστά το \mathbf{r} .

Βήμα 6ο: Αν $g(\mathbf{r}) > g(\mathbf{w})$, το σημείο ανάκλασης \mathbf{r} απορρίπτεται και το άπλοκο συμπιέζεται εσωτερικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{g} - (0.25 + 0.5 u) (\mathbf{g} - \mathbf{r}) \quad (2.85)$$

Αν $f(\mathbf{x}_{\text{new}}) > f(\mathbf{x}_{n+1})$, δηλαδή το νέο σημείο είναι χειρότερο ακόμη και από την χειρότερη κορυφή του απλόκου, το τελευταίο συρρικνώνεται γύρω από την καλύτερη κορυφή \mathbf{x}_1 , ώστε $\mathbf{x}'_i = 0.5 (\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_i)$ για κάθε $i = 2, \dots, n+1$. Η μείωση του όγκου, που σημειωτέον είναι η μοναδική περίπτωση αντικατάστασης περισσοτέρων του ενός μελών του πληθυσμού, υποδηλώνει ότι το άπλοκο περικυκλώνει ένα τοπικό ακρότατο. Ταυτόχρονα, η θερμοκρασία μειώνεται κατά έναν συντελεστή ψ (δεύτερη παράμετρος χρονοδιαγράμματος ανόπτησης), η οποία λαμβάνει τιμές στο διάστημα 0.90-0.99. Ο μικρός ρυθμός μείωσης εμποδίζει τον υπερβολικά γρήγορο μηδενισμό της θερμοκρασίας (άρα και του βαθμού τυχαιότητας της διαδικασίας αναζήτησης), κάτι που θα οδηγούσε σε γρήγορη σύγκλιση του αλγορίθμου σε ένα τοπικό ακρότατο.

Βήμα 7ο: Αν $g(\mathbf{r}) < g(\mathbf{w})$, το σημείο ανάκλασης \mathbf{r} γίνεται αποδεκτό παρόλο που χειροτερεύει την τιμή της συνάρτησης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ένα δεδομένο πλήθος βημάτων επέκτασης σύμφωνα με την (2.83), με τη διαφορά ότι τώρα η αναζήτηση γίνεται προς την κατεύθυνση μεγιστοποίησης της συνάρτησης (η εν λόγω διαδικασία ονομάζεται αναρρίχηση). Η διαφορά των τιμών της συνάρτησης σε δύο διαδοχικά σημεία αποτελεί μέτρο της κλίσης της. Εφόσον η κλίση γίνει αρνητική, γεγονός που υποδηλώνει ότι το νέο σημείο υπερπηδά την περιοχή έλξης όπου έχει εγκλωβιστεί το άπλοκο, το σημείο που προκύπτει αντικαθιστά το \mathbf{r} . Η παραπάνω στρατηγική, η οποία βασίζεται σε μια ελαφρά τροποποίηση του σχήματος ανόπτησης-απλόκου που προτείνουν οι *Pan and Wu* (1998), επιτρέπει στο άπλοκο να ξεφεύγει εύκολα από τα ήδη εντοπισμένα τοπικά ακρότατα και να διερευνά περιοχές γειτονικών ακροτάτων.

Βήμα 8ο: Εφόσον με κανέναν από τους παραπάνω τρόπου δεν βρεθεί λύση που να είναι καλύτερη από το σημείο ανάκλασης \mathbf{r} , γεννάται ένα νέο σημείο στην ευρύτερη περιοχή σύγκλισης του πληθυσμού, με βάση μια πιθανότητα μετάλλαξης p_m . Η γέννηση του τυχαίου σημείου γίνεται σύμφωνα με την σχέση:

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{c} + d \mathbf{y} / \|\mathbf{y}\| \quad (2.86)$$

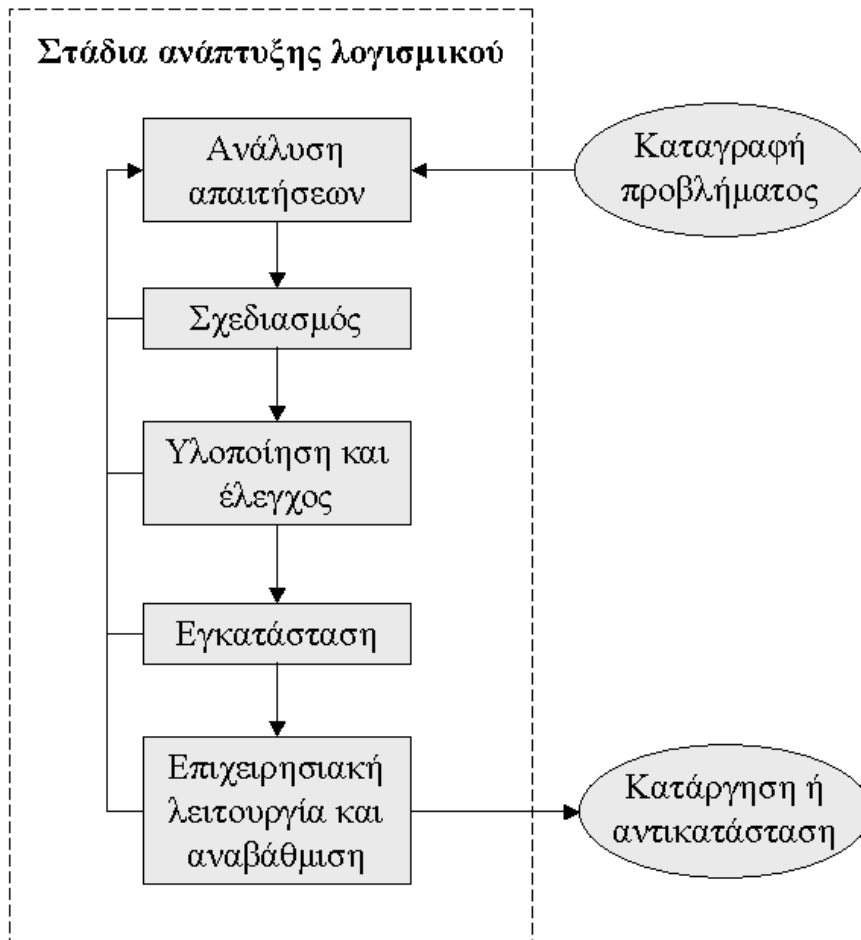
όπου \mathbf{c} το κεντροειδές του πληθυσμού, d η μέγιστη ευκλείδεια απόσταση όλων των σημείων από το \mathbf{c} και \mathbf{y} μια τυχαία διεύθυνση στον n -διάστατο χώρο.

Ο αλγόριθμος διακόπτεται εφόσον η σχετική διαφορά ως προς την τιμή της συνάρτησης μεταξύ του καλύτερου και χειρότερου σημείου του πληθυσμού είναι μικρότερη από μια προκαθορισμένη ανοχή. Διαφορετικά, διακόπτεται αν ξεπεραστεί το μέγιστο επιτρεπόμενο πλήθος δοκιμών, ήτοι των σημείων που διερευνώνται.

Έως τώρα, το προτεινόμενο σχήμα βελτιστοποίησης έχει εξεταστεί σε ένα ευρύ φάσμα τυπικών συναρτήσεων της βιβλιογραφίας καθώς και σε πολύπλοκα προβλήματα από τον χώρο της υδρολογίας, έχοντας αποδειχθεί πολύ αξιόπιστο ως προς τον εντοπισμό του ολικού βελτίστου με λογικό πλήθος δοκιμών (*Ευστρατιάδης*, 2001).

3 Σχεδιασμός του υπολογιστικού συστήματος

Ο σχεδιασμός αποτελεί βασικό τμήμα της ανάπτυξης ενός υπολογιστικού συστήματος. Όπως φαίνεται από τον κύκλο ανάπτυξης λογισμικού (Software Life Cycle) του Σχήματος 3.1 ο σχεδιασμός αποτελεί το δεύτερο στάδιο ανάπτυξης μετά την ανάλυση των απαιτήσεων, το αποτέλεσμα του οποίου χρησιμοποιείται στη φάση της υλοποίησης του συστήματος.



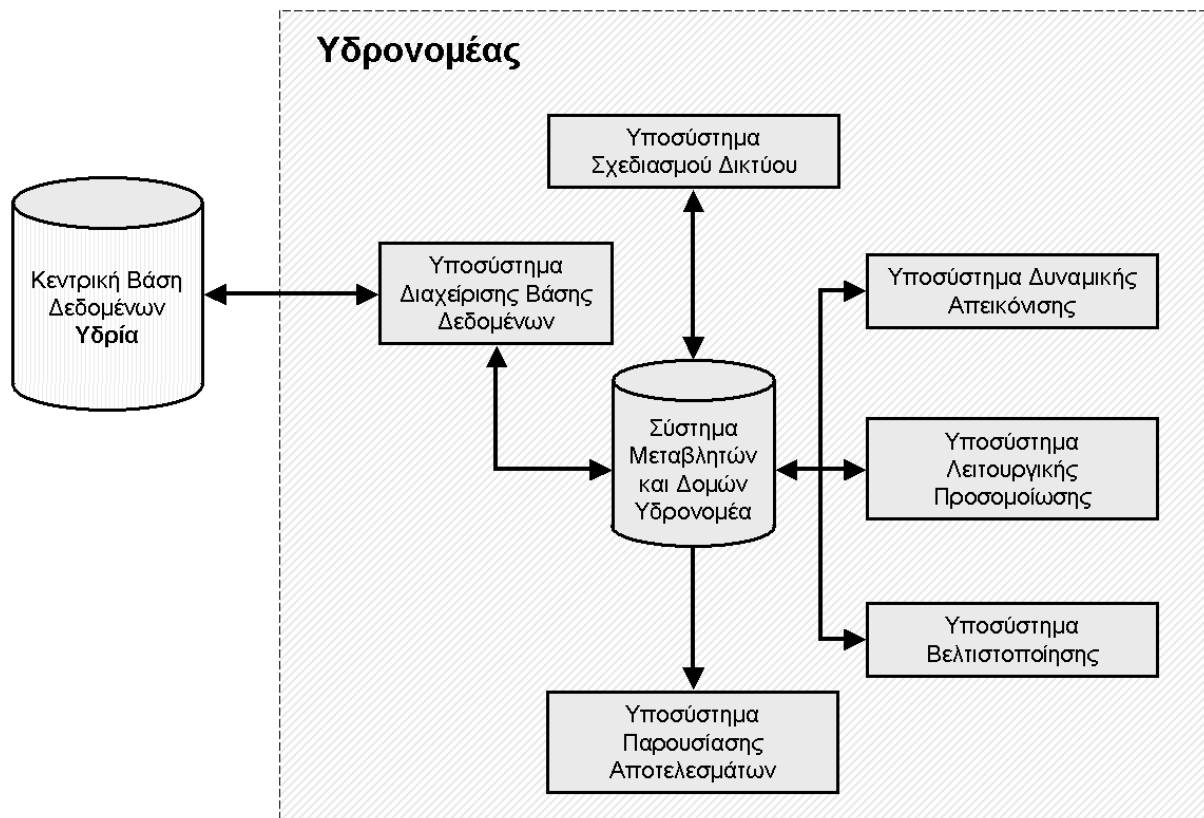
Σχήμα 3.1: Κύκλος ανάπτυξης λογισμικού

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το υπολογιστικό σύστημα από την οπτική γωνία του σχεδιασμού του λογισμικού. Συγκεκριμένα το υποκεφάλαιο 3.1 αναφέρεται στην αρχιτεκτονική δομή του υπολογιστικού συστήματος περιγράφοντας τα υποσυστήματα, τις μεταξύ τους διασυνδέσεις και τις λειτουργίες τους. Το διάγραμμα μετάβασης κατάστασης του υποκεφαλαίου 3.2 καταγράφει όλες οι δυνατές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να περιέλθει ο *Υδρονομέας* κατά τη διάρκεια μιας συνόδου. Τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα έργο¹ αναλύονται στο υποκεφάλαιο 3.3 ενώ ο σχεδιασμός του συστήματος μεταβλητών και δομών περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 3.4. Το υποκεφάλαιο 3.5 αναφέρεται στη διεπιφάνεια του *Υδρονομέα* με άλλες εφαρμογές.

¹ Ο όρος *έργο* αναφέρεται εδώ σε ένα *σενάριο διαχείρισης* το οποίο διαμορφώνεται από το χρήστη για να προσομοιωθεί μια πραγματική ή φανταστική κατάσταση και δεν πρέπει να συγχέεται με το *υδρολογικό σενάριο*.

3.1 Υποσυστήματα του Υδρονομείας

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται μια απλουστευμένη αλλά κατατοπιστική εικόνα των βασικών υποσυστημάτων του Υδρονομείας και των αλληλεπιδράσεών τους. Το σχήμα δεν συμπεριλαμβάνει τις επιδράσεις χρηστών στο σύστημα, ενώ ο Υδρονομείας εξωτερικά ανταλλάσσει πληροφορίες μόνο με την Κεντρική Βάση Δεδομένων (ΚΒΔ) Υδρία. Οι φόρμες μέσω των οποίων ο χρήστης μπορεί να παρέμβει στο σύστημα περιγράφονται στο εδάφιο 4.4.2. Τα συστατικά του Υδρονομείας παρουσιάζονται αναλυτικότερα στα επόμενα εδάφια.



Σχήμα 3.2: Τα βασικά συστατικά του Υδρονομείας και οι αλληλοεπιδράσεις τους

3.1.1 Υποσύστημα Διαχείρισης της Βάσης Δεδομένων

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

Το Υποσύστημα Διαχείρισης της Βάσης Δεδομένων αποσυνδέει τα υπόλοιπα υποσυστήματα του Υδρονομείας από τη Βάση Δεδομένων και μπορεί εύκολα να προσαρμοσθεί σε μελλοντικές επεκτάσεις της Βάσης Δεδομένων.

3.1.2 Υποσύστημα Σχεδιασμού Δικτύου

Μέσω του Υποσυστήματος Σχεδιασμού Δικτύου ο χρήστης μπορεί δημιουργήσει ένα μοντέλο δικτύου και να του προσδώσει τα χαρακτηριστικά που επιθυμεί, ή να τροποποιήσει τα χαρακτηριστικά των

συστατικών ενός δικτύου που έχει φορτωθεί από την ΚΒΔ. Οι τροποποιήσεις καταγράφονται στο Σύστημα Μεταβλητών και Δομών Δεδομένων του *Υδρονομέα*. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορούν να τροποποιηθούν τα στοιχεία των ταμιευτήρων, των κόμβων, των υδραγωγείων, των γεωτρήσεων και των στόχων προσομοίωσης και να πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις, διατηρώντας παράλληλα στη Βάση Δεδομένων του *Υδρονομέα* το αρχικό σενάριο.

3.1.3 Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης

Το Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης αναπαριστά τη λειτουργία του υδροσυστήματος με τη βοήθεια ενός μοντέλου του υδροσυστήματος. Χρησιμοποιεί τις εσωτερικές δομές και τις καθολικές μεταβλητές του *Υδρονομέα* στις οποίες είναι καταχωρημένο το μοντέλο, οι επιλογές του χρήστη και οι χρονοσειρές εισόδου. Για την εκτέλεση προσομοίωσης απαιτείται η επιλογή ενός κανόνα λειτουργίας που εισάγεται σε παραμετρική μορφή με έναν από τους ακόλουθους δύο τρόπους:

- Από τον χρήστη ο οποίος ορίζει από τη Φόρμα Κανόνων Λειτουργίας τις τιμές των συντελεστών του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας για κάθε έναν ταμιευτήρα που συμμετέχει στη διαδικασία διαχείρισης βάσει του τροποποιημένου χωρικού κανόνα.
- Από το Υποσύστημα Βελτιστοποίησης, το οποίο στα πλαίσια της διαδικασίας της βελτιστοποίησης ελέγχει το Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης.

Μετά την προσομοίωση, από το Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης επιστρέφονται τα εξής αποτελέσματα:

- Τα χρονικά βήματα στα οποία δεν ήταν δυνατή η εξυπηρέτηση του εκάστοτε στόχου.
- Ο όγκος νερού που χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη του στόχου σε κάθε χρονικό βήμα, εφόσον ο στόχος αναφέρεται στην κατανάλωση νερού.
- Τα μεγέθη του υδατικού ισοζυγίου για κάθε έναν από τους κόμβους του δικτύου, δηλαδή η απορροή, η βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, η εξάτμιση, οι εκροές από τον κόμβο μέσω υδραγωγείων, η υπερχειλίση, και οι υπόγειες διαφυγές.
- Ο όγκος νερού που μεταφέρθηκε διαμέσου των υδραγωγείων του δικτύου καθώς και η κατανάλωση ενέργειας των υδραγωγείων που λειτουργούν με άντληση για κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης.
- Ο όγκος νερού που αντλήθηκε σε κάθε μονάδα γεώτρηση καθώς και η κατανάλωση ενέργειας άντλησης για κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης.

3.1.4 Υποσύστημα Βελτιστοποίησης

Το Υποσύστημα Βελτιστοποίησης ενεργοποιείται από το χρήστη και εκτελεί επαναληπτικά το Υποσύστημα Λειτουργικής Προσομοίωσης με διαφορετικές τιμές μεταβλητών ελέγχου κάθε φορά. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αξιολογούνται συγκριτικά με προηγούμενες προσομοιώσεις για να επιλεγούν νέες μεταβλητές ελέγχου. Στο Σύστημα Μεταβλητών και Δομών του *Υδρονομέα* καταγράφονται οι δέκα βέλτιστοι κανόνες λειτουργίας που προέκυψαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

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

Ταμιευτήρες

- Ονομασία ταμιευτήρα
- Στάθμη νεκρού όγκου
- Στάθμη όγκου-στόχου εάν έχει τεθεί από το χρήστη
- Επίκαιρη στάθμη όγκου-στόχου του παραμετρικού κανόνα
- Τιμή όγκου στόχου του παραμετρικού κανόνα
- Τιμή επίκαιρου όγκου
- Δείκτης αστοχίας στόχων που συνδέονται με τον ταμιευτήρα

Αγωγοί

- Ονομασία αγωγού
- Επίκαιρη παροχή
- Τιμή παροχευτικότητας
- Φορά ροής
- Δείκτης αστοχίας στόχων που συνδέονται με τον αγωγό

Γεωτρήσεις

- Ονομασία γεώτρησης
- Τιμή παροχής άντλησης
- Τιμή αντλητικής ικανότητας

3.1.6 Υποσύστημα Παρουσίασης Αποτελεσμάτων

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

- Την συνολική πιθανότητα αστοχίας ως προς τη χρονική περίοδο και το χρονικό βήμα για κάθε έναν στόχο που έθεσε ο χρήστης ξεχωριστά. Εάν ο στόχος αναφέρεται στην κατανάλωση νερού, τότε δίνεται επιπλέον και η αστοχία κάλυψης όγκου.
- Την χρονική κατανομή της αστοχίας κάθε στόχου. Σε περίπτωση που ο στόχος αναφέρεται στην κατανάλωση νερού, τότε δίνεται επιπλέον και η ποσοτική κατανομή του ελλειμματικού όγκου.
- Το αναλυτικό υδατικό ισοζύγιο για κάθε κόμβο και ταμιευτήρα του δικτύου.
- Το ισοζύγιο ροών των υδραγωγείων του δικτύου.
- Την κατανάλωση ενέργειας για τη μεταφορά νερού διαμέσου αντλιοστασίων.
- Την πρόβλεψη παροχής σε κάθε υδραγωγείο του δικτύου στη βάση ισοπίθανων καμπυλών.
- Την πρόβλεψη άντλησης νερού σε κάθε μονάδα γεώτρησης του δικτύου στη βάση ισοπίθανων καμπυλών.
- Την πρόβλεψη διακύμανσης της στάθμης και όγκου σε κάθε ταμιευτήρα του συστήματος στη βάση ισοπίθανων καμπυλών.

3.2 Διάγραμμα μετάβασης κατάστασης

Το διάγραμμα μετάβασης κατάστασης (state transition diagram) περιγράφει τις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να περιέλθει το υπολογιστικό σύστημα και τον τρόπο μετάβασης από την μία κατάσταση στην άλλη. Σε κάθε μια κατάσταση έχουν προκαθοριστεί μια σειρά από λειτουργίες τις

οποίες είναι σε θέση να εκτελέσει ο χρήστης. Το διάγραμμα αποτελείται από κυκλικά ή ελλειπτικά σχήματα που αντιστοιχούν στις καταστάσεις του υπολογιστικού συστήματος και από τόξα που δίνουν τις δυνατότητες μετάβασης. Η μετάβαση εκτελείται ύστερα από μια ενέργεια και συνοδεύεται και από ένα ή περισσότερα αποτελέσματα.

Το διάγραμμα μετάβασης κατάστασης του *Υδρονομέα* παρατίθεται στο Σχήμα 3.3. Τα σημεία εκκίνησης και τερματισμού δεν αποτελούν καταστάσεις του υπολογιστικού συστήματος και διαφοροποιούνται χρωματικά από αυτές.

Αμέσως μετά από την εκκίνηση, το σύστημα μεταβαίνει σε μια αρχική κατάσταση (**Αρχή**), κατά την οποία δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμα η ταυτοποίηση του χρήστη και το σύστημα ζητάει από αυτόν να εισάγει τα στοιχεία του. Σε περίπτωση αποτυχίας αναγνώρισης του χρήστη από το σύστημα οι λειτουργίες που μπορεί να εκτελέσει είναι πολύ περιορισμένες (επισκόπηση οδηγιών χρήσης, επανάληψη διαδικασίας ταυτοποίησης, τερματισμός του συστήματος).

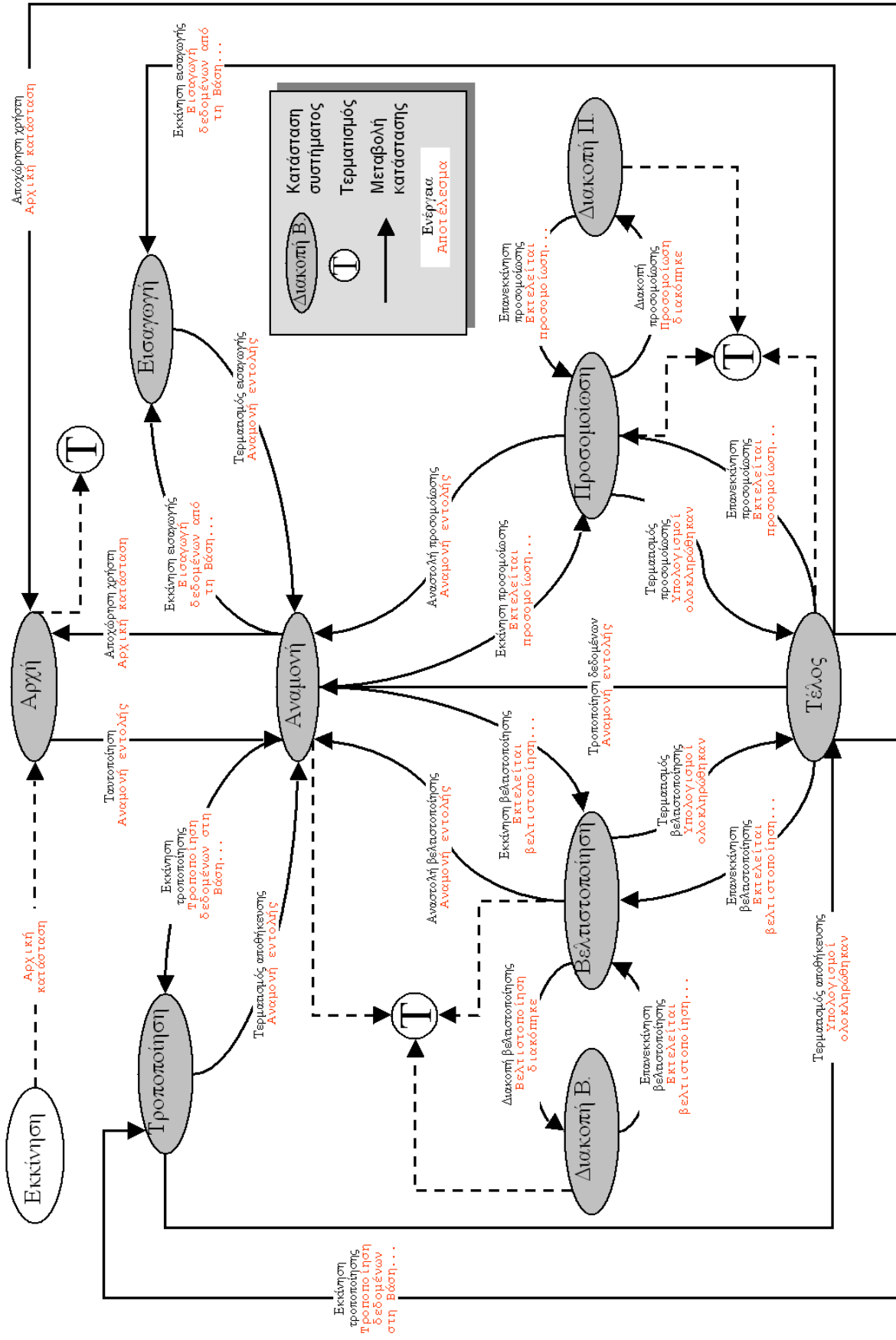
Για να αποκτήσει ο χρήστης περισσότερα δικαιώματα εκτέλεσης λειτουργιών θα πρέπει να προβεί σε επιτυχημένη ταυτοποίηση μεταβαίνοντας στην κατάσταση **Αναμονή**. Αυτή είναι η βασική κατάσταση του *Υδρονομέα* και το σύστημα είναι έτοιμο να δεχθεί εντολές όπως είναι η δημιουργία νέου έργου και η διαχείριση υφιστάμενων στη Βάση Δεδομένων, η πραγματοποίηση υπολογισμών κλπ.

Αρχικά σε αυτήν την φάση το υπολογιστικό σύστημα δεν έχει φορτώσει ακόμα κάποιο έργο από τη Βάση Δεδομένων. Εφόσον ο χρήστης δεν θελήσει να δημιουργήσει το μοντέλο του δικτύου από την αρχή, μπορεί να κινήσει τη διαδικασία εισαγωγής δεδομένων κάποιου αποθηκευμένου έργου θέτοντας τον *Υδρονομέα* στην κατάσταση **Εισαγωγή**. Σε όλη τη διάρκεια της κατάστασης αυτής καμία άλλη λειτουργία του υπολογιστικού συστήματος δεν είναι δυνατή. Με την ολοκλήρωση της εισαγωγής δεδομένων ο *Υδρονομέας* επανέρχεται στην προηγούμενη κατάσταση.

Όταν ο *Υδρονομέας* βρίσκεται σε κατάσταση **Αναμονή**, ο χρήστης μπορεί να κινήσει τη διαδικασία αποθήκευσης του έργου που έχει διαμορφωθεί. Το υπολογιστικό σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση **Αποθήκευση** απ' όπου επανέρχεται στην προηγούμενη κατάσταση μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία.

Από την κατάσταση **Αναμονή** μπορεί να εκτελεστεί προσομοίωση ή βελτιστοποίηση υπό την προϋπόθεση να έχει δημιουργηθεί ή να έχει φορτωθεί ένα μοντέλο του υδροσυστήματος και να έχουν γίνει οι απαραίτητες επιλογές υδρολογικών δεδομένων. Παράλληλα, ο *Υδρονομέας* μεταβαίνει στις αντίστοιχες καταστάσεις εκτέλεσης υπολογισμών (**Προσομοίωση/Βελτιστοποίηση**). Από αυτές μπορεί να επανέλθει στην κατάσταση **Αναμονή** με αναστολή της διαδικασίας ύστερα από ενέργεια του χρήστη.

Όταν ο *Υδρονομέας* πραγματοποιεί προσομοίωση ή βελτιστοποίηση ο χρήστης μπορεί να διακόψει προσωρινά τη διαδικασία. Το υπολογιστικό σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση **Διακοπή Προσομοίωσης** ή **Διακοπή Βελτιστοποίησης** αντίστοιχα, από τις οποίες μπορεί να επανέλθει στην προηγούμενη κατάσταση μόνο με την επανεκκίνηση της διαδικασίας.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα μετάβασης κατάστασης του υπολογιστικού συστήματος Υδρονομίας.

Ύστερα από επιτυχημένη ολοκλήρωσή της προσομοίωσης ή βελτιστοποίησης, το σύστημα μεταβαίνει στην κατάσταση *Τέλος*. Η κατάσταση αυτή έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά με αυτήν της *Αναμονής* και οι δυνατότητες που έχει ο χρήστης από την κατάσταση *Τέλος* είναι αντίστοιχες. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι στην κατάσταση *Τέλος* το υπολογιστικό σύστημα έχει ολοκληρώσει με επιτυχία υπολογισμούς και τα αποτελέσματά τους μπορούν πλέον να επισκοπηθούν στην οθόνη του υπολογιστή και να αποθηκευτούν στη Βάση Δεδομένων για χρήση από άλλες εφαρμογές. Αντίθετα οι λειτουργίες αυτές δεν είναι επιλέξιμες από την κατάσταση *Αναμονή*. Το υπολογιστικό σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση *Τέλος* στην κατάσταση *Αναμονή* όταν τροποποιηθεί κάποιο από τα δεδομένα εισόδου, πράγμα που αλλοιώνει την αντιστοιχία των δεδομένων εισόδου με τα αποτελέσματα.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, για την μετάβαση του *Υδρονομέα* από τη μία κατάσταση στην άλλη απαιτείται κατά κανόνα κάποια ενέργεια του χρήστη. Εξαιρέση αποτελούν η αυτόματη μετάβαση στην κατάσταση *Αναμονή* ύστερα από εισαγωγή ή αποθήκευση δεδομένων και η μετάβαση στην κατάσταση *Τέλος* με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης ή βελτιστοποίησης. Το υπολογιστικό σύστημα τερματίζεται από οποιαδήποτε κατάσταση εκτός από τις καταστάσεις *Τροποποίηση* και *Εισαγωγή*, κατά τις οποίες πραγματοποιείται μεταφορά δεδομένων από και προς τη Βάση.

Τέλος, ο χρήστης του *Υδρονομέα* ενημερώνεται συνεχώς για την τρέχουσα κατάσταση του υπολογιστικού συστήματος, από τη γραμμή κατάστασης της Κύριας Φόρμας (βλ. εδάφιο 4.3.3).

3.3 Στοιχεία ενός έργου

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Γενικά στοιχεία του έργου (ονομασία, περιγραφή).

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

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

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

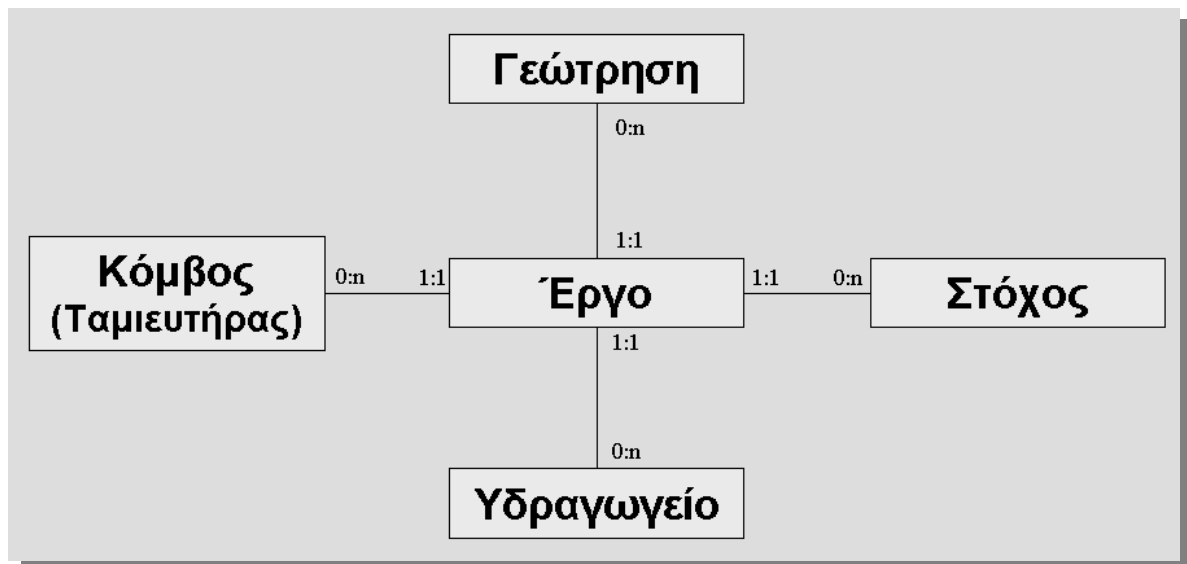
3.4 Σχεδιασμός του Συστήματος Μεταβλητών και Δομών

Στο Σύστημα Μεταβλητών και Δομών του *Υδρονομέα* αποθηκεύονται όλα τα δεδομένα ενός έργου και σε αυτό έχουν άμεση πρόσβαση όλα τα υποσυστήματα του *Υδρονομέα*.

Ένας τρόπος σχεδιασμού του μοντέλου δεδομένων και δομών είναι το μοντέλο Οντοτήτων-Συσχετισμών (Entity-Relationship Model, ER-Model) που πρότεινε ο Chen (1976). Το μοντέλο βασίζεται σε οντότητες και τους συσχετισμούς μεταξύ των οντοτήτων. Ως οντότητα μπορεί να θεωρηθεί ένα αντικείμενο ή μια έννοια που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό του μοντέλου. Η σχηματική απεικόνιση του μοντέλου δίνεται από το διάγραμμα Οντοτήτων-Συσχετισμών (Entity-Relationship Diagram). Από την εποχή που πρωτοπαρουσιάστηκε μέχρι σήμερα έχουν εμφανιστεί διάφορες μορφές απεικόνισης των οντοτήτων και συσχετισμών σε διάγραμμα. Στα βασικά στοιχεία των περισσότερων από αυτά συγκαταλέγεται και η απεικόνιση των πληθάριθμων (cardinality) των συσχετίσεων (π.χ. η συσχέτιση 0:n συνδέει μια οντότητα με 0 έως n οντότητες μιας άλλης κλάσης οντοτήτων). Από τις οντότητες, του συστήματος που αναλύονται παρακάτω, ο κόμβος, ο ταμιευτήρας, το υδραγωγείο και η γεώτρηση αντιστοιχούν σε πραγματικά αντικείμενα, ενώ το έργο, η χρονοσειρά και ο στόχος είναι εννοιολογικές οντότητες (conceptual entities).

3.4.1 Το έργο

Βασική οντότητα στο σχεδιασμό του *Υδρονομία* αποτελεί το Έργο. Ένα έργο συμπεριλαμβάνει όλες τις συνιστώσες του δικτύου και τις επιλογές του χρήστη που είναι απαραίτητες για την εκτέλεση ενός έργου (βλ. υποκεφάλαιο 3.3). Όπως φαίνεται στο πρώτο διάγραμμα Οντοτήτων-Συσχετισμών του *Υδρονομία* (Σχήμα 3.4), ένα έργο μπορεί να συνδεθεί με έναν (θεωρητικά) απεριόριστο αριθμό οντοτήτων του είδους Κόμβος/Ταμιευτήρας, Υδραγωγείο, Γεώτρηση και Στόχος. Κάθε οντότητα από τις παραπάνω συνδέεται με ακριβώς μία οντότητα έργου. Οι συσχετισμοί μεταξύ των οντοτήτων που απαρτίζουν το έργο διακρίνονται στο Σχήμα 3.5.

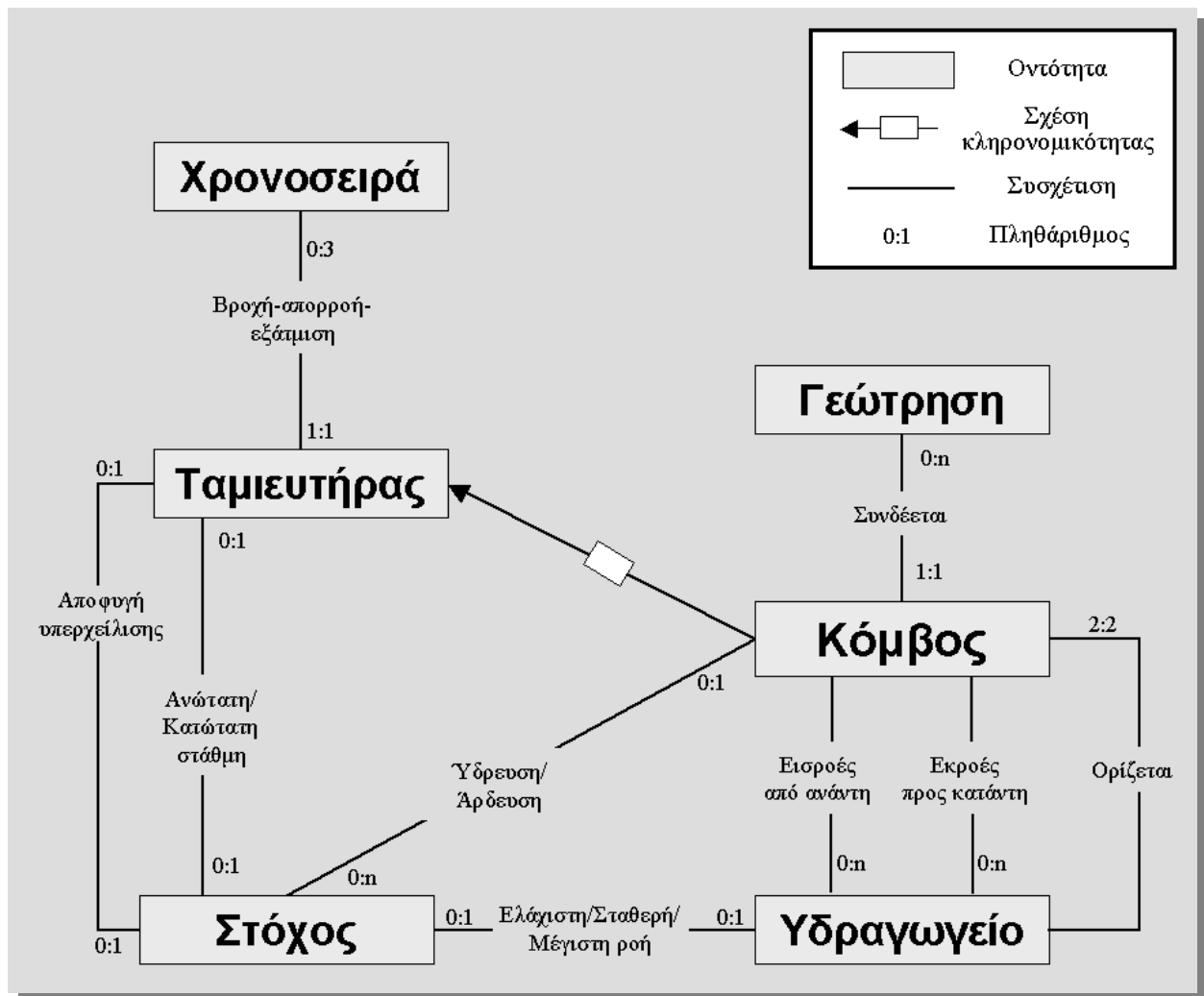


Σχήμα 3.4: Πρώτο διάγραμμα Οντοτήτων-Συσχετισμών του *Υδρονομία* - Διασυνδέσεις της οντότητας Έργο.

3.4.2 Οι συνιστώσες ενός έργου

Ο κόμβος

Μια από τις βασικές οντότητες από τις οποίες απαρτίζεται το δίκτυο είναι ο κόμβος. Ένας κόμβος μπορεί θεωρητικά να συνδέεται με έναν απεριόριστο αριθμό ανάντη ή κατόντη αγωγών μέσω των σχετικών συσχετισμών. Επίσης μπορεί να διαθέτει σύνδεση με γεωτρήσεις, το νερό των οποίων διοχετεύεται μέσω του κόμβου στους κατόντη αγωγούς. Εάν ο κόμβος στο μοντέλο του υδροσυστήματος αποτελεί σημείο υδροληψίας για μια περιοχή, τότε η οντότητα συνδέεται με έναν στόχο που έχει τα χαρακτηριστικά της ζήτησης νερού της περιοχής. Ένας κόμβος μπορεί να συνδέεται με περισσότερους στόχους ζήτησης νερού που προκύπτουν από υδρευτικές ή αρδευτικές ανάγκες.



Σχήμα 3.5: Δεύτερο διάγραμμα Οντοτήτων-Συσχετισμών του Υδρονομία - Διασυνδέσεις των συνιστωσών ενός έργου.

Ο ταμιευτήρας

Σε περίπτωση που ένας κόμβος έχει αποθηκευτική δυνατότητα, ονομάζεται ταμιευτήρας και συνδέεται με την οντότητα κόμβος με μια σχέση κληρονομικότητας. Η οντότητα ταμιευτήρας συνεπώς κληρονομεί τις ιδιότητες και τους συσχετισμούς που διαθέτει ένας κοινός κόμβος. Διαθέτει δε επιπρόσθετες ιδιότητες (χωρητικότητα, καμπύλες στάθμης-όγκου-επιφάνειας κ.ά.) ενώ μπορεί να συνδέεται με μια οντότητα χρονοσειρών υδρολογικών δεδομένων εισόδου που αποτελούνται από τις χρονοσειρές βροχής, απορροής και εξάτμισης. Καθώς ο ταμιευτήρας διαθέτει αποθηκευτικό όγκο είναι δυνατή η σύνδεση της οντότητας με έναν στόχο ανώτατης στάθμης και έναν στόχο ελάχιστης στάθμης της επιφάνειας νερού. Επίσης είναι δυνατή η σύνδεση με στόχο αποφυγής υπερχείλισης του ταμιευτήρα.

Το υδραγωγείο

Το υδραγωγείο ορίζεται από τους δύο εκατέρωθεν του αγωγού κόμβους. Βασικό χαρακτηριστικό της οντότητας Υδραγωγείο στο μοντέλο είναι η παροχευτικότητα του η οποία ορίζεται ως η ελάχιστη παροχευτικότητα των επί μέρους τόξων του.

Για διάφορους λόγους (π.χ. συντήρηση του υδραγωγείου), μπορεί να είναι απαραίτητη η διατήρηση μιας ελάχιστης ροής στο υδραγωγείο. Στο μοντέλο εισάγεται ως στόχος ελάχιστης ροής. Κάθε υδραγωγείο μπορεί να συνδέεται με έναν στόχο αυτού του είδους. Επίσης είναι

δυνατή η σύνδεση με έναν στόχο μέγιστης ή σταθερής ροής, μικρότερης της παροχτετευτικότητας, εφόσον το απαιτεί το σενάριο που ακολουθείται.

Η γεώτρηση

Η γεώτρηση θεωρείται εφεδρικός υδατικός πόρος ο οποίος συνδέεται με έναν κόμβο του δικτύου στον οποίο διοχετεύεται το νερό του υπόγειου υδροφορέα μετά από άντληση. Στο μοντέλο του υδροσυστήματος δεν παρεμβάλλεται οντότητα υδραγωγείου μεταξύ της γεώτρησης και του κόμβου.

Ο στόχος

Η οντότητα στόχος χρησιμοποιείται στο μοντέλο Οντοτήτων-Συσχετισμών για να απεικονίσει τους στόχους και περιορισμούς που θέτει ο χρήστης στο υδροσύστημα κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης. Κάθε στόχος συνδέεται με ακριβώς μία από τις οντότητες Ταμιευτήρας, Κόμβος ή Υδραγωγείο. Οι διασυνδέσεις που μπορούν να δημιουργηθούν στο μοντέλο μεταξύ των οντοτήτων αυτών και της οντότητας Στόχος εξαρτώνται από το είδος του στόχου και δίνονται από τον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Εξάρτηση των συσχετισμών μεταξύ της οντότητας Στόχος και άλλων οντοτήτων από το είδος του στόχου.

Είδος στόχου	Οντότητα συσχετισμού
κατανάλωση νερού για ύδρευση	Κόμβος/Ταμιευτήρας
κατανάλωση νερού για άρδευση	Κόμβος/Ταμιευτήρας
ελάχιστη στάθμη	Ταμιευτήρας
μέγιστη στάθμη	Ταμιευτήρας
αποφυγή υπερχείλισης	Ταμιευτήρας
ελάχιστη ροή	Υδραγωγείο
μέγιστη ροή	Υδραγωγείο
σταθερή ροή	Υδραγωγείο

Η χρονοσειρά

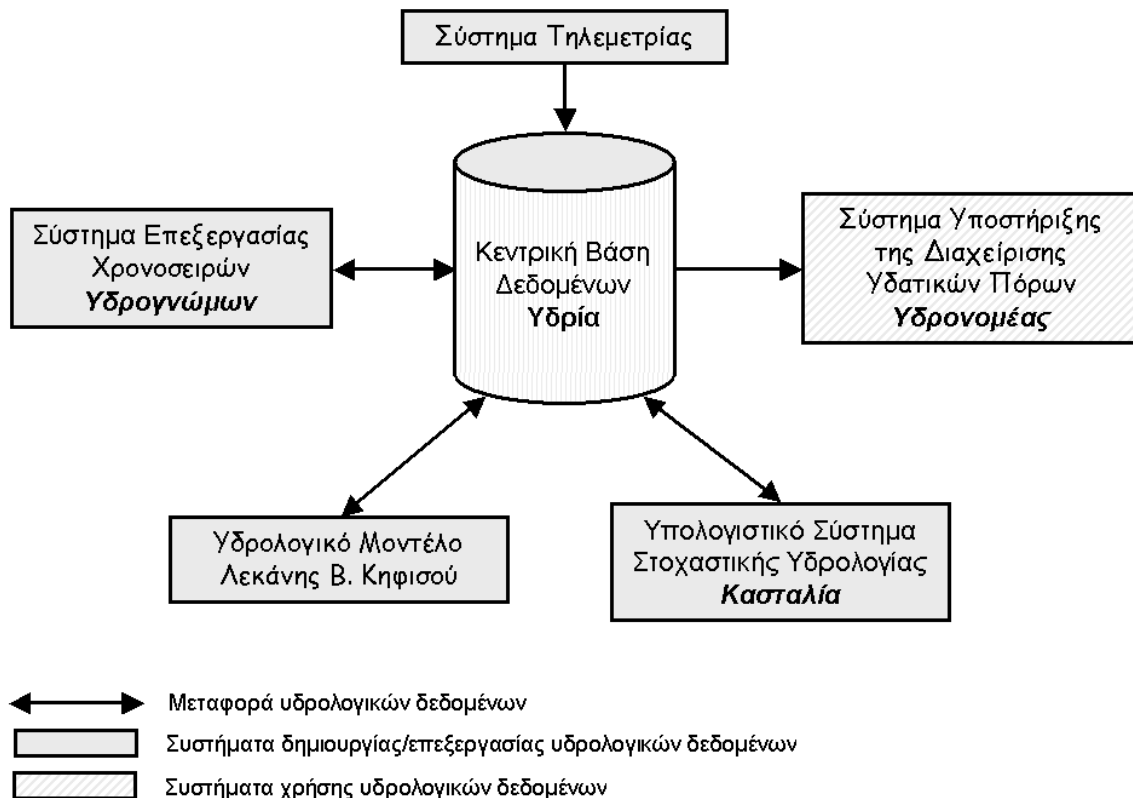
Η οντότητα Χρονοσειρά περιλαμβάνει μια ενότητα χρονοσειρών βροχόπτωσης, εξάτμισης και απορροής από την υπολεκάνη και συνδέεται με έναν ταμιευτήρα.

3.5 Διεπιφάνεια με άλλα συστήματα

Η μοναδική δυνατότητα σύνδεσης και ανταλλαγής δεδομένων του *Υδρονομέα* με άλλες εφαρμογές είναι μέσω της ΚΒΔ. Η δυνατότητα αυτή χρησιμοποιείται στις εξής περιπτώσεις:

- α) Το Σύστημα Δημιουργίας Εκθέσεων (Reporting Manager) χρησιμοποιεί όλα τα αποθηκευμένα στοιχεία ενός έργου του *Υδρονομέα* για να συντάξει αυτόματα μια έκθεση που θα τεκμηριώνει τη σύνθεση ενός έργου και τη διενέργεια υπολογισμών. Στην έκθεση, με επιλογή του χρήστη, μπορούν να συμπεριλαμβάνονται μια συνοπτική περιγραφή του έργου, τα δεδομένα εισόδου και τα αποτελέσματα προσομοιώσεων ή βελτιστοποιήσεων (βλ. Καραβοκυρός, Γ. και Σ. Κοζάνης, 2003).

- β) Το Σύστημα Γεωγραφικής Πληροφορίας (GIS) μπορεί να χρησιμοποιήσει επιλεγμένα αποτελέσματα υπολογισμών του *Υδρονομέα* που έχουν γεωγραφική συνιστώσα για να τα συνδέσει με το υπάρχον γεωγραφικό υπόβαθρο.
- γ) Ο *Υδρονομέας* δεν δημιουργεί υδρολογικές χρονοσειρές και δεν πραγματοποιεί περαιτέρω επεξεργασία των χρονοσειρών καθώς οι λειτουργίες αυτές υλοποιούνται από άλλα υπολογιστικά συστήματα. Οι αποθηκευμένες στην ΚΒΔ χρονοσειρές που έχουν χρονικό βήμα τον μήνα και μονάδα μέτρησης τα χιλιοστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υδρολογικά δεδομένα στους υπολογισμούς του *Υδρονομέα*. Το Σχήμα 3.6 δίνει μια εικόνα των δυνατοτήτων επεξεργασίας και χρήσης χρονοσειρών από τα συστήματα που αναπτύχθηκαν στο παρόν ερευνητικό έργο.



Σχήμα 3.6: Επεξεργασία και χρήση υδρολογικών δεδομένων.

4 Οδηγίες χρήσης

4.1 Εισαγωγή

4.1.1 Διαφορές στην έκδοση 3.2 του *Υδρονομέα*

Οι παρούσες οδηγίες χρήσης αναφέρονται στην έκδοση 3.2 του *Υδρονομέα*. Σε σχέση με την έκδοση 2.0 (Δεκέμβριος 2000) η έκδοση 3.2 του *Υδρονομέα* παρουσιάζει τις εξής βελτιώσεις και τροποποιήσεις:

Βάση Δεδομένων

- Κατάργηση τοπικής βάσης δεδομένων και σύνδεση με την Κεντρική Βάση Δεδομένων
- Πλήρεις δυνατότητες διαχείρισης έργων στη Βάση Δεδομένων (εισαγωγή, αποθήκευση, τροποποίηση, διαγραφή)
- Δυνατότητα αποθήκευσης κανόνων λειτουργίας στη Βάση Δεδομένων κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης

- Δυνατότητα εποχιακής μεταβολής των συντελεστών των κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων
- Δυνατότητα τροποποίησης τιμών παροχρητευτικότητας και διαρροών υδραγωγείων διαχρονικά.
- Εισαγωγή κλάσης στόχων μέγιστης και σταθερής ροής υδραγωγείων
- Ένταξη του στόχου αποφυγής υπερχειλίσις ταμιευτήρα στον κατάλογο προτεραιοτήτων στόχων
- Βελτιστοποίηση ορίων χρήσης γεωτρήσεων (κατώφλι, ανώφλι)
- Δυνατότητα προσομοίωσης τμήματος της συνολικής χρονικής περιόδου
- Κατάργηση υδραγωγείου αμφίδρομης ροής στο μοντέλο. Το υδραγωγείο αμφίδρομης ροής προσομοιώνεται με δύο παράλληλα υδραγωγεία αντίθετης φοράς
- Διατήρηση περισσοτέρων της μιας (βέλτιστης) λύσης του προβλήματος βελτιστοποίησης

Διεπαφή με το χρήστη

- Δυνατότητα ανάπτυξης και επεξεργασίας του μοντέλου δικτύου με γραφικό τρόπο
- Δυνατότητα τροποποίησης και αποθήκευσης όλων των ιδιοτήτων των συνιστωσών του δικτύου
- Προσαρμογή γραφικής παράστασης κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων ώστε να απεικονίζει την εποχιακή διακύμανση των κανόνων και να είναι συμβατή με τους στόχους μέγιστου/ελάχιστου αποθέματος
- Υπολογισμός αποθεμάτων-στόχων των ταμιευτήρων για δεδομένο συνολικό απόθεμα συστήματος και κανόνες λειτουργίας ταμιευτήρων

Αποτελέσματα

- Παρουσίαση αποτελεσμάτων τμήματος προσομοιωμένης περιόδου
- Ισοζύγιο γεωτρήσεων
- Τυπικές αποκλίσεις σε όλες τις τιμές ισοζυγίων
- Πρόγνωση παροχής γεωτρήσεων και υδραγωγείων με όρους πιθανότητας
- Πρόγνωση αποθέματος ταμιευτήρων με όρους πιθανότητας
- Πρόγνωση αστοχίας στόχου και ελλείμματος όγκου στη διάσταση του χρόνου

Χρονοσειρές

- Επιλογή χρονοσειρών και υδρολογικών σεναρίων από τη Βάση Δεδομένων
- Επισκόπηση τιμών χρονοσειρών και ιδιοτήτων υδρολογικών σεναρίων
- Δυνατότητα εναρμόνισης ορισμένων ιδιοτήτων χρονοσειρών (ημερομηνία έναρξης, αριθμός ενοτήτων) στις απαιτήσεις του διαχειριστικού σεναρίου

Άλλες τροποποιήσεις

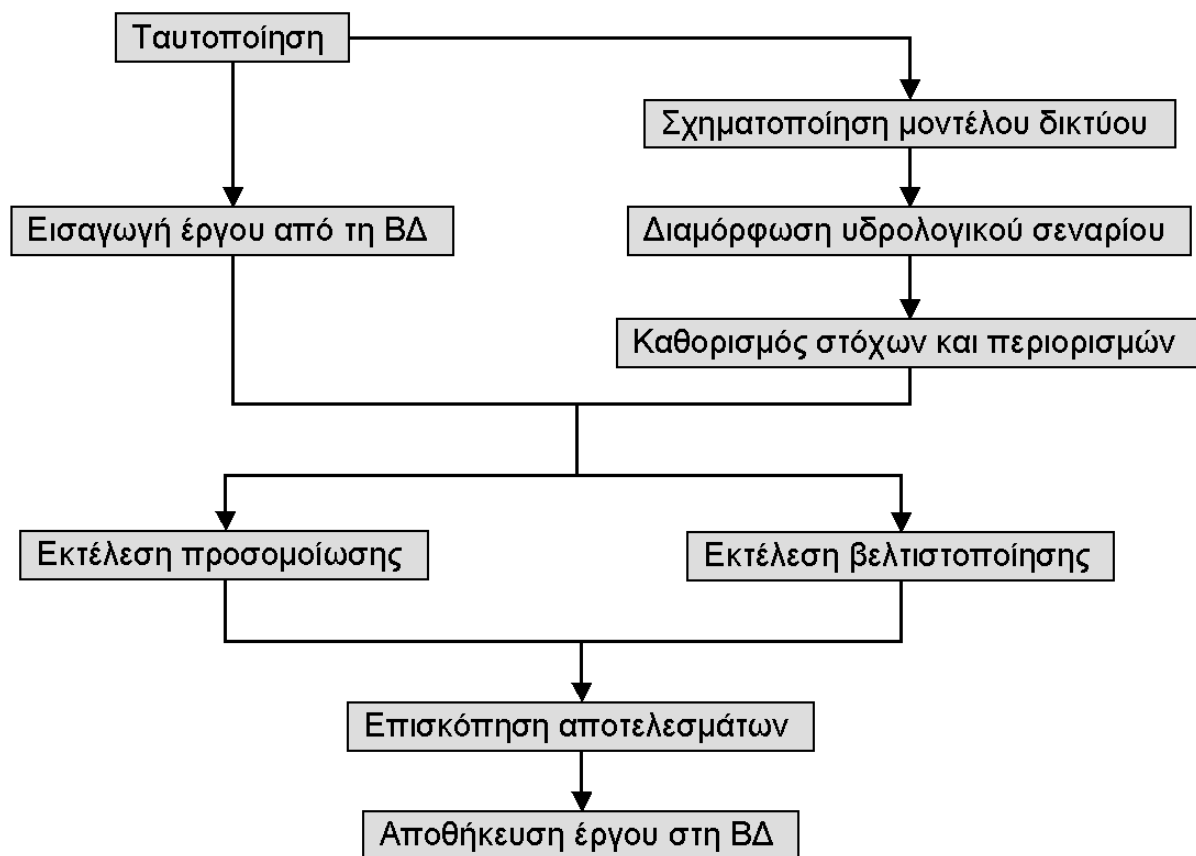
- Κατάργηση αυτόματης έκδοσης εκθέσεων ως μέρος του υπολογιστικού συστήματος *Υδρονομέας*. Η δυνατότητα αυτή προσφέρεται από άλλο λογισμικό (Reporting Manager).
- Κοινή διαχείριση στοιχείων ταυτοποίησης χρηστών για όλες τις εφαρμογές που συνδέονται με την Κεντρική Βάση Δεδομένων
- Οδηγίες χρήσης από το υπολογιστικό σύστημα (help).

4.1.2 Βασικές λειτουργίες

Οι οδηγίες χρήσης επιτρέπουν στον εκπαιδευμένο χρήστη να εκτελέσει τις ακόλουθες λειτουργίες του *Υδρονομέας*:

- Ταυτοποίηση, κατά την οποία το σύστημα αναγνωρίζει τον χρήστη και του μεταβιβάζει δικαιώματα πρόσβασης στη Βάση Δεδομένων και εκτέλεσης λειτουργιών του *Υδρονομέας*.
- Εισαγωγή έργου από τη Βάση Δεδομένων
- Σχηματοποίηση του μοντέλου του δικτύου και διαμόρφωση των ιδιοτήτων των συνιστωσών του.
- Επιλογή χρονοσειρών και υδρολογικών σεναρίων.
- Καθορισμός στόχων και περιορισμών προσομοίωσης.
- Διαμόρφωση επιλογών έργου.
- Εκτέλεση και παρακολούθηση της διαδικασίας προσομοίωσης.
- Εκτέλεση βελτιστοποίησης.
- Επισκόπηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και της βελτιστοποίησης.
- Αποθήκευση του έργου και των αποτελεσμάτων στη Βάση Δεδομένων.
- Διαχείριση έργων στη Βάση Δεδομένων.

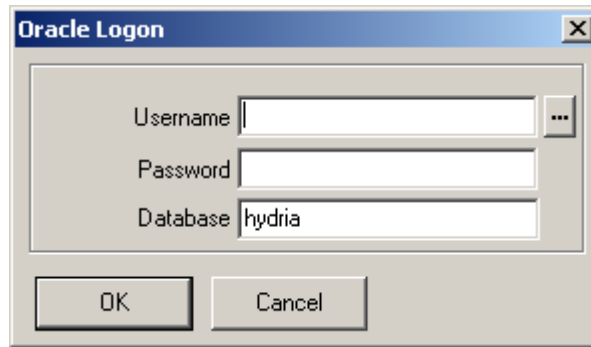
Οι διαδικασίες που ακολουθούνται σε μια τυπική σύνοδο συνοψίζονται σχηματικά στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 4.1: Οι βασικές διαδικασίες που ακολουθούνται σε μια τυπική σύνοδο του *Υδρονομέα*.

4.2 Ταυτοποίηση χρηστών

Για να εκτελέσει κάποιος χρήστης βασικές λειτουργίες του *Υδρονομέα* πρέπει προηγουμένως κατά τη διαδικασία της ταυτοποίησης να αναγνωρισθεί από το υπολογιστικό σύστημα στη διαδικασία της ταυτοποίησης ως ένας από τους καταχωρημένους χρήστες στη Βάση Δεδομένων. Κατά κανόνα η ταυτοποίηση πραγματοποιείται στην αρχή μιας συνόδου και γι' αυτόν τον λόγο με την εκκίνηση του *Υδρονομέα* εμφανίζεται στην οθόνη η σχετική φόρμα. Σε αυτήν ο χρήστης καλείται να δώσει τον κωδικό (Username) και το σύνθημα (Password), με τα οποία έχει καταχωρηθεί στο σύστημα από τον διαχειριστή της Κεντρικής Βάσης Δεδομένων. Σημειώνεται ότι τα σύμβολα που εισάγονται στο πεδίο του συνθήματος δεν εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή για λόγους ασφαλείας. Σε περίπτωση που δεν κατέστη δυνατή η αναγνώριση του χρήστη, ο τελευταίος καλείται να επαναλάβει τη διαδικασία. Μετά την ταυτοποίηση το ονοματεπώνυμο του χρήστη εμφανίζεται στο δεξί μέρος της γραμμής κατάστασης της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα*.




Σχήμα 4.2: Φόρμα Ταυτοποίησης Χρήστη.

Επανάληψη της διαδικασίας ταυτοποίησης μπορεί να γίνει και κατά τη διάρκεια μιας συνόδου, σε περίπτωση αλλαγής του χρήστη του συστήματος. Σε αυτήν την περίπτωση η εργασία στο επίκαιρο έργο μπορεί να συνεχιστεί απρόσκοπτα.

Παρατήρηση: Η καταχώρηση νέων χρηστών και η αλλαγή κωδικού και συνθήματος καταχωρημένων χρηστών δεν πραγματοποιείται από τον *Υδρονομέα*. Για τον λόγο αυτό οι χρήστες πρέπει να απευθυνθούν στον διαχειριστή της Κεντρικής Βάσης Δεδομένων.

4.3 Η Κύρια Φόρμα του Υδρονομέα

Μετά την ταυτοποίηση εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή η Κύρια Φόρμα του Υδρονομέα. Το κλείσιμο της φόρμας, με το πάτημα του συμβόλου  στο άνω δεξιό μέρος αυτής, ισοδυναμεί με τερματισμό της λειτουργίας του Υδρονομέα.



Σχήμα 4.3: Κύρια Φόρμα του Υδρονομέα.

4.3.1 Το βασικό μενού επιλογών

Το πάνω μέρος της φόρμας καταλαμβάνει το βασικό μενού επιλογών λειτουργίας του συστήματος. Για να εκτελέσει ο χρήστης μια λειτουργία πρέπει να πατήσει με το ποντίκι επάνω στην ονομασία μιας ομάδας επιλογών. Αμέσως εμφανίζονται σε δεύτερο μενού οι επιλογές της ομάδας αυτής, ορισμένες από τις οποίες ενδέχεται να αναλύονται σε περαιτέρω επιλογές. Ορισμένες ομάδες ή επιλογές ενδέχεται να είναι απενεργοποιημένες σε ορισμένες φάσεις της λειτουργίας του συστήματος. Παρακάτω παρατίθεται το σύνολο των δυνατών επιλογών από το βασικό μενού:

Έργο

Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει τις επιλογές που σχετίζονται με τη διαχείριση ενός έργου και την ασφάλεια του συστήματος.

Ταυτοποίηση χρήστη. Παραπομπή στη Φόρμα Ταυτοποίησης.

Αποχώρηση χρήστη. Κατάργηση των δικαιωμάτων πρόσβασης στη Βάση Δεδομένων και χρήσης του *Υδρονομέα*. Ύστερα από την αποχώρηση απαιτείται εκ νέου ταυτοποίηση χρήστη για την συνέχιση της εργασίας.

Νέο. Κατάργηση του επίκαιρου έργου ύστερα από επιβεβαίωση του χρήστη. Η επιλογή χρησιμοποιείται στη δημιουργία νέου έργου.

Εισαγωγή. Παραπομπή στο Φύλλο Εισαγωγής της Φόρμας Διαχείρισης Έργου.

Αποθήκευση. επικαιροποίηση του έργου στη Βάση, συμπεριλαμβανομένων και τυχόν αποτελεσμάτων υπολογισμών.

Αποθήκευση ως... Παραπομπή στο Φύλλο Αποθήκευσης της Φόρμας Διαχείρισης Έργου.

Διαγραφή από τη Βάση. Παραπομπή στο Φύλλο Διαγραφής της Φόρμας Διαχείρισης Έργου.

Εξοδος. Τερματισμός του *Υδρονομέα*.

Δίκτυο

Απεικόνιση δικτύου. Παραπομπή στη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου ή στην Φόρμα Οπτικοποίησης Προσομοίωσης στην περίπτωση που η διαδικασία προσομοίωσης/βελτιστοποίησης είναι σε εξέλιξη.

Εισαγωγή/ Εισαγωγή κόμβου,

Εισαγωγή/ Εισαγωγή ταμιευτήρα,

Εισαγωγή/ Εισαγωγή υδραγωγείου,

Εισαγωγή/ Εισαγωγή γεώτρησης. Παραπομπή στη φόρμα εισαγωγής της αντίστοιχης συνιστώσας δικτύου.

Εισαγωγή/ Εισαγωγή στόχου. Παραπομπή στη Φόρμα Προτεραιότητας Στόχων.

Τροποποίηση/ Τροποποίηση κόμβου/ταμιευτήρα,

Τροποποίηση/ Τροποποίηση υδραγωγείου,

Τροποποίηση/ Τροποποίηση γεώτρησης. Παραπομπή στη φόρμα τροποποίησης της αντίστοιχης συνιστώσας δικτύου.

Τροποποίηση/ Τροποποίηση στόχου. Παραπομπή στη Φόρμα Προτεραιότητας Στόχων.

Υδρολογία

Η ομάδα επιλογών αναφέρεται στην επιλογή υδρολογικών δεδομένων

Σενάρια. Παραπομπή στη Φόρμα Υδρολογικών Σεναρίων.

Χρονοσειρές. Παραπομπή στη Φόρμα Χρονοσειρών.

Υπολογισμοί

Η ομάδα επιλογών αναφέρεται στον έλεγχο της διαδικασίας προσομοίωσης και βελτιστοποίησης

Επιλογές. Παραπομπή στη Φόρμα Επιλογών Έργου.

Προσομοίωση. Παραπομπή στη Φόρμα Προσομοίωσης.

Βελτιστοποίηση. Άμεση εκκίνηση διαδικασίας βελτιστοποίησης της διαχείρισης του έργου.

Αποτελέσματα

Η ομάδα επιλογών χρησιμεύει στην εμφάνιση στην οθόνη του υπολογιστή των αποτελεσμάτων της πλέον πρόσφατης προσομοίωσης.

Κανόνας λειτουργίας. Παραπομπή στον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας των ταμιευτήρων σε μορφή γραφήματος.

Πρόγνωση αστοχίας. Αποτελέσματα που σχετίζονται με την αστοχία στόχων και περιορισμών που έθεσε ο χρήστης. Ειδικότερα μπορούν να εμφανιστούν:

- Οι αστοχίες αναφερόμενες σε όλη τη διάρκεια της προσομοιωμένης περιόδου από τη Φόρμα Αστοχίας Στόχων και Περιορισμών.
- Η κατανομή των αστοχιών - χρονικά και ποσοτικά - από τη Φόρμα Πρόγνωσης Πιθανότητας Αστοχίας Στόχου

Ισοζύγια. Τα αποτελέσματα αυτής της ενότητας αφορούν τα παρακάτω ισοζύγια:

- *Ισοζύγιο ταμιευτήρων.* Παραπομπή στο φύλλο υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρων της Φόρμας Αποτελεσμάτων Ισοζυγίων.
- *Ισοζύγιο κόμβων* Παραπομπή στο φύλλο υδατικού ισοζυγίου κόμβων της Φόρμας Αποτελεσμάτων Ισοζυγίων
- *Ισοζύγιο υδραγωγείων.* Παραπομπή στο φύλλο ισοζυγίου υδραγωγείων της Φόρμας Αποτελεσμάτων Ισοζυγίων
- *Ενεργειακό ισοζύγιο.* Παραπομπή στο φύλλο ενεργειακού ισοζυγίου της Φόρμας Αποτελεσμάτων Ισοζυγίων

Πρόγνωση αποθέματος. Αποτελέσματα πρόγνωσης αποθέματος και στάθμης στη βάση ισοπίθανων καμπυλών:

- Πρόγνωση του αποθέματος του συστήματος
- Πρόγνωση του αποθέματος/στάθμης των ταμιευτήρων

Πρόγνωση παροχής. Αποτελέσματα πρόγνωσης παροχής:

- Πρόγνωση παροχής των υδραγωγείων
- Πρόγνωση παροχής των γεωτρήσεων

Πληροφορίες

Υπολογιστικό σύστημα: Παρέχονται ενημερωτικές πληροφορίες που αφορούν την έκδοση του λογισμικού.

Οδηγίες χρήσης. Εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή οι οδηγίες χρήσης του υπολογιστικού συστήματος.

Τροποποιήσεις: Συνοπτική απαρίθμηση των βασικών βελτιώσεων και τροποποιήσεων που παρουσιάζει η επίκαιρη έκδοση του *Υδρονομέα* σε σχέση με την έκδοση 2.0.

4.3.2 Η γραμμή εργαλείων της Κύριας Φόρμας

Κάτω από το μενού επιλογών της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα* εμφανίζεται η γραμμή εργαλείων (tool bar) με εικονίδια που αντιστοιχούν στις ακόλουθες βασικές λειτουργίες του υπολογιστικού συστήματος:



Κλήση της Φόρμας Ταυτοποίησης



Κλήση του Φύλλου Εισαγωγής της Φόρμας Διαχείρισης Έργου



Κλήση του Φύλλου Αποθήκευσης της Φόρμας Διαχείρισης Έργου



Κλήση της Φόρμας Προτεραιότητας Στόχων



Κλήση της Φόρμας Επιλογής Υδρολογικών Χρονοσειρών



Κλήση της Φόρμας Σχεδίασης Δικτύου ή κλήση της Φόρμας Οπτικοποίησης της Διαδικασίας Προσομοίωσης, εφόσον η επιλογή γίνεται κατά τη διάρκεια υπολογισμών (προσομοίωση/βελτιστοποίηση)



Κλήση της Φόρμας Προσομοίωσης



Εκτέλεση βελτιστοποίησης



Κλήση της Φόρμας Αστοχίας Στόχων και Περιορισμών

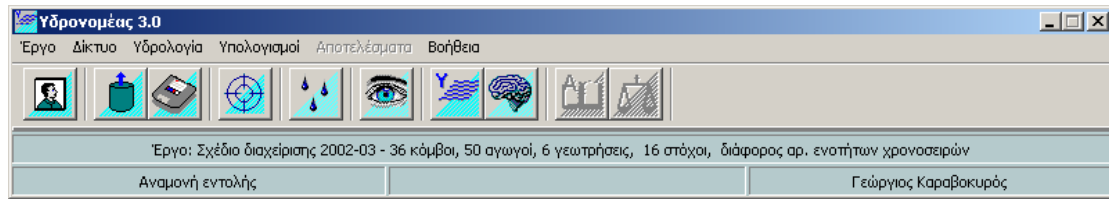


Κλήση της Φόρμας Ισοζυγίων

Μετακινώντας το ποντίκι επάνω σε κάποιο από τα εικονίδια, αναγράφεται για λίγα δευτερόλεπτα στην οθόνη ως υπενθύμιση η ονομασία της αντίστοιχης λειτουργίας. Όταν ένας χρήστης επιχειρήσει να εκτελέσει μια λειτουργία για την οποία δεν έχει δικαιοδοσία, τότε εμφανίζεται στην οθόνη ένα μήνυμα υπενθύμισης. Απενεργοποιημένες εμφανίζονται οι επιλογές για τις οποίες δεν έχουν εκπληρωθεί οι απαραίτητες προϋποθέσεις για την εκτέλεση της αντίστοιχης λειτουργίας (π.χ. παρουσίαση αποτελεσμάτων πριν από την εκτέλεση προσομοίωσης).

4.3.3 Οι γραμμές κατάστασης

Κάτω από τη γραμμή εργαλείων της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα* εμφανίζονται δύο γραμμές κατάστασης (status bar) που παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες στο χρήστη του συστήματος.



Σχήμα 4.4: Παράδειγμα γραμμών κατάστασης.

Η άνω γραμμή κατάστασης παρέχει στο χρήστη στοιχεία για το έργο που έχει φορτωθεί από τη Βάση Δεδομένων. Σε αυτά συμπεριλαμβάνεται η ονομασία του έργου καθώς και κάποια στοιχεία του υδρουσυστήματος και των χρονοσειρών που φορτώθηκαν.

Στο αριστερό μέρος της κάτω γραμμής κατάστασης αναγράφεται η επίκαιρη κατάσταση του υπολογιστικού συστήματος, σύμφωνα με το διάγραμμα μετάβασης κατάστασης. Στη δεξιά πλευρά της γραμμής κατάστασης αναγράφεται η ονομασία του χρήστη που έχει αναγνωριστεί από το σύστημα.

4.4 Σχεδιασμός του δικτύου

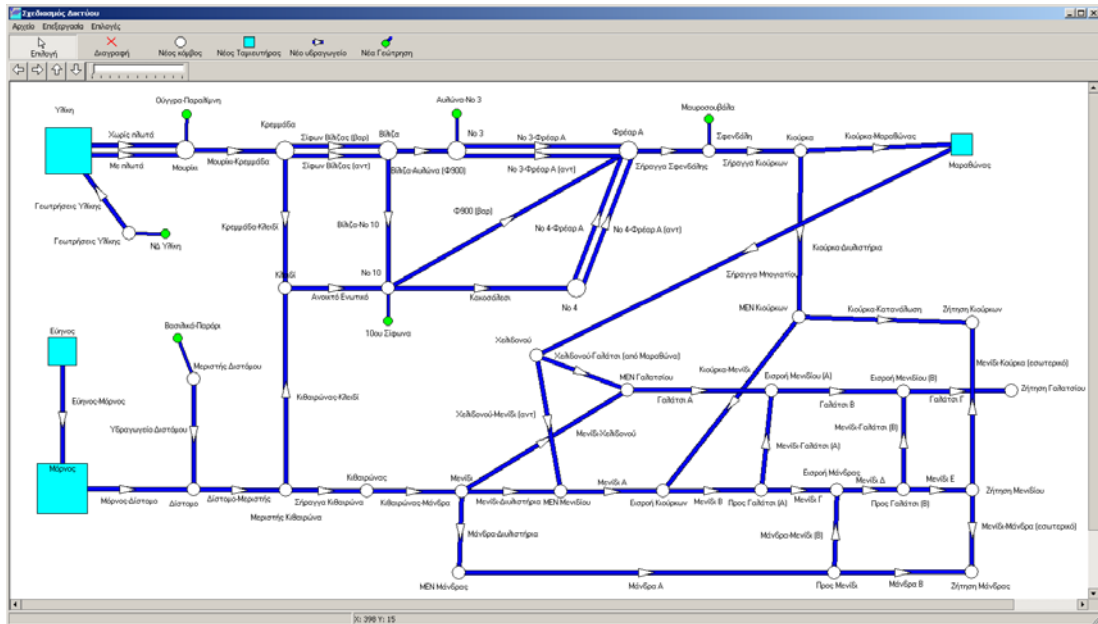
Το πρώτο βήμα για τη διενέργεια προσομοιώσεων και βελτιστοποιήσεων είναι ο σχεδιασμός του μοντέλου του δικτύου με τρόπο που να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Με τη Φόρμα Σχεδίασης του Δικτύου ο *Υδρονομέας* υποστηρίζει τον χρήστη σε αυτήν τη διαδικασία εμφανίζοντας την τοπολογία και τις συνιστώσες του δικτύου του επίκαιρου έργου και δίνοντάς του δυνατότητες τροποποίησης του μοντέλου με εύχρηστο τρόπο.

4.4.1 Γραφική υποστήριξη σχεδίασης του δικτύου

Θεωρητικά, δεν είναι απαραίτητη η γραφική παράσταση για τον ορθό σχεδιασμό του μοντέλου του δικτύου και την επιτυχημένη εκτέλεση υπολογισμών. Ωστόσο, η δυνατότητα σχεδίασης του μοντέλου με γραφικό τρόπο συμβάλλει σημαντικά στην καλύτερη κατανόησή του και στην αποφυγή ή τον εντοπισμό σχεδιαστικών σφαλμάτων.

Η Φόρμα Σχεδίασης του Δικτύου καλείται από την Κύρια Φόρμα

- με την επιλογή Δίκτυο/ Απεικόνιση δικτύου από το βασικό μενού ή
- πατώντας με το ποντίκι το εικονίδιο Απεικόνιση δικτύου (👁️) όταν η διαδικασία προσομοίωσης/βελτιστοποίησης δεν είναι σε εξέλιξη.

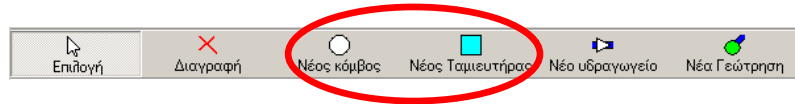


Σχήμα 4.5: Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου.

Στο πάνω μέρος της φόρμας εμφανίζεται το μενού και ορισμένα κουμπιά επιλογών. Το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας καταλαμβάνει η λευκή επιφάνεια σχεδίασης δικτύου. Με επιλογή από το μενού Αρχείο/ Αντιγραφή ή Αρχείο/ Εκτύπωση είναι δυνατή η αντιγραφή στο πρόχειρο (clipboard) και η εκτύπωση της φόρμας στον προεπιλεγμένο εκτυπωτή.

Προσθήκη κόμβου ή ταμιευτήρα

Η προσθήκη ενός κόμβου ή ενός ταμιευτήρα στο δίκτυο από τη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου πραγματοποιείται πατώντας με το ποντίκι το εικονίδιο Νέος Κόμβος ή Νέος Ταμιευτήρας και στη συνέχεια πατώντας με το ποντίκι σε κάποιο σημείο στην επιφάνεια σχεδίασης δικτύου.

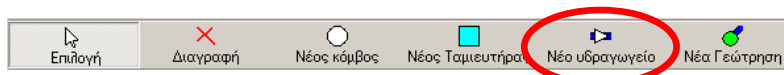


Σχήμα 4.6: Επιλογή προσθήκης νέου κόμβου/ νέου ταμιευτήρα.

Αμέσως εμφανίζεται η Φόρμα Νέου Κόμβου/Ταμιευτήρα, με την οποία ο χρήστης μπορεί να διαμορφώσει τις ιδιότητες αυτής της συνιστώσας του δικτύου. Με το κλείσιμο της Φόρμας Νέου Κόμβου/Ταμιευτήρα και ταυτόχρονη εισαγωγή της συνιστώσας, εμφανίζεται το εικονίδιο της στην επιφάνεια σχεδίασης δικτύου, στο σημείο που είχε επιλεγεί με το ποντίκι.

Προσθήκη υδραγωγείου

Η προσθήκη ενός υδραγωγείου στο δίκτυο από τη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου προϋποθέτει την ύπαρξη τουλάχιστον δύο κόμβων ή ταμιευτήρων στο δίκτυο, με τους οποίους θα συνδεθεί το νέο υδραγωγείο ανάντη και κατόντη. Η προσθήκη πραγματοποιείται πατώντας με το ποντίκι το εικονίδιο Νέο Υδραγωγείο και στη συνέχεια πατώντας διαδοχικά δύο κόμβους ή ταμιευτήρες του δικτύου.



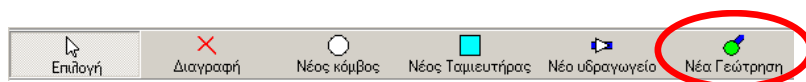
Σχήμα 4.7: Επιλογή προσθήκης νέου υδραγωγείου.

Αμέσως μετά την επιλογή της δεύτερης (κατάντη) συνιστώσας εμφανίζεται η Φόρμα Νέου Υδραγωγείου, με την οποία ο χρήστης μπορεί να διαμορφώσει τις ιδιότητες αυτής της συνιστώσας του δικτύου. Με το κλείσιμο της Φόρμας Νέου Υδραγωγείου και ταυτόχρονη εισαγωγή της συνιστώσας, εμφανίζεται στην επιφάνεια σχεδίασης δικτύου ένας αγωγός που συνδέει τους κόμβους/ταμιευτήρες που είχαν επιλεγεί.

Σημειώνεται ότι είναι δυνατή η εισαγωγή περισσότερων παράλληλων υδραγωγείων. Υδραγωγείο με δυνατότητα αμφίδρομης ροής νερού απεικονίζεται στο μοντέλο σαν δύο παράλληλα και ανεξάρτητα υδραγωγεία με αντίθετη φορά ροής.

Προσθήκη γεώτρησης

Η προσθήκη μιας γεώτρησης στο δίκτυο από τη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου προϋποθέτει την ύπαρξη τουλάχιστον ενός κόμβου ή ταμιευτήρα στο δίκτυο, με τον οποίο θα συνδεθεί η νέα γεώτρηση. Η προσθήκη πραγματοποιείται πατώντας με το ποντίκι το εικονίδιο Νέα Γεώτρηση και στη συνέχεια πατώντας έναν κόμβο ή ταμιευτήρα του δικτύου.



Σχήμα 4.8: Επιλογή προσθήκης νέας γεώτρησης.

Αμέσως μετά την επιλογή του κόμβου/ταμιευτήρα εμφανίζεται η Φόρμα Νέας Γεώτρησης, με την οποία ο χρήστης μπορεί να διαμορφώσει τις ιδιότητες αυτής της συνιστώσας του δικτύου. Με το κλείσιμο της Φόρμας Νέας Γεώτρησης και ταυτόχρονη εισαγωγή της συνιστώσας, εμφανίζεται στην επιφάνεια σχεδίασης δικτύου μια γεώτρηση που συνδέεται με τον κόμβο/ταμιευτήρα, που είχε επιλεγεί.

Μετατόπιση συνιστώσας και ονομασίας

Ο χρήστης μπορεί να μετατοπίσει επάνω στην επιφάνεια σχεδίασης δικτύου όλες τις συνιστώσες εκτός από τα υδραγωγεία. Η μετακίνηση των τελευταίων πραγματοποιείται έμμεσα με την μετακίνηση του ανάντη ή του κατάντη κόμβου του υδραγωγείου. Ο χρήστης μετατοπίζει τη συνιστώσα πατώντας με το αριστερό πλήκτρο του ποντικιού πάνω στην συνιστώσα και κρατώντας το πλήκτρο πατημένο μετακινεί το ποντίκι στην επιθυμητή θέση.

Παράλληλα με την συνιστώσα του δικτύου μετακινείται και η ονομασία της, εφόσον αυτή εμφανίζεται στην οθόνη (Επιλογή/ Εμφάνιση ονομασιών), έτσι ώστε η θέση της ονομασίας σε σχέση με την συνιστώσα να παραμένει ίδια. Επιπρόσθετα με τον ίδιο τρόπο μπορεί να μετατοπιστεί και η ονομασία της συνιστώσας ανεξάρτητα από αυτήν.

Μετατόπιση του δικτύου

Με τα βοηθήματα που εμφανίζονται κάτω από την γραμμή εργαλείων είναι δυνατή η μετακίνηση όλης της γραφικής παράστασης του δικτύου, έτσι ώστε να λάβει στην οθόνη τη θέση που επιθυμεί ο χρήστης.



Σχήμα 4.9: Βοηθήματα μετακίνησης γραφικής παράστασης.

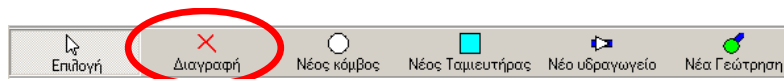
Πατώντας κάποιο από τα τέσσερα κουμπιά μετακινείται η γραφική παράσταση του δικτύου στην αντίστοιχη κατεύθυνση με το βήμα που καθορίζεται από την μπάρα κύλισης.

Ευθυγράμμιση συνιστωσών δικτύου

Με επιλογή Επεξεργασία/ Ευθυγράμμιση συνιστωσών... επιτυγχάνεται μέσω της σχετικής φόρμας η μετακίνηση και ευθυγράμμιση των κόμβων, ταμειυτήρων και γεωτρήσεων του δικτύου σε ένα νοητό πλέγμα του οποίου οι αποστάσεις από τον ένα κόμβο του πλέγματος στον άλλο δίνονται από τις τιμές της οριζόντιας και κάθετης μπάρας κύλισης της φόρμας.

Διαγραφή συνιστωσών δικτύου

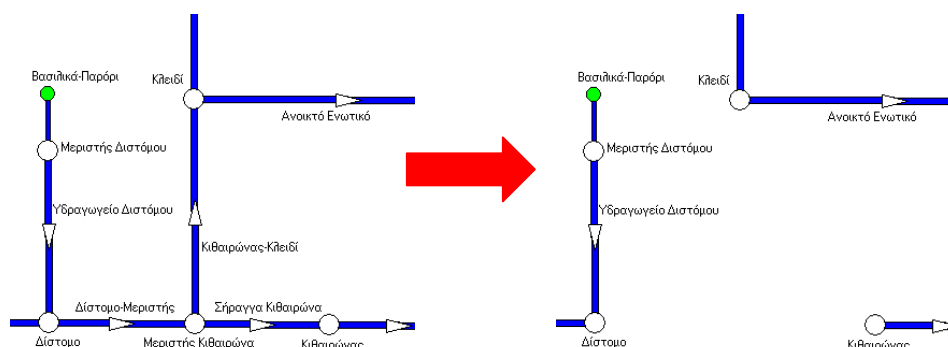
Η διαγραφή συνιστωσών του δικτύου από τη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου πραγματοποιείται πατώντας με το ποντίκι το εικονίδιο Διαγραφή και στη συνέχεια πατώντας μια συνιστώσα του δικτύου. Η συνιστώσα διαγράφεται κατά κανόνα ύστερα από επιβεβαίωση του χρήστη. Η διαδικασία διαγραφής μπορεί να απλοποιηθεί και να πραγματοποιείται χωρίς επιβεβαίωση εάν ο χρήστης απενεργοποιήσει από το μενού την σχετική επιλογή (Επιλογές/ Επιβεβαίωση διαγραφών).



Σχήμα 4.10: Επιλογή προσθήκης νέας γεώτρησης.

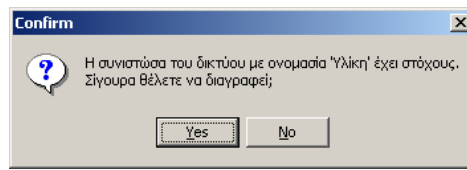
Στην περίπτωση διαγραφής ενός κόμβου ή ενός ταμειυτήρα είναι πιθανόν από την ενέργεια αυτή να επηρεάζονται και άλλες συνιστώσες του δικτύου και συγκεκριμένα τα υδραγωγεία και οι γεωτρήσεις που συνδέονται με τον προαναφερόμενο κόμβο/ταμειυτήρα. Το σύστημα ελέγχει την ύπαρξη τέτοιων συνδέσεων και απαγορεύει σε αυτήν την περίπτωση τη διαγραφή του κόμβου/ταμειυτήρα προς αποφυγή «εκκρεμών» υδραγωγείων ή γεωτρήσεων.

Με επιλογή από το μενού Επιλογές/ Αναδρομική διαγραφή είναι δυνατή η ταυτόχρονη διαγραφή ενός κόμβου ή ταμειυτήρα και όλων των υδραγωγείων και γεωτρήσεων που συνδέονται με αυτόν όπως δείχνει το παρακάτω παράδειγμα.



Σχήμα 4.11: Αναδρομική διαγραφή συνιστωσών δικτύου με βάση το παράδειγμα της διαγραφής του κόμβου «Μεριστής Κιθαιρώνας».

Εφόσον η συνιστώσα που πρόκειται να διαγραφεί συνδέεται με κάποιον στόχο που έχει θέσει ο χρήστης, τότε μαζί με την συνιστώσα διαγράφεται και ο στόχος, αφού προηγουμένως ενημερωθεί και επιβεβαιώσει ο χρήστης τη διαγραφή με τη σχετική φόρμα διαλόγου.



Σχήμα 4.12: Φόρμα διαλόγου για την επιβεβαίωση διαγραφής στόχων.

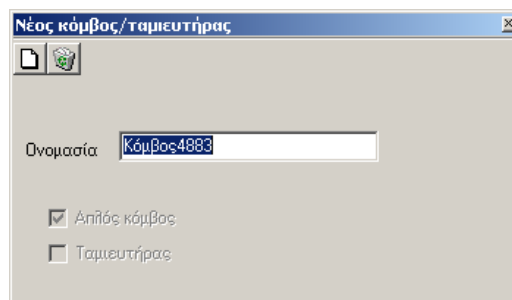
4.4.2 Φόρμες συνιστωσών δικτύου

Η προσθήκη ή η τροποποίηση των ιδιοτήτων μιας συνιστώσας του δικτύου πραγματοποιείται μέσω των φορμών (εισαγωγής/τροποποίησης) συνιστωσών δικτύου που περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

Προσθήκη κόμβου

Η Φόρμα Νέου Κόμβου εμφανίζεται με τις ακόλουθες ενέργειες στην οθόνη του υπολογιστή:

- Από τη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου επιλέγοντας το εικονίδιο Νέος Κόμβος και κατόπιν πατώντας με το ποντίκι σε κάποια ελεύθερη στην επιφάνεια σχεδίασης δικτύου.
- Από την Κύρια Φόρμα του Υδρονομέα επιλέγοντας από το μενού Δίκτυο/ Εισαγωγή/ Εισαγωγή κόμβου.



Σχήμα 4.13: Φόρμα Νέου Κόμβου.

Στη Φόρμα Νέου Κόμβου ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει την ονομασία του κόμβου.

Ο κόμβος προστίθεται στον κατάλογο κόμβων του δικτύου με το πάτημα του εικονιδίου εισαγωγής (□). Με το πάτημα του εικονιδίου διαγραφής (☒) ακυρώνεται η προσθήκη του κόμβου.

Προσθήκη ταμιευτήρα

Η Φόρμα Νέου Ταμιευτήρα εμφανίζεται με τις ακόλουθες ενέργειες στην οθόνη του υπολογιστή:

- Από τη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου επιλέγοντας το εικονίδιο Νέος Ταμιευτήρας και κατόπιν πατώντας με το ποντίκι σε κάποιο σημείο της ελεύθερης επιφάνειας σχεδίασης δικτύου.
- Από την Κύρια Φόρμα του Υδρονομέα επιλέγοντας από το μενού Δίκτυο/ Εισαγωγή/ Εισαγωγή ταμιευτήρα

Σχήμα 4.14: Φόρμα Νέου Ταμιευτήρα.

Η Φόρμα εμφανίζεται με τυπικές αρχικές τιμές ιδιοτήτων, τις οποίες καλείται ο χρήστης να τροποποιήσει κατάλληλα. Συγκεκριμένα ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τις ακόλουθες ιδιότητες:

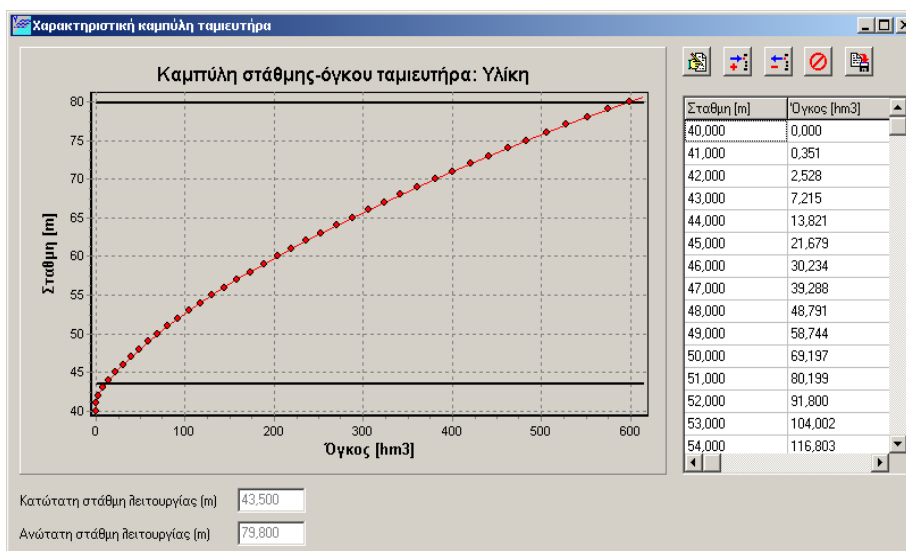
- Την ονομασία του ταμιευτήρα
- Τη στάθμη υδροληψίας
- Τη στάθμη υπερχείλισης
- Τον αρχικό όγκο του ταμιευτήρα
- Την έκταση της λεκάνης απορροής στον ταμιευτήρα
- Τους συντελεστές υπολογισμού υπογείων διαφυγών
- Τις καμπύλες στάθμης-όγκου-επιφάνειας

Ο νεκρός όγκος και η χωρητικότητα του ταμιευτήρα υπολογίζονται με βάση την καμπύλη στάθμης-όγκου και τις στάθμες υδροληψίας και υπερχείλισης. Τα σχετικά πεδία δεν επιδέχονται άμεση τροποποίηση από το χρήστη.

Ο ταμιευτήρας προστίθεται στον κατάλογο ταμιευτήρων του δικτύου με το πάτημα του εικονιδίου εισαγωγής (□). Με το πάτημα του εικονιδίου διαγραφής (☒) ακυρώνεται η προσθήκη του ταμιευτήρα.

Καθορισμός καμπυλών στάθμης - όγκου - επιφάνειας

Πατώντας από τη Φόρμα Νέου Ταμιευτήρα ένα από τα κουμπιά Στάθμη-όγκος ή Στάθμη-επιφάνεια εμφανίζεται η φόρμα με τη χαρακτηριστική καμπύλη του ταμιευτήρα. Στο δεξιό μέρος της φόρμας εμφανίζονται οι τιμές που καθορίζουν την καμπύλη, ενώ οι ενδιάμεσες τιμές υπολογίζονται με λογαριθμική παρεμβολή.



Σχήμα 4.15: Καμπύλη στάθμης-όγκου ταμιευτήρα Υλίκης.

Αρχικά ο νέος ταμιευτήρας εμφανίζεται με μια καμπύλη που καθορίζεται από τρεις τυχαίες τιμές. Ο χρήστης καλείται να προσαρμόσει την καμπύλη προσθέτοντας ή τροποποιώντας τις τιμές στάθμης-όγκου (στάθμης-επιφάνειας).

Οι υφιστάμενες τιμές στάθμης-όγκου (στάθμης-επιφάνειας) τροποποιούνται κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στο εικονίδιο τροποποίησης (📏) και κατόπιν πατώντας επάνω στη σχετική καταχώρηση στον πίνακα τιμών. Με το ίδιο τρόπο μπορούν να τροποποιηθούν και οι τιμές κατώτατης και ανώτατης στάθμης λειτουργίας του ταμιευτήρα, από τα πεδία που βρίσκονται στο κάτω μέρος της φόρμας.

Η εισαγωγή νέας καταχώρησης στον πίνακα τιμών πραγματοποιείται κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στο εικονίδιο νέας εγγραφής (+) και συμπληρώνοντας με τα στοιχεία τη φόρμα που εμφανίζεται.

Μια καταχώρηση διαγράφεται από τον πίνακα τιμών πατώντας επάνω στη σχετική καταχώρηση του πίνακα και κατόπιν κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στο εικονίδιο διαγραφής (-).

Όλες οι τροποποιήσεις μπορούν να ακυρωθούν κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στο εικονίδιο ακύρωσης (⊘). Αντίθετα κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στο εικονίδιο αποθήκευσης (💾) όλες οι αλλαγές αποθηκεύονται και επικαιροποιείται το γράφημα.

Επισημαίνεται ότι για να καθοριστεί η καμπύλη με λογαριθμική παρεμβολή είναι απαραίτητη η ύπαρξη τριών τουλάχιστον τιμών.

Καθορισμός των υπόγειων διαφυγών του ταμιευτήρα

Οι υπόγειες διαφυγές του ταμιευτήρα καθορίζονται με παραμετρικό τρόπο από τη Φόρμα Παραμέτρων Υπόγειων Διαφυγών ή οποία καλείται από τη Φόρμα Νέου Ταμιευτήρα. Η εξίσωση υπολογισμού υπόγειων διαφυγών είναι

$$A = \alpha x^3 + \beta x^2 + \gamma x + \varepsilon + \zeta$$

όπου A είναι οι υπόγειες διαφυγές, x η στάθμη του ταμιευτήρα, α , β , γ και ε συντελεστές της εξίσωσης και ζ ένας τυχαίος όρος σφάλματος με κανονική κατανομή, μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση σ . Ο χρήστης μπορεί να ορίσει ξεχωριστές τιμές για κάθε μήνα του έτους για όλους τους συντελεστές της εξίσωσης και για την τυπική απόκλιση.

Φόρμα Παραμέτρων Υπόγειων Διαφυγών					
$\Delta = ax^3 + \beta x^2 + \gamma x + \varepsilon + \xi$					
Δ : Υπόγειες διαφυγές		X : Στάθμη ταμιευτήρα		a, β, γ και ε : Συντελεστές	
ξ : Τυχαίος όρος σφάλματος με κανονική κατανομή, μέση τιμή μηδέν και τοπική απόκλιση σ					
Μήνας	Συντελεστής α	Συντελεστής β	Συντελεστής γ	Συντελεστής ε	Τυπική απόκλιση σ
1	0	0	0,0233348	-8,97	0
2	0	0	0,0233348	-8,97	0
3	0	0	0,0233348	-8,97	0
4	0	0	0,0233348	-8,97	0
5	0	0	0,0233348	-8,97	0
6	0	0	0,0233348	-8,97	0
7	0	0	0,0233348	-8,97	0
8	0	0	0,0233348	-8,97	0
9	0	0	0,0233348	-8,97	0
10	0	0	0,0233348	-8,97	0
11	0	0	0,0233348	-8,97	0
12	0	0	0,0233348	-8,97	0

Σχήμα 4.16: Φόρμα Παραμέτρων Υπόγειων Διαφυγών Ταμιευτήρα.

Διαχείριση ταμιευτήρα

Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον τρόπο λειτουργίας του ταμιευτήρα κατά την προσομοίωση επιλέγοντας με το σχετικό κουμπί της περιοχής Διαχείριση ταμιευτήρα της Φόρμας Νέου Ταμιευτήρα ένα από τα παρακάτω:

Διαχείριση ενεργή: Αναπροσαρμογή του όγκου-στόχου του ταμιευτήρα σε κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης σύμφωνα με τον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας και την εκάστοτε κατάσταση στο σύστημα.

Διαχείριση ανενεργή: Καθορισμός σταθερού όγκου στόχου για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης ή εναλλακτικά, εφόσον από το φύλλο Κανόνες Λειτουργίας της Φόρμας Επιλογών Έργου έχει επιλεγεί η δυνατότητα εποχιακής μεταβολής των παραμέτρων, καθορισμός σταθερού όγκου στόχου για κάθε μια από τις δύο περιόδους του έτους (ξηρή, υγρή).

Τροποποίηση ιδιοτήτων κόμβου/ταμιευτήρα

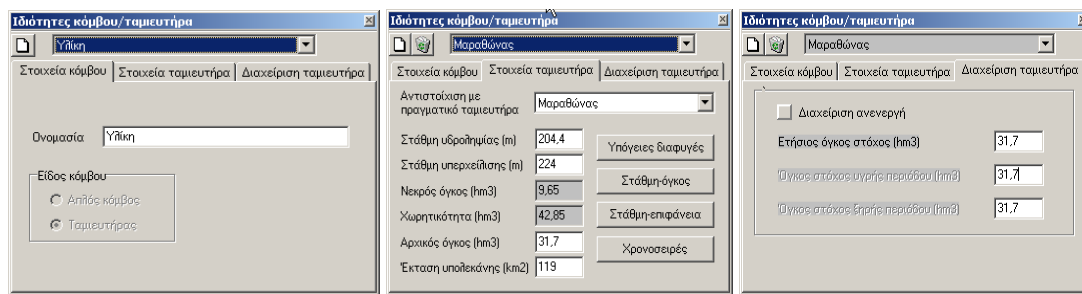
Ο χρήστης είναι σε θέση να τροποποιήσει εκ των υστέρων τις ιδιότητες υφιστάμενων κόμβων και ταμιευτήρων από την Φόρμα Ιδιοτήτων Κόμβου/Ταμιευτήρα, η οποία εμφανίζεται στην οθόνη με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Από τη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου κάνοντας διπλό κλικ με το ποντίκι επάνω στον προς τροποποίηση κόμβο ή ταμιευτήρα του δικτύου.
- Από το μενού της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομία* με επιλογή Δίκτυο/ Τροποποίηση/ Τροποποίηση Κόμβου/Ταμιευτήρα

Εφόσον η συνιστώσα του δικτύου που επιλέχθηκε είναι απλός κόμβος δικτύου μόνο η ονομασία του κόμβου μπορεί να τροποποιηθεί από τη Φόρμα Ιδιοτήτων Κόμβου/Ταμιευτήρα. Εφόσον η συνιστώσα είναι ταμιευτήρας η Φόρμα Ιδιοτήτων Κόμβου/Ταμιευτήρα διακρίνεται στα εξής τρία φύλλα:

- Το φύλλο στοιχείων κόμβου
- Το φύλλο στοιχείων ταμιευτήρα

- Το φύλλο διαχείρισης ταμιευτήρα



Σχήμα 4.17: Φύλλα της Φόρμας Ιδιοτήτων Κόμβου/Ταμιευτήρα.

Όπως και στην περίπτωση απλού κόμβου, από το φύλλο που αναφέρεται στα *στοιχεία κόμβου* μπορεί να τροποποιηθεί η ονομασία του ταμιευτήρα.

Από το δεύτερο φύλλο που αναφέρεται στα *στοιχεία του ταμιευτήρα* μπορούν να τροποποιηθούν τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο *προσθήκη ταμιευτήρα*. Επιπρόσθετα μπορεί να αντιστοιχιστεί ο ταμιευτήρας του μοντέλου δικτύου με τον πραγματικό ταμιευτήρα που είναι καταχωρημένος στη Βάση Δεδομένων. Η αντιστοίχιση αυτή χρησιμοποιείται κατά την εισαγωγή ομάδας συνθετικών χρονοσειρών υπό μορφή υδρολογικών σεναρίων που έχουν παραχθεί από το λογισμικό *Κασταλία*.

Το τρίτο φύλλο αναφέρεται στον τρόπο διαχείρισης του ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οι σχετικές επιλογές περιγράφηκαν επίσης στο κεφάλαιο *προσθήκη ταμιευτήρα*.

Από το μενού επιλογής κόμβων/ταμιευτήρων στο πάνω μέρος της Φόρμας Ιδιοτήτων Κόμβου/Ταμιευτήρα ο χρήστης μπορεί να ανακτήσει τις ιδιότητες κάποιου άλλου κόμβου ή ταμιευτήρα του μοντέλου.

Προσοχή: Ο κόμβος ή ταμιευτήρας διαγράφεται από το δίκτυο με το πάτημα του εικονιδίου διαγραφής (🗑️) και την επιβεβαίωση από το χρήστη από τη σχετική φόρμα διαλόγου. Η διαγραφή είναι αναδρομική, με αποτέλεσμα να διαγραφούν και όλα τα υδραγωγεία, οι γεωτρήσεις και οι στόχοι προσομοίωσης που ενδέχεται να συνδέονται με τον κόμβο/ταμιευτήρα.

Προσθήκη υδραγωγείου

Η Φόρμα Νέου Υδραγωγείου εμφανίζεται με τις ακόλουθες ενέργειες στην οθόνη του υπολογιστή:

- Από τη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου πατώντας με το ποντίκι το εικονίδιο Νέο Υδραγωγείο και στη συνέχεια πατώντας διαδοχικά δύο κόμβους ή ταμιευτήρες του δικτύου.
- Από την Κύρια Φόρμα του Υδρονομέα επιλέγοντας από το μενού Δίκτυο/ Εισαγωγή/ Εισαγωγή υδραγωγείου

Νέο υδραγωγείο

Όνομασία: Υδραγωγείο_4861

Ανάντη κόμβος: Μαραθώνας

Κατάντη κόμβος: Μόρνος

Τιμές ιδιοτήτων

Στάθμη τροφοδοσίας (m): 0

Στάθμη εξαγωγής (m): 0

Ειδική ενέργεια (kWh/m3): 0

Συντελεστής μείωσης της παροχευτικότητας: 0

Παροχευτικότητα			Διαρροές	
Ημερομηνία	Ύψος πτώσης [m]	Παροχή [m3/s]	Ημερομηνία	Συντ. διαρροών
29/10/2003	0,00	0,00		

Buttons: Εισαγωγή, Τροποποίηση, Διαγραφή (for both tables)

Σχήμα 4.18: Φόρμα Νέου Υδραγωγείου.

Στη Φόρμα Νέου Υδραγωγείου αναγράφονται οι παρακάτω χαρακτηριστικές ιδιότητες ενός υδραγωγείου:

- Η ονομασία του υδραγωγείου
- Ο ανάντη και ο κατάντη κόμβος οι οποίοι ορίζουν το υδραγωγείο
- Οι στάθμες τροφοδοσίας και εξαγωγής του υδραγωγείου.
- Η κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα μεταφερόμενου όγκου κατά την ροή του νερού στον αγωγό. Η τιμή κατανάλωσης ενέργειας είναι μηδενική όταν η μεταφορά πραγματοποιείται με βαρύτητα.
- Ο συντελεστής μείωσης της παροχευτικότητας που λαμβάνει υπόψη χρονικούς περιορισμούς στη χρήση του υδραγωγείου. Ο συντελεστής παίρνει τιμές από 0 έως 1.

Το υδραγωγείο προστίθεται στον κατάλογο υδραγωγείων του δικτύου με το πάτημα του εικονιδίου εισαγωγής (□). Με το πάτημα του εικονιδίου διαγραφής (☒) ακυρώνεται η προσθήκη του υδραγωγείου.

Ορισμός παροχευτικότητας υδραγωγείου

Στο κάτω και αριστερό τμήμα της φόρμας ο χρήστης ορίζει τα στοιχεία παροχευτικότητας και ύψους πτώσης του υδραγωγείου, τα οποία καταγράφονται με χρονολογική σειρά στο σχετικό πίνακα. Σε περίπτωση που έχει επιλεγεί από τη Φόρμα Επιλογών η δυνατότητα προσομοίωσης με θεωρούμενη απεριόριστη την παροχευτικότητα των υδραγωγείων η πραγματική παροχευτικότητα δεν λαμβάνεται υπόψη και το γεγονός υπενθυμίζεται στο χρήστη με σχετικό μήνυμα που εμφανίζεται στον πίνακα παροχευτικότητας.

Με το πάτημα του κουμπιού Εισαγωγή εμφανίζεται η Φόρμα Καταχώρησης Στοιχείων Παροχής.

Νέα στοιχεία παροχής

Ημερομηνία (ηη/μμ/εεεε):

Ύψος πτώσης [m]:

Παροχή [m3/s]:

Buttons: Εισαγωγή, Έξοδος

Σχήμα 4.19: Φόρμα Καταχώρησης Στοιχείων Παροχής.

Από τη Φόρμα Καταχώρησης Στοιχείων Παροχής με το πάτημα του κουμπιού Εισαγωγή επικαιροποιείται ο πίνακας παροχεταιυτικότητας με τα νέα στοιχεία.

Η τροποποίηση των στοιχείων του πίνακα πραγματοποιείται από τη Φόρμα Καταχώρησης Στοιχείων Παροχής με ένα από τους παρακάτω τρόπους:

- Διπλό κλικ του ποντικιού επάνω στην επιθυμητή σειρά στον πίνακα παροχεταιυτικότητας
- Επιλογή της επιθυμητής σειράς στον πίνακα παροχεταιυτικότητας και κατόπιν πάτημα του κουμπιού Τροποποίηση.

Η διαγραφή της καταχώρησης από τον πίνακα παροχεταιυτικότητας πραγματοποιείται με επιλογή της επιθυμητής σειράς και κατόπιν πάτημα του κουμπιού Διαγραφή. Επισημαίνεται ότι στον πίνακα παροχεταιυτικότητας πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον μία καταχώρηση.

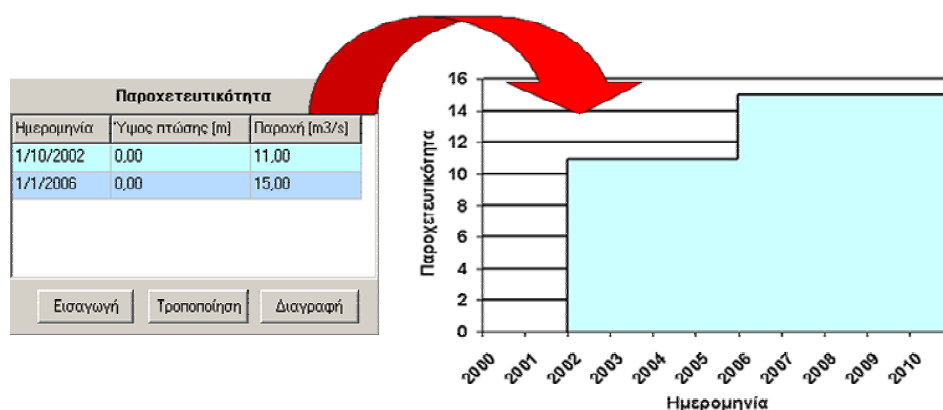
Προσοχή: Η παροχεταιυτικότητα των υδραγωγείων λαμβάνεται υπόψη κατά την προσομοίωση μόνο εφόσον στο Φύλλο Προσομοίωσης της Φόρμας Επιλογών είναι επιλεγμένη η Προσομοίωση με πραγματική παροχεταιυτικότητα αγωγών

Σταθερή παροχεταιυτικότητα

Η σταθερή για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης παροχεταιυτικότητα ορίζεται από μία και μοναδική καταχώρηση στον πίνακα παροχεταιυτικότητας. Σε αυτήν την περίπτωση η τιμή ύψους πτώσης δεν έχει σημασία. Η ημερομηνία πρέπει να είναι προγενέστερη της ημερομηνίας έναρξης της προσομοίωσης. Η παροχεταιυτικότητα για τη χρονική περίοδο που προηγείται της πρώτης καταχώρησης θεωρείται μηδενική.

Μεταβλητή παροχεταιυτικότητα συναρτήσσει του χρόνου

Η μεταβλητή παροχεταιυτικότητα συναρτήσσει του χρόνου προσομοίωσης ορίζεται από δύο ή περισσότερες καταχωρήσεις στον πίνακα παροχεταιυτικότητας με διαφορετική ημερομηνία η κάθε μία. Σε περίπτωση που η παροχεταιυτικότητα δεν εξαρτάται και από το ύψος πτώσης η τιμή ύψους πτώσης δεν έχει σημασία. Η παροχεταιυτικότητα του υδραγωγείου διατηρείται έως το τέλος της προσομοιωμένης περιόδου ή έως ότου η τιμή της τροποποιηθεί από μεταγενέστερη καταχώρηση, όπως δείχνει το παρακάτω παράδειγμα. Η παροχεταιυτικότητα για τη χρονική περίοδο που προηγείται της πρώτης καταχώρησης θεωρείται μηδενική.

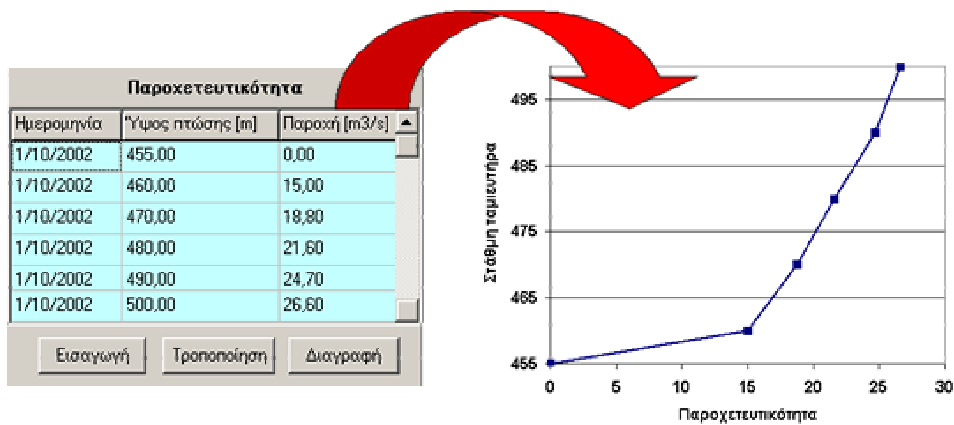


Σχήμα 4.20: Παράδειγμα μεταβλητής παροχεταιυτικότητας συναρτήσσει του χρόνου.

Μεταβλητή παροχεταιυτικότητα συναρτήσσει του ύψους πτώσης

Η μεταβλητή παροχεταιυτικότητα συναρτήσσει του ύψους πτώσης ορίζεται από δύο ή περισσότερες καταχωρήσεις στον πίνακα παροχεταιυτικότητας με ίδια ημερομηνία η κάθε μία και διαφορετικές τιμές

ύψους πτώσης, όπως δείχνει το παρακάτω παράδειγμα. Η παροχαραυτικότηα για τη χρονική περίοδο που προηγείται της καταχωρημένης ημερομηνίας θεωρείται μηδενική.



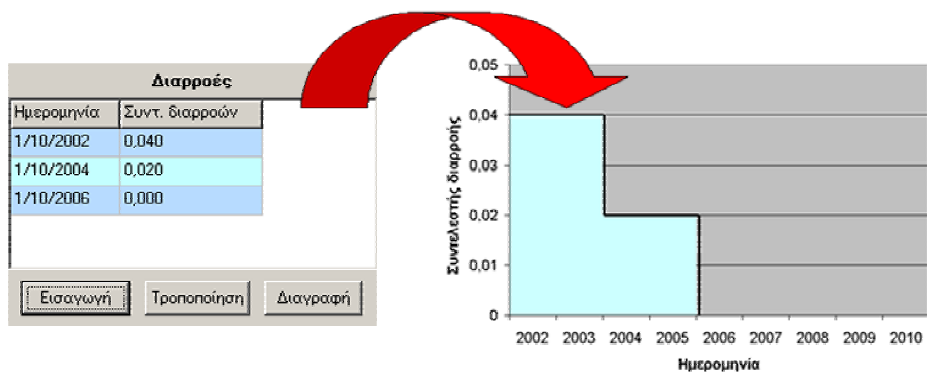
Σχήμα 4.21: Παράδειγμα μεταβλητής παροχαραυτικότηα συναρτήσει του ύψους πτώσης.

Το επίκαιρο ύψος πτώσης υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης από την επίκαιρη στάθμη του ανάντη ταμειεντήρα και την τιμή στάθμης εξαγωγής του υδραγωγείου που δίνεται στη Φόρμα Νέου Υδραγωγείου.

Επίσης μπορεί να γίνει συνδυασμός των δύο παραπάνω δυνατοτήτων υπολογισμού της μεταβλητής παροχαραυτικότηα όταν η παροχαραυτικότηα του υδραγωγείου είναι συνάρτηση του χρόνου και του ύψους πτώσης.

Ορισμός διαρροής υδραγωγείου

Η διαρροή ορίζεται από έναν συντελεστή διαρροής επί της παροχής του υδραγωγείου. Οι συντελεστές διαρροής καταχωρούνται στον πίνακα διαρροών που βρίσκεται στο κάτω δεξιό μέρος της Φόρμας Νέου Υδραγωγείου. Ο συντελεστής διαρροής μπορεί να αλλάζει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, πράγμα που αντιστοιχεί σε περισσότερες καταχωρήσεις στον πίνακα όπως δείχνει το παρακάτω παράδειγμα. Εφόσον δεν υπάρχουν καταχωρήσεις η διαρροή θεωρείται μηδενική. Ο τρόπος εισαγωγής, τροποποίησης και διαγραφής των καταχωρήσεων είναι αντίστοιχος με αυτόν της παροχαραυτικότηα.



Σχήμα 4.22: Παράδειγμα συντελεστή διαρροής υδραγωγείου συναρτήσει του χρόνου.

Τροποποίηση ιδιοτήτων υδραγωγείου

Τροποποίηση των ιδιοτήτων ενός υφιστάμενου υδραγωγείου πραγματοποιείται από τη Φόρμα Τροποποίησης Ιδιοτήτων Υδραγωγείου η οποία εμφανίζεται στην οθόνη με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Από τη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου κάνοντας διπλό κλικ με το ποντίκι επάνω στο προς τροποποίηση υδραγωγείο του δικτύου.
- Από το μενού της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομία* με επιλογή *Δίκτυο/ Τροποποίηση/ Τροποποίηση Υδραγωγείου*

Η Φόρμα Τροποποίησης Ιδιοτήτων Υδραγωγείου διαφέρει από τη Φόρμα Νέου Υδραγωγείου στο γεγονός ότι δεν είναι δυνατή η τροποποίηση του ανάντη και κατάντη κόμβου που ορίζουν το υδραγωγείο. Όλες οι υπόλοιπες λειτουργίες είναι οι ίδιες που αναφέρονται στο κεφάλαιο καταχώρησης νέων υδραγωγείων.

Πέραν τούτου από τη Φόρμα Τροποποίησης Ιδιοτήτων Υδραγωγείου ο χρήστης μπορεί να ανακτήσει πληροφορίες που αφορούν άλλα υδραγωγεία από το μενού επιλογής υδραγωγείων

Προσοχή: Το υδραγωγείο διαγράφεται από το δίκτυο με το πάτημα του εικονιδίου διαγραφής (🗑️) και την επιβεβαίωση από το χρήστη από τη σχετική φόρμα διαλόγου. Η διαγραφή είναι αναδρομική, με αποτέλεσμα να διαγραφούν και όλοι οι στόχοι προσομοίωσης που ενδέχεται να συνδέονται με το υδραγωγείο.

Μενού επιλογής υδραγωγείων

Παροχетеυτικότητα			Διαρροές	
Ημερομηνία	Ύψος πτώσης [m]	Παροχή [m3/s]	Ημερομηνία	Συντ. διαρροών
1/10/2002	455.00	0.00		
1/10/2002	460.00	15.00		
1/10/2002	470.00	18.80		
1/10/2002	480.00	21.60		
1/10/2002	490.00	24.70		

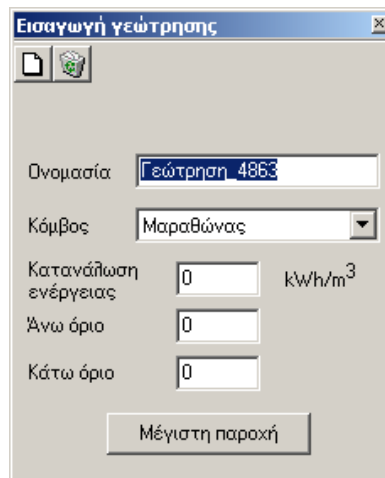
Σχήμα 4.23: Φόρμα Τροποποίησης Ιδιοτήτων Υδραγωγείου.

Προσθήκη γεώτρησης

Μια γεώτρηση (που στην πραγματικότητα μπορεί να αντιστοιχεί σε μια ομάδα γεωτρήσεων) μπορεί να προστεθεί στο μοντέλο δικτύου από τη Φόρμα Νέας Γεώτρησης, η οποία εμφανίζεται με τις ακόλουθες ενέργειες στην οθόνη του υπολογιστή:

- Από τη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου επιλέγοντας το εικονίδιο Νέα Γεώτρηση και κατόπιν πατώντας με το ποντίκι σε κάποιο σημείο της ελεύθερης επιφάνειας σχεδίασης δικτύου.

- Από την Κύρια Φόρμα του Υδρονομέα επιλέγοντας από το μενού Δίκτυο/ Εισαγωγή/ Εισαγωγή κόμβου.



Σχήμα 4.24: Φόρμα Νέας Γεώτρησης.

Προϋπόθεση για την εισαγωγή νέας γεώτρησης είναι η ύπαρξη ενός κόμβου ή ταμιευτήρα με τον οποίον θα συνδέεται.

Κατά τη δημιουργία ενός νέου αντικειμένου γεώτρησης, εμφανίζεται η φόρμα με τυπικές τιμές ιδιοτήτων, τις οποίες ο χρήστης καλείται να τροποποιήσει. Συγκεκριμένα μπορεί να τροποποιήσει τις εξής ιδιότητες:

- Την ονομασία της νέας γεώτρησης.
- Τον κόμβο με τον οποίον συνδέεται.
- Την κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την άντληση ενός κυβικού μέτρου νερού από τον υπόγειο υδροφόρο.
- Τον συντελεστή άνω ορίου επί του συνολικού αποθέματος του συστήματος, πέραν του οποίου απαγορεύεται η λειτουργία της γεώτρησης.
- Τον συντελεστή κάτω ορίου επί του συνολικού αποθέματος του συστήματος, κάτω του οποίου η γεώτρηση λειτουργεί υποχρεωτικά, ανεξαρτήτως της ενέργειας που καταναλώνει.
- Τη μέγιστη δυνατότητα άντλησης της γεώτρησης για κάθε μήνα του έτους.

Η δυνατότητα άντλησης από τη γεώτρηση ορίζεται για κάθε μήνα του έτους από τη σχετική φόρμα. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ τριών μονάδων μέτρησης:

- κυβικά μέτρα το δευτερόλεπτο
- χιλιάδες κυβικά μέτρα την ώρα
- εκατομμύρια κυβικά μέτρα το μήνα (30 ημερών)

Πατώντας το κουμπί Αναπαραγωγή 1ης τιμής, αντιγράφεται η τιμή του 1ου μήνα στα πεδία όλων των μηνών του έτους.

Φόρμα Παροχής Γεώτρησης

Μαυροσουβάλα

m3/s tm3/d hm3/m

Αναπαραγωγή 1ης τιμής

Μήνας	Τιμή [m3/s]
1	1.36
2	1.41
3	1.36
4	1.36
5	1.51
6	1.36
7	1.41
8	1.36
9	1.41
10	1.36
11	1.36
12	1.41

Εισαγωγή

Φόρμα Παροχής Γεώτρησης.

Η γεώτρηση προστίθεται στον κατάλογο γεωτρήσεων του δικτύου με το πάτημα του εικονιδίου εισαγωγής (□). Με το πάτημα του εικονιδίου διαγραφής (☒) ακυρώνεται η προσθήκη της γεώτρησης.

Τροποποίηση ιδιοτήτων γεώτρησης

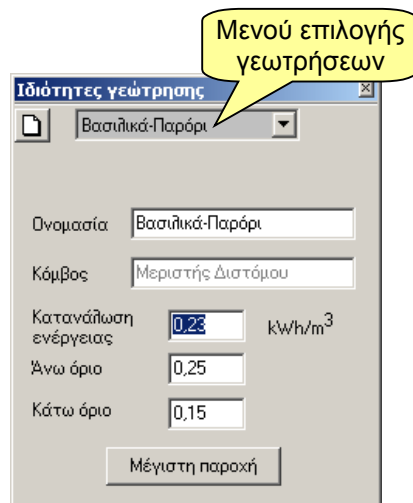
Η τροποποίηση των ιδιοτήτων μιας υφιστάμενης γεώτρησης πραγματοποιείται από τη Φόρμα Τροποποίησης Ιδιοτήτων Γεώτρησης η οποία εμφανίζεται στην οθόνη με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Από τη Φόρμα Σχεδίασης Δικτύου κάνοντας διπλό κλικ με το ποντίκι επάνω στην προς τροποποίηση γεώτρηση του δικτύου.
- Από το μενού της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα* με επιλογή Δίκτυο/ Τροποποίηση/ Τροποποίηση Γεώτρησης

Η Φόρμα Τροποποίησης Ιδιοτήτων Γεώτρησης διαφέρει από τη Φόρμα Νέας Γεώτρησης στο γεγονός ότι δεν είναι δυνατή η τροποποίηση της σύνδεσης με τον σχετικό κόμβο. Όλες οι υπόλοιπες λειτουργίες είναι οι ίδιες που αναφέρονται στο κεφάλαιο καταχώρησης νέας γεώτρησης.

Πέραν τούτου ο χρήστης μπορεί να ανακτήσει τις πληροφορίες που αφορούν άλλες γεωτρήσεις από το μενού επιλογής γεωτρήσεων της Φόρμας Τροποποίησης Ιδιοτήτων Γεώτρησης.

Προσοχή: Η γεώτρηση διαγράφεται από το δίκτυο με το πάτημα του εικονιδίου διαγραφής (☒) και την επιβεβαίωση από το χρήστη από τη σχετική φόρμα διαλόγου.

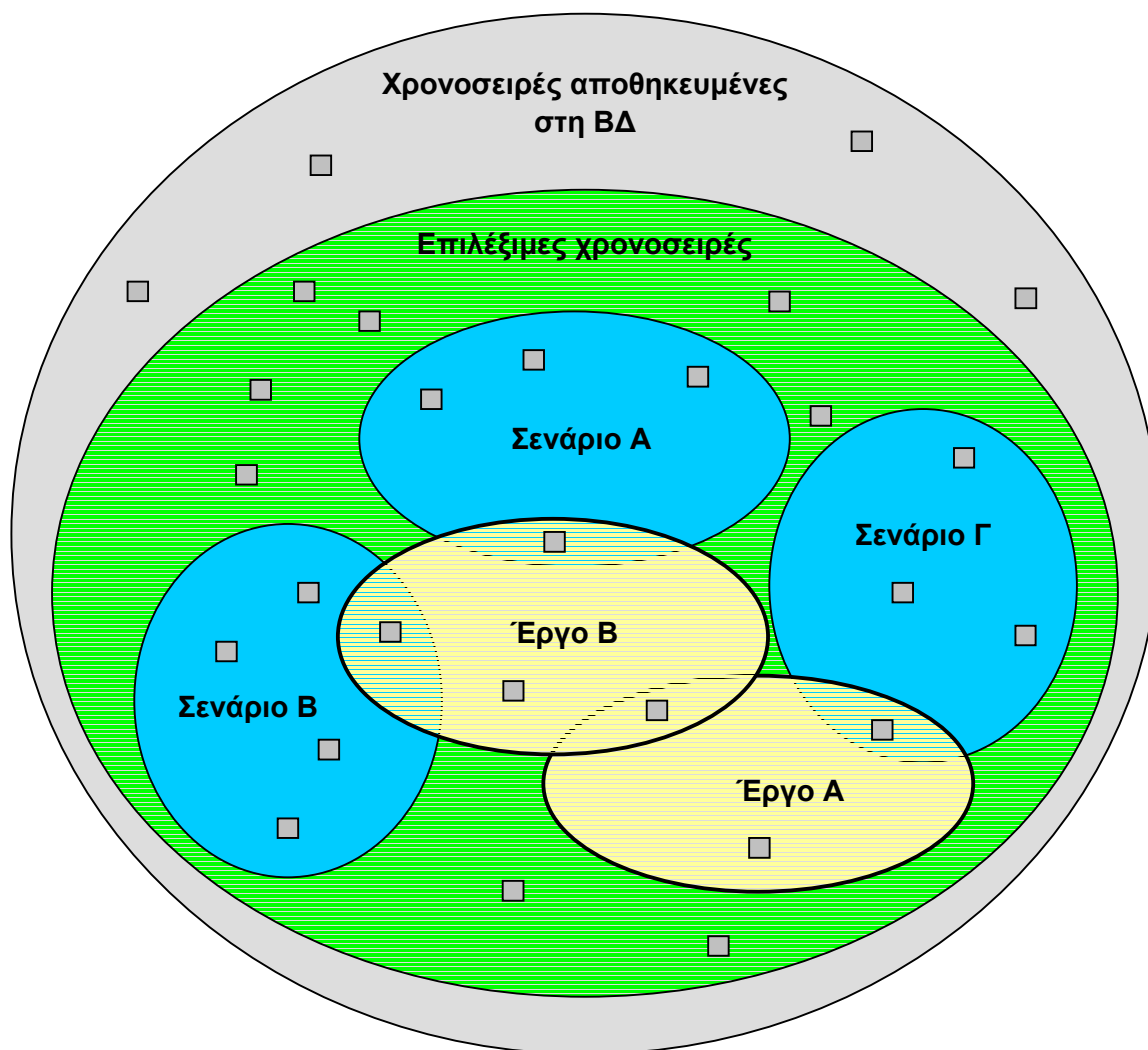


Σχήμα 4.25: Φόρμα Τροποποίησης Ιδιοτήτων Γεώτρησης.

4.5 Διαμόρφωση υδρολογικού σεναρίου

Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του δικτύου πρέπει να επιλεγούν τα υδρολογικά δεδομένα του σεναρίου. Συγκεκριμένα, ο χρήστης καλείται να καθορίσει για κάθε ταμειευτήρα του συστήματος τις χρονοσειρές βροχόπτωσης, απορροής και εξάτμισης, βάσει των οποίων θα εκτελεστούν προσομοιώσεις και/ή βελτιστοποιήσεις της διαχείρισης υδατικών πόρων. Οι υδρολογικές χρονοσειρές είναι είτε ιστορικές είτε συνθετικές και πρέπει να βρίσκονται αποθηκευμένες στη Βάση Δεδομένων. Ο *Υδρονομέας* χρησιμοποιεί χρονοσειρές αυτούσιες ή μέρος αυτών από τη Βάση, χωρίς να κάνει οποιαδήποτε τροποποίηση στις τιμές τους. Η διαχείρισή χρονοσειρών στη Βάση και η παραγωγή νέων χρονοσειρών εξασφαλίζεται από άλλες εφαρμογές (βλ. Υδρογνώμων, Κασταλία). Τα επόμενα εδάφια περιγράφουν τον τρόπο επιλογής υδρολογικών χρονοσειρών είτε μεμονωμένα είτε ως ομάδα συνθετικών χρονοσειρών που δημιουργήθηκαν από το Σύστημα Στοχαστικής Προσομοίωσης Υδρολογικών Μεταβλητών *Κασταλία* βάσει κάποιου υδρολογικού σεναρίου.

Επιλέξιμες είναι οι αποθηκευμένες στη Βάση Δεδομένων χρονοσειρές βροχής, απορροής και εξάτμισης με μηνιαίο χρονικό βήμα και μονάδα μέτρησης χιλιοστά. Προκειμένου να εκτελεστεί η προσομοίωση είναι απαραίτητο οι χρονοσειρές που φορτώθηκαν να ικανοποιούν ορισμένες επιπρόσθετες προϋποθέσεις που ελέγχονται από το φύλλο χρονοσειρών της Φόρμας Επιλογών Έργου.



Σχήμα 4.26: Χρονοσειρές επιλέξιμες από τον Υδρονομέα.

■ Χρονοσειρές

Ομάδες χρονοσειρών



Το σύνολο των χρονοσειρών που είναι αποθηκευμένες στη Βάση Δεδομένων



Οι αποθηκευμένες στη Βάση χρονοσειρές, τις οποίες ο χρήστης είναι σε θέση να επιλέξει από τον Υδρονομέα. Πρόκειται για χρονοσειρές βροχής, απορροής και εξάτμισης με μηνιαίο χρονικό βήμα και μονάδα μέτρησης χιλιοστά



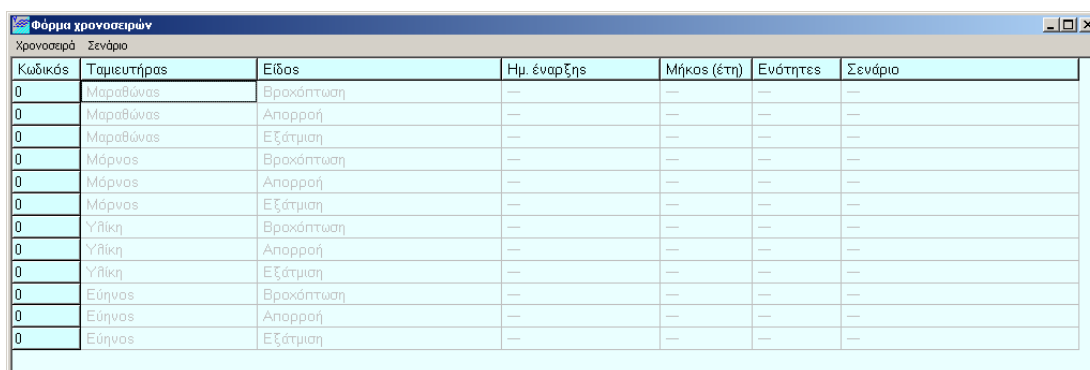
Συνθετικές χρονοσειρές που δημιουργήθηκαν και αποθηκεύτηκαν στη Βάση από το υπολογιστικό σύστημα Κασταλία και συνδέονται με κάποιο υδρολογικό σενάριο



Χρονοσειρές που έχουν επιλεγεί από κάποιο διαχειριστικό έργο του Υδρονομέα και η επιλογή έχει αποθηκευτεί στη ΒΔ. Οι επιλεγμένες χρονοσειρές μπορούν να ταυτίζονται με τις υδρολογικές χρονοσειρές που παρήχθησαν με κάποιο σενάριο του υπολογιστικού συστήματος Κασταλία, πράγμα όμως όχι απαραίτητο.

4.5.1 Επιλογή χρονοσειρών

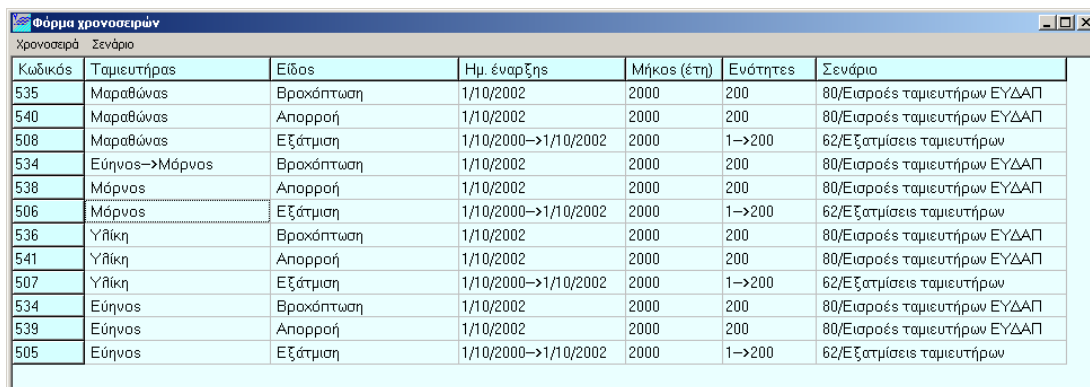
Με επιλογή από το μενού της Κύριας Φόρμας Υδρολογία/ Χρονοσειρές ή με το πάτημα του σχετικού εικονιδίου εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή η Φόρμα Χρονοσειρών. Η φόρμα απαρτιθμεί σε μορφή καταλόγου όλες τις απαιτούμενες υδρολογικές χρονοσειρές, οι οποίες αντιστοιχούν σε χρονοσειρές βροχόπτωσης, απορροής και εξάτμισης για όλους τους ταμιευτήρες του συστήματος. Σε περίπτωση που ακόμα δεν έχει φορτωθεί καμία χρονοσειρά από τη Βάση εμφανίζονται όλες οι σειρές του καταλόγου απενεργοποιημένες.



Κωδικός	Ταμιευτήρας	Είδος	Ημ. έναρξης	Μήκος (έτη)	Ενότητες	Σενάριο
0	Μαραθιώνας	Βροχόπτωση	---	---	---	---
0	Μαραθιώνας	Απορροή	---	---	---	---
0	Μαραθιώνας	Εξάτμιση	---	---	---	---
0	Μόρνος	Βροχόπτωση	---	---	---	---
0	Μόρνος	Απορροή	---	---	---	---
0	Μόρνος	Εξάτμιση	---	---	---	---
0	Υψίκη	Βροχόπτωση	---	---	---	---
0	Υψίκη	Απορροή	---	---	---	---
0	Υψίκη	Εξάτμιση	---	---	---	---
0	Εύηνος	Βροχόπτωση	---	---	---	---
0	Εύηνος	Απορροή	---	---	---	---
0	Εύηνος	Εξάτμιση	---	---	---	---

Σχήμα 4.27: Φόρμα Χρονοσειρών πριν από την επιλογή χρονοσειρών.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη διενέργεια προσομοιώσεων είναι η ύπαρξη τουλάχιστον ενός ταμιευτήρα στο δίκτυο και η εισαγωγή από τη Βάση Δεδομένων χρονοσειρών βροχόπτωσης, απορροής και εξάτμισης για κάθε ταμιευτήρα. Όταν μια χρονοσειρά έχει φορτωθεί, η αντίστοιχη σειρά στον πίνακα εμφανίζεται με κανονική γραμματοσειρά σε χρώμα μαύρο και η αριστερή στήλη δίνει τον κωδικό της χρονοσειράς.



Κωδικός	Ταμιευτήρας	Είδος	Ημ. έναρξης	Μήκος (έτη)	Ενότητες	Σενάριο
535	Μαραθιώνας	Βροχόπτωση	1/10/2002	2000	200	80/Εισαρές ταμιευτήρων ΕΥΔΑΠ
540	Μαραθιώνας	Απορροή	1/10/2002	2000	200	80/Εισαρές ταμιευτήρων ΕΥΔΑΠ
508	Μαραθιώνας	Εξάτμιση	1/10/2000→1/10/2002	2000	1→200	62/Εξατμίσεις ταμιευτήρων
534	Εύηνος→Μόρνος	Βροχόπτωση	1/10/2002	2000	200	80/Εισαρές ταμιευτήρων ΕΥΔΑΠ
538	Μόρνος	Απορροή	1/10/2002	2000	200	80/Εισαρές ταμιευτήρων ΕΥΔΑΠ
506	Μόρνος	Εξάτμιση	1/10/2000→1/10/2002	2000	1→200	62/Εξατμίσεις ταμιευτήρων
536	Υψίκη	Βροχόπτωση	1/10/2002	2000	200	80/Εισαρές ταμιευτήρων ΕΥΔΑΠ
541	Υψίκη	Απορροή	1/10/2002	2000	200	80/Εισαρές ταμιευτήρων ΕΥΔΑΠ
507	Υψίκη	Εξάτμιση	1/10/2000→1/10/2002	2000	1→200	62/Εξατμίσεις ταμιευτήρων
534	Εύηνος	Βροχόπτωση	1/10/2002	2000	200	80/Εισαρές ταμιευτήρων ΕΥΔΑΠ
539	Εύηνος	Απορροή	1/10/2002	2000	200	80/Εισαρές ταμιευτήρων ΕΥΔΑΠ
505	Εύηνος	Εξάτμιση	1/10/2000→1/10/2002	2000	1→200	62/Εξατμίσεις ταμιευτήρων

Σχήμα 4.28: Φόρμα Χρονοσειρών κατόπιν επιλογής χρονοσειρών.

Ο πίνακας της Φόρμας Χρονοσειρών δίνει τις εξής χαρακτηριστικές πληροφορίες των φορτωμένων χρονοσειρών:

- το όνομα του ταμιευτήρα στον οποίο αναφέρονται οι χρονοσειρές
- το είδος της χρονοσειράς
- την ημερομηνία έναρξης της χρονοσειράς
- το συνολικό μήκος της χρονοσειράς (άθροισμα του μήκους όλων των ενοτήτων)
- το πλήθος των ενοτήτων στις οποίες διακρίνεται

- το σενάριο στο οποίο ενδεχομένως ανήκει η χρονοσειρά

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται μια χρονοσειρά στο μοντέλο προσομοίωσης για έναν ταμιευτήρα, ενώ αναφέρεται σε έναν άλλον (και ως τέτοια είναι καταχωρημένη στη Βάση Δεδομένων). Επίσης, για λόγους σκοπιμότητας της προσομοίωσης μπορεί να μετατοπιστεί ο χρόνος έναρξης ή ο αριθμός των ενοτήτων της χρονοσειράς, εξομοιώνοντας τα χαρακτηριστικά αυτά με τα χαρακτηριστικά των υπολοίπων χρονοσειρών. Ο τρόπος πραγματοποίησης της εξομοίωσης αναφέρεται στο φύλλο χρονοσειρών της Φόρμας Επιλογών Έργου.

Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις που αφορούν τη χρήση των χρονοσειρών δίνονται με ένα βελάκι (→) στη σχετική στήλη του πίνακα χρονοσειρών, όπως περιγράφουν τα παρακάτω παραδείγματα:

1^ο παράδειγμα:

Η καταχώρηση 1/10/2000 → 1/10/2002 στη στήλη Ημ. Έναρξης σημαίνει ότι η χρονοσειρά έχει στη Βάση Δεδομένων καταχωρημένη ως ημερομηνία έναρξης την 1/10/2000, όμως κατά την προσομοίωση θα θεωρηθεί ως ημερομηνία έναρξης η 1/10/2002.

2^ο παράδειγμα:

Η καταχώρηση Εύηνος → Μόρνος στη στήλη Ταμιευτήρας σημαίνει ότι η χρονοσειρά βροχόπτωσης αναφέρεται στον ταμιευτήρα του Ευήνου, όμως κατά την προσομοίωση θα χρησιμοποιηθεί στον ταμιευτήρα του Μόρνου.

Εισαγωγή χρονοσειρών από τη Βάση Δεδομένων

Από το μενού της Φόρμας Χρονοσειρών και με επιλογή Χρονοσειρά/ Εισαγωγή όλων από τη ΒΔ μπορούν να φορτωθούν οι υδρολογικές χρονοσειρές που έχουν επιλεγεί παλαιότερα για το συγκεκριμένο έργο και οι επιλογές είχαν αποθηκευτεί στη Βάση Δεδομένων.

Προσοχή: Η εισαγωγή χρονοσειρών από τη Βάση καταργεί και αντικαθιστά τις όποιες επιλογές χρονοσειρών είχε κάνει έως τώρα ο χρήστης.

Εισαγωγή μεμονωμένης χρονοσειράς

Ο χρήστης είναι σε θέση να εισάγει μια χρονοσειρά βροχόπτωσης, απορροής ή εξάτμισης για έναν ταμιευτήρα του δικτύου από τη Βάση Δεδομένων με τον ακόλουθο τρόπο:

1. Επιλογή της σειράς του καταλόγου της Φόρμας Χρονοσειρών που αντιστοιχεί στην επιθυμητή χρονοσειρά κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στη σειρά. Αμέσως η σειρά αυτή λαμβάνει κίτρινο φόντο, πράγμα που υποδηλώνει ότι έχει επιλεγεί.
2. Από το μενού της Φόρμας Χρονοσειρών και με επιλογή Χρονοσειρά/ Εισαγωγή χρονοσειράς εμφανίζεται η Φόρμα Επιλογής Χρονοσειρών.
3. Εισαγωγή μιας χρονοσειράς από τον κατάλογο της Φόρμας Επιλογής Χρονοσειρών.

Φόρμα Επιλογής Χρονοσειρών

Η Φόρμα Επιλογής Χρονοσειρών απαριθμεί σε μορφή καταλόγου όλες τις δυνατές επιλογές χρονοσειρών που είναι αποθηκευμένες στη Βάση Δεδομένων. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται οι χρονοσειρές του είδους που επιλέχθηκε από τη Φόρμα Χρονοσειρών (βροχόπτωση, απορροή ή εξάτμιση) και που αναφέρονται σε σταθερό μηνιαίο χρονικό βήμα.

Φόρμα επιλογής χρονοσειρών με μηνιαίο χρονικό βήμα

Επιλογή Χρονοσειρές ταμιευτήρα Συνθετικές χρονοσειρές
 Ιστορικές χρονοσειρές

Υλική

ID	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ	ΜΟΝΑΔΑ	ΕΝΑΡΞΗ	ΛΗΞΗ	ΕΙΔΟΣ	ΤΑΜΕΥΤΗΡΑΣ
72		0		9 1/10/1979	1/9/1995	Εξάτμιση	Μόρνος
506	Εξάτμιση - Μόρνος	1		9 1/10/2000	1/9/4000	Εξάτμιση	Μόρνος
76		0		9 1/1/1977	1/9/1997	Εξάτμιση	Υλική
507	Εξάτμιση - Υλική	1		9 1/10/2000	1/9/4000	Εξάτμιση	Υλική
218	Υψος εξάτμισης στον ταμιευτήρα Μαραθώνα	0		9 1/10/1933	1/9/1981	Εξάτμιση	Μαραθώνας
508	Εξάτμιση - Μαραθώνας	1		9 1/10/2000	1/9/4000	Εξάτμιση	Μαραθώνας
219	Μετρημένη εξάτμιση	0		1/2/1933	1/12/1981	Εξάτμιση	Μαραθώνας
70		0		9 1/1/1974	1/9/1994	Εξάτμιση	Εύηνος
505	Εξάτμιση - Εύηνος	1		9 1/10/2000	1/9/4000	Εξάτμιση	Εύηνος

Σχήμα 4.29: Φόρμα Επιλογής Χρονοσειρών.

Ο κατάλογος περιέχει ορισμένα χαρακτηριστικά στοιχεία της χρονοσειράς, όπως ο κωδικός (ID), η ονομασία, αν πρόκειται για ιστορική ή συνθετική χρονοσειρά, οι ημερομηνίες έναρξης και λήξης και ο ταμιευτήρας ή μετεωρολογικός σταθμός στον οποίον αναφέρονται.

Ο χρήστης είναι σε θέση να επιλέξει χρονοσειρά από το σύνολο των χρονοσειρών της Βάσης Δεδομένων που ικανοποιούν τους προαναφερθέντες περιορισμούς. Ειδικότερα, είναι σε θέση να επιλέξει χρονοσειρά που αναφέρεται σε διαφορετικό ταμιευτήρα από αυτόν που έχει επιλέξει στη Φόρμα Χρονοσειρών. Αυτή η δυνατότητα είναι χρήσιμη στην περίπτωση που ελλείψει στοιχείων για έναν ταμιευτήρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία ενός παραπλήσιου ταμιευτήρα ή σταθμού μέτρησης.

Πέραν τούτου, με τις κατάλληλες επιλογές στη φόρμα ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τη σύνθεση του καταλόγου ώστε να εμφανίζει χρονοσειρές που αναφέρονται σε συγκεκριμένο μόνο ταμιευτήρα ή σε συνθετικές ή ιστορικές μόνο χρονοσειρές.

Η επιλογή και εισαγωγή μιας χρονοσειράς από τη Βάση Δεδομένων πραγματοποιείται με τον ακόλουθο τρόπο:

1. Επιλογή της σειράς του καταλόγου της Φόρμας Επιλογής Χρονοσειρών που αντιστοιχεί στην επιθυμητή χρονοσειρά κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στη σειρά.
2. Εισαγωγή μιας χρονοσειράς πατώντας το κουμπί **Επιλογή**.

Μη επιλογή χρονοσειράς

Σε ορισμένες εφαρμογές ο χρήστης ενδέχεται να μην επιθυμεί την εισαγωγή κάποιας χρονοσειράς για συγκεκριμένο ταμιευτήρα του δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να γίνουν οι εξής επιλογές:

1. Επιλογή της σειράς του καταλόγου της Επιλογής Χρονοσειρών που αντιστοιχεί στην χρονοσειρά για την οποία δεν επιθυμείται η εισαγωγή της, κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στη σειρά.
2. Από το μενού της Φόρμας Χρονοσειρών επιλογή **Χρονοσειρά/ Μηδενική χρονοσειρά**, με αποτέλεσμα το υπολογιστικό σύστημα να μην εισάγει δεδομένα για το συγκεκριμένο ταμιευτήρα και είδος χρονοσειράς.

Η μηδενική χρονοσειρά εμφανίζεται στη Φόρμα Χρονοσειρών με τον κωδικό -1 .

Κατάργηση επιλογής χρονοσειράς

Ο χρήστης μπορεί να καταργήσει την επιλογή χρονοσειράς που έχει γίνει πρωτύτερα με τον ακόλουθο τρόπο:

1. Επιλογή της σειράς του καταλόγου της Φόρμας Χρονοσειρών που αντιστοιχεί σε κάποια φορτωμένη χρονοσειρά.
2. Από το μενού της Φόρμας Χρονοσειρών επιλογή Χρονοσειρά/ Διαγραφή χρονοσειράς.

Επισημαίνεται ότι με τις παραπάνω ενέργειες καταργείται η επιλογή της χρονοσειράς για το συγκεκριμένο έργο χωρίς να επηρεάζεται κατά οποιονδήποτε τρόπο η αποθηκευμένη χρονοσειρά στη Βάση Δεδομένων.

Πίνακας τιμών χρονοσειράς

Ο χρήστης μπορεί να επισκοπήσει τις τιμές φορτωμένων χρονοσειρών με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Επιλογή της σειράς του καταλόγου της Φόρμας Χρονοσειρών που αντιστοιχεί σε κάποια φορτωμένη χρονοσειρά. Κατόπιν, από το μενού της Φόρμας Χρονοσειρών επιλογή Χρονοσειρά/ Πίνακας Τιμών
- Διπλό αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στη σειρά που αναφέρεται στη χρονοσειρά.

Στην οθόνη εμφανίζεται ο πίνακας τιμών για τις χρονοσειρές του συγκεκριμένου ταμειυτήρα σε mm. Στο κάτω μέρος της φόρμας εμφανίζονται η μέση μηνιαία και ετήσια τιμή της χρονοσειράς καθώς και οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις.

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιουλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
2002-03	78,9	45,5	24,3	30,7	35,2	109,3	78,2	158,3	201,5	217,4	268,2	165,8	1413,3
2003-04	76,2	36,7	29,4	29,3	28,8	61,2	96,7	167,3	203,1	232,2	187,0	141,8	1289,8
2004-05	70,1	42,9	23,2	14,2	65,8	54,3	107,7	192,2	214,6	262,8	208,6	155,2	1411,7
2005-06	78,9	23,8	11,5	8,4	25,2	57,0	89,7	182,9	257,8	283,9	260,0	165,4	1444,7
2006-07	64,0	32,1	22,3	26,0	26,9	76,5	97,3	128,5	204,3	273,4	251,2	162,0	1364,4
2007-08	78,8	45,9	22,9	24,1	37,6	60,9	114,4	172,9	205,7	231,8	190,0	136,1	1321,0
2008-09	66,5	42,8	34,1	18,1	16,0	56,3	103,9	185,8	209,6	247,8	249,2	156,1	1386,2
2009-10	79,3	50,7	34,0	35,5	53,5	43,7	104,4	117,6	181,7	221,8	180,1	120,9	1223,3
2010-11	104,5	38,9	18,3	21,8	29,4	42,6	78,6	148,5	258,6	284,3	260,6	140,8	1426,9
2011-12	53,8	36,8	21,5	22,0	35,2	52,0	90,0	164,6	225,3	281,3	262,8	238,3	1483,5
2002-03	146,9	63,3	21,4	33,2	51,9	56,2	118,1	173,0	194,5	242,5	231,5	136,4	1468,8
2003-04	69,3	16,1	15,1	23,5	19,0	78,6	111,6	157,0	198,2	280,3	214,3	120,4	1303,5
2004-05	94,1	44,3	29,3	30,8	34,2	87,5	91,3	131,1	188,2	230,2	197,6	170,4	1329,2
2005-06	95,8	51,5	29,5	27,6	36,7	47,5	83,0	129,4	230,9	263,6	244,6	162,9	1403,1
2006-07	54,4	7,6	9,4	7,7	19,8	110,9	131,5	192,2	230,2	256,3	244,6	145,8	1410,3
2007-08	52,2	31,4	19,1	27,8	38,8	79,0	154,9	192,9	212,1	222,9	169,3	97,0	1297,5
2008-09	57,8	7,0	0,0	12,8	22,4	32,3	69,4	137,6	220,8	271,2	257,3	152,5	1241,1
2009-10	85,6	43,9	28,2	17,1	21,9	41,1	98,3	156,6	190,3	230,5	260,0	142,5	1316,1
2010-11	82,0	23,7	13,6	17,5	36,0	74,3	98,8	144,0	172,0	221,1	200,2	133,6	1216,8
2011-12	52,7	36,7	4,8	22,5	43,1	53,3	100,1	169,8	220,1	278,3	225,4	157,5	1364,3

Στατιστικά χαρακτηριστικά	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιουλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	78,0	36,7	22,5	23,2	36,0	60,2	99,3	150,4	207,1	250,2	225,7	143,6	1332,9
Τυπ. απόκλιση	21,1	12,0	8,1	7,3	15,4	17,5	26,3	34,6	30,3	34,2	35,4	25,4	167,0

Σχήμα 4.30: Πίνακας τιμών χρονοσειράς.

4.5.2 Επιλογή υδρολογικού σεναρίου

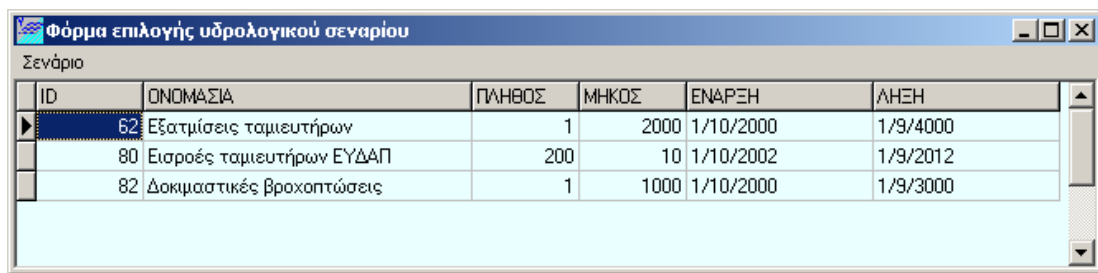
Οι συνθετικές χρονοσειρές που έχουν δημιουργηθεί από το Σύστημα Στοχαστικής Προσομοίωσης Υδρολογικών Μεταβλητών Κασαλία βάσει κάποιου υδρολογικού σεναρίου είναι στατιστικά συσχετισμένες μεταξύ τους. Πέραν τούτου έχουν κοινά χαρακτηριστικά όπως ίδιο μήκος και διάκριση

σε ίσο αριθμό ενοτήτων (περίπτωση καταληκτικής προσομοίωσης). Για τους λόγους αυτούς ο χρήστης πιθανόν να θέλει να επιλέξει όλες τις χρονοσειρές που ανήκουν στο ίδιο υδρολογικό σενάριο και όχι μεμονωμένες και ανεξάρτητες μεταξύ τους χρονοσειρές.

Ο *Υδρονομέας* παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής από τη Βάση Δεδομένων όλων των χρονοσειρών που ανήκουν στο ίδιο υδρολογικό σενάριο με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

Επιλογή υδρολογικού σεναρίου μέσω της σχετικής φόρμας

Εμφάνιση στην οθόνη της Φόρμας Επιλογής Υδρολογικού Σεναρίου επιλέγοντας από το μενού της Κύριας Φόρμας Υδρολογία/ Σενάρια ή από το μενού της Φόρμας Χρονοσειρών Σενάριο/ Επιλογή σεναρίου.



ID	ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΠΛΗΘΟΣ	ΜΗΚΟΣ	ΕΝΑΡΞΗ	ΛΗΞΗ
62	Εξατμίσεις ταμειυτήρων	1	2000	1/10/2000	1/9/4000
80	Εισροές ταμειυτήρων ΕΥΔΑΠ	200	10	1/10/2002	1/9/2012
82	Δοκιμαστικές βροχοπτώσεις	1	1000	1/10/2000	1/9/3000

Σχήμα 4.31: Φόρμα Επιλογής Υδρολογικού Σεναρίου.

Η Φόρμα παρέχει πληροφορίες για όλα τα υδρολογικά σενάρια που έχουν δημιουργηθεί από το λογισμικό Κασταλία και έχουν αποθηκευτεί στη Βάση Δεδομένων, όπως:

- η ονομασία του σεναρίου,
- το πλήθος και το μήκος των ενοτήτων στις οποίες διακρίνεται η χρονοσειρά,
- η ημερομηνία έναρξης και λήξης της χρονοσειράς.

Περισσότερες πληροφορίες για συγκεκριμένα υδρολογικά σενάρια παρέχονται από τη Φόρμα Πληροφορίας Υδρολογικών Σεναρίων και Μεταβλητών, η οποία εμφανίζεται με επιλογή από το μενού Σενάριο/ Πληροφορίες από τη Φόρμα Επιλογής Υδρολογικού Σεναρίου. Επεξηγήσεις των παραμέτρων και επιλογών της φόρμας αυτής παρέχονται από την τεκμηρίωση του λογισμικού πακέτου *Κασταλία*.

Σχήμα 4.32: Φόρμα Πληροφορίας Υδρολογικών Σεναρίων και Μεταβλητών.

Επιλογή υδρολογικού σεναρίου στη βάση επιλεγμένης χρονοσειράς

Σε περίπτωση που έχει φορτωθεί μια συνθετική χρονοσειρά είναι δυνατή η εισαγωγή όλων των υπολοίπων χρονοσειρών που ανήκουν στο ίδιο υδρολογικό σενάριο – εφόσον υπάρχουν τέτοιες – με την επιλογή **Σενάριο/ Εισαγωγή σχετικού σεναρίου από το μενού της Φόρμας Χρονοσειρών**. Απαραίτητη προϋπόθεση για αυτό είναι να έχει προηγηθεί η αντιστοίχιση πραγματικών ταμιευτήρων που είναι καταχωρημένοι στη Βάση Δεδομένων με τους ταμιευτήρες του μοντέλου.

4.6 Καθορισμός στόχων και περιορισμών προσομοίωσης

Ο *Υδρονομέας* έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει υπόψη του περισσότερους στόχους και περιορισμούς προσομοίωσης ταυτόχρονα, οι οποίοι ενδεχομένως να είναι ανταγωνιστικοί μεταξύ τους. Οι κατηγορίες στόχων που μπορούν να τεθούν και οι συνιστώσες δικτύου με τις οποίες συνδέονται δίνονται από τον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Σύνδεση στόχου και συνιστώσας δικτύου

Κατηγορία στόχου	Συνιστώσα δικτύου
Ζήτηση νερού για κατανάλωση (ύδρευση, άρδευση κλπ.)	Κόμβος/Ταμιευτήρας
Μέγιστη, ελάχιστη ή σταθερή ροή υδραγωγείου	Υδραγωγείο
Μέγιστο ή ελάχιστο απόθεμα ταμιευτήρα	Ταμιευτήρας
Αποφυγή υπερχειλίσας ταμιευτήρα	Ταμιευτήρας

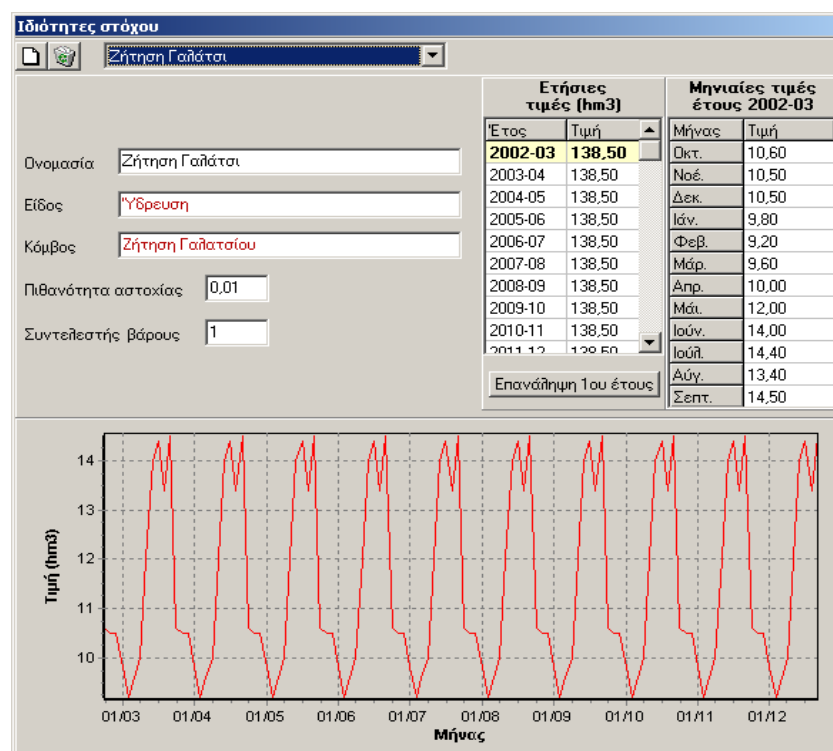
Κάποια συνιστώσα του δικτύου μπορεί να συνδέεται με περισσότερους από έναν στόχους. Περιορισμοί όσον αφορά το πλήθος των συσχετίσεων υπάρχουν μόνο στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Επιτρεπόμενος είναι το ανώτατο ένας στόχος από τις κατηγορίες μέγιστου αποθέματος, ελάχιστου αποθέματος και υπερχειλίσης για κάθε ταμιευτήρα
- Επιτρεπόμενος είναι το πολύ ένας στόχος από τις κατηγορίες ελάχιστης ροής και μέγιστης ροής ή το πολύ ένας στόχος σταθερής ροής ανά υδραγωγείο.

Της εισαγωγής στόχων πρέπει να έχει προηγηθεί ο σχεδιασμός ενός μοντέλου δικτύου ή ακριβέστερα εκείνων των συνιστωσών του δικτύου στους οποίους θα αναφέρονται οι στόχοι. Στη συνέχεια περιγράφονται οι τρόποι διαχείρισης στόχων από το χρήστη και ένταξής τους σε έναν σύστημα προτεραιοτήτων.

4.6.1 Εισαγωγή στόχου

Επιλέγοντας από το μενού της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομία* Δίκτυο/ Εισαγωγή/ Εισαγωγή στόχου εμφανίζεται στην οθόνη η Φόρμα Στόχου.



Σχήμα 4.33: Παράδειγμα Φόρμας Στόχου.

Η φόρμα συγκεντρώνει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του στόχου, τα οποία λαμβάνουν τυπικές τιμές κατά την εμφάνιση της φόρμας:

- Η ονομασία του στόχου ή περιορισμού
- Το είδος του στόχου που μπορεί να είναι κάποιο από τα εξής:
 - Κατανάλωση νερού για άρδευση
 - Κατανάλωση νερού για ύδρευση
 - Ελάχιστη ροή υδραγωγείου
 - Μέγιστη ροή υδραγωγείου
 - Σταθερή ροή υδραγωγείου


- Ελάχιστο απόθεμα ταμιευτήρα
- Μέγιστο απόθεμα ταμιευτήρα
- Αποφυγή υπερχειλίσης ταμιευτήρα
- Η συνιστώσα του δικτύου με την οποία συνδέεται ο στόχος. Ανάλογα με το είδος του στόχου η συνιστώσα μπορεί να είναι ένας ταμιευτήρας, ένας κόμβος ή ένα υδραγωγείο. Το μενού συνιστώσας δικτύου εμφανίζει όλες τις δυνατές επιλογές για την εκάστοτε περίπτωση.
- Η πιθανότητα αστοχίας στόχου. Χρησιμοποιείται μόνο στον υπολογισμό του δείκτη επίδοσης σε βελτιστοποιήσεις με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση κόστους ή την μεγιστοποίηση απόληψης με δεδομένο το επίπεδο αστοχίας. Το πεδίο τιμών του πεδίου είναι μεταξύ 0 και 1.
- Ο συντελεστής βάρους του στόχου λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του δείκτη επίδοσης του κανόνα λειτουργίας. Ο συντελεστής βάρους λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1.
- Οι τιμές του στόχου για την περίοδο προσομοίωσης καθορίζονται από τους πίνακες μηνιαίων και ετήσιων τιμών στόχου.

Η εισαγωγή των μηνιαίων τιμών πραγματοποιείται με τον ακόλουθο τρόπο:

1. Επιλογή του έτους κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στη αντίστοιχη σειρά του πίνακα ετησίων τιμών.
2. Στον δεξιό πίνακα εμφανίζονται οι μηνιαίες τιμές του έτους, οι οποίες μπορούν να τροποποιηθούν κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω σε κάποια σειρά του πίνακα.


Στους στόχους με σταθερή εποχιακή διακύμανση μπορεί να αναπαραχθεί ο πίνακας τιμών του πρώτου έτους σε όλη την υπόλοιπη διάρκεια προσομοίωσης πατώντας το κουμπί Επανάληψη 1^{ου} έτους.

- Το διάγραμμα στο κάτω μέρος της φόρμας δίνει τις τιμές του στόχου σε γραφική μορφή. Τροποποιείται δυναμικά απεικονίζοντας άμεσα τις αλλαγές που κάνει ο χρήστης στις τιμές στόχου.

Ο χρήστης καλείται να διαμορφώσει τα χαρακτηριστικά του στόχου και να τον εισαγάγει πατώντας το εικονίδιο Εισαγωγή στόχου (□). Αντίθετα με το πάτημα του εικονιδίου Διαγραφή  διαγράφεται ο στόχος.

4.6.2 Προτεραιότητες στόχων

Για την επίτευξη των στόχων το υπολογιστικό σύστημα δεν απαιτεί από το χρήστη να προκαθορίσει τον τρόπο μεταφοράς νερού ή την κατανομή των υδατικών πόρων στο δίκτυο. Αντίθετα, ο αλγόριθμος μεταφοράς νερού του υπολογιστικού συστήματος εξασφαλίζει σε κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης τον απαιτούμενο όγκο υπολογίζοντας εκ νέου την ποσότητα απόληψης από κάθε υδατικό πόρο και τον τρόπο μεταφοράς του έως τα σημεία χρήσης νερού με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Ο αλγόριθμος προσδιορίζει αυτόνομα τις ποσότητες νερού με βάση την κατάσταση του δικτύου, τους κανόνες λειτουργίας, τους στόχους που έχει θέσει ο χρήστης και τις προτεραιότητες που έχει δώσει σε αυτές.

Ειδικότερα οι προτεραιότητες των στόχων καθορίζονται από τη Φόρμα Προτεραιότητας Στόχων, η οποία μπορεί να εμφανιστεί στην οθόνη επιλέγοντας από το μενού της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα* Δίκτυο/ Τροποποίηση/ Τροποποίηση στόχου ή πατώντας το σχετικό εικονίδιο ().

Α/Α	Συνιστώσα δικτύου	Στόχος	Ενεργός στόχος	Τιμή στόχου	Πιθ. αστοχίας
1	Μαραθώνας	Αποφυγή υπερχειλίσεων	ΝΑΙ	0.00	1.000
2	Μαραθώνας	Μέγιστος όγκος (hm ³)	ΝΑΙ	30.50-35.00	1.000
3	Μόρνος	Αποφυγή υπερχειλίσεων	ΝΑΙ	0.00	1.000
4	Εύηνος	Αποφυγή υπερχειλίσεων	ΝΑΙ	0.00	1.000
5	Ζήτηση Μενιδίου	Κατανάλωση νερού - Ύδρευση (hm ³)	ΝΑΙ	183.60	0.010
6	Ζήτηση Γαλαταίου	Κατανάλωση νερού - Ύδρευση (hm ³)	ΝΑΙ	138.50	0.010
7	Ζήτηση Κιούρκων	Κατανάλωση νερού - Ύδρευση (hm ³)	ΝΑΙ	57.70	0.010
8	Ζήτηση Μάνδρας	Κατανάλωση νερού - Ύδρευση (hm ³)	ΝΑΙ	45.20	0.010
9	Μεριστής Κιθαιρώνα	Κατανάλωση νερού - Ύδρευση (hm ³)	ΝΑΙ	5.61	0.010
10	No 3	Κατανάλωση νερού - Ύδρευση (hm ³)	ΝΑΙ	2.20	1.000
11	Εύηνος	Μέγιστος όγκος (hm ³)	ΝΑΙ	110.00	1.000
12	Μόρνος	Μέγιστος όγκος (hm ³)	ΝΑΙ	600.00	1.000
13	Μαραθώνας	Ελάχιστος όγκος (hm ³)	ΝΑΙ	25.40-34.50	1.000
14	Μόρνος	Ελάχιστος όγκος (hm ³)	ΝΑΙ	290.00	1.000
15	Εύηνος	Κατανάλωση νερού - Ύδρευση (hm ³)	ΝΑΙ	31.20	1.000
16	Υφίκη	Κατανάλωση νερού - Άρδευση (hm ³)	ΝΑΙ	35.10	1.000

Σχήμα 4.34: Φόρμα Προτεραιότητας Στόχων.

Οι στόχοι εντάσσονται στον κατάλογο της Φόρμας Προτεραιότητας Στόχων με τη σειρά προτεραιότητας που προβλέπεται να εξυπηρετηθούν κατά την προσομοίωση. Σε κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης το σύστημα εξασφαλίζει, εφόσον είναι εφικτό, την εξυπηρέτηση των στόχων με ανώτερη προτεραιότητα και εφόσον είναι διαθέσιμοι επιπλέον υδατικοί πόροι θα εξυπηρετήσει και τους στόχους με χαμηλότερη προτεραιότητα.

Κάθε κατηγορία στόχων εμφανίζεται με συγκεκριμένο χρώμα όπως δείχνει ο Πίνακας 4.2.

Πίνακας 4.2: Σύνδεση στόχου και συνιστώσας δικτύου

Κατηγορία στόχου	Χρώμα
Κατανάλωση νερού για άρδευση	Πράσινο
Κατανάλωση νερού για ύδρευση	Κόκκινο
Ελάχιστη ροή υδραγωγείου	Μπλε
Μέγιστη ροή υδραγωγείου	Μπλε
Σταθερή ροή υδραγωγείου	Μπλε
Ελάχιστο απόθεμα ταμιευτήρα	Καφέ
Μέγιστο απόθεμα ταμιευτήρα	Καφέ
Αποφυγή υπερχειλίσης ταμιευτήρα	Καφέ

Οι πρώτες τρεις στήλες της Φόρμας Προτεραιότητας Στόχων αναφέρουν τον αριθμό προτεραιότητας, το αντικείμενο που συνδέεται με τον στόχο (Συνιστώσα δικτύου) και το είδος του στόχου. Η στήλη Τιμή στόχου αναφέρεται σε ετήσια τιμή εφόσον ο στόχος είναι του είδους *κατανάλωση νερού* και σε μηνιαία τιμή για όλους τους υπόλοιπους στόχους. Η πιθανότητα αστοχίας χρησιμοποιείται μόνο στον υπολογισμό του δείκτη επίδοσης σε βελτιστοποιήσεις με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση κόστους ή την μεγιστοποίηση απόληψης με δεδομένο το επίπεδο αστοχίας. Ο στόχος *αποφυγή υπερχειλίσεων* δεν παίρνει τιμή.

Ένας νέος στόχος λαμβάνει αρχικά τη μικρότερη προτεραιότητα απ' όλους τους υφιστάμενους στόχους και κατά συνέπεια εμφανίζεται τελευταίος στον κατάλογο της Φόρμας Προτεραιότητας Στόχων. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει την προτεραιότητα οποιουδήποτε στόχου πατώντας με το αριστερό πλήκτρο του ποντικιού επάνω στη σειρά του στόχου και με πατημένο το πλήκτρο να σύρει το δρομέα του ποντικιού στην επιθυμητή σειρά. Ο κατάλογος προτεραιοτήτων αναδιατάσσεται αμέσως μετά από αυτήν την ενέργεια.

4.6.3 Τροποποίηση ιδιοτήτων στόχου

Οι ιδιότητες των στόχων που έχουν εισαχθεί μπορούν να τροποποιηθούν από τη Φόρμα Ιδιοτήτων Στόχου, η οποία εμφανίζεται με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- Από το μενού της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα*, με επιλογή Δίκτυο/ Τροποποίηση/ Τροποποίηση στόχου.
- Από την Φόρμα Προτεραιότητας Στόχων πατώντας με το ποντίκι επάνω στη σειρά του στόχου στον σχετικό κατάλογο και ύστερα επιλέγοντας το εικονίδιο Στοιχεία στόχου (☰).
- Από τη Φόρμα Προτεραιότητας Στόχων κάνοντας διπλό κλικ με το ποντίκι επάνω στη σειρά του στόχου.

Από τη φόρμα που εμφανίζεται είναι δυνατή η τροποποίηση όλων των τιμών των ιδιοτήτων, με τον τρόπο που περιγράφηκε στην εισαγωγή νέου στόχου, εκτός από αυτές του είδους και της συνιστώσας με την οποία συνδέεται.

4.6.4 Διαγραφή στόχου

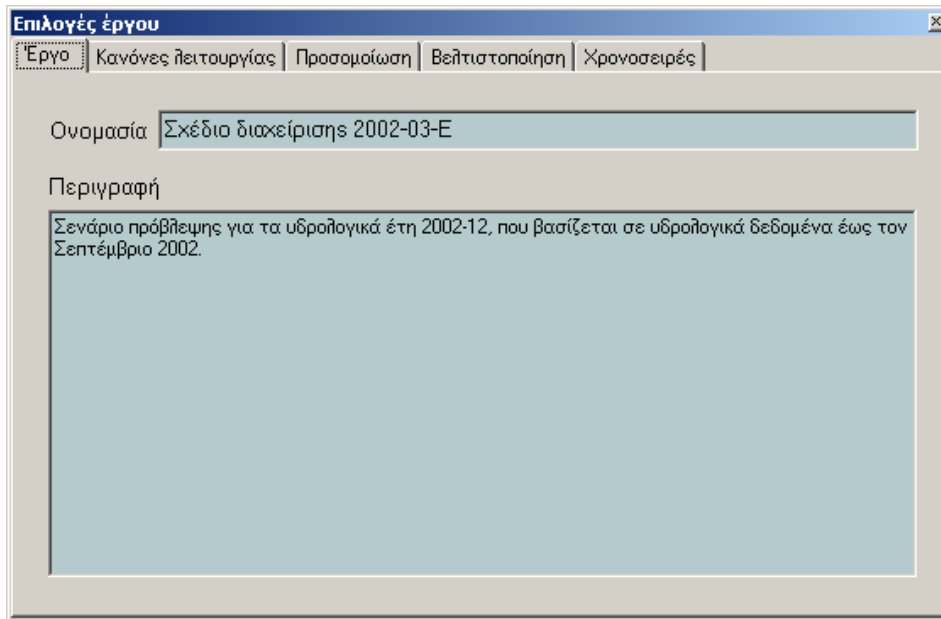
Ο χρήστης μπορεί να διαγράψει στόχους είτε από τη Φόρμα Προτεραιότητας Στόχων είτε από τη Φόρμα Στόχου πατώντας το εικονίδιο διαγραφής (🗑).

4.7 Επιλογές έργου

Από το μενού της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα*, επιλέγοντας Υπολογισμοί/ Επιλογές ο χρήστης μπορεί να εμφανίσει τη Φόρμα Επιλογών Έργου. Η φόρμα χωρίζεται σε φύλλα, κάθε ένα από τα οποία περιλαμβάνει μια ενότητα επιλογών.

4.7.1 Ονομασία και περιγραφή

Το φύλλο Βασικών Στοιχείων Έργου περιλαμβάνει πεδία στα οποία ο χρήστης μπορεί να ορίσει ή να τροποποιήσει την ονομασία και την περιγραφή του έργου.



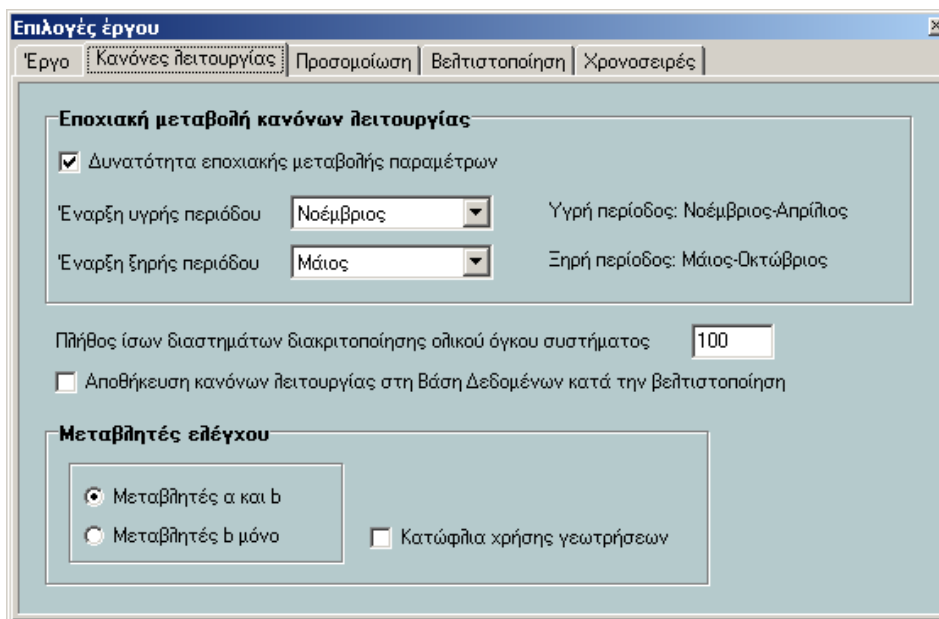
Σχήμα 4.35: Φύλλο Βασικών Στοιχείων Έργου της Φόρμας Επιλογών Έργου.

4.7.2 Κανόνες λειτουργίας

Το φύλλο αυτό περιλαμβάνει επιλογές που αφορούν τους κανόνες λειτουργίας ταμειυτήρων κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την εποχιακή διαφοροποίηση των κανόνων λειτουργίας σε υγρή και ξηρή περίοδο, ορίζοντας παράλληλα και τους μήνες έναρξης της εκάστοτε περιόδου. Στους ταμειυτήρες για τους οποίους έχει επιλεγεί να γίνεται η διαχείριση με βάση τον παραμετρικό κανόνα, η εποχιακή διαφοροποίηση αφορά τις μεταβλητές ελέγχου, ενώ στους υπόλοιπους ταμειυτήρες διαφοροποιείται εποχιακά ο σταθερός όγκος στόχος που έχει ορίσει ο χρήστης (βλ. Διαχείριση ταμειυτήρα).

Με επιλογή της εποχιακής διαφοροποίησης των κανόνων λειτουργίας κατά την βελτιστοποίηση, επιτυγχάνεται δυναμικά η θεωρητικά ακριβέστερη προσέγγιση της βέλτιστης λύσης, παράλληλα όμως αυξάνεται ο φόρτος επεξεργασίας και κατά συνέπεια επιμηκύνεται η διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Η βελτιστοποίηση είναι χρονοβόρα διαδικασία, η διάρκειά της οποίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η επιλογή της μεθόδου βελτιστοποίησης, το μέγεθος του δικτύου κ.ά. Κατά την βελτιστοποίηση το υπολογιστικό σύστημα εκτελεί διαδοχικές προσομοιώσεις αποθηκεύοντας στην προσωρινή μνήμη τους βέλτιστους κανόνες λειτουργίας. Με την επιλογή αποθήκευσης των κανόνων λειτουργίας στη Βάση Δεδομένων κατά τη βελτιστοποίηση, ο χρήστης μπορεί να ανακτήσει τα αποτελέσματα αυτά ύστερα από βλάβη που μπορεί να προκύψει κατά τη διάρκεια των υπολογισμών (π.χ. διακοπή ρεύματος).



Σχήμα 4.36: Φύλλο Κανόνων Λειτουργίας της Φόρμας Επιλογών Έργου.

Περιορίζοντας τον αριθμό μεταβλητών ελέγχου μόνο στους συντελεστές β του κανόνα λειτουργίας επιτυγχάνεται η ταχύτερη ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης εις βάρος όμως της ακρίβειας του αποτελέσματος.

Στις μεταβλητές ελέγχου μπορούν να συμπεριληφθούν τα όρια (άνω και κάτω) χρήσης γεωτρήσεων.

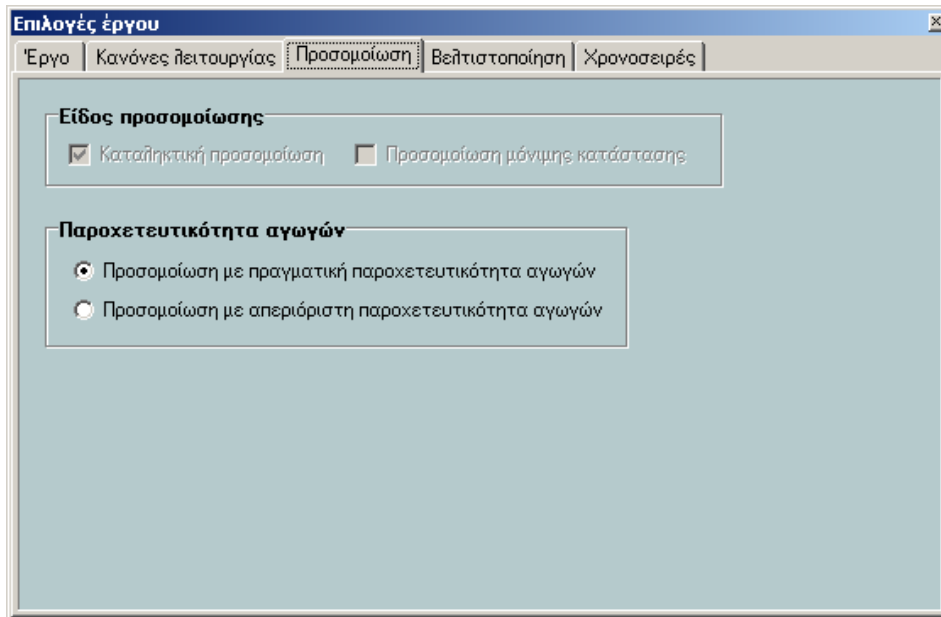
Σημείωση

Σύμφωνα με το μαθηματικό σχήμα που χρησιμοποιεί ο *Υδρονομέας* σε κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης καθορίζεται με βάση το συνολικό απόθεμα του συστήματος και δύο παραμέτρους (α και β) το απόθεμα-στόχος των ταμιευτήρων που συμμετέχουν στον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας. Η χρονοβόρα αυτή διαδικασία επιβραδύνει την προσομοίωση πράγμα που αντιμετωπίζεται στον *Υδρονομέα* με τον ακόλουθο τρόπο:

Το υπολογιστικό σύστημα δημιουργεί για κάθε έναν από αυτούς τους ταμιευτήρες πριν από την προσομοίωση με βάση τους συντελεστές α και β έναν πίνακα αντιστοίχισης αποθέματος-στόχου και συνολικού αποθέματος στο σύστημα. Το μέγεθος του πίνακα δίνεται από το χρήστη στο πεδίο πλήθους ίσων διαστημάτων διακριτοποίησης ολικού όγκου συστήματος. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης χρησιμοποιείται αυτός ο πίνακας για την εύκολη και γρήγορη προσέγγιση του αποθέματος-στόχου του ταμιευτήρα, πράγμα που επισπεύδει τη διαδικασία. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των διαστημάτων διακριτοποίησης τόσο ακριβέστερη είναι η προσέγγιση. Επισημαίνεται ότι η διακριτοποίηση αφορά τη μαθηματική έκφραση (μέσω παρεμβολής) του κανόνα λειτουργίας και μόνο, ενώ οι μεταβλητές ελέγχου δεν διακριτοποιούνται.

4.7.3 Επιλογές προσομοίωσης

Πριν από την έναρξη της διαδικασίας της προσομοίωσης ο χρήστης καλείται να επιλέξει εάν στο σενάριο που θα ακολουθηθεί θα ληφθεί υπόψη ο περιορισμός της παροχτετευτικότητας των υδραγωγείων ή εάν η παροχτετευτικότητα θα θεωρηθεί απεριόριστη. Η επιλογή αυτή καθορίζεται από το φύλλο προσομοίωσης της Φόρμας Επιλογών Έργου.



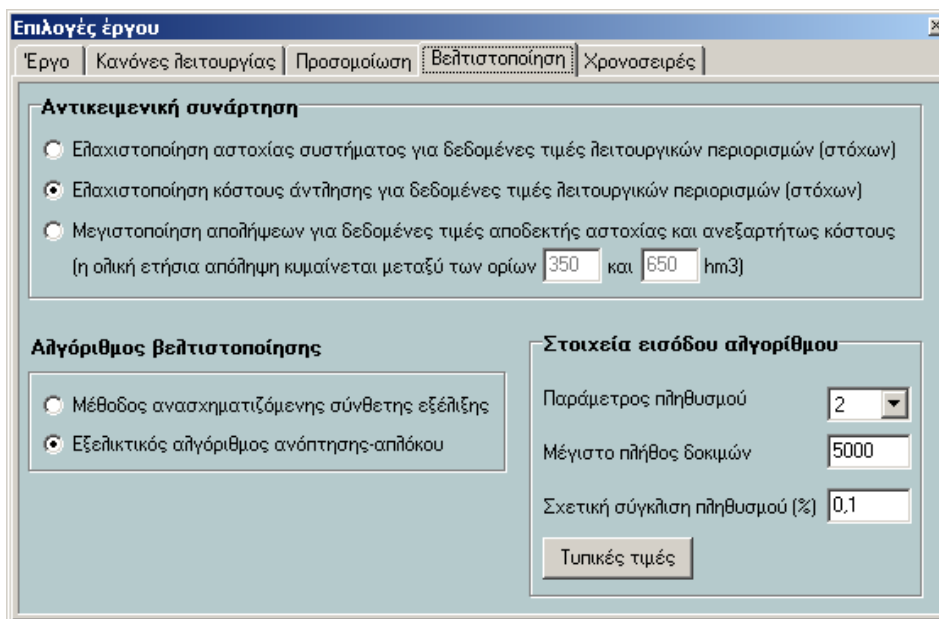
Σχήμα 4.37: Φύλλο Προσομοίωσης της Φόρμας Επιλογών Έργου.

4.7.4 Επιλογές βελτιστοποίησης

Οι επιλογές βελτιστοποίησης εμφανίζονται στο τέταρτο φύλλο της Φόρμας Επιλογών Έργου. Οι επιλογές αναφέρονται στην αντικειμενική συνάρτηση που θα χρησιμοποιηθεί, στη μέθοδο βελτιστοποίησης και στα λοιπά στοιχεία εισόδου του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Συγκεκριμένα ο χρήστης καλείται να επιλέξει ανάμεσα στις ακόλουθες αντικειμενικές συναρτήσεις:

- Ελαχιστοποίηση της μέσης σταθμισμένης πιθανότητας αστοχίας επίτευξης επιλεγμένων στόχων (π.χ. κάλυψης ζήτησης νερού για την ύδρευση της Αθήνας). Η τιμή του συντελεστή βάρους του στόχου (βλ. Φόρμα Ιδιοτήτων Στόχου) καθορίζει το βαθμό στον οποίο η πιθανότητα αστοχίας του συγκεκριμένου στόχου συμμετέχει στην αξιολόγηση του κανόνα λειτουργίας. Το λειτουργικό κόστος δεν λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση των κανόνων λειτουργίας.
- Ελαχιστοποίηση του μέσου κόστους λειτουργίας του υδροσυστήματος, με δεδομένες τιμές στόχων και δεδομένο αποδεκτό επίπεδο πιθανότητας αστοχίας, το οποίο ο χρήστης εισαγάγει από τη Φόρμα Ιδιοτήτων Στόχου. Η αστοχία δίνεται ως ποσοστό των χρονικών περιόδων με αστοχία επί του συνόλου των προσομοιωμένων.
- Μεγιστοποίηση της εγγυημένης απόδοσης του υδροσυστήματος για δεδομένο αποδεκτό επίπεδο πιθανότητας αστοχίας, το οποίο ο χρήστης εισαγάγει από τη Φόρμα Ιδιοτήτων Στόχου. Ταχύτερη σύγκλιση της βελτιστοποίησης στην μέγιστη τιμή επιτυγχάνεται περιορίζοντας το πεδίο τιμών του αποτελέσματος από τα σχετικά πεδία της φόρμας.



Σχήμα 4.38: Φύλλο Βελτιστοποίησης της Φόρμας Επιλογών Έργου.

Σημείωση

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που υλοποιήθηκαν στον *Υδρονομέα* είναι οι ακόλουθοι:

- Ανασχηματιζόμενη σύνθετη εξέλιξη (Shuffled Complex Evolution)
- Εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου

Ο τρόπος και η ταχύτητα προσέγγισης της βέλτιστης λύσης μπορεί να επηρεαστεί από τις ακόλουθες τιμές:

- την παράμετρο πληθυσμού
- το μέγιστο πλήθος δοκιμών, πέραν του οποίου διακόπτεται η διαδικασία βελτιστοποίησης
- τη σχετική σύγκλιση πληθυσμού

Σε περίπτωση αμφιβολίας ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τυπικές τιμές γι' αυτές τις ιδιότητες, πατώντας με το ποντίκι το σχετικό κουμπί.

4.7.5 Επιλογές χρονοσειρών

Το πέμπτο φύλλο της Φόρμας Επιλογών Έργου περιλαμβάνει επιλογές που αφορούν τις χρονοσειρές του έργου. Επίσης το φύλλο αυτό παραθέτει τα αποτελέσματα ελέγχου που γίνονται στις χρονοσειρές.

Προκειμένου να εκτελεστεί η προσομοίωση είναι απαραίτητο οι χρονοσειρές που φορτώθηκαν να ικανοποιούν τις εξής προϋποθέσεις:

- Να έχουν φορτωθεί χρονοσειρές (βροχής απορροής και εξάτμισης) για κάθε έναν από τους ταμειυτήρες του συστήματος
- Οι χρονοσειρές να έχουν το ίδιο μήκος
- Ο αριθμός των ενοτήτων στις οποίες διακρίνονται οι χρονοσειρές να είναι ίσος
- Οι χρονοσειρές να έχουν κοινή ημερομηνία έναρξης

Η μη τήρηση κάποιας από αυτές τις προϋποθέσεις επισημαίνεται στο Φύλλο Χρονοσειρών με την ένδειξη Σφάλμα Χρονοσειρών σε κόκκινο φόντο. Κάτω από την ένδειξη παρατίθεται ένας κατάλογος σφαλμάτων.

Σε περίπτωση που δεν ικανοποιούνται οι δύο τελευταίοι όροι, ο χρήστης είναι σε θέση να ορίσει ίσο αριθμό ενοτήτων και κοινή ημερομηνία έναρξης των χρονοσειρών από τα σχετικά πεδία του φύλλου, πατώντας κατόπιν το κουμπί Αναπροσαρμογή.

Σχήμα 4.39: Επισήμανση σφαλμάτων στο Φύλλο Χρονοσειρών της Φόρμας Επιλογών Έργου.

Σε περίπτωση που τηρούνται οι προϋποθέσεις χρονοσειρών, στο Φύλλο Χρονοσειρών εμφανίζεται η ένδειξη Συμβατές Χρονοσειρές σε πράσινο φόντο.

Σχήμα 4.40: Αποδοχή χρονοσειρών στο Φύλλο Χρονοσειρών της Φόρμας Επιλογών Έργου.

Η περιοχή χρονικών παραμέτρων καταληκτικής προσομοίωσης εμφανίζεται στο κάτω μέρος του φύλλου σε περίπτωση που ικανοποιούνται όλες οι προϋποθέσεις χρονοσειρών. Από αυτήν ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις ημερομηνίες έναρξης και λήξης της προσομοίωσης. Το χρονικό διάστημα που ορίζουν οι ημερομηνίες θα πρέπει να καλύπτεται από το διάστημα που ορίζεται από τις υδρολογικές

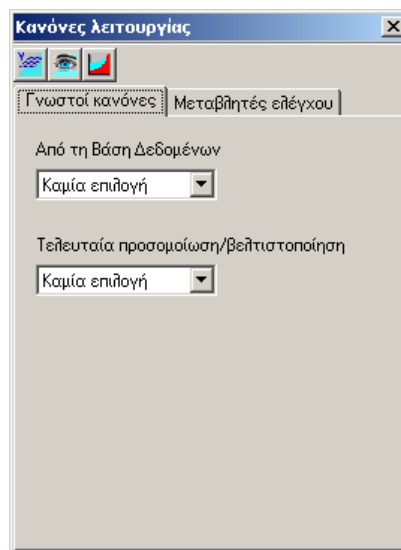
χρονοσειρές εισόδου. Με το κουμπί Επαναφορά ο χρήστης μπορεί να επαναφέρει τις αρχικές ημερομηνίες προσομοίωσης.

4.8 Εκτέλεση προσομοίωσης


4.8.1 Επιλογή κανόνα λειτουργίας


Η προσομοίωση εκτελείται πάντοτε με έναν συγκεκριμένο παραμετρικό κανόνα λειτουργίας των ταμιευτήρων από τον οποίο υπολογίζεται ο όγκος-στόχος του ταμιευτήρα για κάθε προσομοιωμένο χρονικό βήμα. Ανάλογα με τις επιλογές μεταβλητών ελέγχου (βλ. φύλλο κανόνων λειτουργίας στη Φόρμα Επιλογών Έργου) και σύμφωνα με το σχήμα παραμετροποίησης που έχει υλοποιηθεί, ο κανόνας λειτουργίας εκφράζεται από έναν (μόνο β) ή δύο παραμέτρους (α και β), για κάθε ταμιευτήρα που συμμετέχει στη διαχείριση. Επιπρόσθετα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα όρια χρήσης γεωτρήσεων ως μεταβλητές ελέγχου.

Η επιλογή των κανόνων λειτουργίας πραγματοποιείται από τη Φόρμα Κανόνων Λειτουργίας, η οποία αποτελείται από δύο φύλλα. Στο πρώτο φύλλο ο χρήστης μπορεί να επιλέξει από τις σχετικές λίστες επιλογής μεταξύ γνωστών κανόνων λειτουργίας για το συγκεκριμένο έργο. Τέτοιοι είναι οι κανόνες λειτουργίας που έχουν καταχωρηθεί στη Βάση Δεδομένων με τη διαδικασία της αποθήκευσης του έργου ή, εφόσον έχει προηγηθεί κάποια προσομοίωση ή βελτιστοποίηση, οι κανόνες λειτουργίας που είχαν χρησιμοποιηθεί τελευταία. Στην περίπτωση βελτιστοποίησης διατηρούνται στη μνήμη και εν συνεχεία μπορούν να αποθηκευτούν στη Βάση έως και δέκα καλύτεροι κανόνες λειτουργίας.



Σχήμα 4.41: Φύλλο Γνωστών Κανόνων της Φόρμας Κανόνων Λειτουργίας.

Με το πάτημα του εικονιδίου γραφήματος () εμφανίζεται η γραφική παράσταση του επίκαιρου κανόνα λειτουργίας στην οθόνη.

Η προσομοίωση εκτελείται με το πάτημα του εικονιδίου προσομοίωσης (). Παράλληλα ο Υδρονομέας απαγορεύει την εκτέλεση άλλων λειτουργιών όπως βελτιστοποίηση ή αποθήκευση δεδομένων σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας της προσομοίωσης. Σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης εμφανίζεται στην οθόνη η Φόρμα Κατάστασης Προσομοίωσης, η οποία πληροφορεί το χρήστη για την πορεία της διαδικασίας.

Πατώντας το εικονίδιο οπτικοποίησης προσομοίωσης (👁️) από τη Φόρμα Κανόνων Λειτουργίας, ο χρήστης μπορεί να παρακολουθήσει από την αρχή βήμα προς βήμα τη διαδικασία της προσομοίωσης.

Σημείωση

Ο χρήστης μπορεί να εισαγάγει κανόνες λειτουργίας καθορίζοντας τις τιμές των μεταβλητών ελέγχου από το Φύλλο Μεταβλητών Ελέγχου της Φόρμας Κανόνων Λειτουργίας. Σε αυτό αναγράφονται οι ταμειυτήρες των οποίων η διαχείριση πρόκειται να πραγματοποιηθεί με βάση τον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας και οι τιμές των παραμέτρων τους. Σε περίπτωση εποχιακής μεταβολής κανόνων λειτουργίας, οι ονομασίες των ταμειυτήρων συνοδεύονται από το σύμβολο (1) για την υγρή και από το σύμβολο (2) για την ξηρή περίοδο. Στις μεταβλητές ελέγχου μπορούν να συμπεριληφθούν οι τιμές των ορίων λειτουργίας των γεωτρήσεων (βλ. Προσθήκη γεώτρησης) που αναφέρονται σε όλες τις γεωτρήσεις του δικτύου. Το πεδίο τιμών των μεταβλητών ελέγχου είναι μεταξύ 0 και 1. Μετά το τέλος της προσομοίωσης το μέτρο επίδοσης του κανόνα λειτουργίας αναγράφεται στο σχετικό πεδίο στο κάτω μέρος του φύλλου.

Ταμειυτήρας	a	b
Μόρνος (1)	0,4638	0,0000
Υψική (1)	0,4296	0,0000
Εύηνος (1)	0,0822	0,0000
Μόρνος (2)	0,4638	0,0000
Υψική (2)	0,4296	0,0000
Εύηνος (2)	0,0822	0,0000

Μέτρο επίδοσης: -99924.9914

Σχήμα 4.42: Φύλλο Μεταβλητών Ελέγχου της Φόρμας Κανόνων Λειτουργίας.

4.8.2 Ανάλυση κανόνων λειτουργίας ταμειυτήρων

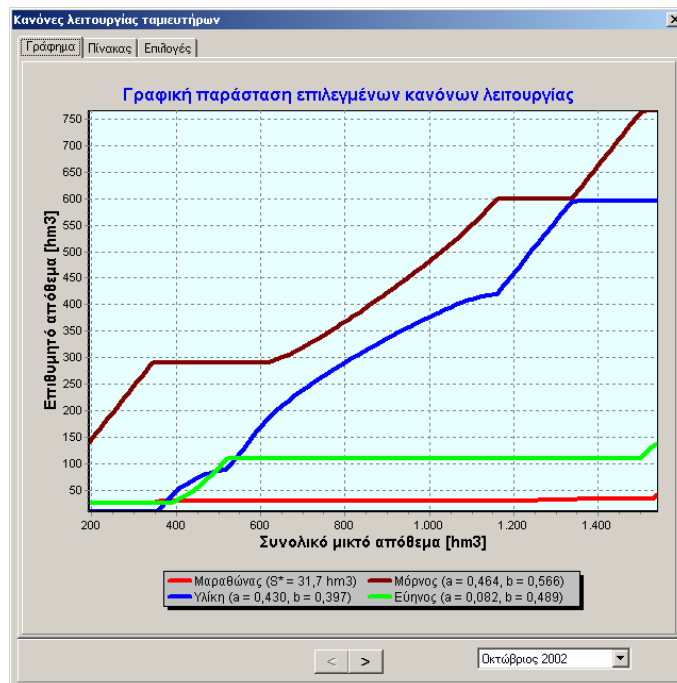
Με το πάτημα του εικονιδίου γραφήματος (📊) εμφανίζεται η Φόρμα Κανόνων Λειτουργίας Ταμειυτήρων, η οποία αποτελείται από τρία φύλλα. Το κάτω μέρος της φόρμας είναι κοινό για όλα τα φύλλα και περιλαμβάνει μενού επιλογής του μήνα στον οποίον αναφέρονται τα στοιχεία που παρατίθενται.

Φύλλο γραφικής παράστασης κανόνων λειτουργίας.

Σε αυτό το φύλλο παρατίθεται η γραφική παράσταση του επίκαιρου κανόνα λειτουργίας ταμειυτήρων. Το γράφημα ορίζει το επιθυμητό απόθεμα του εκάστοτε ταμειυτήρα σε σχέση με το συνολικό μικτό απόθεμα του συστήματος. Κάτω από το γράφημα αναγράφονται οι επίκαιροι συντελεστές α και β των ταμειυτήρων, των οποίων η διαχείριση πραγματοποιείται σύμφωνα με τον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας.

Σημείωση

Η γραφική παράσταση δίνει προσεγγιστικά το απόθεμα-στόχο των ταμιευτήρων, με τον τρόπο που περιγράφηκε στις επιλογές των κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων.



Σχήμα 4.43: Φύλλο γραφικής παράστασης κανόνων λειτουργίας της Φόρμας Κανόνων Λειτουργίας Ταμιευτήρων.

Φύλλο πίνακα αντιστοίχισης αποθεμάτων

Στο φύλλο αυτό παρατίθεται ο κανόνας λειτουργίας των ταμιευτήρων σε μορφή πίνακα αντιστοίχισης αποθεμάτων. Το βήμα διακριτοποίησης του πίνακα ορίζεται από το Φύλλο Κανόνων Λειτουργίας της Φόρμας Επιλογών.

Ολικό απόθεμα	Μαροθόνας	Μάρνος	Υψίλη	Εύηνος
193,80	28,80	138,67	10,22	25,77
207,41	28,80	152,28	10,22	25,77
221,02	28,80	165,88	10,22	25,77
234,62	28,80	179,49	10,22	25,77
248,23	28,80	193,09	10,22	25,77
261,83	28,80	206,70	10,22	25,77
275,44	28,80	220,31	10,22	25,77
289,05	28,80	233,91	10,22	25,77
302,65	28,80	247,52	10,22	25,77
316,26	28,80	261,13	10,22	25,77
329,87	28,80	274,73	10,22	25,77
343,47	28,80	288,34	10,22	25,77
357,08	30,50	290,00	10,81	25,77
370,68	30,50	290,00	24,42	25,77
384,29	30,50	290,00	37,11	26,68
397,90	30,50	290,00	47,03	30,37
411,50	30,50	290,00	55,69	35,32
425,11	30,50	290,00	63,25	41,36
438,71	30,50	290,00	69,84	48,38
452,32	30,50	290,00	75,51	56,31
465,93	30,50	290,00	80,29	65,14
479,53	30,50	290,00	84,14	74,89
493,14	30,50	290,00	87,01	85,63
506,75	30,50	290,00	88,77	97,48
520,35	30,50	290,00	89,85	110,00
533,96	30,50	290,00	103,46	110,00

Σχήμα 4.44: Φύλλο πίνακα αντιστοίχισης αποθεμάτων της Φόρμας Κανόνων Λειτουργίας Ταμιευτήρων.

Φύλλο επιλογών

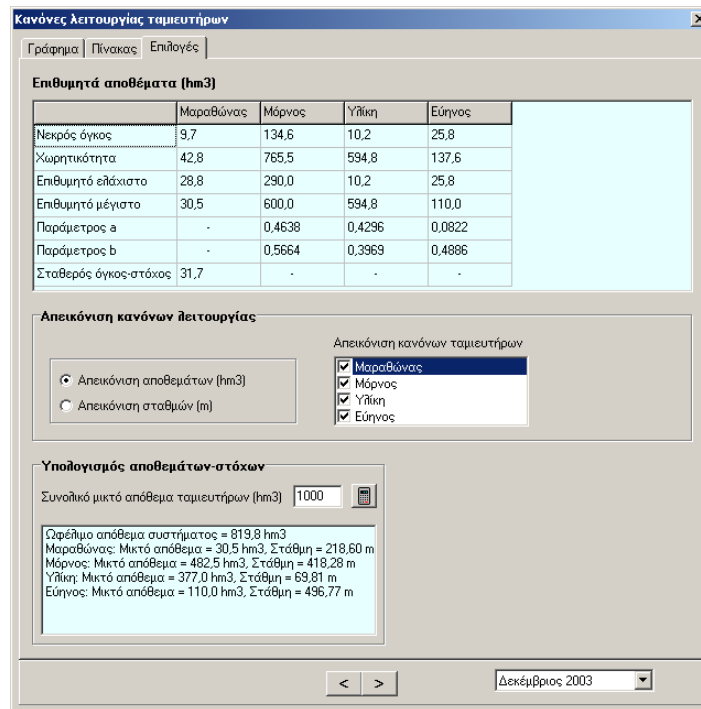
Στο άνω μέρος του φύλλου επιλογών παρατίθενται σε μορφή πίνακα χρήσιμα στοιχεία που αφορούν τους ταμιευτήρες του συστήματος:

- Ο νεκρός όγκος
- Η χωρητικότητα
- Το επιθυμητό ελάχιστο απόθεμα. Ισούται με το νεκρό όγκο του ταμιευτήρα σε περίπτωση που δεν έχει οριστεί από το χρήστη στόχος ελάχιστου αποθέματος
- Το επιθυμητό μέγιστο απόθεμα. Ισούται με τη χωρητικότητα του ταμιευτήρα σε περίπτωση που δεν έχει οριστεί από το χρήστη στόχος μέγιστου αποθέματος
- Οι συντελεστές α και β σε περίπτωση που η διαχείριση του ταμιευτήρα πραγματοποιείται σύμφωνα με τον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας.
- Ο σταθερός όγκος στόχος σε περίπτωση που η διαχείριση του ταμιευτήρα δεν πραγματοποιείται σύμφωνα με τον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας.

Άλλες επιλογές αφορούν την απεικόνιση των κανόνων λειτουργίας στα δύο πρώτα φύλλα της φόρμας:

- Η απεικόνιση ή μη της καμπύλης κανόνων λειτουργίας συγκεκριμένων ταμιευτήρων (1^ο φύλλο).
- Η απεικόνιση των αποθεμάτων ή σταθμών στον πίνακα αντιστοίχισης αποθεμάτων (2^ο φύλλο)

Στην περιοχή υπολογισμού αποθεμάτων-στόχων μπορεί ο χρήστης εισάγοντας το συνολικό μικτό απόθεμα των ταμιευτήρων και πατώντας το εικονίδιο υπολογισμού να υπολογίσει το απόθεμα-στόχο και τη στάθμη-στόχο για κάθε ταμιευτήρα του συστήματος, σύμφωνα με τον επίκαιρο κανόνα λειτουργίας.



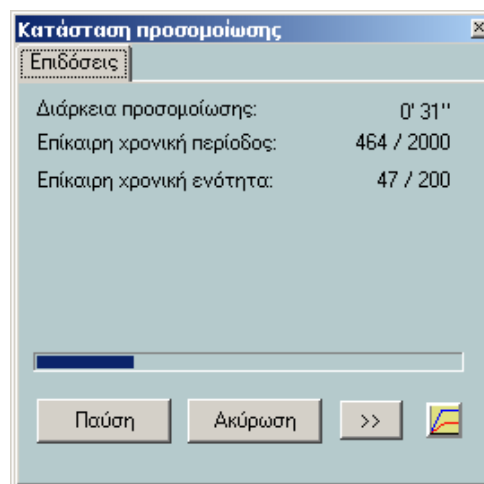
Σχήμα 4.45: Φύλλο επιλογών της Φόρμας Κανόνων Λειτουργίας Ταμειυτήρων.

4.8.3 Παρακολούθηση της διαδικασίας προσομοίωσης



Φόρμα Κατάστασης Προσομοίωσης

Η διαδικασία της προσομοίωσης παρακολουθείται από τη Φόρμα Κατάστασης Προσομοίωσης που παραμένει στην οθόνη καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Από τη φόρμα ο χρήστης μπορεί να ενημερωθεί για τα εξής στοιχεία:

- την τρέχουσα προσομοιωμένη χρονική περίοδο
- την τρέχουσα προσομοιωμένη χρονική ενότητα
- τη διάρκεια της προσομοίωσης από την έναρξη της διαδικασίας





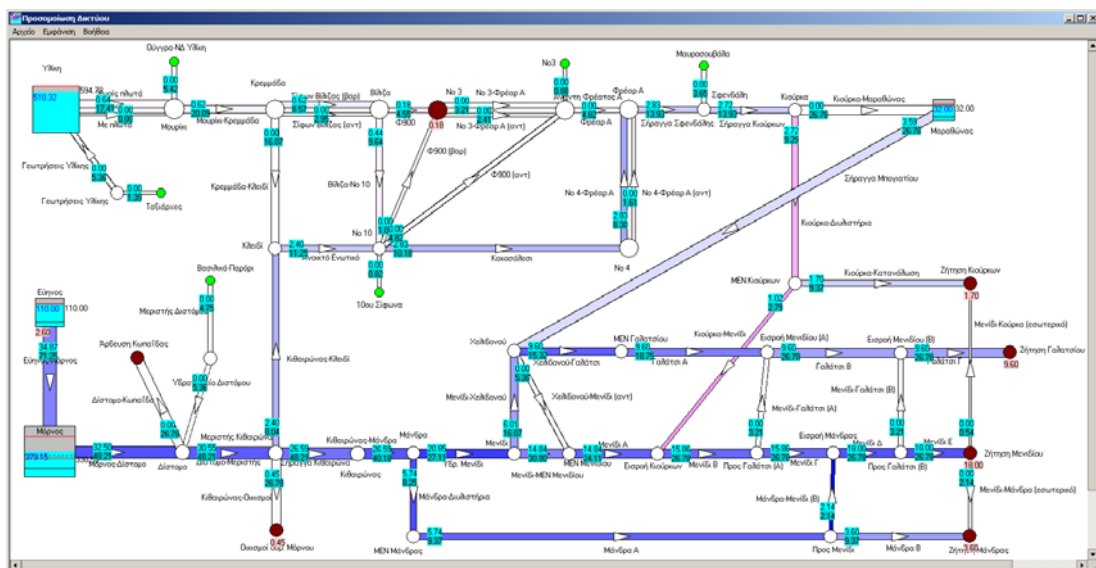
Σχήμα 4.46: Φύλλο επιδόσεων της Φόρμας Κατάστασης Προσομοίωσης.

Πατώντας το εικονίδιο  εμφανίζεται η Φόρμα Κανόνων Λειτουργίας Ταμιευτήρων με τη γραφική παράσταση του τρέχοντος κανόνα λειτουργίας. Η διαδικασία προσομοίωσης μπορεί να διακοπεί προσωρινά πατώντας το κουμπί Παύση ή να ανασταλεί οριστικά με το κουμπί Ακύρωση. Πατώντας το κουμπί με το σύμβολο  η προσομοίωση προχωράει κατά ένα χρονικό βήμα. Η δυνατότητα αυτή είναι χρήσιμη για την βήμα προς βήμα οπτικοποίηση της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τη Φόρμα Δυναμικής Απεικόνισης Προσομοίωσης.

Φόρμα Δυναμικής Απεικόνισης Προσομοίωσης

Η διαδικασία της προσομοίωσης μπορεί να εξεταστεί καλύτερα με τη Φόρμα Δυναμικής Απεικόνισης, η οποία εμφανίζεται στην οθόνη με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Πατώντας με το ποντίκι το εικονίδιο οπτικοποίησης προσομοίωσης  από τη Φόρμα Κανόνων Λειτουργίας. Παράλληλα εκτελείται μόνο το πρώτο χρονικό βήμα προσομοίωσης και κατόπιν αναμένεται εντολή χρήστη.
- Πατώντας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης το εικονίδιο απεικόνισης δικτύου  από την Κύρια Φόρμα του *Υδρονομέα*.

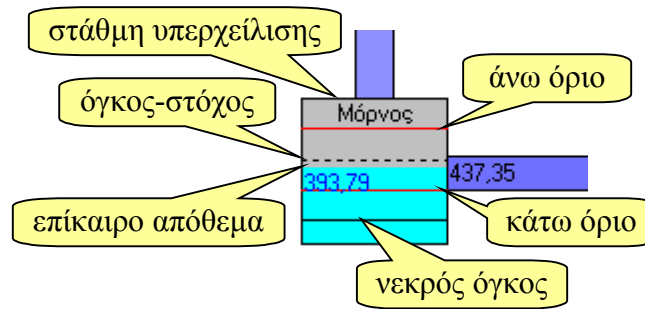


Σχήμα 4.47: Δυναμική απεικόνιση της προσομοίωσης στη βάση του μοντέλου του συστήματος υδροδότησης της Αθήνας.

Η Φόρμα Δυναμικής Απεικόνισης κατατοπίζει τον χρήστη για την κατάσταση των ταμιευτήρων και τις μεταφορές νερού που πραγματοποιήθηκαν στο τελευταίο χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

Η διαβάθμιση του μπλε χρώματος στους αγωγούς δείχνει τον όγκο νερού που μεταφέρθηκε από αυτούς σε σχέση με την παροχρητευτικότητά τους. Ροές που πραγματοποιούνται με άντληση εμφανίζονται ως αποχρώσεις του ροζ χρώματος.

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 συνεχή μαύρη γραμμή. Τα ανώτατα ή κατώτατα όρια όγκων που ενδεχομένως έχει θέσει ο χρήστης (βλ. στόχοι προσομοίωσης) απεικονίζονται με μια συνεχή κόκκινη γραμμή.



Σχήμα 4.48: Επεξήγηση του μοντέλου ταμιευτήρα.

Οι απλοί κόμβοι του δικτύου εμφανίζονται με άσπρους και οι γεωτρήσεις με πράσινους κύκλους. Κόμβοι που συνδέονται με στόχο κατανάλωσης νερού έχουν χρώμα καφέ. Επιπρόσθετα δίπλα στον κόμβο ή ταμιευτήρα που συνδέεται με στόχο κατανάλωσης νερού εμφανίζεται η τιμή ζήτησης του επίκαιρου μήνα. Σε περίπτωση που αστοχήσει κάποιος από τους στόχους που έθεσε ο χρήστης, εμφανίζεται η συνιστώσα του δικτύου που αστόχησε (ταμιευτήρας, κόμβος ή υδραγωγείο) με κόκκινο περίγραμμα. Σε περίπτωση αστοχίας κάλυψης της ζήτησης νερού για ύδρευση ή άρδευση εμφανίζεται δίπλα στον σχετικό κόμβο ή ταμιευτήρα η τιμή ελλειμματικού όγκου.

Από το μενού της Φόρμας Δυναμικής Απεικόνισης ο χρήστης μπορεί να εμφανίσει ή να αποκρύψει όλα ή επιλεκτικά κάποια από τα ακόλουθα στοιχεία των συνιστωσών του δικτύου:

Απλοί κόμβοι

- Ονομασία
- Ένδειξη κατανάλωσης. Όταν υπάρχει κατανάλωση νερού στον κόμβο (π.χ. ύδρευση, άρδευση), ο κόμβος λαμβάνει καφέ χρώμα.
- Δείκτης αστοχίας
- Τιμή στόχων κατανάλωσης
- Έλλειμμα κάλυψης στόχων κατανάλωσης

Ταμιευτήρες

- Ονομασία
- Στάθμη νεκρού όγκου
- Στάθμη ελάχιστου ή μέγιστου όγκου που ορίστηκε ως στόχος από τον χρήστη
- Στάθμη όγκου-στόχου του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας
- Τιμή επίκαιρου όγκου σε hm^3
- Τιμή όγκου-στόχου του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας σε hm^3
- Δείκτης αστοχίας
- Τιμή στόχων κατανάλωσης
- Έλλειμμα κάλυψης στόχων κατανάλωσης

Υδραγωγεία

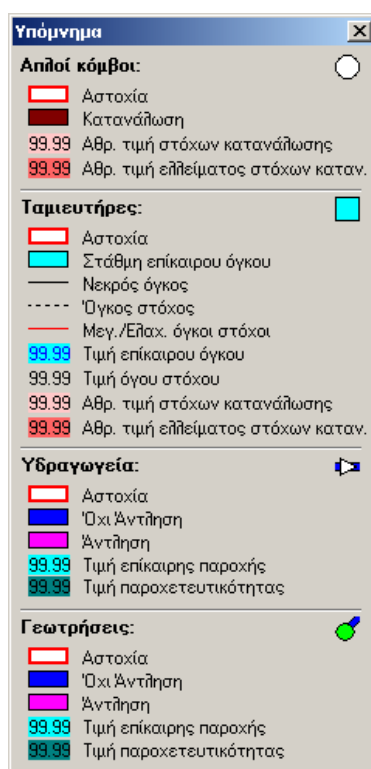
- Ονομασία
- Τιμή επίκαιρης μηνιαίας παροχής σε hm^3

- Τιμή παροχρεωτικότητας σε hm^3 τον επίκαιρο μήνα
- Φορά της ροής
- Δείκτης αστοχίας

Γεωτρήσεις

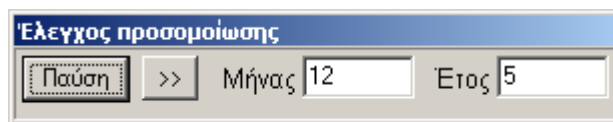
- Ονομασία
- Τιμή επίκαιρης μηνιαίας παροχής άντλησης σε hm^3
- Τιμή αντλητικής ικανότητας τον επίκαιρο μήνα
- Δείκτης αστοχίας

Το υπόμνημα εμφανίζεται από το μενού της Φόρμας Δυναμικής Απεικόνισης με επιλογή Εμφάνιση/Υπόμνημα.



Σχήμα 4.49: Υπόμνημα της Φόρμας Δυναμικής Απεικόνισης

Παράλληλα με τη Φόρμα Δυναμικής Απεικόνισης, κατά τη διάρκεια της οπτικοποίησης της προσομοίωσης εμφανίζεται στην οθόνη η Φόρμα Ελέγχου Προσομοίωσης. Από αυτήν μπορεί ο χρήστης να διακόψει προσωρινά και να επανεκκινήσει τη διαδικασία προσομοίωσης, πατώντας το κουμπί Παύση/Εκκίνηση ή να προχωρήσει την προσομοίωση κατά ένα χρονικό βήμα με το σύμβολο >>. Στα σχετικά πεδία της φόρμας εμφανίζονται ο επίκαιρος μήνας και το επίκαιρο έτος χρονοσειρών (ανεξαρτήτως ενότητας).



Σχήμα 4.50: Φόρμα Ελέγχου Προσομοίωσης.


Επισημαίνεται ότι η οπτικοποίηση της προσομοίωσης επιβραδύνει σημαντικά τη διαδικασία. Η Φόρμα Δυναμικής Απεικόνισης θα πρέπει συνεπώς να εμφανίζεται μόνο με σκοπό τον έλεγχο και την καλύτερη κατανόηση του τρόπου εφαρμογής κάποιου κανόνα λειτουργίας.

Με επιλογή από το μενού Αρχείο/ Αντιγραφή ή Αρχείο/ Εκτύπωση είναι δυνατή η αντιγραφή στο πρόχειρο (clipboard) και η εκτύπωση της φόρμας στον προεπιλεγμένο εκτυπωτή.

4.9 Εκτέλεση βελτιστοποίησης

4.9.1 Η διαδικασία της βελτιστοποίησης

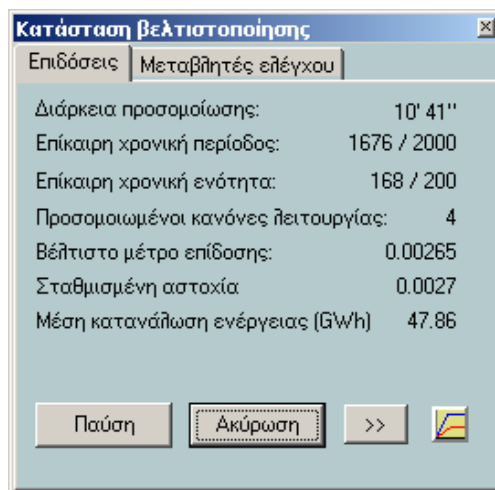
Η διαδικασία της βελτιστοποίησης πραγματοποιείται για την ανεύρεση του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας των ταμιευτήρων, που εκφράζεται με παραμετρικό τρόπο (συντελεστές α και β). Βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος συνιστάται όταν δεν είναι εκ των προτέρων γνωστός ένας ικανοποιητικός κανόνας λειτουργίας, πράγμα που συνήθως ισχύει σε νέα έργα, και όταν αλλάζουν τα δεδομένα στο υφιστάμενο έργο (π.χ. αλλαγή της αντικειμενικής συνάρτησης, νέα υδρολογικά δεδομένα, επέκταση δικτύου ή αλλαγή στις ιδιότητες δικτύου, τροποποίηση στόχων κλπ.).

Η βελτιστοποίηση εκτελείται επιλέγοντας από το μενού της Κύριας Φόρμας *Υπολογισμοί/ Βελτιστοποίηση* ή πατώντας με το ποντίκι το εικονίδιο της βελτιστοποίησης (). Κατά την βελτιστοποίηση ο *Υδρονομέας* εκτελεί διαδοχικές προσομοιώσεις και συγκρίσεις των αποτελεσμάτων διαφόρων κανόνων λειτουργίας και διατηρεί τα αποτελέσματα του βέλτιστου από αυτούς, σύμφωνα με τον δείκτη επίδοσης που υπολογίζεται.



4.9.2 Παρακολούθηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης παρακολουθείται από τη Φόρμα Κατάστασης Βελτιστοποίησης που παραμένει στην οθόνη σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Η φόρμα αποτελείται από δύο φύλλα. Στο πρώτο φύλλο ο χρήστης μπορεί να ενημερώνεται για τα εξής στοιχεία:

- την τρέχουσα προσομοιωμένη χρονική περίοδο.
- την τρέχουσα προσομοιωμένη χρονική ενότητα.
- τον αριθμό προσομοιώσεων που ολοκληρώθηκαν μέχρι στιγμής με διαφορετικούς κανόνες λειτουργίας.
- το μέτρο επίδοσης του μέχρι στιγμής βέλτιστου κανόνα λειτουργίας. Το μέτρο επίδοσης χρησιμοποιείται από το σύστημα για την αξιολόγηση κανόνων λειτουργίας.
- τη σταθμισμένη αστοχία του μέχρι στιγμής βέλτιστου κανόνα λειτουργίας
- τη μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας του μέχρι στιγμής βέλτιστου κανόνα λειτουργίας
- τη διάρκεια της προσομοίωσης από την έναρξη της διαδικασίας.



Σχήμα 4.51: Φύλλο επιδόσεων της Φόρμας Κατάστασης Βελτιστοποίησης.

Πατώντας το κουμπί  εμφανίζεται η Φόρμα Κανόνων Λειτουργίας Ταμιευτήρων με τη γραφική παράσταση του τρέχοντος κανόνα λειτουργίας. Η διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να διακοπεί προσωρινά πατώντας το κουμπί Παύση ή να ανασταλεί οριστικά με το κουμπί Ακύρωση. Πατώντας το κουμπί με το σύμβολο  η προσομοίωση προχωράει κατά ένα χρονικό βήμα. Η δυνατότητα αυτή είναι χρήσιμη για την βήμα-προς-βήμα οπτικοποίηση της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τη Φόρμα Δυναμικής Απεικόνισης Προσομοίωσης.

Σημείωση

Το δεύτερο φύλλο της Φόρμας Κατάστασης Βελτιστοποίησης παραθέτει σε μορφή πίνακα τις τιμές μεταβλητών ελέγχου της τρέχουσας και της μέχρι στιγμής βέλτιστης λύσης. Οι μεταβλητές ελέγχου αποτελούνται από τους συντελεστές α και β (ή μόνο β ανάλογα με τις επιλογές βελτιστοποίησης στη Φόρμα Επιλογών Έργου) για κάθε ταμιευτήρα του συστήματος που συμμετέχει στον παραμετρικό κανόνα λειτουργίας και ενδεχομένως και από τα όρια χρήσης γεωτρήσεων. Σε περίπτωση επιλογής εποχιακής μεταβολής κανόνων λειτουργίας, οι ονομασίες των ταμιευτήρων συνοδεύονται από το σύμβολο (1) για την υγρή και από το σύμβολο (2) για την ξηρή περίοδο. Το πεδίο τιμών των μεταβλητών ελέγχου είναι μεταξύ 0 και 1.

Παράμετρος	Τρέχουσα	Βέλτιστη
Μόρνος (b1)	0.4983	0.7959
Υψίκη (b1)	0.6143	0.5069
Εύηνος (b1)	0.7001	0.9345
Μόρνος (a1)	0.7044	0.5189
Υψίκη (a1)	0.6992	0.8139
Εύηνος (a1)	0.6567	0.9338
Μόρνος (b2)	0.6143	0.5069
Υψίκη (b2)	0.7001	0.9345
Εύηνος (b2)	0.2789	0.9119

Σχήμα 4.52: Φύλλο Μεταβλητών Ελέγχου της Φόρμας Κατάστασης Βελτιστοποίησης.

4.10 Επισκόπηση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών είναι διαθέσιμα εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία προσομοίωσης ή βελτιστοποίησης. Σε περίπτωση διακοπής της διαδικασίας βελτιστοποίησης ο χρήστης θα πρέπει να επαναλάβει την προσομοίωση με τους βέλτιστους κανόνες λειτουργίας για να είναι σε θέση να επισκοπήσει τα αποτελέσματα.

4.10.1 Κανόνες λειτουργίας ταμιευτήρων

Με επιλογή από το μενού της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα Αποτελέσματα/ Κανόνες Λειτουργίας* εμφανίζεται η Φόρμα Κανόνων Λειτουργίας Ταμιευτήρων με τους κανόνες λειτουργίας του πλέον πρόσφατου υπολογισμού (προσομοίωση) ή του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας (βελτιστοποίηση).

4.10.2 Πρόγνωση αστοχίας στόχων και περιορισμών

Συνολική αστοχία στόχων και περιορισμών

Ένα από τα βασικά αποτελέσματα των υπολογισμών τα οποία θα ενδιαφέρουν το χρήστη είναι σε ποιο βαθμό ήταν εφικτή η κάλυψη των αναγκών σε νερό. Μια πρώτη συνολική εικόνα της αστοχίας επίτευξης των στόχων που έθεσε ο χρήστης δίνεται από τη Φόρμα Αστοχίας Συστήματος που εμφανίζεται επιλέγοντας από το μενού της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα Αποτελέσματα/ Πρόγνωση αστοχίας/ Συνολική αστοχία*.

Συγκεκριμένα, η φόρμα δίνει τη συνολική αστοχία για κάθε στόχο με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

α) Η πρώτη στήλη εκφράζει την αστοχία χρονικών περιόδων (ετών) με τη σχέση

$$a_T = \frac{n'}{n}$$

όπου n' το πλήθος των ετών κατά τα οποία δεν επιτυγχάνεται πλήρως η επιθυμητή τιμή στόχου και n το σύνολο των προσομοιωμένων ετών, ήτοι το μήκος της προσομοίωσης.

β) Η δεύτερη στήλη δίνει την αντίστοιχη αστοχία χρονικών βημάτων (μηνών)

γ) Μια εναλλακτική διατύπωση της πιθανότητας αστοχίας δίνεται στην τρίτη στήλη αστοχιών (ποσοστιαίο έλλειμμα) και αφορά βασικά τις κατηγορίες στόχων κατανάλωσης νερού (ύδρευση και άρδευση). Εδώ υπολογίζεται το μέσο ποσοστιαίο έλλειμμα (*ογκομετρικό μέτρο αστοχίας*), που ορίζεται ως:

$$a_V = 1 - \frac{\mu_X}{x^*}$$

όπου μ_X ο ετήσιος μέσος όρος των πραγματοποιήσεων της μεταβλητής X και x^* η επιθυμητή τιμή της εν λόγω μεταβλητής, εκφρασμένη σε ετήσια χρονική βάση. Χαρακτηριστικό είναι ότι ενώ η συνάρτηση a_V λαμβάνει συνεχείς τιμές, η συνάρτηση a_T λαμβάνει μόνο διακριτές τιμές από το σύνολο $\{0, 1/n, \dots, 1\}$. Επιπλέον, ισχύει πάντοτε η συνθήκη:

$$a_T \geq a_V$$

Φόρμα Αστοχίας Συστήματος

Πιθανότητα αστοχίας βέλτιστης λύσης
Προσομοιωμένοι κανόνες λειτουργίας: 1

ΠΡΟΣΟΦ: Στον υπολογισμό της αστοχίας χρονικής περιόδου συμπεριλαμβάνονται υδρολογικά έτη που δεν προσομοιώθηκαν στο σύνολό τους

Στόχος	Αστοχία χρονικών περιόδων	Αστοχία χρονικών βημάτων	Ποσοστιαίο έλλειμμα
1) Μαραθώνος - Αποφυγή υπερχειλίσεων	0.000 (0 / 1800)	0.000 (0 / 21600)	Δεν ορίζεται
2) Μαραθώνος - Μέγιστο απόθεμα	0.000 (0 / 1800)	0.000 (0 / 21600)	-0.000 (-0.00 / 30.72)
3) Μάρνος - Αποφυγή υπερχειλίσεων	0.183 (329 / 1800)	0.031 (663 / 21600)	Δεν ορίζεται
4) Εύηνος - Αποφυγή υπερχειλίσεων	0.267 (480 / 1800)	0.071 (1523 / 21600)	Δεν ορίζεται
5) Ζήτηση Μενιδίου - Κατανάλωση νερού - Ύδρευση	0.004 (7 / 1800)	0.001 (13 / 21600)	0.000 (0.03 / 183.60)
6) Ζήτηση Γαϊταίου - Κατανάλωση νερού - Ύδρευση	0.007 (13 / 1800)	0.001 (27 / 21600)	0.001 (0.15 / 138.50)
7) Ζήτηση Κισούρκων - Κατανάλωση νερού - Ύδρευση	0.010 (18 / 1800)	0.002 (34 / 21600)	0.002 (0.10 / 57.70)
8) Ζήτηση Μάνδρας - Κατανάλωση νερού - Ύδρευση	0.012 (21 / 1800)	0.002 (42 / 21600)	0.002 (0.09 / 45.20)
9) Μεριατής Κιθαριώνα - Κατανάλωση νερού - Ύδρευση	0.012 (22 / 1800)	0.002 (44 / 21600)	0.002 (0.01 / 5.61)
10) Να 3 - Κατανάλωση νερού - Ύδρευση	0.006 (11 / 1800)	0.001 (25 / 21600)	0.001 (0.00 / 2.20)
11) Εύηνος - Μέγιστο απόθεμα	0.342 (615 / 1800)	0.116 (2495 / 21600)	0.057 (4.86 / 85.74)
12) Μάρνος - Μέγιστο απόθεμα	0.558 (1004 / 1800)	0.377 (8153 / 21600)	0.075 (37.85 / 504.40)
13) Μαραθώνος - Ελάχιστο απόθεμα	0.015 (27 / 1800)	0.007 (158 / 21600)	0.003 (0.05 / 20.03)
14) Μάρνος - Ελάχιστο απόθεμα	0.113 (203 / 1800)	0.079 (1716 / 21600)	0.016 (2.41 / 155.45)
15) Εύηνος - Κατανάλωση νερού - Ύδρευση	0.114 (206 / 1800)	0.041 (875 / 21600)	0.040 (1.25 / 31.20)

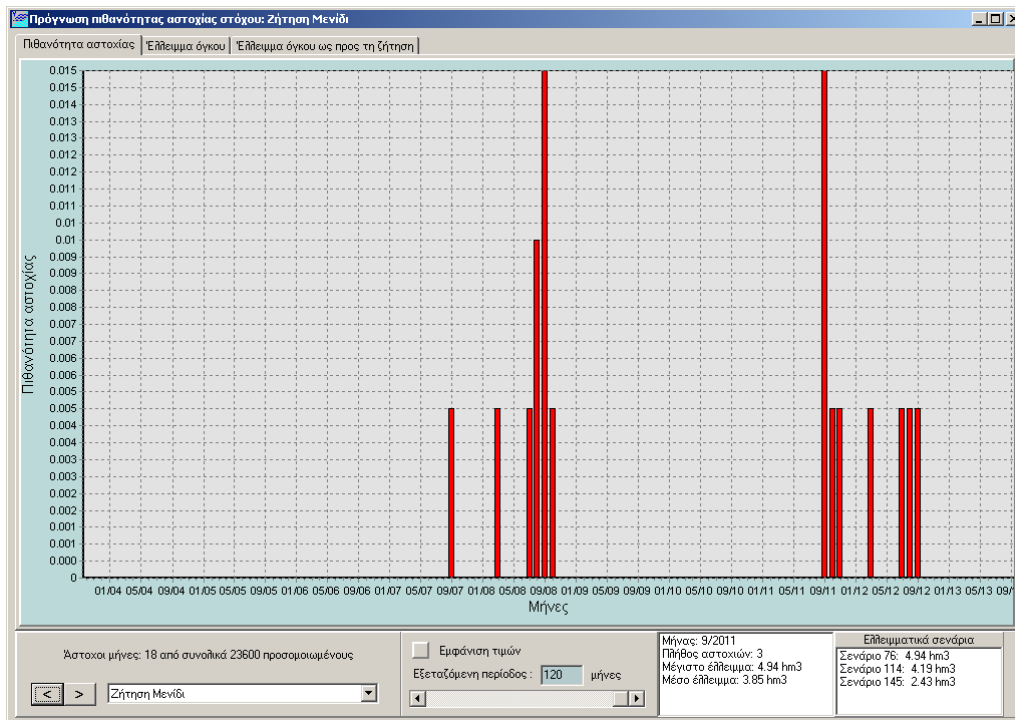
Σχήμα 4.53: Φόρμα Αστοχίας Συστήματος.

Χρονική κατανομή πιθανότητας αστοχίας

Η πρόγνωση της χρονικής κατανομής της πιθανότητας αστοχίας δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να εντοπίσει τα χρονικά πλαίσια πιθανής ανεπάρκειας του συστήματος.

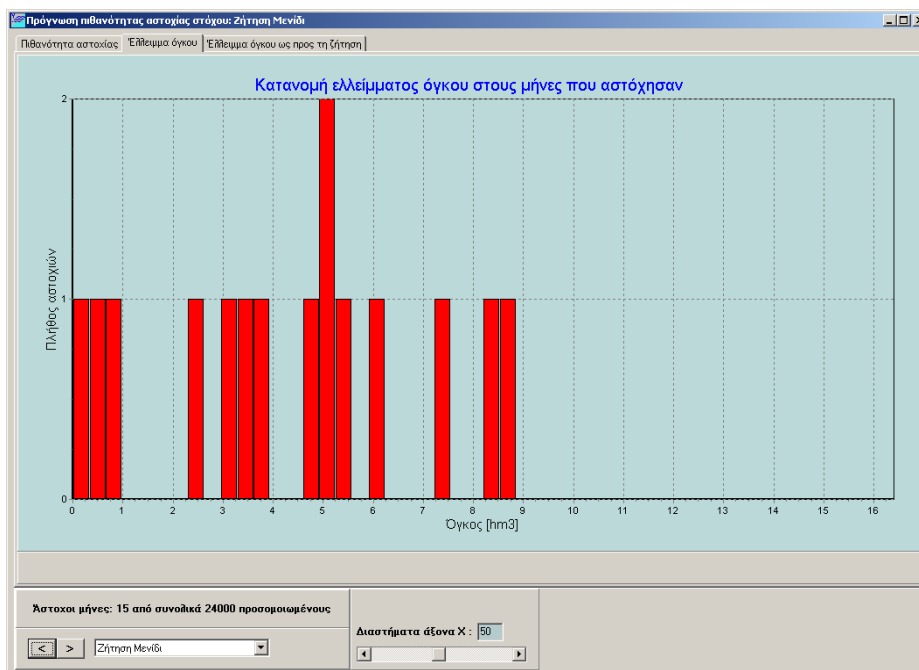
Η Φόρμα Πρόγνωσης Πιθανότητας Αστοχίας Στόχων καλείται από το μενού της Κύριας Φόρμας του Υδρονομέα με επιλογή Αποτελέσματα/ Πρόγνωση αστοχίας/ Χρονικά κατανομημένα. Αποτελείται από τρία φύλλα, το πρώτο από τα οποία δίνει σε μορφή γραφήματος την πρόγνωση πιθανότητας αστοχίας για κάθε μήνα της προσομοιωμένης περιόδου και κάθε στόχο που έχει θέσει ο χρήστης. Στο κάτω μέρος του φύλλου ο χρήστης επιλέγει από το σχετικό μενού τον επιθυμητό στόχο, ενώ με τη μπάρα κύλισης μπορεί να περιορίσει τον χρονικό ορίζοντα του γραφήματος.

Για τους στόχους που αναφέρονται σε κατανάλωση νερού, το σύστημα υπολογίζει ορισμένα στατιστικά στοιχεία των σεναρίων που αστόχησαν. Συγκεκριμένα, κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω σε μια μπάρα του γραφήματος, εμφανίζεται στο παράθυρο κάτω δεξιά το πλήθος των αστοχιών, το μέγιστο και το μέσο έλλειμμα όγκου των άστοχων σεναρίων του συγκεκριμένου μήνα. Παράλληλα, εμφανίζεται στο διπλανό παράθυρο μια λίστα με την τιμή ελλείμματος νερού όλων των σεναρίων που αστόχησαν.



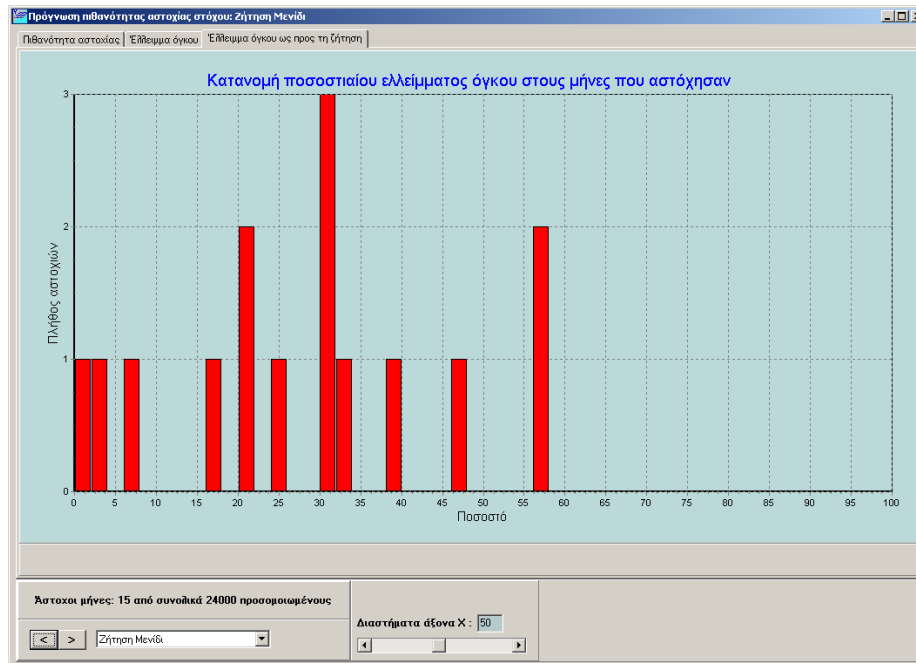
Σχήμα 4.54: Χρονική κατανομή πιθανότητας αστοχίας στόχου.

Το δεύτερο φύλλο της φόρμας αφορά μόνο τους στόχους κατανάλωσης νερού και δίνει μια εικόνα του ελλείμματος όγκου νερού στους μήνες που αστόχησαν. Συγκεκριμένα παραθέτει σε μορφή γραφήματος την κατανομή του ελλείμματος όγκου σε εκ. κυβικά μέτρα νερό το μήνα στους μήνες αστοχίας κάλυψης της ζήτησης. Το πλήθος των διαστημάτων στον άξονα του X μπορεί να καθορισθεί από τον χρήστη με τη βοήθεια της μπάρας κύλισης στο κάτω μέρος του φύλλου.



Σχήμα 4.55: Κατανομή αστοχίας κάλυψης ζήτησης νερού σε ελλειμματικό όγκο.

Τέλος, το τρίτο φύλλο της φόρμας το οποίο και πάλι αφορά μόνο τους στόχους κατανάλωσης νερού, δίνει τη διακύμανση του ελλείμματος όγκου νερού σε σχέση με τη ζήτηση στους μήνες που αστόχησαν. Συγκεκριμένα παραθέτει σε μορφή γραφήματος την κατανομή του ποσοστιαίου ελλείμματος όγκου στους μήνες αστοχίας κάλυψης της ζήτησης. Το πλήθος των διαστημάτων στον άξονα του X μπορεί να καθοριστεί από το χρήστη με τη βοήθεια της μπάρας κύλισης στο κάτω μέρος του φύλλου.



Σχήμα 4.56: Κατανομή αστοχίας κάλυψης ζήτησης νερού στο ποσοστό ελλειμματικού όγκου νερού σε σχέση με τη ζήτηση νερού.

4.10.3 Ισοζύγια

Η Φόρμα Ισοζυγίων αποτελείται από τέσσερα φύλλα:

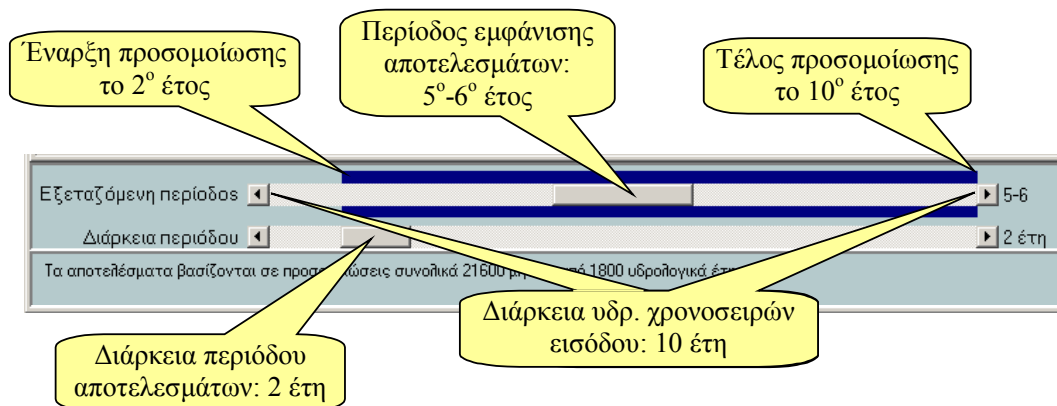
- Το ισοζύγιο ταμειυτήρων συνοψίζει όλες τις εισόδους και εξόδους των ταμειυτήρων.
- Το ισοζύγιο κόμβων
- Το ισοζύγιο υδραγωγείων
- Το ενεργειακό ισοζύγιο αναφέρεται στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη μεταφορά νερού από τους πόρους στα σημεία χρήσης νερού

Η φόρμα μπορεί να εμφανιστεί στην οθόνη επιλέγοντας από το μενού της Κύριας Φόρμας Αποτελέσματα/ Ισοζύγια. Τα ισοζύγια αφορούν τους μέσους όρους χρονικών περιόδων (ετών) κατά την προσομοίωση με τον πλέον πρόσφατο κανόνα λειτουργίας.

Σε όλα τα φύλλα της φόρμας, στο κάτω μέρος της εμφανίζονται δύο μπάρες κύλισης με τις οποίες ελέγχεται η χρονική περίοδος των αποτελεσμάτων:

Με τη 2^η μπάρα κύλισης ο χρήστης μπορεί να ορίσει τη χρονική διάρκεια στην οποίαν αναφέρονται τα αποτελέσματα των ισοζυγίων, ενώ με την 1^η μπάρα καθορίζονται τα χρονικά όρια της περιόδου αποτελεσμάτων. Κατ' αυτόν τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να αναπροσαρμόσει τους πίνακες ισοζυγίων για οποιαδήποτε συνεχόμενα έτη της προσομοιωμένης περιόδου. Το μπλε φόντο στην 1^η μπάρα

κύλισης οπτικοποιεί τη διάρκεια της προσομοιωμένης περιόδου σε σχέση με τα όρια των χρονοσειρών εισόδου.



Σχήμα 4.57: Παράδειγμα επιλογής περιόδου εμφάνισης αποτελεσμάτων ισοζυγίων.

Όταν κληθεί η Φόρμα Ισοζυγίων ή όταν τροποποιηθεί η περίοδος εμφάνισης αποτελεσμάτων, αναπροσαρμόζονται οι τιμές του ισοζυγίου. Εφόσον χρησιμοποιήθηκαν στο υδρολογικό σενάριο συνθετικές χρονοσειρές μεγάλου μήκους ο υπολογισμός των νέων τιμών ισοζυγίου μπορεί να καθυστερήσει λίγα δευτερόλεπτα.

Ισοζύγιο ταμιευτήρων

Στο 1^ο φύλλο αναλύεται το υδατικό ισοζύγιο κάθε ταμιευτήρα και σε παρένθεση δίνονται οι τυπικές αποκλίσεις των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα ο πίνακας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

Είσοδοι

- Εισροή στον ταμιευτήρα από την λεκάνη απορροής του
- Επιφανειακή βροχόπτωση
- Εισροές στον ταμιευτήρα από τα ανάντη υδραγωγεία
- Εισροές από γεωτρήσεις

Έξοδοι (σε κόκκινο φόντο)

- Επιφανειακή εξάτμιση
- Υπόγειες διαφυγές
- Εκροές σε κατάντη υδραγωγεία
- Καταναλώσεις νερού (π.χ. ύδρευση, άρδευση)
- Υπερχειλίσσεις από τον ταμιευτήρα
- Διαρροές των αμέσως κατάντη του ταμιευτήρα υδραγωγείων

Το ισοζύγιο κλείνει η διαφορά όγκου μεταξύ έναρξης και λήξης της προσομοίωσης. Όλες οι τιμές αναφέρονται σε εκ. κυβικά μέτρα. Στο κάτω μέρος του πίνακα ισοζυγίων δίνεται το μέσο απόθεμα και η μέση στάθμη των ταμιευτήρων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επίσης αναγράφονται οι τιμές των συντελεστών α και β (ή μόνο β) των ταμιευτήρων, η λειτουργία των οποίων προσομοιώθηκε σύμφωνα με τον παραμετρικό κανόνα.

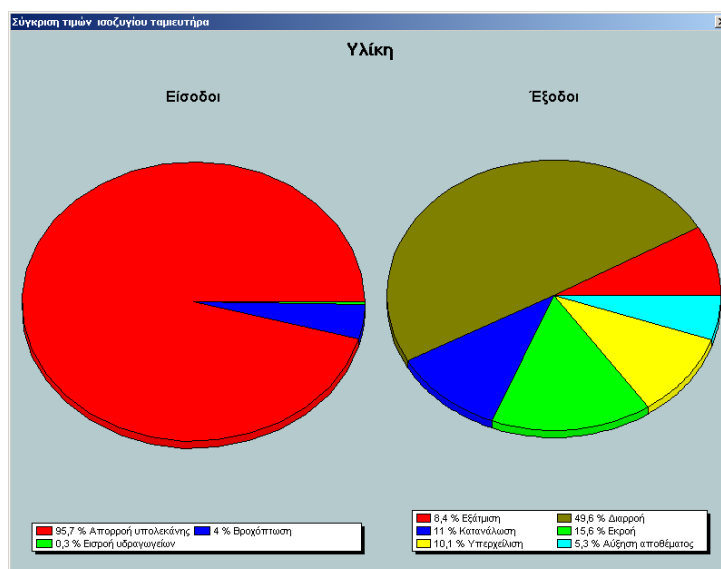
Η γραφική παράσταση των εισόδων και εξόδων κάποιου ταμιευτήρα δίνεται κάνοντας αριστερό κλικ με το ποντίκι επάνω στη στήλη του ταμιευτήρα.

Υδατικό και Ενεργειακό Ισοζύγιο					
Ισοζύγιο ταμιευτήρων Ισοζύγιο κόμβων Ισοζύγιο υδραγωγείων Ενεργειακό ισοζύγιο					
Υδατικό Ισοζύγιο ταμιευτήρων					
(Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις χρονικών περιόδων βέλτιστης ρύθμισης σε hm ³)					
	Μαραθώνας	Μόρνος	Υλίκη	Εύηνος	ΣΥΝΟΛΟ
Απορροή ανάντη υπολεκάνης	13.23 (5.01)	246.15 (85.97)	295.98 (123.81)	274.48 (75.33)	829.84 (261.02)
Επιφανειακή βροχόπτωση	1.29 (0.34)	15.19 (4.47)	12.35 (4.38)	3.70 (1.32)	32.53 (9.08)
Επιφανειακή εξάτμιση	-2.90 (0.36)	-21.58 (2.96)	-26.01 (6.00)	-3.72 (0.82)	-54.21 (9.38)
Υπόγειες διαφυγές	-0.00 (0.00)	-11.11 (2.02)	-153.47 (56.93)	-0.00 (0.00)	-164.58 (58.60)
Εισροές από ανάντη υδραγωγεία	4.74 (1.56)	212.70 (48.37)	0.89 (4.01)	0.00 (0.00)	218.33 (47.58)
Εισροές από γεωτρήσεις	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)
Εκροές σε κατάντη υδραγωγεία	16.07 (5.38)	411.50 (67.52)	48.10 (57.96)	212.70 (48.37)	-688.38 (58.36)
Καταναλώσεις	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)	-34.07 (5.23)	-30.58 (2.83)	-64.65 (7.43)
Υπερχείλισεις	-0.00 (0.00)	-6.76 (20.04)	-31.29 (66.03)	-28.76 (59.55)	-66.80 (131.43)
Διαρροές κατάντη υδραγωγείων	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
Χρήση αρχικού αποθέματος	-0.28 (1.26)	-23.09 (75.84)	-16.27 (70.03)	-2.44 (12.00)	-42.08 (153.09)
Διαφορά	-0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00
Απόθεμα ταμιευτήρα (hm ³)	32.58 (2.45)	580.20 (132.21)	354.51 (177.33)	84.58 (37.78)	1051.87 (321.19)
Στάθμη ταμιευτήρα (m)	219.57 (1.20)	423.98 (8.81)	67.51 (10.20)	485.66 (16.07)	
Παράμετρος a1	-	0.5189	0.8139	0.9338	
Παράμετρος b1	-	0.7959	0.5069	0.9345	
Παράμετρος a2	-	0.8139	0.9338	0.3603	
Παράμετρος b2	-	0.5069	0.9345	0.9119	

Εξεταζόμενη περίοδος: [] Διάρκεια περιόδου: [] 9 έτη

Τα αποτελέσματα βασίζονται σε προσομοιώσεις συνολικά 21600 μγνών από 1800 υδρολογικά έτη.

Σχήμα 4.58: Φύλλο Ισοζυγίου Ταμιευτήρων της Φόρμας Ισοζυγίων.

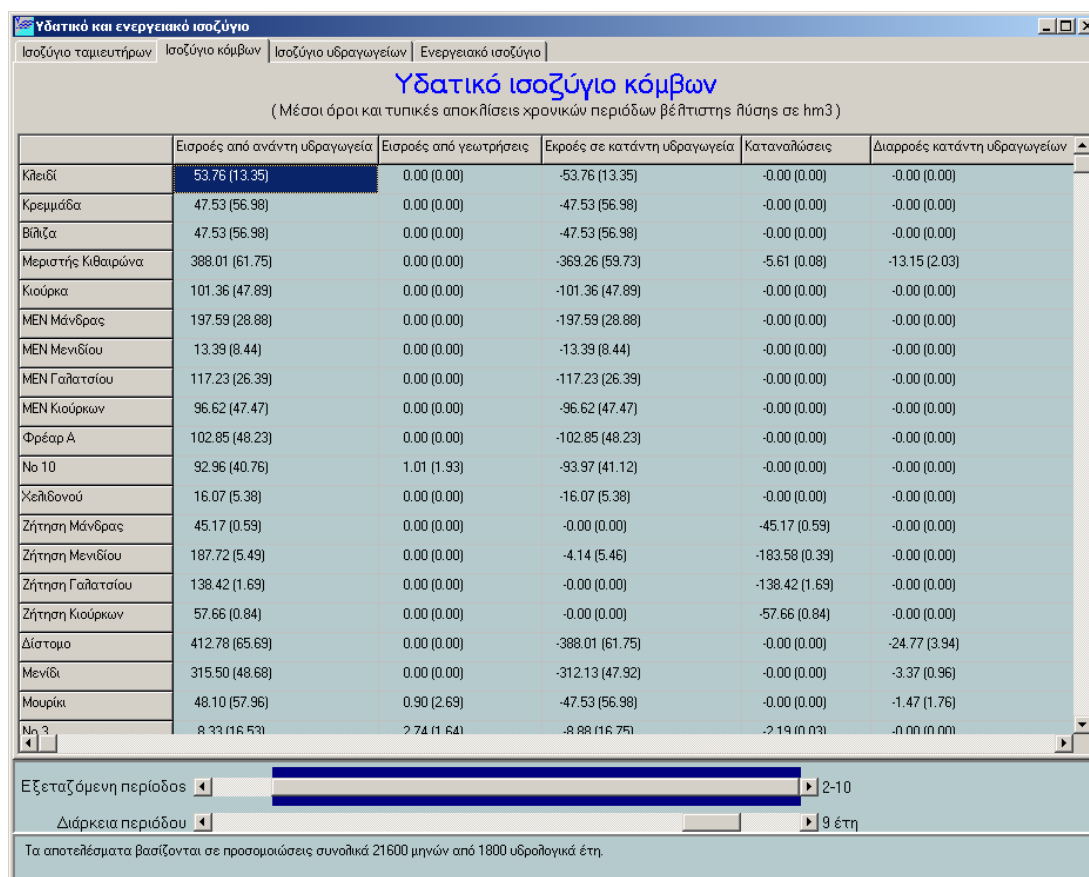


Σχήμα 4.59: Γραφική παράσταση εισόδων-εξόδων ταμιευτήρα.

Ισοζύγιο κόμβων

Στο 2^ο φύλλο αναλύεται το υδατικό ισοζύγιο κάθε κόμβου του δικτύου και σε παρένθεση δίνονται οι τυπικές αποκλίσεις των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα ο πίνακας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Εισροή από κατάντη υδραγωγεία
- Εισροή από γεωτρήσεις
- Εκροές σε κατάντη υδραγωγεία
- Καταναλώσεις νερού (π.χ. ύδρευση, άρδευση)
- Διαρροές των αμέσως κατάντη του κόμβου υδραγωγείων



	Εισροές από ανάντη υδραγωγεία	Εισροές από γεωτρήσεις	Εκροές σε κατάντη υδραγωγεία	Καταναλώσεις	Διαρροές κατάντη υδραγωγείων
Κλειδί	53.76 (13.35)	0.00 (0.00)	-53.76 (13.35)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
Κρεμμάδα	47.53 (56.98)	0.00 (0.00)	-47.53 (56.98)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
Βιλήτσα	47.53 (56.98)	0.00 (0.00)	-47.53 (56.98)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
Μεριστής Κιθαρώνα	388.01 (61.75)	0.00 (0.00)	-369.26 (59.73)	-5.61 (0.08)	-13.15 (2.03)
Κιούρκα	101.36 (47.89)	0.00 (0.00)	-101.36 (47.89)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
MEN Μάνδρας	197.59 (28.88)	0.00 (0.00)	-197.59 (28.88)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
MEN Μενιδίου	13.39 (8.44)	0.00 (0.00)	-13.39 (8.44)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
MEN Γαλατασίου	117.23 (26.39)	0.00 (0.00)	-117.23 (26.39)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
MEN Κιούρκων	96.62 (47.47)	0.00 (0.00)	-96.62 (47.47)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
Φρέαρ Α	102.85 (48.23)	0.00 (0.00)	-102.85 (48.23)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
No 10	92.96 (40.76)	1.01 (1.93)	-93.97 (41.12)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
Χελιδονού	16.07 (5.38)	0.00 (0.00)	-16.07 (5.38)	-0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)
Ζήτηση Μάνδρας	45.17 (0.59)	0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)	-45.17 (0.59)	-0.00 (0.00)
Ζήτηση Μενιδίου	187.72 (5.49)	0.00 (0.00)	-4.14 (5.46)	-183.58 (0.39)	-0.00 (0.00)
Ζήτηση Γαλατασίου	138.42 (1.69)	0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)	-138.42 (1.69)	-0.00 (0.00)
Ζήτηση Κιούρκων	57.66 (0.84)	0.00 (0.00)	-0.00 (0.00)	-57.66 (0.84)	-0.00 (0.00)
Δίσταμο	412.78 (65.69)	0.00 (0.00)	-388.01 (61.75)	-0.00 (0.00)	-24.77 (3.94)
Μενίδι	315.50 (48.68)	0.00 (0.00)	-312.13 (47.92)	-0.00 (0.00)	-3.37 (0.96)
Μουρία	48.10 (57.96)	0.90 (2.69)	-47.53 (56.98)	-0.00 (0.00)	-1.47 (1.76)
No 3	8.33 (16.53)	2.74 (1.64)	-8.88 (16.75)	-2.19 (0.03)	-0.00 (0.00)

Εξεταζόμενη περίοδος: 2-10
Διάρκεια περιόδου: 9 έτη
Τα αποτελέσματα βασίζονται σε προσομοιώσεις συνολικά 21600 μηνών από 1800 υδρολογικά έτη.

Σχήμα 4.60: Φύλλο Ισοζυγίου Κόμβων της Φόρμας Ισοζυγίων.

Ισοζύγιο υδραγωγείων

Στο φύλλο ισοζυγίου υδραγωγείων παρατίθενται για κάθε υδραγωγείο του δικτύου τα εξής:

- Η παροχή εισόδου
- Η παροχή εξόδου
- Οι διαρροές
- Η κατανάλωση ενέργειας
- Η παραγωγή ενέργειας δεν έχει υλοποιηθεί στην παρούσα έκδοση του *Υδρονομέα*
- Το ενεργειακό ισοζύγιο ανά υδραγωγείο
- Το κόστος μεταφοράς νερού με δεδομένο κόστος ανά kWh άντλησης νερού. Η στήλη αυτή αναπροσαρμόζεται με τροποποίηση της τιμής του σχετικού πεδίου που βρίσκεται στο επάνω δεξιό μέρος της φόρμας.

Σε παρένθεση δίνονται οι τυπικές αποκλίσεις των αποτελεσμάτων.

Υδατικό και ενεργειακό ισοζύγιο							
Υδατικό και ενεργειακό ισοζύγιο υδραγωγείων							
(Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις χρονικών περιόδων βέλτιστης ρύθισης σε hm ³)							
Κόστος άντλησης (Ευρώ/kWh) 0,05							
Αναπροσαρμογή							
ΠΡΟΣΟΧΗ: Στην τιμή ενέργειας δεν συμπολογίζονται τα ανιμιστικά αντίστοιχα γεωτρήσεων							
	Παροχή εισόδου	Παροχή εξόδου	Διαρροές	Κατανάλωση ενέργειας	Παραγωγή ενέργειας	Σύνολο (GWh)	Κόστος [κιλ. Ευρώ]
Μουρία-Κρεμμίδα	37.51 (50.12)	36.39 (48.61)	1.13 (1.50)	-	-	-	-
Σήραγγα Κιθαριώνας	338.06 (44.21)	324.54 (42.44)	13.52 (1.77)	-	-	-	-
Μόρνος-Δίσταμο	423.01 (61.19)	423.01 (61.19)	-	-	-	-	-
Δίσταμο-Μεριστήρι	424.35 (58.75)	398.89 (55.23)	25.46 (3.53)	-	-	-	-
Μενίδι-Διυλιστήρια	5.47 (9.13)	5.47 (9.13)	-	-	-	-	-
Βιλήζα-Αυλιόνα (Φ900)	7.71 (16.26)	7.71 (16.26)	-	2.39 (5.04)	-	2.39 (5.04)	119.5 (252.1)
Είληγος-Μόρνος	210.26 (47.67)	210.26 (47.67)	-	-	-	-	-
Κιθαριώνας-Κλειδί	55.23 (13.04)	55.23 (13.04)	-	-	-	-	-
Κιούρκα-Μαραθιώνας	4.62 (1.64)	4.62 (1.64)	-	-	-	-	-
Κιούρκα-Διυλιστήρια	87.47 (40.62)	87.47 (40.62)	-	5.25 (2.44)	-	5.25 (2.44)	262.4 (121.9)
Άνοικτο Ενωτικό	55.23 (13.04)	55.23 (13.04)	-	-	-	-	-
Σίφιαν Βιλήζας (βαρ)	36.39 (48.61)	36.39 (48.61)	-	-	-	-	-
Κρεμμίδα-Κλειδί	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	-	0.00 (0.00)	-	0.00 (0.00)	0.0 (0.0)
Σήραγγα Μπιογιατίου	16.22 (5.35)	16.22 (5.35)	-	-	-	-	-
Χωρίς πιλάτα	36.61 (49.08)	36.61 (49.08)	-	17.57 (23.56)	-	17.57 (23.56)	878.6 (1178.0)
Βιλήζα-Νο 10	28.68 (40.52)	28.68 (40.52)	-	8.89 (12.56)	-	8.89 (12.56)	444.5 (628.0)
Κακασάθει	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	-	-	-	-	-
Σήραγγα Σφενδάλης	93.20 (40.44)	93.20 (40.44)	-	-	-	-	-
Μάνδρα Α	203.25 (23.68)	203.25 (23.68)	-	-	-	-	-

Εξεταζόμενη περίοδος: 2-10
 Διάρκεια περιόδου: 9 έτη
 Τα αποτελέσματα βασίζονται σε προσομοιώσεις συνολικά 24000 μηνών από 2000 υδρολογικά έτη.

Σχήμα 4.61: Φύλλο Ισοζυγίου Υδραγωγείων της Φόρμας Ισοζυγίων.

Ενεργειακό ισοζύγιο

Το φύλλο ενεργειακού ισοζυγίου συνοψίζει την κατανάλωση ενέργειας που προκύπτει από τη μεταφορά νερού διαμέσου υδραγωγείων και από την άντληση νερού από τους υπόγειους υδροφορείς. Ο πίνακας ισοζυγίου συμπεριλαμβάνει τα εξής πεδία:

- Την ειδική ενέργεια σε kWh/ m³ που ορίστηκε από τον χρήστη.
- Την μέση ετήσια παροχή σε m³.
- Τη μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας
- Η παραγωγή ενέργειας δεν έχει υλοποιηθεί στην παρούσα έκδοση του *Υδρονομία*
- Το σύνολο κατανάλωσης ενέργειας
- Το ενεργειακό ισοζύγιο ανά υδραγωγείο ή ανά γεώτρηση
- Το κόστος μεταφοράς νερού με δεδομένο κόστος ανά kWh άντλησης νερού. Η στήλη αυτή αναπροσαρμόζεται με τροποποίηση της τιμής του σχετικού πεδίου που βρίσκεται στο επάνω δεξιό μέρος της φόρμας.

Στο τέλος του πίνακα παρατίθενται τα συνολικά στατιστικά στοιχεία των υδραγωγείων και γεωτρήσεων. Σε παρένθεση δίνονται οι τυπικές αποκλίσεις των αποτελεσμάτων.

Υδατικό και ενεργειακό ισοζύγιο						
Ενεργειακό ισοζύγιο υδραγωγείων και γεωτρήσεων (Μέσαι όροι και τυπικές αποκλίσεις χρονικών περιόδων βεβίηπιας ρύσης σε GWh)						
ΥΔΡΑΓΩΓΕΙΟ	Ειδική ενέργεια [kWh/m ³]	Παροχή [l/m ³]	Κατανάλωση ενέργειας	Παραγωγή ενέργειας	Όλικη ενέργεια	Κόστος (χιλ. Ευρώ)
Βιλλίσα-Αυλιώνα (Φ900)	0.310	7.71 (16.26)	2.39 (5.04)	-	2.39 (5.04)	131.4 (277.3)
Κιούρκια-Διυλιστήρια	0.060	87.47 (40.62)	5.25 (2.44)	-	5.25 (2.44)	288.6 (134.1)
Κρεμμύδα-Κλειδί	0.440	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	-	0.00 (0.00)	0.0 (0.0)
Χωρίς πιλωτά	0.480	36.61 (49.08)	17.57 (23.56)	-	17.57 (23.56)	966.5 (1295.8)
Βιλλίσα-Νο 10	0.310	28.68 (40.52)	8.89 (12.56)	-	8.89 (12.56)	489.0 (690.8)
Κιούρκια-Μενίδι	0.240	29.84 (40.68)	7.16 (9.76)	-	7.16 (9.76)	393.9 (536.9)
Σίφων Βιλλίσα (αντ)	0.480	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	-	0.00 (0.00)	0.0 (0.0)
Με πιλωτά	0.710	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	-	0.00 (0.00)	0.0 (0.0)
Χελιδονού-Μενίδι (αντ)	0.350	8.45 (6.43)	2.96 (2.25)	-	2.96 (2.25)	162.6 (123.7)
Νο 3-Φρέαρ Α (αντ)	2.080	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	-	0.00 (0.00)	0.0 (0.0)
Νο 4-Φρέαρ Α (αντ)	0.570	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	-	0.00 (0.00)	0.0 (0.0)
Υδραγωγείο Διστάμου	1.300	1.34 (4.93)	1.75 (6.41)	-	1.75 (6.41)	96.0 (352.6)
ΓΕΩΤΡΗΣΗ						
Βασιλικά-Παρόρι	0.230	1.34 (4.93)	0.31 (1.13)	-	0.31 (1.13)	17.0 (62.4)
Ούγγρα-Παραλιμνη	1.000	0.90 (2.71)	0.90 (2.71)	-	0.90 (2.71)	49.7 (149.2)
Μαυροσουβάδα	1.530	2.72 (5.74)	4.17 (8.78)	-	4.17 (8.78)	229.1 (483.0)
Αυλιώνα-Νο 3	0.700	2.77 (1.66)	1.94 (1.16)	-	1.94 (1.16)	106.8 (63.8)
10ου Σίφωνα	1.080	1.01 (1.95)	1.09 (2.10)	-	1.09 (2.10)	59.7 (115.6)
ΜΑ Υδρ...	0.500	0.87 (4.03)	0.44 (2.01)	-	0.44 (2.01)	24.0 (110.8)

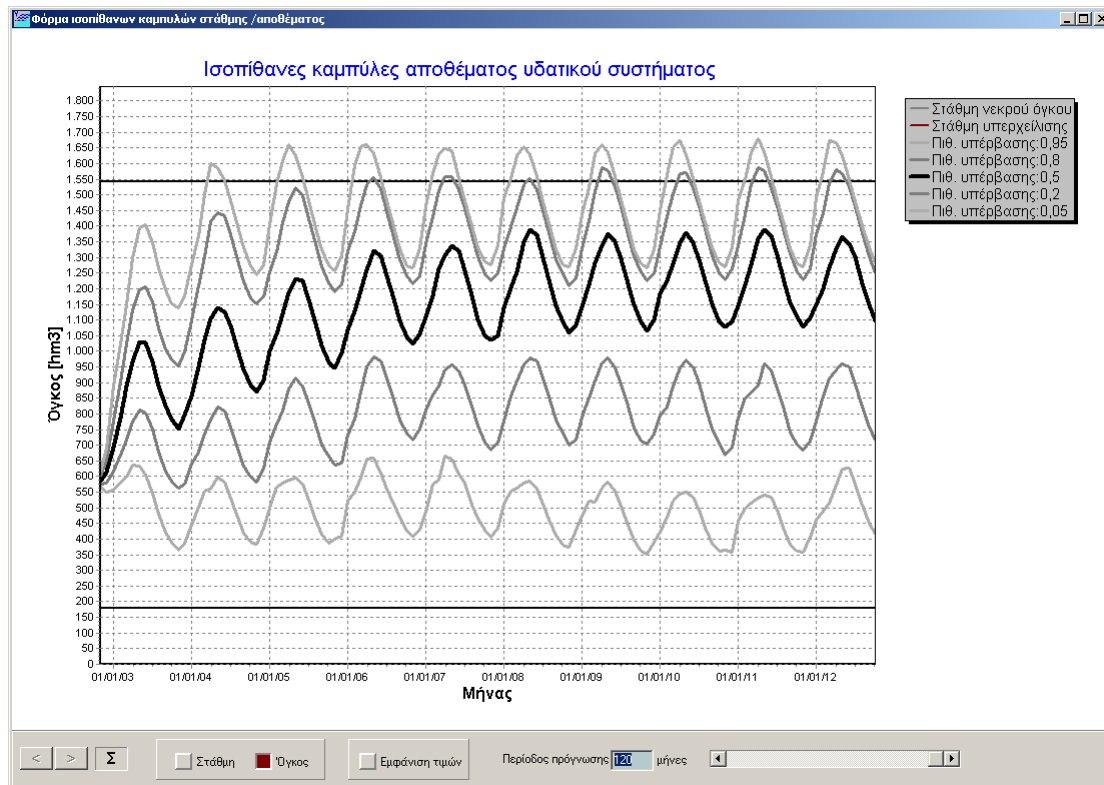
Εξεταζόμενη περίοδος: 2-10
Διάρκεια περιόδου: 9 έτη
Τα αποτελέσματα βασίζονται σε προσομοιώσεις συνολικά 24000 μηνών από 2000 υδρολογικά έτη.

Σχήμα 4.62: Φύλλο Ενεργειακού Ισοζυγίου της Φόρμας Ισοζυγίων.

4.10.4 Πρόγνωση αποθέματος

Πρόγνωση συνολικού αποθέματος συστήματος

Επιλέγοντας από το μενού της Κύριας Φόρμας Αποτελέσματα/ Πρόγνωση αποθέματος/ Απόθεμα συστήματος εμφανίζεται η Φόρμα Ισοπίθανων Καμπυλών Αποθέματος, η οποία δίνει το προβλεπόμενο συνολικό απόθεμα του συστήματος στη διάσταση του χρόνου, σε σχέση με μια πιθανότητα υπέρβασης του αποθέματος αυτού. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται πέντε ισοπίθανες καμπύλες αποθέματος που αντιστοιχούν στις πιθανότητες υπέρβασης 5%, 20%, 50%, 80% και 95%.

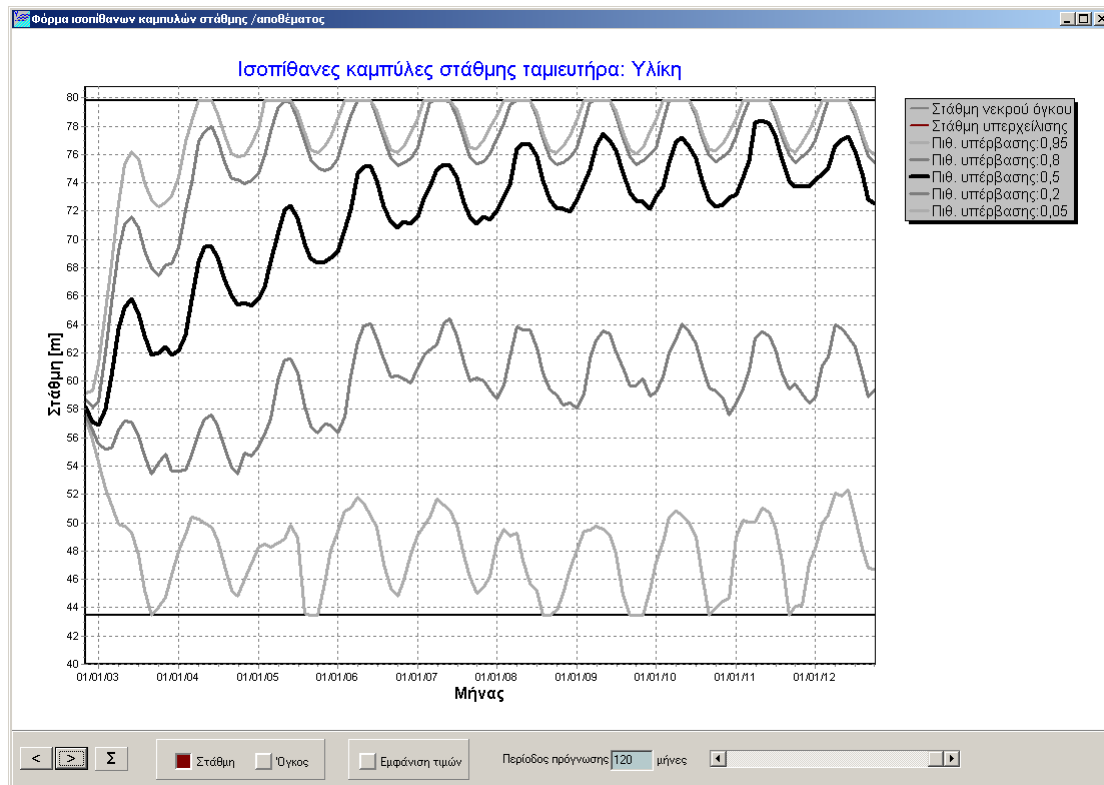


Σχήμα 4.63: Παράδειγμα ισοπίθανων καμπύλων αποθέματος του υδατικού συστήματος.

Πρόγνωση αποθέματος και στάθμης ταμιευτήρων

Επιλέγοντας από το μενού της Κύριας Φόρμας Αποτελέσματα/ Πρόγνωση αποθέματος/ Απόθεμα ταμιευτήρων εμφανίζεται η Φόρμα Ισοπίθανων Καμπυλών Αποθέματος η οποία δίνει την προβλεπόμενη στάθμη και το απόθεμα των ταμιευτήρων του υδροσυστήματος στη διάσταση του χρόνου, σε σχέση με μια πιθανότητα υπέρβασης του αποθέματος (της στάθμης) αυτής. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται πέντε ισοπίθανες καμπύλες στάθμης ή αποθέματος που αντιστοιχούν στις πιθανότητες υπέρβασης 5%, 20%, 50%, 80% και 95%.

Στο κάτω μέρος της φόρμας ο χρήστης μπορεί με τους διακόπτες Στάθμη/Όγκος να εμφανίσει τις αντίστοιχες ισοπίθανες καμπύλες. Πατώντας το κουμπί **Σ** εμφανίζονται οι ισοπίθανες καμπύλες του συνολικού αποθέματος του συστήματος, ενώ με τα κουμπιά **>** και **<** μπορεί να προχωρήσει στον επόμενο και προηγούμενο ταμιευτήρα. Στο κάτω δεξιό μέρος της φόρμας ο χρήστης μπορεί με τη μπάρα κύλισης να περιορίσει το χρονικό ορίζοντα του γραφήματος, ενώ με τον διακόπτη Εμφάνιση τιμών μπορούν να εμφανιστούν στο γράφημα οι μηνιαίες τιμές όγκου ή αποθέματος.



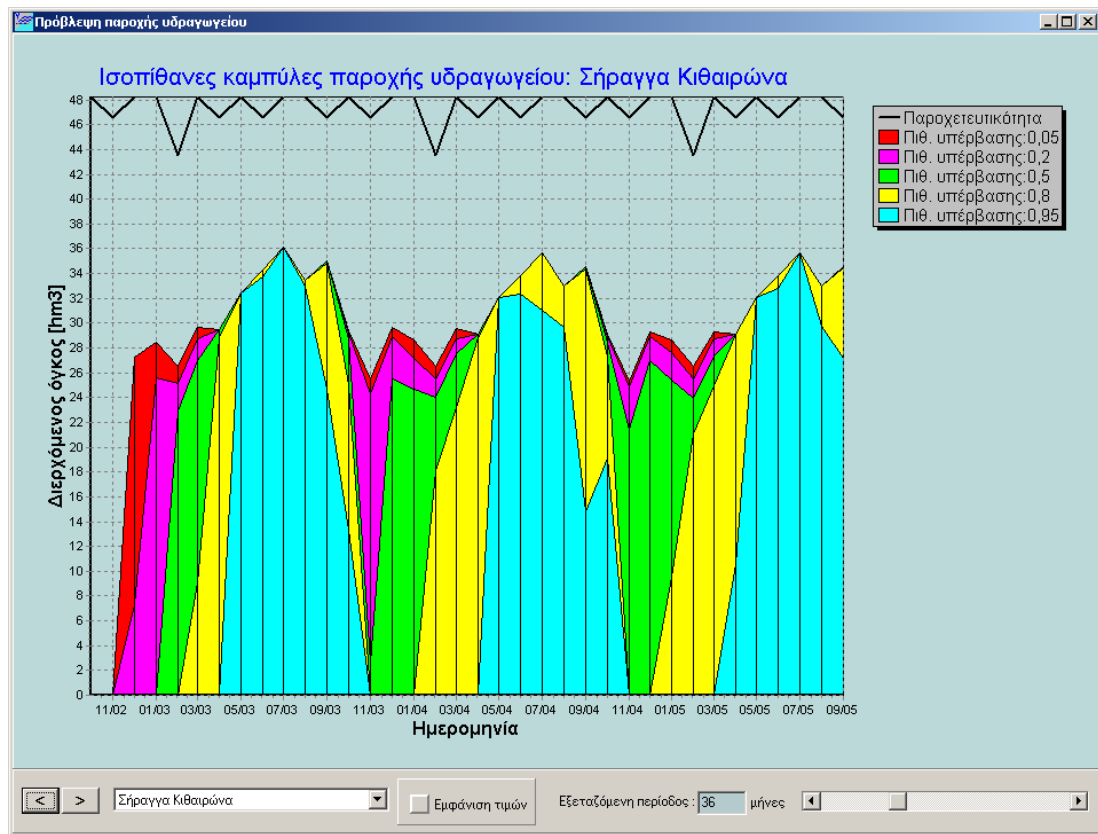
Σχήμα 4.64: Παράδειγμα ισοπίθανων καμπύλων στάθμης της λίμνης Υλίκη.

4.10.5 Πρόγνωση παροχής

Πρόγνωση παροχής υδραγωγείων

Η Φόρμα Πρόβλεψης Παροχής Υδραγωγείου εμφανίζεται στην οθόνη με επιλογή Αποτελέσματα/ Πρόγνωση παροχής/ Παροχή υδραγωγείων από την Κύρια Φόρμα του *Υδρονομέα*. Το γράφημα που εμφανίζεται δίνει την πρόβλεψη του διερχόμενου όγκου από το υδραγωγείο για κάθε μήνα της προσομοιωμένης περιόδου στη βάση ισοπίθανων καμπυλών παροχής. Συγκεκριμένα δίνονται πέντε ισοπίθανες καμπύλες παροχής που αντιστοιχούν σε διερχόμενο όγκο με πιθανότητα υπέρβασης 5%, 20%, 50%, 80% και 95%. Το όριο της παροχετευτικότητας εμφανίζεται με μια μαύρη καμπύλη.

Στο κάτω μέρος της φόρμας ο χρήστης μπορεί από το μενού ή με τα κουμπιά > και < να επιλέξει άλλο υδραγωγείο. Στο κάτω δεξιό μέρος της φόρμας ο χρήστης μπορεί με τη μπάρα κύλισης να περιορίσει το χρονικό ορίζοντα του γραφήματος, ενώ με τον διακόπτη Εμφάνιση τιμών μπορούν να εμφανιστούν στο γράφημα οι μηνιαίες τιμές παροχής.

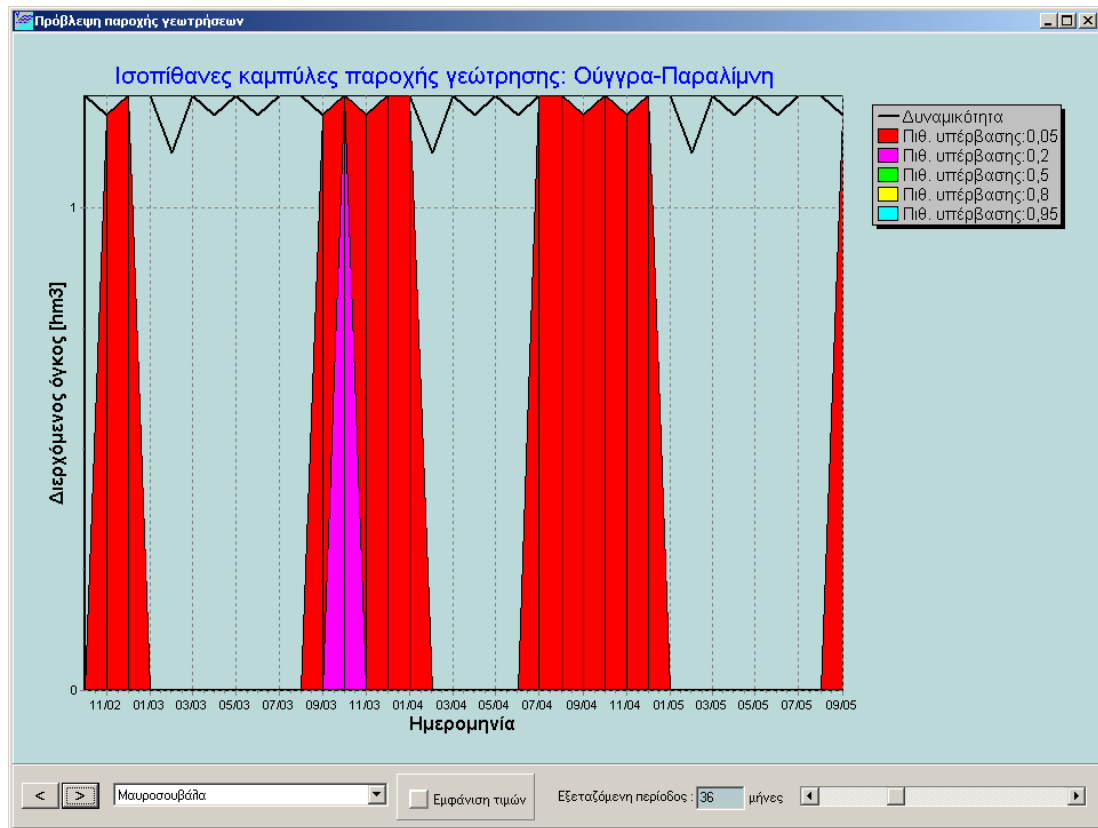


Σχήμα 4.65: Παράδειγμα πρόβλεψης παροχής του υδραγωγείου Σήραγγας Κιθαιρώνα στη βάση ισοπίθανων καμπυλών.

Πρόγνωση παροχής γεωτρήσεων

Η Φόρμα Πρόβλεψης Παροχής Γεώτρησης εμφανίζεται στην οθόνη με επιλογή Αποτελέσματα/ Πρόγνωση παροχής/ Παροχή γεωτρήσεων από την Κύρια Φόρμα του Υδρονομέα. Το γράφημα που εμφανίζεται δίνει την πρόβλεψη άντλησης νερού από τη μονάδα γεώτρησης για κάθε μήνα της προσομοιωμένης περιόδου στη βάση ισοπίθανων καμπυλών παροχής. Συγκεκριμένα δίνονται πέντε ισοπίθανες καμπύλες παροχής που αντιστοιχούν σε αντλούμενο όγκο με πιθανότητα υπέρβασης 5%, 20%, 50%, 80% και 95%. Το όριο της δυναμικότητας της γεώτρησης εμφανίζεται με μια μαύρη καμπύλη.

Στο κάτω μέρος της φόρμας ο χρήστης μπορεί από το μενού ή με τα κουμπιά > και < να επιλέξει άλλη γεώτρηση. Στο κάτω δεξιό μέρος της φόρμας ο χρήστης μπορεί με τη μπάρα κύλισης να περιορίσει το χρονικό ορίζοντα του γραφήματος, ενώ με τον διακόπτη Εμφάνιση τιμών μπορούν να εμφανιστούν στο γράφημα οι μηνιαίες τιμές όγκου άντλησης.




Σχήμα 4.66: Παράδειγμα πρόβλεψης παροχής της γεώτρησης Ούγγρα-Παραλίμνη στη βάση ισοπίθανων καμπυλών.

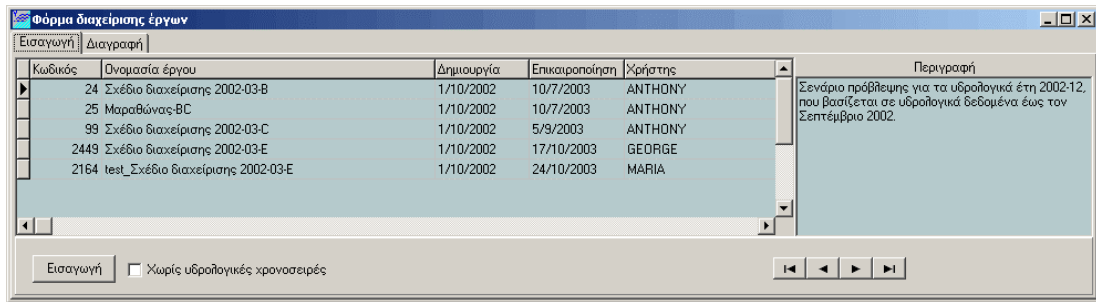
4.11 Διαχείριση έργων

Η διαχείριση των έργων στη Βάση Δεδομένων περιλαμβάνει τις λειτουργίες εισαγωγής, αποθήκευσης και διαγραφής των αποθηκευμένων έργων. Η διαχείριση πραγματοποιείται μέσω της Φόρμας Διαχείρισης Έργων, η οποία αποτελείται από τρία φύλλα:

- το φύλλο εισαγωγής έργου
- το φύλλο αποθήκευσης έργου και
- το φύλλο διαγραφής έργου

4.11.1 Εισαγωγή έργου

Το φύλλο εισαγωγής της Φόρμας Διαχείρισης Έργων εμφανίζεται με την επιλογή Έργο/ Εισαγωγή από το μενού επιλογών ή με το πάτημα του σχετικού κουμπιού () της Κύριας Φόρμας του Υδρονομέα. Το φύλλο περιλαμβάνει έναν πίνακα στον οποίο αναγράφονται ο κωδικός, η ονομασία, η ημερομηνία δημιουργίας και επικαιροποίησης του έργου καθώς και ο κωδικός του χρήστη που αποθήκευσε το έργο. Στο δεξιό μέρος της φόρμας παρατίθεται μια σύντομη περιγραφή με την οποία έχει καταχωρηθεί το έργο.




Σχήμα 4.67: Φύλλο εισαγωγής της Φόρμας Διαχείρισης Έργων.

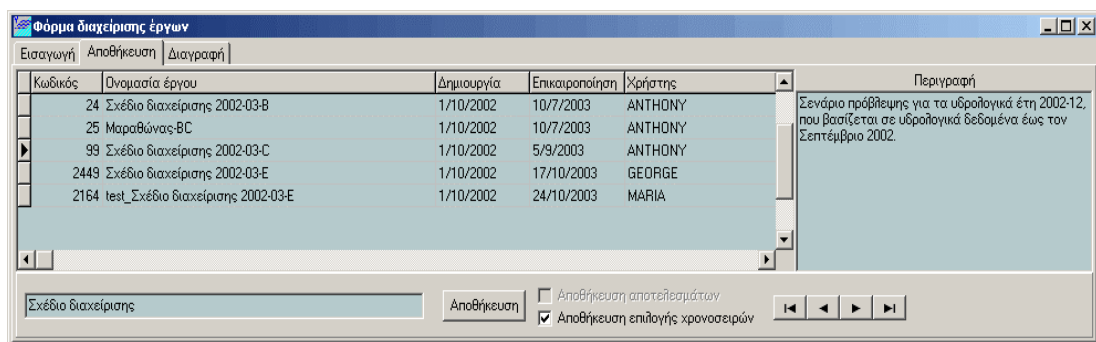
Ο χρήστης μπορεί να εισάγει κάποιο από τα καταχωρημένα στη Βάση Δεδομένων έργα για επισκόπηση και επεξεργασία, επιλέγοντάς το με το ποντίκι ή με τα κουμπιά πλοήγησης και μετά πατώντας το κουμπί **Εισαγωγή**. Η εισαγωγή ενός νέου έργου από τη Βάση συνεπάγεται την κατάργηση του έργου που ενδέχεται να είναι φορτωμένο. Πριν από την πραγματοποίηση αυτού του βήματος ζητείται η επιβεβαίωση του χρήστη. Ανάλογα με το πλήθος των δεδομένων που περιλαμβάνονται στο έργο η διαδικασία εισαγωγής μπορεί να διαρκέσει λίγα λεπτά της ώρας. Για όση ώρα διαρκεί η εισαγωγή δεδομένων δεν είναι δυνατή η εκτέλεση άλλης λειτουργίας του *Υδρονομέα*. Ο τερματισμός της διαδικασίας εισαγωγής έργου γνωστοποιείται στο χρήστη με την αναγραφή της νέας κατάστασης του υπολογιστικού συστήματος και των στατιστικών στοιχείων του έργου στη γραμμή κατάστασης της Κύριας Φόρμας.

4.11.2 Αποθήκευση έργου

Η αποθήκευση των τροποποιήσεων ενός έργου που έχει φορτωθεί από τη Βάση Δεδομένων μπορεί να γίνει και με επιλογή **Έργο/ Αποθήκευση** από το μενού επιλογών της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα*. Σε αυτήν την περίπτωση αποθηκεύονται και ενδεχομένως υφιστάμενα αποτελέσματα υπολογισμών και οι επιλογές χρονοσειρών.

Στην περίπτωση νέου έργου, η αποθήκευση πραγματοποιείται από το φύλλο αποθήκευσης έργου της Φόρμας Διαχείρισης. Το φύλλο εμφανίζεται στην οθόνη με την επιλογή **Έργο/ Αποθήκευση** ως... από το μενού επιλογών ή με το πάτημα του σχετικού κουμπιού () της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα*, υπό την προϋπόθεση ότι το σχήμα του δικτύου περιλαμβάνει τουλάχιστον μια συνιστώσα (δηλ. δεν είναι κενό).

Από το φύλλο αποθήκευσης ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει την τρέχουσα ονομασία και να αποθηκεύσει το έργο πατώντας το κουμπί **Αποθήκευση**.



Σχήμα 4.68: Φύλλο αποθήκευσης της Φόρμας Διαχείρισης Έργων.

Αποθήκευση αποτελεσμάτων

Ο *Υδρονομέας* υποστηρίζει τη δυνατότητα αποθήκευσης της επιλογής χρονοσειρών που έγινε για το συγκεκριμένο έργο και ορισμένων αποτελεσμάτων υπολογισμών, με σκοπό την χρήση τους από άλλες εφαρμογές (GIS, σύνταξη εκθέσεων κλπ.)

Στα αποτελέσματα υπολογισμών που με επιλογή του χρήστη μπορούν να αποθηκευτούν στη Βάση Δεδομένων συγκαταλέγονται:

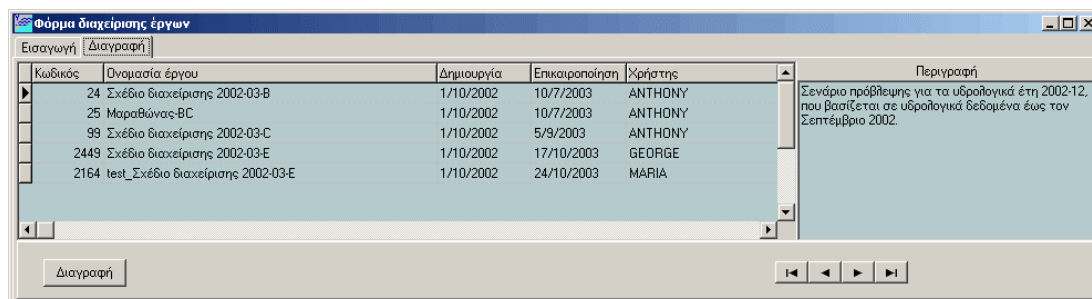
- Ο βέλτιστος κανόνας λειτουργίας ταμιευτήρων (χρησιμεύει στην περίπτωση που έχει προηγηθεί βελτιστοποίηση). Σημειώνεται ότι με κατάλληλη επιλογή είναι δυνατή η αποθήκευση όλων των κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων που αναδεικνύονται ως βέλτιστοι κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης (βλ. επιλογές κανόνων λειτουργίας στη Φόρμα Επιλογών Έργου).
- Στοιχεία για την αστοχία των στόχων που έθεσε ο χρήστης. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στην συνολική περίοδο προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, για κάθε στόχο αποθηκεύεται η συνολική αστοχία χρονικών περιόδων (έτη) και χρονικών βημάτων (μήνες), καθώς και το έλλειμμα όγκου στις σχετικές κατηγορίες στόχων.
- Οι μέσες τιμές του ισοζυγίου των ταμιευτήρων, κόμβων, υδραγωγείων και γεωτρήσεων για τη συνολική προσομοιωμένη χρονική περίοδο καθώς και για κάθε ένα έτος ξεχωριστά.

Σε περίπτωση που στη Βάση Δεδομένων υπάρχουν παλαιότερες εγγραφές αποτελεσμάτων του ίδιου έργου, αυτές αντικαθίστανται κατά την αποθήκευση με τις πρόσφατες.

4.11.3 Διαγραφή έργου

Το φύλλο διαγραφής της Φόρμας Διαχείρισης Έργων εμφανίζεται με την επιλογή Έργο/ Διαγραφή από τη Βάση από το μενού επιλογών της Κύριας Φόρμας του *Υδρονομέα*. Το φύλλο περιλαμβάνει έναν πίνακα στον οποίο αναγράφονται ο κωδικός, η ονομασία, η ημερομηνία δημιουργίας και επικαιροποίησης του έργου καθώς και ο κωδικός του χρήστη που αποθήκευσε το έργο. Στο δεξιό μέρος της φόρμας παρατίθεται μια σύντομη περιγραφή με την οποία έχει καταχωρηθεί το έργο.

Με επιλογή του έργου και πάτημα του κουμπιού Διαγραφή το έργο διαγράφεται μόνιμα από τη Βάση Δεδομένων, ύστερα από επιβεβαίωση από τον χρήστη.



Σχήμα 4.69: Φύλλο διαγραφής της Φόρμας Διαχείρισης Έργων.

5 Ανακεφαλαίωση, συμπεράσματα και συζήτηση

Το λογισμικό πακέτο *Υδρονομέας* (έκδοση 3.2) αποτελεί τον πυρήνα του ολοκληρωμένου υπολογιστικού συστήματος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*. Βασίζεται σε πρωτότυπο και προχωρημένο μεθοδολογικό-θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο υλοποιεί με γρήγορες και αποτελεσματικές υπολογιστικές δομές και διαδικασίες σε ένα εύχρηστο παραθυρικό υπολογιστικό περιβάλλον.

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

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

Ειδικότερα, ο προσδιορισμός του μέτρου επίδοσης γίνεται μέσω λεπτομερούς προσομοίωσης της λειτουργίας του υδροσυστήματος για ένα κατάλληλο χρονικό ορίζοντα. Προηγουμένως έχει εκτελεστεί στοχαστική προσομοίωση των υδρολογικών μεταβλητών, βάσει της οποίας έχουν παραχθεί οι κατάλληλες εισόδους για την προσομοίωση της λειτουργίας του υδροσυστήματος. Με την τελευταία προσομοίωση προσδιορίζονται, βήμα προς βήμα, όλα τα μεγέθη που αφορούν στη λειτουργία όλων των συνιστωσών του υδροσυστήματος, όπως οι απολήψεις από κάθε υδατικό πόρο, οι παροχές σε κάθε αγωγό, οι παροχετεύσεις σε κάθε κόμβο κατανάλωσης, οι απώλειες νερού σε κάθε κόμβο, οι καταναλώσεις ενέργειας κ.ά. Όλες οι ποσότητες αυτές λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή του μέτρου επίδοσης.

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

Αυτή η βελτιστοποίηση σε κάθε βήμα προσομοίωσης, που έχει ονομαστεί εσωτερική βελτιστοποίηση, αποδείχθηκε ότι μπορεί να αναχθεί σε γραμμικό δικτυακό πρόβλημα εφόσον δεν υπάρχουν διαρροές

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

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

Οι παραπάνω μεθοδολογίες και οι αντίστοιχοι αλγόριθμοι υλοποιήθηκαν στο υπολογιστικό σύστημα *Υδρονομέας* (έκδοση 3.2). Πέρα από τους υπολογιστικούς αλγορίθμους, ο *Υδρονομέας* προσφέρει και μια σειρά επιπλέον λειτουργιών και δυνατοτήτων, όπως τη διαχείριση των σχετικών δεδομένων και των υπολογιστικών σεναρίων μέσω σχεσιακής βάσης δεδομένων, την ασφάλεια χειρισμού των δεδομένων μέσω εκχώρησης κατάλληλων δικαιωμάτων ανά κατηγορία χρηστών, την εποπτική παράσταση της προσομοίωσης και των κανόνων λειτουργίας μέσω δυναμικής γραφικής απεικόνισης, και την εξαγωγή εύχρηστων πινακοποιημένων αποτελεσμάτων των υπολογισμών.

Εκτός από τις εργασίες προγραμματισμού, η θέση σε λειτουργία του *Υδρονομέας* για το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας απαιτήσε μια σειρά από εκτεταμένες εργασίες αναζήτησης και επεξεργασίας δεδομένων σχετικών με τη δομή, την ταυτότητα και τα λεπτομερή χαρακτηριστικά όλων των συνιστωσών του υδροσυστήματος. Αποτέλεσμα των ενεργειών αυτής της κατηγορίας είναι η κατάρτιση ενός δομημένου μοντέλου του υδροσυστήματος που είναι κατανοητό και αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά το φυσικό υδροσύστημα με τον απλούστερο δυνατό τρόπο αλλά και χωρίς υπεραπλουστεύσεις ως προς τη δομή, τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία του.

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

Αναφορές

- Ευστρατιάδης, Α., και Δ. Κουτσογιάννης, Κασταλία (έκδοση 2.0) - Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τεύχος 23, Αθήνα, 2003.
- Ευστρατιάδης, Α., Ι. Ναλμπάντης και Ε. Ρόζος Σύστημα προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών λεκανών Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 21, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2003.
- Ευστρατιάδης, Α., *Διερεύνηση μεθόδων αναζήτησης ολικού βελτίστου σε προβλήματα υδατικών πόρων*, Μεταπτυχιακή εργασία, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.
- Καραβοκυρός, Γ. και Σ. Κοζάνης, Λογισμικό εργαλείο σύνταξης εκθέσεων, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 20, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2003.
- Καραβοκυρός, Γ., Α. Ευστρατιάδης, και Δ. Κουτσογιάννης, Υδρονομέας (έκδοση 2): Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τεύχος 11, 84 σελίδες, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000a.
- Καραβοκυρός, Γ., Α. Ευστρατιάδης, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Ν. Δαμιανόγλου, Κ. Κωνσταντινίδου, Σ. Ναλπαντίδου, Α. Ξανθάκης, και Σ. Πολιτάκη, Ανάλυση απαιτήσεων του συστήματος, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 1, 74 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2000b.
- Καραβοκυρός, Γ., Δ. Κουτσογιάννης, και Ν. Μανδέλλος, Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του υδροσυστήματος της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 3*, Τεύχος 40, 161 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Ε. Ρόζος, Χ. Καρόπουλος, Α. Νασίκας, Ε. Νεστορίδου, και Α. Νικολόπουλος, Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας — Έτος 2002–2003, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 14, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2002.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Δ. Γκριντζιά, Ν. Δαμιανόγλου, Χ. Καρόπουλος, Σ. Ναλπαντίδου, Α. Νασίκας, Α. Νικολόπουλος, Α. Ξανθάκης, και Κ. Ρίπης, Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος

- της Αθήνας — Έτος 2001–2002, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 13, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.
- Κουτσογιάννης, Δ., *Σημειώσεις Βελτιστοποίησης Συστημάτων Υδατικών Πόρων - Μέρος Α*, Έκδοση 2, 91 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000a.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Δ. Γκριντζιά, Ν. Δαμιανόγλου, Α. Ξανθάκης, Σ. Πολιτάκη, και Β. Τσουκαλά, Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας - Έτος 2000-2001, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τεύχος 5, 165 σελίδες, Αθήνα, 2000b.
- Οικονόμου, Α., *Αξιολόγηση της μεθόδου Παραμετροποίησης - Προσομοίωσης - Βελτιστοποίησης στη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.
- Παπακώστας, Ν., Σχεδιασμός και υλοποίηση κεντρικής βάσης δεδομένων, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 19, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2003.
- 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 A. Maass et al., chap. 11, pp. 443-458, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1962.
- Chen, P. P., The entity-relationship model: toward a unified view of data, *ACM Transactions on Database Systems* 1:1 pp 9-36, 1976
- Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W., *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1988.
- Chvatal, V., *Linear Programming*, W. H. Freeman and Company, 1983.
- Clark, E. J., Impounding reservoirs, *Journal of American Water Works Association*, 48(4), 349-354, 1956.
- Clark, E. J., New York control curves, *Journal of American Water Works Association*, 42(9), 823-827, 1950.
- Dai, T., and J. W. Labadie, River basin network model for integrated water quantity/quality management, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 127(5), 295-305, 2001.
- Deo, N., *Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science*, Prentice-Hall, 1974.
- Duan, Q., S. Sorooshian, and V. Gupta, Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031, 1992.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems, *Proceedings of the 5th International Conference on Hydroinformatics*, Vol. 2, 1423-1428, Cardiff, UK, July 2002, IAHR, IWA, IAHS, 2002.

- Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, and D. Xenos, Minimising water cost in the water resource system of Athens, *Urban Water*, 2003 (υπό έκδοση).
- Fredericks, J., J. Labadie, and J. Altenhofen, Decision support system for conjunctive stream-aquifer management, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 124(2), 69-78, 1998.
- Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- Graham, L. P., J. W. Labadie, I. P. G. Hutchison, and K. A. Ferguson, Allocation of augmented water supply under a priority water rights system, *Water Resources Research*, 22(7), 1083-1094, 1986.
- Israel, M. S., and J. R. Lund, Priority preserving unit penalties in network flow modeling, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 125(4), 205-214, 1999.
- Karavokiros, G., A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, Determining management scenarios for the water resource system of Athens, *Proceedings, Hydorama 2002, 3rd International Forum on Integrated Water Management*, March 2002, 175-181, Water Supply and Sewerage Company of Athens, Athens, 2002.
- Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, *Science*, 220, 671-680, 1983.
- Koutsoyiannis, D., A. Efstratiadis, and G. Karavokiros, A decision support tool for the management of multi-reservoir systems, *Journal of the American Water Resources Association*, 38(4), 945-958, 2002.
- Koutsoyiannis, D., and A. Economou, Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems, *Water Resources Research*, 39(6), 1170, 1-17, 2003.
- Koutsoyiannis, D., G. Karavokiros, A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Koukouvinos, and A. Christofides, A decision support system for the management of the water resource system of Athens, *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(14-15), 599-609, 2003.
- Koutsoyiannis, D., Reliability concepts in reservoir design, *The Encyclopedia of Water*, edited by J. H. Lehr, New York, 2004a.
- Koutsoyiannis, D., Stochastic simulation of hydrosystems, *The Encyclopedia of Water*, edited by J. H. Lehr, New York, 2004b.
- Kuczera, G., Fast multireservoir multiperiod linear programming models, *Water Resources Research*, 25(2), 169-176, 1989.
- Labadie, J., *MODSIM: Technical manual river basin network model for water rights planning*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1995.
- 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, IIASA Collab. Proc. Ser., CP-82-53, 1-103, 1982.
- Loucks, D. P., J. R. Stedinger, and D. A. Haith, *Water Resources Systems Planning and Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.
- Lund, J. R., and J. Guzman, Derived operating rules for reservoirs in series or in parallel, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 125(3), 143-153, 1999.
- Mays, L. W., and Y. K. Tung, *Hydrosystems Engineering and Management*, McGraw-Hill, New York, 1992.

- Mays, L. W., and Y. K. Tung, Systems analysis, in *Water Resources Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1996.
- Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, New York, 1992.
- Nalbantis, I., and D. Koutsoyiannis, A parametric rule for planning and management of multiple-reservoir systems, *Water Resources Research*, 33(9), 2165-2177, 1997.
- Nelder, J. A., and R. Mead, A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, 7(4), 308-313, 1965.
- Oliveira, R., and D. P. Loucks, Operating rules for multi-reservoir systems, *Water Resources Research*, 33(4), 839-852, 1997.
- Pan, L., and L. Wu, A hybrid global optimization method for inverse estimation of hydraulic parameters: annealing-simplex method, *Water Resources Research*, 34(9), 2261-2269, 1998.
- Philbrick, C. R., and P. Kitanidis, Limitations of deterministic optimization applied to reservoir operations, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 125(3), 135-142, 1999.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1992.
- ReVelle, C., *Optimizing Reservoir Resources – Including a New Model for Reservoir Reliability*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- Ripley, B. D., *Stochastic Simulation*, Wiley, New York, 1987.
- Smith, D. K., *Network Optimization Practice: A Computational Guide*, John Wiley and Sons, 1982.
- Winston, W. L., *Operations Research, Applications and Algorithms*, 3rd edition, Duxbury, Belmont, 1994.