



ΟΔΥΣΣΕΥΣ

ΝΑΜΑ

ΕΜΠ

ΔΕΥΑΚ

ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ

ΜΔΣ



Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης 2000-2006  
Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ  
ΣΥΖΕΥΞΗ ΜΕ ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

ΟΔΥΣΣΕΥΣ

Τεύχος 9

Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης  
και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών  
συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ»

Αθήνα  
Ιανουάριος  
2007

*Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Δ. Κουτσογιάννης*

## Συνεργαζόμενοι φορείς



NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων  
Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων



Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης  
Καρδίτσας



Αειφορική Δωδεκανήσου Α.Ε.



Άδωνις Κοντός και ΣΙΑ Ε.Ε. (Marathon Data Systems)

## Ενότητα Εργασίας 4

Ανάπτυξη μοντέλου λειτουργικής προσομοίωσης και  
βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών  
συστημάτων

## Τεύχος 9

Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και  
βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών  
συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ»

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο του τεύχους είναι η ανάπτυξη του υπολογιστικού συστήματος ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, που είναι ένα επιχειρησιακό εργαλείο για τη διαχείριση σύνθετων συστημάτων υδατικών πόρων. Το μοντέλο μπορεί να βρει εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος υδροσυστημάτων, που περιλαμβάνουν ποτάμια, ταμιευτήρες, γεωτρήσεις, αντλιοστάσια, σταθμούς παραγωγής ενέργειας, δίκτυα υδραγωγείων, σημεία ζήτησης, κλπ. Μετά από μια γενική θεώρηση του προβλήματος διαχείρισης υδατικών πόρων καθώς και μια συνοπτική παρουσίαση κάποιων καταξιωμένων συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου, που υλοποιεί το σχήμα παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση. Η πρώτη αναφέρεται στη διατύπωση παραμετρικών κανόνων ελέγχου για τις σημαντικές υποδομές (ταμιευτήρες, γεωτρήσεις), στους οποίους ο αριθμός των παραμέτρων διατηρείται όσο το δυνατό πιο χαμηλός. Η προσομοίωση εφαρμόζεται για την πιστή αναπαράσταση των διεργασιών. Ειδικότερα, αντιστοιχεί πραγματικά οικονομικά μεγέθη καθώς και εικονικά κόστη στις συνιστώσες του δικτύου ώστε να τηρήσει τους φυσικούς περιορισμούς και τις προτεραιότητες των υδατικών χρήσεων, καθώς και να εξασφαλίσει τη μεταφορά του νερού από τις πηγές στην κατανάλωση από τη διαδρομή με το χαμηλότερο κόστος. Τέλος, η βελτιστοποίηση εφαρμόζεται για να εντοπίσει τη βέλτιστη διαχειριστική πολιτική στη βάση πολλαπλών κριτηρίων επίδοσης, εξασφαλίζοντας έτσι την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους και ρίσκου στη λήψη των αποφάσεων. Επισημαίνουμε ότι το πλαίσιο του μοντέλου υιοθετεί μια στοχαστική προσέγγιση, παρέχοντας προγνώσεις όλων των μεταβλητών του υδροσυστήματος (αποθέματα, παροχές, απολήψεις) στη βάση σεναρίων συνθετικών εισροών. Το τελευταίο μέρος του τεύχους εστιάζει στην πρακτική χρήση του μοντέλου, τόσο ως αυτόνομο σύστημα όσο και σε συνεργασία με άλλα λογισμικά που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού έργου ΟΔΥΣΣΕΥΣ.

## ABSTRACT

The subject of the report is the development of the software system HYDRONOMEAS, which is an operational tool for the management of complex water resource systems. The model is applicable to a wide range of hydrosystems, consisting of river branches, reservoirs, boreholes, pumping and hydropower stations, aqueduct networks, demand points, etc. After a general overview of the water resources management problem and a short presentation of some well-recognized decision support systems, we describe the theoretical background of the model, which implements the parameterisation-simulation-optimisation scheme. The former refers to the formulation of parametric control rules for the major infrastructures (reservoirs, boreholes), where the number of parameters is kept as low as possible. Simulation is applied to faithfully represent the processes. Specifically, real economic values in addition to virtual costs are assigned to network components to preserve the physical constraints and water use priorities, ensuring also the lowest-cost transportation path of water from the sources to the consumption. Finally, optimisation is applied to derive the optimal management policy on the basis of multiple performance criteria, thus ensuring simultaneous minimisation of the risk and cost of decision-making. Note that the modelling framework adopts a

stochastic approach, providing predictions for all hydrosystem fluxes (storages, discharges, withdrawals) on the basis of synthetic scenarios of inflows. The last part of the report focus on the practical use of the model, as a stand-alone system as well as in co-operation with other modules developed within the ODYSSEUS research project.

# Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>4</b>
1.1	Αντικείμενο του τεύχους - Ιστορικό.....	4
1.2	Ανάλυση απαιτήσεων.....	5
1.3	Διάρθρωση του τεύχους.....	8
<b>2</b>	<b>Θεωρητικό πλαίσιο διαχείρισης υδατικών πόρων</b>	<b>9</b>
2.1	Γενικά.....	9
2.2	Θεμελιώδεις έννοιες.....	9
2.2.1	Συστήματα υδατικών πόρων.....	9
2.2.2	Η έννοια της σχηματοποίησης.....	10
2.2.3	Η έννοια της προσομοίωσης.....	10
2.2.4	Ανάλυση συστημάτων και βελτιστοποίηση.....	11
2.2.5	Η έννοια της αξιοπιστίας.....	12
2.3	Συστήματα υδατικών πόρων και αβεβαιότητα.....	13
2.3.1	Υδρολογική αβεβαιότητα και ποσοτικοποίησή της.....	13
2.3.2	Στοχαστική προσομοίωση υδροσυστημάτων.....	14
2.3.3	Τύποι προσομοίωσης – Η έννοια της στοχαστικής πρόγνωσης.....	15
2.4	Βελτιστοποίηση συστημάτων υδατικών πόρων.....	16
2.4.1	Τοποθέτηση του προβλήματος.....	16
2.4.2	Χειρισμός με κλασικές τεχνικές βελτιστοποίησης.....	17
2.4.3	Προσομοίωση υδροσυστημάτων με χρήση κανόνων λειτουργίας.....	18
2.4.4	Το μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίησης – προσομοίωση – βελτιστοποίηση.....	19
<b>3</b>	<b>Επισκόπηση εργαλείων διαχείρισης υδατικών πόρων</b>	<b>22</b>
3.1	Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων.....	22
3.1.1	Γενικά.....	22
3.1.2	Εφαρμογή στη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων.....	23
3.2	Διερεύνηση διεθνώς καταξιωμένων μοντέλων.....	24
3.2.1	Στόχοι της έρευνας αγοράς.....	24
3.2.2	Το μοντέλο MIKE BASIN.....	25
3.2.3	Το μοντέλο RIBASIM.....	26
3.2.4	Το μοντέλο WEAP.....	26
3.2.5	Το μοντέλο MODSIM.....	28
3.3	Ιστορικό των ΣΥΑ που αναπτύχθηκαν στο ΕΜΠ.....	29
<b>4</b>	<b>Το μαθηματικό μοντέλο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ</b>	<b>32</b>
4.1	Γενικές αρχές.....	32
4.1.1	Ευελιξία ως προς την σχηματοποίηση.....	32
4.1.2	Ρεαλιστική αναπαράσταση λειτουργιών υδροσυστήματος.....	33

4.1.3	Ολιστική προσέγγιση .....	33
4.1.4	Πρακτικότητα κανόνων διαχείρισης .....	33
4.1.5	Ποσοτικοποίηση αβεβαιότητας και ρίσκου .....	34
4.1.6	Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση .....	34
4.1.7	Περιορισμός υπολογιστικού φόρτου.....	35
4.2	Συνιστώσες υδροσυστήματος.....	36
4.2.1	Γενικά.....	36
4.2.2	Κόμβοι.....	36
4.2.3	Κόμβοι εισροής.....	36
4.2.4	Ταμιευτήρες .....	37
4.2.5	Γεωτρήσεις.....	38
4.2.6	Υδατορεύματα.....	39
4.2.7	Υδραγωγεία.....	39
4.2.8	Στρόβιλοι.....	39
4.2.9	Αντλιοστάσια .....	41
4.3	Δεδομένα εισόδου.....	41
4.3.1	Χαρακτηριστικά μεγέθη υδροσυστήματος.....	41
4.3.2	Υδρολογικά σενάρια .....	42
4.3.3	Στόχοι και λειτουργικοί περιορισμοί .....	42
4.3.4	Οικονομικά δεδομένα .....	43
4.4	Παραμετροποίηση κανόνων λειτουργίας .....	44
4.4.1	Η έννοια των βαθμών ελευθερίας .....	44
4.4.2	Κανόνες λειτουργίας ταμιευτήρων .....	45
4.4.3	Γενίκευση κανόνων με ενσωμάτωση περιορισμών αποθέματος .....	47
4.4.4	Πρακτική χρήση κανόνων λειτουργίας .....	49
4.4.5	Κανόνες λειτουργίας γεωτρήσεων .....	49
4.5	Μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης.....	50
4.5.1	Τοποθέτηση του προβλήματος.....	50
4.5.2	Γενική περιγραφή του προβλήματος μεταφόρτωσης.....	52
4.5.3	Σχηματοποίηση μοντέλου διγράφου .....	53
4.5.4	Προσομοίωση διαρροών και διηθήσεων.....	58
4.5.5	Προσομοίωση επιστροφών νερού.....	59
4.5.6	Μοντέλο αναδρομικού υπολογισμού μοναδιαίου κόστους.....	60
4.5.7	Επικαιροποίηση ιδιοτήτων διγράφου.....	63
4.5.8	Επίλυση γραμμικού προβλήματος .....	64
4.5.9	Επισκόπηση της διαδικασίας προσομοίωσης.....	64
4.5.10	Αποτελέσματα προσομοίωσης .....	66
4.6	Εντοπισμός βέλτιστης διαχειριστικής πολιτικής.....	69
4.6.1	Γενικά.....	69
4.6.2	Μεταβλητές ελέγχου .....	69
4.6.3	Μέτρο επίδοσης υδροσυστήματος .....	70
4.6.4	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης .....	71
4.6.5	Επισκόπηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης .....	74

## 5 Πλαίσιο επιχειρησιακής λειτουργίας του συστήματος

76

5.1	Δεδομένα εισόδου σεναρίων .....	76
5.2	Πεδία εφαρμογής .....	76
5.3	Συνεργασία με άλλες εφαρμογές λογισμικού .....	78
5.3.1	Γενική αρχιτεκτονική υπολογιστικού συστήματος .....	78
5.3.2	Συνεργασία με το λογισμικό ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ .....	79
5.3.3	Συνεργασία με το μοντέλο γέννησης συνθετικών σεναρίων ΚΑΣΤΑΛΙΑ .....	79
5.3.4	Συνεργασία με το μοντέλο στατιστικής ανάλυσης ΠΥΘΙΑ .....	79
5.3.5	Συνεργασία με το μοντέλο εκτίμησης υδατικών αναγκών ΔΙΨΟΣ .....	80
5.3.6	Συνεργασία με τα υδρολογικά μοντέλα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και ΖΥΓΟΣ .....	80
5.3.7	Συνεργασία με το μοντέλο ανάλυσης παράκτιων υδροφορέων ΑΛΣ .....	81
5.3.8	Συνεργασία με τα μοντέλα ποιότητας νερού ΗΡΙΑΔΑΝΟΣ και ΛΕΡΝΗ .....	81
5.3.9	Συνεργασία με το μοντέλο οικονομικής ανάλυσης ΕΡΜΗΣ .....	82

## Αναφορές

83

# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Αντικείμενο του τεύχους - Ιστορικό

Το παρόν τεύχος συντάχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου με τίτλο «*Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*», που ανατέθηκε από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) στη εταιρεία NAMA Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές σε συνεργασία με τον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΕΜΠ και τρεις ακόμη φορείς (Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης Καρδίτσας, Αειφορική Δωδεκανήσου, Marathon Data Systems). Το έργο εντάσσεται στο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα», στην Πράξη «Φυσικό Περιβάλλον και Βιώσιμη Ανάπτυξη». Επιστημονικός υπεύθυνος είναι ο Αναπληρωτής Καθηγητής Δ. Κουτσογιάννης.

Αντικείμενο του έργου είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος εργαλείων πληροφορικής, που σε συνδυασμό με ένα παράλληλο πλαίσιο μεθοδολογιών και προδιαγραφών, θα παρέχει την κατάλληλη υποδομή για την ορθολογική και βιώσιμη διαχείριση υδροσυστημάτων κάθε κλίμακας. Η κεντρική συνιστώσα του συστήματος είναι το μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδροσυστημάτων, που θα λειτουργεί ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων. Το μοντέλο διαχείρισης θα πλαισιώνεται από μια δέσμη υποστηρικτικών μοντέλων, για την ανάλυση κρίσιμων συνιστωσών που σχετίζονται με την προσφορά, ζήτηση και διαχείριση του νερού. Το παρόν τεύχος περιγράφει την κεντρική αυτή συνιστώσα του υπολογιστικού συστήματος, στην οποία δόθηκε η ονομασία «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ». Επιπλέον, περιέχει τη σχετική βιβλιογραφική έρευνα σε θέματα διαχείρισης υδατικών πόρων και την έρευνα αγοράς, όπως ακριβώς προβλέπεται από το Τεχνικό Παράρτημα της Σύμβασης του έργου.

Ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ αποτελεί μετεξέλιξη μιας σειράς εφαρμογών που έχουν αναπτυχθεί από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ, με σκοπό την αντιμετώπιση συγκεκριμένων διαχειριστικών προβλημάτων σε σύνθετα υδροσυστήματα του ελληνικού χώρου, όπως το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας και το σύστημα ταμιευτήρων Αχελώου-Θεσσαλίας (βλ. 3.3). Θα πρέπει ωστόσο να επισημανθεί ότι καμία από τις παραπάνω απόπειρες δεν στόχευε σε ένα προϊόν εμπορικού προσανατολισμού, που να μπορεί να εφαρμοστεί σε υδροσυστήματα κάθε κλίμακας, να πληρεί τις προδιαγραφές λειτουργικότητας των διεθνώς καταξιωμένων πακέτων και να μπορεί, προφανώς, να συνεργαστεί με τα υπόλοιπα μοντέλα του υπολογιστικού συστήματος. Συνεπώς, αν και αξιοποιήθηκαν οι υπάρχουσες υποδομές, ο όλος σχεδιασμός έγινε εκ του μηδενός, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του Τεχνικού Παραρτήματος της Σύμβασης του έργου.

Η ομάδα εκπόνησης του παρόντος τεύχους, που αποτελεί και την ομάδα ανάπτυξης του μοντέλου ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, είναι:

- Ανδρέας Ευστρατιάδης, Πολιτικός Μηχανικός, Msc Υδρολόγος, Υποψ. Δρ.
- Γιώργος Καραβοκυρός, Διπλ. Πληροφορικής
- Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ.



## 1.2 Ανάλυση απαιτήσεων

Σύμφωνα με το Τεχνικό Παράρτημα της Σύμβασης του έργου, η ανάπτυξη του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ εντάσσεται στην ενότητα εργασίας 4, με τίτλο «Ανάπτυξη μοντέλου λειτουργικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων». Στο σχετικό χωρίο, προδιαγράφονται ρητά οι απαιτήσεις του μοντέλου ως εξής:

*«Στόχος της ενότητας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ανταγωνιστικού, ευέλικτου, ευρείας εφαρμογής μοντέλου λειτουργικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων σε διάφορες κλίμακες. Το μοντέλο θα είναι σε θέση να δώσει απαντήσεις σε πλήθος ερωτημάτων σχετικών με τη διαχείριση των υδατικών πόρων, όπως:*

- *Ποια είναι η μακροπρόθεσμη απόδοση ενός υδροσυστήματος για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας;*
- *Με ποια ελάχιστη πιθανότητα αστοχίας μπορούν να επιτευχθούν οι στόχοι και περιορισμοί (ποσοτικοί, ποιοτικοί, ενεργειακοί, οικονομικοί, περιβαλλοντικοί) στη χρήση νερού που προβλέπει ένα διαχειριστικό σενάριο και με ποια μέτρα και τρόπους διαχείρισης;*
- *Ποιο είναι το ελάχιστο κόστος λειτουργίας του συστήματος με το οποίο εξασφαλίζεται η επίτευξη των στόχων με δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας; Με ποια μέτρα και τρόπους διαχείρισης επιτυγχάνεται αυτός ο στόχος;*
- *Ποιες είναι οι επιπτώσεις υδροκλιματικών αλλαγών στο υδροσύστημα, κυρίως όσον αφορά τους στόχους χρήσης νερού που έχουν τεθεί καθώς και την οικονομική συνιστώσα;*
- *Ποιες θα είναι οι επιπτώσεις από την εφαρμογή μιας συγκεκριμένης διαχειριστικής πολιτικής στην ποιότητα νερού των φυσικών αποδεκτών και στα οικοσυστήματα;*
- *Ποιες θα είναι οι επιπτώσεις αλλαγών (π.χ., κατασκευή νέων έργων) ή έκτακτων περιστατικών (π.χ., βλάβες) στο υφιστάμενο δίκτυο διανομής υδατικών πόρων.*

*Το σύστημα που θα αναπτυχθεί θα χρησιμοποιεί τεχνολογία αιχμής για να εντοπίζει τη βέλτιστη πολιτική διαχείρισης υδροσυστημάτων, αναπαριστώντας με ακρίβεια τις φυσικές διεργασίες, χωρίς να χρειάζεται να καταφύγει σε υπερβολικές απλουστεύσεις του φυσικού συστήματος. Το μαθηματικό μοντέλο, το οποίο θα είναι εφαρμόσιμο σε υδροσυστήματα οποιασδήποτε τοπολογίας και πολυπλοκότητας, θα προσομοιώνει τη λειτουργία ενός μεγάλου φάσματος υδραυλικών έργων συλλογής, αξιοποίησης, μεταφοράς και επεξεργασίας του νερού, όπως ταμιευτήρων, λιμνοδεξαμενών, γεωτρήσεων, υδραγωγείων (ανοιχτών και κλειστών), αρδευτικών καναλιών, αντλιοστασίων, μονάδων παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, μεριστών, θυροφραγμάτων, μονάδων επεξεργασίας νερού, κλπ. Η διαδικασία σχηματισμού του υδροσυστήματος θα γίνεται μέσω γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, ενώ τα χαρακτηριστικά μεγέθη των έργων θα ανακτώνται από τη βάση δεδομένων.*

*Στο μοντέλο θα λαμβάνονται υπόψη επιφανειακοί και υπόγειοι υδατικοί πόροι, καθώς και άλλες πηγές υδροδότησης, όπως μονάδες αφαλάτωσης, επαναχρησιμοποίηση λυμάτων για συγκεκριμένες χρήσεις, κλπ.*

*Το μοντέλο θα υποστηρίζει ένα ευρύ πλήθος στόχων και περιορισμών σε σχέση με τη χρήση του νερού, όπως:*

- *ζήτηση νερού για ύδρευση, άρδευση ή άλλες χρήσεις·*
- *διατήρηση των αποθεμάτων ταμιευτήρων ή υδροφορέων πάνω ή κάτω από κάποιο όριο·*
- *ρύθμιση της παροχής ή επιβολή ορίων παροχής σε υδατορεύματα ή υδραγωγεία·*
- *διατήρηση της ποιοτικής κατάστασης των υδροφορέων, των υδάτινων αποδεκτών και των οικοσυστημάτων, εκφρασμένης με όρους συγκέντρωσης συγκεκριμένων δεικτών·*

- παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας αιχμής.

Η πολιτική διαχείρισης του υδροσυστήματος θα εκφράζεται με τη μορφή κανόνων λειτουργίας, οι οποίοι είτε θα είναι προκαθορισμένοι ή θα αναζητώνται από το ίδιο το μοντέλο, μέσω υπολογιστικών διαδικασιών αυτόματης αναζήτησης. Για το λόγο αυτό, οι κανόνες λειτουργίας θα έχουν κατάλληλη μαθηματική δομή, ώστε να είναι εφικτή η βελτιστοποίησή τους. Ως κριτήρια βελτιστοποίησης θα μπορούν να τεθούν παράγοντες όπως η αξιοπιστία του συστήματος, η ασφαλής απόληψη, η οικονομικότητα της διαχείρισης (π.χ., λόγος οφέλους-κόστους), η ποιότητα των υδάτινων σωμάτων, η παραγωγή ενέργειας, κλπ. Η βελτιστοποίηση θα μπορεί να λάβει υπόψη της περισσότερα από ένα κριτήρια, με εφαρμογή εξελιγμένων τεχνικών πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Η αποτίμηση μια συγκεκριμένης πολιτικής διαχείρισης θα γίνεται μέσω στοχαστικής προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας δηλαδή συνθετικές χρονοσειρές εισόδου. Κατά την προσομοίωση, θα λαμβάνονται υπόψη οι φυσικοί και λειτουργικοί περιορισμοί του υδροσυστήματος, καθώς και οι κανόνες λειτουργίας του. Σε κάθε χρονικό βήμα, το μοντέλο θα υπολογίζει και θα εφαρμόζει τον προσφορότερο τρόπο εξυπηρέτησης των στόχων, τηρώντας προκαθορισμένη σειρά προτεραιότητας και επιλέγοντας τόσο τη αποδοτικότερη κατανομή των απολήψεων από τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους όσο και την βέλτιστη διαδρομή του νερού σε περίπτωση εναλλακτικών δυνατοτήτων. Η διάρκεια του βήματος προσομοίωσης θα μπορεί να προσαρμοστεί στο εκάστοτε υδατικό σύστημα και στο είδος του διαχειριστικού προβλήματος που πρόκειται να αντιμετωπιστεί.

Αντικατοπτρίζοντας με ρεαλιστικό τρόπο τη στοχαστική φύση βασικών συνιστωσών της διαχείρισης των υδατικών πόρων (π.χ., υδρολογικές εισροές), τα αποτελέσματα των αναλύσεων θα δίνονται με πιθανοτικούς όρους. Στα αποτελέσματα θα συμπεριλαμβάνονται τουλάχιστον τα εξής:

- οι βέλτιστοι κανόνες διαχείρισης του συστήματος·
- αναλυτικά υδατικά, οικονομικά και ενεργειακά ισοζύγια·
- διαχρονικές πιθανότητες αστοχίας των λειτουργικών στόχων και περιορισμών·
- στατιστική πρόγνωση της εξέλιξης των διαφόρων υδρολογικών και διαχειριστικών μεγεθών, όπως αποθεμάτων ταμιευτήρων, στάθμης υδροφορέων, παροχής υδραγωγείων, ενεργειακής κατανάλωσης και υδροηλεκτρικής παραγωγής»

Όπως διαφαίνεται στο Κεφάλαιο 4, στο οποίο περιγράφεται λεπτομερώς το μαθηματικό υπόβαθρο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, ο σχεδιασμός του έλαβε υπόψη, στο βαθμό που κατέστη τελικά εφικτό, τις παραπάνω προδιαγραφές. Πρακτικά, καλύφθηκαν όλες οι συμβατικές απαιτήσεις, οι περισσότερες εντός του ίδιου του μαθηματικού μοντέλου του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, και ορισμένες, πιο εξειδικευμένες, στα πλαίσια μιας διαδραστικής συνεργασίας του με άλλα μοντέλα, όπως εξηγείται στην ενότητα 5.3. Βασική απαίτηση ήταν να βρεθεί ένας πρόσφορος συμβιβασμός μεταξύ ακρίβειας στην περιγραφή των φυσικών διεργασιών και ταχύτητας στους σχετικούς υπολογισμούς. Συνεπώς, στις περιπτώσεις που η χρονική ανάλυση των εν λόγω διεργασιών είναι πολύ πιο λεπτομερής σε σχέση με την τυπική μηνιαία κλίμακα των προβλημάτων διαχείρισης υδροσυστημάτων, και προκειμένου να μην επιβαρύνεται δραματικά ο υπολογιστικός φόρτος της προσομοίωσης, κρίνεται πιο αποτελεσματικό ένα σχήμα παράλληλης σύζευξης των σχετικών μοντέλων, που βασίζεται στην ανταλλαγή δεδομένων εισόδου και εξόδου. Χαρακτηριστικά αναφέρονται η μοντελοποίηση των επιφανειακών και υπόγειων νερών, με σκοπό την εκτίμηση των υδρολογικών εισροών ενός υδροσυστήματος, που υλοποιεί το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, στο οποίο μάλιστα έχουν ενσωματωθεί κοινές διαδικασίες προσομοίωσης με τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (βλ. 5.3.6), καθώς και η εκτίμηση των επιπτώσεων μιας διαχειριστικής πολιτικής στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υδάτινων σωμάτων (ποτάμια, λίμνες), με αξιοποίηση των αναλυτικών μοντέλων ΗΡΙΑΝΟΣ και ΛΕΡΝΗ (βλ. 5.3.8).

Σημαντική συνιστώσα του σχεδιασμού ήταν η αποκρυστάλλωση της διεθνούς εμπειρίας, η οποία είχε δύο σκέλη, αφενός την εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση των συναφών μαθηματικών μοντέλων και αφετέρου την έρευνα αγοράς, στην οποία εξετάστηκαν κυρίως θέματα λειτουργικότητας που αφορούν στην ανάπτυξη του λογισμικού.

Η βιβλιογραφική επισκόπηση, οι θεμελιώδεις έννοιες της οποίας εξηγούνται στο Κεφάλαιο 2, κατέληξε σε ένα πλαίσιο μεθοδολογικών απαιτήσεων που συνοψίζεται ως εξής:

- ευελιξία ως προς την σχηματοποίηση, με δυνατότητα περιγραφής των τεχνικών έργων αλλά και των φυσικών συνιστωσών (υδατορεύματα), σε υδροσυστήματα κάθε κλίμακας·
- ρεαλιστική αναπαράσταση της λειτουργίας των υδροσυστημάτων, χωρίς ωστόσο υπερσύνθετη περιγραφή των διεργασιών, με υπερπληθείς και ασαφείς παραμέτρους και υπερβολικές απαιτήσεις σε δεδομένα·
- ολιστική προσέγγιση, με ενσωμάτωση όλων των πτυχών της διαχείρισης των υδατικών πόρων (τεχνικών, οικονομικών, ενεργειακών, περιβαλλοντικών)·
- περιγραφή διαχειριστικών πολιτικών με χρήση πρακτικών κανόνων, που να είναι κατανοητοί από μη έμπειρους χρήστες και να έχουν μακροχρόνια ισχύ·
- ποσοτικοποίηση της υδρολογικής αβεβαιότητας και του ρίσκου στη λήψη των αποφάσεων, με στοχαστική πρόγνωση υδρολογικών και διαχειριστικών μεγεθών·
- βελτιστοποίηση της λειτουργίας του υδροσυστήματος ως προς ένα ευρύ φάσμα διαχειριστικών παραμέτρων του και έναντι πληθώρας κριτηρίων αξιολόγησης·
- περιορισμός του υπολογιστικού φόρτου κατά τη σύζευξη των σχημάτων στοχαστικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, με την υιοθέτηση φειδωλής παραμετροποίησης και τη χρήση εξελιγμένων αλγορίθμων.

Η υλοποίηση των παραπάνω αρχών στο μαθηματικό μοντέλο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ εξηγείται στο Κεφάλαιο 4, και ειδικότερα στην ενότητα 4.1.

Όσον αφορά στην έρευνα αγοράς, αυτή επικεντρώθηκε σε τέσσερα ευρέως διαδεδομένα λογισμικά πακέτα, τα χαρακτηριστικά των οποίων εξετάζονται στην ενότητα 3.2:

- το MIKE BASIN της εταιρίας Danish Hydraulic Institute·
- το RIBASIM της εταιρίας Delft Hydraulics·
- το WEAP του Stockholm Environment Institute·
- το MODSIM, που είναι ελεύθερο προϊόν και έχει αναπτυχθεί στο Colorado State University.

Η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι παρά την ύπαρξη πληθώρας επιλογών με αντικείμενο τη διαχείριση των υδατικών πόρων, φαίνεται γενικά να υπάρχει ασυμβατότητα μεταξύ της τεχνολογικής (από πλευράς ποιότητας και ευελιξίας του λογισμικού) και μεθοδολογικής (όσον αφορά τα χρησιμοποιούμενα μαθηματικά μοντέλα) συνιστώσας τους. Από την άλλη πλευρά, κατέστη σαφές ότι θα ήταν αδύνατη η ανάπτυξη ενός προϊόντος ικανού να ανταγωνιστεί σε όλο το φάσμα εφαρμογών τα καθιερωμένα εμπορικά πακέτα. Για τον λόγο αυτό, η προσπάθεια επικεντρώθηκε σε επιλεγμένες εφαρμογές στον τομέα των υδατικών πόρων με κριτήρια: (α) την υφιστάμενη τεχνογνωσία στην ερευνητική ομάδα, (β) τις ανάγκες της ελληνικής αλλά και της διεθνούς αγοράς, (γ) την πληρότητα των υπηρεσιών που θα παρέχονται, (δ) το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα ως προς τα κρίσιμα μεθοδολογικά ζητήματα που συζητήθηκαν προηγουμένως, με έμφαση στη σύζευξη μεθοδολογιών στοχαστικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης που απουσιάζει από τα διαδεδομένα πακέτα της αγοράς, και (ε) την ευκολία στην παρουσίαση και διαχείριση των πληροφοριών και αποτελεσμάτων.

### 1.3 Διάρθρωση του τεύχους

Εκτός από την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), το τεύχος περιλαμβάνει τέσσερα ακόμη κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2 εισάγονται οι θεμελιώδεις έννοιες της διαχείρισης των υδατικών πόρων και εξετάζονται οι υφιστάμενες προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας σε ζητήματα στοχαστικής ανάλυσης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο πρόβλημα του βέλτιστου ελέγχου ταμειυτήρων, που λόγω της συνθετότητας της λειτουργίας τους αλλά και του καθοριστικού τους ρόλου στην αναρρύθμιση των επιφανειακών αποθεμάτων νερού, αποτελεί ένα από τα ζητήματα αιχμής στην έρευνα των υδατικών πόρων.

Στο Κεφάλαιο 3 συνοψίζεται η διεθνής αλλά και ελληνική εμπειρία στην ανάπτυξη συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων για την διαχείριση των υδατικών πόρων. Η έρευνα εστιάζεται σε τέσσερα αντιπροσωπευτικά και ιδιαίτερα διαδεδομένα προϊόντα λογισμικού, των οποίων εξετάζονται τα μεθοδολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά, ενώ επισημαίνονται τα στοιχεία εκείνα ως προς τα οποία είναι δυνατό να υπάρξει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται το πλήρες θεωρητικό πλαίσιο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, που βασίζεται στο μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση. Συγκεκριμένα, δίνονται τα χαρακτηριστικά εισόδου και οι εξισώσεις λειτουργίας όλων των συνιστωσών ενός υδροσυστήματος που υποστηρίζει το μοντέλο, εξηγείται η ολοκλήρωση των παραπάνω στο μοντέλο προσομοίωσης και τίθεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης της διαχείρισης, για το οποίο περιγράφονται οι μεταβλητές ελέγχου (παράμετροι), τα κριτήρια που ενσωματώνονται στο μέτρο επίδοσης του συστήματος και ο αλγόριθμος αναζήτησης της πλέον πρόσφορης πολιτικής διαχείρισης.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 δίνεται ένα πλαίσιο επιχειρησιακής λειτουργίας του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, τόσο αυτόνομα όσο και σε συνεργασία με τις υπόλοιπες εφαρμογές που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του παρόντος έργου.

## 2 Θεωρητικό πλαίσιο διαχείρισης υδατικών πόρων

---

### 2.1 Γενικά

Ως *διαχείριση υδατικών πόρων* νοείται η εφαρμογή μέτρων, κατασκευαστικών και μη, για τον έλεγχο φυσικών και τεχνητών συστημάτων υδατικών πόρων, με στόχο την ωφέλεια του ανθρώπου και του περιβάλλοντος (Grigg, 1996). Η σύγχρονη αντίληψη περί της διαχείρισης προϋποθέτει μια ολιστική προσέγγιση, με στόχο την ποσοτικά αξιόπιστη, ποιοτικά και περιβαλλοντικά ασφαλή, και οικονομικά πρόσφορη κάλυψη των υδατικών αναγκών, με κατάλληλη αξιοποίηση των διαθέσιμων αποθεμάτων νερού. 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.

Η συνθετότητα των διαχειριστικών προβλημάτων οφείλεται σε μια πληθώρα παραγόντων, όπως η μη γραμμική δυναμική των φυσικών διεργασιών, η ανάγκη ταυτόχρονης ικανοποίησης πολλαπλών και, συχνά, αντικρουόμενων στόχων και περιορισμών, που επιβάλλονται από ομάδες με διαφορετικά συμφέροντα, η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη των υδρολογικών εισροών και, σε μικρότερο βαθμό, της ζήτησης, καθώς και η ανάγκη συγκερασμού της οικονομικότητας και του ρίσκου, και μάλιστα σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Τα παραπάνω επιβάλλουν μια *συστημική προσέγγιση* στη λήψη των αποφάσεων (Grigg, 1996), που επιτυγχάνεται με τη χρήση εξελιγμένων εργαλείων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης.

Στο κεφάλαιο αυτό ορίζονται, σύμφωνα και με τις πλέον πρόσφατες εξελίξεις της βιβλιογραφίας, οι θεμελιώδεις έννοιες, στις οποίες βασίζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. Επιπλέον, διερευνάται το ζήτημα της υδρολογικής αβεβαιότητας και της ποσοτικής θεώρησης αυτής με τεχνικές στοχαστικής προσομοίωσης, πρακτική που έχει υιοθετηθεί στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. Τέλος, γίνεται επισκόπηση των βιβλιογραφικών προσεγγίσεων ανάλυσης και βελτιστοποίησης υδροσυστημάτων, με έμφαση στα μοντέλα βέλτιστου ελέγχου ταμειυτήρων, που συνιστούν το πλέον σύνθετο σκέλος του γενικότερου διαχειριστικού προβλήματος.

### 2.2 Θεμελιώδεις έννοιες

#### 2.2.1 Συστήματα υδατικών πόρων

Σύμφωνα με τον ορισμό των Mays and Tung (1992, σ. 8) *σύστημα* καλείται 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.

Ως *υδροσύστημα* (hydrosystem) νοείται ένα σύστημα αποτελούμενο από φυσικά υδάτινα σώματα και τεχνικά έργα, που συνεργαζόμενα εξυπηρετούν έναν ή περισσότερους σκοπούς, που 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 δύο παραπάνω όροι θα χρησιμοποιούνται με κοινή σημασία, και θα αναφέρονται στον κύκλο φυσική προσφορά, αποθήκευση, μεταφορά και κατανάλωση νερού, που περιλαμβάνει τις συνιστώσες του φυσικού περιβάλλοντος (λεκάνες απορροής, ποτάμια, υδροφορείς, κλπ.) και τα σχετιζόμενα υδραυλικά έργα (ταμιευτήρες, υδραγωγεία, αντλιοστάσια, γεωτρήσεις, κλπ.), χωρίς ωστόσο να εκτείνεται στη λεπτομέρεια των υδρευτικών ή αρδευτικών δικτύων διανομής.

## 2.2.2 Η έννοια της σχηματοποίησης

*Σχηματοποίηση* (schematisation) είναι η διαδικασία μετασχηματισμού των συνιστωσών ενός φυσικού συστήματος σε συνιστώσες του μαθηματικού μοντέλου που αναπαριστά το εν λόγω σύστημα. Λόγω της δικτυακής δομής τους, η σχηματική διάταξη των συστημάτων υδατικών πόρων έχει συνήθως τη μορφή *γράφου* (graph), αποτελείται δηλαδή από *κόμβους* και *κλάδους*.

Η σχηματοποίηση είναι μια εξαιρετικά σημαντική διαδικασία, που αποτελεί ευθύνη του μηχανικού ή αναλυτή. Λαμβάνει χώρα πριν την κατάστρωση των εξισώσεων του μαθηματικού μοντέλου, και 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 το σκοπό του προβλήματος που εξετάζεται. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στα συστήματα υδατικών πόρων 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, με έχουν κοινές ιδιότητες. Για παράδειγμα, στη συνήθη χρονική κλίμακα των διαχειριστικών μοντέλων, όπου οι υδραυλικές διεργασίες δεν επηρεάζουν τη δυναμική του συστήματος, οι αγωγοί με βαρύτητα και οι καταθλιπτικοί αγωγοί μπορούν να θεωρηθούν ως ένα αντικείμενο, δηλαδή στοιχεία μεταφοράς νερού με πεπερασμένη παροχευτικότητα.

*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, ούτε τη διαχειριστική πρακτική. Χαρακτηριστικά αναφέρονται η ομαδοποίηση των γεωτρήσεων που υδρομαστεύουν μια ευρύτερη περιοχή σε ένα εννοιολογικό αντικείμενο που υλοποιεί τη συνολική άντληση, καθώς και η ενοποίηση των επιμέρους τμημάτων ενός υδραγωγείου σε ένα στοιχείο μεταφοράς.

Μια επιτυχής σχηματοποίηση παρέχει την απαιτούμενη εποπτεία για την κατανόηση των διεργασιών και τη λήψη των αποφάσεων στο υδροσύστημα, ενώ εξοικονομεί σημαντικούς πόρους, τόσο όσον αφορά στο όγκο των δεδομένων που καλείται να εισάγει ο χρήστης όσο και όσον αφορά στον φόρτο των υπολογισμών.

## 2.2.3 Η έννοια της προσομοίωσης

*Προσομοίωση* (simulation) είναι η τεχνική μίμησης της λειτουργίας 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 με τη μορφή μαθηματικών ή λογικών σχέσεων και κωδικοποιημένων, συνήθως, σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού (Κουτσογιάννης, 2000). Θεωρητικά, ένα τέλειο μοντέλο, δεχόμενο τις διεγέρσεις του πραγματικού συστήματος, οφείλει να παράγει παρόμοια απόκριση με αυτό. Στην πράξη βεβαίως, η προσομοιωμένη απόκριση ενός

μοντέλου αποκλίνει πάντοτε από την απόκριση του πραγματικού συστήματος, καθώς εισάγεται πληθώρα σφαλμάτων και αβεβαιοτήτων στη μαθηματική δομή, τα δεδομένα και τις παραμέτρους του μοντέλου. Αν σε ένα μοντέλο προσομοίωσης εισάγονται οι προβλεπόμενες μελλοντικές διεγέρσεις, με σκοπό την αναπαράσταση της μελλοντικής απόκρισης του συστήματος, τότε το αυτό λειτουργεί ως εργαλείο 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 διέγερση.

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, δηλαδή 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 και η βελτιστοποίηση έντονα μη γραμμικών συναρτήσεων. Στη βιβλιογραφία, η στοχαστική προσομοίωση απαντά και ως *μέθοδος Monte Carlo*.

Η μελέτη 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, δηλαδή 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 σύνηθες 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.

#### **2.2.4 Ανάλυση συστημάτων και βελτιστοποίηση**

Η ανάλυση συστημάτων είναι μια επιστημονική περιοχή με τεράστιο πεδίο εφαρμογής, που περιλαμβάνει μια δέσμη υπολογιστικών εργαλείων για τη μελέτη πολύπλοκων δομών ή φαινομένων, για τα οποία δεν υπάρχει αναλυτική λύση. Αποσκοπεί στην αναγνώριση του τρόπου με τον οποίο αλληλεπιδρούν τα στοιχεία του συστήματος μεταξύ τους και με το περιβάλλον (Grigg, 1996, σ. 115), χωρίς ωστόσο να επιδιώκει τη λεπτομερειακή θεώρηση των σχέσεων ή φυσικών διεργασιών που τα διέπουν (Dingman, 1994, σ. 382).

Συνήθως, η αντιμετώπιση των προβλημάτων ανάλυσης συστημάτων βασίζεται σε μια διαδοχή από εναλλακτικές *αποφάσεις* (decisions) και *αξιολογήσεις* (evaluations) των επιπτώσεων κάθε απόφασης

στο υπό μελέτη σύστημα. Αν κάθε μια από τις εναλλακτικές αποφάσεις που ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος, μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο τιμών, και αν σε κάθε τέτοια περιγραφή μπορεί να αντιστοιχιστεί ένα πραγματικό μέτρο επίδοσης (performance measure), τότε ως βέλτιστη (optimal) νοείται η απόφαση που μεγιστοποιεί το εν λόγω μέτρο. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση συστημάτων έχει πρακτικά ταυτιστεί με τον γενικότερο όρο βελτιστοποίηση (optimisation), που χρησιμοποιείται τόσο σε πραγματικές εφαρμογές όσο και σε μαθηματικά προβλήματα, για να υποδηλώσει μια διαδικασία συστηματικής αναζήτησης της μέγιστης ή, ανάλογα με τη διατύπωση του προβλήματος, ελάχιστης τιμής μιας *στοχικής συνάρτησης*<sup>1</sup> (objective function) ως προς τις *μεταβλητές ελέγχου* της (control variables).

Στα κλασικά εγχειρίδια ανάλυσης συστημάτων υδατικών πόρων (Biswas, 1976· Loucks *et al.* 1981· Mays and Tung, 1996), η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση θεωρούνται ξεχωριστές τεχνικές, με την πρώτη να έχει ως πλεονέκτημα της ακρίβειας στην περιγραφή των διεργασιών και τη δεύτερη να πλεονεκτεί από την άποψη ότι εντοπίζει βέλτιστες διαχειριστικές πολιτικές, καταφεύγοντας ωστόσο σε υπεραπλουστεύσεις του συστήματος (π.χ. γραμμικοποίηση). Αυτό συμβαίνει επειδή τίθεται η ανάγκη προσαρμογής των εξισώσεων που περιγράφουν τη δυναμική του υδροσυστήματος στα αυστηρά πλαίσια που καθορίζει το εκάστοτε μοντέλο βελτιστοποίησης (βλ. 2.4.2). Στην προσέγγιση που υιοθετείται στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, η προσομοίωση εντάσσεται στη βελτιστοποίηση, καθώς τα αποτελέσματά της χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση του μέτρου επίδοσης του υδροσυστήματος, που αντιστοιχεί στη στοχική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

## 2.2.5 Η έννοια της αξιοπιστίας

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 ένα ποσοτικό μέτρο επίδοσης του συστήματος (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).

Μια σημαντική πληροφορία ενός υδροσυστήματος είναι η *ασφαλής απόληψη* (safe yield), εκφρασμένη σε κάποιο χρονικό διάστημα (συνήθως ετήσιο). Ο όρος υποδηλώνει την ποσότητα νερού που μπορεί να αποδοθεί από το σύστημα ή, ισοδύναμα, τη ζήτηση που ικανοποιείται, με κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο αξιοπιστίας.

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 σύνθετο σύστημα, που περιλαμβάνει πολλαπλά έργα συλλογής και μεταφοράς νερού, κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό. Αυτό συμβαίνει επειδή τα υδραυλικά έργα διαταράσσουν το φυσικό καθεστώς υδροφορίας, ρυθμίζοντας τη διαίτα των υδατικών πόρων τόσο χρονικά (αποθήκευση νερού και απόδοσή του μεταγενέστερα) όσο και χωρικά (μεταφορά νερού μεταξύ διαφορετικών λεκανών). Σε μια τέτοια περίπτωση, η εκτίμηση της αξιοπιστίας ή, ισοδύναμα, της πιθανότητας αστοχίας, των απολήψεων δεν είναι εφικτή αναλυτικά, αλλά γίνεται εμπειρικά, υπολογίζοντας την συχνότητα ικανοποίησης της ζήτησης, από ένα επαρκώς μεγάλο δείγμα εκροών. Το τελευταίο προκύπτει μέσω

---

<sup>1</sup> Ο όρος στοχική συνάρτηση θα χρησιμοποιείται αντί του διαδεδομένου αντικειμενική, καθώς θεωρούμε ότι αποδίδει πολύ καλύτερα την πραγματική της έννοια.



προσομοίωσης, εφόσον είναι διαθέσιμο ένα δείγμα εισροών. Από το δείγμα εισροών, και για τη δεδομένη ζήτηση, παράγονται προσομοιωμένες χρονοσειρές απολήψεων που χρησιμοποιούνται για την εμπειρική εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος, με βάση τη σχέση:

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

όπου  $n'$  το πλήθος των ετών κατά τα οποία δεν επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή  $x^*$  και  $n$  το σύνολο των προσομοιωμένων ετών, δηλαδή 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 κάθε χρήση σε ένα σύστημα υδατικών πόρων, ανάλογα με την κρισιμότητά της, μελετάται με διαφορετικό επίπεδο αξιοπιστίας. Για παράδειγμα, μια υδρευτική χρήση οφείλει να ικανοποιείται με πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με μια αρδευτική. Όσο μεγαλύτερο το επίπεδο αξιοπιστίας τόσο μεγαλύτερο οφείλει να είναι το δείγμα των εισροών που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση. Συνήθως, τα ιστορικά δείγματα δεν είναι κατάλληλα για την εκτίμηση υψηλών επιπέδων αξιοπιστίας ή, ισοδύναμα, μικρών πιθανοτήτων αστοχίας, δεδομένου ότι αδυνατούν να αναπαράγουν τις ακραίες τιμές των σχετικών κατανομών πιθανοτήτων (Philbrick and Kitanidis, 1999). Ο περιορισμός αυτός καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση μεθοδολογιών στοχαστικής προσομοίωσης για την ανάλυση τέτοιων συστημάτων, όπως περιγράφεται στο εδάφιο 2.3.2.

## 2.3 Συστήματα υδατικών πόρων και αβεβαιότητα

### 2.3.1 Υδρολογική αβεβαιότητα και ποσοτικοποίησή της

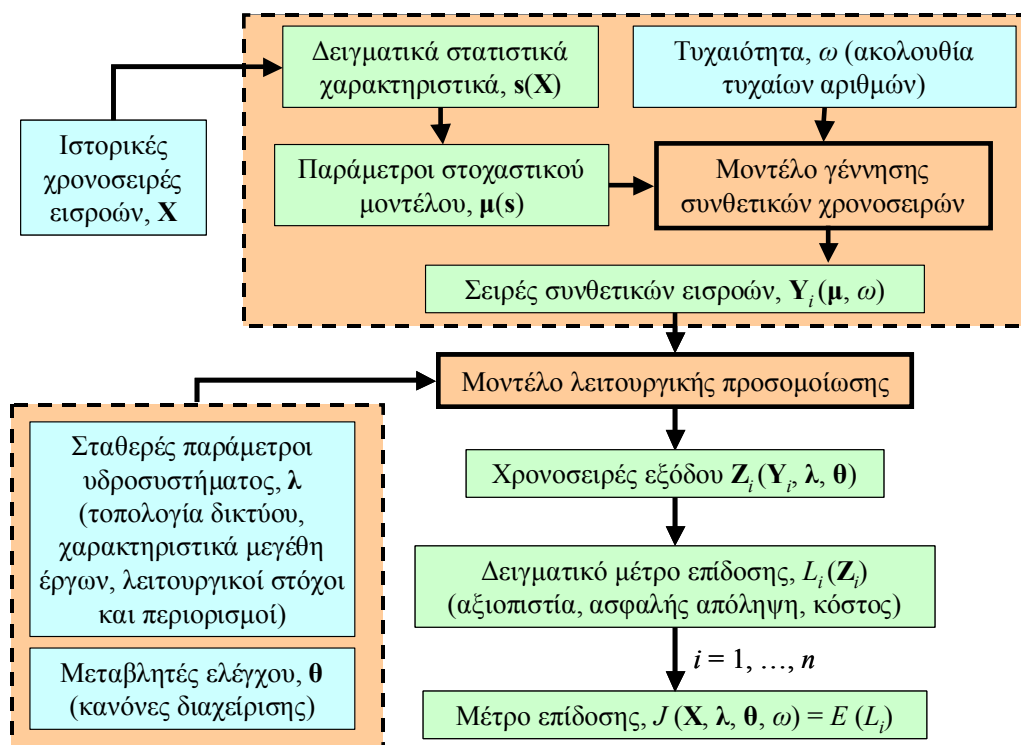
Από την πληθώρα των πηγών αβεβαιότητας που διέπει την λειτουργία ενός υδροσυστήματος, σημαντικότερη ασφαλώς είναι η υδρολογική. Αυτή οφείλεται στην αδυναμία πρόβλεψης της εξέλιξης των υδρομετεωρολογικών διεργασιών, η χαοτική συμπεριφορά των οποίων καθιστά ανέφικτη την πραγματοποίηση ασφαλών προγνώσεων 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 διεργασιών με την χρήση προσδιοριστικών μοντέλων οδήγησε στην εναλλακτική θεώρησή τους ως τυχαίων μεταβλητών και την αντιμετώπισή τους με τη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων. 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 μοντέλα αυτά εφαρμόζονται για την γέννηση συνθετικών χρονοσειρών, οι οποίες αναπαράγουν τη στατιστική

εξάρτηση και τα στατιστικά χαρακτηριστικά των υδρολογικών διεργασιών. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των συνθετικών δειγμάτων είναι η απουσία περιορισμού ως προς το μήκος τους, κάτι που καθιστά δυνατή την χρήση τους για την εκτίμηση οσοδήποτε μεγάλων επιπέδων αξιοπιστίας.

### 2.3.2 Στοχαστική προσομοίωση 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,  $\mu$ , και ένας όρος τυχαιότητας,  $\omega$ , που εκφράζεται από ένα σύνολο τυχαίων αριθμών, που παράγονται αυτόματα μέσω του υπολογιστή. Οι παράμετροι του μοντέλου είναι συνάρτηση κάποιων δειγματικών στατιστικών χαρακτηριστικών,  $s(\mathbf{X})$ , όπου με  $\mathbf{X}$  συμβολίζονται οι χρονοσειρές εισροών του υδροσυστήματος (π.χ. ιστορικές απορροές ανάντη ταμιευτήρων). Οι εν λόγω παράμετροι ορίζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αναπαράγουν τα παραπάνω στατιστικά χαρακτηριστικά. Έξοδοι του 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).



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

Η δεύτερη συνιστώσα του σχήματος στοχαστικής προσομοίωσης είναι το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης του υδροσυστήματος. Το μοντέλο χρησιμοποιεί ως στοιχεία εισόδου τις παραμέτρους του συστήματος και τις συνθετικές χρονοσειρές εισροών που παράγονται από το στοχαστικό υδρολογικό μοντέλο. Οι παράμετροι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: (α) σταθερές παράμετροι, που συμβολίζονται με  $\lambda$ , και αναφέρονται στην τοπολογία του δικτύου, τα χαρακτηριστικά μεγέθη των υδραυλικών έργων και τους λειτουργικούς περιορισμούς, και (β) παράμετροι διαχείρισης, που

συμβολίζονται με  $\theta$ , και αναφέρονται σε άγνωστες μεταβλητές του μαθηματικού μοντέλου που καθορίζουν την πολιτική λειτουργίας του υδροσυστήματος. Το μοντέλο αναπαριστά την λειτουργία του υδροσυστήματος, τηρώντας τους φυσικούς περιορισμούς του προβλήματος και προσπαθώντας να ικανοποιήσει τους λειτουργικούς περιορισμούς, με βάση την πολιτική διαχείρισης,  $\theta$ . Έξοδοι του μοντέλου είναι  $n$  σενάρια απολήψεων  $Z_i(Y_i, \lambda, \theta)$ , κάθε ένα από τα οποία 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 υδροηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος λειτουργίας, το οικονομικό όφελος από την πώληση του νερού, κλπ.

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 ένας στατιστικός δείκτης των επιμέρους δειγματικών μέτρων (π.χ. η μέση τιμή), με την οποία αποτιμάται η αποτελεσματικότητα της πολιτικής διαχείρισης, όπως περιγράφεται από τις παραμέτρους  $\theta$ .

Το σχήμα που περιγράφηκε παραπάνω προϋποθέτει ότι η διαχειριστική πολιτική του υδροσυστήματος είναι εκ των προτέρων καθορισμένη, είναι δηλαδή γνωστές οι τιμές του διανύσματος  $\theta$ . Στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, οι παράμετροι  $\theta$  εκτιμώνται μέσω βελτιστοποίησης, με στοχαστική συνάρτηση το μέτρο  $J$ , σύμφωνα με το γενικό σχήμα που περιγράφεται στο εδάφιο 2.4.4. Όσον αφορά στο στοχαστικό υδρολογικό μοντέλο, που γεννά τις συνθετικές χρονοσειρές, υλοποιείται από το πακέτο ΚΑΣΤΑΛΙΑ, που αποτελεί αντικείμενο της ενότητας εργασίας 3 (Ευστρατιάδης κ.ά., 2005).

### 2.3.3 Τύποι προσομοίωσης – Η έννοια της στοχαστικής πρόγνωσης

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2.3.2, το μέτρο επίδοσης ενός συστήματος υδατικών πόρων που εκτιμάται μέσω στοχαστικής προσομοίωσης εξαρτάται από: (α) τις παραμέτρους του στοχαστικού μοντέλου,  $\mu$ , (β) τα χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος,  $\lambda$ , και (γ) τις διαχειριστικές παραμέτρους,  $\theta$ . Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, οι παράμετροι  $\mu$  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 την 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, δηλαδή 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, δηλαδή η λειτουργία 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 ένταξης νέων έργων στο σύστημα ή και την προσωρινής απενεργοποίησης ορισμένων, λόγω συντήρησης ή βλάβης, 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).

## 2.4 Βελτιστοποίηση συστημάτων υδατικών πόρων

### 2.4.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Έστω σύστημα υδατικών πόρων αποτελούμενο από ταμιευτήρες και αγωγούς μεταφοράς νερού, του οποίου αναζητείται μια πολιτική λειτουργίας, που είναι βέλτιστη ως προς κάποια κριτήρια (π.χ. κόστος). Το σύστημα θεωρείται ότι εξυπηρετεί πολλαπλές χρήσεις ύδατος, όπως ύδρευση, άρδευση, παραγωγή ενέργειας, περιβαλλοντική διατήρηση, αντιπλημμυρική προστασία κλπ., που μπορούν να εξυπηρετηθούν από εναλλακτικές πηγές και εναλλακτικές διαδρομές. Οι ταμιευτήρες συνδέονται είτε εν σειρά είτε παράλληλα, διαμορφώνοντας ένα δίκτυο οποιασδήποτε τοπολογίας.

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

- *φυσικούς περιορισμούς*, που προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τεχνικών έργων (ελάχιστη στάθμη υδροληψίας και χωρητικότητα ταμιευτήρων, παροχτευτικότητα υδραγωγείων, εγκατεστημένη ισχύς στροβίλων και αντλιοστασίων κλπ).
- *λειτουργικούς περιορισμούς*, που επιβάλλονται από έναν ή περισσότερους φορείς που έχουν την ευθύνη διαχείρισης των υδραυλικών έργων, με στόχο την ικανοποίηση των διαφόρων χρήσεων αλλά και των τυχόν θεσμικών, διοικητικών, περιβαλλοντικών ή άλλων δεσμεύσεων.

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, ακόμη και μετά την κατασκευή έργων αναρρύθμισης, μη ελεγχόμενες και συνεπώς τυχαίες, οι αποφάσεις που σχετίζονται με την ικανοποίηση των εν λόγω περιορισμών, δηλαδή οι απολήψεις απ'ότους διάφορους υδατικούς πόρους και η κατανομή τους στο δίκτυο των υδραγωγείων, είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές. Κατά συνέπεια, στη γενική περίπτωση, οι περιορισμοί που αναφέρονται στα εν λόγω μεγέθη θα ικανοποιούνται όχι στο σύνολο του χρονικού ορίζοντα ελέγχου αλλά σε ένα ποσοστό αυτού. Το ποσοστό αυτό, όπως εξηγήθηκε στο εδάφιο 2.2.5, αποτελεί εμπειρικό μέτρο της *αξιοπιστίας* επίτευξης του συγκεκριμένου περιορισμού (βλ. και ReVelle, 1999, σ. 116-118).

Στους φυσικούς περιορισμούς εντάσσονται ακόμη οι εξισώσεις υδατικού ισοζυγίου που περιγράφουν τη δυναμική του συστήματος, ως περιορισμοί τύπου ισότητας. Αυτές διατυπώνονται σε όλα τα σημεία ελέγχου, δηλαδή τους κόμβους, ως διαφορικές εξισώσεις της γενικής 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, ενώ η έννοια του αποθέματος έχει νόημα μόνο για τις θέσεις που

υπάρχουν έργα ταμίευσης. Για πρακτικούς λόγους, η εξίσωση ισοζυγίου διατυπώνεται σε διακριτή μορφή, χωρίζοντας τον χρονικό ορίζοντα ελέγχου σε ισομήκη διαστήματα  $\Delta t$ . Στα τυπικά προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων, το διάστημα  $\Delta t$  αντιστοιχεί σε έναν μήνα, που είναι και η χρονική κλίμακα προσομοίωσης στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. 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 ο αριθμός των ταμιευτήρων και  $T$  ο αριθμός των χρονικών βημάτων, δηλαδή το μήκος της προσομοίωσης, προκύπτουν  $n \times T$  βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος. Εφόσον όμως διατίθενται εναλλακτικές θέσεις απόληξης (γεωτρήσεις, ποτάμια) και εναλλακτικές διαδρομές νερού από τις πηγές στις θέσεις ζήτησης, τότε προκύπτουν περαιτέρω βαθμοί ελευθερίας, που σχετίζονται με την κατανομή των απολήψεων στο δίκτυο των υδραγωγείων σε κάθε χρονικό βήμα,  $t$ .

Για τη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, πρέπει να οριστεί ένα βαθμωτό μέτρο επίδοσης, μέσω του οποίου αξιολογείται η αποτελεσματικότητα της διαχειριστικής πολιτικής ως προς κάποια κριτήρια. Το εν λόγω μέτρο αντιστοιχεί στη στοχική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης, ενώ ως μεταβλητές ελέγχου νοούνται, καταρχήν, όλα τα άγνωστα μεγέθη του μοντέλου λειτουργίας του συστήματος, δηλαδή οι απολήψεις και η κατανομή τους στο δίκτυο, σε κάθε χρονικό βήμα. Η συνάρτηση αυτή είναι μη γραμμική ως προς τις μεταβλητές ελέγχου, και μαζί με τους φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς, συνιστούν το μοντέλο βέλτιστου ελέγχου του συστήματος.

#### 2.4.2 Χειρισμός με κλασικές 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), δηλαδή 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 συχνά πολύ μεγάλος, δεδομένου ότι για την ακριβή εκτίμηση της αξιοπιστίας απαιτείται η χρήση δειγμάτων μεγάλου μήκους. Για παράδειγμα, αν απαιτείται η εκτίμηση επιπέδων αξιοπιστίας της τάξης του 99% σε ετήσια βάση, όπως συμβαίνει με το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας, ο χρονικός ορίζοντας των δειγμάτων οφείλει να είναι της τάξης των μερικών χιλιάδων ετών, ώστε να μπορούν να εκτιμηθούν εμπειρικές πιθανότητες αστοχίας της τάξης του 1%. Συνδυάζοντας τα παραπάνω προκύπτει ότι, σε τέτοια συστήματα η διάσταση του προβλήματος βελτιστοποίησης, δηλαδή ο αριθμός των αγνώστων μεταβλητών ελέγχου, θα είναι της τάξης των εκατοντάδων χιλιάδων ή ακόμη και εκατομμυρίων.

Μια εναλλακτική προσέγγιση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου υδροσυστημάτων είναι η χρήση κλασικών μεθόδων ανάλυσης συστημάτων, όπως τεχνικές γραμμικού (ReVelle, 2001), δυναμικού ή στοχαστικού δυναμικού προγραμματισμού (Wasimi and Kitanidis, 1983· Loaiciga and Marino, 1985· Georgakakos and Marks, 1987· Faber and Stedinger, 2001). Πρόκειται για ειδικές δομές μοντέλων βελτιστοποίησης, που επειδή επιλύονται αναλυτικά, εγγυώνται τον εντοπισμό της ολικά βέλτιστης λύσης, σε αντίθεση με μια μη γραμμική προσέγγιση, όπου υπάρχει ισχυρός κίνδυνος εγκλωβισμού σε τοπικά ακρότατα (τόσο μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου). Ωστόσο, η εφαρμογή τους προϋποθέτει σημαντικές απλοποιήσεις στη μαθηματική περιγραφή του προβλήματος, όπως γραμμικοποίηση των εξισώσεων δυναμικής ή διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού

των μεταβλητών, με αποτέλεσμα οι λύσεις που προκύπτουν να μη ανταποκρίνονται στην πραγματική κατάσταση του συστήματος.

Μια ενδιαφέρουσα κατηγορία μοντέλων είναι αυτά που βασίζονται στον δικτυακό προγραμματισμό. Στην πλειονότητά τους, πρόκειται για μοντέλα προσομοίωσης, που σε κάθε χρονικό βήμα εκτιμούν την πλέον πρόσφορη 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. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής τέτοιων πρακτικών είναι το μοντέλο MODSIM, για το οποίο γίνεται μνεία στο εδάφιο 3.2.5. Άλλα μοντέλα, όπως αυτό που ανέπτυξε ο Kuczera (1989), είναι καθαρά μοντέλα βελτιστοποίησης, όπου ο χειρισμός των οριακών συνθηκών μεταξύ των διαδοχικών χρονικών βημάτων γίνεται μέσω εικονικών κλάδων μεταφοράς νερού. Επισημαίνεται ότι η δικτυακή βελτιστοποίηση χρησιμοποιείται και στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, σε ένα διαφορετικό ωστόσο πλαίσιο, ως βοηθητική διαδικασία της βελτιστοποίησης του καθολικού μέτρου επίδοσης του συστήματος (βλ. 4.5).

Ένα 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 στην πραγματικότητα είναι άγνωστη. Συνεπώς, προκύπτει κίνδυνος *υπερεκτίμησης* της επίδοσης του υδροσυστήματος, καθώς καμία πολιτική διαχείρισης δεν μπορεί να πετύχει αντίστοιχη επίδοση εξαιτίας της υδρολογικής αβεβαιότητας, δηλαδή της αδυναμίας πρόβλεψης των μελλοντικών εισροών.

#### 2.4.3 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 μη γραμμικής 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). Σε συστήματα που περιλαμβάνουν πολλαπλούς ταμιευτήρες, οι κανόνες διατυπώνονται με την μορφή εμπειρικών ή ευρετικών σχέσεων υπολογισμού των επιθυμητών εκροών, 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:

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

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 κατάντη ζήτηση νερού και  $\lambda$

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 αναλυτικοί 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:

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

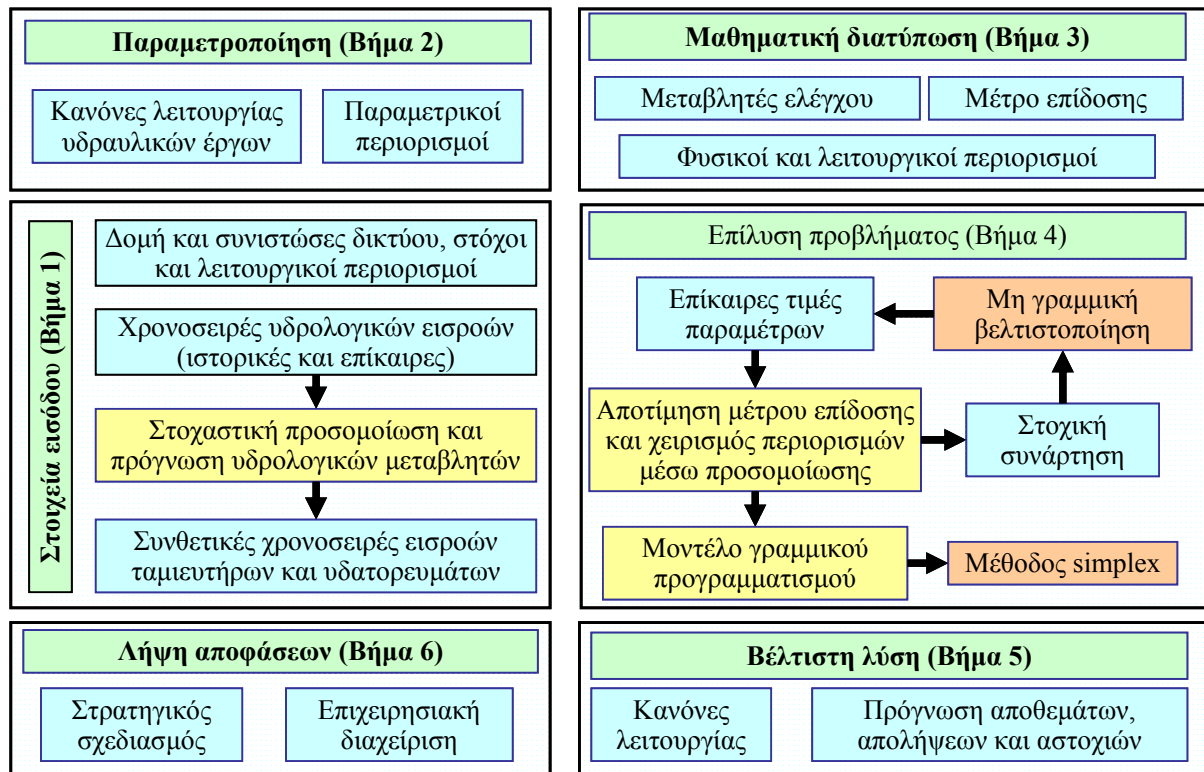
όπου  $s_i^*$  το επιθυμητό απόθεμα του ταμιευτήρα  $i$ ,  $k_i$  η αποθηκευτική ικανότητα του εν λόγω ταμιευτήρα,  $E[Q_i]$  η αναμενόμενη (μέση) καθαρή εισροή στον ταμιευτήρα από το τέλος της τρέχουσας περιόδου μέχρι το τέλος της περιόδου πλήρωσης,  $s$  το συνολικό ωφέλιμο απόθεμα του συστήματος (δηλαδή 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 (μέσων) εισροών.

Τονίζεται ότι οι κανόνες λειτουργίας αναφέρονται πάντοτε σε *επιθυμητά* και όχι σε πραγματικά μεγέθη απολήψεων. Ωστόσο, σε ένα σύστημα ταμιευτήρων πολύπλοκης τοπολογίας, η εφαρμογή ενός συγκεκριμένου κανόνα μπορεί να οδηγεί 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 είναι πολύ πιο σύνθετα, ώστε να μην είναι δυνατή η εφαρμογή μιας τυποποιημένης πολιτικής διαχείρισης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, που είναι και οι συνήθεις της πράξης, τα μοντέλα προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν ένα μικρό αριθμό από κανόνες διαχείρισης που έχουν προκύψει εμπειρικά και, ενδεχομένως, απέχουν πολύ από τους θεωρητικά βέλτιστους. Μια τέτοια εμπειροτεχνική προσέγγιση είναι σαφές ότι οδηγεί σε *υποεκτίμηση* της επίδοσης του συστήματος.

#### 2.4.4 Το μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση

Το σχήμα παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση, όπως εισήχθη από τους Koutsoyiannis and Economou (2003· βλ. και Οικονόμου, 2000) και γενικεύτηκε από τους Efstratiadis *et al.* (2004) και Καραβοκυρό κ.ά. (2004), είναι μια εύρωστη μεθοδολογία αντιμετώπισης προβλημάτων βέλτιστου ελέγχου συστημάτων υδατικών πόρων. Η κεντρική ιδέα συνίσταται στην παραμετρική διατύπωση των πρακτικών διαχείρισης των κύριων υδραυλικών έργων (ταμιευτήρες, γεωτρήσεις, κλπ.), ώστε να περιορίζεται δραστικά το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του μαθηματικού μοντέλου, χωρίς ωστόσο να μηδενίζεται, όπως στην περίπτωση των τυποποιημένων κανόνων λειτουργίας. Οι πρακτικές αυτές, καθώς και το σύνολο των φυσικών και λειτουργικών περιορισμών, ενσωματώνονται σε μια διαδικασία προσομοίωσης, τα αποτελέσματα της οποίας αξιολογούνται ποσοτικά, με σκοπό την αποτίμηση του μέτρου επίδοσης του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, ένας αλγόριθμος μη

γραμμικής βελτιστοποίησης αναλαμβάνει τον εντοπισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων, συναρτήσει του εν λόγω μέτρου, εξετάζοντας συστηματικά ένα μεγάλο αριθμό εναλλακτικών πρακτικών διαχείρισης. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται σύζευξη των μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, που συνδυάζει την ακριβή αναπαράσταση της λειτουργίας του συστήματος και τον εντοπισμό την αντικειμενικά καλύτερης πολιτικής διαχείρισης, και μάλιστα με εύλογο υπολογιστικό φόρτο, λόγω του μικρού αριθμού των παραμέτρων.



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

Το γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο, όπως υλοποιήθηκε στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2 και περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

**Βήμα 1ο:** Διαμορφώνεται η σχηματοποίηση του υδροσυστήματος και εισάγονται τα δεδομένα του μαθηματικού μοντέλου, δηλαδή τα χαρακτηριστικά μεγέθη των φυσικών και τεχνητών συνιστωσών, οι λειτουργικοί περιορισμοί, το μέτρο επίδοσης 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.

**Βήμα 2ο:** Ορίζονται γενικοί κανόνες διαχείρισης του υδροσυστήματος, που περιγράφονται από ένα σύνολο παραμέτρων,  $\theta$ . Η παραμετροποίηση οφείλει να είναι φειδωλή, έτσι ώστε το πλήθος των παραμέτρων, και συνεπώς το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος, να διατηρείται όσο το δυνατό πιο μικρό για να μη επιβαρύνει τη διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Με την προϋπόθεση στασιμότητας των χαρακτηριστικών του συστήματος, οι κανόνες διαχείρισης, και ως εκ τούτου οι παράμετροι, δεν πρέπει να μεταβάλλονται διαχρονικά, ώστε η διάσταση του προβλήματος να μην εξαρτάται από τον χρονικό ορίζοντα ελέγχου. Από την άλλη πλευρά, ορισμένες παράμετροι έχει νόημα να μεταβάλλονται εποχιακά, ώστε η διαχειριστική πολιτική που αποτυπώνουν να προσαρμόζεται στην ενδοετήσια ανισοκατανομή ορισμένων χρήσεων νερού.



**Βήμα 3ο:** Ορίζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης, με στοχική συνάρτηση το μέτρο επίδοσης του συστήματος και μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους  $\theta$ . 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, δηλαδή δεδομένες τιμές παραμέτρων, καλείται το μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης που επιλύει το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος, δηλαδή τις εξισώσεις δυναμικής και τους μαθηματικούς περιορισμούς, για το σύνολο του ορίζοντα ελέγχου. Η επίλυση γίνεται βήμα προς βήμα, μετασχηματίζοντας το πρόβλημα σε ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού, ο χειρισμός του οποίου γίνεται με αναλυτικές τεχνικές (μέθοδος simplex). Μετά το πέρας της διαδικασίας προσομοίωσης αποτιμάται η τιμή της στοχικής συνάρτησης, δηλαδή η επίδοση του συστήματος έναντι της συγκεκριμένης διαχειριστικής πολιτικής. Για την μεγιστοποίηση του εν λόγω μέτρου, εισάγεται μια εξωτερική διαδικασία βελτιστοποίησης, σε κάθε δοκιμή της οποίας ορίζονται νέες τιμές παραμέτρων, και επαναλαμβάνεται η προσομοίωση. Η διαδικασία σταματά όταν επέλθει σύγκλιση στην βέλτιστη λύση. Επειδή το μοντέλο βελτιστοποίησης είναι έντονα μη γραμμικό, αντιμετωπίζεται με εξειδικευμένες υπολογιστικές μεθόδους (εξελικτικούς αλγορίθμους).

**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 περιορισμών και την στοχαστική πρόγνωση όλων των μεταβλητών απόκρισης του υδροσυστήματος (απολήψεις, παροχές υδραγωγείων, αντλήσεις, κλπ.).

**Βήμα 6ο:** Τα αποτελέσματα της βέλτιστης λύσης αξιοποιούνται για την λήψη αποφάσεων, είτε σε επίπεδο στρατηγικού σχεδιασμού είτε σε κλίμακα επιχειρησιακής διαχείρισης. Εφόσον κρίνεται αναγκαίο, η διαδικασία επαναλαμβάνεται τροποποιώντας τόσο τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου όσο και τα κριτήρια βελτιστοποίησης.

Επιχειρώντας μια σύγκριση μεταξύ της παραπάνω μεθοδολογίας και των τυπικών, μη παραμετρικών προσεγγίσεων των εδαφίων 2.4.2 και 2.4.3, επισημαίνουμε 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, δηλαδή 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 συστήματος.

Η υλοποίηση του παραπάνω μεθοδολογικού πλαισίου στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, καθώς και όλες οι συνιστώσες του μαθηματικού του υποβάθρου, αναπτύσσονται με πλήρη λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 4.

## 3 Επισκόπηση εργαλείων διαχείρισης υδατικών πόρων

### 3.1 Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων

#### 3.1.1 Γενικά

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

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

Επιχειρώντας να δώσουμε έναν πιο εξειδικευμένο ορισμό, μπορούμε να διακρίνουμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά ενός ΣΥΑ (Κουτσογιάννης και Ευστρατιάδης, 2004):

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

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

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

## 5. Ανάλυση δράσεων.

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

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

### 3.1.2 Εφαρμογή στη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων

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

- Διαχείριση λιμνών και ταμιευτήρων (για την εξυπηρέτηση στόχων υδροδότησης, παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, ελέγχου ρύπανσης)·
- Έλεγχος πλημμυρών και διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου (σε λεκάνες ποταμών αλλά και αστικές λεκάνες)·
- Διαχείριση υδροφορέων - συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων πόρων·
- Διαχείριση συστημάτων διανομής νερού (δίκτυα ανοιχτών και κλειστών αγωγών, αντλιοστάσια, κλπ.)·
- Έλεγχος βλαβών ή διαρροών σε δίκτυα ύδρευσης·

- Έλεγχος ρύπανσης σε λεκάνες απορροής και Δέλτα ποταμών·
- Διαχείριση μη σημειακών πηγών ρύπανσης σε γεωργικές περιοχές.

Από τα παραπάνω, η έρευνα εστιάζεται στη διαχείριση υδροσυστημάτων μεγάλης κλίμακας, που περιλαμβάνουν μεγάλα υδραυλικά έργα συλλογής, αξιοποίησης και μεταφοράς νερού (ταμιευτήρες, υδροηλεκτρικοί σταθμοί, γεωτρήσεις, υδραγωγεία, αντλιοστάσια), τα οποία μπορούν να εκτείνονται σε περισσότερες από μία λεκάνες απορροής. Εκτός των τεχνικών έργων, στα εν λόγω υδροσυστήματα περιλαμβάνονται ακόμη το φυσικό περιβάλλον και τα σχετιζόμενα οικοσυστήματα.

Για τη διαχείριση τέτοιων μεγάλης κλίμακας υδροσυστημάτων έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικά πακέτα, τα οποία αποτελούν εμπορικά, συνήθως, προϊόντα και χρησιμοποιούνται ως ΣΥΑ μετά από προσαρμογή στο υπό μελέτη υδροσύστημα. Τα εν λόγω πακέτα έχουν αναπτυχθεί και συντηρούνται από εξειδικευμένα ερευνητικά κέντρα (όπως είναι στην Ευρώπη η Delft Hydraulics στην Ολλανδία, η Danish Hydraulic Institute στη Δανία και η HR Wallingford στη Μεγάλη Βρετανία). Οι εν λόγω οργανισμοί προωθούν τα προϊόντα τους σε όλο τον κόσμο, παρέχοντας παράλληλα υπηρεσίες συμβούλου σε έργα σχετικά με την αξιοποίηση και διαχείριση των υδατικών πόρων. Ωστόσο, σε πολλά από τα προϊόντα αυτά προτιμάται η χρήση απλουστευμένων μοντέλων που απευθύνονται σε μη καταρτισμένους χρήστες (π.χ. στελέχη των τοπικών φορέων διαχείρισης).

Από την άλλη πλευρά, στα πανεπιστήμια αναπτύσσονται πιο πλήρη, από πλευράς θεωρητικού υποβάθρου, μαθηματικά μοντέλα διαχείρισης υδατικών πόρων, πλην όμως η εφαρμογή τους είναι συνήθως ακαδημαϊκού ή πιλοτικού χαρακτήρα, χωρίς να δίνεται έμφαση στο επιχειρησιακό σκέλος (γενικότητα, φιλικότητα περιβάλλοντος, συμβατότητα με άλλες εφαρμογές). Η παρατήρηση αυτή αποτέλεσε ένα από τα κεντρικά σημεία στη φιλοσοφία ανάπτυξης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, δίνοντας έμφαση τόσο στη μεθοδολογική πληρότητα του μαθηματικού υποβάθρου του μοντέλου όσο και στη λειτουργικότητά του, ως πακέτου λογισμικού.

## **3.2 Διερεύνηση διεθνώς καταξιωμένων μοντέλων**

### **3.2.1 Στόχοι της έρευνας αγοράς**

Μια σημαντική συνιστώσα του σχεδιασμού των υπολογιστικών συστημάτων ήταν η έρευνα αγοράς, που είχε δύο κύριους στόχους. Ο πρώτος ήταν να επισημάνει τα πλεονεκτήματα των εμπορικών πακέτων, που τα έχουν καταξιώσει στη συνείδηση τόσο της επιστημονικής κοινότητας όσο και του τεχνικού κόσμου, με συνέπεια να έχει εξαπλωθεί η χρήση τους σε ένα πολύ μεγάλο φάσμα εφαρμογών σε πολλές περιοχές του κόσμου. Στα πλαίσια αυτά, ήταν επιθυμητό να καταγραφούν τα μεθοδολογικά αλλά και λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, ώστε η ανάπτυξη του τελικού προϊόντος να είναι συμβατή με τις απαιτήσεις αλλά και συνήθειες της αγοράς.

Από την άλλη πλευρά, με δεδομένο ότι το προϊόν αυτό προσδοκείται να αξιοποιηθεί εμπορικά, οφείλει να παρέχει ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα. Συνεπώς, ο δεύτερος από τους στόχους της έρευνας ήταν να αναδείξει τις ελλείψεις ή δυσαρμονίες που υπάρχουν, με δεδομένο ότι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, παρατηρείται μια διαφορετική φιλοσοφία μεταξύ των εταιρειών ερευνητικών κέντρων που προωθούν τα λογισμικά και των πανεπιστημιακών ιδρυμάτων που αναπτύσσουν τα μαθηματικά μοντέλα.

Στη συνέχεια συνοψίζονται τα αποτελέσματα της έρευνας που αφορά σε τέσσερα γνωστά πακέτα διαχείρισης υδατικών πόρων, τα οποία έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί σε μελέτες υδροσυστημάτων σε όλο τον κόσμο.

### 3.2.2 Το μοντέλο MIKE BASIN

Το μοντέλο MIKE BASIN (<http://www.dhigroup.com/Software/WaterResources/MIKEBASIN.aspx>) υποστηρίζεται από τη Δανέζικη εταιρεία DHI Software, η οποία δραστηριοποιείται στην ανάπτυξη εφαρμογών λογισμικού σε όλο το φάσμα των προβλημάτων υδατικών πόρων και περιβάλλοντος. Το πρόγραμμα αξιοποιεί τις δυνατότητες του ArcGIS, σε συνδυασμό με υδρολογικά μοντέλα, για την παροχή διαχειριστικών λύσεων στην κλίμακα λεκάνης απορροής. Η φιλοσοφία του μοντέλου είναι πολύ απλή, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη χωρική και χρονική οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Οι προσομοιώσεις γίνονται πάνω σε ένα σχήμα δικτύου, του οποίου οι κλάδοι αναπαριστούν τμήματα ποταμών, ενώ οι κόμβοι αναπαριστούν θέσεις συμβολής, εκτροπής, ταμιευτήρες και χρήστες νερού. Το MIKE BASIN θεωρεί, συνήθως, μόνιμες συνθήκες, οπότε λειτουργεί αποκλειστικά με εξισώσεις συνέχειας. Ωστόσο, στην περίπτωση μεγάλων ποταμών επιτρέπει και τη χρήση μοντέλων διόδευσης (Muskingum, μοντέλο γραμμικού ταμιευτήρα).

Η βασική υδρολογική μονάδα είναι η λεκάνη απορροής, στην οποία δημιουργείται η απορροή που εισέρχεται στο δίκτυο. Η τελευταία υπολογίζεται με τους ακόλουθους τρόπους:

- εισάγοντας ιστορικές χρονοσειρές·
- εισάγοντας επίκαιρες τιμές από παρατηρήσεις σε πραγματικό χρόνο·
- εφαρμόζοντας ένα υδρολογικό μοντέλο, και συγκεκριμένα το εννοιολογικό σχήμα NAM.

Εκτός των επιφανειακών πόρων, το μοντέλο αναπαριστά, σε μια αδρή προσέγγιση, τη λειτουργία του υδροφορέα, ορίζοντας εννοιολογικές υπόγειες δεξαμενές νερού. Οι εν λόγω δεξαμενές αλληλεπιδρούν με το υδρογραφικό δίκτυο με τους ακόλουθους τρόπους:

- τροφοδοσία υδροφορέα από διηθήσεις ποταμών·
- τροφοδοσία υδροφορέα από κατεΐσδυση λεκανών·
- εκροή υπόγειου νερού προς τα κατάντη ποτάμια.

Αν και οι δύο πρώτες συνιστώσες μπορούν να δοθούν από το χρήστη, ενώ η τελευταία υπολογίζεται από το μοντέλο, θεωρώντας έναν εννοιολογικό ταμιευτήρα με δυνατότητα ταχείας και βραδείας απόκρισης. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να μελετηθούν συνδυασμένες χρήσεις επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, και να διερευνηθούν οι επιπτώσεις των αντλήσεων.

Το MIKE BASIN προσομοιώνει μια πληθώρα χρήσεων νερού, υιοθετώντας απλές διαχειριστικές προσεγγίσεις. Στην περίπτωση που υπάρχει έλλειμμα για την ικανοποίηση της συνολικής ζήτησης, οπότε προκύπτει σύγκρουση ως προς την κατανομή των απολήψεων, το μοντέλο τροφοδοτεί τους χρήστες κατά προτεραιότητα. Εναλλακτικά, χρησιμοποιεί κανόνες διαχείρισης των απολήψεων, που ορίζονται από τον χρήστη με τη βοήθεια μακροεντολών σε γλώσσα Visual Basic. Μάλιστα, με χρήση του ενσωματωμένου επιλυτή (solver) του Excel, παρέχεται η δυνατότητα βελτιστοποίησης των εν λόγω κανόνων, ως προς ένα ευρύ φάσμα κριτηρίων.

Όσον αφορά στην προσομοίωση των ταμιευτήρων, αυτή βασίζεται σε κανόνες λειτουργίας για μεμονωμένους ταμιευτήρες ή για ταμιευτήρες που λειτουργούν συνδυαστικά. Οι κανόνες ορίζουν επιθυμητά αποθέματα, στάθμες και απολήψεις σε κάθε χρονικό βήμα, ως συνάρτηση των επίκαιρων αποθεμάτων, της εποχής του έτους, της ζήτησης και, πιθανόν, των προβλεπόμενων εισροών. Σε ξηρές περιόδους, οι εκροές μπορούν να μειωθούν με χρήση ενός συντελεστή (reduction factor), που διαφοροποιείται ανάλογα με τη στάθμη. Το πλήθος των συντελεστών και οι αντίστοιχες τιμές της στάθμης ορίζονται για κάθε κατάντη χρήστη νερού. Στην περίπτωση ταμιευτήρων που λειτουργούν συνδυαστικά, ορίζονται πιο σύνθετοι κανόνες διαχείρισης, η μαθηματική διατύπωση των οποίων γίνεται σε γλώσσα Visual Basic.

### 3.2.3 Το μοντέλο RIBASIM

Το RIBASIM (River Basin Simulation Model· <http://www.wldelft.nl/soft/ribasim/int/index.html>) της εταιρείας Delft Hydraulics είναι ένα υπολογιστικό πακέτο για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των λεκανών απορροής κάτω από διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες. Πρόκειται για ένα εύχρηστο εργαλείο, που επιτρέπει τη σύνδεση των υδρολογικών εισόδων νερού σε διάφορες θέσεις με της διάφορες καταναλώσεις νερού, με σκοπό την εκτίμηση και αξιολόγηση των μέτρων που σχετίζονται με της υποδομές και τον τρόπο διαχείρισης και λειτουργίας του συστήματος. Το θεωρητικό υπόβαθρο έχει αναπτυχθεί στο Πανεπιστήμιο του Delft στην Ολλανδία, ενώ ως εμπορικό λογισμικό έχει βρει εφαρμογή εδώ και περισσότερο από 20 χρόνια σε πληθώρα μελετών υδατικών πόρων, σε ολόκληρο τον κόσμο.

Το RIBASIM συνδέεται με το λογισμικό HYMOS της ίδιας εταιρείας, που υποστηρίζει μια βάση δεδομένων και μια πλατφόρμα υδρολογικών μοντέλων, όπως το SACRAMENTO. Η ανάλυση των ποιοτικών χαρακτηριστικών γίνεται με το μοντέλο DELWAQ .

Το RIBASIM χρησιμοποιεί οποιοδήποτε χρονικό βήμα προσομοίωσης, και έχει σχεδιαστεί για αναλύσεις όπου απαιτείται ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου σε λεκάνες απορροής. Το μοντέλο παράγει πρότυπα διανομής του νερού και παρέχει τη βάση για λεπτομερή ανάλυση της ποιότητας του νερού και των φερτών σε τμήματα ποταμών και ταμιευτήρες, εξετάζοντας την πηγή προέλευσης κάθε υδατικού πόρου. Κατά την προετοιμασία των υδατικών ισοζυγίων, λαμβάνονται ακόμα υπόψη η αποστράγγιση από τη γεωργία, οι εκροές των βιομηχανιών και η κατάντη επαναχρησιμοποίηση του νερού. Παρέχοντας κάθε πληροφορία σχετικά με την διαθεσιμότητα νερού καθώς και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής, επιτρέπει στον χρήστη να αξιολογήσει μια σειρά μέτρων που σχετίζονται με τις υποδομές, τη λειτουργική διαχείριση και τη διαχείριση της ζήτησης, καθώς και την ποσότητα και ποιότητα του νερού. Τελικά, το μοντέλο παράγει ένα πλήθος παραμέτρων επίδοσης της λεκάνης για την αποτίμηση των προσομοιώσεων.

Η παραγωγή πρωτεύουσας υδροηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να τεθεί ως στόχος προσομοίωσης σε μεμονωμένη μονάδα παραγωγής, με συνδεδεμένο ταμιευτήρα. Η ζητούμενη ενέργεια παράγεται σε κάθε χρονικό βήμα, εφόσον υπάρχει επαρκές απόθεμα στον ταμιευτήρα. Σε μονάδες παραγωγής χωρίς αποθηκευτική ικανότητα (πάνω σε υδατορεύματα) δεν τίθεται στόχος παραγωγής ενέργειας. Μετά το πέρας της προσομοίωσης, στη μετα-επεξεργασία των δεδομένων, το σύστημα POWERIB υπολογίζει για δεδομένη αξιοπιστία, που δίνεται ως ποσοστό του χρόνου με κάλυψη του στόχου παραγωγής ενέργειας ως προς τη συνολική διάρκεια προσομοίωσης: (α) την παραγόμενη πρωτεύουσα ενέργεια, (β) το οικονομικό όφελος, (γ) την πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ενέργεια σε κάθε χρονικό βήμα, και (δ) τον αριθμό των αστοχιών κάλυψης σε πρωτεύουσα ενέργεια.

Μια πρόσφατη εφαρμογή του RIBASIM είναι η χρήση του μοντέλου σε συνδυασμό με μια συνιστώσα διόδευσης, στα πλαίσια ενός συστήματος προειδοποίησης πλημμυρών (Flood Early Warning System). Στο πρόγραμμα διατίθενται διάφορες υδραυλικές μέθοδοι, όπως η εξίσωση του Manning, δεδομένες σχέσεις στάθμης-παροχής, η μέθοδος Muskingum δύο επιπέδων, η μέθοδος Puls καθώς και η μη γραμμική μέθοδος Laurensen. Η διόδευση της ροής πραγματοποιείται σε ημερήσια βάση, ξεκινώντας από οποιοδήποτε χρονικό σημείο και για οποιοδήποτε χρονικό ορίζοντα.

### 3.2.4 Το μοντέλο WEAP

Το WEAP (<http://www.weap21.org/>) είναι από τα πλέον διαδεδομένα διαχειριστικά εργαλεία, που έχει εφαρμοστεί σε μελέτες υδατικών πόρων στις ΗΠΑ, το Μεξικό, την Κίνα, την Κεντρική Ασία, την Αφρική, την Αίγυπτο, το Ισραήλ και την Ινδία. Η εμπορική του προώθηση γίνεται από το Stockholm Environment Institute (SEI), στη θεωρητική του ανάπτυξη έχει βοηθήσει το Hydrologic Engineering

Center του US Army Corps of Engineers, ενώ έχει υποστηριχθεί οικονομικά από φορείς όπως τα Ηνωμένα Έθνη και η Διεθνής Τράπεζα.

Η σύλληψη του μοντέλου είναι πολύ απλή, ώστε να είναι κατανοητή από μη εξειδικευμένους χρήστες. Αρχικά, με τη βοήθεια εργαλείων συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας, δημιουργείται ένα σενάριο αναφοράς (reference scenario/current accounts) πάνω στο οποίο βασίζονται υποθετικά (what if-) σενάρια. Όλα τα σενάρια ξεκινούν από την ίδια χρονική στιγμή και μπορούν να διαφοροποιηθούν σε μια σειρά από δεδομένα εισόδου. Τα σενάρια έχουν σχέση κληρονομικότητας μεταξύ τους, που ξεκινά από το σενάριο αναφοράς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα: (α) μόνο οι διαφορές από το γονέα-σενάριο καταγράφονται στη βάση δεδομένων, (β) αλλαγές στο σενάριο αναφοράς να τροποποιούν και όλα τα μεταγενέστερα της ίδιας οικογένειας, και (γ) τα αποτελέσματα των σεναρίων μπορούν να επισκοπηθούν κατ' αντιπαράβολή.

Όλα τα δεδομένα εισόδου ενός σεναρίου, εκτός από το σχήμα του μοντέλου οργανώνονται σε μια δένδροειδή ιεραρχική δομή. Επιλέγοντας κλάδους και φύλλα του δένδρου, ο χρήστης μπορεί να επισκοπήσει και να τροποποιήσει τη συγκεκριμένη κατηγορία δεδομένων. Βασικοί κλάδοι του δένδρου είναι οι ακόλουθοι:

- κύριες και δευτερεύουσες υποθέσεις·
- ζήτηση νερού·
- υδρολογία·
- προσφορά και πόροι·
- περιβάλλον.

Το WEAP επιτρέπει τρεις διαφορετικές μεθόδους ορισμού υδρολογικών δεδομένων:

- καθορισμός τυπικών ετήσιων υδρολογικών χρονοσειρών και της σειράς εμφάνισής τους·
- εισαγωγή των τιμών από αρχείο·
- χρήση μαθηματικής έκφρασης (σταθερή τιμή, ποσοστό άλλης χρονοσειράς, κλπ.).

Οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούνται στις θέσεις όπου απαιτούνται υδρολογικά δεδομένα (απορροές σε ταμιευτήρες, παροχές υδατορεμάτων, εισροές σε υπόγειους υδροφορείς).

Το σύστημα παρέχει μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τον τομέα κατανάλωσης νερού (αστικός οικισμός, αγροτικός οικισμός, βιομηχανική κατανάλωση, αγροτική κατανάλωση) και τα μοντέλα που χρησιμοποιεί: αναλυτικά μοντέλα όταν υπάρχουν λεπτομερή στοιχεία (έως τον τελικό χρήστη ή συσκευή) και αδρομερή μοντέλα όταν υπάρχει έλλειψη αυτών. Για κάθε χρήστη νερού μπορούν να οριστούν προτιμήσεις (προτεραιότητες) στην κατανάλωση από συγκεκριμένους υδατικούς πόρους, για τη συνολική ζήτηση ή για κάποιο ποσοστό της.

Οι υπόγειοι υδροφορείς αντιμετωπίζονται ως μια δεξαμενή με συγκεκριμένη χωρητικότητα, αρχικό απόθεμα και αντλητική ικανότητα. Οι εισροές καθορίζονται από τον χρήστη με μεθόδους όπως και τα υδρολογικά δεδομένα. Η χωρητικότητα των ταμιευτήρων χωρίζεται σε τέσσερις ζώνες: (α) μη ενεργή ζώνη, (β) εφεδρική ζώνη, (γ) ζώνη συντήρησης, (δ) ζώνη ελέγχου πλημμυρών. Όταν το απόθεμα βρίσκεται στην εφεδρική ζώνη τότε μόνο ένα ποσοστό του αποθέματος. Γενικά, το χρονικό βήμα προσομοίωσης φαίνεται να είναι ο μήνας (και μόνο).

Η μηνιαία παραγωγή ενέργειας υπολογίζεται συναρτήσει του διερχόμενου από τους όγκου από τους στροβίλους, του ύψους πτώσης, ενός ενεργειακού συντελεστή και της απόδοσης της εγκατάστασης. Η τιμή του ύψους πτώσης υπολογίζεται από τον μέσο όρο του ύψους πτώσης στην αρχή και στο τέλος του μήνα. Δεν τίθεται στόχος παραγωγής ενέργειας, ούτε γίνεται διάκριση μεταξύ πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας.

Για το υπολογισμό του λειτουργικού κόστους του συστήματος, χρησιμοποιείται ένα πολύ απλό μοντέλο. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται το κόστος μεταφοράς νερού από τους πόρους στην κατανάλωση με βάση το γινόμενο μεταφερόμενου όγκου και μοναδιαίου κόστους της διαδρομής. Το μοναδιαίο κόστος ορίζεται για κάθε συνδυασμό υδατικού πόρου και σημείου κατανάλωσης. Το αθροιστικό κόστος μπορεί να υπολογιστεί ανά πόρο ή ανά σημείο κατανάλωσης.

Στα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνονται:

- ζήτηση στους πόρους και στην κατανάλωση για κάθε κόμβο κατανάλωσης·
- κάλυψη σε νερό, έλλειμμα νερού και ποσοστό κάλυψης για κάθε κόμβο κατανάλωσης·
- κόστος νερού ανά πόρο ή ανά κόμβο κατανάλωσης·
- ισοζύγιο κόμβων·
- εισοδοι και εξοδοι από μια περιοχή·
- διακύμανση παροχής υδατορέματος και ποσοστό κάλυψης ζήτησης ελάχιστης παροχής·
- διακύμανση στάθμης, ισοζύγιο και απώλειες υπόγειων υδροφορέων·
- διακύμανση στάθμης, ισοζύγιο ταμιευτήρων·
- ενέργεια που παράχθηκε από υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις·
- εξάτμιση και διαρροή σε κλάδους του δικτύου·
- δημιουργία και μεταφορά ρύπανσης·

Όλα τα αποτελέσματα δίνονται σε μορφή πίνακα και γραφήματος. Υπάρχει ευελιξία στην επιλογή των διαστάσεων του γραφήματος, όπως π.χ. στα αποτελέσματα κάλυψης σε νερό οι επιλογές είναι έτη, σενάρια, κόμβοι ζήτησης και υδατικός πόρος. Επιλεγμένα γραφήματα μπορούν να αποθηκευτούν σε σχετικό κατάλογο για εύκολη ανάκτηση. Ακόμη, υπάρχει η δυνατότητα αντιγραφής του πίνακα των αποτελεσμάτων στο clipboard και εξαγωγής του σε μορφή Excel.

### 3.2.5 Το μοντέλο MODSIM

Το MODSIM είναι ένα γενικευμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων διαχειριστικών και μοντέλο ροής λεκανών απορροής, που έχει αναπτυχθεί στο Colorado State University. Για την συνδυασμένη ανάλυση επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων συνδέεται με το μοντέλο MODRSP, που είναι παραλλαγή του MODFLOW, ενώ για την προσομοίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού, λειτουργεί σε συνδυασμό με το μοντέλο QUAL2E, που πραγματοποιεί μονοδιάστατη ανάλυση σε ποταμούς. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα συνεργασίας του συστήματος με πλατφόρμα GIS, για τη διαχείριση της χωρικής πληροφορίας.

Το MODSIM υποστηρίζει ένα από τα πληρέστερα μαθηματικά υπόβαθρα, σε σύγκριση με τα κοινά εμπορικά πακέτα, έχοντας μάλιστα τύχει αρκετών δημοσιεύσεων (Graham *et al.*, 1986· Fredericks *et al.*, 1998· Dai and Labadie, 2001). Η κύρια ιδέα βασίζεται σε ένα σχήμα δικτυακού προγραμματισμού, που έχει αρκετά κοινά σημεία με το σχήμα προσομοίωσης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. Στα χαρακτηριστικά του μοντέλου αναφέρονται:

- λειτουργία σε μηνιαίο, εβδομαδιαίο ή ημερήσιο βήμα, με κατάλληλη προετοιμασία των δεδομένων εισόδου·
- ενσωμάτωση σύνθετων θεσμικών και νομικών απαιτήσεων που σχετίζονται με την διαχείριση του νερού·
- προσομοίωση σύνθετων πολιτικών λειτουργίας·
- οι κανόνες λειτουργίας δεν καθορίζονται εκ των προτέρων, αλλά προκύπτουν με βάση τα στοιχεία εισόδου του μοντέλου·
- δεν υπάρχει περιορισμός ως προς την τοπολογία του δικτύου (ακτινωτό ή βροχωτό)·
- οι περιορισμοί του συστήματος μεταβάλλονται χρονικά·



- οι υδρολογικές απώλειες (εξάτμιση, διαρροές αγωγών, διαφυγές ταμιευτήρων) υπολογίζονται με ακρίβεια, συναρτήσει των μέσων τιμών παροχής και αποθήκευσης·
- στην περίπτωση ημερήσιας λειτουργίας, ενσωματώνονται συναρτήσεις διόδευσης·
- το μοντέλο προσομοίωσης διαμορφώνεται ως ένα πρόβλημα δικτυακού προγραμματισμού, που επιλύεται με μια ειδική μέθοδο χαλάρωσης·
- η παραγωγή ενέργειας υπολογίζεται συναρτήσει των χαρακτηριστικών των υδροηλεκτρικών μονάδων (βαθμός απόδοσης, παροχή, ύψος πτώσης), ενώ γίνεται διαχωρισμός σε ενέργεια αιχμής/μη αιχμής και πρωτεύουσα/δευτερεύουσα.

Ορισμένα ενδιαφέροντα μεθοδολογικά χαρακτηριστικά του μοντέλου προσομοίωσης είναι:

- στο μοντέλο δικτυακού προγραμματισμού εισάγονται ορισμένοι συγκεντρωτικοί (accounting) εικονικοί κόμβοι, και συγκεκριμένα: (α) ένας συγκεντρωτικός κόμβος εισροών, όπου αθροίζονται τα τρέχοντα αποθέματα των ταμιευτήρων και οι υδρολογικές εισροές, (β) ένας συγκεντρωτικός κόμβος υπόγειων νερών, όπου καταλήγουν οι διαφυγές των ταμιευτήρων, οι διαρροές των υδραγωγείων, οι διηθήσεις των υδατορευμάτων και οι προς επαναφόρτιση ποσότητες νερού, και από τον οποίο πραγματοποιούνται οι συνολικές αντλήσεις, (γ) ένας συγκεντρωτικός κόμβος ζήτησης, όπου αθροίζονται οι καταναλώσεις νερού, (δ) ένας συγκεντρωτικός κόμβος αποθεμάτων, (ε) ένας συγκεντρωτικός κόμβος υπερχειλίσεων, και (στ) ένας τελικός κόμβος διατήρησης της μάζας·
- οι διαρροές των υδραγωγείων (στις οποίες περιλαμβάνονται και οι διηθήσεις) υπολογίζονται με βάση μια απλή επαναληπτική διαδικασία, ώστε να διατηρείται ο δικτυακός χαρακτήρας του μοντέλου·
- η εξάτμιση από ταμιευτήρα, που είναι συνάρτηση της (άγνωστης) μέσης μηνιαίας επιφανείας του, υπολογίζεται επίσης με βάση μια επαναληπτική διαδικασία (παρόμοιος είναι ο υπολογισμός των υπόγειων διαφυγών, αλλά και του ύψους πτώσης, που είναι συνάρτηση της μέσης στάθμης)·
- τα εικονικά κόστη στους κλάδους ορίζονται με μια συνάρτηση της μορφής  $c = a + \beta x$ , όπου  $x$  η σειρά προτεραιότητας του συγκεκριμένου στόχου (που μπορεί να μεταβάλλεται χρονικά) και  $a, \beta$  σταθεροί συντελεστές ( $a = -50000, \beta = 10$ )·
- για την συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων νερών, εφαρμόζεται η μέθοδος discrete kernel, βάσει της οποίας οι αποκρίσεις του υδροφορέα υπολογίζονται μέσω αναλυτικών σχέσεων (γραμμικές εξισώσεις με σταθερούς συντελεστές απόκρισης), που έχουν προκύψει με εφαρμογή αναλυτικών μοντέλων, τύπου MODFLOW·
- η λογική της εφαρμογής επαναληπτικών διαδικασιών με τεχνικές χαλάρωσης εφαρμόζεται και στις περιπτώσεις σύζευξης του μοντέλου με το μοντέλο υπόγειων νερών και το μοντέλο ποιότητας·
- το μοντέλο δεν πραγματοποιεί βελτιστοποίηση, ενώ η λειτουργία του συστήματος ορίζεται με βάση: (α) τα αποθέματα-στόχους των ταμιευτήρων, και (β) τη σειρά προτεραιότητας των στόχων.

Στην πραγματικότητα, δεν πρόκειται για εμπορικό πακέτο αλλά για πανεπιστημιακό προϊόν, που έχει εφαρμοστεί κυρίως στις ΗΠΑ, από δημόσιους φορείς (U.S. Bureau of Reclamation, City of Ft. Collins, City of Greeley, City of Colorado Springs, Imperial Irrigation District), καθώς και σε μελέτες στην Αίγυπτο και τη Βραζιλία. Οι ρουτίνες του λογισμικού είναι ελεύθερα διαθέσιμες στο Διαδίκτυο, στη διεύθυνση: <http://modsim.engr.colostate.edu/>.

### 3.3 Ιστορικό των ΣΥΑ που αναπτύχθηκαν στο ΕΜΠ

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ έχουν γίνει μείζονες προσπάθειες για την ανάπτυξη ΣΥΑ για τη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων, και ειδικότερα των συστημάτων μεγάλης κλίμακας που εκτείνονται σε περισσότερες των μία υδρολογικές λεκάνες

και εξυπηρετούν πολλαπλές χρήσεις (Κουτσογιάννης και Ευστρατιάδης, 2003). Στη συνέχεια περιγράφεται η εμπειρία από την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων, που αξιοποιήθηκε και, εν μέρει, εντάχθηκε στο κεντρικό διαχειριστικό εργαλείο του υπολογιστικού συστήματος.

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

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

Στα πλαίσια της τρίτης φάσης του ίδιου έργου (1996-1999), έγινε γενίκευση του μοντέλου διαχείρισης, με ανάπτυξη ενός υπολογιστικού πακέτου γενικού σκοπού, υποστηριζόμενου από μια σχεσιακή βάση δεδομένων. Πρόκειται για την πρώτη έκδοση λογισμικού με την ονομασία ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, την οποία ακολούθησαν αρκετές βελτιώσεις, μέχρι την παραγωγή του εμπορικού προϊόντος στα πλαίσια του παρόντος έργου. Το μοντέλο αυτό διέθετε δυνατότητες προσαρμογής σε συστήματα ταμιευτήρων οποιασδήποτε τοπολογίας, χειριζόμενο διάφορες χρήσεις νερού καθώς και περιορισμούς αστοχίας. Επιπλέον, παρείχε τη δυνατότητα βελτιστοποίησης όχι μόνο της ασφαλούς απόληψης αλλά και της παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας, μέσω παραμετροποίησης της λειτουργίας των Υ/Η μονάδων. Το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια δύο πιλοτικών εφαρμογών: (α) στο υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας, αποτελούμενο από 4 ταμιευτήρες (Καραβοκυρός κ.ά., 1999), και (β) στο σύστημα ταμιευτήρων Αχελώου-Θεσσαλίας και των συναφών έργων εκτροπής, αποτελούμενο από 7 ταμιευτήρες και 7 μονάδες παραγωγής ενέργειας (Ευστρατιάδης και Ζερβός, 1999).

Ακολούθησαν επόμενες εκδόσεις του λογισμικού ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας». Σκοπός του ήταν η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου ΣΥΑ, προσανατολισμένου στην επιχειρησιακή διαχείριση του συστήματος υδροδότησης της Αθήνας (Κουτσογιάννης *et al.*, 2002-2003). Το έργο ανατέθηκε και εκπονήθηκε σε συνεργασία με την Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης της Αθήνας (ΕΥΔΑΠ), που είναι και ο φορέας-χρήστης του. Σε αυτό εντάσσονται, εκτός από τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (εκδόσεις 2 και 3· Καραβοκυρός κ.ά., 2004) που αποτελεί το κεντρικό διαχειριστικό εργαλείο, μετρητικά δίκτυα στις λεκάνες απορροής, εργαλεία διαχείρισης γεωγραφικών και υδρολογικών πληροφοριών αλλά και τηλεμετρικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, μοντέλα στοχαστικής πρόγνωσης των εισροών των ταμιευτήρων και μοντέλα αναπαράστασης του υδρολογικού κύκλου των λεκανών Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης. Επιπλέον, η έκδοση 2 του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, που δεν είχε επιχειρησιακό προσανατολισμό, χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια ακαδημαϊκής εργασίας, για την προσομοίωση των υδατικών χρήσεων στη Θεσσαλία (Πέππας, 2001). Από το 2000, το υπολογιστικό αυτό σύστημα χρησιμοποιείται για τη στρατηγική διαχείριση των

υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, τον ετήσιο προγραμματισμό των απολήψεων και την κατάρτιση του προϋπολογισμού, σε ότι αφορά την προβλεπόμενη κατανάλωση ενέργειας στα αντλιοστάσια και τις γεωτρήσεις. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των ειδικών συνθηκών που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια των Ολυμπιακών Αγώνων του 2004.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι όλες οι παραπάνω απόπειρες ήταν εστιασμένες στην επίλυση μεμονωμένων προβλημάτων, στις οποίες αντιμετωπίστηκαν οι συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες των υπό μελέτη συστημάτων. Επιπλέον, η ανάπτυξη των μοντέλων και των συναφών λογισμικών καθορίστηκαν σε σημαντικό βαθμό από τις απαιτήσεις των φορέων που ανέθεσαν τα ερευνητικά έργα, και δεν υπήρξε η ουσιαστική δυνατότητα ελέγχου τους σε άλλα υδροσυστήματα. Ωστόσο, η εμπειρία που αποκτήθηκε, καθώς και η διεθνής αποδοχή των μεθοδολογιών με την παραγωγή σειράς δημοσιεύσεων σε καταξιωμένα περιοδικά και συνέδρια, συνέβαλαν ουσιαστικά στην εμφανή βελτίωση πολλαπλών πτυχών του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, καθιστώντας τον προσαρμόσιμο σε πολύ ευρύτερο φάσμα προβλημάτων, όπως τεκμηριώνεται από την επιτυχή εφαρμογή του στις δύο πιλοτικές περιοχές. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφεται αναλυτικά το θεωρητικό πλαίσιο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, ενώ για τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του παραπέμπουμε στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος.

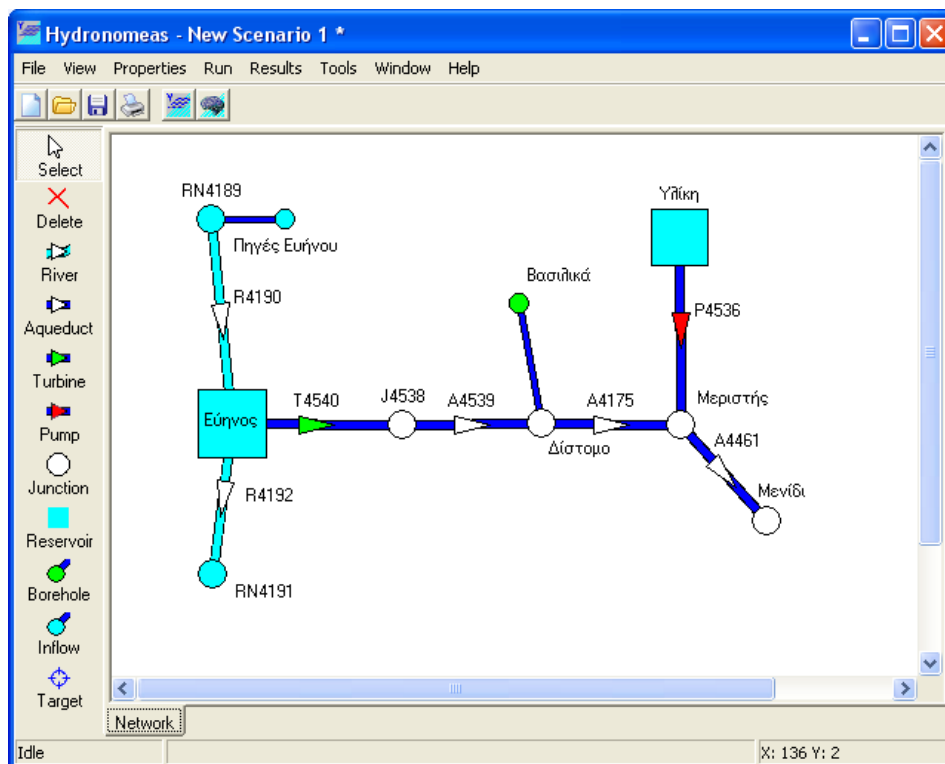
## 4 Το μαθηματικό μοντέλο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ

### 4.1 Γενικές αρχές

Ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ είναι ένα εξελιγμένο μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης συστημάτων υδατικών πόρων, που αποτελεί την κεντρική εφαρμογή του υπολογιστικού συστήματος. Η φιλοσοφία ανάπτυξης του μαθηματικού του υποβάθρου βασίστηκε σε ένα πλαίσιο αρχών, για τις οποίες έγινε μια πρώτη μνεία στην εισαγωγική ενότητα 1.2. Στη συνέχεια, εξηγούνται οι πτυχές του εν λόγω πλαισίου, σε σύγκριση μάλιστα με τις υφιστάμενες βιβλιογραφικές προσεγγίσεις.

#### 4.1.1 Ευελιξία ως προς την σχηματοποίηση

Η έννοια της σχηματοποίησης συζητήθηκε στο εδάφιο 2.2.2 και θεωρείται κομβική συνιστώσα της όλης προσέγγισης. Στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, παρέχεται η δυνατότητα περιγραφής όλων των σημαντικών φυσικών και τεχνητών συνιστωσών ενός υδροσυστήματος, χωρίς περιορισμούς στην κλίμακα των έργων και τη γενική τους διάταξη. Με τη βοήθεια κατάλληλων γραφικών εργαλείων (Σχήμα 4.1), ο χρήστης μπορεί να διαμορφώσει δίκτυα υδατικών πόρων οσοδήποτε σύνθετης τοπολογίας, που περιλαμβάνουν πολλαπλά σημεία προσφοράς και ζήτησης νερού και πολλαπλές διαδρομές μεταφοράς. Χαρακτηριστικό είναι ότι τα χαρακτηριστικά των τεχνικών έργων και, βεβαίως, οι στόχοι και περιορισμοί, μπορούν να μεταβάλλονται διαχρονικά, επιτρέποντας έτσι τη διερεύνηση των επιπτώσεων από αλλαγές που οφείλονται στην προσθήκη νέων, την ενίσχυση των υφιστάμενων ή την προσωρινή παύση λειτουργίας ορισμένων έργων, λόγω συντήρησης ή βλάβης.



Σχήμα 4.1: Γραφικό περιβάλλον εργασίας για τη σχηματοποίηση συστημάτων υδατικών πόρων.

#### **4.1.2 Ρεαλιστική αναπαράσταση λειτουργιών υδροσυστήματος**

Το μαθηματικό μοντέλο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ αποσκοπεί σε μια ρεαλιστική αναπαράσταση τόσο των φυσικών (υδρολογικών και υδραυλικών) διεργασιών των υδροσυστημάτων όσο και των πρακτικών διαχείρισης σε αυτά. Όπως εξηγείται στην ενότητα 4.5, το μοντέλο προσομοίωσης είναι διατυπωμένο με τρόπο ώστε να εξασφαλίζει την αυστηρή τήρηση των φυσικών περιορισμών και την ιεραρχική τήρηση των στόχων και λειτουργικών περιορισμών, σε αρμονία με τη διαχειριστική πολιτική που επιλέγεται και τη σειρά προτεραιότητας που ορίζει ο χρήστης. Επιπλέον, η κατανομή των απολήψεων στο δίκτυο ακολουθεί την οικονομικότερη διαδρομή, ελαχιστοποιώντας τα πάγια και μεταβλητά κόστη των έργων σύλληψης και μεταφοράς (υδραγωγεία, αντλιοστάσια, γεωτρήσεις), όπως εξάλλου συμβαίνει στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Μάλιστα, όλα τα παραπάνω επιτυγχάνονται χωρίς υπερσύνθετη περιγραφή των διεργασιών, χωρίς υπερπληθείς και ασαφείς παραμέτρους και χωρίς υπερβολικές απαιτήσεις σε δεδομένα. Έχει δοθεί προσοχή ώστε τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα να μη διαφέρουν από τα αντίστοιχα των συναφών μοντέλων, όπως αυτών που αναλύθηκαν στην ενότητα 3.2.

Στην πράξη, ακόμα και ο μη έμπειρος χρήστης μπορεί να κατανοήσει τις πτυχές του μοντέλου που ενδιαφέρουν στη διαχείριση, χωρίς να απαιτείται εμβάθυνση στις εξειδικευμένες υπολογιστικές διαδικασίες στοχαστικής ανάλυσης και βελτιστοποίησης. Στην κατεύθυνση αυτή, το πρόγραμμα παρέχει μια σημαντική και ιδιαίτερα πρωτότυπη δυνατότητα, που είναι η δυναμική παρακολούθηση της προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να ελέγξει τις διαδικασίες του μοντέλου, να πειστεί για τις δυνατότητές του και να εντοπίσει τυχόν σφάλματα στα δεδομένα και, γενικά, τις παραδοχές της σχηματοποίησης.

#### **4.1.3 Ολιστική προσέγγιση**

Η ολιστική προσέγγιση αναφέρεται στην ενσωμάτωση όλων των πτυχών της σύγχρονης αντίληψης περί διαχείρισης των υδατικών πόρων (τεχνικών, οικονομικών, ενεργειακών, περιβαλλοντικών). Στην κατεύθυνση αυτή, ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ παρέχει μια πληθώρα επιλογών σχετικά με χρήσεις νερού και λειτουργικούς περιορισμούς, που εισάγονται στις συνιστώσες του υδροσυστήματος (βλ. 4.3.1). Οι χρήσεις αναφέρονται στην κατανάλωση νερού για ύδρευση και άρδευσης και την παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας αιχμής, ενώ οι περιορισμοί αναφέρονται σε επιθυμητά όρια διακύμανσης των αποθεμάτων των ταμιευτήρων και των παροχών των υδραγωγείων, αλλά και σε πολιτικές διαχείρισης των υπερχειλίσεων. Εκτός αυτών, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη στοιχεία κόστους-οφέλους, καθώς και δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, που σε συνδυασμό με τις προτεραιότητες των χρήσεων και περιορισμών, εντοπίζουν την πλέον πρόσφορη πολιτική λειτουργίας, ως προς διάφορα κριτήρια ελέγχου.

#### **4.1.4 Πρακτικότητα κανόνων διαχείρισης**

Στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, παρέχεται η δυνατότητα εισαγωγής βαθμών ελευθερίας στο μαθηματικό μοντέλο του υδροσυστήματος, με τη θεώρηση μιας πληθώρας πτυχών της διαχείρισης ως άγνωστες παραμέτρους προς βελτιστοποίηση. Οι πτυχές αυτές αναφέρονται σε γενικούς κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων (βλ. 4.4.2) και γεωτρήσεων (βλ. 4.4.5), που έχουν καθορισμένη δομή, καθώς και σε λειτουργικούς περιορισμούς με άγνωστες τιμές ορίων, που εισάγονται ως επιπλέον συνιστώσες της διαχειριστικής πολιτικής. Υπενθυμίζεται ότι οι κανόνες αυτοί έχουν διαχρονική ισχύ (εκτός αν υπάρχουν αλλαγές στο υδροσύστημα, οπότε εύλογα πρέπει να αναθεωρηθούν), ώστε η εφαρμογή τους να εγγυάται βιώσιμη αξιοποίηση των διαθέσιμων υδατικών πόρων.

Έχει καταβληθεί ιδιαίτερη προσπάθεια ώστε το σύνολο των διαχειριστικών κανόνων και λοιπών δεσμεύσεων να είναι εύληπτοι για τον μη εξειδικευμένο χρήστη, ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν

για την επιχειρησιακή λειτουργία του συστήματος, δηλαδή τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι παραμετρικοί κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων, που απεικονίζονται ως νομογραφήματα, η ερμηνεία των οποίων είναι εξαιρετικά απλή. Από την άλλη πλευρά, οι τιμές των παραμέτρων δεν έχουν φυσικό νόημα, ενώ και η παραγωγή των γραφημάτων προϋποθέτει μια ιδιαίτερα σύνθετη υπολογιστική διαδικασία, που δεν ενδιαφέρει τον χρήστη.

#### **4.1.5 Ποσοτικοποίηση αβεβαιότητας και ρίσκου**

Η στοχαστική θεώρηση σε όλες τις πτυχές του μαθηματικού μοντέλου του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ αποτελεί ένα από τα ισχυρότερα πλεονεκτήματά του, ιδιαίτερα αν λάβει κανείς υπόψη τις πολύ πιο απλοϊκές προσεγγίσεις συναφών υπολογιστικών πακέτων. Πράγματι, σε αντίθεση με τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ όπου η χρήση συνθετικών δειγμάτων εισροών επιτρέπει την πιθανοτική εκτίμηση του συνόλου των αποκρίσεων του μοντέλου προσομοίωσης (χρονοσειρές αποθεμάτων, απολήψεων, παροχών, κόστους, παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, κλπ.), πολλά από τα γνωστά μοντέλα βασίζονται σε παρωχημένες διερευνήσεις τύπου μέσου, ξηρού και υγρού υδρολογικού σεναρίου, μη παρέχοντας καμία δυνατότητα εκτίμησης του ρίσκου στη λήψη των αποφάσεων.

Στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, ο ορισμός του ρίσκου (ή της αξιοπιστίας) διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο της προσομοίωσης (βλ. 2.3.3). Στην προσομοίωση μόνιμης κατάστασης, στην οποία οι συνθήκες του υδροσυστήματος θεωρούνται αμετάβλητες, προκύπτει μία και μοναδική εκτίμηση του μακροχρόνιου ρίσκου. Τέτοιες προσεγγίσεις ενδείκνυνται για μελέτες σχεδιασμού έργων ή στρατηγικής διαχείρισης, όπου ζητείται η εκτίμηση ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών του υδροσυστήματος (π.χ. ασφαλής απόληψη, μέσο κόστος), που επιτυγχάνεται με συγκεκριμένο επίπεδο αξιοπιστίας ή, αντίστροφα, η αξιοπιστία που επιτυγχάνεται για συγκεκριμένες τιμές των εν λόγω μεγεθών.

Από την άλλη πλευρά, στην καταληκτική προσομοίωση, που συνήθως έχει χρονικό ορίζοντα λίγων ετών και στην οποία θεωρούνται μεταβλητές συνθήκες του υδροσυστήματος (π.χ. μεταβλητή ζήτηση, αλλαγές στα χαρακτηριστικά των έργων, κλπ.), το μοντέλο εκτιμά την βήμα-προς-βήμα διακύμανση της αστοχίας, ενώ έχει τη δυνατότητα παραγωγής αντίστοιχων εμπειρικών στατιστικών κατανομών για κάθε απόκριση του συστήματος και κάθε χρονικό βήμα. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται πολλαπλά σενάρια υδρολογικών εισροών, που αποτελούν ισοπίθανες εκτιμήτριες της εξέλιξης των αντίστοιχων μεταβλητών, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες του πρόσφατου παρελθόντος. Για κάθε υδρολογικό σενάριο αντιστοιχεί ένα σενάριο αποκρίσεων, ενώ το σύνολο των τιμών που παράγονται για μια συγκεκριμένη απόκριση σε ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα (π.χ. το απόθεμα ενός ταμιευτήρα στο μήνα  $t$ ) αποτελεί ένα συνθετικό δείγμα του μοντέλου, που επιδέχεται τυπική στατιστική ανάλυση. Η τελευταία περιλαμβάνει την εκτίμηση μεγεθών όπως η μέση πρόγνωση, η τυπική της απόκλιση, τα όρια εμπιστοσύνης, η τιμή που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης, κλπ. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης μπορεί να εκτιμήσει πολύ πιο σφαιρικά τις διαχρονικές επιπτώσεις μιας διαχειριστικής πολιτικής. Επισημαίνεται ότι λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα της όλης προσέγγισης, τα όρια εμπιστοσύνης των εκτιμήσεων είναι πολύ πιο στενά στο βραχυχρόνια ορίζοντα, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην επιχειρησιακή λειτουργία ενός συστήματος υδατικών πόρων.

#### **4.1.6 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση**

Ένα ακόμη ισχυρό πλεονέκτημα του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, που εμφανώς επίσης τον διαφοροποιεί από τα άλλα εμπορικά πακέτα, είναι η εισαγωγή της έννοιας της βελτιστοποίησης, σε διάφορες κλίμακες του μοντέλου και με χρήση πολλαπλών κριτηρίων. Συγκεκριμένα:

Στην κλίμακα του χρονικού βήματος, το μοντέλο βελτιστοποιεί το συνολικό κόστος μεταφοράς νερού στο δίκτυο (κόστος λειτουργίας υδραγωγείων, γεωτρήσεων και αντλιοστασίων), τηρώντας αυστηρά του φυσικούς περιορισμούς (εξισώσεις συνέχειας, περιορισμοί χωρητικότητας, κλπ.), επιδιώκοντας να

ικανοποιήσει τους επίκαιρους στόχους και λειτουργικούς περιορισμούς, με την προκαθορισμένη σειρά προτεραιότητας, και ταυτόχρονα να αποκλίνει όσο το δυνατό λιγότερο από τα επιθυμητά μεγέθη εκροών που επιβάλλουν οι δεδομένοι κανόνες λειτουργίας. Αποδεικνύεται ότι τα παραπάνω κριτήρια μπορούν να ενταχθούν σε ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού, που με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων εξασφαλίζει πλήρη ακρίβεια αλλά και μεγάλη ταχύτητα στους υπολογισμούς (βλ. 4.5.9).

Από την άλλη πλευρά, οι παράμετροι των κανόνων λειτουργίας του υδροσυστήματος εκτιμώνται μέσω μιας διαδικασίας μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ως προς ένα καθολικό μέτρο επίδοσης που περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα κριτηρίων. Τα κριτήρια ορίζονται από τον χρήστη και περιλαμβάνουν όρους αξιοπιστίας, οικονομικά και ενεργειακά μεγέθη και μεγέθη απολήψεων, που προκύπτουν από στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης (βλ. 4.6.3).

Με τον τρόπο αυτό, στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ υλοποιείται ένα εξαιρετικά πρωτότυπο σχήμα δύο επιπέδων βελτιστοποίησης, μιας εξωτερικής, που είναι μη γραμμική ως προς τις παραμέτρους των κανόνων λειτουργίας, και μιας εσωτερικής, που είναι γραμμική ως προς τις βήμα-προς-βήμα αποφάσεις που αφορούν στην κατανομή των εκροών στο υδροσύστημα.

#### **4.1.7 Περιορισμός υπολογιστικού φόρτου**

Είναι προφανές ότι ο συνδυασμός της στοχαστικής προσέγγισης, που επιβάλλει τη χρήση συνθετικών δειγμάτων πολύ μεγαλύτερου μήκους σε σχέση με τις ιστορικές χρονοσειρές, και του σχήματος βελτιστοποίησης δύο επιπέδων δημιουργεί, αναγκαστικά, μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους. Για τον λόγο αυτό, έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στον περιορισμό του περιττού φόρτου, με την υιοθέτηση φειδωλής παραμετροποίησης και τη χρήση εξελιγμένων αλγορίθμων.

Όπως αναφέρθηκε και στο εδάφιο 2.4.2, τα μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης πάσχουν από την κατάρρα της διαστατικότητας, που σημαίνει ότι η ακρίβεια και ταχύτητα προσέγγισης της ολικά βέλτιστης λύσης είναι εκθετικά εξαρτώμενη από τον αριθμό των μεταβλητών ελέγχου. Για το λόγο αυτό, είναι εξαιρετικά σημαντικός ο περιορισμός των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος, που στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ επιτυγχάνεται με την χρήση κανόνων λειτουργίας που, ενώ παρέχουν μια πληθώρα εναλλακτικών επιλογών ως προς τις δυνατότητες διαχείρισης του συστήματος, εισάγουν ελάχιστες άγνωστες παραμέτρους στο πρόβλημα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των ταμιευτήρων, που είναι και οι πλέον σύνθετες συνιστώσες ενός συστήματος υδατικών πόρων, αρκεί μία και μόνο παράμετρος για να περιγράψει μια πληθώρα πολιτικών διαχείρισης των αποθεμάτων τους.

Επειδή ο αριθμός των παραμέτρων εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των διατάξεων ελέγχου (π.χ. ταμιευτήρες, γεωτρήσεις) και όχι από το μήκος της προσομοίωσης, ο στοχαστική προσέγγιση δεν επηρεάζει την πολυπλοκότητα του προβλήματος εξωτερικής βελτιστοποίησης. Το εν λόγω πρόβλημα αντιμετωπίζεται με εξελιγμένες υπολογιστικές τεχνικές, που εγγυώνται τον εντοπισμό πρόσφορων λύσεων, με λογικό υπολογιστικό φόρτο (βλ. 4.6.4).

Όσον αφορά στο γραμμικό μοντέλο εσωτερικής βελτιστοποίησης, επιβάλλεται η επίλυσή του τόσες φορές όσες το πλήθος των χρονικών βημάτων που προσομοιώνονται. Η πολυπλοκότητα του εν λόγω προβλήματος σχετίζεται με το πλήθος των μεταβλητών απόφασης του υδροσυστήματος (εκροές και κατανομή τους στο δίκτυο) και το πλήθος των φυσικών και λειτουργικών περιορισμών. Συνεπώς, ο φόρτος της προσομοίωσης είναι ευθέως ανάλογος του πλήθους των υδρολογικών σεναρίων και του χρονικού ορίζοντα ελέγχου, ενώ επηρεάζεται και από το μέγεθος του υδροσυστήματος. Αναπόφευκτα λοιπόν, η στοχαστική προσέγγιση επιβαρύνει σημαντικά την ταχύτητα των υπολογισμών. Από την άλλη πλευρά, με τη χρήση ειδικών τεχνικών γραμμικού προγραμματισμού, την οποία επιτρέπει η ιδιαίτερη μαθηματική δομή του μοντέλου, επιταχύνεται σημαντικά η διαδικασία επίλυσης (βλ. 4.5.9). Με τον τρόπο αυτό, ο συνολικός φόρτος του πλήρους σχήματος προσομοίωσης και βελτιστοποίησης δεν θεωρείται απαγορευτικός, ακόμη και για μεγάλης κλίμακας συστήματα.

## 4.2 Συνιστώσες υδροσυστήματος

### 4.2.1 Γενικά

Σε αρμονία με τις απαιτήσεις του μοντέλου, ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ έχει τη δυνατότητα περιγραφής υδροσυστημάτων. Οι συνιστώσες που υποστηρίζει το πρόγραμμα και υλοποιήθηκαν στο μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε είναι:

- *κόμβοι*, που είναι στοιχεία χωρίς αποθηκευτική ικανότητα και αντιστοιχούν σε σημεία ζήτησης νερού ή αλλαγής της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών μεγεθών του δικτύου·
- *κόμβοι εισροής*, που είναι ειδικοί τύποι κόμβων με δεδομένη προσφορά νερού·
- *ταμιευτήρες*, που είναι ειδικοί τύποι κόμβων, με δυνατότητα αποθήκευσης επιφανειακών υδατικών πόρων·
- *γεωτρήσεις*, που είναι ειδικοί τύποι κόμβων, με δυνατότητα άντλησης νερού από υπόγειους υδροφορείς·
- *υδατορεύματα*, που είναι φυσικοί αγωγοί μεταφοράς νερού, χωρίς περιορισμό παροχευτικότητας·
- *υδραγωγεία*, που είναι τεχνητοί αγωγοί νερού, πεπερασμένης παροχευτικότητας·
- *στρόβιλοι*, που είναι ειδικοί τύποι υδραγωγείων, κατά μήκος των οποίων παράγεται ενέργεια·
- *αντλιοστάσια*, που είναι ειδικοί τύποι υδραγωγείων, κατά μήκος των οποίων καταναλώνεται ενέργεια.

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

### 4.2.2 Κόμβοι

Ω *κόμβος* είναι μια εννοιολογική οντότητα που αντιπροσωπεύει ένα σημείο αλλαγής της τοπολογίας ή των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του δικτύου, χωρίς δυνατότητα προσφοράς ή αποθήκευσης νερού. Έστω ο κόμβος  $i$ , στον οποίον συντρέχουν  $m$  στοιχεία μεταφοράς (υδατορεύματα, υδραγωγεία). Η εξίσωση δυναμικής σε κάθε χρονικό βήμα  $t$  γράφεται:

$$\sum_j [1 - \delta_{ji}(t)] q_{ji}(t) - \sum_j q_{ij}(t) - w_i(t) = 0 \quad (4.1)$$

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  $j \rightarrow i$  (συντελεστής διήθησης σε υδατορεύματα ή διαρροής σε υδραγωγεία),  $q_{ij}(t)$  ο όγκος νερού που εξέρχεται από τον κόμβο  $i$  με κατεύθυνση τον κατάντη κόμβο  $j$ , και  $w_i(t)$  η απόληψη 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.

Στους τελικούς κόμβους του δικτύου των υδραγωγείων ο χρήστης μπορεί να επιτρέψει ή όχι την κατάντη μεταφορά νερού. Στην πρώτη περίπτωση, το μοντέλο επιτρέπει την απεριόριστη μεταφορά νερού διαμέσου του συγκεκριμένου κόμβου, που θεωρείται απώλεια από το σύστημα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η μεταφορά νερού δεν μπορεί να ξεπεράσει τον στόχο ζήτησης στον κόμβο. Όσον αφορά στους τελικούς κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, εκεί προφανώς επιτρέπεται η απεριόριστη μεταφορά νερού κατάντη, η οποία καταγράφεται ως απώλεια από το σύστημα.

### 4.2.3 Κόμβοι εισροής

Ο κόμβος εισροής είναι ειδική οντότητα, που αναπαριστά τη σημειακή προσφορά επιφανειακού νερού στο σύστημα, που προέρχεται από την απορροή μιας ανάντη λεκάνης, την εκροή μιας πηγής, κλπ. Οι



τιμές της προσφοράς θεωρούνται γνωστές, και εισάγονται στο μοντέλο με την μορφή χρονοσειρών παροχής.

Οι κόμβοι εισροής συνδέονται αποκλειστικά με κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, κατά μήκος του οποίου δεν υπάρχουν περιορισμοί παροχεταιυτικότητας, ή με ταμειυτήρες. Αντίθετα, δεν επιτρέπεται η απευθείας σύνδεσή τους με το δίκτυο των υδραγωγιών, αφενός γιατί κάτι τέτοιο δεν έχει φυσικό νόημα και αφετέρου επειδή μπορεί να οδηγήσει σε μη εφικτή λύση του μοντέλου, στην περίπτωση που μια τιμή εισροής ξεπερνά την κατάντη παροχεταιυτικότητα του δικτύου.

#### 4.2.4 Ταμειυτήρες

Ο ταμειυτήρας αντιπροσωπεύει ένα τεχνικό έργο αποθήκευσης επιφανειακών υδατικών πόρων, που οφείλει να έχει επαρκή χωρητικότητα, ώστε να επιτυγχάνεται ρύθμιση της ροής για χρονικό ορίζοντα μεγαλύτερο του μήνα, που είναι και η χρονική κλίμακα του μοντέλου προσομοίωσης.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός ταμειυτήρα 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,  $dv_i$ , και η αποθηκευτική ικανότητα,  $k_i$ , που προκύπτουν άμεσα από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} dv_i &= f_1(z_i^{\min}) \\ k_i &= f_1(z_i^{\max}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

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

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

$$s_i(t+1) = \max \{ \min [k_i, s_i(t) + i_i(t) - r_i(t)], 0 \} \quad (4.3)$$

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 ταμειυτήρα,  $p_i(t)$ , μείον την εξάτμιση,  $e_i(t)$ , και τις υπόγειες διαφυγές,  $l_i(t)$ , δηλαδή:

$$i_i(t) = q_i(t) + p_i(t) - e_i(t) - l_i(t) \quad (4.4)$$

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:

$$\begin{aligned} q_i(t) &= \tilde{q}_i(t) [a_i^* - a_i(t)] \\ p_i(t) &= \tilde{p}_i(t) a_i(t) \\ e_i(t) &= \tilde{e}_i(t) a_i(t) \end{aligned} \quad (4.5)$$

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  $a_i^*$  η συνολική έκταση της ανάντη του φράγματος υπολεκάνης.

Οι υπόγειες διαφυγές, οι οποίες περιλαμβάνουν τις πάσης φύσεως απώλειες νερού διαμέσου του πυθμένα, των πρανών και τους σώματος του φράγματος, θεωρούνται συνάρτηση της στάθμης του ταμιευτήρα στην αρχή του χρονικού βήματος,  $z_i(t)$ , και εκτιμώνται μέσω μιας πολυωνμικής εξίσωσης της μορφής:

$$l_i(t) = a_{it} z_i^3(t) + \beta_{it} z_i^2(t) + \gamma_{it} z_i(t) + \varepsilon_{it} + \zeta_i(t) \quad (4.6)$$

όπου  $a_{it}$ ,  $\beta_{it}$ ,  $\gamma_{it}$  και  $\varepsilon_{it}$  μηνιαίοι συντελεστές και  $\zeta_i(t)$  τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή, με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση  $\sigma_{it}$ . Ο τυχαίος όρος εισάγεται ώστε να προσομοιώσει την αβεβαιότητα εκτίμησης των υπόγειων διαφυγών, με ανάλυση ιστορικών δεδομένων στάθμης και διαφυγών. Ο δείκτης  $\tau$  που αναφέρεται στον επίκαιρο μήνα προκύπτει από την σχέση:

$$\tau = (t - 1) \bmod 12 + 1 \quad (4.7)$$

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

$$r_i(t) = w_i(t) - \sum_j [1 - \delta_{ji}(t)] q_{ji}(t) \quad (4.8)$$

Προφανώς, στην περίπτωση απλού κόμβου χωρίς αποθηκευτική ικανότητα, η καθαρή απόληψη είναι ίση με μηδέν (βλ. 4.2.2).

Στο μαθηματικό μοντέλο ενός ταμιευτήρα ισχύει ο περιορισμός αποθέματος:

$$0 \leq s_i(t) \leq k_i \quad (4.9)$$

Διατυπώνοντας την εξίσωση ισοζυγίου με την μορφή (4.3), 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 παροχτευτικότητας του δικτύου δεν μπορούν να διοχετευτούν κατάντη, προκύπτει πλεόνασμα αποθέματος που εκρέει ως υπερχειλίση  $sp_i(t)$ , δηλαδή:

$$sp_i(t) = \max \{0, s_i(t) + i_i(t) - r_i(t) - k_i\} \quad (4.10)$$

Στο μοντέλο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, παρέχεται η κατ' επιλογή δυνατότητα εκροής των υπερχειλίσεων σε κάποιο κατάντη κόμβο του υδρογραφικού δικτύου. Διαφορετικά, η υπερχειλίση θεωρείται απώλεια από το σύστημα, καθώς δεν διοχετεύεται στο δίκτυο ώστε να αξιοποιηθεί για την εξυπηρέτηση άλλων χρήσεων νερού.

#### 4.2.5 Γεωτρήσεις

Η *γεώτρηση* αναφέρεται σε μια εικονική συνιστώσα, που περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα έργα υδροληψίας από υπόγειους υδροφορείς. Στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, το αντικείμενο αυτό έχει την ίδια έννοια με την ομάδα γεωτρήσεων που χρησιμοποιεί το μοντέλο γεω-υδρολογικής προσομοίωσης

ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, στην οποία συναθροίζεται η αντλητική ικανότητα των μεμονωμένων γεωτρήσεων του πραγματικού κόσμου, για διαχειριστικούς σκοπούς (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006).

Κάθε γεώτρηση  $i$  συνδέεται με συγκεκριμένο κόμβο του δικτύου. Χαρακτηριστικό της μέγεθος είναι η δυναμικότητα  $g_i$ , η οποία είτε αντιστοιχεί στην πραγματική αντλητική ικανότητα του συστήματος είτε αποτελεί εικονικό μέγεθος, που εισάγεται ως εκτιμήτρια του διαθέσιμου υπόγειου δυναμικού. Για δεδομένη τιμή δυναμικότητας, εισάγεται ο περιορισμός που αφορά στις υπόγειες απολήψεις:

$$0 \leq w_i(t) \leq g_i \quad (4.11)$$

Άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος της γεώτρησης είναι η *ειδική ενέργεια*, που δίνεται σε kWh/m<sup>3</sup> και εκφράζει την κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την άντληση 1 m<sup>3</sup> από τον υδροφορέα.

#### 4.2.6 Υδατορεύματα

Το *υδατόρευμα* είναι συνιστώσα του φυσικού συστήματος, που ορίζεται ως τμήμα του υδρογραφικού δικτύου μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων  $i$  και  $j$ . Το υδατόρευμα μεταφέρει τις υδρολογικές εισροές των ανάντη υπολεκανών, και θεωρείται ότι δεν έχει περιορισμό παροχетеυτικότητας. Χαρακτηριστικό του μέγεθος είναι ο συντελεστής διήθησης,  $\delta_{ij} \leq 1$ , που θεωρείται σταθερός στον χρόνο και εκφράζει το ποσοστό της διερχόμενης παροχής που διαφεύγει κατακόρυφα, προς τον υπόγειο υδροφορέα.

#### 4.2.7 Υδραγωγεία

Το *υδραγωγείο* είναι 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 *παροχетеυτικότητα*,  $c_{ij}$ , που εκφράζεται σε μονάδες παροχής (m<sup>3</sup>/s). Η παροχетеυτικότητα είτε είναι σταθερή ή εξαρτάται από τη διαφορά ενεργειακού υψομέτρου,  $h_{ij}(t) = z_i(t) - z_j(t)$ , μεταξύ του ανάντη και κατάντη κόμβου. Προφανώς, το μέγεθος  $h_{ij}(t)$ , που καλείται ύψος πτώσης, μεταβάλλεται μόνο στην περίπτωση που ένας τουλάχιστον από τους κόμβους είναι ταμιευτήρας. Η σχέση μεταβολής της παροχетеυτικότητας περιγράφεται από μια καμπύλη  $\pi_{ij} = f_3(h_{ij})$ , που κατασκευάζεται με λογαριθμική παρεμβολή μεταξύ γνωστών ζευγών τιμών ( $h_{ij}$ ,  $\pi_{ij}$ ). Η παροχетеυτικότητα (ή, γενικότερα, η καμπύλη ύψους πτώσης-παροχής) μπορεί να μεταβάλλεται διαχρονικά, αποτυπώνοντας έτσι τυχόν αλλαγές στα χαρακτηριστικά του υδραγωγείου (π.χ. ενίσχυση διατομής).

Δύο χαρακτηριστικά αδιάστατα μεγέθη του υδραγωγείου είναι ο συντελεστής διαρροών,  $\delta_{ij}(t)$ , και ο συντελεστής χρονικής λειτουργίας,  $\psi_{ij}$ . Ο πρώτος θεωρείται μεταβλητός στον χρόνο και εκφράζει τις πάσης φύσεως γραμμικές απώλειες μεταξύ του ανάντη και κατάντη κόμβου, ενώ ο δεύτερος εκφράζει χρονικούς περιορισμούς στη χρήση του υδραγωγείου. Με βάση τα παραπάνω, η διερχόμενη παροχή σε κάθε χρονικό βήμα υπόκειται στον φυσικό περιορισμό:

$$0 \leq q_{ij}(t) \leq (1 - \psi_{ij}) c_{ij}(t) \quad (4.12)$$

Τελικά, εξαιτίας των διαρροών, στον κατάντη κόμβο καταλήγει παροχή  $[1 - \delta_{ij}(t)] q_{ij}(t)$ , ενώ η ποσότητα που διαφεύγει καταγράφεται ως απώλεια από το σύστημα.

#### 4.2.8 Στρόβιλοι

Ο *στρόβιλος* είναι ειδικός τύπος υδραγωγείου, με δυνατότητα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διέλευση παροχής από αυτό.

Η ποσότητα ενέργειας που παράγεται όταν ένας δεδομένος όγκος νερού  $V$  διέλθει από τους στροβίλους ενός σταθμού παραγωγής δίνεται από την εξίσωση:

$$E = \rho g V H_n \eta \quad (4.13)$$

όπου  $E$  η ενέργεια,  $\rho$  η πυκνότητα του νερού ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  η επιτάχυνση βαρύτητας,  $H_n$  το καθαρό ύψος πτώσης, το οποίο διατίθεται για μετατροπή σε ενέργεια, και  $\eta$  ο συντελεστής απόδοσης των στροβίλων (αδιάστατος αριθμός  $< 1$ ), ο οποίος εξαρτάται από λειτουργικά χαρακτηριστικά των τελευταίων. Αν όλα τα μεγέθη του δεύτερου μέλους της εξίσωσης εισαχθούν σε μονάδες του SI, τότε η ενέργεια προκύπτει σε J ( $1 \text{ J} = 1 \text{ W}\cdot\text{s}$ , άρα  $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \text{ MJ}$ ). Το καθαρό ύψος πτώσης είναι:

$$H_n = H - h_f - h_k \quad (4.14)$$

όπου  $H$  το ολικό (ή γεωμετρικό) ύψος πτώσης, ίσο με τη διαφορά της στάθμης νερού στα σημεία υδροληψίας και εξαγωγής,  $h_f$  είναι οι γραμμικές απώλειες κατά μήκος των αγωγών και  $h_k$  οι αντίστοιχες τοπικές απώλειες. Για δεδομένα χαρακτηριστικά αγωγού οι απώλειες είναι συνάρτηση της παροχής. Παρόλο που η λειτουργία των στροβίλων επιτρέπει, καταρχήν, ένα μεγάλο φάσμα παροχών για ένα δεδομένο ύψος πτώσης  $H_n$ , λόγοι λειτουργικοί και οικονομικοί οδηγούν συνήθως σε μονοσήμαντη σχέση παροχής-ύψους. Με αυτή την προϋπόθεση, σε δεδομένο ολικό ύψος πτώσης αντιστοιχεί μία τιμή της παροχής και του καθαρού ύψους πτώσης, οπότε από τις καμπύλες του στροβίλου προκύπτει μία τιμή του συντελεστή απόδοσης. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η σχέση υπολογισμού σε κάθε στρόβιλο ( $i, j$ ) γράφεται:

$$E_{ij} = \psi_{ij} V_{ij} H_{ij} \quad (4.15)$$

όπου  $E_{ij}$  η ενέργεια σε GWh,  $V_{ij}$  ο διερχόμενος όγκος νερού σε  $\text{hm}^3$ ,  $H_{ij}$  το ολικό ύψος πτώσης σε hm, και  $\psi_{ij}$  η ειδική ενέργεια (δηλαδή η ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα ύψους πτώσης), η οποία εκφράζεται σε  $\text{GWh/hm}^4$  και δίνεται από τη σχέση:

$$\psi = 0.2725 \eta \frac{H_n}{H} \quad (4.16)$$

Κάτω από τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν, η ειδική ενέργεια είναι συνάρτηση του ολικού ύψους πτώσης  $H$  και έχει μέγιστη δυνατή τιμή  $0.2725 \text{ GWh/hm}^4$ . Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε συντελεστή απόδοσης 1 και σε μηδενικές γραμμικές και τοπικές απώλειες, οπότε  $H_n = H$ .

Μετά τα παραπάνω, γίνεται καταφανές ότι η μαθηματική περιγραφή των στροβίλων στο μοντέλο προσομοίωσης γίνεται μέσω των συναρτήσεων  $\psi(H)$ . Οι συναρτήσεις αυτές περιγράφονται από ακολουθίες συντεταγμένων  $(H_i, \psi_i)$  μέσω των οποίων είναι δυνατή η εκτίμηση της ειδικής ενέργειας για οποιοδήποτε ύψος πτώσης, χρησιμοποιώντας λογαριθμική παρεμβολή.

Επισημαίνεται ότι ο ακριβής προσδιορισμός των συντεταγμένων  $(H_i, \psi_i)$  προϋποθέτει αναλυτικούς υδραυλικούς υπολογισμούς, όπου υπεισέρχονται τόσο τα χαρακτηριστικά του αγωγού μεταφοράς, όσο και οι χαρακτηριστικές καμπύλες των στροβίλων. Στο μοντέλο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, το ολικό ύψος πτώσης  $H_{ij}$  προσδιορίζεται ως η διαφορά του υψομέτρου του ανάντη και του κατάντη κόμβου. Τα υψόμετρα είναι σταθερά, εφόσον ο στρόβιλος συνδέεται με κόμβους ή μεταβλητά, εφόσον συνδέεται με έναν τουλάχιστο ταμιευτήρα, οπότε το ενεργειακό διαθέσιμο εξαρτάται από την επίκαιρη στάθμη του. Στην περίπτωση αυτή, η εκτίμηση του μεταβλητού ύψους πτώσης γίνεται κατά προσέγγιση, λαμβάνοντας τη γνωστή στάθμη στην αρχή του χρονικού βήματος.

Χαρακτηριστικό μέγεθος του στροβίλου είναι η εγκατεστημένη ισχύς,  $PI_{ij}$ , που δίνεται σε MW και εκφράζει το θεωρητικό άνω όριο της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί, με βάση τη σχέση:

$$E_{ij} \leq \lambda PI_{ij} \quad (4.17)$$

όπου  $\lambda$  συντελεστής αναγωγής, οι διαστάσεις του οποίου εξαρτώνται από τη χρονική κλίμακα στην οποία αναφέρεται η παραγόμενη ενέργεια.

## 4.2.9 Αντλιοστάσια

Το *αντλιοστάσιο* είναι ειδικός τύπος υδραγωγείου, στο οποίο η μεταφορά νερού πραγματοποιείται με κατανάλωση ενέργειας.

Για την περίπτωση άντλησης, η εξίσωση που δίνει την ενέργεια που καταναλώνεται για την ανύψωση όγκου  $V$  σε μανομετρικό ύψος  $H_n$  είναι παρόμοια με την περίπτωση των στροβίλων, με τη διαφορά ότι ο συντελεστής απόδοσης είναι στον παρονομαστή:

$$E = \rho g V H_n / \eta \quad (4.18)$$

Το μανομετρικό ύψος είναι αντίστοιχα:

$$H_n = H + h_f + h_k \quad (4.19)$$

Η ειδική ενέργεια  $\psi$ , σε  $\text{GWh/hm}^4$ , δίνεται από τη σχέση:

$$\psi = 0.2725 \eta \frac{H}{H_n} \quad (4.20)$$

και έχει ελάχιστη δυνατή τιμή  $0.2725 \text{ GWh/hm}^4$ . Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε συντελεστή απόδοσης 1 και σε μηδενικές γραμμικές και τοπικές απώλειες, οπότε  $H_n = H$ .

Τονίζεται ότι, σε αντίθεση με τα κοινά υδραγωγεία, η μεταφορά νερού μέσω των στροβίλων και αντλιοστασίων γίνεται χωρίς διαρροές.

## 4.3 Δεδομένα εισόδου

### 4.3.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη υδροσυστήματος

Ξεκινώντας μια νέα εφαρμογή, ο χρήστης διαμορφώνει μια σχηματοποίηση του υδροσυστήματος, επιλέγοντας τις συνιστώσες του δικτύου και τον τρόπο σύνδεσης αυτών, δηλαδή τοπολογία. Στη συνέχεια, καλείται να ορίσει μια πρώτη κατηγορία δεδομένων, που είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη του υδροσυστήματος ή αλλιώς, οι σταθερές ιδιότητες του δικτύου. Συγκεκριμένα:

- για κάθε *κόμβο* ορίζεται το απόλυτο υψόμετρο και, εφόσον που πρόκειται για τελικό κόμβο του δικτύου υδραγωγείων, η δυνατότητα μεταφοράς της πλεονάζουσας παροχής κατάντη, εκτός του υδροσυστήματος·
- για κάθε *κόμβο εισροής* ορίζεται ο κόμβος του υδρογραφικού δικτύου ή ο ταμιευτήρας με τον οποίο συνδέεται·
- για κάθε *ταμιευτήρα* ορίζονται η έκταση της ανάντη υπολεκάνης, οι σχέσεις στάθμης-αποθέματος, στάθμης-επιφάνειας και στάθμης-διαφυγών, οι στάθμες υδροληψίας και υπερχειλίσης, ο κόμβος στον οποίο εκρέουν οι υπερχειλίσεις και η στάθμη στην αρχή της προσομοίωσης, που είναι και η μοναδική αρχική συνθήκη του μοντέλου·
- για κάθε *γεώτρηση* ορίζονται ο κόμβος τον οποίο τροφοδοτεί, η μηνιαία δυναμικότητα και η ειδική ενέργεια·
- για κάθε *υδατόρευμα* ορίζεται ένας σταθερός συντελεστής διήθησης·
- για κάθε *υδραγωγείο* ορίζονται οι συντελεστές διαρροών και χρονικής λειτουργίας, η σταθερή ή μεταβλητή παροχетеυτικότητα, και στην τελευταία περίπτωση η σχέση ύψους πτώσης-παροχής·
- για κάθε *στρόβιλο* ορίζονται οι σχέσεις ύψους πτώσης-ειδικής ενέργειας και ύψους πτώσης-παροχής και η εγκατεστημένη ισχύς·
- για κάθε *αντλιοστάσιο* ορίζεται οι σχέσεις ύψους πτώσης-ειδικής ενέργειας και ύψους πτώσης-παροχής·

Υπενθυμίζεται ότι ορισμένες από τις παραπάνω ιδιότητες, και συγκεκριμένα οι παροχευετικότητες και συντελεστές διαρροών των υδραγωγείων, καθώς και οι σχέσεις υπολογισμού της παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας σε στροβίλους και αντλιοστάσια, αντίστοιχα, μπορούν να μεταβάλλονται διαχρονικά. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να διερευνηθούν οι επιπτώσεις αλλαγών ή έκτακτων περιστατικών στο υφιστάμενο δίκτυο διανομής υδατικών πόρων, κάτι που εξάλλου αποτελεί βασική λειτουργική απαίτηση του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (βλ. 1.2). Για παράδειγμα, μια βλάβη σε υδραγωγείο, η οποία επιβάλει προσωρινή διακοπή της λειτουργίας του, μπορεί να αποτυπωθεί στο μοντέλο με τη θεώρηση μηδενικής παροχευετικότητας για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

#### 4.3.2 Υδρολογικά σενάρια

Οι υδρολογικές μεταβλητές του υδροσυστήματος δίνονται με τη μορφή χρονοσειρών, που αποτελούν τα δυναμικά δεδομένα εισόδου των ταμιευτήρων και των κόμβων εισροής.

Οι χρονοσειρές των ταμιευτήρων είναι τριών ειδών:

- χρονοσειρές απορροής·
- χρονοσειρές βροχόπτωσης·
- χρονοσειρές εξάτμισης·

Η απορροή αναφέρεται στη φυσική εισροή νερού που προέρχεται από την υπολεκάνη ανάντη του φράγματος, ενώ η βροχόπτωση και η εξάτμιση θεωρείται ότι πραγματοποιούνται στην επιφάνεια του ταμιευτήρα. Όλες οι τιμές των παραπάνω χρονοσειρών δίνονται σε μονάδες ισοδύναμου ύψους νερού (υποχρεωτικά σε mm). Αντίθετα, οι χρονοσειρές στους κόμβους εισροής δίνονται απευθείας σε μονάδες παροχής ( $m^3/s$ ).

Οι χρονοσειρές του μοντέλου μπορεί να είναι ιστορικές ή συνθετικές, που σημαίνει ότι παράγονται μέσω κάποιου στοχαστικού μοντέλου. Ως γνωστό, τα μοντέλα γέννησης συνθετικών χρονοσειρών επιτρέπουν την διατήρηση των στατιστικών συσχετίσεων μεταξύ των αντίστοιχων υδρολογικών διεργασιών, έτσι ώστε η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών να είναι ρεαλιστική και συμβατή με τις πραγματικές συνθήκες του συστήματος (βλ. 2.3.1). Χρονοσειρές που παράγονται μέσω μιας τέτοιας συστηματικής διαδικασίας ομαδοποιούνται σε υδρολογικά σενάρια. Συνεπώς, το υδρολογικό σενάριο αναφέρεται σε ένα σύνολο συνθετικών χρονοσειρών, που είναι στατιστικά συνεπείς μεταξύ τους. Προφανώς, οι χρονοσειρές που ανήκουν σε ένα υδρολογικό σενάριο έχουν κοινή ημερομηνία έναρξης και κοινό μήκος.

Η παραγωγή και διαχείριση των υδρολογικών σεναρίων του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ γίνεται εξειδικευμένα εργαλεία, που παρέχονται από τα λογισμικά ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ και ΚΑΣΤΑΛΙΑ, ενώ η δομή τους διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο της προσομοίωσης (βλ. 2.3.3). Στην προσομοίωση μόνιμης κατάστασης, το σενάριο περιλαμβάνει μια μοναδική χρονοσειρά για κάθε υδρολογική μεταβλητή, που κατά κανόνα έχει πολύ μεγάλο μήκος, της τάξης των εκατοντάδων ή χιλιάδων ετών. Από την άλλη πλευρά, στην προσομοίωση μόνιμης κατάστασης, κάθε σενάριο περιλαμβάνει ένα πλήθος ενοτήτων (της τάξης των δεκάδων ή εκατοντάδων), που αντιστοιχούν σε διαφορετικές στοχαστικές προγνώσεις της εκάστοτε μεταβλητής, για σχετικά μικρό χρονικό ορίζοντα (μηνών ή ετών). Κάθε ενότητα ξεκινά από τις ίδιες συνθήκες διαθεσιμότητας νερού, δηλαδή την ίδια αρχική στάθμη των ταμιευτήρων.

#### 4.3.3 Στόχοι και λειτουργικοί περιορισμοί

Στις συνιστώσες του υδροσυστήματος, ο χρήστης μπορεί να ορίσει *στόχους*, δηλαδή χρήσεις νερού, και *λειτουργικούς περιορισμούς*, με τη μορφή επιθυμητών όριων σε μεταβλητές, από τις ακόλουθες κατηγορίες:

- επιθυμητή απόληψη νερού για άρδευση, ύδρευση ή άλλη χρήση, που αναφέρεται σε κόμβο ή ταμιευτήρα, και συμβολίζεται με  $d_i(t)$ .
- αποφυγή απωλειών νερού λόγω υπερχειλίσης, που αναφέρεται σε ταμιευτήρα.
- διατήρηση του αποθέματος ταμιευτήρα μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης επιθυμητής τιμής, που συμβολίζονται με  $s_i^{\min}(t)$  και  $s_i^{\max}(t)$ , αντίστοιχα, και για τα οποία ισχύει η ανισότητα:

$$dv_i < s_i^{\min}(t) < s_i^{\max}(t) < k_i \quad (4.21)$$

- διατήρηση παροχής μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης επιθυμητής τιμής, που αναφέρονται σε υδραγωγείο ή υδατόρευμα, και συμβολίζονται με  $q_{ij}^{\min}(t)$  και  $q_{ij}^{\max}(t)$ , αντίστοιχα.
- παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας σε στροβίλο, που συμβολίζεται με  $E_{ij}^*(t)$ .

Σε κάθε στόχο ορίζεται ένα επίπεδο προτεραιότητας, από 1 έως 10. Δύο ή περισσότεροι στόχοι μπορούν να ενταχθούν στο ίδιο επίπεδο, οπότε αντιμετωπίζονται από το μοντέλο κατανομής με την ίδια ιεραρχία. Οι τιμές των στόχων και περιορισμών μπορούν να είναι σταθερές, μεταβλητές ανά μήνα ή, στη γενικότερη περίπτωση, μεταβλητές ανά χρονικό βήμα  $t$ . Οι ανισωτικοί περιορισμοί ελέγχου των αποθεμάτων και παροχών μπορούν να διατυπωθούν και με τη μορφή ισότητας, εισάγοντας στόχους διατήρησης των εν λόγω μεταβλητών σε συγκεκριμένη τιμή. Τέλος, σε κάθε χρονικό βήμα  $t$ , οι στόχοι παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας μετασχηματίζονται σε στόχους ελάχιστης ροής στους στροβίλους, με βάση τη σχέση:

$$V_{ij}^*(t) = \frac{E_{ij}^*(t)}{\psi_{ij}(t) H_{ij}(t)} \quad (4.22)$$

όπου  $V_{ij}^*(t)$  η επιθυμητή μεταφορά όγκου νερού μέσω του στροβίλου για την παραγωγή του ενεργειακού στόχου  $E_{ij}^*(t)$ , που είναι συνάρτηση της επίκαιρης ειδικής ενέργειας και του επίκαιρου ύψους πτώσης.

Στους στόχους απόληξης μπορεί να οριστεί ένα σταθερό ποσοστό επιστροφής του καταναλισκόμενου νερού σε οποιοδήποτε κόμβο του υδροσυστήματος, εκτός βεβαίως από τον κόμβο όπου ορίζεται ο εν λόγω στόχος. Στην περίπτωση μηδενικής επιστροφής, το σύνολο της απόληξης «μεταφέρεται» εκτός του συστήματος, διαφορετικά μέρος της ανακυκλώνεται στο δίκτυο. Παραδείγματα ανακύκλωσης αποτελούν οι αποστραγγίσεις των γεωργικών χρήσεων, οι αποχετεύσεις των αστικών χρήσεων και τα λύματα των βιομηχανικών χρήσεων.

Για την επίτευξη των στόχων και περιορισμών, δεν απαιτείται από τον χρήστη να προκαθορίσει τον τρόπο μεταφοράς νερού ή την κατανομή των υδατικών πόρων στο δίκτυο. Αντίθετα, σε κάθε χρονικό βήμα, το μοντέλο προσομοίωσης εκτιμά την πλέον πρόσφορη κατανομή των διαθέσιμων υδατικών πόρων, βελτιστοποιώντας τις απολήψεις από κάθε θέση προσφοράς και τον τρόπο μεταφοράς τους για την ικανοποίηση των στόχων και περιορισμών, με τη δεδομένη σειρά προτεραιότητας. Σε περίπτωση που σε κάποιο χρονικό βήμα (μήνας) δεν είναι δυνατή η πλήρης εξυπηρέτηση κάποιου στόχου, τότε καταγράφεται αστοχία εξυπηρέτησης του στόχου τον εν λόγω μήνα και υπολογίζεται το αντίστοιχο έλλειμμα. Ταυτόχρονα, καταγράφεται αστοχία και σε ετήσια κλίμακα, καθώς θεωρείται ότι αν έστω και ένας μήνας του έτους είναι ελλειμματικός, τότε όλο το έτος χαρακτηρίζεται ελλειμματικό. Στο πέρας της προσομοίωσης, το μοντέλο αθροίζει τις αστοχίες και τα ελλείμματα, και βάσει αυτών εκτιμά εμπειρικές πιθανότητες αστοχίας και άλλα στατιστικά μεγέθη.

#### 4.3.4 Οικονομικά δεδομένα

Τα οικονομικά δεδομένα εισόδου του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ αναφέρονται σε τιμές κόστους και οφέλους από τη μεταφορά του νερού μέσω του δικτύου. Τα κόστη είναι δύο κατηγοριών:

- *πάγια κόστη*, από την ενεργοποίηση κάθε συνιστώσας του δικτύου.
- *μεταβλητά κόστη*, που αναφέρονται στη μεταφορά νερού μέσω της εν λόγω συνιστώσας.

Τα παραπάνω μεγέθη ορίζονται στις γεωτρήσεις, τα υδραγωγεία και τα αντλιοστάσια. Ειδικότερα, στις γεωτρήσεις και τα αντλιοστάσια, το μεταβλητό κόστος διατυπώνεται ως χρηματική δαπάνη ανά μονάδα καταναλισκόμενης ενέργειας (kWh), ενώ στα υδραγωγεία διατυπώνεται ως χρηματική δαπάνη ανά μονάδα μεταφερόμενου όγκου ( $m^3$ ). Τα πάγια κόστη διατυπώνονται σε χρηματικές μονάδες και υπολογίζονται στο συνολικό κόστος μόνο όταν χρησιμοποιείται η αντίστοιχη συνιστώσα του δικτύου, οπότε η μεταφερόμενη ποσότητα νερού στο χρονικό βήμα είναι μη μηδενική.

Τα οικονομικά οφέλη του συστήματος προέρχονται από την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Το μοντέλο διακρίνει την ενέργεια που παράγεται σε κάθε στρόβιλο σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα. Η πρώτη αναφέρεται στην ενέργεια που είναι διαθέσιμη με κάποιο πολύ υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας, π.χ. 99%, ενώ η δεύτερη εκτιμάται ως η περίσσεια μεταξύ της ολικής και πρωτεύουσας τιμής. Δεδομένο εισόδου του μοντέλου είναι οι τιμές μονάδας από την παραγωγή πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας, που είναι κοινές για όλους τους στρόβιλους και διατυπώνονται ως χρηματικό όφελος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας (kWh).

Επισημαίνεται ότι στην εμπλουτισμένη έκδοση του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, στην οποία ενσωματώνεται το μοντέλο οικονομικής αποτίμησης ΕΡΜΗΣ, εισάγονται επιπλέον συνιστώσες κόστους και οφέλους, που αναφέρονται όχι μόνο από τη μεταφορά αλλά και από τη χρήση των υδατικών πόρων. Ακόμη, λαμβάνονται υπόψη μια πληθώρα χρηματοοικονομικών παραμέτρων, όπως επιτόκια, κόστη επένδυσης και συντήρησης, κλπ.

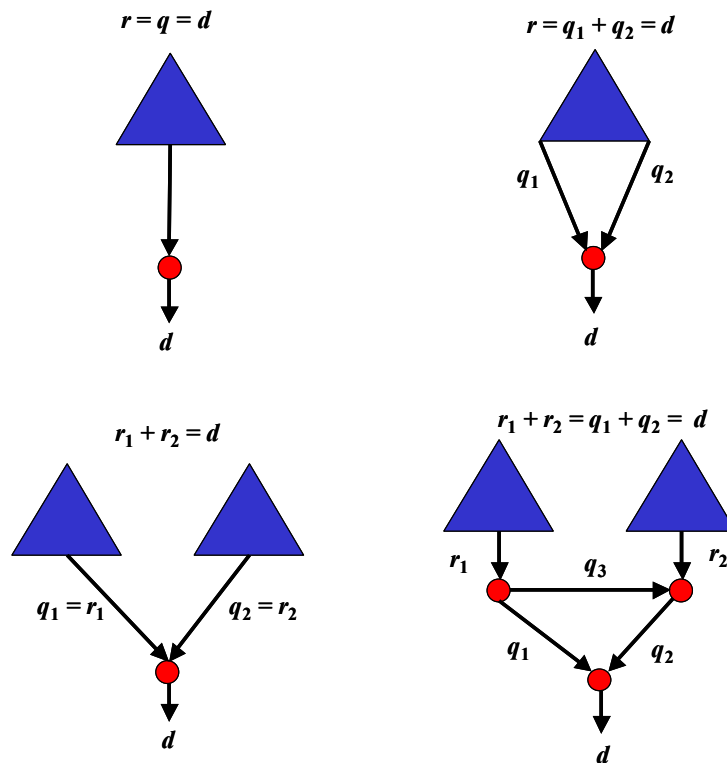
## 4.4 Παραμετροποίηση κανόνων λειτουργίας

### 4.4.1 Η έννοια των βαθμών ελευθερίας

Στη γενική περίπτωση, τα άγνωστα μεγέθη ενός υδροσυστήματος είναι οι *απολήψεις* από τις θέσεις προσφοράς νερού (υδατορεύματα, ταμιευτήρες, γεωτρήσεις) και ο τρόπος μεταφοράς τους μέχρι τις θέσεις κατανάλωσης, δηλαδή οι *παροχές* κατά μήκος του δικτύου των υδραγωγείων και ποταμών. Ο αριθμός των εν λόγω μεταβλητών, και συνακόλουθα των βαθμών ελευθερίας του διαχειριστικού προβλήματος, είναι άμεση συνάρτηση της πολυπλοκότητας του συστήματος. Η παραμετροποίηση έχει ως στόχο τον περιορισμό των βαθμών ελευθερίας του μοντέλου, κάτι που, όπως έχει εξηγηθεί στο εδάφιο 2.4.4, εξασφαλίζει σημαντικά θεωρητικά και πρακτικά πλεονεκτήματα.

Η έννοια των βαθμών ελευθερίας εξηγείται στο παράδειγμα του Σχήματος 4.2, όπου απεικονίζονται τέσσερις χαρακτηριστικές δομές δικτύων, που αφορούν σε συστήματα ταμιευτήρων και υδραγωγείων, που εξυπηρετούν μία κατάντη ζήτηση,  $d$ . Στην πρώτη περίπτωση (πάνω αριστερά), όπου θεωρούνται ένας μοναδικός ταμιευτήρας και ένα μοναδικό υδραγωγείο, δεν υπάρχουν βαθμοί ελευθερίας, άρα και εναλλακτικές επιλογές διαχείρισης, καθώς η απόληψη  $r$ , η παροχή  $q$ , και η ζήτηση  $d$ , ταυτίζονται. Στην δεύτερη περίπτωση (κάτω αριστερά), θεωρούνται δύο παράλληλοι ταμιευτήρες και μια μοναδική διαδρομή νερού, οπότε προκύπτει ένας βαθμός ελευθερίας ως προς την κατανομή των απολήψεων,  $r_1$  και  $r_2$ . Στην τρίτη περίπτωση (πάνω δεξιά), θεωρείται ένας ταμιευτήρας και δύο εναλλακτικές διαδρομές νερού, οπότε προκύπτει ένας βαθμός ελευθερίας ως προς την κατανομή της παροχών  $q_1$  και  $q_2$  στο δίκτυο των υδραγωγείων. Στην τελευταία περίπτωση (κάτω δεξιά), στην οποία θεωρούνται δύο παράλληλοι ταμιευτήρες και δύο εναλλακτικές διαδρομές νερού, προκύπτουν περισσότεροι βαθμοί ελευθερίας, που αναφέρονται τόσο στην κατανομή των απολήψεων όσο και των παροχών.





Σχήμα 4.2: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συστημάτων ταμιευτήρων και υδραγωγείων, που εξυπηρετούν μια κατάντη ζήτηση,  $d$ .

Στο μοντέλο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, η έννοια της παραμετροποίησης αφορά στις πρακτικές διαχείρισης των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, και υλοποιείται με τη χρήση παραμετρικών κανόνων λειτουργίας των ταμιευτήρων και γεωτρήσεων, που μάλιστα μεταβάλλονται εποχιακά. Οι κανόνες αυτοί καθορίζουν, σε κάθε χρονικό βήμα, τις επιθυμητές απολήψεις από τα εν λόγω έργα, συναρτήσει των επίκαιρων αποθεμάτων, των αναμενόμενων εισροών και της συνολικής ζήτησης. Από την άλλη πλευρά, ο υπολογισμός των πραγματικών απολήψεων και της κατανομής των παροχών στα υδραγωγεία γίνεται, σε κάθε χρονικό βήμα, από το μοντέλο προσομοίωσης του υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα επιθυμητά μεγέθη των κανόνων λειτουργίας, τους φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς, καθώς και τα οικονομικά μεγέθη του δικτύου (βλ. 4.5). Αν και οι κανόνες λειτουργίας αίρουν ορισμένους μόνο από τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος, θεωρούνται εξαιρετικά σημαντικοί για τη βιώσιμη διαχείριση του υδροσυστήματος, καθώς η εκτίμηση των παραμέτρων τους μπορεί να γίνει για μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα, και όχι αποκλειστικά με βάση τις επίκαιρες συνθήκες. Αυτό προϋποθέτει μια διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων, ως προς κατάλληλα κριτήρια επίδοσης (βλ. 4.6).

#### 4.4.2 Κανόνες λειτουργίας ταμιευτήρων

Ο ταμιευτήρας αποτελεί το σημαντικότερο έργο υποδομής ενός συστήματος υδατικών πόρων, καθώς επιτρέπει την εποχιακή αλλά και υπερετήσια ρύθμιση των υδρολογικών εισροών. Όπως εξηγήθηκε στο παράδειγμα του προηγούμενου εδαφίου, όταν το υδροσύστημα περιλαμβάνει πολλαπλούς ταμιευτήρες, εισάγονται αντίστοιχοι βαθμοί ελευθερίας, που αναφέρονται στην κατανομή των απολήψεων. Για τέτοιας δομής υδροσυστήματα, οι Nalbantis and Koutsoyiannis (1997) ανέπτυξαν μια καινοτόμο μεθοδολογία παραμετροποίησης, τα κύρια σημεία της οποίας συνοψίζονται στη συνέχεια.

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:

$$\sum_{i=1}^n s_i(t) = s(t) \quad (4.23)$$

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:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n s_i(t-1) + \sum_{i=1}^n i_i(t) - d(t) \quad (4.24)$$

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

$$\sum_{i=1}^n r_i(t) = d(t) \quad (4.25)$$

Ισοδύναμα, το πρόβλημα συνίσταται στην βέλτιστη κατανομή του συνολικού όγκου  $v(t)$  στους ταμιευτήρες ώστε να ικανοποιείται ο περιορισμός (4.23). 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, δηλαδή 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 2.4.3, 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:

$$s_i^* = k_i - a_i k + b_i s \quad (4.26)$$

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 (4.26) είναι ελαφρά τροποποιημένη σε σχέση με την αυθεντική εξίσωση των Nalbantis and Koutsoyiannis (1997), ώστε οι παράμετροι 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 (4.23).

Αποδεικνύεται ότι ο κανόνας (4.26), ειδική περίπτωση του οποίου είναι ο χωρικός κανόνας που αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.4.3, 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  $2 \times n$ , δηλαδή δύο παράμετροι ανά ταμιευτήρα. 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 (4.26) είναι:

$$s_i^* = b_i s \quad (4.27)$$

Η εξίσωση (4.27) συνιστά τον λεγόμενο *ομογενή κανόνα*, ο οποίος προκύπτει από την (4.26) με θεώρηση σταθερών τιμών των παραμέτρων  $a_i$ , ίσων με:

$$a_i = \frac{k_i}{k} \quad (4.28)$$

Στην γραμμική σχέση (4.26) ή την (4.27) δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι φυσικοί περιορισμοί του προβλήματος, δηλαδή οι περιορισμοί ωφέλιμης χωρητικότητας. Για τον λόγο αυτό, τα αποθέματα-στόχοι που υπολογίζονται από την (4.26) διορθώνονται ώστε:

$$s_i^* = \max \{ \min [k_i, k_i - a_i k + b_i s], 0 \} \quad (4.29)$$

Μετά την (4.29) ακολουθεί μια επόμενη διόρθωση, ώστε να ικανοποιείται και ο περιορισμός (4.23), δηλαδή να μηδενίζεται το σφάλμα:

$$\Delta s = s - \sum_{i=1}^n s_i^* \quad (4.30)$$

Πρόκειται για μια διαδικασία αναγωγής, βάσει της οποίας το σφάλμα  $\Delta s$  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 ( $s^* = k_i$ ) 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:

$$s_i'^* = s_i^* [1 + \varphi (1 - s_i^* / k_i)] \quad (4.31)$$

όπου:

$$\varphi = \frac{\Delta s}{\sum_{j=1}^n s_j^* (1 - s_j^* / k_j)} \quad (4.32)$$

Επισημαίνεται ότι για τιμές του  $\varphi$  εκτός του διαστήματος  $[-1, 1]$ , η σχέση αναγωγής (4.31) μπορεί να δώσει τιμές αποθεμάτων-στόχων που εξακολουθούν να παραβιάζουν τους φυσικούς περιορισμούς. Στην περίπτωση αυτή, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, διορθώνοντας τα αποθέματα βάσει της (4.29) και εφαρμόζοντας εκ νέου την διαδικασία αναγωγής (4.31), ώσπου να επέλθει σύγκλιση. Λόγω των σχέσεων (4.29) και (4.31), η τελική μορφή των κανόνων λειτουργίας είναι μη γραμμική.

Στην παραπάνω διαδικασία, τα αποθέματα και οι χωρητικότητες, αναφέρονται σε καθαρά ή αλλιώς ωφέλιμα μεγέθη. Συνεπώς, για την πρακτική εφαρμογή των κανόνων απαιτείται αναγωγή της μικτής χωρητικότητας κάθε ταμειυτήρα σε ωφέλιμη, δηλαδή:

$$k_i \rightarrow k_i - dv_i \quad (4.33)$$

Στη συνέχεια, με δεδομένα τα επιθυμητά ωφέλιμα αποθέματα, η αναγωγή τους σε μικτά γίνεται προσθέτοντας τον αντίστοιχο νεκρό όγκο, δηλαδή:

$$s_i^* \rightarrow s_i^* + dv_i \quad (4.34)$$

#### 4.4.3 Γενίκευση κανόνων με ενσωμάτωση περιορισμών αποθέματος

Στην έως τώρα προσέγγιση, η διατύπωση των κανόνων λειτουργίας των ταμειυτήρων καθορίζεται πλήρως από τις τιμές των παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$ . Οι Καραβοκυρός κ.ά. (2004) εισήγαγαν επιπλέον μεταβλητές στους κανόνες λειτουργίας των ταμειυτήρων, και συγκεκριμένα τα επιθυμητά άνω και κάτω όρια διακύμανσης των αποθεμάτων τους, εξασφαλίζοντας μια πιο αξιόπιστη προσέγγιση των πρακτικών διαχείρισης τους σε πραγματικές συνθήκες.

Οι λειτουργικοί περιορισμοί ελάχιστου και μέγιστου αποθέματος ενσωματώνονται στους κανόνες λειτουργίας λαμβάνοντας υπόψη ότι η καθαρή χωρητικότητα κάθε ταμιευτήρα είναι πλέον συνάρτηση του χρονικού βήματος  $t$  (αφού οι στόχοι δύνανται να μεταβάλλονται διαχρονικά). Η τελευταία ορίζεται ως η διαφορά:

$$k_i(t) = s_i^{\max}(t) - s_i^{\min}(t) \quad (4.35)$$

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

$$\left( \sum_{i=1}^n s_i^{\min}, \sum_{i=1}^n s_i^{\max} \right) \quad (4.36)$$

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 (4.36) 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 ταμιευτήρας του οποίου ο περιορισμός ελάχιστου αποθέματος βρίσκεται στην υψηλότερη προτεραιότητα, στην συνέχεια αυτός του οποίου ο περιορισμός βρίσκεται στην επόμενη προτεραιότητα, κοκ. Κατά συνέπεια, θεωρώντας ότι ο δείκτης  $i$  κατατάσσει τους ταμιευτήρες με βάση την προτεραιότητα των περιορισμών ελάχιστου αποθέματος, η μαθηματική διατύπωση των αποθεμάτων-στόχων είναι:

$$s_i^* = \begin{cases} s_i^{\min} & i < j \\ s - \sum_{i=1}^{j-1} s_i^{\min} & i = j \\ dv_i & i > j \end{cases} \quad (4.37)$$

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

$$\sum_{i=1}^j s_i^{\min} \leq s \leq \sum_{i=1}^{j-1} s_i^{\min} \quad (4.38)$$

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. Συνεπώς, θεωρώντας τώρα ότι ο δείκτης  $i$  εκφράζει την σειρά προτεραιότητας των περιορισμών μέγιστου αποθέματος, τα επιθυμητά αποθέματα υπολογίζονται ως:

$$s_i^* = \begin{cases} s_i^{\max} & i < j \\ s - \sum_{i=1}^{j-1} s_i^{\max} - \sum_{i=j}^n k_i & i = j \\ k_i & i > j \end{cases} \quad (4.39)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για συνολικό μικτό απόθεμα στο διάστημα:

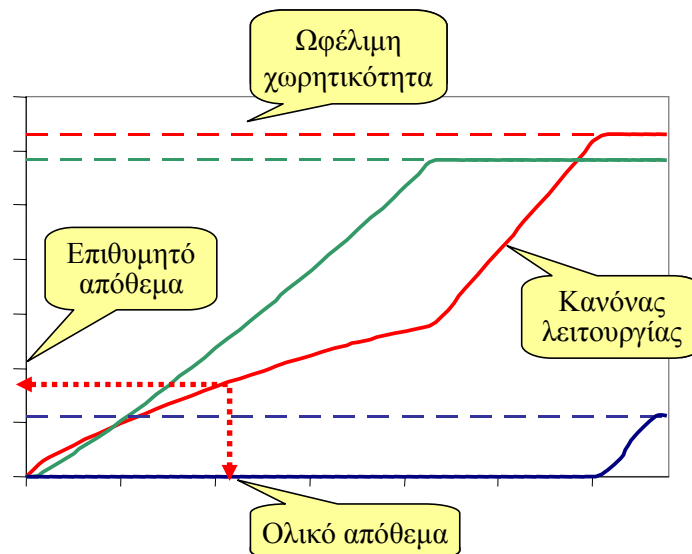
$$\sum_{i=1}^j s_i^{\max} + \sum_{i=j+1}^n k_i \leq s \leq \sum_{i=1}^{j-1} s_i^{\max} + \sum_{i=j}^n k_i \quad (4.40)$$

Η ενσωμάτωση των στόχων ελάχιστου και μέγιστου αποθέματος στους κανόνες λειτουργίας, τους καθιστά πιο ρεαλιστικούς αλλά και πιο φιλικούς για τον διαχειριστή του συστήματος. Σε αντίθεση μάλιστα από τις παραμέτρους  $a_i$  και  $b_i$ , που δεν έχουν φυσική ερμηνεία, οι περιορισμοί αποθέματος είναι άμεσα αντιληπτοί.

#### 4.4.4 Πρακτική χρήση κανόνων λειτουργίας

Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται οι κανόνες λειτουργίας τριών υποθετικών ταμιευτήρων, για τους οποίους δεν εισάγονται λειτουργικοί περιορισμοί ελάχιστου και μέγιστου αποθέματος. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται το συνολικό ωφέλιμο απόθεμα του συστήματος, ενώ στον κατακόρυφο άξονα φαίνεται το επιθυμητό απόθεμα κάθε ταμιευτήρα. Με λεπτή οριζόντια γραμμή απεικονίζεται η ωφέλιμη χωρητικότητα, που αποτελεί το φυσικό άνω όριο του αντίστοιχου αποθέματος. Για δεδομένη διαθεσιμότητα επιφανειακών νερών, που μπορεί δυνητικά να αποθηκευτεί στο σύστημα, ο εκάστοτε κανόνας ορίζει την τιμή του αντίστοιχου αποθέματος-στόχου.

Αυτού του τύπου τα νομογραφήματα αποτελούν εύχρηστα εργαλεία για την επιχειρησιακή διαχείριση ενός συστήματος ταμιευτήρων. Σε κάθε χρονική στιγμή ο χρήστης μπορεί να ελέγξει την κατάσταση των αποθεμάτων και να την συγκρίνει με την επιθυμητή κατάσταση που ορίζει ο κανόνας λειτουργίας. Αν 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 αφηθεί ο ταμιευτήρας να γεμίσει μέχρι να επιτευχθεί ο όγκος-στόχος. Επισημαίνεται ότι το μαθηματικό μοντέλο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ σε καμία περίπτωση δεν επιτρέπει την αστοχία κάποιου λειτουργικού στόχου ή περιορισμού, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων. Οι τελευταίοι εκφράζουν μια μακροχρόνια στρατηγική διαχείρισης των επιφανειακών υδατικών πόρων, που σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος καθορίζουν την λειτουργία του σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 4.3: Γραφική παράσταση των κανόνων λειτουργίας τριών υποθετικών ταμιευτήρων. Με λεπτή γραμμή απεικονίζεται η ωφέλιμη χωρητικότητα κάθε ταμιευτήρα, με παχιά γραμμή η τελική μορφή των κανόνων λειτουργίας, ενώ με διακεκομμένη η αρχική (γραμμική) τους μορφή.

#### 4.4.5 Κανόνες λειτουργίας γεωτρήσεων

Όταν ένα υδροσύστημα εξυπηρετεί τις ανάγκες του με συνδυαστικές απολήψεις από επιφανειακούς και υπόγειους πόρους, τότε προκύπτουν επιπλέον βαθμοί ελευθερίας ως προς την κατανομή των εν λόγω απολήψεων. Επειδή στις γεωτρήσεις δεν υπάρχει η έννοια της αποθήκευσης (όπως συμβαίνει στους ταμιευτήρες), η προσέγγιση που υιοθετείται στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ για τη διαχείρισή τους είναι πιο απλή, και συνίσταται στην προτεραιότητα χρήσης κάθε γεώτρησης σε σχέση με τα διαθέσιμα επιφανειακά αποθέματα. Οι σχετικοί κανόνες λειτουργίας εισάγουν δύο αδιάστατες παραμέτρους ανά

γεώτρηση  $i$ . Συγκεκριμένα, πρόκειται για δυο κατώφλια  $b_i^{\text{up}}$  και  $b_i^{\text{down}}$ , τα οποία συγκρίνονται με το ποσοστό πλήρωσης των ταμιευτήρων, δηλαδή την ποσότητα:

$$\omega = \frac{\sum_{j=1}^n s_j - dv_j}{\sum_{j=1}^n k_j - dv_j} \quad (4.41)$$

όπου  $n$  το πλήθος των ταμιευτήρων. Εφόσον  $\omega > b_i^{\text{up}}$  απαγορεύεται η χρήση της γεώτρησης  $i$ , ενώ αν  $\omega < b_i^{\text{down}}$  η εν λόγω γεώτρηση ενεργοποιείται κατά προτεραιότητα σε σχέση με τους ταμιευτήρες. Τέλος, για ενδιάμεσες τιμές, η γεώτρηση χρησιμοποιείται μόνο εφόσον η λειτουργία της προκύπτει οικονομικότερη σε σχέση με τις λοιπές εναλλακτικές λύσεις (βλ. 4.5.5).

Όπως συμβαίνει και με τους κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων, έτσι και αυτοί των γεωτρήσεων είναι εν μέρει μόνο δεσμευτικοί. Στην περίπτωση που η επιθυμητή πολιτική που ορίζουν οι κανόνες συναρτήσει των επίκαιρων συνθηκών του υδροσυστήματος έρχεται σε σύγκρουση είτε με τους φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς του δικτύου, τότε το μοντέλο προσομοίωσης επιδιώκει έναν ρεαλιστικό συμβιβασμό, πραγματοποιώντας απολήψεις που απέχουν όσο το δυνατό λιγότερο από τις επιθυμητές. Συνεπώς, δεν υπάρχει ποτέ η περίπτωση μη ικανοποίησης κάποιου στόχου, προκειμένου να τηρηθούν επακριβώς οι κανόνες λειτουργίας.

## 4.5 Μοντέλο λειτουργικής προσομοίωσης

### 4.5.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Η προσομοίωση είναι η διαδικασία αναπαράστασης των φυσικών διεργασιών που σχετίζονται με την διαχείριση των υδρολογικών εισροών και την μεταφορά των απολήψεων από τις θέσεις προσφοράς (υδατορεύματα, ταμιευτήρες, γεωτρήσεις) στην κατανάλωση. Στοιχεία εισόδου του μοντέλου προσομοίωσης είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη των τεχνικών έργων, τα υδρολογικά σενάρια, οι στόχοι και λειτουργικοί περιορισμοί, τα οικονομικά μεγέθη του δικτύου, καθώς και οι παράμετροι των κανόνων λειτουργίας. Έξοδοι είναι οι χρονοσειρές απόκρισης όλων των συνιστωσών του συστήματος, δηλαδή τα αποθέματα των ταμιευτήρων, οι απολήψεις από επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους, και οι παροχές των υδραγωγείων και υδατορευμάτων. Οι εν λόγω αποκρίσεις αντιστοιχούν στις μεταβλητές απόφασης του μοντέλου. Η προσομοίωση εκτελείται σε μηνιαία χρονικά βήματα, ενώ τα αποτελέσματα της συναθροίζονται και σε μεγαλύτερες χρονικές περιόδους. Η διαδικασία είναι σειριακή, που σημαίνει ότι οι αποφάσεις κάθε χρονικού βήματος είναι ανεξάρτητες από τις αποφάσεις των προηγούμενων και επόμενων βημάτων. Σε κάθε χρονικό βήμα, το πρόβλημα τίθεται ως εξής:

Αρχικά δίνονται ή υπολογίζονται τα εξής μεγέθη:

- το τρέχον απόθεμα κάθε ταμιευτήρα,  $s_i$
- οι καθαρές υδρολογικές εισροές κάθε ταμιευτήρα,  $i_i$
- οι εισροές των κόμβων του υδρογραφικού δικτύου,  $i_i$
- η δυναμικότητα κάθε γεώτρησης,  $g_i$
- η παροχεταιυτικότητα κάθε υδραγωγείου, στροβίλου και αντλιστασίου,  $c_{ij}$ , που είτε είναι σταθερή ή εξαρτώμενη από το τρέχον ύψος πτώσης,  $H_{ij}$ .
- οι επίκαιρες τιμές των στόχων και λειτουργικών περιορισμών.

Με βάση τα επίκαιρα αποθέματα, τις αναμενόμενες εισροές και τη συνολική ζήτηση των στόχων κατανάλωση νερού, εκτιμάται το συνολικό επιφανειακό δυναμικό του συστήματος στο πέρας του χρονικού βήματος. Για τις δεδομένες τιμές των παραμέτρων των κανόνων λειτουργίας υπολογίζεται,

για κάθε ταμιευτήρα, το απόθεμα-στόχος  $s_i^*$ , και συνακόλουθα, η απόληψη-στόχος,  $r_i^*$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$r_i^* = \max(0, s_i + i_i - s_i^*) \quad (4.42)$$

όπου το μέγεθος  $s_i$  αναφέρεται στο *τρέχον* απόθεμα του ταμιευτήρα, ενώ η ποσότητα  $s_i^*$  στο *επιθυμητό* απόθεμα στο τέλος του χρονικού βήματος. Η παραπάνω σχέση υποδηλώνει ότι αν η ποσότητα  $s_i + i_i$ , η οποία εκφράζει το θεωρητικά διαθέσιμο δυναμικό του ταμιευτήρα, είναι μικρότερη από το απόθεμα-στόχο που επιβάλλει ο κανόνας λειτουργίας, δεν επιδιώκεται η πραγματοποίηση απολήψεων από τον εν λόγω ταμιευτήρα.

Βεβαίως, εξαιτίας της ύπαρξης πληθώρας βαθμών ελευθερίας, η γνώση των επιθυμητών απολήψεων  $r_i^*$ , δεν επαρκεί για τον προσδιορισμό όλων των μεταβλητών απόφασης του υδροσυστήματος, δηλαδή των πραγματικών απολήψεων και της κατανομής τους στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει όταν ισχύει μία τουλάχιστον από τις ακόλουθες συνθήκες:

- οι επιθυμητές απολήψεις από τους ταμιευτήρες δεν μπορούν να διοχετευτούν κατάντη εξαιτίας των φυσικών περιορισμών του δικτύου·
- ο τρόπος μεταφοράς των απολήψεων από τις πηγές στην κατανάλωση 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, για το οποίο τίθενται οι εξής 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 επιβάλλουν οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων·
- ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των υδατικών πόρων κατά μήκος του δικτύου των υδραγωγείων, γεωτρήσεων και αντλιοστασίων.

Αποδεικνύεται ότι οι παραπάνω απαιτήσεις μπορούν να αναχθούν σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού που, υπό προϋποθέσεις, διατυπώνεται σε μια ειδική μορφή γνωστή ως *πρόβλημα μεταφόρτωσης* (βλ. 4.5.2). Ως μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος βελτιστοποίησης θεωρείται το σύνολο των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου, για το σύνολο των συνιστωσών του μοντέλου του υδροσυστήματος. Το πρόβλημα επιλύεται ρητά 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 μιας τέτοιας διατύπωσης είναι η ύπαρξη αναλυτικών αλγορίθμων επίλυσης, που εγγυώνται πλήρη ακρίβεια, με σχετικά μικρό υπολογιστικό φόρτο.

Το προτεινόμενο μοντέλο χειρίζεται οποιαδήποτε τοπολογία δικτύου και ενσωματώνει όλους τους τύπους περιορισμών, φυσικών και λειτουργικών, ενώ είναι άμεσα προσαρμόσιμο στο μεθοδολογικό σχήμα παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση, το οποίο περιγράφηκε στο εδάφιο 2.4.4. Η αναλυτική του διατύπωση γίνεται στο εδάφιο 4.5.3, ενώ στο εδάφιο 4.5.5 εξηγείται ο τρόπος καθορισμού των χαρακτηριστικών μεγεθών του διγράφου, που αποτελεί κομβικό σημείο της όλης προσέγγισης.

#### 4.5.2 Γενική περιγραφή του προβλήματος μεταφόρτωσης

Το πρόβλημα μεταφόρτωσης (transshipment problem) είναι εφαρμογή της επιχειρησιακής έρευνας, που προέρχεται από την θεωρία γράφων (Deo, 1974· Smith, 1982). Ο γράφος (graph) είναι μια μαθηματική οντότητα, που ορίζεται ως ένα σύνολο που αποτελείται από διατεταγμένα ζεύγη σημείων. Κάθε γράφος μπορεί να παρασταθεί με τη μορφή  $(\mathcal{N}, \mathcal{A})$ , όπου  $\mathcal{N}$  ένα σύνολο σημείων που ονομάζονται *κόμβοι*, και  $\mathcal{A}$  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:

$$\sum_{i=1}^n y_i = 0 \quad (4.43)$$

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

Η εξίσωση συνέχειας γράφεται στην μορφή:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

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

Τέλος, οι περιορισμοί παροχαρακτηριστικότητας γράφονται στη μορφή:



$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_m \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_m \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

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

$$f(x_1, \dots, x_m) = \sum_{j=1}^m c_j x_j \quad (4.46)$$

Η μητρική διατύπωση του προβλήματος είναι:

$$\begin{aligned} \text{minimise } f(\mathbf{x}) &= \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{έτσι ώστε } \mathbf{A} \mathbf{x} &= \mathbf{y} \\ \mathbf{0} &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned} \quad (4.47)$$

όπου  $\mathbf{x}$  το διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου, δηλαδή 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.

Το σύστημα (4.47) 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, τη λεγόμενη *δικτυακή simplex* (Chvátal, 1983, σ. 291-319). Η δικτυακή simplex επιλύει μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού, στα οποία οι συντελεστές των περιορισμών ισότητας 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.

### 4.5.3 Σχηματοποίηση μοντέλου διγράφου

Έστω σύστημα υδατικών πόρων, που αποτελείται από τις συνιστώσες που αναφέρονται στην ενότητα 4.2. Ζητούμενο είναι η αναπαράσταση του συνόλου των μεταβλητών απόφασης του μαθηματικού μοντέλου του υδροσυστήματος μέσω ενός ιδεατού διγράφου, με τρόπο ώστε όλες να αντιστοιχούν στις μεταβλητές ελέγχου ενός προβλήματος μεταφόρτωσης. Δεδομένου ότι ο διγράφος διατηρεί την τοπολογία του πραγματικού συστήματος, επιδιώκεται μια διατύπωση του προβλήματος που εγγυάται την ικανοποίηση των τεσσάρων απαιτήσεων που τέθηκαν στο εδάφιο 4.5.1, και συνεπώς εξασφαλίζει τη βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων υδατικών πόρων στις επιμέρους συνιστώσες του συστήματος. Αυτό γίνεται με τον ορισμό κατάλληλων τιμών προσφοράς και ζήτησης στους κόμβους, και κατάλληλων τιμών παροχτευτικότητας και μοναδιαίου κόστους στους κλάδους. Το μοναδιαίο κόστος πρέπει να είναι θετικό, δηλαδή να εκφράζει ποινή, όταν επιδιώκεται απαγόρευση μιας συγκεκριμένης μεταφοράς νερού (π.χ. διατήρηση αποθέματος πάνω από τον σχετικό περιορισμό μεγίστου) και αρνητικό όταν επιβάλλεται μια συγκεκριμένη μεταφορά νερού (π.χ. απώληση για την ικανοποίηση του σχετικού στόχου κατανάλωσης). Στο μοντέλο εισάγεται και ένας εικονικός σωρευτικός κόμβος, όπου διοχετεύεται που καταναλώνεται στους κόμβους, αποθηκεύεται επιφανειακά και υπόγεια ή «χάνεται» από το σύστημα λόγω διηθήσεων, διαρροών, υπερχειλίσεων και μεταφορών κατάντη. Ο κόμβος αυτός τίθεται ώστε να ισχύουν οι υποθέσεις του προβλήματος μεταφόρτωσης, και συγκεκριμένα η υπόθεση συνολικής προσφοράς ίσης με την συνολική ζήτηση.

Πίνακας 4.1: Τύποι κόμβων του μοντέλου διγράφου.

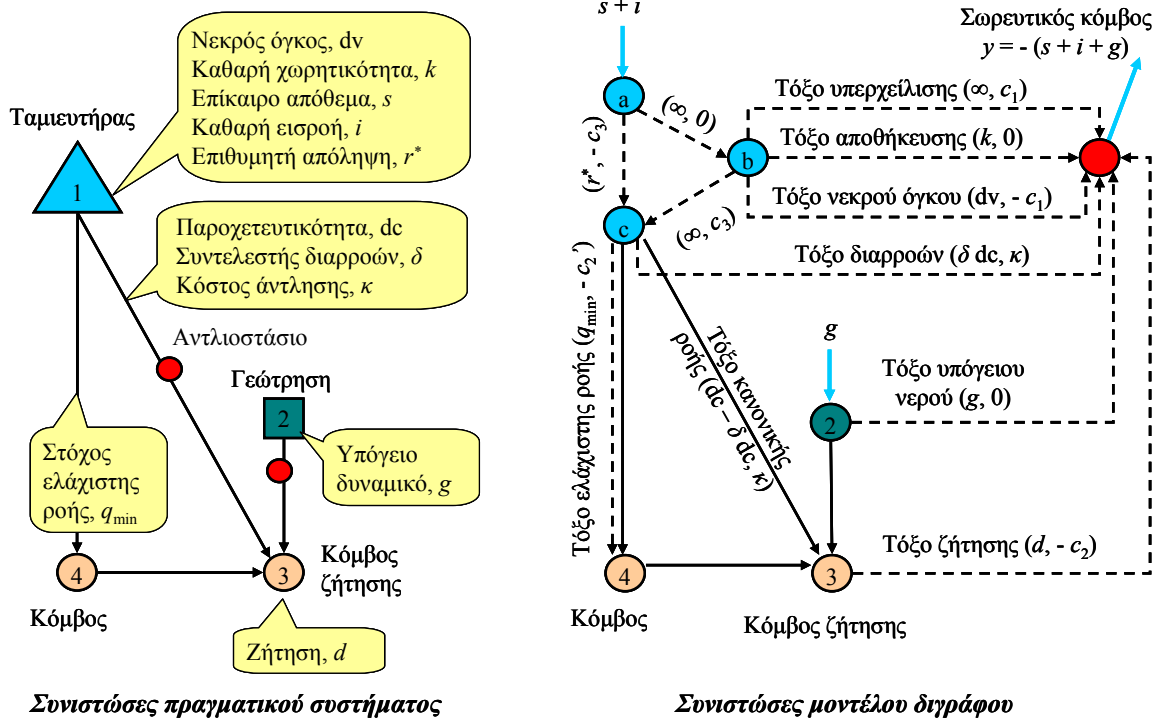
Τύπος	Περιγραφή	Εισροή/εκροή
0	Κόμβος υδατορεύματος	Απορροή κόμβου εισροής
1	Κόμβος υδραγωγείου	-
2	Γεώτρηση	Δυναμικότητα γεώτρησης
3	Εισροή σε ταμιευτήρα	Διαθέσιμο επιφανειακό δυναμικό (τρέχον απόθεμα + απορροή υπολεκάνης + βροχόπτωση - εξάτμιση - διαφυγές)
4	Αποθήκευση σε ταμιευτήρα	-
5	Εκροή από ταμιευτήρα	-
6	Σωρευτικός κόμβος	Εκροή ίση με το άθροισμα των εισροών

Πίνακας 4.2: Τύποι κλάδων του μοντέλου διγράφου.

Τύπος	Μεταβλητή μοντέλου υδροσυστήματος	Συνιστώσα δικτύου
0	Επιθυμητή ροή, μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που ορίζουν οι περιορισμοί παροχής	Υδατόρευμα
1	Απώλειες λόγω διήθησης	Υδατόρευμα
2	Επιθυμητή ροή, μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που ορίζουν οι περιορισμοί παροχής	Υδραγωγείο
3	Απώλειες λόγω διαρροών	Υδραγωγείο
4	Εκροή για κάλυψη της απόληξης-στόχου που ορίζουν οι παραμετρικοί κανόνες λειτουργίας	Ταμιευτήρας
5	Δυνητική αποθήκευση διαθέσιμου επιφανειακού δυναμικού	Ταμιευτήρας
6	Πλεονασματική εκροή, πέραν της απόληξης-στόχου	Ταμιευτήρας
7	Αποθήκευση μέχρι το νεκρό όγκο	Ταμιευτήρας
8	Επιθυμητή αποθήκευση, μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που ορίζουν οι περιορισμοί αποθέματος	Ταμιευτήρας
9	Υπερχείλιση	Ταμιευτήρας
10	Απόληξη υπόγειων νερών	Γεώτρηση
11	Αποθήκευση υπόγειων νερών	Γεώτρηση
12	Κατανάλωση νερού	Κόμβος ή ταμιευτήρας
13	Επιστροφή νερού που καταναλώθηκε	Κόμβος ή ταμιευτήρας
14	Παροχή για κάλυψη του περιορισμού ελάχιστης ροής	Υδραγωγείο ή υδατόρευμα
15	Πλεονασματική παροχή, πέραν του περιορισμού μέγιστης ροής	Υδραγωγείο ή υδατόρευμα
16	Αποθήκευση για κάλυψη του περιορισμού ελάχιστου αποθέματος	Ταμιευτήρας
17	Πλεονασματική αποθήκευση, πέραν του περιορισμού μέγιστου αποθέματος	Ταμιευτήρας
18	Παροχή για κάλυψη του στόχου παραγωγής ενέργειας	Στρόβιλος
19	Παροχή	Αντλιοστάσιο
20	Πλεονασματική παροχή, πέραν της απαιτούμενης για την κάλυψη του στόχου παραγωγής ενέργειας	Στρόβιλος
21	Μεταφορά νερού κατάντη του υδροσυστήματος	Τελικός κόμβος ή ταμιευτήρας

Το μοντέλο διγράφου περιλαμβάνει 7 τύπους κόμβων και 22 τύπους κλάδων, τα χαρακτηριστικά των οποίων συνοψίζονται στους Πίνακες 4.1 και 4.2, αντίστοιχα. Η σχηματοποίηση του μοντέλου, δηλαδή η δημιουργία των οντοτήτων και η περιγραφή της τοπολογίας τους, γίνεται πριν την έναρξη της προσομοίωσης. Όσον αφορά στις ιδιότητες του διγράφου (εισροές, παροχετευτικότητες, μοναδιαία κόστη), ορισμένες είναι σταθερές, οπότε αποτιμώνται άπαξ, ενώ άλλες είναι χρονικά μεταβαλλόμενες, και συνεπώς επικαιροποιούνται σε κάθε χρονικό βήμα, πριν την επίλυση του μοντέλου.

Στο Σχήμα 4.4 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. Στο παράδειγμα, οι πραγματικές διαδρομές νερού απεικονίζονται με συνεχή γραμμή, και οι εικονικές με διακεκομμένη.



Σχήμα 4.4: Παράδειγμα μετασχηματισμού των συνιστωσών ενός 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 εικονικούς κλάδους που αναφέρονται στους σχετικούς περιορισμούς. Στην παρένθεση ορίζονται η παροχετευτικότητα και το μοναδιαίο κόστος κάθε κλάδου.

Η σχηματοποίηση κάθε συνιστώσας του υδροσυστήματος έχει ως εξής:

Οι *κόμβοι* του δικτύου των υδατορευμάτων και υδραγωγείων θεωρούνται χωριστές οντότητες (κόμβοι τύπου 0 και 1), καθώς στους πρώτους υπάρχει η δυνατότητα εισόδου απορροής (μέσω των σχετικών κόμβων εισροής), ενώ στους δεύτερους όχι. Οι τελικοί (κατάντη) κόμβοι των υδατορευμάτων, καθώς και οι κατάντη κόμβοι του των υδραγωγείων για τους οποίους επιτρέπεται η μεταφορά νερού εκτός του υδροσυστήματος, συνδέονται με τον σωρευτικό κόμβο με έναν εικονικό κλάδο, τύπου 21, που αναπαριστά την εκροή του πλεονάζοντος νερού από το υδροσύστημα.

Οι *ταμιευτήρες* αποτελούν την πλέον σύνθετη συνιστώσα, καθώς η λειτουργία τους αναπαρίσταται από τρεις κόμβους και, στη γενική περίπτωση, οκτώ κλάδους. Οι τρεις κόμβοι υλοποιούν την

προσφορά (κόμβος τύπου 3), αποθήκευση (κόμβος τύπου 4) και απόληψη νερού (κόμβος τύπου 5). Στο παράδειγμα του Σχήματος 4.4, οι εν λόγω κόμβοι συμβολίζονται με a, b και c, αντίστοιχα. Ως προσφορά νερού νοείται το διαθέσιμο επιφανειακό υδατικό δυναμικό για αποθήκευση και απόληψη, που εκτιμάται προσθέτοντας στο τρέχον απόθεμα τις καθαρές υδρολογικές εισροές. Η διαδρομή a-c (κλάδος τύπου 4) αναπαριστά την απόληψη με σκοπό την ικανοποίηση του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας. Συνεπώς, η χωρητικότητα του κλάδου τίθεται ίση με την επιθυμητή απόληψη που ορίζει ο κανόνας, ενώ το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς είναι αρνητικό, ώστε να «αναγκαστεί» το μοντέλο να υλοποιήσει τη συγκεκριμένη απόληψη. Η διαδρομή a-b (κλάδος τύπου 5) αναπαριστά τη δυνητική αποθήκευση νερού, και έχει απεριόριστη παροχτευτικότητα<sup>1</sup> και μηδενικό μοναδιαίο κόστος. Τέλος, η διαδρομή b-c (κλάδος τύπου 6) αναπαριστά τη μεταφορά πλεονάζουσας απόληψης, πέραν της τιμής-στόχου του κανόνα λειτουργίας. Αυτή είναι αναγκαία όταν οι φυσικοί και λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου δεν επιτρέπουν την ικανοποίηση των στόχων, με την πραγματοποίηση απολήψεων ακριβώς ίσων με τις επιθυμητές. Για το λόγο αυτό, στον σχετικό κλάδο τίθεται ένα θετικό μοναδιαίο κόστος μεταφοράς, που εμποδίζει την παραβίαση του κανόνα λειτουργίας, όταν αυτό δεν είναι αναγκαίο. Οι υπόλοιποι κλάδοι συνδέουν τον κόμβο b με τον σωρευτικό κόμβο και αναπαριστούν μεταβλητές αποθήκευσης μεταξύ διαφόρων ορίων αποθέματος. Συγκεκριμένα::

- αποθήκευση μέχρι τη στάθμη του νεκρού όγκου (κλάδος τύπου 7)·
- επιθυμητή αποθήκευση μεταξύ του νεκρού όγκου και της ελάχιστης τιμής που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός αποθέματος (κλάδος τύπου 16)·
- επιτρεπόμενη αποθήκευση μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που επιβάλλουν οι σχετικοί περιορισμοί αποθέματος (κλάδος τύπου 8)·
- πλεονάζουσα αποθήκευση μεταξύ της μέγιστης τιμής που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός αποθέματος και της μικτής χωρητικότητας του ταμιευτήρα (κλάδος τύπου 17)·
- υπερχειλίση (κλάδος τύπου 9).

Τα κόστη των κλάδων 7 και 16 είναι αρνητικά, με το πρώτο να είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερο από το δεύτερο, καθώς αναφέρεται στον φυσικό περιορισμό διατήρησης του νεκρού όγκου. Το κόστος του κλάδου 8 είναι μηδενικό, καθώς θεωρείται αδιάφορο αν τα διαθέσιμα νερά αποθηκευτούν ή όχι στον συγκεκριμένο ταμιευτήρα. Το κόστος του κλάδου 17 είναι θετικό, ώστε να εμποδίσει την παραβίαση του σχετικού περιορισμού μέγιστου αποθέματος. Τέλος, το κόστος του κλάδου 9 είναι θετικό και ίσο, κατ' απόλυτη τιμή, με αυτό του κλάδου 7, ώστε η υπερχειλίση να πραγματοποιείται μόνο στην περίπτωση εξάντλησης της χωρητικότητας τόσο του συγκεκριμένου ταμιευτήρα όσο και του κατάντη συστήματος.

Οι γεωτρήσεις αναπαρίστανται ως κόμβοι προσφοράς νερού, των οποίων η εισροή είναι ίση με την αντίστοιχη δυναμικότητα. Κάθε γεώτρηση συνδέεται, μέσω δύο εικονικών κλάδων, με τον κόμβο του δικτύου που τροφοδοτεί και τον σωρευτικό κόμβο. Οι δύο κλάδοι έχουν κοινή παροχτευτικότητα, ίση με την εισροή. Η παροχή του πρώτου (κλάδος τύπου 10) αντιστοιχεί στην ποσότητα νερού που αντλείται, ενώ του δεύτερου (κλάδος τύπου 11) αντιστοιχεί την περίσσεια της προσφοράς υπόγειου νερού που αποθηκεύεται στον υδροφορέα. Το μοναδιαίο κόστος του κλάδου άντλησης εξαρτάται από τις τιμές των παραμετρικών ορίων λειτουργίας της γεώτρησης και των επίκαιρων αποθεμάτων των ταμιευτήρων σε σχέση με την ολική τους χωρητικότητα. Αν το ποσοστό πλήρωσης των ταμιευτήρων είναι μικρότερο από το κάτω όριο, τότε η γεώτρηση ενεργοποιείται κατά προτεραιότητα, και συνεπώς το κόστος είναι αρνητικό. Αν το ποσοστό πλήρωσης ξεπερνά το άνω όριο, τότε τίθεται ένα μεγάλο θετικό κόστος, ώστε να εμποδιστεί η χρήση της γεώτρησης. Τέλος, σε ενδιάμεσες τιμές του ποσοστού πλήρωσης το κόστος τίθεται ίσο με το πραγματικό μοναδιαίο κόστος άντλησης, όπως εκτιμάται με

---

<sup>1</sup> Για λόγους μαθηματικής ευστάθειας, ως άπειρη παροχτευτικότητα νοείται μια πολύ μεγάλη τιμή, που τίθεται συμβατικά ίση με τη συνολική προσφορά νερού στο υδροσύστημα, το εκάστοτε χρονικό βήμα.

βάση την τιμή μονάδας καταναλισκόμενης ενέργειας. Όσον αφορά στο κόστος του κλάδου υπόγειας αποθήκευσης, αυτό είναι μηδενικό, καθώς θεωρείται αδιάφορο αν οι διαθέσιμοι υπόγειοι πόροι παραμείνουν ή όχι στον υδροφορέα.

Τα *υδατορεύματα* και *υδραγωγεία* αναπαρίστανται από τους κλάδους που συνδέουν τους αντίστοιχους ανάντη και κατόντη κόμβους. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των εν λόγω κλάδων (παροχετευτικότητα, μοναδιαίο κόστος) ταυτίζονται με τα πραγματικά. Επισημαίνεται ότι στα υδατορεύματα, όπου δεν υπάρχει η έννοια της παροχετευτικότητας, θεωρείται η συμβατική τιμή παροχής που είναι μαθηματικά ισοδύναμη της άπειρης. Επιπλέον, το μοναδιαίο κόστος λαμβάνει μια πολύ μικρή αρνητική τιμή, καθώς οι επιφανειακές απορροές μεταφέρονται κατά προτεραιότητα στο υδρογραφικό δίκτυο παρά στο δίκτυο των υδραγωγείων.

Στη γενικότερη περίπτωση ύπαρξης απωλειών λόγω διηθήσεων ή διαρροών, καθώς και περιορισμών ελάχιστης και μέγιστης ροής, δημιουργούνται όχι ένας αλλά τέσσερις κλάδοι. Συγκεκριμένα::

- οι κλάδοι τύπου 1 και 3 συνδέουν τον ανάντη κόμβο με τον σωρευτικό κόμβο, και αναπαριστούν τη μεταφορά των διηθήσεων και διαρροών από υδατορεύματα και υδραγωγεία, αντίστοιχα·
- οι κλάδοι τύπου 0 και 2 αναπαριστούν την πραγματική διαδρομή κατά μήκος ενός υδατορεύματος ή υδραγωγείου, αντίστοιχα, και μεταφέρουν την επιτρεπόμενη παροχή μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που επιβάλλουν οι σχετικοί περιορισμοί ελέγχου της ροής·
- οι κλάδοι τύπου 14 δημιουργούνται παράλληλα στην πραγματική διαδρομή και μεταφέρουν την επιθυμητή παροχή μέχρι την τιμή που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός ελάχιστης ροής·
- οι κλάδοι τύπου 15 δημιουργούνται παράλληλα στην πραγματική διαδρομή και μεταφέρουν την πλεονάζουσα παροχή μεταξύ της τιμής που επιβάλλει ο σχετικός περιορισμός μέγιστης ροής και της παροχετευτικότητας.

Η ύπαρξη διηθήσεων (κλάδοι τύπου 1) και διαφυγών (κλάδοι τύπου 3) εισάγει επιπλέον περιορισμούς στο μαθηματικό μοντέλο του διγράφου, όπως εξηγείται στο εδάφιο 4.5.4. Το μοναδιαίο κόστος των σχετικών κλάδων είναι ίδιο με αυτό των πραγματικών διαδρομών (κλάδοι τύπου 0 και 2). Επιπλέον, σε αντιστοιχία με τους περιορισμούς ελέγχου των αποθεμάτων ταμιευτήρων, το κόστος των κλάδων τύπου 14 είναι αρνητικό, ώστε να επιβάλει τη μεταφορά της επιθυμητής παροχής, ενώ των κλάδων τύπου 15 θετικό, ώστε να εμποδίσουν τη μεταφορά παροχής μεγαλύτερης της επιτρεπόμενης.

Οι *στροβίλοι* στους οποίους έχει οριστεί στόχος παραγωγής ενέργειας, αναπαρίστανται από δύο παράλληλους κλάδους. Ο πρώτος (κλάδος τύπου 18) έχει αρνητικό κόστος, ώστε να μεταφέρει την απαιτούμενη παροχή για την ικανοποίηση του στόχου, ενώ ο δεύτερος (κλάδος τύπου 20) μεταφέρει χωρίς κόστος την πλεονάζουσα παροχή, μέχρι εξάντλησης της παροχετευτικότητας του στροβίλου.

Τα *αντλιοστάσια* αναπαρίστανται ως κλάδοι, παροχετευτικότητας ίσης με αυτή του αντλιοστασίου, για το επίκαιρο ύψος πτώσης, και κόστους ίσου με το μοναδιαίο κόστος άντλησης. Το τελευταίο είναι συνάρτηση του ύψους πτώσης, της ειδικής ενέργειας και της την τιμής μονάδας καταναλισκόμενης ενέργειας.

Τέλος, σε κόμβους και ταμιευτήρες όπου ορίζονται *στόχοι κατανάλωσης* δημιουργούνται εικονικοί κλάδοι (κλάδοι τύπου 12) που συνδέουν τις θέσεις ζήτησης με τον σωρευτικό κόμβο του διγράφου. Η παροχετευτικότητα κάθε τέτοιου κλάδου είναι ίση με την επίκαιρη ζήτηση, ενώ το μοναδιαίο κόστος του είναι αρνητικό, ώστε να επιβάλει την πραγματοποίηση απολήψεων για την ικανοποίηση του εν λόγω στόχου. Στην περίπτωση που μέρος της κατανάλωσης επιστρέφει στο δίκτυο, τότε δημιουργείται μία ακόμη διαδρομή (κλάδος τύπου 13), που συνδέει τη θέση ζήτησης με τον κόμβο επιστροφής. Οι επιστροφές νερού εισάγουν επιπλέον περιορισμούς στο μαθηματικό μοντέλο του διγράφου, όπως εξηγείται στο εδάφιο 4.5.5.

Στον Πίνακα 4.3 συνοψίζονται ο απαιτούμενος αριθμός των κόμβων και κλάδων που εισάγονται στο μοντέλου διγράφου για κάθε συνιστώσα του υδροσυστήματος. Ειδικότερα, για κάθε στόχο και λειτουργικό περιορισμό του συστήματος εισάγεται ένας εικονικός κλάδος, το μοναδιαίο κόστος του οποίου εξαρτάται από τη σειρά προτεραιότητας του αντίστοιχου στόχου/περιορισμού. Ειδικότερα, στην περίπτωση στόχων κατανάλωσης και περιορισμών ελάχιστης παροχής ή ελάχιστου αποθέματος, το κόστος είναι αρνητικό, ώστε να υποχρεώσει τη μεταφορά νερού. Στην αντίστροφη περίπτωση περιορισμών μέγιστης παροχής ή μέγιστου αποθέματος, το κόστος είναι θετικό ώστε να επιβάλει ποινή στην παραβίαση του εν λόγω περιορισμού. Τα κόστη αυτά είναι, κατ' απόλυτη τιμή, μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερα την ποινής που σχετίζεται με την ικανοποίηση των επιθυμητών απολήψεων που προκύπτουν από την εφαρμογή των κανόνων λειτουργίας και μια τάξη μεγέθους μικρότερα την ποινής που σχετίζεται με την ικανοποίηση των φυσικών περιορισμών. Λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο καθορισμού τους δίνονται στο εδάφιο 4.5.5.

Πίνακας 4.3: Απαιτούμενος αριθμός κόμβων και κλάδων που εισάγονται στο μοντέλου διγράφου για κάθε συνιστώσα του υδροσυστήματος.

Συνιστώσα υδροσυστήματος	Πλήθος κόμβων	Πλήθος κλάδων
Ενδιάμεσος κόμβος υδατορεύματος ή υδραγωγείου	1	0
Τελικός κόμβος, με δυνατότητα εκροής κατάντη	1	1
Ταμειυτήρας	3	6
Γεώτρηση	1	2
Υδατόρευμα ή υδραγωγείο χωρίς απώλειες	2	1
Υδατόρευμα ή υδραγωγείο με απώλειες	2	2
Στρόβιλος, χωρίς στόχο παραγωγής ενέργειας	2	1
Στρόβιλος, με στόχο παραγωγής ενέργειας	2	2
Αντλιοστάσιο	2	1
Στόχος κατανάλωσης, χωρίς δυνατότητα επιστροφής νερού	1	1
Στόχος κατανάλωσης, με δυνατότητα επιστροφής νερού	1	2
Περιορισμός ελάχιστου ή μέγιστου αποθέματος	0	1
Περιορισμός ελάχιστης ή μέγιστης παροχής	0	1

#### 4.5.4 Προσομοίωση διαρροών και διηθήσεων

Στην περίπτωση που το υδροσύστημα περιλαμβάνει στοιχεία μεταφοράς με γραμμικές απώλειες, δηλαδή υδατορεύματα με διηθήσεις ή υδραγωγεία με διαρροές, δεν ισχύει η δομή του προβλήματος μεταφόρτωσης (βλ. 4.5.2), καθώς εισάγονται επιπλέον περιορισμοί. Έστω στοιχείο μεταφοράς με συντελεστή διαρροών,  $\delta$ , στο οποίο εισέρχεται ποσότητα νερού  $x$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Αν  $x_1$  η ποσότητα νερού που καταλήγει στον κατάντη κόμβο και  $x_2$  οι κατά μήκος απώλειες, ισχύουν οι ακόλουθες προφανείς σχέσεις:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 &= x \\ x_1 &= (1 - \delta) x \\ x_2 &= \delta x \end{aligned} \quad (4.48)$$

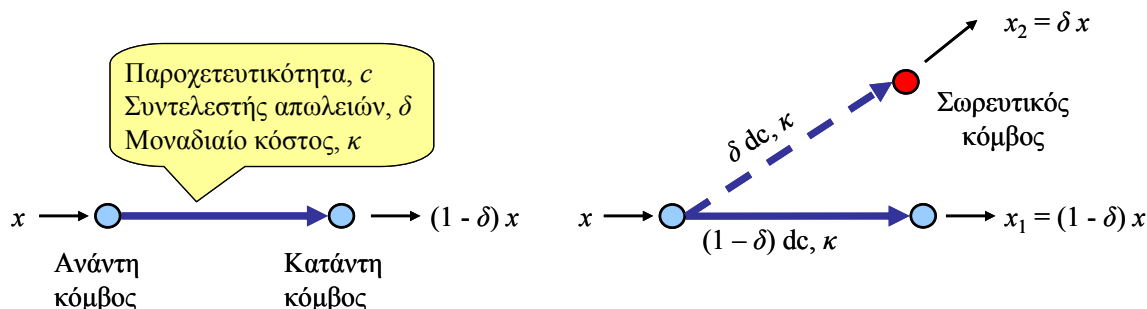
Με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων, προκύπτει ο φυσικός περιορισμός:

$$x_2 - \frac{\delta}{1 - \delta} x_1 = 0 \quad (4.49)$$

που σε μητρική μορφή γράφεται:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (4.50)$$

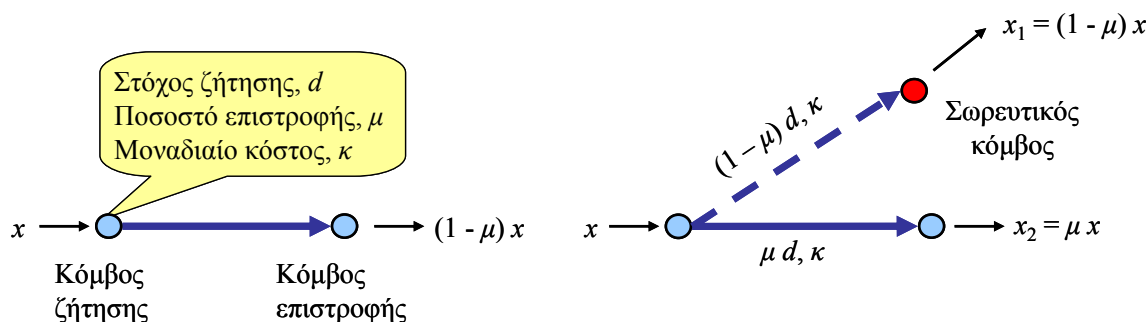
όπου  $\Delta$  μητρώο με στοιχεία από το σύνολο  $\{-1, \delta_i / 1 - \delta_i, 0\}$  και  $i$  ο δείκτης του στοιχείου μεταφοράς. Συνεπώς, αν και η σχέση (4.49), η οποία τίθεται επιπρόσθετα των εξισώσεων συνέχειας στους κόμβους, εξακολουθεί να είναι γραμμική, οι συντελεστές της δεν λαμβάνουν πλέον τιμές από το σύνολο  $\{-1, 1, 0\}$ , όπως συμβαίνει με τα στοιχεία του μητρώου πρόσπτωσης  $\mathbf{A}$ . Αυτό σημαίνει ότι δεν ισχύουν οι μαθηματικές υποθέσεις του μοντέλου μεταφόρτωσης, και συνεπώς δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η δικτυακή μέθοδος simplex για την επίλυση του προβλήματος.



Σχήμα 4.5: Μετασχηματισμός στοιχείου μεταφοράς με απώλειες σε συνιστώσες μοντέλου διγράφου.

#### 4.5.5 Προσομοίωση επιστροφών νερού

Η αναπαράσταση των επιστροφών νερού διαμέσου κόμβων κατανάλωσης παρουσιάζει ομοιότητες με την περίπτωση των απωλειών σε υδατορεύματα και υδραγωγεία. Έστω  $d$  η επίκαιρη ζήτηση σε έναν κόμβο και  $\mu$  το ποσοστό της κατανάλωσης που επιστρέφει σε έναν άλλο κόμβο του υδροσυστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Μετασχηματισμός κόμβου ζήτησης με επιστροφή σε συνιστώσες μοντέλου διγράφου.

Αν  $x$  είναι η ολική απόληψη,  $x_1$  η καθαρή ποσότητα που καταναλώνεται και  $x_2$  η ποσότητα που επιστρέφει, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 &= x \\ x_1 &= (1 - \mu)x \\ x_2 &= \mu x \end{aligned} \quad (4.51)$$

Με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων, προκύπτει ο φυσικός περιορισμός:

$$x_2 - \frac{\mu}{1 - \mu} x_1 = 0 \quad (4.52)$$

που σε μητρική μορφή γράφεται:

$$\mathbf{M} \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (4.53)$$

όπου  $\mathbf{M}$  μητρώο με στοιχεία από το σύνολο  $\{-1, \mu_i / 1 - \mu_i, 0\}$  και  $i$  ο δείκτης του κόμβου. Κατά συνέπεια, και σε αυτή την περίπτωση δεν ισχύουν οι μαθηματικές υποθέσεις του μοντέλου μεταφόρτωσης, καθώς εκτός των εξισώσεων συνέχειας τίθενται επιπλέον περιορισμοί, με συντελεστές εκτός του συνόλου  $\{-1, 1, 0\}$ .

#### 4.5.6 Μοντέλο αναδρομικού υπολογισμού μοναδιαίου κόστους

Ο τρόπος καθορισμού των τιμών μοναδιαίου κόστους συνιστά ένα εξαιρετικά σημαντικό όσο και πρωτότυπο σημείο του μαθηματικού πλαισίου που αναπτύχθηκε, καθώς εξασφαλίζει την ικανοποίηση των τεσσάρων απαιτήσεων που τέθηκαν στο εδάφιο 4.5.1. Σύμφωνα με αυτές, η κατανομή των υδατικών πόρων στο υδροσύστημα οφείλει να εξασφαλίζει, με την ακόλουθη σειρά προτεραιότητας:

1. αυστηρή τήρηση των φυσικών περιορισμών·
2. ιεραρχική ικανοποίηση των στόχων και λειτουργικών περιορισμών·
3. ελαχιστοποίηση της απόκλισης από την επιθυμητή πολιτική των κανόνων λειτουργίας·
4. ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των υδατικών πόρων από τις πηγές στις θέσεις κατανάλωσης.

Για τον λόγο αυτό, οι μεταβλητές του μοντέλου, όπως έχει αντιστοιχιστεί στους κλάδους του δικτύου, ομαδοποιούνται σε τέσσερα επίπεδα σημαντικότητας, έτσι ώστε το μοναδιαίο κόστος (κατ' απόλυτη τιμή) κάθε κλάδου που ανήκει στο επίπεδο  $k$  να ξεπερνά το αθροιστικό κόστος των κλάδων όλων των προηγούμενων κατηγοριών, δηλαδή:

$$|c|^{[k]} = \sum_{j=1}^{n(k)} |c_j| + \varepsilon \quad (4.54)$$

όπου  $c_j$  το μοναδιαίο κόστος του κλάδου  $j$ ,  $n(k)$  το πλήθος των κλάδων που κατατάσσονται έως το  $k$  επίπεδο σημαντικότητας ( $k = 0, \dots, 7$ ) και  $\varepsilon$  μια μικρή θετική τιμή. Άμεση συνέπεια της (4.54) είναι αφενός η ανεξάρτητη ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κάθε κατηγορίας και αφετέρου η κατά προτεραιότητα ελαχιστοποίηση των τιμών κόστους που ανήκουν σε υψηλότερες κατηγορίες.

Πίνακας 4.4: Επίπεδα σημαντικότητας κόστους και σχετικές διεργασίες που πραγματοποιούνται μέσω των αντίστοιχων κλάδων του μοντέλου διγράφου.

Επίπεδο	Διεργασίες με θετικό κόστος	Διεργασίες με αρνητικό κόστος
1	Μεταφορά νερού μέσω υδραγωγείων, γεωτρήσεων και αντλιοστασίων, πραγματοποίηση διαρροών	Εκροή από στροβίλους για παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας
2	Πλεονάζουσα απόληψη από ταμειυτήρες, πάνω από την επιθυμητή τιμή	Απόληψη από ταμειυτήρες, μέχρι την επιθυμητή τιμή
3	Ενεργοποίηση γεωτρήσεων κατά παράβαση του κανόνα λειτουργίας	Κατά προτεραιότητα χρήση γεωτρήσεων
4	Μεταφορά επιφανειακών υδατικών πόρων εκτός του υδροσυστήματος	
5	Πλεονάζουσα παροχή και απόθεμα, καθ' υπέρβαση των λειτουργικών περιορισμών	Κατανάλωση και επιστροφή νερού, τήρηση ορίων ελάχιστης παροχής και αποθέματος, εκροή από στροβίλους για παραγωγή ενέργειας
6	Υπερχείλιση ταμειυτήρα	Πλήρωση ταμειυτήρων μέχρι το νεκρό όγκο
7	Μη επιτρεπόμενη υπερχείλιση	

Υπενθυμίζεται ότι κάθε κλάδος αναπαριστά μια συγκεκριμένη διεργασία με αρνητικό, μηδενικό ή θετικό μοναδιαίο κόστος, ανάλογα με το αν η πραγματοποίησή της είναι επιθυμητή, αδιάφορη ή



ανεπιθύμητη, αντίστοιχα. Ο υπολογισμός των επιμέρους τιμών κόστους γίνεται με μια αναδρομική διαδικασία, που ξεκινά από τα χαμηλότερα επίπεδα. Συγκεκριμένα, χωρίς κόστος πραγματοποιούνται οι εξής διεργασίες, που εντάσσονται στο **μηδενικό επίπεδο** σημαντικότητας:

- η μεταφορά της επιθυμητής παροχής στα υδατορεύματα, μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που ορίζουν οι σχετικοί λειτουργικοί περιορισμοί (κλάδοι τύπου 0)·
- η πραγματοποίηση διηθήσεων (κλάδοι τύπου 1)·
- η δυναμική αποθήκευση του διαθέσιμου δυναμικού των ταμιευτήρων (κλάδοι τύπου 5)·
- η επιθυμητή αποθήκευση νερού στους ταμιευτήρες, μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που ορίζουν οι σχετικοί λειτουργικοί περιορισμοί (κλάδοι τύπου 8)·
- η αποθήκευση του πλεονασματικής διαθεσιμότητας υπόγειων νερών στις θέσεις των γεωτρήσεων (κλάδοι τύπου 11)·
- η μεταφορά νερού κατάντη του υδροσυστήματος, διαμέσου των τελικών κόμβων και ταμιευτήρων (κλάδοι τύπου 21).

Κάθε άλλη διεργασία ή, ισοδύναμα, κάθε άλλος τύπος κλάδου, κατατάσσεται σε ένα μη μηδενικό επίπεδο σημαντικότητας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.4.

Στο **επίπεδο 1** εντάσσονται οι διεργασίες με πραγματικό κόστους ή όφελος, δηλαδή:

- η μεταφορά της επιθυμητής παροχής στα υδραγωγεία, μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής που ορίζουν οι σχετικοί λειτουργικοί περιορισμοί (κλάδοι τύπου 2)·
- η πραγματοποίηση διαρροών στα υδραγωγεία (κλάδοι τύπου 3)·
- η άντληση νερού από γεωτρήσεις (κλάδοι τύπου 10)·
- η μεταφορά παροχής μέσω των αντλιοστασίων (κλάδοι τύπου 19)·
- η μεταφορά της πλεονάζουσας παροχής (πάνω, δηλαδή, από την επιθυμητή τιμή που προβλέπει ο σχετικός στόχος παραγωγής ενέργειας) μέσω των στροβίλων (κλάδοι τύπου 20).

Τα κόστη όλων των κλάδων πλην του τελευταίου είναι θετικά, και υπολογίζονται είτε άμεσα, με βάση το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς, είτε έμμεσα, με βάση την ειδική ενέργεια, το ύψος πτώσης και την τιμή μονάδας άντλησης. Τονίζεται ότι το κόστος των γεωτρήσεων είναι το πραγματικό, που υποθέτει ότι οι τελευταίες βρίσκονται στο ενδιάμεσο επίπεδο ενεργοποίησης, που ορίζεται με βάση τον σχετικό κανόνα λειτουργίας (βλ. 4.4.5). Το μοναδιαίο κόστος των στροβίλων είναι αρνητικό, και τιμάται με βάση την τιμή μονάδας δευτερεύουσας ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση, στο αρχικό κόστος προστίθεται η ελάχιστη τιμή  $\varepsilon$ , ώστε ακόμα και αν μια ροή πραγματοποιείται χωρίς κόστος, να διαφοροποιείται σε σχέση με τις ροές του μηδενικού επιπέδου. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι πλεονάζουσες επιφανειακές εισροές μεταφέρονται με φυσικό τρόπο, μέσω του υδρογραφικού δικτύου, και όχι μέσω του δικτύου των υδραγωγείων, ενώ τα πλεονάζοντα υπόγεια νερά διατηρούνται αποθηκευμένα, και δεν αντλούνται μέσω των γεωτρήσεων.

Στο **επίπεδο 2** εντάσσονται οι διεργασίες που αφορούν στην ικανοποίηση του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας των ταμιευτήρων, δηλαδή:

- η εκροή νερού για την ικανοποίηση της επιθυμητής απόληψης μέσω των κλάδων τύπου 4, που πραγματοποιείται με αρνητικό μοναδιαίο κόστος  $-c^{[2]}$ .
- η πλεονάζουσα εκροή, πάνω από την τιμή της επιθυμητής απόληψης μέσω των κλάδων τύπου 6, που πραγματοποιείται με θετικό μοναδιαίο κόστος  $c^{[2]}$ .

όπου  $|c^{[2]}|$  το άθροισμα των απόλυτων τιμών κόστους όλων των κλάδων του προηγούμενου επιπέδου, στο οποίο προστίθεται η τιμή  $\varepsilon$ . Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι το μοντέλο τηρεί την κατανομή των αποθεμάτων που επιβάλλουν οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων, μεταφέροντας απολήψεις από τους ανάντη προς τους κατάντη ταμιευτήρες, ανεξαρτήτως κόστους.

Το **επίπεδο 3** αναφέρεται στην άντληση νερού από γεωτρήσεις (κλάδοι τύπου 10), σε σχέση με την πολιτική λειτουργίας τους. Συγκεκριμένα, προκειμένου να εμποδιστεί η χρήση μιας γεώτρησης στην περίπτωση που το ποσοστό πλήρωσης των ταμιευτήρων είναι μεγαλύτερο του σχετικού ανωφλίου  $b_i^{up}$ , τότε θεωρείται μοναδιαίο κόστος ίσο  $c^{[3]}$ . Αντίστοιχα, όταν επιβάλλεται η χρήση της γεώτρησης, δεδομένου ότι το ποσοστό πλήρωσης των ταμιευτήρων είναι μικρότερο του σχετικού κατωφλίου  $b_i^{down}$ , το μοναδιαίο κόστος πραγματοποίησης των απολήψεων είναι αρνητικό, και ίσο  $-c^{[3]}$ . Στην ενδιάμεση περίπτωση, θεωρείται το πραγματικό κόστος, το οποίο εντάσσεται στο επίπεδο 1.

Το **επίπεδο 4** αναφέρεται στη μεταφορά επιφανειακών υδατικών πόρων εκτός του υδροσυστήματος, διαμέσου των τελικών κόμβων και ταμιευτήρων, που υλοποιείται μέσω των κλάδων τύπου 21. Στους εν λόγω κλάδους τίθεται μοναδιαίο κόστος ίσο με  $c^{[4]}$ , ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες του υδροσυστήματος.

Το **επίπεδο 5** αναφέρεται στην ικανοποίηση των στόχων και λειτουργικών περιορισμών, με βάση τη σειρά προτεραιότητας που ορίζει ο χρήστης. Αν επιδιώκεται η μεταφορά νερού, τότε το κόστος είναι αρνητικό, διαφορετικά, είναι θετικό. Με αρνητικό κόστος πραγματοποιούνται οι εξής διεργασίες:

- η κατανάλωση νερού για την ικανοποίηση του σχετικού στόχου ζήτησης (κλάδοι τύπου 12)·
- η επιστροφή σταθερής ποσότητας νερού που καταναλώθηκε (κλάδοι τύπου 13)·
- η μεταφορά παροχής μέσω υδατορευμάτων και υδραγωγείων για την ικανοποίηση του σχετικού περιορισμού ελάχιστης ροής (κλάδοι τύπου 14)·
- η αποθήκευση νερού σε ταμιευτήρες για την ικανοποίηση του σχετικού περιορισμού ελάχιστου αποθέματος (κλάδοι τύπου 16)·
- η μεταφορά της παροχής μέσω των στροβίλων για την ικανοποίηση του σχετικού στόχου παραγωγής ενέργειας (κλάδοι τύπου 18).

Ομοίως, με θετικό κόστος πραγματοποιούνται οι εξής διεργασίες:

- η μεταφορά πλεονάζουσας παροχής μέσω υδατορευμάτων και υδραγωγείων, καθ' υπέρβαση του σχετικού περιορισμού μέγιστης ροής (κλάδοι τύπου 15)·
- η πλεονάζουσα αποθήκευση νερού σε ταμιευτήρες, καθ' υπέρβαση του σχετικού περιορισμού μέγιστου αποθέματος (κλάδοι τύπου 17).

Οι επιμέρους τιμές κόστους, κατ' απόλυτη τιμή, εξαρτώνται από την προτεραιότητα κάθε στόχου και περιορισμού. Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει ότι μεταξύ στόχων που εντάσσονται σε διαφορετικό επίπεδο προτεραιότητας, ικανοποιείται πρώτα αυτός που βρίσκεται στην υψηλότερη ιεραρχία. Επιπλέον, όλες οι διεργασίες του επιπέδου 5 υλοποιούνται κατά προτεραιότητα σε σχέση με όλες τις προηγούμενες. Συνεπώς, το μοντέλο πρώτα επιδιώκει την ικανοποίηση των στόχων και λειτουργικών περιορισμών, ακολούθως την τήρηση των κανόνων λειτουργίας των ταμιευτήρων και γεωτρήσεων, και σε τελευταία προτεραιότητα τον εντοπισμό της οικονομικά προσηφορότερης διαδρομής.

Το **επίπεδο 6** αναφέρεται στην τήρηση των φυσικών περιορισμών των ταμιευτήρων, δηλαδή:

- την αποθήκευση νερού μέχρι την πλήρωση του νεκρού όγκου, που υλοποιείται μέσω των κλάδων τύπου 7 και πραγματοποιείται με αρνητικό μοναδιαίο κόστος  $-c^{[6]}$ .
- την υπερχειλίση, που υλοποιείται μέσω των κλάδων τύπου 9 και πραγματοποιείται με θετικό μοναδιαίο κόστος  $c^{[6]}$ .

Η διαδικασία εγγυάται ότι, πέραν όλων των υπόλοιπων απαιτήσεων, το μοντέλο θα γεμίσει τους ταμιευτήρες τουλάχιστον μέχρι της στάθμη υδροληψίας, και δεν θα πραγματοποιήσει υπερχειλίσεις εκτός και αν έχει εξαντληθεί η παροχεταιτικότητα του κατάντη δικτύου. Ειδικότερα, όσον αφορά στους κλάδους τύπου 9, ορίζεται το επιπλέον **επίπεδο 7**, που αναφέρεται στους ταμιευτήρες για τους

οποίους η αποφυγή υπερχειλίσης εισάγεται ως διαχειριστικός περιορισμός. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή του μοναδιαίου κόστους στους εν λόγω κλάδους είναι ίση με  $2c^{[7]}$ .

#### 4.5.7 Επικαιροποίηση ιδιοτήτων διγράφου

Η διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου του διγράφου προϋποθέτει τη διαμόρφωση ενός πλήθους μητρώων, συγκεκριμένα:

- του μητρώου πρόσπτωσης **A**, με στοιχεία από το σύνολο  $\{-1, 1, 0\}$ , που περιγράφει τις εξισώσεις συνέχειας των κόμβων με βάση την τοπολογία του μοντέλου, δηλαδή τον τρόπο σύνδεσης των κόμβων και κλάδων·
- του μητρώου διαρροών **B**, με στοιχεία από το σύνολο  $\{-1, \delta_i / 1 - \delta_i, 0\}$ , που περιγράφει τις εξισώσεις μεταφοράς ενός σταθερού ποσοστού  $\delta_i$  της διερχόμενης παροχής των υδατορευμάτων και υδραγωγείων εκτός του υδροσυστήματος, δηλαδή στο σωρευτικό κόμβο·
- του μητρώου επιστροφών **M**, με στοιχεία από το σύνολο  $\{-1, \mu_i / 1 - \mu_i, 0\}$ , που περιγράφει τις εξισώσεις μεταφοράς ενός σταθερού ποσοστού  $\mu_i$  της καταναλισκόμενης ποσότητας κάθε κόμβου σε κάποιον άλλο κόμβο του υδροσυστήματος·
- του διανύσματος προσφοράς **y**, που περιγράφει τις εισροές επιφανειακών και υπόγειων πόρων στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, τους ταμιευτήρες και τις γεωτρήσεις, καθώς και την αρνητική προσφορά (ζήτηση) στον σωρευτικό κόμβο του διγράφου·
- του διανύσματος χωρητικότητας **u**, που περιγράφει την πραγματική ή εικονική μεταφορική ικανότητα των κλάδων του διγράφου·
- του διανύσματος μοναδιαίου κόστους **c**, που περιγράφει το πραγματικό ή εικονικό κόστος μεταφοράς νερού, θετικό ή αρνητικό, διαμέσου των κλάδων του διγράφου.

Τα στοιχεία των μητρώων πρόσπτωσης **A** και επιστροφών **M** ορίζονται άπαξ, ενώ, αντίθετα, ορισμένα τουλάχιστον από τα στοιχεία των υπόλοιπων μητρώων και διανυσμάτων επικαιροποιούνται σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα:

Τα στοιχεία του μητρώου διαρροών **B** επικαιροποιούνται εφόσον μεταβάλλεται η τιμή κάποιου συντελεστή διαρροής υδραγωγείου, λόγω τεχνικών επεμβάσεων στο δίκτυο. Όσον αφορά στα στοιχεία που εκφράζουν απώλειες των υδατορευμάτων λόγω διήθησης, επειδή πρόκειται για φυσικά μεγέθη δεν υπόκεινται σε διαχρονικές αλλαγές.

Τα στοιχεία του διανύσματος προσφοράς **y**, για κάθε κόμβο του διγράφου πλην του σωρευτικού υπολογίζονται ως:

$$y_i = \begin{cases} i_i & \text{για εισροή νερού σε κόμβο υδατορεύματος} \\ s_i + i_i & \text{για διαθεσιμότητα νερού σε ταμιευτήρα} \\ g_i & \text{για διαθεσιμότητα νερού σε γεώτρηση} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (4.55)$$

Στο σωρευτικό κόμβο τίθεται ως ζήτηση (με αρνητικό πρόσημο) το σύνολο της προσφοράς νερού στο σύστημα, ώστε να ικανοποιείται η αναγκαία συνθήκη (4.43). Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται και στη συνέχεια, ως ισοδύναμη της άπειρης παροχευτικότητας στους σχετικούς εικονικούς κλάδους (π.χ. κλάδοι υπερχειλίσης).

Τα στοιχεία του διανύσματος **u**, δηλαδή οι παροχευτικότητες των κλάδων, αντιστοιχούν είτε σε πραγματικά είτε σε εικονικά μεγέθη. Τα πρώτα αναφέρονται σε φυσικούς περιορισμούς του δικτύου, όπως είναι ο νεκρός όγκος και η ωφέλιμη χωρητικότητα των ταμιευτήρων, η δυναμικότητα των γεωτρήσεων και η παροχευτικότητα των υδραγωγείων, αντλιοστασίων και στροβίλων. Τα υπόλοιπα εκφράζουν επιθυμητά μεγέθη, όπως η επίκαιρη απόληψη-στόχος των ταμιευτήρων και η ζήτηση των

κόμβων, καθώς και σε όρια που προκύπτουν από τους λειτουργικούς περιορισμούς αποθεμάτων και παροχών.

Τέλος, τα στοιχεία του διανύσματος μοναδιαίου κόστους  $\mathbf{c}$ , επειδή παράγονται μέσω της αναδρομικής ιεραρχικής διαδικασίας που περιγράφηκε στο εδάφιο 4.5.6, επικαιροποιούνται σε κάθε χρονικό βήμα. Αυτό συμβαίνει επειδή ορισμένες τουλάχιστον από τις τιμές κόστους του δικτύου εξαρτώνται από χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες (π.χ. αποθέματα ταμειυτήρων, ύψη πτώσης), επηρεάζοντας έτσι την όλη διαδικασία αποτίμησης.

#### 4.5.8 Επίλυση γραμμικού προβλήματος

Με γνωστά πλέον τα στοιχεία των μητρών, διαμορφώνεται το ακόλουθο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού:

$$\begin{aligned} \text{minimise } f(\mathbf{x}) &= \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{έτσι ώστε } \mathbf{A} \mathbf{x} &= \mathbf{y} \\ \mathbf{B} \mathbf{x} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{M} \mathbf{x} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{0} &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned} \tag{4.56}$$

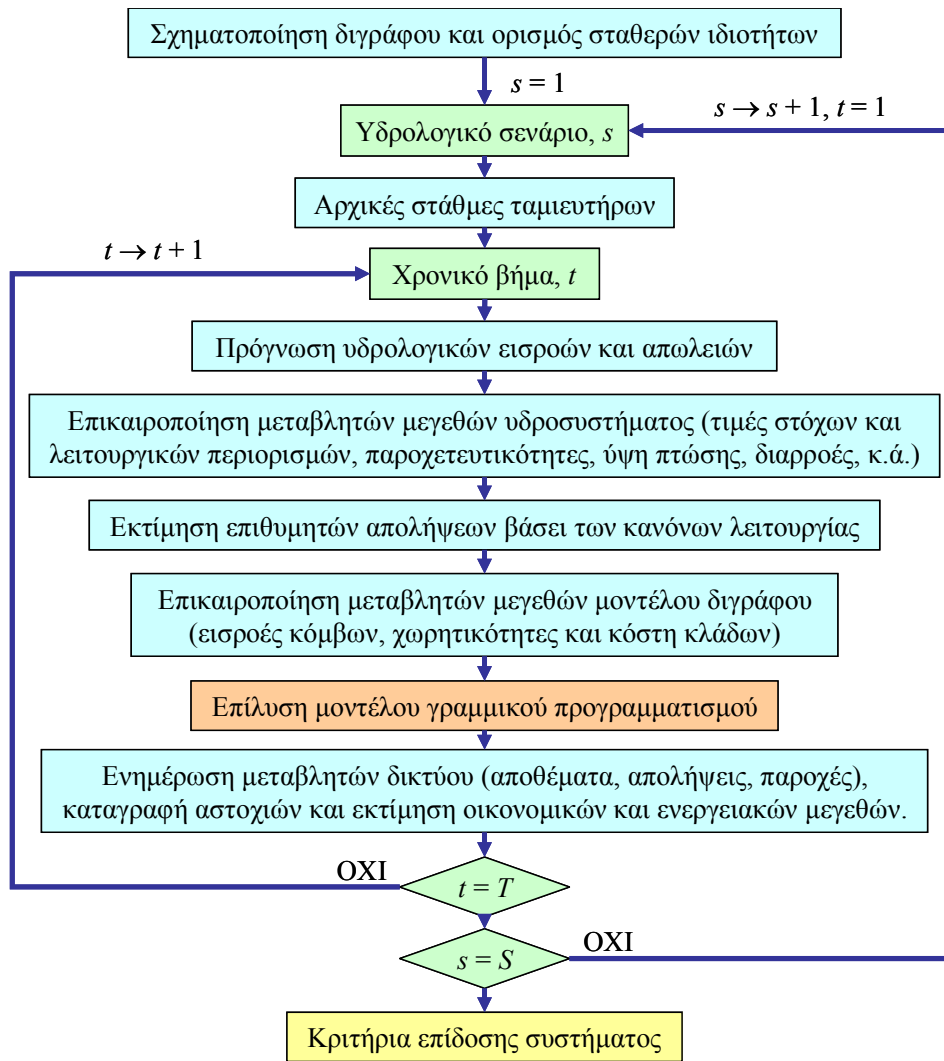
Το εν λόγω πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ελαφρά τροποποιημένο σε σχέση με το τυποποιημένο μοντέλο μεταφόρτωσης, διατηρεί ωστόσο ένα εξαιρετικά ισχυρό πλεονέκτημα, που είναι η *αραιή* (sparse) δομή των μητρών περιορισμών, δηλαδή η ύπαρξη πολλών μηδενικών στοιχείων. Η δομή αυτή επιτρέπει την εφαρμογή ειδικών παραλλαγών της μεθόδου simplex (όχι ωστόσο της δικτυακής simplex), που εγγυώνται πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα επίλυσης σε σχέση με τον συμβατικό αλγόριθμο. Στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, έχει ενσωματωθεί ένας ισχυρός γραμμικός επιλυτής (lp\_solve 5.5.0.10), στην ανάπτυξη του οποίου έχουν συμβάλει αρκετοί ερευνητές παγκοσμίως. Ο επιλυτής είναι ελεύθερο λογισμικό και διατίθεται δωρεάν στο Διαδίκτυο (<http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/>).

#### 4.5.9 Επισκόπηση της διαδικασίας προσομοίωσης

Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου προσομοίωσης, το οποίο αναφέρεται στη γενική περίπτωση της καταληκτικής προσομοίωσης (βλ. 2.3.3). Θεωρείται ότι εξετάζονται  $S$  σεναρία πρόγνωσης με κοινή ημερομηνία εκκίνησης και μήκους  $T$  χρονικών βημάτων (μηνών) έκαστο, που σημαίνει ότι το σύνολο των προσομοιωμένων βημάτων ισούται με  $N = S \times T$ . Η προσομοίωση μόνιμης κατάστασης μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση της καταληκτικής, για την οποία θεωρείται  $S = 1$ .

Για την αρχικοποίηση της διαδικασίας διαμορφώνεται το μοντέλο διγράφου, δηλαδή δημιουργούνται οι συνιστώσες του (κόμβοι, κλάδοι), το μητρώο πρόσπτωσης  $\mathbf{A}$  που περιγράφει την τοπολογία του γράφου, η οποία διατηρείται σταθερή (βλ. 4.5.3), καθώς και τα μητρώα διαρροών και επιστροφών,  $\mathbf{B}$  και  $\mathbf{M}$ . Ακόμη, υπολογίζονται ορισμένες από τις συνιστώσες μοναδιαίου κόστους των κλάδων, που επίσης διατηρούνται σταθερές (π.χ. μηδενικά και πραγματικά κόστη).

Η προσομοίωση εκτελείται σε δύο βρόχους. Ο εξωτερικός βρόχος υλοποιεί τα σεναρία πρόγνωσης, ενώ ο εσωτερικός υλοποιεί τις διεργασίες των χρονικών βημάτων κάθε σεναρίου. Επισημαίνεται ότι ο χρήστης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ έχει τη δυνατότητα οπτικής προβολής της διαδικασίας πάνω στο δίκτυο, μέσω του συστήματος δυναμικής απεικόνισης.



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου προσομοίωσης.

Πριν την εκτέλεση κάθε σεναρίου πρόγνωσης, επαναφέρονται οι συνθήκες εκκίνησης, δηλαδή τα αρχικά αποθέματα των ταμιευτήρων. Ακολούθως, εκτελούνται οι υπολογιστικές διαδικασίες των χρονικών βημάτων, ως εξής:

**Βήμα 1ο:** Γίνεται η πρόγνωση των υδρολογικών εισροών και απωλειών, με βάση τις γνωστές τιμές των χρονοσειρών του τρέχοντος σεναρίου, για το τρέχον χρονικό βήμα. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται οι εισροές στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου και οι καθαρές εισροές στους ταμιευτήρες. Οι τελευταίες εκτιμώνται με βάση τις τιμές απορροής, βροχόπτωσης, εξάτμισης και υπόγειων διαφυγών, συναρτήσει της επίκαιρης στάθμης στην αρχή του βήματος. Ειδικότερα, η εκτίμηση των διαφυγών γίνεται παράγοντας τυχαίους κανονικούς αριθμούς και εφαρμόζοντας τη σχέση (4.6).

**Βήμα 2ο:** Επικαιροποιούνται τα μεταβλητά μεγέθη του υδросυστήματος, δηλαδή οι τιμές των στόχων και λειτουργικών περιορισμών, καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη των υδραγωγείων, αντλιοστασίων και στροβίλων που είτε απαιτούν ενημέρωση λόγω μεταβολής των φυσικών συνθηκών (π.χ. ύψη πτώσης) είτε διαφοροποιούνται σημειακά, ώστε να αποτυπώσουν χρονικά προσδιορισμένες τροποποιήσεις στις ιδιότητες του δικτύου (παροχεταιυτικότητα, συντελεστές διαρροών).

**Βήμα 3ο:** Με βάση τα επίκαιρα αποθέματα των ταμιευτήρων, τις επίκαιρες εισροές και την επίκαιρη ζήτηση εκτιμάται, κατά προσέγγιση, το αναμενόμενο επιφανειακό υδατικό δυναμικό του συστήματος στο τέλος του χρονικού βήματος. Με βάση το εν λόγω δυναμικό, και από την εφαρμογή των κανόνων

λειτουργίας, υπολογίζονται τα επιθυμητά αποθέματα και, συνακόλουθα, οι επιθυμητές απολήψεις των ταμιευτήρων. Επιπλέον, με βάση το ολικό ποσοστό πλήρωσης των ταμιευτήρων, ελέγχεται το επίπεδο ενεργοποίησης κάθε γεώτρησης, για τις δεδομένες παραμέτρους κατωφλίου.

**Βήμα 4ο:** επικαιροποιούνται τα μεταβλητά χαρακτηριστικά μεγέθη του μοντέλου διγράφου, δηλαδή οι εισροές των κόμβων, οι παροχετευτικότητες των κλάδων και οι μεταβλητές τιμές του μοναδιαίου κόστους (βλ. 4.5.5), και ενημερώνονται τα σχετικά μητρώα.

**Βήμα 5ο:** Επιλύεται το μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού και επιστρέφονται οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών ελέγχου που ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος του δικτύου (πραγματικό και εικονικό).

**Βήμα 6ο:** Οι βελτιστοποιημένες μεταβλητές ελέγχου του μοντέλου διγράφου αντιστοιχίζονται στις μεταβλητές του υδροσυστήματος, ώστε να εκφράζουν πραγματικά και όχι ιδεατά μεγέθη (αποθέματα, υπερχειλίσεις, απολήψεις, παροχές). Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του τρέχοντος βήματος, καταγράφονται οι αστοχίες, υπολογίζονται τα σχετικά ελλείμματα καθώς και τα διάφορα οικονομικά και ενεργειακά μεγέθη του δικτύου (κόστη υδραγωγείων, γεωτρήσεων και αντλιοστασίων, παραγωγή ενέργειας στους στροβίλους, κατανάλωση ενέργειας στις γεωτρήσεις και τα αντλιοστάσια).

Μετά το πέρας της διαδικασίας για όλα τα σενάρια πρόγνωσης, και με βάση τα συγκεντρωτικά μεγέθη των προσομοιώσεων (βλ. 4.5.10), αποτιμώνται τα κριτήρια επίδοσης του υδροσυστήματος, από τα οποία διαμορφώνεται, τελικά, η τιμή του καθολικού μέτρου επίδοσης που χρησιμοποιείται ως στοχική συνάρτηση στη διαδικασία βελτιστοποίησης (βλ. 4.6.3).

#### 4.5.10 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Σε κάθε προσομοίωση, ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ διατηρεί στη μνήμη του όλες τις χρονοσειρές απόκρισης. Οι τελευταίες έχουν την ίδια δομή με τα υδρολογικά σενάρια εισόδου, αποτελούν δηλαδή προγνώσεις όλων των μεταβλητών του μαθηματικού μοντέλου υδροσυστήματος. Οι μεμονωμένες τιμές των εν λόγω χρονοσειρών δεν έχουν πρακτική αξία, καθώς αναφέρονται σε ένα τεράστιο πλήθος πιθανών πραγματοποιήσεων των αντίστοιχων μεταβλητών, για κάθε σενάριο εισροών και κάθε χρονικό βήμα. Για το λόγο αυτό, απαιτείται μια επεξεργασία των εν λόγω δειγμάτων, με σκοπό την παραγωγή αποτελεσμάτων γενικού ενδιαφέροντος, που συμβάλλουν στην καλύτερη εποπτεία του συστήματος, την αξιολόγηση των επιλογών και παραδοχών του χρήστη και, τελικά, τη λήψη αποφάσεων.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εντάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- συγκεντρωτικά μεγέθη υδροσυστήματος·
- υδατικά και ενεργειακά ισοζύγια·
- πιθανότητες αστοχίας·
- καμπύλες πρόγνωσης αποθεμάτων και παροχών.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναφέρονται στα ακόλουθα μεγέθη, που υπολογίζονται σε μέση ετήσια βάση:

- ολικό κόστος χρήσης υδραγωγείων, πάγιο και μεταβλητό·
- ολικό κόστος χρήσης αντλιοστασίων και γεωτρήσεων, πάγιο και μεταβλητό·
- ολικό όφελος παραγωγής ενέργειας·
- ολική κατανάλωση νερού σε κόμβους και ταμιευτήρες·
- παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας στους στροβίλους·
- κατανάλωση ενέργειας στα αντλιοστάσια και γεωτρήσεις·
- ολικές απώλειες λόγω υπερχειλίσης.

Υπενθυμίζεται ότι το πάγιο κόστος αναφέρεται σε μια σταθερή δαπάνη, που πραγματοποιείται σε κάθε χρονικό βήμα που ενεργοποιείται η σχετική συνιστώσα του δικτύου, ενώ το μεταβλητό κόστος είναι ευθέως ανάλογο της διερχόμενης παροχής στα υδραγωγεία ή της καταναλισκόμενης ενέργειας στις γεωτρήσεις και αντλιοστάσια. Η πάγια δαπάνη λαμβάνεται υπόψη μόνο στην αποτίμηση της διαχειριστικής πολιτικής, μετά το πέρας της προσομοίωσης, και όχι στο βήμα-προς-βήμα μοντέλο κατανομής, δηλαδή κατά τη λήψη των αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Τα υδατικά και ενεργειακά ισοζύγια υπολογίζονται για δεδομένη χρονική περίοδο, την οποία ορίζει ο χρήστης. Τα εν λόγω ισοζύγια αναφέρονται σε όλες τις συνιστώσες του δικτύου (ταμιευτήρες, κόμβοι, υδατορεύματα, υδραγωγεία, γεωτρήσεις, στρόβιλοι, αντλιοστάσια) και προκύπτουν με στατιστική επεξεργασία των σεναρίων πρόγνωσης. Όλα τα αποτελέσματα δίνονται με τη μορφή μέσων τιμών και τυπικών αποκλίσεων κάθε μεταβλητής, για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο (βλ. Σχήμα 4.8).

	Υήθη	Μόνηος	Εύηνος	Μαθαθάνος	TOTAL
Subcatchment runoff	23.24 (24.03)	15.02 (13.02)	19.31 (17.93)	1.37 (1.73)	<b>58.94</b>
Rainfall	0.12 (0.40)	0.08 (0.29)	0.03 (0.09)	0.02 (0.07)	<b>0.24</b>
Aqueduct inflow		4.42 (7.14)		11.89 (2.69)	<b>16.31</b>
River inflow					<b>0.00</b>
Aquifer inflow					<b>0.00</b>
External inflow					<b>0.00</b>
Returned water					<b>0.00</b>
Leakage	2.82 (4.46)				<b>2.82</b>
Evaporation					<b>0.00</b>
Conduit outflow	6.30 (4.85)	5.08 (9.42)	4.42 (7.14)	1.06 (3.20)	<b>16.86</b>
River outflow			1.29 (4.42)		<b>1.29</b>
Water supply					<b>0.00</b>
Irrigation					<b>0.00</b>
Spill	17.14 (26.98)	18.61 (24.66)	14.61 (13.50)	12.65 (5.93)	<b>63.01</b>
System loss					<b>0.00</b>
Storage usage	-2.90 (21.11)	-4.17 (17.22)	-0.98 (5.24)	-0.44 (3.08)	<b>-8.49</b>
Verification	-0.00	0.00	0.00	-0.00	<b>-0.00</b>
Mean storage [hm <sup>3</sup> ]	42.61 (6.93)	328.89 (23.64)	418.60 (22.81)	190.11 (10.90)	
Mean level [m]	27.33 (72.82)	23.71 (65.68)	7.79 (20.85)	3.91 (10.42)	

Σχήμα 4.8: Παράδειγμα αποτελεσμάτων υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρων.

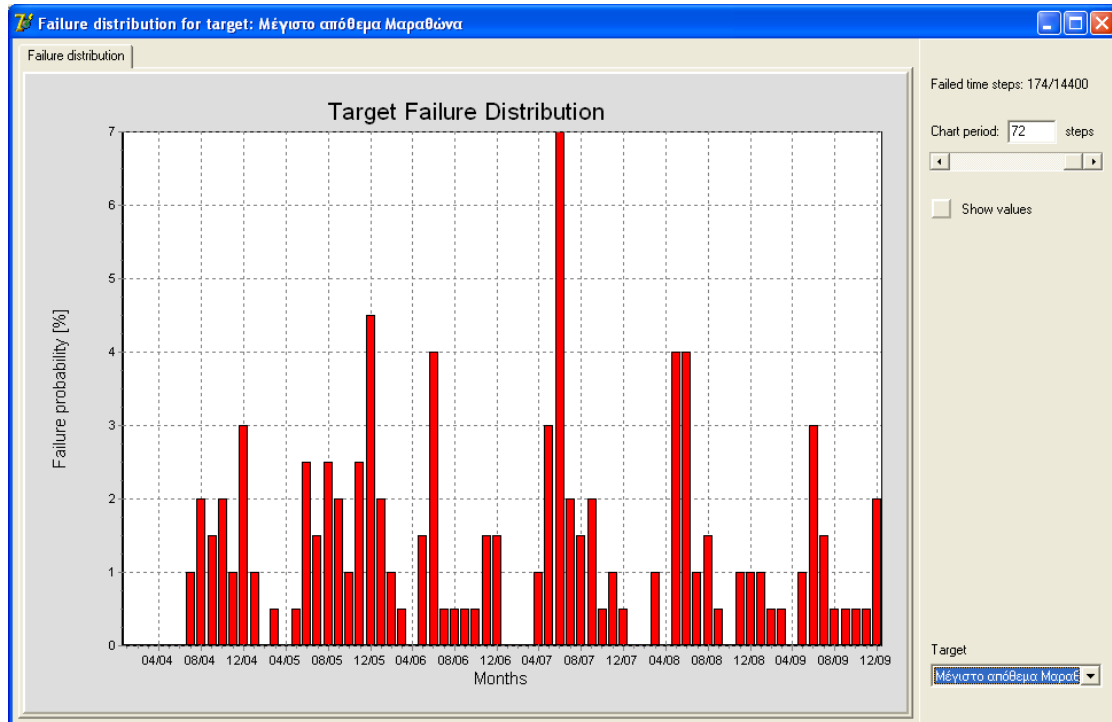
Οι αστοχίες των στόχων και λειτουργικών περιορισμών δίνονται σε υπερετήσια και μηνιαία κλίμακα. Στην υπερετήσια κλίμακα υπολογίζονται τα ακόλουθα μέτρα αστοχίας:

- μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας·
- μέγιστη ετήσια πιθανότητα αστοχίας·
- πλήθος άστοχων χρονικών βημάτων·
- μέσο ετήσιο έλλειμμα·
- μέγιστο ετήσιο έλλειμμα.

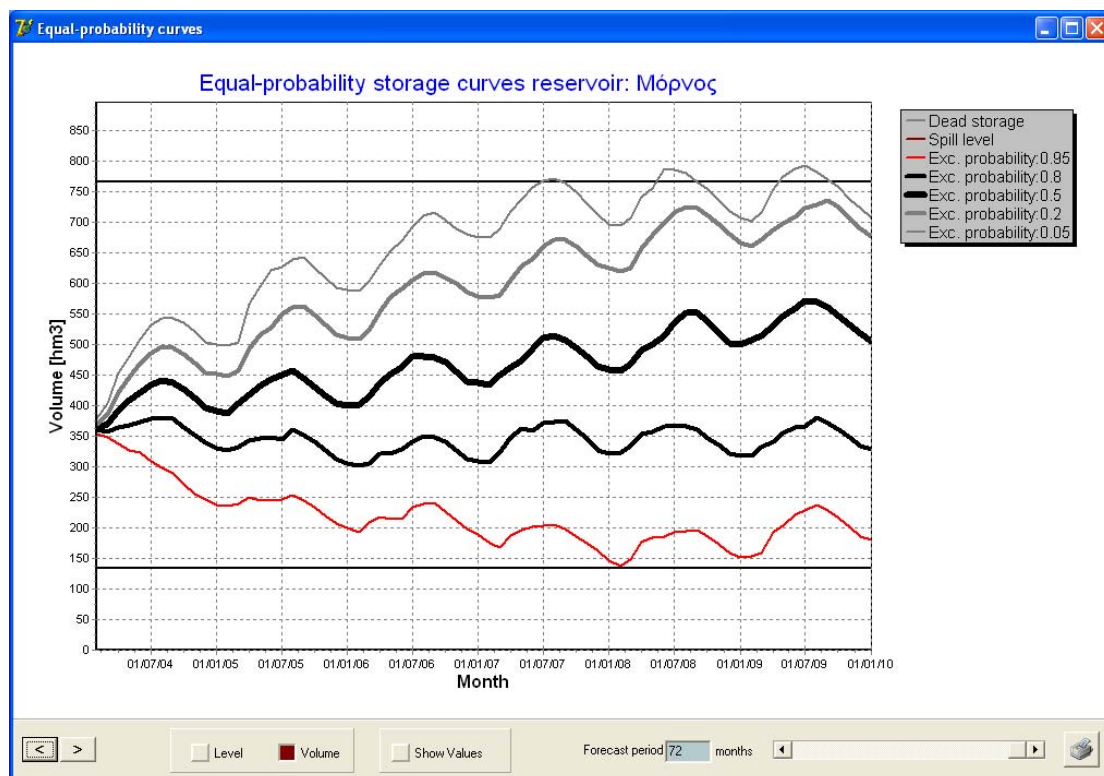
Ο ορισμός της μέσης ετήσιας πιθανότητα αστοχίας έχει ήδη δοθεί στο εδάφιο 2.2.5. Συγκεκριμένα, προκύπτει ως ο μέσος όρος των αστοχιών όλων των σεναρίων, για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα ελέγχου. Από την άλλη πλευρά, η μέγιστη ετήσια πιθανότητα αναφέρεται στο πλέον δυσμενές έτος, αυτόν δηλαδή κατά το οποίο αστοχούν τα περισσότερα σεναρία, και είναι συνεπώς πιο ρεαλιστικός ως δείκτης. Υπενθυμίζεται ότι το μοντέλο καταγράφει αστοχία υδρολογικού έτους εφόσον παραβιαστεί κάποιος στόχος ή περιορισμός, έστω και για ένα μήνα του έτους.

Όσον αφορά στη μηνιαία κλίμακα, το πρόγραμμα απαριθμεί σε κάθε χρονικό βήμα τον αριθμό των σεναρίων που αστόχησαν, οπότε «προβλέπει» την αντίστοιχη εμπειρική πιθανότητα αστοχίας (βλ. Σχήμα 4.9). Πρόκειται για μια εξαιρετικά σημαντική πτυχή του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, καθώς επιτρέπει στο

χρήστη τον εντοπισμό των χρονικών περιόδων υψηλού ρίσκου, και τη λήψη κατάλληλων μέτρων για τον περιορισμό του εν λόγω ρίσκου.



Σχήμα 4.9: Παράδειγμα πρόγνωσης μηνιαίας πιθανότητας αστοχίας.



Σχήμα 4.10: Παράδειγμα καμπυλών πρόγνωσης αποθέματος για διάφορες πιθανότητες υπέρβασης.

Τέλος, οι καμπύλες πρόγνωσης προκύπτουν με στατιστική επεξεργασία των κύριων αποκρίσεων του μοντέλου (αποθέματα, παροχές) για όλα τα σενάρια και σε κάθε χρονικό βήμα. Συγκεκριμένα, για



κάθε μήνα το πρόγραμμα αναλύει το δείγμα των εφικτών αποκρίσεων (όπως προκύπτει για το σύνολο των σεναρίων πρόγνωσης), βάσει του οποίου εκτιμά εμπειρικές πιθανότητες υπέρβασης για τιμές 5, 20, 50, 80 και 95%. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10, τα αντίστοιχα όρια που προκύπτουν, άρα και η αβεβαιότητα των προγνώσεων, έχουν εύρος που αυξάνει γρήγορα μετά τα πρώτα χρονικά βήματα, γεγονός που εξηγείται από τη χαμηλή (όχι όμως και μηδενική) στατιστική εξάρτηση των εισροών από τις πραγματοποιήσεις των έστω και λίγο απομακρυσμένων χρονικά μηνών. Παρατηρείται ακόμη ότι, όσον αφορά στα αποθέματα των ταμιευτήρων, αυτά ξεκινούν από την ίδια αρχική συνθήκη, που είναι η πραγματική στάθμη στην αρχή της προσομοίωσης.

## 4.6 Εντοπισμός βέλτιστης διαχειριστικής πολιτικής

### 4.6.1 Γενικά

Η βελτιστοποίηση αποτελεί ένα από τα ισχυρότερα χαρακτηριστικά του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ και έχει ιδιαίτερο νόημα όταν το υδροσύστημα καλείται να ικανοποιήσει πολλαπλούς και αντικρουόμενους στόχους από πολλαπλές θέσεις απολήψεων, επιφανειακές και υπόγειες. Σε μια τέτοια περίπτωση, το γραμμικό μοντέλο κατανομής που εφαρμόζεται στα πλαίσια της προσομοίωσης, εισάγοντας ως μοναδικό κριτήριο βελτιστοποίησης την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των απολήψεων στις θέσεις κατανάλωσης, δεν εξασφαλίζει *βιωσιμότητα*, δηλαδή επάρκεια πόρων σε μακροχρόνιο ορίζοντα. Αυτό συμβαίνει επειδή οι έννοιες του κόστους και της αξιοπιστίας στη διαχείριση των υδατικών πόρων είναι αντικρουόμενες. Για το λόγο αυτό, απαιτείται μια πιο μακροσκοπική θεώρηση του προβλήματος, που λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τις τρέχουσες συνθήκες αλλά και τις μελλοντικές. Αυτό γίνεται με τη θεώρηση ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών της διαχείρισης ως αγνώστων, και την εκτίμησή τους βάσει καθολικών κριτηρίων, που αναφέρονται στο σύνολο του ορίζοντα ελέγχου. Τα μεγέθη αυτά θεωρούνται μεταβλητές ελέγχου ενός «εξωτερικού» προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ως προς τα εν λόγω κριτήρια, από την επίλυση του οποίου προκύπτει η πλέον πρόσφορη διαχειριστική πολιτική. Οι αρχές της εν λόγω πολιτικής έχουν γενική ισχύ, δεν εξαρτώνται δηλαδή από τις τρέχουσες συνθήκες εισροών αλλά από το μακροχρόνιο υδρολογικό και διαχειριστικό καθεστώς του υδροσυστήματος.

Στη συνέχεια, και συγκεκριμένα στα εδάφια 4.6.2 και 4.6.3 εξηγείται ο τρόπος καθορισμού των μεταβλητών ελέγχου και κριτηρίων, αντίστοιχα. Στο εδάφιο 4.6.4 περιγράφεται η μεθοδολογία βελτιστοποίησης, που βασίζεται σε ένα πρωτότυπο σχήμα εξελικτικής αναζήτησης. Τέλος, στο εδάφιο 4.6.5 επισκοπείται το γενικό πλαίσιο βελτιστοποίησης και δίνονται πρακτικές κατευθύνσεις για την πρακτική αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της.

### 4.6.2 Μεταβλητές ελέγχου

Η πολιτική διαχείρισης του υδροσυστήματος εκφράζεται, κατά μείζονα λόγο, μέσω των κανόνων λειτουργίας των ταμιευτήρων και των γεωτρήσεων, η μαθηματική διατύπωση των οποίων γίνεται παραμετρικά. Συγκεκριμένα, οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων ορίζονται συναρτήσει των αδιάστατων παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$ , που είναι δύο ανά ταμιευτήρα (ή μόνο μία, εφόσον θεωρηθεί ο ομογενής κανόνας 4.27) και μπορεί να μεταβάλλονται ανάλογα με την εποχή του έτους (βλ. 4.4.2). Στην τελευταία περίπτωση, 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 συναρτήσει των επίσης αδιάστατων παραμέτρων  $b_i^{up}$  και  $b_i^{down}$ , που μπορούν επίσης να μεταβάλλονται εποχιακά.

Εκτός των παραμέτρων των κανόνων λειτουργίας, ο χρήστης μπορεί να ορίσει μεταβλητές ελέγχου σε τιμές στόχων και λειτουργικών περιορισμών, με την προϋπόθεση ότι αυτές έχουν διαχρονική ισχύ. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να αναζητήσει:

- μια σταθερή τιμή για όλους τους μήνες του έτους·
- δύο σταθερές τιμές για τις αντίστοιχες περιόδους του έτους·
- μια σταθερή μέση τιμή για όλο το έτος, που διατηρεί μια συγκεκριμένη μηνιαία κατανομή·
- μεμονωμένες τιμές για κάθε μήνα του έτους.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι για κάθε ταμιευτήρα μπορούν να θεωρηθούν μία, δύο ή τέσσερις μεταβλητές ελέγχου, για κάθε γεώτρηση δύο ή τέσσερις, ενώ για κάθε στόχο ή περιορισμό μπορούν μία, δύο ή δώδεκα. Τονίζεται ωστόσο ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των μεταβλητών του προβλήματος βελτιστοποίησης, τόσο πιο δυσχερές είναι ο εντοπισμός μιας ικανοποιητικής λύσης.

Η αναζήτηση των μεταβλητών γίνεται σε ένα πεπερασμένο διάστημα που καλείται *εφικτός χώρος* και προσδιορίζεται από μια ελάχιστη και μια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Όσον αφορά στις παραμέτρους των κανόνων λειτουργίας, επειδή αυτές είναι αδιάστατες, το εύρος διακύμανσής τους δεν μπορεί να ξεπερνά το διάστημα  $[0, 1]$ . Όσον αφορά στις μεταβλητές ελέγχου που αναφέρονται σε στόχους και περιορισμούς, ο χρήστης μπορεί να ορίσει οποιαδήποτε ελάχιστη και μέγιστη τιμή τους, αρκεί να είναι μεγαλύτερη του μηδενός.

### 4.6.3 Μέτρο επίδοσης υδροσυστήματος

Το μέτρο επίδοσης είναι ένας καθολικός αριθμητικός δείκτης, βάσει του οποίου αποτιμάται ποσοτικά μια συγκεκριμένη διαχειριστική πολιτική. Ο εν λόγω δείκτης ορίζεται ως:

$$F = \sum_{j=1}^m w_j f_j \quad (4.57)$$

όπου  $f_j$  μεμονωμένα κριτήρια ελέγχου και  $w_j$  συντελεστές βάρους, που εκφράζουν τη σχετική σπουδαιότητα των κριτηρίων.

Τα κριτήρια αναφέρονται σε μεμονωμένα και συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης, από αυτά που παρουσιάστηκαν στο εδάφιο 4.5.10. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα ή περισσότερα κριτήρια από τις ακόλουθες κατηγορίες:

- μέση ετήσια κατανάλωση νερού σε επιλεγμένους κόμβους και ταμιευτήρες·
- μέση ετήσια πιθανότητα αστοχίας επιλεγμένων στόχων και περιορισμών·
- μέγιστη ετήσια πιθανότητα αστοχίας επιλεγμένων στόχων και περιορισμών·
- μέσο ετήσιο έλλειμμα επιλεγμένων στόχων και περιορισμών·
- μέγιστο ετήσιο έλλειμμα επιλεγμένων στόχων και περιορισμών·
- μέση ετήσια οικονομική επίδοση υδροσυστήματος (άθροισμα κόστους-οφέλους)·
- μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας·
- ετήσια παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας·
- μέσες ετήσιες απώλειες λόγω υπερχειλίσης.

Όπως ορίζεται το μέτρο επίδοσης, με στάθμιση δηλαδή επιμέρους κριτηρίων που δεν χρησιμοποιούν κοινή μονάδα μέτρησης, είναι αδύνατο να αποδοθεί κάποιο φυσικό νόημα. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για μια μαθηματική ποσότητα, που αντιστοιχεί στη στοχαστική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης και χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης εναλλακτικών λύσεων (ως λύση νοείται ένα σύνολο εφικτών τιμών των μεταβλητών ελέγχου, που υποδηλώνει μια συγκεκριμένη διαχειριστική πολιτική). Είναι προφανές ότι η εισαγωγή διαφορετικών κριτηρίων ή και η διατήρηση των ίδιων, αλλά

με διαφορετικές τιμές συντελεστών βάρους, διαφοροποιεί το πρόβλημα και οδηγεί εύλογα σε αλλαγή της προτεινόμενης διαχειριστικής πολιτικής.

#### 4.6.4 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης

Η διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης διαχειριστικής πολιτικής, όπως αυτή εκφράζεται μέσω των μεταβλητών ελέγχου  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , διατυπώνεται, συμβατικά, ως ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης της βαθμωτής συνάρτησης  $F$  ως εξής:

$$\min F(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^m w_j f_j(\mathbf{x}) \quad (4.58)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max}$$

όπου  $\mathbf{x}_{\min}$ ,  $\mathbf{x}_{\max}$  τα όρια του εφικτού χώρου.

Η επίλυση του προβλήματος, το οποίο είναι μη γραμμικό ως προς τις μεταβλητές  $\mathbf{x}$ , γίνεται μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας, που καλείται *εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτωσης-απλόκου*. Η σχετική μεθοδολογία έχει αναπτυχθεί από ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ (Ευστρατιάδης, 2001· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2002· Rozos *et al.*, 2004), για το χειρισμό προβλημάτων βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές δυσχέρειες, που οφείλονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του χώρου αναζήτησης (ύπαρξη τοπικών ακροτάτων σε πολλαπλές κλίμακες, ασυνέχειες, γεωμετρικές ανωμαλίες όπως μακρόστενες χαράδρες, πλατιές κοιλάδες, αυχένες, κλπ.). Πρόκειται για μια ευρετική τεχνική, στην οποία επιχειρείται η σύζευξη διαφορετικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων καθώς και ορισμένων πρωτότυπων στοιχείων. Ενσωματώνοντας στρατηγικές τοπικής και ολικής αναζήτησης σε ένα ενιαίο αλγοριθμικό σχήμα, εξασφαλίζεται ευελιξία κινήσεων, με σκοπό τον αποτελεσματικό χειρισμό των ποικίλων γεωμετρικών ιδιομορφιών, ταυτόχρονα με τη δυνατότητα ταχείας διερεύνησης των κυρτών περιοχών των εν λόγω επιφανειών.

Ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ, όπως και το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (Ευστρατιάδης *κ.ά.*, 2006), ενσωματώνει την πλέον πρόσφατη εκδοχή του αλγορίθμου, που βασίζεται στις ακόλουθες αρχές:

- μια διαδικασία *εξελικτικής αναζήτησης* (evolutionary search)<sup>1</sup>, για την παράλληλη διερεύνηση του εφικτού χώρου από έναν πληθυσμό σημείων·
- ένα σύνολο κανόνων εξέλιξης του πληθυσμού, που χρησιμοποιούν ένα τροποποιημένο σχήμα *κατερχόμενου απλόκου* (downhill simplex)<sup>2</sup> για την παραγωγή απογόνων, καθώς και διαδικασίες *μετάλλαξη*<sup>3</sup> (mutation)·
- μια στρατηγική *προσομοιωμένης ανόπτωσης* (simulated annealing)<sup>1</sup>, μέσω της οποίας ρυθμίζεται ο βαθμός τυχαιότητας ως προς την αξιολόγηση την καταλληλότητας των λύσεων που παράγονται κατά την διαδικασία αναζήτησης.

<sup>1</sup> Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (Goldberg, 1989· Michalewicz, 1996) ακολουθούν το πρότυπο των φυσικών εξελικτικών διεργασιών, χρησιμοποιώντας πληθυσμούς λύσεων που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά τους καθώς εξελίσσονται, με εφαρμογή των λεγόμενων γενετικών τελεστών (επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη).

<sup>2</sup> Πρόκειται για μια κλασική τεχνική αναζήτησης τοπικών ακροτάτων (Nelder and Mead, 1965), που βασίζεται σε διαδοχικούς γεωμετρικούς μετασχηματισμούς ενός συνόλου  $n + 1$  εφικτών σημείων, που αντιπροσωπεύουν τις κορυφές ενός απλόκου στο  $n$ -διάστατο χώρο. Το απλόκο διερευνά το πεδίο αναζήτησης, πραγματοποιώντας συγκεκριμένες κινήσεις (ανάκλαση ως προς τη χειρότερη κορυφή, επέκταση στην κατεύθυνση της ανάκλασης, συμπίεση προς το κεντροειδές του, συρρίκνωση γύρω από τη καλύτερη κορυφή).

<sup>3</sup> Ο όρος προέρχεται από τους γενετικούς αλγορίθμους και υποδηλώνει τυχαίες μεταβολές που λαμβάνουν χώρα σε μικρό ποσοστό του πληθυσμού, επιτρέποντας τη μετάβαση σε απομακρυσμένες, σε σύγκριση με τον τρέχοντα πληθυσμό, περιοχές του πεδίου αναζήτησης.

Η υπολογιστική διαδικασία ξεκινά με την παραγωγή ενός τυχαίου πληθυσμού σημείων, ομοιόμορφα κατανεμημένων στο πεδίο αναζήτησης. Ο πληθυσμός διατηρεί σταθερό μέγεθος, το οποίο ορίζει ο χρήστης, και σε καμία περίπτωση δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει τα επιτρεπόμενα όρια του εφικτού χώρου. Με βάση τον αρχικό πληθυσμό υπολογίζεται η αρχική «θερμοκρασία» του συστήματος, ως η διαφορά μεταξύ της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή της στοχικής συνάρτησης στον πληθυσμό. Ο ρόλος της θερμοκρασίας είναι αντίστοιχος με αυτόν της φυσικής διεργασίας ανόπτησης. Στα αρχικά στάδια της αναζήτησης η τιμή της θερμοκρασίας είναι μεγάλη, επιτρέποντας μια πιο συχνή αποδοχή μη βέλτιστων βημάτων και, συνακόλουθα, μεγαλύτερη διασπορά του πληθυσμού, ενώ μειώνεται σταδιακά, καθώς η διαδικασία οδηγείται προς τις πλέον πρόσφορες περιοχές του εφικτού χώρου, όπου και επικεντρώνεται η έρευνα, ώστε η διαδικασία σύγκλισης να μην είναι υπερβολικά αργή.

Η εξέλιξη των λύσεων γίνεται κατά στάδια, που με βάση την ορολογία των γενετικών αλγορίθμων ονομάζονται *γενιές* (generations). Σε κάθε γενιά, ένα (συνήθως) ή περισσότερα μέλη του πληθυσμού αντικαθίσταται από νέα σημεία, που καλούνται *απόγονοι* (offspring). Αν και ο αλγόριθμος αναζητά βελτιωμένες λύσεις, όταν δεν μπορεί να εντοπίσει τέτοιες αποδέχεται λύσεις που μπορεί να είναι χειρότερες από τις προηγούμενες, προς όφελος της διερεύνησης εκτενέστερων περιοχών του εφικτού χώρου. Η γέννηση νέων λύσεων γίνεται ως εξής:

Από τον τρέχοντα πληθυσμό λαμβάνονται, με τυχαία επιλογή,  $n + 1$  σημεία, που διαμορφώνουν ένα *απλόκο*. Ζητούμενο είναι ένα νέο σημείο (απόγονος) που θα αντικαταστήσει τη συμβατικά χειρότερη κορυφή. Η τελευταία ορίζεται ως εκείνη για την οποία μεγιστοποιείται η τιμή του μέτρου ποινής:

$$y(\mathbf{x}) = g(\mathbf{x}) + u T \quad (4.59)$$

όπου  $u$  τυχαίος ομοιόμορφος αριθμός στο διάστημα  $[0, 1]$  και  $T$  η τρέχουσα θερμοκρασία. Ο όρος  $g(\mathbf{x})$ , δηλαδή η στοχική συνάρτηση, αποτελεί την προσδιοριστική συνιστώσα του μέτρου ποινής, ενώ ο όρος  $u T$  την στοχαστική του συνιστώσα. Η επίδραση της τελευταίας περιορίζεται με τη μείωση της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα στα προχωρημένα στάδια της εξελικτικής διαδικασίας η πορεία αναζήτησης να είναι σχεδόν πάντοτε στην κατεύθυνση μείωσης της τιμής της στοχικής συνάρτησης, όπως συμβαίνει με μια τεχνική τοπικής βελτιστοποίησης.

Καταρχήν, επιχειρείται ο εντοπισμός μιας βελτιωμένης λύσης, με βάση την παρακάτω ακολουθία κινήσεων του απλόκου:

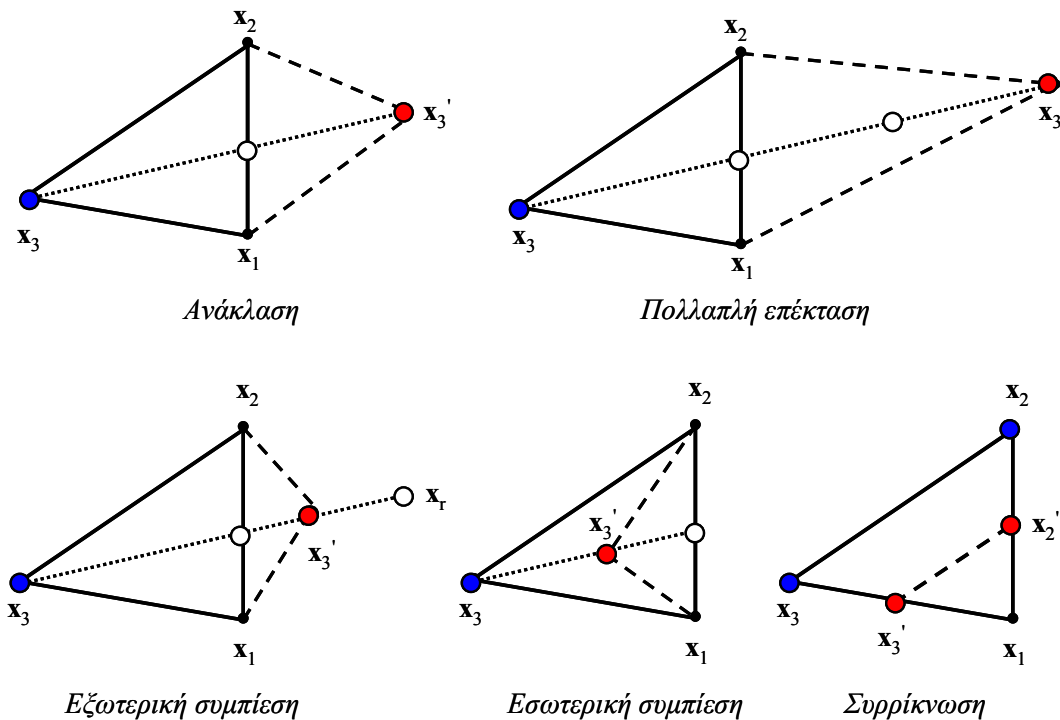
- ανάκλαση του απλόκου, ως προς τη συμβατικά χειρότερη κορυφή του·
- διαδοχικές επεκτάσεις προς την κατεύθυνση της ανάκλασης, για όσο διάστημα εντοπίζονται λύσεις που υπερτερούν σε σχέση με την αντικειμενικά καλύτερη κορυφή του απλόκου (δηλαδή αυτή για την οποία ελαχιστοποιείται η τιμή της στοχικής συνάρτησης)·

---

<sup>1</sup> *Ανόπτηση* (annealing) ονομάζεται η φυσική διεργασία ψύξης των μετάλλων, που συνεπάγεται ελαχιστοποίηση της κινητικής ενέργειας των μορίων τους. Κατά τη διαδικασία ψύξης, επιτρέπεται η μετάβαση του συστήματος σε καταστάσεις υψηλότερης ενέργειας, ακολουθώντας έναν πιθανοτικό κριτήριο που στη στατιστική μηχανική αναφέρεται ως νόμος του Boltzman. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του συστήματος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα αποδοχής τέτοιων καταστάσεων. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η υπερπήδηση των τοπικών ενεργειακών ακροτάτων, προς όφελος της απόκτησης μιας τέλει κρυσταλλικής δομής. Αναγκαία προϋπόθεση για κάτι τέτοιο είναι ο αργός ρυθμός ψύξης, διαφορετικά η διαδικασία καταλήγει σε μια άμορφη μάζα, που αντιστοιχεί σε κάποιο τοπικό ενεργειακό ακρότατο. Στις αρχές της παραπάνω διεργασίας βασίζεται η τεχνική της προσομοιωμένης ανόπτησης, που εισήγαγαν στη βελτιστοποίηση μη γραμμικών συναρτήσεων οι Kirkpatrick *et al.* (1983).

- εξωτερική συμπίεση μεταξύ του κεντροειδούς<sup>1</sup> του απλόκου και του σημείου ανάκλασης, εφόσον η τιμή της στοχικής συνάρτησης στο τελευταίο είναι χειρότερη σε σύγκριση με την αντικειμενικά καλύτερης κορυφή·
- εσωτερική συμπίεση μεταξύ της συμβατικά χειρότερης κορυφής και του κεντροειδούς του απλόκου, εφόσον η τιμή της συνάρτησης  $y(\mathbf{x})$  στο σημείο ανάκλασης ξεπερνά την αντίστοιχη τιμή στη συμβατικά χειρότερη κορυφή·
- συρρίκνωση του απλόκου γύρω από την αντικειμενικά καλύτερη κορυφή του, εφόσον η τιμή της συνάρτησης  $y(\mathbf{x})$  στο σημείο ανάκλασης ξεπερνά την αντίστοιχη τιμή στο σημείο εσωτερικής συμπίεσης.

Όλες οι παραπάνω κινήσεις, παράγουν ένα μεμονωμένο νέο σημείο, με εξαίρεση την τελευταία που παράγει  $n$  το πλήθος απογόνους, καθώς αντικαθίστανται όλες οι κορυφές του απλόκου εκτός από την αντικειμενικά καλύτερη. Σε αντίθεση με την αυθεντική μέθοδο κατερχόμενου απλόκου, η επιλογή της προς αντικατάσταση κορυφής δεν βασίζεται στην τιμή της στοχικής συνάρτησης αλλά στο μέτρο ποινής, που εμπεριέχει και τον στοχαστικό όρο  $u T$ . Επιπλέον, τα μήκη των εκάστοτε βημάτων δεν είναι αυστηρά καθορισμένα, αλλά θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές, που ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή. Οι μετασχηματισμοί του απλόκου, που περιγράφηκαν προηγουμένως, απεικονίζονται στο γραφικό παράδειγμα του Σχήματος 4.11.



Σχήμα 4.11: Δυνατοί μετασχηματισμοί ενός απλόκου στον χώρο των δύο διαστάσεων. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα νέα σημεία που γεννώνται (απόγονοι), ενώ με μπλε τα σημεία που αντικαθίστανται. Το σημείο  $x_1$  αντιστοιχεί στην αντικειμενικά καλύτερη κορυφή, ενώ το  $x_3$  στη συμβατικά χειρότερη.

Αν καμία από τις προηγούμενες κινήσεις του απλόκου δεν οδηγήσει στην παραγωγή μιας καλύτερης λύσης, τότε το άπλοκο «αναρριχάται» προς την κατεύθυνση της ανάκλασης, εκτελώντας μια σειρά από βήματα μεγιστοποίησης (αντί ελαχιστοποίησης) της στοχικής συνάρτησης, στην προσπάθειά του να υπερπηδήσει το τρέχον τοπικό ακρότατο στο οποίο έχει εγκλωβιστεί. Αν ούτε τότε υπάρξει

<sup>1</sup> Ορίζεται ως το κέντρο βάρους όλων των κορυφών του απλόκου, πλην της συμβατικά χειρότερης.

επιτυχία, τότε η νέα λύση παράγεται μέσω μετάλλαξης. Η συνάρτηση μετάλλαξης γεννά τυχαίες συντεταγμένες ως εξής:

$$x_i = \mu_i \pm v \sigma_i \quad (4.60)$$

όπου  $\mu_i$  η μέση τιμή του πληθυσμού για τη συντεταγμένη  $i$ ,  $\sigma_i$  η αντίστοιχη τυπική απόκλιση και  $v$  τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή  $N(0, 1)$ . Το πρόσημο  $+$  ή  $-$  επιλέγεται τυχαία, με συχνότητα 50%. Η παραπάνω διαδικασία αποσκοπεί στη γέννηση απομακρυσμένων, σε σχέση με το μέσο όρο του πληθυσμού, σημείων, και συνεπώς εξασφαλίζει μεγαλύτερη διασπορά λύσεων που είναι επιθυμητή για την αποτελεσματικότερη διερεύνηση του εφικτού χώρου.

Η αυτορύθμιση της θερμοκρασίας γίνεται με την εφαρμογή δύο ελέγχων. Στο πέρας κάθε γενιάς ελέγχεται αν η τρέχουσα τιμή της ξεπερνά την ποσότητα  $\zeta$  ( $g_{\max} - g_{\min}$ ), όπου  $g_{\max}$  η μέγιστη και  $g_{\min}$  η ελάχιστη τιμή της στοχικής συνάρτησης στον πληθυσμό, ενώ όποτε εντοπίζεται μία βελτιωμένη λύση (και συνεπώς ένα τοπικό ακρότατο), η θερμοκρασία μειώνεται ελαφρά κατά έναν συντελεστή  $\lambda$ . Τα  $\zeta$  και  $\lambda$  είναι παράμετροι εισόδου του αλγορίθμου, με τυπικές τιμές 2 και 0.99, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές εξασφαλίζουν ότι η θερμοκρασία του συστήματος, που χρησιμοποιείται στα διάφορα στάδια επιλογής, δεν είναι υπερβολικά μεγάλη σε σχέση με τα μεγέθη του πληθυσμού (που θα είχε ως συνέπεια μεγάλο βαθμό τυχαιότητας), ενώ μειώνεται με βραδύ ρυθμό, εμποδίζοντας την πρόωρη σύγκλιση σε κάποιο μη αποδεκτό τοπικό ακρότατο.

Η εξελικτική διαδικασία ολοκληρώνεται με δύο τρόπους:

- όταν η σχετική βελτίωση της τιμής της στοχικής συνάρτησης από γενιά σε γενιά γίνει μικρότερη από κάποια ανοχή (κριτήριο σύγκλισης)·
- όταν ξεπεραστεί ένας προβλεπόμενος αριθμός δοκιμών (κριτήριο τερματισμού).

Η ανοχή (εκφρασμένη ως ποσοστό) και ο μέγιστος αριθμός δοκιμών αποτελούν επίσης παραμέτρους εισόδου του αλγορίθμου. Στις συνήθεις εφαρμογές του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, το δεύτερο κριτήριο είναι αυτό που οδηγεί στον τερματισμό της διαδικασίας, καθώς η πολυπλοκότητα του προβλήματος, σε συνδυασμό με τις υψηλές χρονικές απαιτήσεις κάθε μεμονωμένης προσομοίωσης, δεν επιτρέπουν τη διεξαγωγή του απαιτούμενου αριθμού δοκιμών, προκειμένου να επιτευχθεί σύγκλιση.

#### 4.6.5 Επισκόπηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Πριν την έναρξη της βελτιστοποίησης, ο χρήστης διατυπώνει τις συνιστώσες του προβλήματος και τα βασικά ορίσματα του εξελικτικού αλγορίθμου ανόπτησης-απλόκου. Οι πρώτες περιλαμβάνουν:

- την επιλογή  $n$  το πλήθος μεταβλητών ελέγχου  $x_i$ ·
- τη διαμόρφωση των ορίων του εφικτού χώρου, δηλαδή της ελάχιστης και μέγιστης τιμής κάθε μεταβλητής·
- την επιλογή  $m$  το πλήθος κριτηρίων  $f_j$  και αντίστοιχων συντελεστών βάρους  $w_j$ .

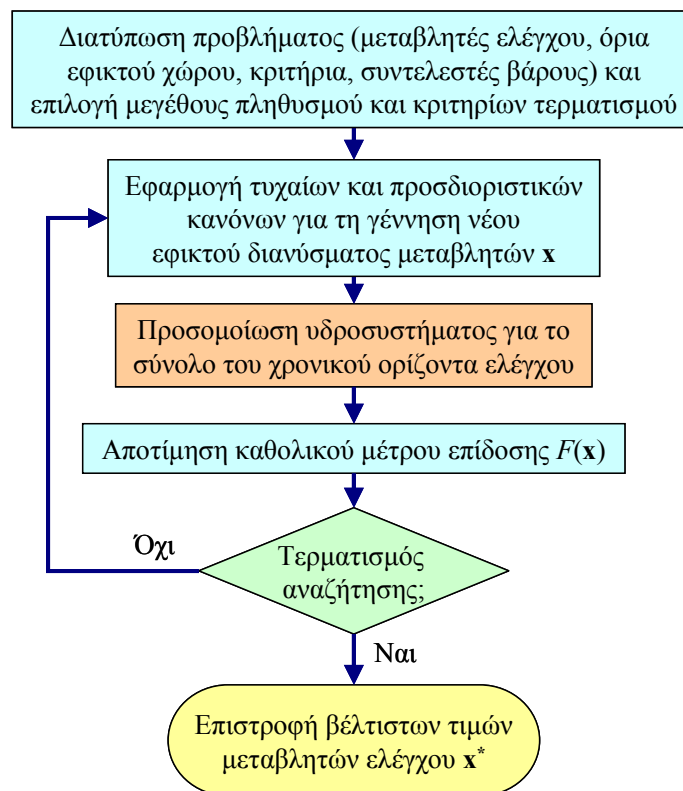
Τα ορίσματα του αλγορίθμου αφορούν στο μέγεθος του πληθυσμού και τα δύο κριτήρια τερματισμού. Για τις υπόλοιπες παραμέτρους εισόδου που αναφέρονται στο εδάφιο 4.6.4, υπάρχουν προεπιλεγμένες τιμές, καθώς πρόκειται για εξειδικευμένου χαρακτήρα μεγέθη. Όσον αφορά στα μεγέθη που ορίζει ο χρήστης, ισχύουν τα ακόλουθα:

Το μέγεθος του πληθυσμού πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τον αριθμό των μεταβλητών ελέγχου. Όσο πιο μεγάλος είναι ο πληθυσμός τόσο πιο αξιόπιστη είναι η διαδικασία αναζήτησης, αλλά και τόσο πιο αργή στην εξέλιξή της. Μια ικανοποιητική τιμή που συστήνεται είναι η εφαρμογή πληθυσμών ίσων με δύο έως τρεις φορές τον αριθμό των μεταβλητών ελέγχου.

Ο μέγιστος αριθμός προσομοιώσεων αποτελεί ένα από τα δύο κριτήρια τερματισμού, και είναι αυτό που κατά κανόνα ικανοποιείται πρώτο. Εμπειρικά, έχει διαπιστωθεί ότι ο αριθμός αυτός πρέπει να

είναι τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερος από το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου. Ωστόσο, η τιμή του εξαρτάται και από τον χρονικό φόρτο της προσομοίωσης, που είναι ευθέως ανάλογος του αριθμού των υδρολογικών σεναρίων που εξετάζονται και του χρονικού ορίζοντα ελέγχου, ενώ επηρεάζεται σημαντικά και από το μέγεθος του δικτύου (από το οποίο εξαρτάται το πλήθος των περιορισμών του γραμμικού προβλήματος κατανομής).

Το ποσοστό σύγκλισης λαμβάνει τιμές από 1% έως 5% και εκφράζει τη σχετική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών βέλτιστων λύσεων. Συνήθως, η αναζήτηση τερματίζεται πρωτίτερα, εφόσον φτάσει τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό προσομοιώσεων.



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα ροής διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης, που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.12, προϋποθέτει την πραγματοποίηση ενός ικανού αριθμού προσομοιώσεων, για την αποτίμηση του δείκτη επίδοσης ως προς διαφορετικές τιμές των μεταβλητών ελέγχου. Κάθε φορά που δοκιμάζεται μια νέα λύση, δίνονται οι επίκαιρες τιμές των παραμέτρων στον αλγόριθμο προσομοίωσης και υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του δείκτη επίδοσης. Υπενθυμίζεται ότι η προσομοίωση ενσωματώνει μια βήμα-προς-βήμα διαδικασία γραμμικής βελτιστοποίησης, που επιλέγει την οικονομικότερη κατανομή των υδατικών πόρων στο υδροσύστημα, λαμβάνοντας υπόψη τις επίκαιρες συνθήκες προσφοράς και ζήτησης.

Ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου ανήκει στις στοχαστικές μεθόδους, που εξετάζουν πολλαπλές λύσεις παράλληλα και σταδιακά συγκλίνουν προς τη βέλτιστη. Οι λύσεις αυτές θεωρείται ότι διαμορφώνουν έναν πληθυσμό, που σε αντιστοιχία με τη φυσική διεργασία της εξέλιξης, οδηγείται σε στατιστικά ισχυρότερες γενιές, με βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Στα αρχικά στάδια αναζήτησης, η πορεία του αλγορίθμου είναι σχεδόν τυχαία (άλλοτε εντοπίζει καλύτερες και άλλοτε χειρότερες λύσεις), προοδευτικά όμως σταθεροποιείται προς την κατεύθυνση βελτίωσης της τιμής του δείκτη επίδοσης, ώσπου να συγκλίνει σε μια τελική τιμή. Κατά διαστήματα, παράγονται λύσεις μακριά από την τρέχουσα βέλτιστη, μέσω των διαδικασιών αναρρίχησης και μετάλλαξης, ώστε να δοθεί η ευκαιρία διαφυγής από τοπικά ακρότατα.

## 5 Πλαίσιο επιχειρησιακής λειτουργίας του συστήματος

---

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ από την οπτική γωνία του χρήστη. Συγκεκριμένα, εξηγείται η διαδικασία προετοιμασίας των δεδομένων, παρουσιάζονται τα πεδία εφαρμογής του μοντέλου και επιχειρείται η ένταξή του σε ένα πλαίσιο επιχειρησιακής συνεργασίας με τις άλλες εφαρμογές του υπολογιστικού συστήματος.

### 5.1 Δεδομένα εισόδου σεναρίων

Σε μια τυπική εφαρμογή του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, ο χρήστης καλείται να ορίσει ένα πλήθος δεδομένων εισόδου. Τα δεδομένα αυτά είναι οργανωμένα σε δύο επίπεδα πληροφορίας, στην κλίμακα έργου (project) και την κλίμακα σεναρίου (scenario). Το έργο αφορά στο υδροσύστημα μιας συγκεκριμένης περιοχής μελέτης, για το οποίο πρέπει να εξεταστούν μια σειρά από πραγματικές ή υποθετικές καταστάσεις, δηλαδή σεναρία λειτουργίας του υδροσυστήματος. Συνεπώς, τα σεναρία αποτελούν εναλλακτικές διατυπώσεις του ίδιου έργου, στα πλαίσια μιας μελέτης, από τα τυπικά πεδία εφαρμογής που εξετάζονται στην ενότητα 5.2.

Τα δεδομένα εισόδου ενός σεναρίου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στατικά και δυναμικά. Έχοντας καταλήξει σε μια σχηματοποίηση του υδροσυστήματος, τα πρώτα αναφέρονται στα χαρακτηριστικά μεγέθη των τεχνικών έργων, τους στόχους και λειτουργικούς περιορισμούς και ορισμένες οικονομικές παραμέτρους της διαχείρισης. Πρόκειται για πραγματικές πληροφορίες, τις οποίες διαχειρίζεται και το λογισμικό ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ, οπότε είναι δυνατό να ανακτηθούν από την κεντρική βάση δεδομένων ΥΔΡΙΑ (βλ. 5.3.2).

Όσον αφορά στα δυναμικά δεδομένα, αυτά αναφέρονται σε χρονοσειρές εισροών και απωλειών σε ταμειυτήρες ή κόμβους του υδρογραφικού δικτύου. Οι εν λόγω χρονοσειρές μπορεί να είναι ιστορικές ή συνθετικές, με τη δεύτερη κατηγορία να ενδείκνυται όταν είναι επιθυμητή η ακριβής αποτίμηση των πιθανοτικών μεγεθών του συστήματος, ιδιαίτερα όταν τα τελευταία αναφέρονται σε ακραία επίπεδα αξιοπιστίας. Επιπλέον, όταν το σύστημα λειτουργεί ως εργαλείο πρόγνωσης, πρέπει αναγκαστικά να χρησιμοποιήσει σεναρία υδρολογικών εισροών που διατηρούν την ίδια στατιστική δομή. Τέτοια σεναρία παράγει το λογισμικό ΚΑΣΤΑΛΙΑ, που αποτελεί και το πλέον ενδεδειγμένο εργαλείο ώστε να χρησιμοποιείται παράλληλα με τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (βλ. 5.3.3).

### 5.2 Πεδία εφαρμογής

Οι ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ είναι ένα εργαλείο γενικού σκοπού, που μπορεί να βρει εφαρμογή σε πληθώρα μελετών/ερευνών πάνω σε συστήματα υδατικών πόρων, και συγκεκριμένα:

- μελέτες στρατηγικής διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων·
- επιχειρησιακά σχέδια λειτουργίας υδροσυστημάτων·
- προγραμματισμός νέων έργων·
- διερεύνηση σεναρίων έκτακτης λειτουργίας·
- μελέτες οικονομικής σκοπιμότητας.



Οι μελέτες στρατηγικής διαχείρισης έχουν ως στόχο την αποτίμηση των βασικών υδρολογικών, ενεργειακών και οικονομικών μεγεθών ενός υδροσυστήματος, σε μακροχρόνιο ορίζοντα. Τα υδρολογικά μεγέθη αναφέρονται στην ετήσια ασφαλής απόληψη, δηλαδή τη σταθερή ποσότητα νερού που είναι διαθέσιμη από το σύστημα για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας, ή, αντίστροφα, το επίπεδο αξιοπιστίας που μπορεί να επιτευχθεί για δεδομένη ζήτηση. Τα ενεργειακά μεγέθη αναφέρονται στη μέση παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας, ενώ τα οικονομικά μεγέθη αναφέρονται στο μέσο ετήσιο κόστος λειτουργίας του υδροσυστήματος, που επιμερίζεται σε κόστος μεταφοράς νερού και κόστος χρήσης αντλιοστασίων και γεωτρήσεων. Η αποτίμηση των παραπάνω μεγεθών μπορεί να γίνει με τη χρήση συνθετικών χρονοσειρών μεγάλου μήκους, σε συνθήκες προσομοίωσης μόνιμης κατάστασης. Επισημαίνεται ότι η εκπόνηση μελετών στρατηγικής διαχείρισης των υδατικών πόρων, στην κλίμακα λεκάνης απορροής ή υδροσυστήματος, αποτελεί ζητούμενο της Οδηγίας-Πλαίσιο 2000/60/ΕΕ.

Τα επιχειρησιακά σχέδια λειτουργίας ενός υδροσυστήματος αναφέρονται σε δέσμες μέτρων που αφορούν στον προγραμματισμό των απολήψεων σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο. Τέτοια σχέδια είναι καλό να εκπονούνται σε τακτική βάση (τουλάχιστον μία φορά ετησίως, στην αρχή του υδρολογικού έτους), ώστε να λαμβάνουν υπόψη τις τρέχουσες συνθήκες προσφοράς και ζήτησης νερού, καθώς και προγραμματισμένες τροποποιήσεις στο δίκτυο. Αναγκαία προϋπόθεση είναι η χρήση πολλαπλών σεναρίων πρόγνωσης, όπου αποτυπώνεται η πρόσφατη εξέλιξη των υδρολογικών μεγεθών του υδροσυστήματος. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η μελέτη της συμπεριφοράς του σε βραχύ χρονικό ορίζοντα (της τάξης των λίγων μηνών ή ετών), κατά τον οποίο υπάρχει αξιολογή στατιστική εξάρτηση των μελλοντικών εισροών από τα επίκαιρα δεδομένα, αλλά και σημαντική επίδραση των τρεχουσών συνθηκών (π.χ. αποθέματα ταμιευτήρων) στη λήψη των αποφάσεων.

Ο προγραμματισμός νέων έργων αποτελεί ένα από τα πλέον προνομιακά πεδία εφαρμογής του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, καθώς παρέχεται η δυνατότητα σύγκρισης εναλλακτικών σεναρίων εξέλιξης ενός υδροσυστήματος, με αποτίμηση των επιπτώσεών τους ως προς ένα ευρύ φάσμα κριτηρίων. Αυτό αφορά ιδιαίτερα στα μεγάλα υδραυλικά έργα που αποτελούν κρίκους σε ευρύτερες αλυσίδες έργων (υδροσυστήματα), τα οποία συνεργαζόμενα εξυπηρετούν από κοινού έναν ή περισσότερους σκοπούς. Τόσο ο σχεδιασμός, όσο και η λειτουργία τέτοιων έργων επιβάλλει μια ολοκληρωμένη αντιμετώπιση, με συνολική μελέτη του υδροσυστήματος, ενώ οι παραδοσιακές μεθοδολογίες σχεδιασμού που βασίζονταν στην απομόνωση και την ανεξάρτητη μελέτη των επιμέρους έργων δεν είναι επαρκείς (Κουτσογιάννης, 1997).

Η διερεύνηση σεναρίων έκτακτης λειτουργίας αποτελεί απαραίτητη συνιστώσα μιας διαχειριστικής μελέτης, καθώς επιτρέπει την ανάλυση των επιπτώσεων από μη προγραμματισμένες μεταβολές στο σύστημα, που αφορούν σε βλάβες του δικτύου ή άλλες έκτακτες καταστάσεις (π.χ. απότομη αύξηση κατανάλωσης) και συνήθως έχουν παροδικό χαρακτήρα. Για να έχει νόημα η εξέταση τέτοιων σεναρίων, θα πρέπει η διάρκειά τους να είναι μεγαλύτερη του χρονικού βήματος της προσομοίωσης (μήνας) και οι επιπτώσεις τους να είναι σημαντικές, όσον αφορά στις λειτουργικές δυνατότητες του υδροσυστήματος. Η έγκαιρη προετοιμασία μπορεί να συμβάλει στη λήψη των πλέον πρόσφορων μέτρων, ώστε να αμβλυνθούν οι παραπάνω επιπτώσεις, προς όφελος της ασφάλειας του συστήματος.

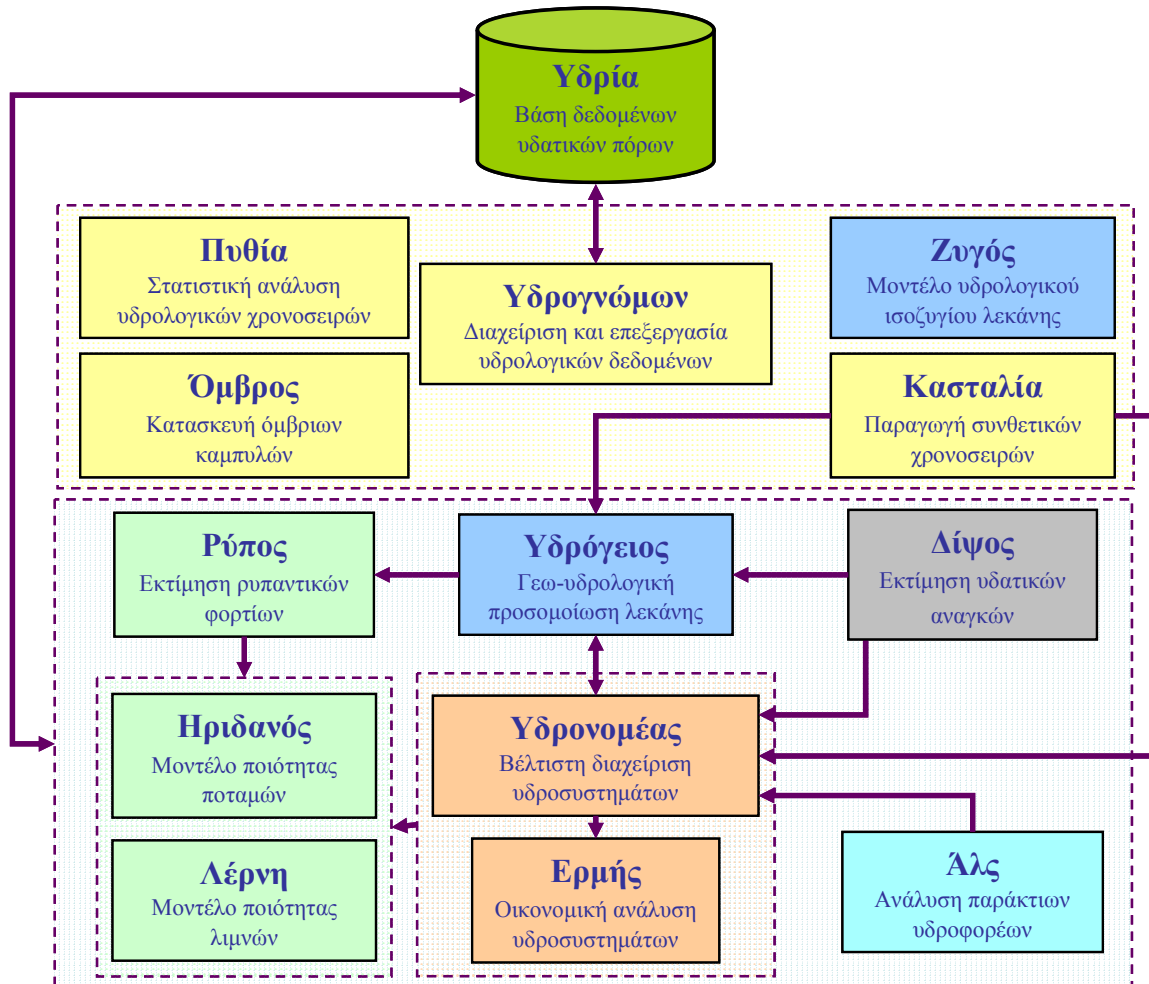
Τέλος, ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μελέτες οικονομικής σκοπιμότητας, σε συνδυασμό με το λογισμικό ΕΡΜΗΣ. Τέτοιες μελέτες αποσκοπούν στην ανάλυση των συνιστωσών κόστους και οφέλους ενός υδροσυστήματος, με σκοπό τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το κατά πόσο είναι οικονομικά συμφέρουσα η κατασκευή ενός έργου ή η ανάληψη μιας διαχειριστικής πολιτικής.

## 5.3 Συνεργασία με άλλες εφαρμογές λογισμικού

### 5.3.1 Γενική αρχιτεκτονική υπολογιστικού συστήματος

Το κύριο παραδοτέο του ερευνητικού έργου ΟΔΥΣΣΕΥΣ είναι μια δέσμη εφαρμογών λογισμικού, που λειτουργούν τόσο αυτόνομα όσο και σε συνεργασία μεταξύ τους, και επιλύουν ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων υδατικών πόρων. Οι εν λόγω εφαρμογές αποτελούν συνιστώσες ενός ολοκληρωμένου υπολογιστικού συστήματος, με την ονομασία ΥΔΡΟΓΑΙΑ, που θα αποτελέσει και την ονομασία του τελικού εμπορικού προϊόντος. Η αρχιτεκτονική δομή του συστήματος και το πλαίσιο επικοινωνίας των μοντέλων απεικονίζονται στο Σχήμα 5.1. Τα απλά βέλη υποδηλώνουν μεταφορά δεδομένων από το ένα μοντέλο στο άλλο, ενώ τα διπλά βέλη υποδηλώνουν αμφίδρομη επικοινωνία των μοντέλων. Γενικά, όλες οι συνιστώσες του συστήματος ΥΔΡΟΓΑΙΑ ανακτούν και καταχωρούν δεδομένα στην κεντρική βάση ΥΔΡΙΑ, μέσω της οποίας υλοποιείται η ανταλλαγή πληροφοριών.

Στα επόμενα εδάφια εξετάζεται το πλαίσιο συνεργασίας του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, που αποτελεί και την κεντρική εφαρμογή του συστήματος, με τα υπόλοιπα προγράμματα, ως επί το πλείστον μέσω της βάσης δεδομένων. Εξάιρεση αποτελεί το μοντέλο οικονομικής ανάλυσης ΕΡΜΗΣ, που είναι πρόσθετο υποσύστημα του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, οπότε τα δύο προγράμματα συνεργάζονται άμεσα, χωρίς δηλαδή τη μεσολάβηση της βάσης.



Σχήμα 5.1: Αρχιτεκτονική υπολογιστικού συστήματος ΥΔΡΟΓΑΙΑ και πλαίσιο συνεργασίας των επιμέρους εφαρμογών λογισμικού.

### **5.3.2 Συνεργασία με το λογισμικό ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ**

Ο ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ είναι το εργαλείο διαχείρισης και ανάλυσης των υδρολογικών πληροφοριών που είναι καταχωρημένες στη βάση δεδομένων. Η διαχείρισή τους βασίζεται στη γεωγραφική οργάνωση οντοτήτων (λεκάνες απορροής, μετρητικοί σταθμοί, ταμιευτήρες, υδραγωγεία, αντλιοστάσια, κ.ά.), στις οποίες εισάγονται φυσικές ιδιότητες, τεχνικά χαρακτηριστικά και χρονοσειρές μετρήσεων. Οι πληροφορίες που απαιτούνται για τη σχηματοποίηση του δικτύου μπορούν να ανακτηθούν από τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, αντιστοιχίζοντας το εννοιολογικό αντικείμενο του μοντέλου του υδροσυστήματος με την πραγματική γεωγραφική οντότητα. Μάλιστα, δεδομένου ότι το πρόγραμμα παρέχει δυνατότητες οπτικοποίησης των δεδομένων και αμφίδρομης επικοινωνίας με σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας, συμβάλει καθοριστικά στην εποπτεία του φυσικού συστήματος, που αποτελεί προϋπόθεση για την διαμόρφωση ρεαλιστικών σχηματοποιήσεων.

Ο ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ υποστηρίζει τυπικές επεξεργασίες χρονοσειρών και εξειδικευμένες υδρολογικές εφαρμογές, όπως μοντέλα εκτίμησης της εξατμοδιαπνοής, κατασκευή καμπυλών στάθμης-παροχής, ανάλυση υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρων, κ.ά. Κατά συνέπεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία των ιστορικών δειγμάτων υδρολογικών εισροών και απωλειών, που είτε εισάγονται άμεσα στο μοντέλο του υδροσυστήματος είτε, πιο συνηθισμένα, αποτελούν είσοδο του σχήματος γέννησης συνθετικών σεναρίων, που υλοποιεί το μοντέλο ΚΑΣΤΑΛΙΑ (βλ. 5.3.3).

### **5.3.3 Συνεργασία με το μοντέλο γέννησης συνθετικών σεναρίων ΚΑΣΤΑΛΙΑ**

Η ΚΑΣΤΑΛΙΑ, που είναι επιπρόσθετο εργαλείο του λογισμικού ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ, χρησιμοποιείται για τη γέννηση συνθετικών υδρολογικών χρονοσειρών σε πολλαπλές θέσεις και πολλαπλές χρονικές κλίμακες, στατιστικά συνεπών με τα αντίστοιχα ιστορικά δεδομένα. Υλοποιεί ένα σχήμα στοχαστικής ανάλυσης πολλών μεταβλητών, κατάλληλο για την αναπαραγωγή χαρακτηριστικών ιδιαιτεροτήτων των υδρολογικών διεργασιών, όπως της μακροπρόθεσμης εμμονής και της περιοδικότητας. Το μοντέλο λειτουργεί και ως εργαλείο στοχαστικής πρόγνωσης, εφόσον τροφοδοτείται με επίκαιρα υδρολογικά δεδομένα. Στην περίπτωση αυτή γεννά σεναρία εισροών που χρησιμοποιούνται στην καταληκτική προσομοίωση υδροσυστημάτων.

Γενικά, η συνδυαστική λειτουργία των προγραμμάτων ΚΑΣΤΑΛΙΑ και ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ κρίνεται επιβεβλημένη, αφενός λόγω του κοινού θεωρητικού πλαισίου στο οποίο βασίζεται η μαθηματική προσέγγιση του προβλήματος προσομοίωσης και αφετέρου για πρακτικούς λόγους, καθώς η δομή των μεμονωμένων χρονοσειρών μεγάλου μήκους ή, ακόμα περισσότερο, των σεναρίων πρόγνωσης που γεννά η ΚΑΣΤΑΛΙΑ είναι πλήρως συμβατή με τη δομή που εισάγεται στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ.

### **5.3.4 Συνεργασία με το μοντέλο στατιστικής ανάλυσης ΠΥΘΙΑ**

Η ΠΥΘΙΑ, που είναι επιπρόσθετο εργαλείο του λογισμικού ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ, χρησιμοποιείται για την ολοκληρωμένη στατιστική ανάλυση υδρολογικών χρονοσειρών, είναι συνεπώς κατάλληλη για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων οποιουδήποτε μοντέλου, που δίνονται με τη μορφή χρονοσειρών. Οι λειτουργίες του προγράμματος περιλαμβάνουν την εκτίμηση στατιστικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων (τυπικών και εξειδικευμένων, όπως παραμέτρων υδρολογικής εμμονής), την προσαρμογή συναρτήσεων κατανομής, εκτίμηση ορίων εμπιστοσύνης (με μεθόδους αναλυτικές ή Monte Carlo), στατιστικούς ελέγχους, φασματική ανάλυση και στατιστική πρόγνωση.

Οι χρονοσειρές απόκρισης του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (απολήψεις, παροχές, αντλήσεις, κλπ.) ενός σεναρίου προσομοίωσης μπορούν να εισαχθούν στην ΠΥΘΙΑ για περαιτέρω ανάλυση, τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια βάση. Εφόσον αναφερόμαστε σε χρονοσειρές πρόγνωσης, η ανάλυση μπορεί να είναι είτε «κατακόρυφη», να αφορά δηλαδή στο σύνολο του χρονικού ορίζοντα ελέγχου, είτε «οριζόντια», οπότε αναφέρεται στην επεξεργασία των δειγμάτων που προκύπτουν από τη συγκέντρωση των τιμών

όλων των σεναρίων, για συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Επισημαίνεται ότι η παραγωγή καμπυλών πρόγνωσης για διάφορες πιθανότητες υπέρβασης αποτελεί, στην πραγματικότητα, εφαρμογή του λογισμικού ΠΥΘΙΑ, την οποία χρησιμοποιεί από κοινού τόσο με τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ όσο και με την ΚΑΣΤΑΛΙΑ.

### **5.3.5 Συνεργασία με το μοντέλο εκτίμησης υδατικών αναγκών ΔΙΨΟΣ**

Το λογισμικό ΔΙΨΟΣ εκτιμά τις υδατικές ανάγκες για διάφορες καταναλωτικές χρήσεις νερού (ύδρευση, κτηνοτροφία, βιομηχανία, άρδευση). Συγκεκριμένα, οι ανάγκες για ύδρευση καθώς και οι κτηνοτροφικές και βιομηχανικές ανάγκες εκτιμώνται βάσει συντελεστών που έχουν προκύψει από την βιβλιογραφία, ενώ οι αρδευτικές ανάγκες προκύπτουν με βάση τα είδη και τις εκτάσεις των καλλιεργειών, τη δυνητική εξατμοδιαπνοή και τον φυτικό συντελεστή της κάθε καλλιέργειας.

Δεδομένου ότι οι μηνιαίες υδατικές καταναλώσεις αποτελούν βασική πληροφορία εισόδου του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, είναι αναμφισβήτητη η ανάγκη χρήσης μιας τέτοιας εφαρμογής για την αξιόπιστη εκτίμησή τους. Μάλιστα, ένα από τα χαρακτηριστικά του προγράμματος ΔΙΨΟΣ είναι η δυνατότητα ομαδοποίησης των χρήσεων και των χρηστών, κάτι που είναι σύμφωνο με τη φειδωλή φιλοσοφία του μοντέλου του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ. Πράγματι, το μοντέλο προσομοίωσης δεν εστιάζει στη λεπτομέρεια του υδροσυστήματος, καθώς δεν ενδιαφέρεται για τους μεμονωμένους χρήστες μιας περιοχής, αλλά για τη συνολική ζήτηση νερού στην περιοχή, η οποία αναπαρίσταται ως σημειακή κατανάλωση σε έναν εννοιολογικό κόμβο του δικτύου (βλ. 4.3.3).

### **5.3.6 Συνεργασία με τα υδρολογικά μοντέλα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ και ΖΥΓΟΣ**

Ένα από τα στοιχεία εισόδου του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ είναι η προσφορά νερού στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου και τους ταμειυτήρες. Εφόσον υπάρχουν ιστορικά δεδομένα, μπορούν να παραχθούν συνθετικά σενάρια εισροών, με άμεση εφαρμογή του μοντέλου ΚΑΣΤΑΛΙΑ, όπως περιγράφηκε στο εδάφιο 5.3.3. Αντίθετα, αν δεν υπάρχουν ιστορικά δείγματα ή τα δείγματα αυτά δεν είναι αξιόπιστα (π.χ. βασίζονται σε ανεπαρκείς μετρήσεις), τότε απαιτείται ένα ενδιάμεσο βήμα, που είναι η εκτίμηση των ιστορικών εισροών με τη χρήση υδρολογικών μοντέλων. Στα πλαίσια του έργου έχουν αναπτυχθεί δύο τέτοια μοντέλα, ένα αναλυτικό (ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ) και ένα απλουστευμένο (ΖΥΓΟΣ). Συγκεκριμένα:

Η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ υλοποιεί ένα ολοκληρωμένο σχήμα προσομοίωσης, που ενσωματώνει μοντέλα αναπαράστασης των υδρολογικών και υδρογεωλογικών διεργασιών, καθώς και της διαχείρισης των υδατικών πόρων μιας λεκάνης. Η περιγραφή των διεργασιών βασίζεται σε μια ημικατανομημένη σχηματοποίηση της λεκάνης και του υδροφορέα, επιτρέποντας έτσι τη διερεύνηση της χωρικής κατανομής των υδατικών πόρων, όχι μόνο σε φυσικά αλλά και σε διαταραγμένα υδροσυστήματα. Το μοντέλο χρησιμοποιεί γεωγραφικά δεδομένα (π.χ. υδρογραφικό δίκτυο, υπολεκάνες, υδροφορείς, γεωλογία, χρήσεις γης, κλίσεις), δεδομένα για τις τεχνητές συνιστώσες (διατάξεις απόληψης νερού, υδραγωγεία, σημεία ζήτησης), καθώς και υδρολογικά δεδομένα (χρονοσειρές βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής υπολεκανών). Για δεδομένες τιμές των παραμέτρων, η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ υπολογίζει τις παροχές κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου, τις παροχές των πηγών, τις στάθμες του υδροφορέα και τις απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά. Οι παράμετροι, που σχετίζονται με τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος, εκτιμώνται με βάση ιστορικά δεδομένα απορροών και στάθμης, τα οποία εντάσσονται σε ένα πλαίσιο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης.

Η συνεργασία ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ-ΥΔΡΟΓΕΙΟΥ αποτελεί ένα από τα πλέον ισχυρά πλεονεκτήματα του υπολογιστικού συστήματος. Για το σκοπό αυτό δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στον σχεδιασμό των δομών των δύο μοντέλων. Για παράδειγμα, για την περιγραφή των πρακτικών διαχείρισης σε μια λεκάνη, η ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ ενσωματώνει μια απλουστευμένη παραλλαγή του γραμμικού σχήματος κατανομής των

υδατικών πόρων, που περιγράφηκε στην ενότητα 4.5. Με την υπόθεση κοινής σχηματοποίησης του υδροσυστήματος, είναι δυνατή η σειριακή λειτουργία των προγραμμάτων, που υλοποιείται σε τρεις φάσεις. Η πρώτη αναφέρεται στην αναπαράσταση των διεργασιών του υδρολογικού κύκλου μέσω του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, που προϋποθέτει τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του με βάση ιστορικά υδρολογικά δεδομένα. Στη δεύτερη φάση εισάγονται συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης και δυναμικής εξατμοδιαπνοής στις υπολεκάνες που παράγονται από την ΚΑΣΤΑΛΙΑ, και με εφαρμογή του μοντέλου παράγονται αντίστοιχες χρονοσειρές απορροής στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου. Τέλος, στην τρίτη φάση οι εν λόγω χρονοσειρές απορροής εισάγονται στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, και χρησιμοποιούνται για τη στοχαστική προσομοίωση του υδροσυστήματος, με τελικό στόχο τον εντοπισμό της βέλτιστης διαχειριστικής πολιτικής.

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε με επιτυχία στα πλαίσια της πιλοτικής εφαρμογής στην περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας. Συγκεκριμένα, η εκτίμηση της απορροής κατά μήκος του Πηνειού και των κύριων παραποτάμων του (Ενιπέας, Φαρσαλιώτης, Σοφαδίτης, Καλέντζης, Πάμισος) έγινε με εφαρμογή του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, με βάση συνθετικές χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης μήκους 1000 ετών που παρήγαγε η ΚΑΣΤΑΛΙΑ στις αντίστοιχες υπολεκάνες. Στο μοντέλο δικτύου του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, οι εν λόγω υπολεκάνες αναπαραστάθηκαν ως κόμβοι εισροής, που μαζί με τους ταμειυτήρες Πλαστήρα και Σμοκόβου αποτέλεσαν τις θέσεις προσφοράς επιφανειακών υδατικών πόρων στο υδροσύστημα.

Από την άλλη πλευρά, σε κόμβους εισροής που αναπαριστούν την απορροή μεμονωμένων λεκανών, για τις οποίες δεν υπάρχουν επαρκή χωρικά δεδομένα (γεωγραφικά και υδρολογικά), ενδείκνυται η χρήση του απλοποιημένου μοντέλου ΖΥΓΟΣ. Πρόκειται για επιπρόσθετο εργαλείο του λογισμικού ΥΔΡΟΓΝΩΜΩΝ, που υλοποιεί ένα συγκεντρωτικό εννοιολογικό σχήμα υδατικού ισοζυγίου, το οποίο αναπαριστά τις κύριες υδρολογικές διεργασίες μιας λεκάνης απορροής και του υποκείμενου της υδροφορέα. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα εναλλακτικών δομών μοντέλου, ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα, με ενεργοποίηση μίας έως εννιά παραμέτρων.

### **5.3.7 Συνεργασία με το μοντέλο ανάλυσης παράκτιων υδροφορέων ΑΛΣ**

Το υδρογεωλογικό μοντέλο ΑΛΣ προσομοιώνει και βελτιστοποιεί τις αντλήσεις παράκτιων υδροφορέων, με στόχο την εκτίμηση του ασφαλούς απολήψιμου υδατικού δυναμικού. Το μοντέλο περιγράφει τα χαρακτηριστικά κίνησης του νερού σε παράκτιους υδροφορείς συναρτήσει της γεωμετρίας, των υδραυλικών παραμέτρων και της τροφοδοσίας τους. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της αντλούμενης ποσότητας, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα προστασία των παράκτιων υδροφορέων από υφαλμύριση.

Σε παράκτια υδροσυστήματα, το πρόγραμμα ΑΛΣ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της δυναμικότητας των γεωτρήσεων, που συνιστά χαρακτηριστική τους ιδιότητα στο μαθηματικό μοντέλο του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ (βλ. 4.2.5). Υπενθυμίζεται ότι το εν λόγω μέγεθος αποτελεί φυσικό άνω όριο των μηνιαίων απολήψεων, και συνεπώς η τήρησή του αίρει τον κίνδυνο υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων νερών, εξαιτίας της υφαλμύρισης.

### **5.3.8 Συνεργασία με τα μοντέλα ποιότητας νερού ΗΡΙΑΝΟΣ και ΛΕΡΝΗ**

Η ποιοτική συνιστώσα των διαχειριστικών σεναρίων που παράγει ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ εξετάζεται από τα σχετικά μοντέλα ΗΡΙΑΝΟΣ και ΛΕΡΝΗ, που αναλύουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού σε υδατορεύματα και λίμνες ή ταμειυτήρες, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Το λογισμικό ΗΡΙΑΝΟΣ συνδυάζει ένα μονοδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο για την εύρεση των χαρακτηριστικών της ροής του υδατορεύματος με ένα ποιοτικό μοντέλο για την εκτίμηση της διασποράς των ρύπων και την περιγραφή των χημικών και βιολογικών διεργασιών στην υδάτινη

στήλη. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι ο διαλυμένος και σωματιδιακός οργανικός άνθρακας, το άζωτο, ο φώσφορος, το διαλυμένο οξυγόνο, τα άλλα, η ετεροτροφική και αυτοτροφική βιομάζα, οι ανώτεροι μικροοργανισμοί, οι συντηρητικοί ρύποι κ.α. Είσοδοι του μοντέλου είναι η προσφορά νερού και οι εισροές ρυπαντικών φορτίων στο υδατόρευμα. Η προσφορά νερού εξαρτάται τόσο από την ανάντη απορροή όσο και από τις ανάντη απολήψεις, οι οποίες εκτιμώνται από τον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ, σε μηνιαία κλίμακα. Όσον αφορά στα ρυπαντικά φορτία, αυτά υπολογίζονται από το μοντέλο ΡΥΠΟΣ, που αποτελεί την τρίτη συνιστώσα των ποιοτικών μοντέλων του υπολογιστικού συστήματος. Στα αποτελέσματα του μοντέλου ΗΡΙΑΝΟΣ περιλαμβάνονται χρονοσειρές παροχών, ταχυτήτων και συγκεντρώσεων των εξεταζόμενων ρύπων κατά μήκος του υδατορεύματος. Εφόσον οι συγκεντρώσεις ξεπερνούν κάποιο ανεκτό όριο, μπορεί να κριθεί αναγκαία η λήψη διαχειριστικών μέτρων όπως η εισαγωγή περιορισμών ελάχιστης ροής στο υδατόρευμα, που είναι σαφές ότι θα συμβάλει στη μείωση των συγκεντρώσεων. Σε μια τέτοια περίπτωση, το επιθυμητό όριο παροχής μπορεί να βρεθεί με δοκιμές, εξετάζοντας εναλλακτικά σενάρια στον ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ και αξιολογώντας τα, στη συνέχεια, με το μοντέλο ΗΡΙΑΝΟΣ.

Σε ένα παρόμοιο πλαίσιο, είναι δυνατή η συνεργασία του ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ με το μοντέλο ΛΕΡΝΗ, το οποία προσομοιώνει τη δίαιτα ρύπων σε λίμνες και ταμιευτήρες, λαμβάνοντας υπόψη το ισοζύγιο εισροών και εκροών. Στο μοντέλο, η λίμνη αντιμετωπίζεται ως ένα στοιχείο πλήρους μίξης όπου κάθε ρύπος υφίσταται τη δράση της αραίωσης και των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Για την ικανοποιητική περιγραφή του φαινομένου του ευτροφισμού εξετάζονται ποιοτικοί δείκτες όπως η χλωροφύλλη, ο φώσφορος, το άζωτο, ο οργανικός άνθρακας και το διαλυμένο οξυγόνο. Και στην περίπτωση αυτή, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ενδέχεται να οδηγήσει σε αλλαγή της πολιτικής λειτουργίας της λίμνης ή του ταμιευτήρα, με την προσθήκη π.χ. ενός ορίου ελάχιστου αποθέματος ή ενός ορίου μέγιστης απόληψης.

### **5.3.9 Συνεργασία με το μοντέλο οικονομικής ανάλυσης ΕΡΜΗΣ**

Το λογισμικό ΕΡΜΗΣ παρέχει τα κύρια οικονομικά εργαλεία για την ανάλυση και αποτίμηση του κόστους εφαρμογής των σεναρίων που παράγει ο ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ. Το μοντέλο αποσκοπεί στην ανάλυση της χρηματοοικονομικής και περιβαλλοντικής συνιστώσας των σεναρίων, λαμβάνοντας υπόψη τις κατευθυντήριες γραμμές της οδηγίας πλαισίου για τα νερά (ΕΕ 2000/60), με στόχο την πληρέστερη αξιολόγηση των διαχειριστικών πολιτικών που προκύπτουν μέσω της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

## Αναφορές

---

- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Ρόζος, Α. Τέγος, και Ι. Ναλμπάντης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης των υδρολογικών και υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης απορροής «ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA, Τεύχος 4α, 103 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2006.
- Ευστρατιάδης, Α., *Διερεύνηση μεθόδων αναζήτησης ολικού βελτίστου σε προβλήματα υδατικών πόρων*, Μεταπτυχιακή εργασία, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.
- Ευστρατιάδης, Α., και Ν. Ζερβός, *Βέλτιστη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων - Εφαρμογή στο σύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, 181 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 1999.
- Ευστρατιάδης, Α., Δ. Κουτσογιάννης, και Σ. Κοζάνης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών «Κασταλία», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA, Τεύχος 3, 61 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005.
- Καραβοκυρός, Γ., Α. Ευστρατιάδης, και Δ. Κουτσογιάννης, Υδρονομείας (έκδοση 3.2) - Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 24, 142 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2004.
- 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., Από το μεμονωμένο υδραυλικό έργο στο υδροσύστημα: Το παράδειγμα του υδρολογικού σχεδιασμού των έργων Ευήνου, *Πρακτικά του Πανελληνίου Συνεδρίου των Τμημάτων Πολιτικών Μηχανικών*, Θεσσαλονίκη, 235-244, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 1997.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ι. Ναλμπάντης, και Ν. Μαμάσης, *Υδρολογική διερεύνηση - Έκθεση, Προμελέτη ενίσχυσης του υδατικού δυναμικού του ταμιευτήρα Μόρνου από τη λεκάνη του ποταμού Ευήνου*, Εισαγωγικό μέρος, Εργοδότης: Διεύθυνση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Ανάδοχοι: ΟΤΜΕ, Υδροηλεκτρική, ΥΔΡΟΤΕΚ, Δ. Κωνσταντινίδης, Γ. Καραβοκύρης, Θ. Γκόφας και Συνεργάτες, 192 σελίδες, Αθήνα, 1991.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Α. Ευστρατιάδης, Εμπειρία από την ανάπτυξη συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση μεγάλης κλίμακας υδροσυστημάτων της Ελλάδας, *Πρακτικά της Ημερίδας " Μελέτες και Έρευνες Υδατικών Πόρων στον Κυπριακό Χώρο "*, Λευκωσία, 159-180,

- Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2003.
- Κουτσογιάννης, Δ., *Σημειώσεις Βελτιστοποίησης Συστημάτων Υδατικών Πόρων - Μέρος Α*, Έκδοση 2, 91 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.
- Ναλμπάντης, Ι., Μοντελοποίηση υδροδοτικού συστήματος, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 2*, Τεύχος 14, 133 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούνιος 1990.
- 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.
- Πέππας, Α., *Προσομοίωση υδατικών πόρων και χρήσεων νερού στη Θεσσαλία*, Διπλωματική εργασία, 150 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.
- Τσακαλίας, Γ., και Δ. Κουτσογιάννης, Πιλοτικό μοντέλο για τη διαχείριση του συστήματος ταμιευτήρων υδροδότησης της Αθήνας, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 2*, Τεύχος 14, 52 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 1995.
- Biswas, A. K., *Systems Approach to Water Management*, McGraw-Hill, New York, 1976.
- 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.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W., *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 1988.
- Chvátal, 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.
- Dreyfus, H., and S. Dreyfus, *Mind over Machine: The Power of Human Intuition and Expertise in the Era of the Computer*, Free Press, 1986.
- 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 management of Athens, *Urban Water Journal*, 1(1), 3-15, 2004.
- Eom, S. B., S. M. Lee, E. B. Kim, C. Somarajan, A survey of decision support system applications (1994-1998), *Journal of Operational Research*, 35(4), 109-120, 1998.
- Faber, B. A., and J. R. Stedinger, Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts, *Journal of Hydrology*, 249, 113-133, 2001.
- 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.
- French, S., *Decision Analysis and Decision Support Systems*, 3rd draft edition, 2000.
- Georgakakos, A. P., and D. H. Marks, A new method for the real-time operation of reservoir systems, *Water Resources Research*, 23(7), 1376-1390, 1987.
- 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.
- Grigg, N. S., *Water Resources Management*, McGraw-Hill, New York, 1996.
- 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.

- Loaiciga, H. A., and M. A. Marino, An approach to parameter estimation and stochastic control in water resources with an application to reservoir operation, *Water Resources Research*, 21(11), 1575-1584, 1985.
- Loucks, D. P., and O. T. Sigvaldason, Multiple reservoir operation in North America, in *The Operation of Multiple Reservoir Systems*, edited by Z. Kaczmarck and J. Kindler, 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.
- Rozos, E., A. Efstratiadis, I. Nalbantis, and D. Koutsoyiannis, Calibration of a semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), 819-842, 2004.
- Sage, A. P., Associates systems for decision support, *Information and Decision Technologies*, 19, 165-184, 1993.
- Smith, D. K., *Network Optimization Practice: A Computational Guide*, John Wiley and Sons, 1982.
- Sol, H. G., Processes and tools for decision support: Inferences for future developments, in: *Processes and Tools for Decision Support*, (ed. Sol, H. G.), North Holland, Amsterdam, pp. 1-6, 1983.

- Turban, E., and J. Aronson, *Decision Support Systems and Intelligent Systems*, Prentice-Hall, New Jersey, 1998.
- Wasimi, S., and P. K. Kitanidis, Real-time forecasting and daily operation of a multireservoir system during floods by linear quadratic Gaussian control, *Water Resources Research*, 19(6), 1511-1522, 1983.
- Watkins, D. W., and D. C. McKinney, Recent developments associated with decision support systems in water resources, *U.S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991-1994*, Reviews of Geophysics, Vol. 33 Supplement 1995, American Geophysical Union, 1995.
- Winston, W. L., *Operations Research, Applications and Algorithms*, 3rd edition, Duxbury, Belmont, 1994.