

Το υπολογιστικό σύστημα Υδρονομέας και η εφαρμογή του στην προσομοίωση συστημάτων ταμιευτήρων

A. ΕΥΣΤΡΑΤΙΑΔΗΣ
Διπλ. Πολ. Μηχανικός

N. ΖΕΡΒΟΣ
Διπλ. Πολ. Μηχανικός

Γ. ΚΑΡΑΒΟΚΥΡΟΣ
Διπλ. Πληροφορικής

Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Το έργο της βέλτιστης διαχείρισης ενός συστήματος ταμιευτήρων καθίσταται ιδιαίτερα πολύπλοκο όταν υπάρχει ανταγωνισμός στις χρήσεις νερού όπως η ύδρευση, η άρδευση, η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας κ.α. Το υπολογιστικό σύστημα Υδρονομέας αποτελεί ένα λογισμικό εργαλείο, κατάλληλο για την προσομοίωση και αναζήτηση του βέλτιστου τρόπου διαχείρισης υδατικών πόρων σε υδροσυστήματα πολλαπλών στόχων. Το μαθηματικό μοντέλο βασίζεται σε πρόσφατη εισαγωγή και θεωρητική ανάπτυξη παραμετρικών κανόνων λειτουργίας συστημάτων ταμιευτήρων. Η υλοποίηση στον Υδρονομέα έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε αφ' ενός να είναι δυνατή η προσαρμογή του μοντέλου σε ένα ευρύ φάσμα υδροσυστημάτων και αφ' ετέρου να προσομοιώνεται πιστά η πραγματικότητα, συνυπολογίζοντας όλους τους φυσικούς, λειτουργικούς, περιβαλλοντικούς και λοιπούς περιορισμούς. Ο Υδρονομέας περιλαμβάνει υποσυστήματα λειτουργικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης ως προς καταναλωτικές και ενεργειακές χρήσεις του νερού, καθώς και υποσύστημα γραφικής απεικόνισης. Το πρόγραμμα προσαρμόστηκε κι ελέγχθηκε στο υδροσύστημα που περιλαμβάνει τα υφιστάμενα και υπό κατασκευή έργα στον Αχελώο, τη σχεδιαζόμενη εκτροπή και τα συναφή έργα στη Θεσσαλία.

Abstract

Optimisation of a multiple-reservoir system becomes increasingly complex when conflicting water uses exist, such as water supply, irrigation, hydroelectric power generation etc. Hydronomeas is a software tool, suitable for simulating and conducting a search for the optimum water resources management policy of a multi-purpose hydrosystem. The mathematical model is based on recent introduction and theoretical development of parametric rules for operation of multiple-reservoir systems. Software implementation was such performed that the model can be easily applied to a wide range of hydrosystems and that representation will be as realistic as possible, incorporating all natural, operational, environmental and other restrictions. Hydronomeas consists of several subsystems, including operational simulation, optimisation and visualisation. The first two cope with goals concerning both consumptive and energy-oriented water uses. Hydronomeas has been applied on the hydrosystem comprising all existing and under construction

projects of the Acheloos river, its planned diversion and the related projects in Thessalia.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη λειτουργίας συστημάτων ταμιευτήρων πολλαπλού σκοπού αποτελεί ένα πολύπλοκο αντικείμενο, τόσο ως προς τη θεωρητική του ανάλυση όσο και ως προς την πρακτική του αντιμετώπιση. Τα αποτελέσματα της εκτεταμένης έρευνας και ανάπτυξης εργαλείων λογισμικού που έχουν πραγματοποιηθεί τις τελευταίες δεκαετίες συνοψίζονται μεταξύ άλλων από τους Loucks et al. [13], Mays and Tung [16], Grigg [12] και Georgakakos et al. [9, 9].

Το υπολογιστικό σύστημα Υδρονομέας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για την προσομοίωση και βέλτιστη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων. Σε πρώτη φάση εφαρμόστηκε στην Ανατολική Στερεά Ελλάδα, με κύριο στόχο τον καθορισμό της βέλτιστης διαχείρισης των υδατικών πόρων της για την κάλυψη της υδρευτικής ζήτησης στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών [4]. Ωστόσο οι δυνατότητες του προγράμματος δεν περιορίζονται στην προσομοίωση του συγκεκριμένου υδροσυστήματος, αφού ο Υδρονομέας μπορεί να αντιμετωπίσει οποιοδήποτε δίκτυο αποτελούμενο από ταμιευτήρες, κόμβους, υδραγωγεία και μονάδες μετατροπής ενέργειας. Η δυνατότητα διερεύνησης μέσω του Υδρονομέα πραγματικών ή υποθετικών σεναρίων διευκολύνει το μελετητή να κατανοήσει καλύτερα τις επιπτώσεις των επιλογών του. Στις επιλογές αυτές εντάσσονται η τροποποίηση μιας σειράς από παράγοντες και παραμέτρους, όπως η δομή του δικτύου, οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών των έργων, οι στόχοι και οι προτεραιότητες κατά την προσομοίωση, οι χρονοσειρές υδρολογικών μεγεθών (δεδομένα εισόδου) κ.ά.

Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα επιλογής συνδυασμών στόχων, ανταγωνιστικών ή όχι μεταξύ τους, εντάσσοντάς τους σε μια σειρά προτεραιότητας, καθοριζόμενη από τον χρήστη. Δεν υπάρχει περιορισμός ως προς τον αριθμό ή το συνδυασμό στην επιλογή στόχων.

Το σύστημα βελτιστοποίησης του Υδρονομέα αναζητά τον πλέον αποδοτικό τρόπο διαχείρισης, προσομοιώνοντας το υδροσύστημα πολλές φορές με διαφορετικούς κανόνες

λειτουργίας. Κατά την προσομοίωση, η λειτουργία του συστήματος εκφράζεται παραμετρικά μέσω των κανόνων αυτών, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση του υπολογιστικού φόρτου. Με βάση τα αποτελέσματα, επιλέγεται ο βέλτιστος κανόνας διαχείρισης, με ένα από τα ακόλουθα κριτήρια:

- Μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας στην ικανοποίηση στόχου δεδομένης τιμής.
- Μεγιστοποίηση τιμής στόχου, με καθορισμένη αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας.
- Μεγιστοποίηση συνολικής παραγόμενης υδροηλεκτρικής ενέργειας.

Σε πολλές περιπτώσεις η εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων προϋποθέτει την προσομοίωση μιας αρκετά μακράς χρονικής περιόδου. Επειδή οι διαθέσιμες ιστορικές χρονοσειρές βροχής, απορροής και εξάτμισης δεν ξεπερνούν τις λίγες δεκαετίες, ενσωματώθηκε στον *Υδρονομέα* ένα μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης, το οποίο παράγει, με βάση ιστορικά στοιχεία, συνθετικές χρονοσειρές μεγάλου μήκους, διατηρώντας τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά [13, 14].

Η δυνατότητα ορθής ερμηνείας των αποτελεσμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Για το λόγο αυτό γίνεται λεπτομερής και κατατοπιστική παρουσίασή τους, τόσο μέσω γραφικών απεικονίσεων, στατικών ή δυναμικών (animation), όσο και μέσω αναλυτικών πινάκων ισοζυγίων και πιθανοτήτων.

Κατά το σχεδιασμό του *Υδρονομέα* δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του. Η χρησιμοποίηση της γλώσσας προγραμματισμού Object Pascal για την ανάπτυξη του λογισμικού επιτρέπει πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις του μοντέλου, γεγονός που ευνοεί τη μακροβιότητα του. Η επιλογή ανάπτυξης σε περιβάλλον Windows καθιστά το λογισμικό ιδιαίτερα φιλικό προς τον χρήστη.

2 ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ – ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

2.1 Παραμετροποίηση κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων

Ο παραμετρικός κανόνας διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων αποτελεί γενίκευση του λεγόμενου χωρικού κανόνα, σύμφωνα με τον οποίο ορίζεται κατάλληλο απόθεμα – στόχος σε κάθε ταμιευτήρα για ελαχιστοποίηση των υπερχειλίσεων [17]. Αποδεικνύεται ότι ένας γραμμικός παραμετρικός νόμος της μορφής

$$S_i = a_i + b_i V \quad (1)$$

όπου S_i το απόθεμα του ταμιευτήρα i , V ο συνολικός ωφέλιμος όγκος του υδατικού συστήματος και a_i , b_i άγνω-

στες παράμετροι, αρκεί για την πλήρη μαθηματική περιγραφή του χωρικού κανόνα [17].

Αν το υδροσύστημα διαθέτει N ταμιευτήρες τότε πρέπει

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

οπότε προκύπτουν οι περιορισμοί

$$\sum_{i=1}^N a_i = 0, \quad \sum_{i=1}^N b_i = 1 \quad (3)$$

Πρόσφατη έρευνα απέδειξε την καταλληλότητα του παραπάνω παραμετρικού νόμου ως προς τον ορισμό γενικών κανόνων λειτουργίας συστημάτων ταμιευτήρων. Εξαιτίας των περιορισμών χωρητικότητας απαιτείται διόρθωση των γραμμικών εξισώσεων του παραμετρικού κανόνα, οπότε η τελική μορφή των κανόνων λειτουργίας είναι μη γραμμική [17]. Σε διερεύνηση που έχει πραγματοποιηθεί για απλά υδροσυστήματα, έχει αποδειχθεί ότι η ευαισθησία του μοντέλου ως προς τις παραμέτρους a_i είναι πολύ περιορισμένη [17] και συνεπώς αυτές μπορεί να απαλειφθούν.

2.2 Παραμετροποίηση ενεργειακών στόχων

Αν επιδιώκεται μεγιστοποίηση της παραγόμενης υδροηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος, δεν αρκεί ο καθορισμός του κανόνα λειτουργίας των ταμιευτήρων, εφόσον μεταβλητές προς βελτιστοποίηση αποτελούν και οι τιμές των ενεργειακών στόχων E_p^* σε κάθε μονάδα μετατροπής ενέργειας p .

Παρόμοια με τους όγκους των ταμιευτήρων, οι στόχοι παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας E_p^* μπορούν να οριστούν παραμετρικά, συναρτήσει της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος [3]:

$$E_p^* = e_p \cdot \lambda \cdot \sum_{p=1}^M P_p^{inst} \quad (4)$$

όπου E_p^* ο ενεργειακός στόχος της μονάδας p , M ο αριθμός των υδροηλεκτρικών μονάδων (σταθμών), P_p^{inst} η εγκατεστημένη ισχύς της μονάδας, λ σταθερά αναγωγής και e_p παράμετρος του ενεργειακού στόχου. Δεδομένου ότι η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί σε κάθε μονάδα δεν μπορεί να υπερβεί την εγκατεστημένη ισχύ της, κάθε παράμετρος e_p έχει ως άνω όριο την ποσότητα

$$e_p \leq \frac{P_p^{inst}}{\sum_{p=1}^M P_p^{inst}} \quad (5)$$

Οι ενεργειακές παράμετροι e_p μπορούν να δεχθούν και κάτω όρια ως περιορισμούς. Ο στόχος που επιδιώκει το

σύστημα συνίσταται στη μεγιστοποίηση της συνολικής παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας SE_p

$$SE_p = E \left[\sum_{p=1}^m E_p^* \right] \quad (6)$$

όπου με $E[]$ συμβολίζεται η αναμενόμενη τιμή.

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΝΟΜΕΑ

3.1 Δυναμική του συστήματος

Για κάθε κόμβο $i=1, \dots, N$ του συστήματος ισχύει η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου. Στη γενικότερη περίπτωση κόμβου με αποθηκευτική ικανότητα (ταμιευτήρα) αυτή έχει τη μορφή

$$S_i^{t+1} = S_i^t + QS_i^t + QR_i^t + QN_i^t - EV_i^t - L_i^t - DE_i^t - R_i^t - SP_i^t \quad (7)$$

όπου N ο αριθμός των κόμβων, $t = 1, \dots, T$ το τρέχον χρονικό βήμα διακριτοποίησης (π.χ. μήνας), T ο συνολικός αριθμός προσομοιωμένων χρονικών βημάτων, S_i^t το ολικό απόθεμα του ταμιευτήρα i στην αρχή του χρονικού βήματος t , QS_i^t η εισροή λόγω απορροής από την ανάντη υπολεκάνη, QR_i^t η εισροή λόγω βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, QN_i^t η εισροή από ανάντη αγωγούς, δηλαδή από εκροές άλλων κόμβων, EV_i^t οι απώλειες λόγω εξάτμισης, L_i^t οι απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών, DE_i^t οι απολήψεις για εξυπηρέτηση καταναλωτικών στόχων, R_i^t η εκροή κατάντη και SP_i^t η εκροή, οφειλόμενη σε έλλειψη αποθηκευτικής ικανότητας (π.χ. περίπτωση υπερχειλίσης ταμιευτήρα).

Οι απώλειες ενός ταμιευτήρα i λόγω υπόγειων διαφυγών, λαμβάνοντας υπόψη τις εποχιακές διακυμάνσεις τους, θεωρούνται συνάρτηση της στάθμης του Z_i και προσεγγίζονται από ένα πολυώνυμο της μορφής

$$L_i^t = A_i^t \cdot (Z_i^t)^3 + B_i^t \cdot (Z_i^t)^2 + C_i^t \cdot Z_i^t + E_i^t + W_i^t \quad (8)$$

όπου L_i^t υπόγειες διαφυγές κατά το χρονικό βήμα (μήνα) t ($t=1, \dots, 12$), A_i^t , B_i^t , C_i^t , E_i^t συντελεστές της εξίσωσης, εξαρτώμενοι από το χρονικό βήμα και W_i^t τυχαίος όρος σφάλματος που ακολουθεί κανονική κατανομή ($0, \sigma_i^t$).

Ο διερχόμενος από κάθε αγωγό j όγκος δεν μπορεί να υπερβεί την παροχευτικότητα του κατά το αντίστοιχο χρονικό βήμα. Για αγωγούς μονής κατεύθυνσης ισχύει

$$Q_j^t \leq C_j \cdot DC_j^t \quad (9)$$

όπου Q_j^t ο διερχόμενος όγκος κατά το χρονικό βήμα t , C_j ο συντελεστής χρήσης του αγωγού που δέχεται τιμές από 0 ως 1 (όπου το 1 αντιστοιχεί σε απρόσκοπτη δυνατότητα χρήσης του αγωγού καθ' όλη τη διάρκεια του βήματος) και DC_j^t η παροχευτικότητα του αγωγού, η οποία είναι είτε σταθερή είτε εξαρτώμενη από το ύψος πτώσης.

Σε περίπτωση αμφίδρομης ροής εισάγεται αντίστοιχος περιορισμός ως προς τον ανάστροφα παροχετευόμενο όγκο RQ_j^t . Επιπλέον ισχύει η σχέση

$$Q_j^t / DC_j^t + RQ_j^t / RDC_j^t \leq 1 \quad (10)$$

η οποία περιορίζει τη συνολική ροή και προς τις δύο κατευθύνσεις στον αγωγό κατά το χρονικό βήμα t .

3.2 Ενεργειακά στοιχεία

Στον Υδρονομέα ορίζονται Μονάδες Μετατροπής Ενέργειας, οι οποίες διακρίνονται σε *στροβίλους* παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, *αντλιοστάσια* και *αντλιοστροβίλους*. Οι τελευταίοι έχουν τη δυνατότητα αμφίδρομης λειτουργίας, καταναλώνοντας ενέργεια σε ώρες μη αιχμής και παράγοντας υδροηλεκτρική ενέργεια σε ώρες αιχμής.

Κάθε μονάδα ενέργειας p συνδέεται μονοσήμαντα με έναν αγωγό j , ο οποίος έχει σταθερά ή μεταβλητά υψόμετρα υδροληψίας και εξαγωγής και συνδέει δύο κόμβους. Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ή καταναλισκόμενης ενέργειας E_p^t κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος t χρησιμοποιείται η εξίσωση

$$E_p^t = \psi_p^t \cdot V_p^t \cdot H_p^t \quad (11)$$

όπου ψ_p^t η ειδική ενέργεια, εξαρτώμενη από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας και τις απώλειες ενέργειας στον αγωγό σύνδεσης, V_p^t ο διερχόμενος όγκος νερού και H_p^t το ολικό ύψος πτώσης, το οποίο αντιστοιχεί στη διαφορά στάθμης νερού στα σημεία υδροληψίας και εξαγωγής του αγωγού με τον οποίο συνδέεται η μονάδα [7]. Το μοντέλο προϋποθέτει μονοσήμαντη σχέση μεταξύ ύψους πτώσης, παροχής και δυνατότητας παραγωγής ενέργειας (ειδικής ενέργειας).

Ο Υδρονομέας διακρίνει την παραγόμενη ενέργεια σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα και υπολογίζει ξεχωριστά την ενέργεια που παράγεται κατά τις ώρες αιχμής.

3.3 Λειτουργική προσομοίωση

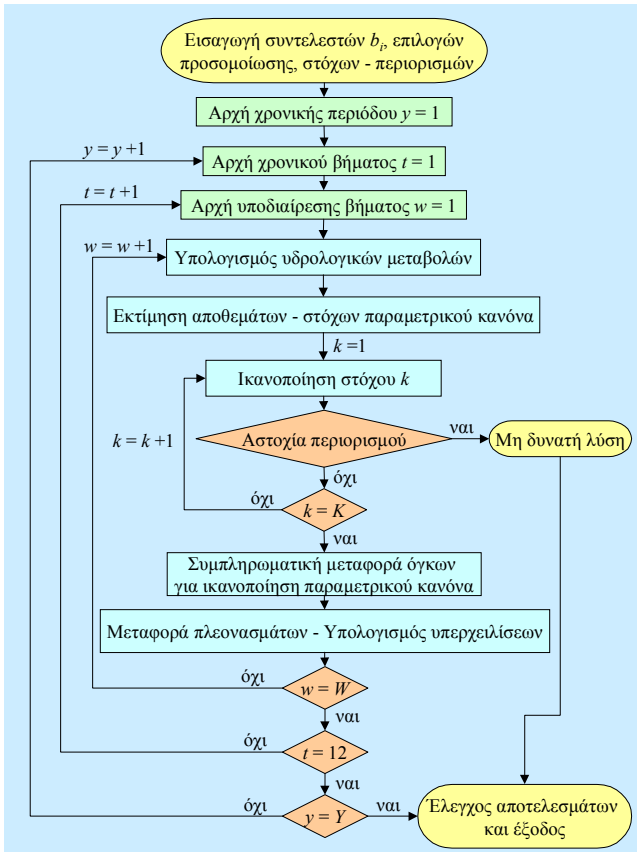
Το πρόγραμμα προσομοιώνει την πραγματική λειτουργία του συστήματος και κατανέμει τα υδατικά αποθέματα στους ταμιευτήρες σύμφωνα με τον εξεταζόμενο παραμετρικό κανόνα διαχείρισης. Ταυτόχρονα, επιδιώκει την ικανοποίηση των στόχων που έχουν τεθεί, σύμφωνα με την προκαθορισμένη σειρά προτεραιότητας (Σχ. 1). Για κάθε στόχο ορίζεται μέγιστη επιτρεπτή πιθανότητα αστοχίας.

Οι στόχοι συνοψίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Κατανάλωση νερού σε κόμβους του υδросυστήματος για υδρευτική, αρδευτική ή άλλη χρήση.
- Ελάχιστη ροή σε αγωγούς ή ποταμούς για λειτουργικούς ή περιβαλλοντικούς λόγους

- Διατήρηση του όγκου ταμιευτήρα πάνω από ένα ελάχιστο ή κάτω από ένα μέγιστο όριο ασφαλείας
- Παραγωγή πρωτεύουσας υδροηλεκτρικής ενέργειας.

Η λειτουργική προσομοίωση αποτελείται από μια ακολουθία σειριακά εκτελούμενων διαδικασιών, οι οποίες επαναλαμβάνονται σε κάθε υποδιαίρεση (αν υφίσταται) του κύριου χρονικού βήματος διακριτοποίησης (μήνας). Κατά τη διάρκεια μιας υποδιαίρεσης τα ύψη πτώσης και οι παροχετευτικότητες των αγωγών θεωρούνται σταθερά.



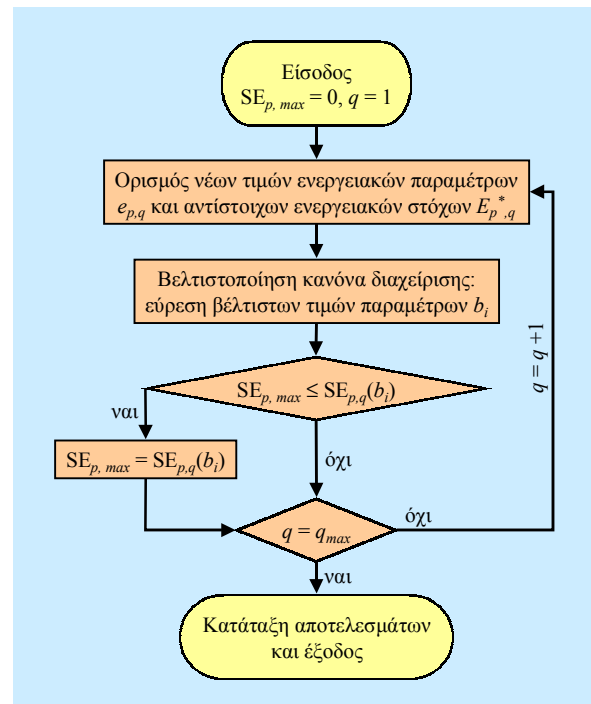
Σχ. 1: Διάγραμμα ροής του Υποσυστήματος Λειτουργικής Προσομοίωσης

Στην αρχή υπολογίζονται τα υδρολογικά μεγέθη, σύμφωνα με τις χρησιμοποιούμενες χρονοσειρές εισόδου. Κατόπιν εκτιμάται ο συνολικός ωφέλιμος όγκος V του συστήματος στο πέρας της χρονικής υποδιαίρεσης και βάσει αυτού καθορίζεται το απόθεμα – στόχος κάθε ταμιευτήρα, σύμφωνα με τον παραμετρικό κανόνα. Ακολουθεί η διαδικασία ικανοποίησης των στόχων σύμφωνα με την προκαθορισμένη σειρά προτεραιότητας. Εάν είναι εφικτό, οι απαιτούμενες απολήψεις νερού πραγματοποιούνται μόνο από ταμιευτήρες που διαθέτουν περίσσειμα σε σχέση με το απόθεμα – στόχο του παραμετρικού κανόνα. Στην επόμενη φάση πραγματοποιούνται συμπληρωματικές μεταφορές νερού, έτσι ώστε να προσεγγιστούν όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα τα αποθέματα – στόχοι του παραμετρικού κανόνα. Η διαδικασία κλείνει με τη μεταφορά των πλεονασμάτων ύδατος των κόμβων και τον υπολογισμό τυχόν

υπερχειλίσεων. Η προσομοίωση διακόπτεται αυτόματα σε περίπτωση υπέρβασης του επιτρεπτού ορίου αστοχίας οποιουδήποτε στόχου του συστήματος.

3.4 Βελτιστοποίηση παραμέτρων

Η κύρια διαδικασία βελτιστοποίησης του *Υδρονομέα* συνίσταται στον καθορισμό των βέλτιστων κανόνων λειτουργίας του υδροσυστήματος, δηλαδή του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων b_i . Ο εντοπισμός γίνεται με διαδοχικές δοκιμές. Ξεκινώντας από έναν αρχικό συνδυασμό παραμέτρων πραγματοποιούνται μεταβολές, ανάλογα με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, βάσει ενός μη γραμμικού αλγορίθμου αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ορισμένο αριθμό αρχικών τιμών, ώστε να εντοπιστεί η ολικά βέλτιστη λύση.



Σχ. 2: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου μεγιστοποίησης συνολικής παραγόμενης πρωτεύουσας υδροηλεκτρικής ενέργειας

Εάν επιδιώκεται ενεργειακή βελτιστοποίηση, εισάγεται μια επαναληπτική διαδικασία εξωτερικά του προηγούμενου βρόχου βελτιστοποίησης (Σχ. 2). Σε κάθε δοκιμή ορίζονται στόχοι παραγωγής ενέργειας στις επιμέρους υδροηλεκτρικές μονάδες. Για να επιτευχθεί γρηγορότερη σύγκλιση, παρέχεται η δυνατότητα εισαγωγής ορίων ως προς τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Σύμφωνα με την εμπειρία, η τελευταία κυμαίνεται στο 15-20% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος.

Μετά το πέρας της ενεργειακής βελτιστοποίησης, προκύπτει μια ακολουθία τιμών συνολικού ενεργειακού στόχου – αστοχίας, από την οποία ο μελετητής επιλέγει την επιθυμητή πολιτική διαχείρισης του υδροσυστήματος.

4 ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΑΧΕΛΩΟΥ – ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

4.1 Περιγραφή του συστήματος

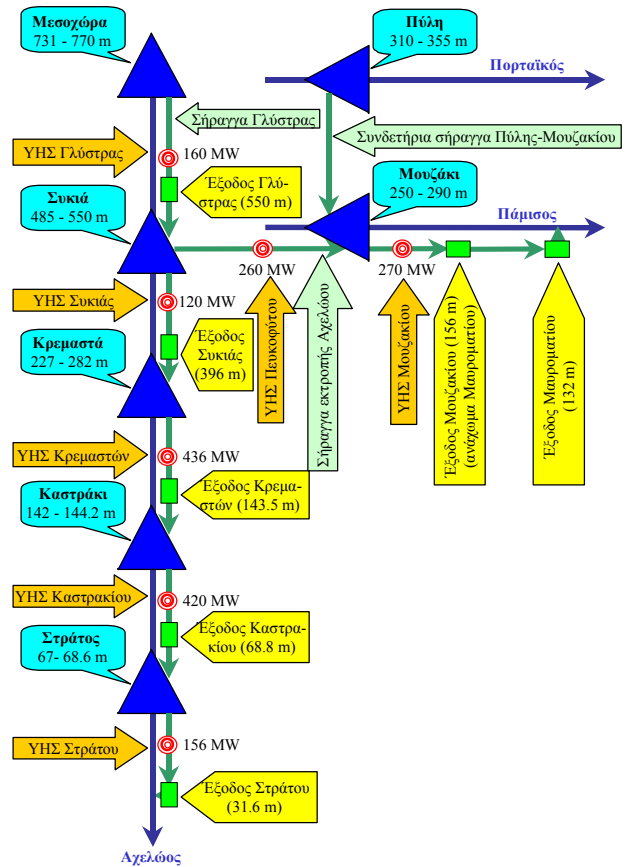
Το πλήρες υδατικό σύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας περιλαμβάνει 7 κύριους ταμιευτήρες και 7 μονάδες παραγωγής ενέργειας (Σχ. 3). Ένα μέρος του συστήματος υφίσταται ήδη (ταμιευτήρες Κρεμαστών, Καστρακίου και Στράτου), ένα άλλο τελεί υπό κατασκευή (φράγματα Μεσοχώρας και Συκιάς), ενώ το υπόλοιπο βρίσκεται υπό μελέτη [4, 7, 11]. Για τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς Πευκοφύτου και Μουζακίου έχει προταθεί η δυνατότητα αντλητικής λειτουργίας κατά τις βραδινές ώρες χαμηλής κατανάλωσης, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας αιχμής [4]. Στη θέση Μαυρομάτι, κατάντη της εξόδου του υδροηλεκτρικού σταθμού Μουζακίου, μελετάται η κατασκευή μικρού ρυθμιστικού αναχώματος.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης διαφόρων Σχημάτων Έργων (σεναρίων), που αφορούν είτε ολόκληρο το υδροσύστημα είτε ορισμένα τμήματα αυτού. Τονίζεται πως σε καμία περίπτωση τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη και τα προκύπτοντα αποτελέσματα δεν αποσκοπούν στη διατύπωση οριστικών προτάσεων ως προς την προτιμητέα μορφή του υδροσυστήματος. Αντίθετα, εξετάζονται μερικά από τα πολλά κατασκευαστικά σενάρια που έχουν κατά καιρούς προταθεί, τα οποία διακρίνονται για την πολυπλοκότητά τους, προκειμένου: α) Να διερευνηθούν οι δυνατότητες και η απόδοση του *Υδρονομέα* στην προσομοίωση και βελτιστοποίηση ενός πολυσύνθετου υδατικού συστήματος με ποικιλία αλληλοσυγκρουόμενων στόχων και β) Να είναι δυνατή η σύγκριση με προγενέστερες μελέτες [7, 11], ώστε να γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις και να εκτιμηθεί η αξιοπιστία του μοντέλου.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων ταμιευτήρων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ταμιευτήρων

Ταμιευτήρας	Ελάχιστες τιμές		Μέγιστες τιμές	
	Όγκος (hm ³)	Στάθμη (m)	Όγκος (hm ³)	Στάθμη (m)
Μεσοχώρα	132.8	731	358.0	770
Συκιά	94.0	485	590.8	550
Κρεμαστά	999.0	227	4500.0	282
Καστράκι	750.0	142	800.0	144.2
Στράτος	60.0	67	70.2	68.6
Πύλη	21.7	310	68.7	335
Μουζάκι	54.4	250	237.2	290



Σχ. 3: Πλήρες σύστημα Αχελώου – Θεσσαλίας

4.2 Αρδευτικές ανάγκες και περιβαλλοντικοί περιορισμοί

Οι καταναλωτικές ανάγκες του συστήματος εντοπίζονται στα δύο κατάντη άκρα του, δηλαδή στην έξοδο Στράτου και στην έξοδο Μαυροματίου, που αποτελούν τους βασικούς κόμβους τροφοδοσίας της Αιτωλοακαρνανίας και της Θεσσαλίας αντίστοιχα. Οι ετήσιες αρδευτικές ανάγκες της Αιτωλοακαρνανίας ανέρχονται σε 35 m³/s για το διάστημα Μαΐου – Σεπτεμβρίου (περίπου 450 hm³). Στην πλευρά της Θεσσαλίας, στην οποία παρουσιάζονται μεγάλα ελλείμματα αρδευτικού νερού μετά την εντατική χρήση και υποβάθμιση των υπόγειων υδροφορέων της περιοχής, οι ανάγκες ανέρχονται για ίδιο διάστημα σε 600 hm³ κατ' ελάχιστον. Η αρδευτική ζήτηση στην Πύλη, ύψους 4 hm³/έτος, έχει τοπικό χαρακτήρα. Η μηνιαία κατανομή των αρδευτικών απολήψεων με βάση μελέτη των ΕΥΔΕ Αχελώου και Υδροεξυγιαντικής [2] παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Οι περιβαλλοντικές δεσμεύσεις του συστήματος συνίστανται κυρίως στη διατήρηση μιας ελάχιστης ροής στους κατάντη των φραγμάτων ποταμούς. Στη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO [1] καθορίζεται ελάχιστη συνεχής παροχή στο τμήμα του Αχελώου μεταξύ των φραγμάτων Μεσοχώρας και Συκιάς ίση με 1.5 m³/s και στο τμήμα κατάντη της Συκιάς ίση με 5 m³/s και στις εκβολές του Αχελώου ίση με 21 m³/s.

Επιπλέον, λαμβάνεται συνεχής παροχή περιβαλλοντικής διατήρησης στους ποταμούς Πορταϊκό και Πάμισο (κατά την των φραγμάτων Πύλης και Μουζακίου αντίστοιχα) ίση με $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ [7]. Τέλος, για τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα κατάντη του φράγματος Πύλης ζητείται μια επιπλέον συνεχής παροχή $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ κατά μήκος του Πορταϊκού.

Πίνακας 2: Μηνιαία κατανομή αρδευτικών απολήψεων σε Πύλη και Μαυρομάτι

Μήνας	Ποσοστό ζήτησης (%)
Απρίλιος	5.0
Μάιος	11.0
Ιούνιος	23.6
Ιούλιος	30.2
Αύγουστος	26.4
Σεπτέμβριος	3.8
ΣΥΝΟΛΟ	100.0

Επειδή οι περιβαλλοντικές δεσμεύσεις στη θέση Πύλη δεν αναφέρονται σε αγωγό του υδροσυστήματος αλλά στον Πορταϊκό ποταμό, τίθενται ως καταναλωτικοί στόχοι στον ίδιο τον ταμιευτήρα.

Για όλους τους αρδευτικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς η μέγιστη αποδεκτή αστοχία τίθεται ίση με 20% [7] σε ετήσια βάση.

4.3 Ενεργειακές και οικονομικές παραδοχές

Όλα τα υδροηλεκτρικά έργα του συστήματος θεωρούνται έργα αιχμής. Η περίοδος αιχμής θεωρείται πως διαρκεί 6 ώρες ημερησίως κατά μέγιστο. Εάν προβλέπεται λειτουργία αντλιοστροβίλου, η χρήση της αντλίας περιορίζεται το πολύ σε 8 ώρες ημερησίως, ώστε να καλύπτεται αποκλειστικά με νυχτερινή ενέργεια. Επειδή το σύστημα μελετάται και βελτιστοποιείται ως προς την ενεργειακή του απόδοση, τίθεται ως αντικειμενικός στόχος η μεγιστοποίηση της παραγωγής πρωτεύουσας ενέργειας αιχμής. Αυτή έχει οριστεί ως η ενέργεια που είναι διαθέσιμη το 99% του χρόνου, με την προϋπόθεση ότι μπορεί να παραχθεί εντός των ορίων του ημερησίου εξάωρου αιχμής. Η λοιπή παραγόμενη ενέργεια θεωρείται δευτερεύουσα και δεν αποτελεί μέγεθος προς βελτιστοποίηση.

Στην περίπτωση των αντλιοστροβίλων, η άντληση πραγματοποιείται κατά προτεραιότητα στη διάρκεια της χειμερινής περιόδου (Σεπτέμβριος-Μάρτιος), κατά την οποία δεν προβλέπεται ροή προς τη Θεσσαλία για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, η κάλυψη των ενεργειακών στόχων στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς Πευκοφύτου και Μουζακίου πραγματοποιείται μέσω άντλησης μόνον εφόσον δεν έχουν

ικανοποιηθεί οι ενεργειακοί στόχοι από μεταφορά όγκων αρδευτικής χρήσης.

Οι τιμές μονάδας πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας λαμβάνονται ίσες με 10.9 και 6.5 δρχ./KWh αντίστοιχα. Η τιμή ενέργειας άντλησης θεωρείται ίση με την τιμή δευτερεύουσας ενέργειας. Το αρδευτικό όφελος λαμβάνεται ίσο με 18.0 δρχ./m^3 , τιμή η οποία αντιστοιχεί σε μέσο καθαρό όφελος 10000 δρχ./στρέμμα [1, 7]. Οι παραπάνω εκτιμήσεις είναι γενικά συντηρητικές και δεν λαμβάνουν υπόψη έμμεσα οφέλη.

Κατά την κατάρτιση του οικονομικού ισολογισμού δε συμπεριλαμβάνονται κόστη κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης των έργων αξιοποίησης.

4.4 Εξεταζόμενα σχήματα έργων

Στην περιοχή μελέτης που περιγράφηκε προηγουμένως εξετάζονται τα παρακάτω υδατικά συστήματα:

- Υφιστάμενο σύστημα Κάτω Αχελώου, το οποίο περιλαμβάνει τους ταμιευτήρες Κρεμαστών, Καστρακίου και Στράτου (Σχήμα Έργων Α).
- Πλήρες σύστημα Αχελώου, το οποίο περιλαμβάνει το υφιστάμενο σύστημα και τους υπό περάτωση ταμιευτήρες Μεσοχώρας και Συκιάς (Σχήμα Έργων Β). Μελετώνται δύο σενάρια. Στο πρώτο (B_1) θεωρείται μοναδικός στόχος απόληψης η αρδευτική ζήτηση στην έξοδο Στράτου, ενώ στο δεύτερο (B_2) εισάγεται επιπλέον στόχος απόληψης 600 hm^3 ετησίως από τον ταμιευτήρα Συκιάς, σύμφωνα με την κατανομή του Πίνακα 2, με σκοπό τη διερεύνηση των επιπτώσεων της εκτροπής στα έργα του Κάτω Αχελώου.
- Πλήρες σύστημα Αχελώου - Θεσσαλίας, το οποίο περιλαμβάνει το πλήρες σύστημα Αχελώου, τη σήραγγα εκτροπής και τους υπό μελέτη ταμιευτήρες Πύλης και Μουζακίου (Σχήμα Έργων Γ).

Κάνοντας χρήση των δυνατοτήτων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του *Υδρονομέα*, εξετάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί ενεργειακών παραμέτρων, με στόχο την μεγιστοποίηση του ενεργειακού οφέλους, χωρίς παραβίαση των ορίων αστοχίας των πάσης φύσεως περιορισμών. Προσομοιώθηκε ένα εύρος 34 υδρολογικών περιόδων (1960-1994), με βάση ιστορικά δεδομένα που ελήφθησαν από προηγούμενες μελέτες [2, 6, 9], και με θεώρηση μηνιαίου βήματος διακριτοποίησης, χωρίς υποδιαίρεσεις.

Όπως προαναφέρθηκε, οι προς βελτιστοποίηση ενεργειακοί στόχοι και οι περιορισμοί του συστήματος ικανοποιούνται με βάση προκαθορισμένη σειρά προτεραιότητας. Για να αποφευχθούν τεχνητά δυσμενείς καταστάσεις κατά τη διαδοχική ικανοποίηση των επιμέρους στόχων, τέθηκαν σε υψηλή προτεραιότητα στόχοι που αναφέρονται στα πλέον ανάντη στοιχεία του συστήματος.

Ειδικά στο Σχήμα Έργων Γ, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ομαλή αντλητική λειτουργία του ΥΗΣ Μουζακίου, θεωρήθηκε εικονικός ρυθμιστικός όγκος 100 hm³ στο Μαυρομάτι, ο οποίος αντιστοιχεί στο ήμισυ της μέγιστης μηνιαίας αρδευτικής ζήτησης. Η παραδοχή αυτή υιοθετήθηκε για υπολογιστικούς λόγους, δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα και δικαιολογείται από το γεγονός ότι το βήμα προσομοίωσης είναι πολύ μεγαλύτερο από το ημερήσιο.

4.5 Αποτελέσματα και συγκρίσεις

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 3, ενώ οι κανόνες λειτουργίας των ταμιευτήρων εικονίζονται στα Σχ. 4 - 7. Με βάση την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε εξάγονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Οι αρδευτικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί του υδροσυστήματος ικανοποιούνται με πρακτικά μηδενικές αστοχίες σε όλες τις περιπτώσεις. Υψηλότερα ποσοστά αστοχίας, αλλά πάντοτε εντός των αποδεκτών ορίων, εμφανίζονται μόνο ως προς την ικανοποίηση των καταναλωτικών απαιτήσεων στον ταμιευτήρα Πύλης.
- Η προσθήκη των ταμιευτήρων Μεσοχώρας και Συκιάς (Σχήμα Έργων Β₁) στο υφιστάμενο σύστημα (Σχήμα Έργων Α) συνεπάγεται αύξηση της ενεργειακής απόδοσης κατά 850 GWh ετησίως, εκ των οποίων οι 500 είναι πρωτεύουσα ενέργεια. Και στις δύο περιπτώσεις οι κανόνες λειτουργίας επιβάλλουν την κατά προτεραιότητα συγκέντρωση του διαθέσιμου όγκου στον ταμιευτήρα Κρεμαστών, ο οποίος λειτουργεί ρυθμιστικά λόγω του μεγέθους του (Σχ. 4 και 5).
- Οι επιπτώσεις της εκτροπής στο υδροσύστημα του Αχελώου (Σχήμα Έργων Β₂) είναι δυσμενείς ως προς την παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας, η οποία μειώνεται στα επίπεδα του Σχήματος Έργων Α. Ωστόσο, οι οικονομικές απώλειες υπερκαλύπτονται από τη σημαντική αύξηση του αρδευτικού οφέλους. Ως προς τους κανόνες λειτουργίας, δίνεται πλέον προτεραιότητα στους μικρότερους ταμιευτήρες και όχι στα Κρεμαστά (Σχ. 6).
- Εφόσον η εκτροπή συνδυαστεί με την κατασκευή των υδροηλεκτρικών έργων στη Θεσσαλία, των ρυθμιστικών έργων και τη χρήση αντλιοστροβίλων (Σχήμα Έργων Γ), προκύπτουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το προηγούμενο σχήμα. Συγκεκριμένα, η συνολική παραγωγή ενέργειας αυξάνεται κατά 1000 GWh ετησίως, οι οποίες αντιστοιχούν αποκλειστικά σε πρωτεύουσα ενέργεια. Οι κανόνες λειτουργίας παρουσιάζουν αναλογία με την προηγούμενη περίπτωση (Σχ. 7).

Τα παραπάνω αποτελέσματα κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα με αυτά προγενέστερων μελετών [7, 11],

επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του παραμετρικού μοντέλου και της εφαρμογής του στον *Υδρονομέα*.

Πίνακας 3: Συνοπτικά αποτελέσματα (μέσα ετήσια μεγέθη)

ΣΧΗΜΑ ΕΡΓΩΝ	A	B ₁	B ₂	Γ
Εκτροπή	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι
Όγκος εκτροπής ¹	–	–	600	487
Πρωτεύουσα ενέργεια ²	1167	1633	1126	2144
Δευτερεύουσα ενέργεια ²	839	1222	1201	1197
Ενέργεια άντλησης ²	–	–	–	578
Συνολική ενέργεια ²	2006	2855	2327	2763
Αρδευτικό όφελος ³	8285	8285	19085	19279
Ενεργειακό όφελος ³	18170	25739	20079	27389
Μικτό όφελος ³	26454	34023	39164	46667

1: σε hm³ 2: σε GWh 3: σε εκατ. δρχ.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

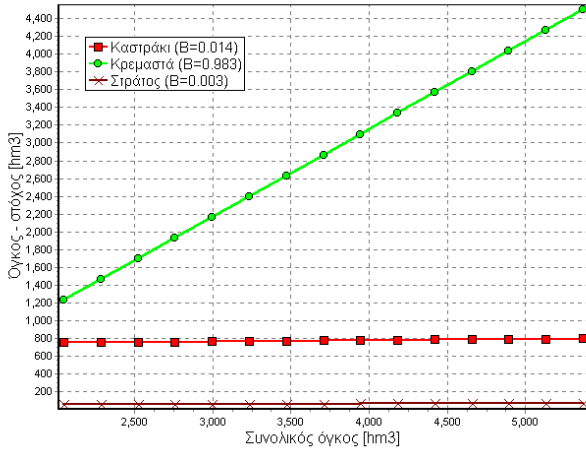
Το μεθοδολογικό σχήμα Παραμετροποίηση – Προσομοίωση – Βελτιστοποίηση αποδεικνύεται αποτελεσματικό για την αντιμετώπιση πολύπλοκων προβλημάτων διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων. Το σχήμα αυτό συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των μεθόδων προσομοίωσης (ακριβής και λεπτομερής αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών) και βελτιστοποίησης (καθορισμός βέλτιστης πολιτικής διαχείρισης), μειώνοντας δραστικά τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης.

Το υπολογιστικό σύστημα *Υδρονομέας*, που υλοποιεί το παραπάνω μεθοδολογικό σχήμα, δεν έχει θεωρητικούς περιορισμούς ούτε ως προς το μέγεθος και την τοπολογία του δικτύου που προσομοιώνεται ούτε ως προς τον αριθμό και το συνδυασμό των στόχων προσομοίωσης. Αποδείχθηκε δε ιδιαίτερα ευέλικτο και εύκολα προσαρμόσιμο σε κάθε εξεταζόμενο σενάριο.

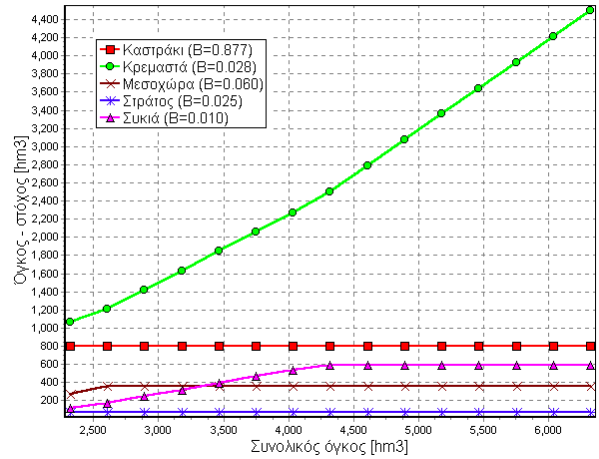
Από την εφαρμογή του *Υδρονομέα* στο υδροσύστημα της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας καθώς και σε άλλα υδροσυστήματα με ριζικά διαφορετικές χρήσεις νερού, διαφαίνεται η καταλληλότητά του για την επίλυση ποικιλίας διαχειριστικών προβλημάτων.

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΕΙΣ

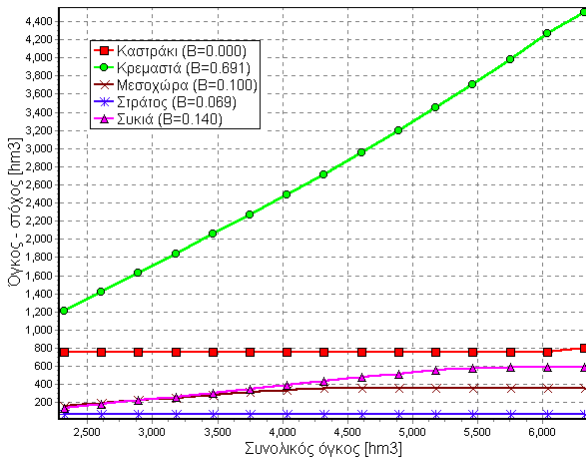
Το Υπολογιστικό σύστημα *Υδρονομέας*, έκδοση 1.0, αναπτύχθηκε στα πλαίσια της 3ης φάσης του ερευνητικού έργου «Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας» και χρηματοδοτήθηκε από τη Διεύθυνση Ύδρευσης και Αποχέτευσης του ΥΠΕΧΩΔΕ.



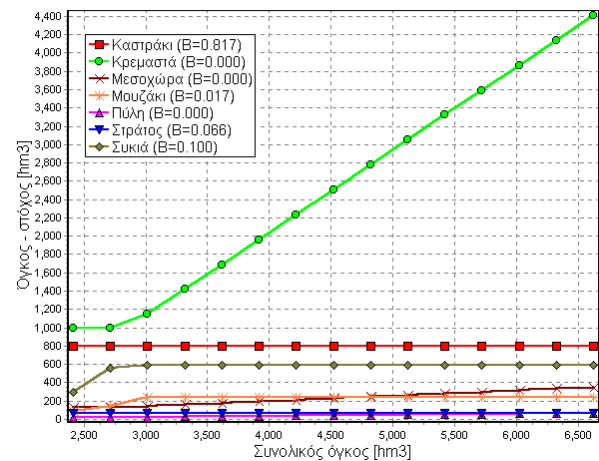
Σχ. 4: Κανόνες λειτουργίας Σχήματος Έργων A



Σχ. 6: Κανόνες λειτουργίας Σχήματος Έργων B2



Σχ. 5: Κανόνες λειτουργίας Σχήματος Έργων B1



Σχ. 7: Κανόνες λειτουργίας Σχήματος Έργων Γ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΕΥΔΕ Αχελώου και ENVECO, **Συνολική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων της Εκτροπής Αχελώου**, ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα, 1995.
- ΕΥΔΕ Αχελώου και Υδροεξυγιαντική, **Μελέτη υδατικών συστημάτων, Παράρτημα Α της Συνολικής Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων της Εκτροπής Αχελώου**, ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα, 1995.
- Ευστρατιάδης, Α., Ζερβός, Ν., **Βέλτιστη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων – Εφαρμογή στο σύστημα Αχελώου-Θεσσαλίας**, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα, 1999.
- Καλαούζης, Γ., **Γενική Διάταξη Έργων Εκτροπής Αχελώου προς τη Θεσσαλία**, ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΔΕ Αχελώου, Αθήνα, 1996.
- Καραβοκυρός, Γ., Κουτσογιάννης, Δ., και Μανδέλλος, Ν., **Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης υδροσυστήματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας**, Τεύχος 40, Ερευνητικό Έργο Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας, ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΜΠ, Αθήνα, 1998.
- Κουτσογιάννης, Δ., **Υδρολογική διερεύνηση, στα πλαίσια της Γενικής Διάταξης Έργων Εκτροπής Αχελώου προς τη Θεσσαλία**, ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΔΕ Αχελώου, Αθήνα, 1996α.
- Κουτσογιάννης, Δ., **Μελέτη λειτουργίας των ταμιευτήρων, στα πλαίσια της Γενικής Διάταξης Έργων Εκτροπής Αχελώου προς τη Θεσσαλία**, ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΔΕ Αχελώου, Αθήνα, 1996β.
- Μιμίκου, Μ., **Υδρολογική μελέτη λεκάνης Κρεμαστών και Άνω Αχελώου**, ΔΕΗ/ΔΑΥΕ, Αθήνα, 1980.
- Georgakakos, A.P., and D. Marks, **A New Method for the Real-Time Operation of Reservoir System**, *Water Resources Research*, 23(7), 1376-1390, 1987.
- Georgakakos, A.P., H. Yao, and Y. Yu, **Control Model for Hydroelectric Energy Optimization**, *Water Resources Research*, 33(10), 2367-2379, 1997.
- Georgakakos, A., Yao, H., DeMarchi, C., and Mullusky, M., **A decision support system for the Western Sterea Hellas water resources system**, Τεύχος 41, Ερευνητικό Έργο Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας, ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΜΠ, Αθήνα, 1998.
- Grigg, N. S., **Water Resources Management**, McGraw-Hill, New York, 1996.
- Koutsoyiannis, D., **Optimal decomposition of covariance matrices for multivariate stochastic models in hydrology**, *Water Resources Research*, in press, 1999.
- Koutsoyiannis, D., and Manetas, A., **Simple disaggregation by accurate adjusting procedures**, *Water Resources Research*, 32(7), 2105-2117, 1996.
- Loucks, D. P., Stedinger, J. R., and Haith, D. A., **Water resource system planning and analysis**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981.
- Mays, L. W., and Tung, Y. K., **Systems analysis**, in *Water Resources Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1996.
- Nalbantis, I., and Koutsoyiannis D., **A parametric rule for planing and management of multiple-reservoir systems**, *Water Resources Research*, 33(9), 2165-2177, 1997.