



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ  
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ –  
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ**

Αθανασία Ναπ. Οικονόμου

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ  
&  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2000

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Δ. Κουτσογιάννης

την αφιερώνω στο θείο μου Δημήτρη

## Αντί προλόγου

Ξεκινώντας να γράψω τον πρόλογο της διπλωματικής μου εργασίας, ξαναέφερα στη μνήμη μου όλα όσα συνέβησαν από τη στιγμή της ανάληψης του συγκεκριμένου θέματος ως τη διεκπεραίωσή του. Το χτίσιμο της εφαρμογής, ο έλεγχος και η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυπταν και τέλος η συγγραφή του κειμένου της εργασίας και η σαφής απόδοση όλης της δουλειάς που προηγήθηκε, αποτέλεσαν για μένα πραγματική πρόκληση.

Πολύτιμος συμπαραστάτης και αρωγός στην προσπάθειά μου ήταν ο επιβλέπων καθηγητής μου και θεός μου κ. Δημήτρης Κουτσογιάννης. Η επιστημονική υποστήριξη και καθοδήγησή του, αλλά και η αμέριστη ηθική του συμπαράσταση ήταν για μένα καταλυτικά στοιχεία στο να φέρω σε πέρας αυτό που είχα ξεκινήσει. Το ευχαριστώ είναι σε αυτή την περίπτωση λίγο.

Ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής που με τις καίριες παρατηρήσεις τους βοήθησαν στην πληρέστερη και σαφέστερη απόδοση του κειμένου της εργασίας.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου ο καθένας με το δικό του τρόπο. Τέλος ευχαριστώ το Στέφανο για την υποστήριξη και το θάρρος που μου έδωσε όταν το χρειαζόμουν.

Αθανασία Οικονόμου  
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2000

# Αξιολόγηση της μεθόδου Παραμετροποίησης – Προσομοίωσης – Βελτιστοποίησης στη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Extended Abstract.....	6
Introduction.....	6
Literature review.....	9
The parametrization – simulation – optimization methodology.....	10
Description of the rule.....	11
Parametric approach.....	12
Non-parametric approach.....	12
The equivalent reservoir method.....	12
The evolutionary algorithm.....	13
Summary and conclusions.....	13
1. Εισαγωγή.....	26
1.1 Γενικά.....	26
1.2 Επισκόπηση μεθοδολογιών.....	26
1.3 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας.....	31
1.4 Διάρθρωση της εργασίας.....	32
2. Η μεθοδολογία παραμετροποίηση - προσομοίωση - βελτιστοποίηση.....	34
2.1 Προσομοίωση ταμιευτήρων με χρήση ευρετικών κανόνων λειτουργίας.....	34
2.2 Ο παραμετρικός κανόνας.....	35
2.2.1 Παραμετροποίηση προβλημάτων διαχείρισης ταμιευτήρων.....	35
2.2.2 Περιγραφή του παραμετρικού κανόνα.....	36
2.2.3 Έλεγχος του μοντέλου για διάφορες πολιτικές λειτουργίας.....	37
2.2.4 Περαιτέρω ανάπτυξη του κανόνα και διερεύνηση παραμέτρων.....	40
2.2.5 Μοντέλο προσομοίωσης - βελτιστοποίησης.....	43
3. Γενετικοί αλγόριθμοι.....	44
3.1 Εισαγωγή.....	44
3.2 Βασικές αρχές.....	45
3.2.1 Αναπαράσταση του προβλήματος.....	46
3.2.2 Αξιολόγηση των πιθανών λύσεων.....	48
3.2.3 Μηχανισμοί επιλογής.....	49
3.2.4 Γενετικοί τελεστές.....	50
3.2.5 Σύγκλιση.....	51
3.3 Διαφορές γενετικών αλγορίθμων από τις παραδοσιακές μεθόδους βελτιστοποίησης.....	52

3.4 Βελτιωμένοι γενετικοί αλγόριθμοι.....	52
3.4.1 Κλιμακούμενη ικανότητα επιβίωσης των αριθμοσειρών.....	53
3.4.2 Μετάλλαξη γειτονικών γονιδίων.....	53
3.4.3 Γκρίζα κωδικοποίηση.....	53
3.4.4 Πραγματική κωδικοποίηση.....	54
3.5 Μαθηματικά και τεχνικά χαρακτηριστικά εξελικτικού επιλυτή.....	56
4. Εφαρμογή.....	58
4.1 Εισαγωγή - Γενική μεθοδολογία.....	58
4.2 Δυναμική συστήματος.....	60
4.2.1 Υπόγειες διαφυγές.....	60
4.2.2 Περιορισμοί.....	61
4.3 Γενικά χαρακτηριστικά ταμιευτήρων.....	61
4.4 Γενικά χαρακτηριστικά στροβίλων.....	62
4.5 Αρδευτικές - υδρευτικές ανάγκες.....	64
4.6 Περιγραφή μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης παραμετροποιημένου συστήματος.....	65
4.6.1 Μεγιστοποίηση αρδευτικών - υδρευτικών απολήψεων, ελαχιστοποίηση κόστους άντλησης νερού στους ταμιευτήρες.....	65
4.6.2 Μεγιστοποίηση οφέλους από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	68
4.7 Περιγραφή λειτουργικών περιορισμών και βελτιστοποίησης του συνόλου των απολήψεων (μη παραμετρική προσέγγιση).....	69
4.7.1 Μεγιστοποίηση αρδευτικών - υδρευτικών απολήψεων, ελαχιστοποίηση κόστους άντλησης νερού στους ταμιευτήρες.....	69
4.7.2 Μεγιστοποίηση οφέλους από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	70
4.8 Επίλυση με μέθοδο του Ισοδύναμου Ταμιευτήρα.....	71
4.9 Κατάστρωση της αντικειμενικής συνάρτησης.....	73
4.10 Εξωτερικοί περιορισμοί.....	74
4.11 Μέθοδος βελτιστοποίησης.....	76
4.12 Πρόγραμμα υπολογιστή.....	77
5. Αποτελέσματα του μοντέλου.....	82
6. Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα.....	106
Βιβλιογραφία.....	110
Παράρτημα.....	112

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της μεθόδου παραμετροποίησης – προσομοίωσης – βελτιστοποίησης στην επίλυση προβλημάτων βέλτιστου ελέγχου συστημάτων ταμιευτήρων. Η αξιολόγηση της μεθόδου παραμετροποίησης – προσομοίωσης – βελτιστοποίησης γίνεται με σύγκριση αυτής με μια εναλλακτική μη παραμετρική μέθοδο στην οποία οι μεταβλητές απόφασης είναι οι απολήψεις κάθε χρονικού βήματος από τους ταμιευτήρες. Σαν μια επιπλέον σύγκριση χρησιμοποιείται μια απλοποιημένη μέθοδος σύμφωνα με την οποία το σύστημα των ταμιευτήρων συγχωνεύεται σε ένα υποθετικό ‘ισοδύναμο ταμιευτήρα’. Η σύγκριση γίνεται με θεωρητική αιτιολόγηση αλλά και με σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνουν οι τρεις παραπάνω μέθοδοι σε ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων που εξετάζονται.

Η προσομοίωση συστημάτων ταμιευτήρων με εισαγωγή παραμέτρων και ειδικότερα ο γενικευμένος παραμετρικός κανόνας διαχείρισης [*Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997*] και στη συνέχεια η βελτιστοποίηση των εν λόγω παραμέτρων συνιστά το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Οι μέθοδοι παραμετροποίησης συνδυάζουν την απλότητα διατύπωσης και την ακριβή αναπαράσταση της λειτουργίας ενός υδατικού συστήματος με τη δυνατότητα αντιμετώπισης μεγάλου αριθμού φυσικών περιορισμών ή διαχειριστικών απαιτήσεων και τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου. Δεδομένου ότι οι μέθοδοι παραμετροποίησης βασίζονται σε προκαθορισμένες μαθηματικές σχέσεις, θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι πιθανό να μην καταλήξουν στη βέλτιστη λύση για κάθε αντικειμενικό στόχο που καλείται να ικανοποιήσει το σύστημα ταμιευτήρων. Η παραμετροποίηση αποτελεί μια δέσμευση για το σύστημα που μελετάται και οφείλουμε πριν την εφαρμογή της να αποδεικνύουμε την καταλληλότητά της ως προς τη μορφή της εξίσωσης που χρησιμοποιείται, τον αριθμό και τη μεταβολή στο χρόνο των παραμέτρων.

Στην εφαρμογή μας το μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος ταμιευτήρων έχει συνδυαστεί με ένα πολυμεταβλητό στοχαστικό υδρολογικό μοντέλο το οποίο έχει τη δυνατότητα γέννησης μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών που χρησιμεύουν ως είσοδοι του μοντέλου προσομοίωσης συστήματος ταμιευτήρων. Για να λειτουργήσει το μοντέλο προσομοίωσης πρέπει να δοθούν τιμές στις παραμέτρους του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας. Η προσομοίωση καταλήγει στον υπολογισμό συγκεκριμένης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, που αντιστοιχεί στις δοθείσες τιμές των παραμέτρων. Με βελτιστοποίηση υπολογίζονται στη συνέχεια οι παράμετροι του γενικευμένου παραμετρικού κανόνα διαχείρισης.

Στη δεύτερη περίπτωση δηλαδή στην άμεση βελτιστοποίηση δεν υπεισέρχονται παράμετροι αλλά θεωρούμε ως μεταβλητές απόφασης τις απολήψεις κάθε χρονικού βήματος. Για τη βελτιστοποίηση του συνόλου των μεταβλητών απόφασης χρησιμοποιήθηκε έτοιμο πακέτο γενετικού αλγορίθμου το οποίος έχει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης μη γραμμικών προβλημάτων τετρακοσίων (400) μεταβλητών και διακοσίων (200) περιορισμών. Οι

δυνατότητες του εν λόγω επιλυτή ήταν αυτές που καθόρισαν τις περιόδους προσομοίωσης των προβλημάτων που εξετάστηκαν.

Κατά την προσέγγιση της βέλτιστης λειτουργίας ενός συστήματος ταμιευτήρων με τις δύο μεθόδους (παραμετρική μέθοδο, μη παραμετρική μέθοδο) δεν μπορούμε εκ των προτέρων να γνωρίζουμε ποια μέθοδος θα δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα. Υπάρχει η πιθανότητα η παραμετρική μέθοδος να δώσει μια λύση κατάτι κατώτερη της βέλτιστης καθώς αυτό εξαρτάται από το πόσο σωστή είναι η παραμετροποίηση που εφαρμόζεται. Από την άλλη η πολυμεταβλητή μη παραμετρική μέθοδος πρέπει να αποδώσει τη βέλτιστη λύση αν χρησιμοποιηθεί ένας καλός αλγόριθμος βελτιστοποίησης.

Για λόγους γενίκευσης και προσαρμοστικότητας σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του συστήματος, δημιουργήσαμε για τη μελέτη μας ένα υποθετικό σύστημα ταμιευτήρων. Για το σκοπό αυτό βασιστήκαμε σε εμπειρία από αρκετά υπάρχοντα συστήματα ταμιευτήρων, αλλά αποφύγαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα συγκεκριμένο πραγματικό σύστημα το οποίο θα περιόριζε ως προς τα χαρακτηριστικά του συστήματος και τις χρήσεις νερού. Για απλοποίηση υποθέσαμε ότι το υποθετικό μας σύστημα περιλαμβάνει δύο ταμιευτήρες. Για να μείνουν οι υπολογισμοί μας όσο πιο απλοί γίνεται, χρησιμοποιήσαμε μια διαδοχή απλών μοντέλων προσομοίωσης, που περιγράφουν τα ουσιώδη στοιχεία του συστήματος. Υπενθυμίζεται ότι στόχος μας στην παρούσα εργασία είναι η σύγκριση διαφορετικών μεθόδων βελτιστοποίησης και όχι η λεπτομερής αναπαράσταση ενός συστήματος ταμιευτήρων. Για το σύνολο των προσομοιώσεων υιοθετήσαμε το μηνιαίο χρονικό βήμα, το οποίο αποτελεί μια καλή μέση οδό μεταξύ της απλότητας και της ακρίβειας και με την επιπλέον υπόθεση ότι όλοι οι μήνες έχουν ίδια διάρκεια. Το σύστημα προσομοιώθηκε για μια περίοδο από 16 έως 50 χρόνια, ανάλογα με το προς βελτιστοποίηση πρόβλημα σε τρόπο ώστε οι μεταβλητές απόφασης να μην υπερβαίνουν τις 400. Ακολούθησε έλεγχος των αλγορίθμων προσομοίωσης – βελτιστοποίησης ώστε να εξασφαλιστεί η ορθή και λεπτομερής προσομοίωση της λειτουργίας του υδροσυστήματος, η αξιοπιστία των εξαγόμενων αποτελεσμάτων και η δυνατότητα βελτιστοποίησης για διάφορες απαιτήσεις διαχείρισης.

Στα πλαίσια της εργασίας αναπτύχθηκαν και επιλύθηκαν 41 προβλήματα με συνδυασμό των τριών μεθόδων επίλυσης με τρεις κατηγορίες αντικειμενικών στόχων (μεγιστοποίηση των απολήψεων, ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης του νερού, μεγιστοποίηση παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας), τρεις χρήσεις νερού (άρδευση, ύδρευση, παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας), δύο συστήματα ταμιευτήρων και δύο υδρολογικά σενάρια.

Οι παραπάνω επιλύσεις απέδειξαν ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου παραμετροποίησης – προσομοίωσης – βελτιστοποίησης είναι εφάμιλλα αυτών των δύο άλλων μεθόδων και συγχρόνως η μελετούμενη μέθοδος έχει πολλά θεωρητικά, υπολογιστικά και πρακτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την μη παραμετρική μέθοδο μεγάλου αριθμού μεταβλητών.

## 1. Extended Abstract

### 1.1 Introduction

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

The subject of the present postgraduate thesis is the approach of the optimal control problem of reservoir management with parametrization of the problem on the one hand and with direct optimization of the entirety of the releases of every time step with application of evolutionary algorithms on the other hand. Our aim is the evaluation of the parametric method with respect to the non - parametric optimization, namely the optimization of every time step release over a long period of time. The evaluation of the first method (parameterization) is attained by comparing its results with the second method's results (non - parametric). The method of the 'equivalent reservoir' is used as an additional comparison to the above methods. According to the 'equivalent reservoir' method, the reservoir system functions as an hypothetical reservoir which merges the basic characteristics (reservoir volume, leakage factor etc) of the separate reservoirs.

The simulation of the reservoir system with parameterization and especially the parametric rule for planning and management of multiple reservoir systems [Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997] and in succession the optimisation of those parameters constitute the theoretical basis of the thesis. The parameterization methods combine the formulation simplicity and reliable representation of the reservoir systems function with the ability of dealing with a large number of physical constraints or management demands and the reduction of the computational load. The system's simulation model is combined with a multivariate stochastic hydrologic model which generates synthetical monthly inflow sequences. Those are used as entries of the simulation model of the reservoir system. In order for the simulation model to start functioning, initial values must be set for the parameters of the parametric rule. The simulation results in the calculation of the objective function, which corresponds to the initial parameter values. The final parameter values of the parametric rule are calculated with optimization.

In the second case, namely the direct optimization, there are no parameters. The decision variables are the entirety of the releases of every time step. For the optimization of the entirety of the releases we have used a commercial software of genetic algorithms (solver) which can



solve problems of up to 400 decision variables and 200 constraints. The potentials of the solver have defined the simulation period of the problems examined.

A hypothetical system of two reservoirs was formed. The system was simulated with a monthly time step and for a simulation period of 16 to 50 years in order for the decision variables not to exceed the number of 400. The simulation – optimization algorithms were thoroughly examined in order to ensure the correct and detailed simulation of the hydrosystem's function as well as the reliability of the results and the optimization ability for various management situations.

Three problems of the reservoir's system optimum management were tackled:

1. the maximization of the total release from the system for a selected level of failure probability
2. the minimization of the conveyance cost for a selected level of failure probability
3. the maximization of the hydropower (economical) benefits

Problems 1 and 2 concern the irrigation and the water supply. Problem 3 concerns the hydropower production. Two hydrological scenarios were applied concerning the coefficient of variation of the system's inflows.

41 variations of the 3 initial problems were constructed and solved. Each one of those three problems is coped with each of the three solution methods. The variations concern the hydrological scenarios, the reservoirs characteristics and the number of parameters that are optimized during the application of the parametric rule.

The thesis consists of chapter 1 (Introduction – Literature Review), five main chapters (2-6) and one appendix.

In chapter 2, the parametric rule for the planning and management of multiple reservoir systems is presented [*Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997*].

In chapter 3 there is an introduction to the basic principles of the genetic algorithms and a report of the mathematical and technical characteristics of the evolutionary algorithm used.

The methodologies of the models based on the parametric rule and on the direct, nonparametric optimisation are presented in chapter 4. There is also a detailed description of the problems examined and of the methods followed.

In chapter 5 we present and comment on the results of the applications the model. Indicative diagrams of the time variation of the storage, the release, the spill and the deficit are presented as well as the duration curves of the produced energy. Some indicative diagrams of the operation rule are also presented.

We present the general conclusions of the thesis in chapter 6.

All the diagrams (41 variations) of the time variation of the storage, the release, the spill and the deficit, as well as the duration curves of the produced energy are presented in the appendix at the end of the thesis.

## 1.2 Literature review

Simulation and optimization are the two main methods of approaching the management reservoir problems. Simulation is the quantitative method which represents the behaviour of the hydrosystem, while optimization is the mathematical technique which validates the alternative solutions.

All known techniques of system analysis have been applied to the problem of optimum management of water resources. The selection of the most suitable method depends on the type of the objective function, the constraints, the number of the decision variables and the general characteristics of the problem (linearity, stochasticity, homogeneity, distinctivity, time variability etc).

Some of the most effective methods for the solution of reservoir systems management problems are the dynamic programming, the stochastic dynamic programming, the multistochastic programming, the hierarchical analysis and the linear quadratic control models.

The dynamic programming, its advantages and its applications are reviewed by *Haith* (1982) and *Mays* (1996). Efficient interpolation schemes for dynamic programming algorithms are discussed by *Johnson et. al.* (1993).

The stochastic dynamic programming and the application of deterministic optimization methods in order to increase the efficiency of the solution algorithm are reviewed by *Wasimi and Kitanidis* (1983) and *Georgakakos and Marks* (1987). *Georgakakos* (1989) has dealt successfully with the problem of the representation of the stochastic structure of inflows.

*Kitanidis and Foufoula-Georgiou* (1987) ; *Foufoula-Georgiou and Kitanidis* (1988) ; *Foufoula-Georgiou* (1991) have tackled the problem of errors resulting from the state space discretization in discrete dynamic programming. They have proposed the use of gradient dynamic programming.

The multistochastic programming is applied to problems which include more than one objective aims. The most usual solution methods are the weight method, the goal – programming method and the utility function method. (*Cohon*, 1978 ; *Loucks et al.*, 1981 ; *Mays*, 1996).

The case of a large number of reservoirs is dealt with hierarchical analysis (*Haines*, 1977).

The linear quadratic control models seek the optimum control policy that minimizes a quadratic performance index in a linear dynamic system. The aim of the model is the determination of suitable system behaviour so that the optimum approach of the system conditions and controls is achieved (*Mays*, 1996).

*Georgakakos and Marks* (1987) represented the reservoir system dynamics in a state – space form and proposed an extension of stochastic control theory, which they termed extended linear quadratic Gaussian (ELQG). ELQG is a repetitive optimization method, which starts from an initial control sequence producing successive improved sequences until the

optimization of the objective function. The ELQG method is a very reliable, efficient and easily adaptable to probabilistic multiple reservoir systems method.

Another approach to the problem of management of multiple reservoir systems incorporates optimization models that are based on linear programming (*ReVelle, 1999*).

The genetic algorithms are another method of solving the problem of management of multiple reservoir systems. They are search algorithms based on the mechanics of natural selection and natural genetics. Their strength lays on the fact that they are based on robust and credible processes and on their ability to locate the total peak despite the number of partial peaks. They are computationally simple yet powerful in their search for improvement. Furthermore, they are not fundamentally limited by restrictive assumptions about the search space (assumptions concerning continuity, existence of derivatives, unimodality, and other matters).

In spite of the large number of optimization techniques available in the literature, simulation models still remain the primary tool for reservoir planning and management studies in practice. The reason is that simulation models allow a more detailed and reliable representation of the system studied than optimization techniques do (*Loucks and Sigvaldason, 1982*). Moreover, they can be easily combined with synthetically generated streamflow sequences. The main drawback of simulation is that unlike optimization it requires prior specification of the system operating policy. To remedy this problem, *Young (1967)* combined the use of synthetically generated annual inflows into a single reservoir with deterministic dynamic programming and inferred simple rules for the operating policy using regression techniques.

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

### 1.3 The parametrization – simulation – optimization methodology

The approach of the optimization problem of multiple – reservoir systems by *Nalbantis and Koutsoyannis (1997)* has proved the efficiency of the use of parametric operating rules. The rule discussed is a generalization of the space rule, which is expressed as

$$\frac{K_i - S_i}{E[CQ_i]} = \frac{\sum_{j=1}^N K_j - V}{\sum_{j=1}^N E[CQ_j]} \quad (1.1)$$

where

- $S_i$  : the end of period storage, which is unknown  
 $N$  : the number of the system's reservoirs  
 $V$  : the total storage in the reservoir system  
 $K_i$  : the storage capacity of reservoir  $i$   
 $E[CQ_i]$ : the expected cumulative inflow (until the end of the refill cycle) to reservoir  $i$

The rule is parametrized and the parameters of the rule are estimated by optimization, using simulation to evaluate the objective function value for each trial set of parameter values.

### 1.3.1 Description of the rule

A system of  $N$  reservoirs is assumed for which an operating policy is sought. Water is withdrawn from all of them to meet a common downstream target release  $D$ , equal to the water demand. The continuity equation for each reservoir  $i$  is given for a certain time period by

$$S_i = BS_i + Q_i - R_i - L_i - SP_i \quad (1.2)$$

where

- $BS_i$ : the beginning of period storage for reservoir  $i$   
 $S_i$  : the end of period storage, which is unknown  
 $Q_i$  : the inflow  
 $R_i$  : the total release from the reservoir  
 $L_i$  : the total loss due to evaporation and leakages  
 $SP_i$ : the reservoirs spill

Let  $V$  denote the total storage in the system at the end of the time period of interest. In the simple case of one reservoir,  $V$  is completely determined by one (1.2), in which case we omit the subscript  $i$  and replace  $S$  with  $V$ . The operation of the system of  $N$  reservoirs is much more complicated as, this time, the state of the system is described by  $N$  variables  $S_i$ , satisfying

$$\sum_{i=1}^N S_i = V \quad (1.3)$$

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

$$V = \sum_{i=1}^N (BS_i + Q_i - L_i - SP_i) - D \quad (1.4)$$

Therefore the problem is to determine the releases from all reservoirs such as their sum equals  $D$ . Equivalently, the problem is to distribute the total volume  $V$  into the  $N$  reservoirs such as (1.4) is satisfied. This can be done in numerous ways, as the problem has several degrees of freedom. We call a specific way to perform this distribution an operating rule. To avoid ambiguity we express the operating rules by means of some quantities  $S_i^*$ , which stand for the target storage for the reservoir  $i$  at the end of the period. The real storage  $S_i$  is generally

different from the target storage  $S_i^*$  because of the physical constraints that are not considered in the determination of  $S_i^*$ .  $V$  is distributed according to the following rule:

$$S_i^* = a_i + b_i V \quad (1.5)$$

where  $a_i$  and  $b_i$   $i = 1, \dots, N$  are unknown parameters.

There exist  $2N$  parameters for the system of  $N$  reservoirs. We note that because of (1.3) we have two constraints on the parameters, i.e.,

$$\sum_{i=1}^N a_i = 0 \quad \sum_{i=1}^N b_i = 1 \quad (1.6)$$

and thus the number of unknown parameters is finally  $2(N - 1)$ . Having defined the operating rule in the linear form of (1.5) with parameters  $a_i$  and  $b_i$  obeying (1.6), we have introduced a convenient parametrization of the problem.

### 1.3.2 Parametric approach

The methodology of the model based on the parametric rule includes the following stages:

1. setting initial values of the parameters  $a_i$  and  $b_i$ , which are the unknown parameters of the system and are obtained by optimization.
2. operating the simulation model of the reservoir system. The simulation model is combined with synthetically generated inflow sequences. The simulation's aim is the evaluation of the objective function, which is then optimized.
3. run optimization procedure for the modifying of the parameters  $a_i$  and  $b_i$  towards their optimal values using evolutionary algorithms.

### 1.3.3 Nonparametric approach

The methodology of the model based on the nonparametric optimization namely the direct optimization of the entirety of the releases of every time step with application of evolutionary algorithms includes the following stages:

1. Estimation of the objective function, the physical and inner operational constraints of the model.
2. Optimization of the entirety of the system's releases in a way that all the exterior constraints are satisfied

### 1.3.4 The equivalent reservoir method

The equivalent reservoir method is an approximate method, which has only one control variable. In this method, applicable under certain conditions, the reservoir system is replaced by one hypothetical reservoir with characteristics somehow merging those of the different reservoirs of the system. In this way, we drastically simplified the problem making it one-dimensional by avoiding parameterization since a single reservoir involves no degrees of freedom. The initial thinking behind the equivalent reservoir approach is that a single reservoir

merging the characteristics of the complete system would possibly exhibit superior performance in comparison with the system with separate reservoirs. For example, it may be worse to store water in two separate reservoirs than to store it in one reservoir whose storage capacity equals the sum of those of the separate reservoirs, because in the latter case the probability of spill is obviously smaller than in the former case. If this is true, then the performance of the single equivalent reservoir will be an upper bound for that of the system, and thus it is very interesting to know this limit; furthermore, it is easy to calculate it accurately because of the simplicity of the calculations (one-dimensional problem). However, it turns out that this is not absolutely true since the system with separate reservoirs offers some degrees of freedom whose utilization can increase the system performance. Even though the performance of the single equivalent reservoir is not an upper bound for that of the system, it provides a good and easy-to-find means of comparison.

#### **1.4 The evolutionary algorithm**

The evolutionary algorithm, which is used for the optimization of the parameters of the parametric rule as well as for the direct optimization of the entirety of the releases of every time step is a commercial software, developed by Frontline systems. The mathematical – technical details that characterize the algorithm are the following:

Frontline’s Evolutionary Solver uses a number of methods from the literature on genetic and evolutionary algorithms. It uses a real – number representation rather than a bit string or encoded representation of the problem, and it handles both integer and general continuous variables.

The Evolutionary Solver uses both mutation and crossover or recombination to generate new points. Uniform mutation, bounds mutation and convex combination in crossover are used.

Most fit members are selected through tournament selection. The population is updated incrementally rather than entirely replaced at each generation.

Constraints are handled by a combination of penalty functions and “constraint repair” methods. Some parameters of the algorithm are adopted during the solution process.

#### **1.5 Summary and conclusions**

The parameterization-simulation-optimization method is a low-dimensional method, which can solve optimal control problems of reservoir systems using a handful of control variables. Specifically, the set of control variables consists of a ‘target variable’ depending on the objective of the problem examined (e.g., target release or target energy) and a few parameters that determine a simple expression for allocating the degrees of freedom of the reservoir system operation, known as the parametric reservoir rule. The performance measure, which is to be optimized, is a function of these control variables depending on the problem

objective. Its value for a given set of values of the control variables is obtained by stochastic simulation of the reservoir system. The problem may also involve some constraints (e.g. dealing with the acceptable system reliability), which again are evaluated by simulation. An optimization algorithm is used to obtain the optimal values of control variables; for each trial set of values of the control variables it runs the simulation model, evaluates the performance measure and the constraints, and subsequently modifies the control variables guiding them towards their optimal values.

To evaluate the parameterization-simulation optimization method we have compared it to an alternative nonparametric high-dimensional method. This uses the reservoir releases (or transformations thereof) of all simulation steps as control variables. As an additional means of comparison, a simplified method that merges the reservoir system into a single hypothetical 'equivalent reservoir' is also used. The comparison is done both by theoretical reasoning and by empirical investigation of the results of the alternative methods in a large variety of test problems. A hypothetical system comprising two reservoirs is used for the empirical evaluation. Specifically, 41 problems are constructed and solved by combining the three solution methods, three categories of objectives (maximization of release, minimization of cost, maximization of energy production), three water uses (irrigation, water supply, hydroelectric energy production), two versions of the reservoir system and two hydrological scenarios.

In the theoretical level, the parameterization-simulation-optimization method exhibits several advantages over the high-dimensional nonparametric method.

1. its simplicity due to the low dimensionality, i.e., the fact that it uses a handful of control variables only, in comparison with hundreds, thousands, or tens of thousands of control variables that may be required in a nonparametric method.
2. the fact that the required computing time in the parametric method increases only linearly with the number of simulation steps  $n$  whereas in a high-dimensional method this time may increase even exponentially with  $n$ . Due to this, the performance measure in the parametric method can be based on a large simulation period, thus avoiding situations of defining it on a short (e.g., one- or two-year) basis in which case the system operation ignores the consequences of the today's management to the future.
3. the fact that the parametric method is directly (by definition) combined with a simulation model of the system, incorporating stochastic and deterministic components, and describing the system dynamics as accurately as possible (and desirable), thus avoiding simplifications of the system (e.g. linearizations).
4. the parametric method is theoretically consistent with the stochastic nature of the reservoir problems and directly incorporates concepts like probability, reliability, expected value, etc., also assigning values to such quantities.
5. the optimal values of the control variables do not depend on a specific realization (sequence) of inflows (or any other quantity that has a stochastic behavior) and they do

not have to be changed if this realization changes. These optimal values implicitly incorporate the reservoir system characteristics, the inflow characteristics, and the operational objectives and constraints. So they only need to be changed only if the system is modified (e.g. by addition of another component), or the hydrologic regime is changed (e.g., change of the mean annual inflow as a result of climate change), or the objective or constraints are changed (e.g. to achieve a greater reliability level). Moreover, these changes are very easy to handle, as the methodology is very general and simple.

6. once the system is optimized with the parameterization-simulation-optimization method, it can be very easily operated applying the parametric reservoir rule (even in its graphical form) without model runs at all. Similar to this, the model parameters and, consequently, the operation policy do not depend on forecasted values of inflows, which could be poor forecasts.

In the empirical level, from the 41 problems examined in this paper, it emerges that the parameterization-simulation-optimization method if used with two couples of parameters per reservoir, one for the refill period and one for the drawdown period, yields solutions that are not inferior at all to those of the nonparametric high-dimensional method, despite of the huge difference of the number of control variables of the two methods. Specifically, if the objective is to maximize the firm release or to minimize the conveyance const, the solutions obtained by the two methods are almost identical. When applicable, the equivalent reservoir method yielded results identical to the other methods as well. Moreover, the parametric method even with one parameter per reservoir yields good solutions whose performance is only by 3% (or less) inferior to that of the nonparametric method. If the objective is the maximization of the benefit from energy production, the nonparametric method was able to seemingly improve the solution of the parametric method (with two couples of parameters per reservoir) by up to 2.1% and that of the equivalent reservoir method by 2.5%. However, a more thorough investigation of the results of the all methods shows that this improvement relies on an implicit assumption that future inflows are perfectly predicted for an arbitrary large lead-time, an assumption that of course cannot be true. If this assumption is eliminated, the performance of the nonparametric method becomes significantly inferior to that of the parametric method.

The definition of the problems examined is given in Table 1

The results of calculations are shown in Table 2 for the problems of the first category (maximization of release), Table 3 for the problems of the second category (minimization of cost) and Table 4 for the problems of the third category (maximization of benefit from energy production).

To acquire a better insight of the behavior of the three methods we give more detailed results in a series of figures for the problems 39-41 of the group XIII, which seems the most interesting, as it gave the biggest differences in the performance of the three methods. Thus,



Figure 1 provides a graphical representation of parametric operating rules for problem 39. Figure 2 depicts the evolution of the storage, release, leakage, spill, and produced energy from the reservoir system in problem group XIII (problems 39-41).

**Table 1** Definition of problems examined. (continued)

Problem category (Target)	Problem group	Water use <sup>a</sup>	Type of reser- vations <sup>a</sup>	Hydrologic scenario <sup>b</sup>	Simulation length (years)	Problem number	Method <sup>c</sup>	Number of seasons	Total number of control variables
V	WS	A	HV	16	16	16	PSO	2	5
						17	NP	-	193
	VI	WS	B	LV	16	18	PSO	2	5
VII	IR	A	LV	50	21	19	ER	-	1
						20	NP	-	193
						21	PSO	2	4
VIII	IR	A	HV	50	22	22	NP	-	350
						23	PSO	2	4
						24	NP	-	350
IX	WS	A	LV	16	25	25	PSO	2	4
						26	NP	-	192
X	WS	A	HV	16	27	27	PSO	2	4
						28	NP	-	192

continued

**Table 1** Definition of problems examined. (continued)

Problem category (Target)	Problem group	Water use <sup>a</sup>	Type of reser-voir system	Hydrologic scenario <sup>b</sup>	Simulation length (years)	Problem number	Method <sup>c</sup>	Number of seasons	Total number of control variables
Maximize benefit from energy production	XI	HP	A	LV	16	29	PSO	2	5
						31	PSO	1	3
						31	PSO	2	3
						32	PSO	1	2
						33	NP	–	384
XII	HP	A	HV	16	34	PSO	2	5	
					35	PSO	1	3	
					36	PSO	2	3	
					37	PSO	1	2	
					38	NP	–	384	
XIII	HP	B	LV	16	39	PSO	2	5	
					40	ER	–	1	
					41	NP	–	384	

<sup>a</sup> IR: irrigation; WS: water supply; HP: Hydropower production.

<sup>b</sup> LV: low variation; HV: high variation .

<sup>c</sup> PSO: parameterization-simulation-optimization; ER: equivalent reservoir; NP: nonparametric optimization.

<sup>d</sup> With acceptable reliability level 0.9375.

**Table 2** Results for problems of the first category (maximization of release).

Problem group	Problem	Mean annual volumes (hm <sup>3</sup> )					Storage difference <sup>a</sup>	Release Deficit <sup>b</sup>	Adjusted release <sup>c</sup>	Attained reliability (%)	Reduction of performance <sup>d</sup> (%)	
		Inflow	Demand	Spill	Leakage	Leakage						
I (IR/A/LV)	1 (PSO/5)	311.9	244.4	48.7	20.3	20.3	-0.7	243.7	0.7	243.0	94.00	0.00
	2 (PSO/3)	311.9	242.7	48.5	22.2	22.2	-0.8	242.0	0.7	241.2	94.00	-0.72
	3 (PSO/3)	311.9	241.3	55.7	16.0	16.0	-0.4	240.7	0.7	240.3	94.00	-1.11
	4 (PSO/2)	311.9	240.1	52.2	20.8	20.8	-0.5	239.3	0.7	238.9	94.00	-1.68
	5 (NP/351)	311.9	244.4	48.7	20.3	20.3	-0.7	243.7	0.7	243.0	94.00	0.00
II (IR/A/HV)	6 (PSO/5)	317.1	217.5	85.3	16.0	16.0	-0.2	216.0	1.5	215.8	94.00	-0.20
	7 (NP/351)	317.1	217.5	84.3	16.5	16.5	-0.2	216.5	1.1	216.2	94.00	0.00
III (IR/B/LV)	8 (PSO/5)	311.9	235.7	49.7	29.3	29.3	-1.1	234.0	1.7	232.9	94.00	-0.12
	9 (ER/1)	311.9	235.7	48.5	30.3	30.3	-1.1	234.2	1.5	233.1	94.00	-0.05
	10 (NP/351)	311.9	236.8	49.3	29.4	29.4	-1.1	234.3	2.4	233.2	94.00	0.00

continued

**Table 2** Results for problems of the first category (maximization of release). (continued)

Problem group	Problem	Mean annual volumes (hm <sup>3</sup> )						Storage difference <sup>a</sup>	Release Deficit <sup>b</sup>	Adjusted release <sup>c</sup>	Attained reliability (%)	Reduction of performance <sup>d</sup> (%)
		Inflow	Demand	Spill	Leakage	Release	Deficit <sup>b</sup>					
IV (WS/A/LV)	11 (PSO/5)	298.2	258.3	23.8	11.0	5.7	257.6	0.6	263.3	93.75	0.00	
	12 (PSO/3)	298.2	256.8	29.6	8.4	4.0	256.2	0.6	260.2	93.75	-1.18	
	13 (PSO/3)	298.2	254.6	18.8	19.3	6.1	253.9	0.6	260.1	93.75	-1.25	
	14 (PSO/2)	298.2	250.0	20.9	21.7	6.3	249.4	0.6	255.6	93.75	-2.93	
	15 (NP/193)	298.2	258.3	23.8	11.0	5.7	257.6	0.6	263.3	93.75	0.00	
V (WS/A/HV)	16 (PSO/5)	297.6	228.2	48.7	14.4	6.7	227.8	0.4	234.5	93.75	0.00	
	17 (NP/193)	297.6	228.2	48.7	14.4	6.7	227.8	0.4	234.5	93.75	0.00	
VI (WS/B/LV)	18 (PSO/5)	298.2	240.6	23.5	30.0	4.7	240.1	0.6	244.7	93.75	0.00	
	19 (ER/1)	298.2	240.6	23.5	30.0	4.7	240.1	0.6	244.7	93.75	0.00	
	20 (NP/193)	298.2	240.6	23.5	29.9	4.7	240.1	0.6	244.7	93.75	0.00	

<sup>a</sup>  $(s_n - s_0) / n$ .

<sup>b</sup> Demand - Release.

<sup>c</sup> Performance measure = Release - Storage difference.

<sup>d</sup> With regard to performance measure of the NP problem.

**Table 3** Results for problems of the second category (minimization of cost).

Problem group	Problem	Mean annual volumes (hm <sup>3</sup> )							Adjusted reliability (%)	Cost (arbitrary units) <sup>d</sup>	Performance (arbitrary reduction) <sup>e</sup> (%)	
		Inflow	Demand	Spill Leakage	Storage difference <sup>a</sup>	Release	Deficit <sup>b</sup>	release <sup>c</sup>				
VII (IR/A/LV)	21 (PSO/4)	311.9	218.9	70.2	27.3	-2.3	216.7	2.3	214.4	96.00	223.9	0.00
	22 (NP/350)	311.9	218.9	70.2	27.3	-2.3	216.7	2.3	214.4	94.00	223.9	0.00
VIII (IR/A/HV)	23 (PSO/4)	317.1	191.7	101.4	27.7	-0.7	188.7	3.0	187.9	96.00	192.6	0.00
	24 (NP/350)	317.1	191.7	101.4	27.7	-0.7	188.7	3.0	187.9	94.00	192.6	0.00
IX (WS/A/LV)	25 (PSO/4)	298.2	230.9	39.6	25.5	2.3	230.8	0.2	233.1	93.75	242.2	0.24
	26 (NP/192)	298.2	230.9	39.0	26.8	1.8	230.4	0.5	232.3	93.75	241.6	0.00
X (WS/A/HV)	27 (PSO/4)	297.6	205.4	58.8	27.3	6.4	205.1	0.3	211.5	93.75	213.3	0.00
	28 (NP/192)	297.6	205.4	58.8	27.3	6.4	205.1	0.3	211.5	93.75	213.3	0.00

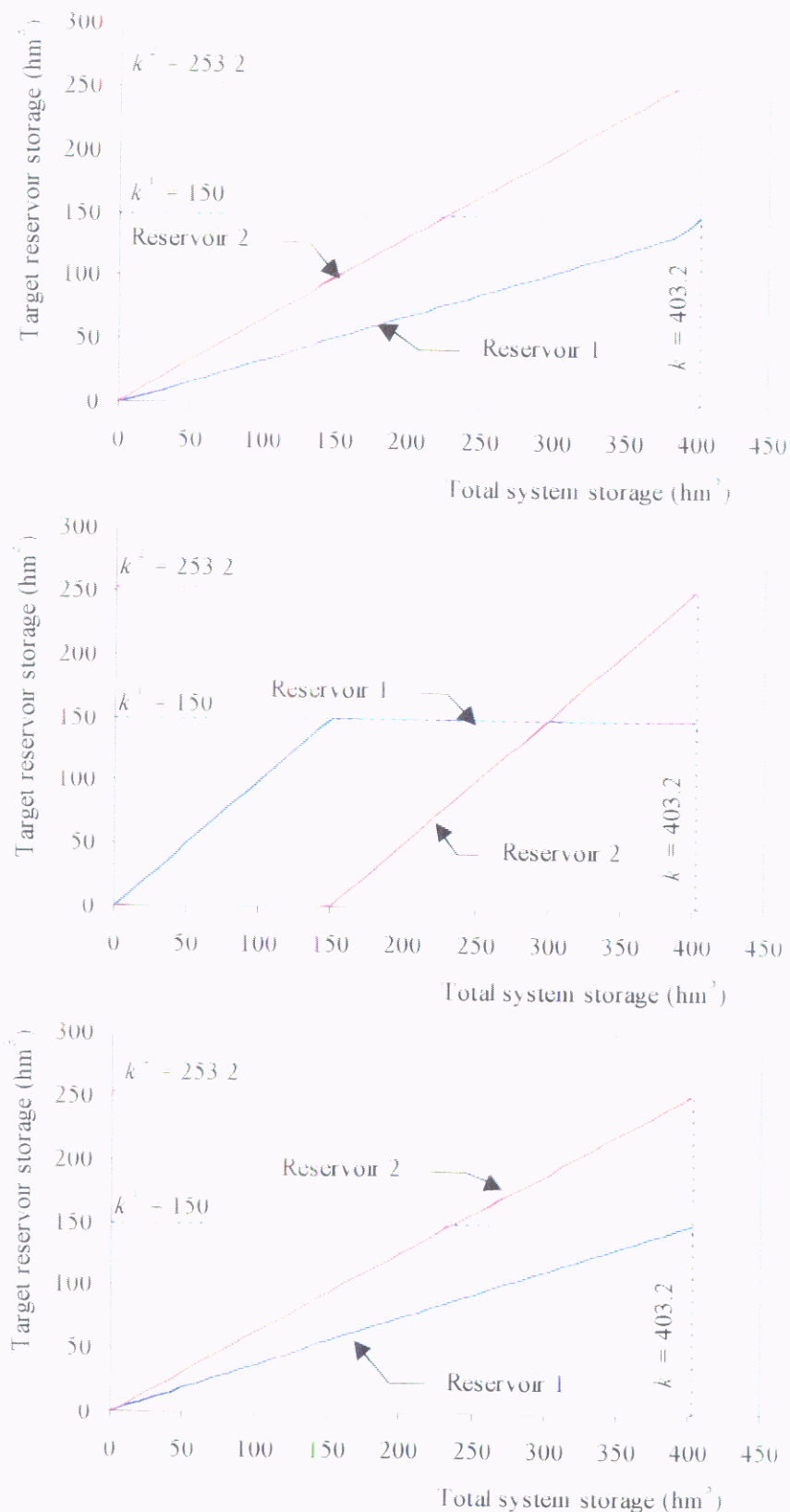
<sup>a</sup>  $(s_n - s_0) / n$ . <sup>b</sup> Demand – Release. <sup>c</sup> Release – Storage difference. <sup>d</sup> Minimized performance measure.

<sup>e</sup> With regard to performance measure of the NP problem.

**Table 4** Results for problems of the third category (maximization of benefit from energy production).

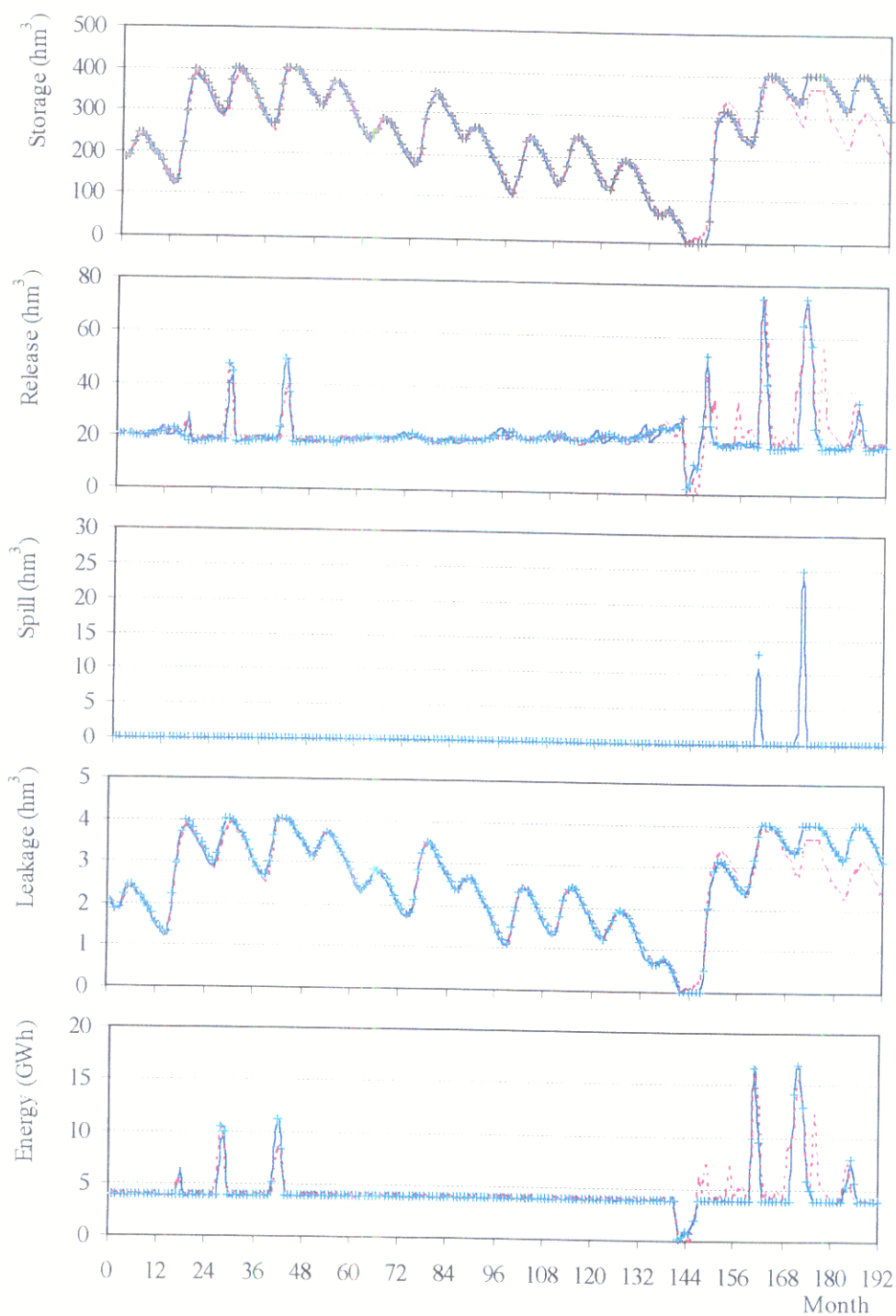
Problem group	Problem	Mean annual volumes (hm <sup>3</sup> )				Annual energy (GWh)			Benefit (arbitrary units) <sup>c</sup>	Performance reduction <sup>d</sup> (%)		
		Inflow	Spill Leakage	Storage difference <sup>a</sup>	Release	Adjusted release <sup>b</sup>	Target	Produced firm			Produced secondary	
XI	(HP/A/LV)	298.2	0.1	21.1	7.6	269.4	276.9	48.7	48.7	7.9	52.7	-1.21
	31 (PSO/3)	298.2	0.1	23.9	7.9	266.2	274.1	48.2	48.2	7.7	52.1	-2.34
	31 (PSO/3)	298.2	0.0	21.1	7.6	269.4	277.0	48.9	48.9	7.5	52.6	-1.30
	32 (PSO/2)	298.2	0.1	23.9	7.9	266.2	274.2	48.2	48.2	7.7	52.1	-2.35
	33 (NP/384)	298.2	0.0	20.9	0.0	277.3	277.3	-	48.6	9.5	53.3	0.00
XII	(HP/A/HV)	297.6	0.9	20.4	8.0	268.3	276.3	43.8	43.8	12.3	50.0	-1.63
	35 (PSO/3)	297.6	0.9	23.2	8.4	265.1	273.5	43.0	43.0	12.5	49.3	-2.96
	36 (PSO/3)	297.6	0.9	20.4	8.0	268.3	276.3	43.8	43.8	12.3	50.0	-1.63
	37 (PSO/2)	297.6	0.9	23.2	8.4	265.1	273.5	43.0	43.0	12.5	49.3	-2.97
38 (NP/384)	297.6	0.0	20.2	0.0	277.5	277.5	-	43.8	14.0	50.8	0.00	
XIII	(HP/B/LV)	298.2	2.4	30.9	5.9	258.9	264.8	47.8	47.8	4.3	49.9	-2.08
	40 (ER/1)	298.2	2.4	31.2	6.0	258.6	264.6	47.5	47.5	4.4	49.7	-2.48
	41 (NP/384)	298.2	0.0	29.9	0.3	268.0	268.3	-	47.6	6.7	50.9	0.00

<sup>a</sup>  $(s_n - s_0) / n$ . <sup>b</sup> Release - Storage difference. <sup>c</sup> Maximized performance measure. <sup>d</sup> With regard to performance measure of the NP problem



**Figure 1** Graphical representation of parametric operating rules for problem 39; up: rule for the refill period (November to April); middle: rule for the drawdown period (May to October); down: Clark's space rule coinciding with the symmetric rule (for comparison only). The parameters of the rules are  $a^1 = -a^2 = 0.375$  and  $b^1 = 1 - b^2 = 0.350$  for the refill period,  $a^1 = -a^2 = 0.372$  and  $b^1 = 1 - b^2 = 1$  for the drawdown period, and  $a^1 = b^1 = -a^2 = 1 - b^2 = 0.372$  for the space rule.





**Figure 2** Evolution of the storage, release, leakage, spill, and produced energy in the reservoir system of problem group XIII as obtained through the parameterization-simulation-optimization method (problem 39; continuous lines), the equivalent reservoir method (problem 40; crosses) and the nonparametric method (problem 41; dashed lines).

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Γενικά

Ο σχεδιασμός και η διαχείριση μεμονωμένων ταμιευτήρων ή συστημάτων πολλαπλών ταμιευτήρων αποτελεί σήμερα το αντικείμενο πολυάριθμων και εκτεταμένων ερευνών. Δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στο συγκεκριμένο θέμα εξαιτίας των σημαντικών ωφελειών που ανακύπτουν κατά τη λειτουργία τέτοιων έργων διαχείρισης υδατικών πόρων (ενεργειακό – οικονομικό όφελος) σε συνδυασμό με τη μείωση των φυσικών κινδύνων (αντιπλημμυρική προστασία). Η ορθολογική τους διαχείριση καθίσταται ιδιαίτερα πολύπλοκη όταν σχεδιάζονται για την εξυπηρέτηση ανταγωνιστικών και αντικρουόμενων στόχων, όπως η αποθήκευση νερού για αρδευτικούς ή άλλους καταναλωτικούς σκοπούς, η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας και η αντιπλημμυρική προστασία. Περαιτέρω περιορισμοί μπορούν να τεθούν εξαιτίας περιβαλλοντικών ή άλλων απαιτήσεων, δυσχεραίνοντας ακόμη περισσότερο την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Το πρόβλημα του σχεδιασμού και της διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων αποτελεί κατ' εξοχήν πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η επίλυσή του είναι μια δύσκολη όσο και επίπονη διαδικασία εξαιτίας του εκτεταμένου αριθμού των μεταβλητών απόφασης, της στοχαστικής φύσης των υδρολογικών συνιστωσών, της μη γραμμικής δυναμικής των συστημάτων καθώς και της αβεβαιότητας ως προς τις τιμές των παραμέτρων. Για την επίλυση του εν λόγω προβλήματος έχουν προταθεί ποικίλες μαθηματικές μεθοδολογίες, που σε συνδυασμό με την αλματώδη ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων παρέχουν ένα ευρύ φάσμα επιλογών.

### 1.2 Επισκόπηση μεθοδολογιών

Οι δύο κύριες μέθοδοι προσέγγισης των προβλημάτων διαχείρισης ταμιευτήρων είναι η προσομοίωση και η βελτιστοποίηση. Η προσομοίωση είναι ποσοτική μέθοδος που αναπαριστά τη συμπεριφορά του υδατικού συστήματος, ενώ η βελτιστοποίηση είναι μαθηματική τεχνική που αξιολογεί εναλλακτικές λύσεις με βάση κάποιον αλγόριθμο [Loucks *et al.*, 1981• Μιμίκου, 1994]. Στη δεύτερη περίπτωση το γενικό μοντέλο ανάλυσης συστημάτων ταμιευτήρων περιλαμβάνει [Μιμίκου, 1994]:

- Μια αντικειμενική συνάρτηση, η οποία εκφράζει τον κεντρικό στόχο του προβλήματος διαχείρισης και χρησιμοποιείται κατά τη λήψη αποφάσεων
- Ένα μοντέλο κατάστασης του συστήματος, το οποίο περιγράφει τις συνθήκες που υπάρχουν στο σύστημα σε κάθε χρονική στιγμή (εξισώσεις εισόδου και εξόδου, φυσικοί περιορισμοί)
- Ένα μοντέλο συσχέτισης μεταξύ εισόδων και εξόδων του συστήματος, που εκφράζει τη σχέση αλληλεπίδρασής τους (εξισώσεις δυναμικής)
- Μια διαδικασία ελέγχου και αξιολόγησης των τεχνικά εφικτών εναλλακτικών λύσεων

- Ένα σύστημα αναζήτησης και επιλογής της βέλτιστης λύσης

Στα προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων έχουν εφαρμοστεί όλες οι γνωστές τεχνικές ανάλυσης συστημάτων. Η επιλογή της προσφορότερης μεθόδου εξαρτάται από τον τύπο της αντικειμενικής συνάρτησης, τη μορφή των περιορισμών, τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης και τα χαρακτηριστικά του προβλήματος (γραμμικότητα, στοχαστικότητα, ομοιογένεια, διακριτοποίηση, χρονική μεταβλητότητα κ.α.).

Μια εισαγωγή στο θέμα δίνεται από τη *Μιμίκου* [1994] απόσπασμα της οποίας παρατίθεται:

« Το πεδίο εφαρμογής της μεθοδολογίας ανάλυσης συστήματος σε θέματα αξιοποίησης και διαχείρισης υδατικών πόρων διακρίνεται σε δύο βασικές περιοχές εφαρμογής: στο σχεδιασμό των έργων αξιοποίησης και διαχείρισης υδατικών πόρων και στη λειτουργία τους. Ο σχεδιασμός αφορά στην επιλογή της διαδικασίας η οποία θα επιτύχει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τους αντικειμενικούς στόχους του μελετητή για τη λήψη αποφάσεων.... Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει αποφάσεις που καταλήγουν στη βέλτιστη διάθεση του αγαθού του οποίου ζητείται η βέλτιστη αξιοποίηση και διαχείριση. Από την άλλη πλευρά τα προβλήματα λειτουργίας αφορούν στο βέλτιστο τρόπο λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο υπαρχόντων συστημάτων έργων, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται οι σκοποί του μελετητή για λήψη αποφάσεων σε επιχειρησιακή κλίμακα.

... Η χρήση της μεθοδολογίας ανάλυσης συστημάτων στους ταμειυτήρες πολλαπλού σκοπού βασίζεται στην ανάπτυξη μαθηματικών ομοιωμάτων με τα οποία μπορεί να βρεθεί η πιο επωφελής πολιτικής αποφόρτισης από τον ταμειυτήρα ή πολιτική λειτουργίας του ανάμεσα σε πολλά αντικρουόμενα εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας. Αυτή η πολιτική λειτουργίας αναπτύσσεται αρχικά στο στάδιο σχεδιασμού του έργου ...οπότε καθορίζονται και τα βέλτιστα αξιόπιστα εγγυημένα μεγέθη παροχής νερού και ενέργειας. Με βάση αυτή τη συμφωνημένη εγγυημένη και αξιόπιστη πολιτική αποφόρτισης νερού και παραγωγής ενέργειας θα πρέπει να χαραχθεί η πολιτική λειτουργίας του έργου (κανόνες λειτουργίας), έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι η απόκλιση στην πράξη από τα εγγυημένα μεγέθη είναι η μικρότερη δυνατή και οπωσδήποτε βρίσκεται μέσα στην αποδεκτή διακινδύνευση αστοχίας.

... Η τεχνική επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης της λειτουργίας ταμειυτήρα σε πραγματικό χρόνο για την εγκαθίδρυση κανόνων λειτουργίας έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται τα ελλείμματα και οι αποκλίσεις από τα εγγυημένα μεγέθη, μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Η πιο γνωστή και χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι αυτή του δυναμικού προγραμματισμού.

... Απαραίτητο στοιχείο είναι η γνωστή εκ των προτέρων διακινδύνευση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές στοχαστικής ανάλυσης που ενσωματώνονται στη διαδικασία βελτιστοποίησης του δυναμικού προγραμματισμού τόσο στο στάδιο σχεδιασμού όσο και στο στάδιο λειτουργίας.»

Μερικές από τις πλέον αποτελεσματικές μεθόδους επίλυσης των προβλημάτων διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων είναι ο δυναμικός προγραμματισμός, ο στοχαστικός δυναμικός προγραμματισμός, ο πολυστοχικός προγραμματισμός, η ιεραρχική ανάλυση και τα γραμμικά δευτεροβάθμια μοντέλα ελέγχου.

Ο δυναμικός προγραμματισμός εφαρμόζεται σε προβλήματα βελτιστοποίησης με διαδοχικές αποφάσεις. Η κατάστρωση του προβλήματος γίνεται σε στάδια γι' αυτό και είναι γνωστός και ως μεθοδολογία διαδοχικών καταμερισμών (sequential allocation process) [Haith, 1982]. Όταν η λήψη αποφάσεων στα συστήματα αξιοποίησης υδατικών πόρων γίνεται διαδοχικά και σειριακά στο χώρο και στο χρόνο, ο δυναμικός προγραμματισμός αποτελεί την καταλληλότερη μέθοδο ανάλυσής τους.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι [Mays, 1996]:

- Κάθε πρόβλημα που απαιτεί  $N$  αποφάσεις διαχωρίζεται σε  $N$  υποπροβλήματα και η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται διαδοχικά, χωρίς να απαιτείται η διερεύνηση όλων των συνδυασμών.
- Εφόσον σε κάθε πρόβλημα εφαρμόζεται βελτιστοποίηση, περιορίζεται, σε μεγάλο βαθμό ο αριθμός των μη βέλτιστων συνδυασμών που εξετάζονται.
- Τα επιμέρους προβλήματα συνδέονται μεταξύ τους κατά τέτοιο τρόπο ώστε να απορρίπτονται αυτόματα όλοι οι συνδυασμοί που οδηγούν σε μη εφικτές λύσεις.

Ο στοχαστικός δυναμικός προγραμματισμός αποτελεί μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση των προβλημάτων διαχείρισης υδατικών πόρων. Αυτό επιτυγχάνεται με το συνυπολογισμό της στοχαστικότητας των υδρολογικών ή άλλων συνιστωσών. Ο στοχαστικός δυναμικός προγραμματισμός εφαρμόζεται σε όλα τα στάδια βελτιστοποίησης συστημάτων ταμιευτήρων και παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Μειονέκτημα της μεθόδου είναι τα τεράστια ποσά υπολογιστικού χρόνου και χώρου που απαιτεί. Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου επίλυσης έχουν προταθεί παραλλαγές του αλγορίθμου οι οποίες αντιμετωπίζουν τη στοχαστικότητα των υδρολογικών μεταβλητών με αναλυτικό τρόπο, χωρίς διακριτοποίηση του χώρου καταστάσεων και στη συνέχεια εφαρμόζουν κατάλληλες μεθόδους ντετερμινιστικής βελτιστοποίησης [Wasimi and Kitanidis, 1983 • Georgakakos and Marks, 1987]

Το πρόβλημα της ακριβούς αναπαράστασης της στοχαστικής δομής των εισροών αντιμετωπίστηκε επιτυχώς [Georgakakos, 1989]. Συνεχίστηκαν οι έρευνες στην κατεύθυνση του στοχαστικού δυναμικού προγραμματισμού με στόχο τη διόρθωση των ατελειών του. Αποδοτικά σχήματα παρεμβολής για δυναμικό προγραμματισμό εισήχθησαν από τους Johnson et al. [1993]. Αντιμετώπιστηκε το πρόβλημα ανάκυψης λαθών που παρουσιαζόταν στο διακριτό δυναμικό προγραμματισμό από τη διακριτοποίηση χώρου καταστάσεων με πρόταση για εφαρμογή βαθμωτού δυναμικού προγραμματισμού [Kitanidis and Foufoula-Georgiou, 1987 • Foufoula-Georgiou and Kitanidis, 1988 • Foufoula-Georgiou, 1991].

Ο πολυστοχικός προγραμματισμός εφαρμόζεται σε προβλήματα που περιλαμβάνουν περισσότερους από έναν αντικειμενικούς στόχους, στα οποία είναι αδύνατος ο καθορισμός ενιαίας αντικειμενικής συνάρτησης. Τα συστήματα ταμειυτήρων πολλαπλού σκοπού είναι συχνά πολυστοχικά. Η διαχείρισή τους οφείλει να ικανοποιεί ανταγωνιστικές κοινωνικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και πολιτικές απαιτήσεις. Στην περίπτωση αυτή δεν έχει νόημα η αναζήτηση μιας μονοσήμαντα ορισμένης βέλτιστης πολιτικής διαχείρισης αλλά ένα σύνολο εναλλακτικών 'βέλτιστων' λύσεων (το οποίο καλείται *σύνολο μη κατωτέρων λύσεων* ή *Pareto optimum*), με την επιλογή της καταλληλότερης (*best compromise solution*) να ανήκει στο λήπτη απόφασης.

Για την επίλυση πολυστοχικών προβλημάτων έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές. Οι πιο συνηθισμένες για τα συστήματα διαχείρισης υδατικών πόρων είναι η *μέθοδος των βαρών* (weight method), η *μέθοδος προγραμματισμού στόχων* (goal – programming method) και η *μέθοδος της συνάρτησης χρησιμότητας* (utility function) [Cohon, 1978 • Loucks et al., 1981 • Mays, 1996].

Σε περίπτωση ύπαρξης μεγάλου αριθμού ταμειυτήρων, συνδεδεμένων είτε σειριακά είτε παράλληλα, η διαδικασία βελτιστοποίησης καθίσταται ιδιαίτερα επίπονη, ειδικά όταν γίνεται χρήση στοχαστικών μοντέλων. Ο τρόπος προσέγγισης πολύ μεγάλων υδροσυστημάτων είναι η διάσπασή τους σε επιμέρους υποσυστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν μικρό αριθμό ταμειυτήρων. Η βελτιστοποίηση του αρχικού συστήματος επιτυγχάνεται έμμεσα, με επίλυση των επιμέρους υποσυστημάτων με οποιαδήποτε από τις γνωστές μεθόδους και εν συνεχεία ανασύνθεσή τους. Η τεχνική αυτή καλείται ιεραρχική ανάλυση [Haimes, 1977].

Τα γραμμικά δευτεροβάθμια μοντέλα ελέγχου αναζητούν τη βέλτιστη πολιτική ελέγχου η οποία ελαχιστοποιεί ένα δευτεροβάθμιο δείκτη επίδοσης σε ένα γραμμικό δυναμικό σύστημα. Ο δείκτης αντιπροσωπεύει μια χρονικά μεταβαλλόμενη συνάρτηση καταστάσεων και ελέγχων του συστήματος. Σκοπός του μοντέλου είναι ο καθορισμός κατάλληλων νόμων συμπεριφοράς του συστήματος, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη προσέγγιση των επιθυμητών καταστάσεων και ελέγχων [Mays, 1996].

Οι *Georgakakos and Marks* [1987] απέδωσαν τη δυναμική των συστημάτων ταμειυτήρων σε μορφή χώρου καταστάσεων και πρότειναν μια τεχνική ελέγχου την οποία και ονόμασαν *επεκτεταμένη γραμμική τετραγωνική γκαουσιανή μέθοδο* ή μέθοδο ELQG (Extended Linear Quadratic Gaussian).

Η ELQG είναι μια επαναληπτική μέθοδος βελτιστοποίησης που ξεκινά από μια αρχική ακολουθία ελέγχου, παράγοντας διαδοχικά καλύτερες ακολουθίες μέχρι τη βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Η μέθοδος είναι αποδοτική, αξιόπιστη και άμεσα προσαρμόσιμη σε πιθανοτικά συστήματα πολλαπλών ταμειυτήρων.

Μια άλλη προσέγγιση του προβλήματος διαχείρισης ταμειυτήρα ή συστήματος ταμειυτήρων είναι αυτή που εξετάζει υδρολογικά μοντέλα βελτιστοποίησης που βασίζονται

στο γραμμικό προγραμματισμό. Μια πολύ καλή ανάπτυξη των μεθόδων γραμμικού προγραμματισμού σε ταμειυτήρα ή σύστημα ταμειυτήρων δίνεται στο πρόσφατο βιβλίο του *ReVelle* [1999], ο οποίος χαρακτηριστικά αναφέρει:

« Τα απλούστερα των ντετερμινιστικών μοντέλων είναι τα γραμμικά μοντέλα, βάσει των οποίων επιλέγονται οι βέλτιστες απολήψεις και χωρητικότητες των ταμειυτήρων και τα μοντέλα προσομοίωσης τα οποία πειραματίζονται με πολλές τιμές απολήψεων και χωρητικότητας.

Ευτυχώς που πολλά υδρολογικά μοντέλα βελτιστοποίησης στηρίζονται στο γραμμικό προγραμματισμό ή σε μεθόδους πολύ κοντά στο γραμμικό προγραμματισμό. Αυτά τα μοντέλα βελτιστοποίησης είναι τα απλούστερα προς κατανόηση και επίλυση. Δίνεται έμφαση στα μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού λόγω της ευκολίας στο στήσιμο του προβλήματος αλλά και της επίλυσής του. Ο μελετητής δεν χρειάζεται να γράψει κώδικα προγραμματισμού για να επιλύσει ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Υπάρχουν πάμπολλοι διαθέσιμοι γραμμικοί επιλυτές. Είναι πολύ εύκολη η εξαγωγή εναλλακτικών λύσεων από πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις. Τέλος το στήσιμο ενός προβλήματος με τη μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού είναι συγχρόνως μέθοδος εξήγησης των συνιστωσών του προβλήματος αλλά και τρόπος επίλυσης αυτού.»

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια ακόμη μέθοδο επίλυσης του σύνθετου προβλήματος διαχείρισης συστημάτων ταμειυτήρων. Είναι αλγόριθμοι αναζήτησης που βασίζονται στους μηχανισμούς της φυσικής επιλογής και της φυσικής γενετικής. Η δύναμη των γενετικών αλγορίθμων βρίσκεται στο γεγονός ότι βασίζονται σε εύρωστες και αξιόπιστες διαδικασίες και στη δυνατότητά τους να εντοπίζουν το ολικό ακρότατο, ακόμη και όταν υπάρχουν πολλά τοπικά ακρότατα. Είναι υπολογιστικά απλοί αλλά πολύ ισχυροί στην αναζήτηση του βέλτιστου. Επιπλέον δεν περιορίζονται από υποθέσεις που αφορούν την περιοχή πολιτικής, τη συνέχεια, την ύπαρξη παραγώγων, την παρουσία τοπικών ή ολικών μεγίστων κλπ. Ο συνδυασμός ενός ειδικευμένου αλγόριθμου και ενός γενετικού αλγόριθμου μπορεί να οδηγήσει σε ένα υβριδικό μοντέλο με αυξημένες ικανότητες επίλυσης προβλημάτων [*Shukla et. al.*, 1996 • *Gelsey et. al.*, 1995].

Παρά το μεγάλο αριθμό τεχνικών βελτιστοποίησης που παρατίθεται στη βιβλιογραφία, τα μοντέλα προσομοίωσης παραμένουν το κύριο εργαλείο για το σχεδιασμό και τη διαχείριση ταμειυτήρων στη θεωρία αλλά και στην πράξη. Ο λόγος είναι ότι τα μοντέλα προσομοίωσης επιτρέπουν μια πιο λεπτομερή και πιστή αναπαράσταση του συστήματος που μελετάται από ότι οι τεχνικές βελτιστοποίησης. Επίσης μπορούν εύκολα να συνδυαστούν με συνθετικές χρονοσειρές εισροών. Το κύριο μειονέκτημα της προσομοίωσης σε σχέση με τη βελτιστοποίηση είναι ότι απαιτεί προκαθορισμό της πολιτικής λειτουργίας του συστήματος. Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, ο *Young* [1967] συνδύασε τη χρήση συνθετικών ετήσιων εισροών με ντετερμινιστικό δυναμικό προγραμματισμό και συνήγαγε

απλούς παραμετρικούς κανόνες για την πολιτική λειτουργίας χρησιμοποιώντας τεχνικές παλινδρόμησης.

Η διαχείριση συστημάτων ταμειυτήρων στην πράξη πραγματοποιείται βάσει καμπυλών λειτουργίας, οι οποίες καθορίζουν την επιθυμητή πολιτική απολήψεων σε επιχειρησιακό επίπεδο [Loucks and Sigvaldason, 1982]. Σε άλλες περιπτώσεις εισάγονται ευρετικοί κανόνες λειτουργίας, όπως είναι ο λεγόμενος χωρικός κανόνας (space rule) [Bower et al., 1962] και ο παρεμφερής κανόνας της Νέας Υόρκης (NYC rule) [Clark, 1950, 1956]. Ο χωρικός κανόνας καθορίζει τα αποθέματα - στόχους σε κάθε ταμειυτήρα έτσι ώστε ο κενός όγκος τους να είναι ανάλογος των αναμενόμενων εισροών. Ο κανόνας της Νέας Υόρκης ορίζει σε κάθε ταμειυτήρα κατάλληλα αποθέματα-στόχους έτσι ώστε η πιθανότητα υπερχειλίσης να είναι η ίδια για όλους τους ταμειυτήρες. Έχει αποδειχθεί [Johnson et al. 1991] ότι οι ευρετικοί κανόνες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένου και του χωρικού κανόνα μπορούν επιτυχώς να ενσωματωθούν σε μοντέλα βελτιστοποίησης.

Προσεγγίζοντας το πρόβλημα της βελτιστοποίησης συστημάτων ταμειυτήρων με έναν τρόπο πιο ρεαλιστικό, πρόσφατη έρευνα απέδειξε την καταλληλότητα της χρήσης παραμετρικών κανόνων λειτουργίας [Nalbantis and Koutsoyannis, 1997]. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μείωση των μεταβλητών του συστήματος από μερικές χιλιάδες σε μόλις  $2(N-1)$ , όπου  $N$  ο αριθμός των ταμειυτήρων του συστήματος. Ο παραμετρικός κανόνας διαχείρισης αποτελεί γενίκευση του ευρύτατα χρησιμοποιούμενου χωρικού κανόνα [Bower et al., 1962], είναι ωστόσο εφαρμόσιμος σε ένα πολύ μεγαλύτερο φάσμα υδροσυστημάτων. Η απλή του διατύπωση και η προσαρμοστικότητά του σε πρακτικά οποιοδήποτε πρόβλημα τον καθιστούν ευχερές μοντέλο διαχείρισης ταμειυτήρων.

### 1.3 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της μεθόδου παραμετροποίησης – προσομοίωσης – βελτιστοποίησης στην επίλυση προβλημάτων βέλτιστου ελέγχου συστημάτων ταμειυτήρων. Η αξιολόγηση της μεθόδου παραμετροποίησης – προσομοίωσης – βελτιστοποίησης γίνεται με σύγκριση αυτής με μια εναλλακτική μη παραμετρική μέθοδο στην οποία οι μεταβλητές απόφασης είναι οι απολήψεις κάθε χρονικού βήματος από τους ταμειυτήρες. Σαν μια επιπλέον σύγκριση χρησιμοποιείται μια απλοποιημένη μέθοδος σύμφωνα με την οποία το σύστημα των ταμειυτήρων συγχωνεύεται σε ένα υποθετικό ‘ισοδύναμο ταμειυτήρα’. Η σύγκριση γίνεται με θεωρητική αιτιολόγηση αλλά και με σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνουν οι τρεις παραπάνω μέθοδοι σε ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων που εξετάζονται.

Η προσομοίωση συστημάτων ταμειυτήρων με εισαγωγή παραμέτρων και ειδικότερα ο γενικευμένος παραμετρικός κανόνας διαχείρισης [Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997] και στη συνέχεια η βελτιστοποίηση των εν λόγω παραμέτρων συνιστά το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Στη δεύτερη περίπτωση δηλαδή στην άμεση βελτιστοποίηση δεν

υπεισέρχονται παράμετροι αλλά θεωρούμε ως μεταβλητές απόφασης τις απολήψεις κάθε χρονικού βήματος.

#### 1.4 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει εκτός από την Εισαγωγή, πέντε κεφάλαια και ένα παράρτημα.

Στο κεφάλαιο δύο παρουσιάζεται η μεθοδολογία παραμετροποίησης – προσομοίωσης – βελτιστοποίησης, και ειδικότερα η προσομοίωση ταμειυτήρων με χρήση του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας [Nalbantis and Koutsoyannis, 1997]. Περιγράφεται ο παραμετρικός κανόνας και ακολουθεί έλεγχος του μοντέλου για διάφορες πολιτικές λειτουργίας. Τέλος γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της γενικής μεθοδολογίας του μοντέλου προσομοίωσης που στηρίζεται στον παραμετρικό κανόνα καθώς και της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Στο κεφάλαιο τρία γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές αρχές των γενετικών αλγορίθμων, στους τρόπους που χρησιμοποιούν για την αναπαράσταση του προβλήματος καθώς και για την αξιολόγηση των πιθανών λύσεων. Αναφέρονται οι διαφορές μεταξύ των γενετικών αλγορίθμων και των παραδοσιακών μεθόδων βελτιστοποίησης καθώς και χαρακτηριστικά των βελτιωμένων γενετικών αλγορίθμων. Τέλος παρατίθενται τα μαθηματικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του εξελικτικού επιλυτή που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση τόσο των παραμέτρων του παραμετρικού κανόνα όσο και των απολήψεων κάθε χρονικού βήματος.

Στο κεφάλαιο τέσσερα παρουσιάζεται η γενική μεθοδολογία του μοντέλου που στηρίζεται στον παραμετρικό κανόνα αλλά και του μοντέλου που στηρίζεται στην άμεση, μη παραμετρική βελτιστοποίηση του συνόλου των απολήψεων. Γίνεται αναλυτική περιγραφή των προβλημάτων που εξετάζονται καθώς και των μεθόδων που ακολουθούνται. Παρατίθενται οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι εξωτερικοί περιορισμοί αυτών και τέλος παρουσιάζεται το πρόγραμμα υπολογιστή βάσει του οποίου επιλύονται τα εν λόγω προβλήματα.

Στο κεφάλαιο πέντε παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών του μοντέλου. Παρατίθενται ενδεικτικά χαρακτηριστικά διαγράμματα της χρονικής διακύμανσης των μεγεθών του αποθέματος, της απόληψης της υπερχειλίσης και του ελλείμματος καθώς και καμπύλες διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας. Δίνονται επίσης ενδεικτικά γραφικές παραστάσεις των κανόνων λειτουργίας των ταμειυτήρων.

Τέλος στο κεφάλαιο έξι καταγράφονται τα γενικά συμπεράσματα της εργασίας.

Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται στο σύνολό τους τα διαγράμματα της χρονικής διακύμανσης των μεγεθών του αποθέματος, της απόληψης της υπερχειλίσης και του



ελλείματος σε κάθε ταμιευτήρα χωριστά αλλά και αθροιστικά στο σύστημα των ταμιευτήρων, καθώς και καμπύλες διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας.

## 2. Η μεθοδολογία παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση.

### 2.1 Προσομοίωση ταμιευτήρων με χρήση ευρετικών κανόνων λειτουργίας

Τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν τα προσηρότερα εργαλεία για τη μελέτη συστημάτων ταμιευτήρων πολλαπλού σκοπού. Ο λόγος είναι ότι τα μοντέλα προσομοίωσης επιτρέπουν μια λεπτομερή και πιστή αναπαράσταση της λειτουργίας των συστημάτων ταμιευτήρων, κάτι που δεν συμβαίνει με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης. Ο συνδυασμός τους με συνθετικές χρονοσειρές υδρολογικών εισροών προσεγγίζει τη στοχαστική φύση του προβλήματος. Σε κάθε προσομοίωση προϋποτίθεται ο καθορισμός πραγματικών ή δυνητικών κανόνων λειτουργίας ταμιευτήρων.

Όπως προαναφέρθηκε οι κυριότεροι ευρετικοί κανόνες λειτουργίας της βιβλιογραφίας είναι ο λεγόμενος χωρικός κανόνας (space rule) [Bower *et al.*,1962] και ο παρεμφερής κανόνας της Νέας Υόρκης (NYC rule) [Clark, 1950, 1956]. Ο χωρικός κανόνας καθορίζει τα αποθέματα - στόχους σε κάθε ταμιευτήρα έτσι ώστε ο άδειος όγκος τους να είναι ανάλογος των αναμενόμενων εισροών. Ο κανόνας της Νέας Υόρκης ορίζει σε κάθε ταμιευτήρα κατάλληλα αποθέματα-στόχους έτσι ώστε η πιθανότητα υπερχειλίσης να είναι η ίδια για όλους τους ταμιευτήρες. Έχει αποδειχθεί [Johnson *et al.*1991] ότι οι ευρετικοί κανόνες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένου και του χωρικού κανόνα μπορούν επιτυχώς να ενσωματωθούν σε μοντέλα βελτιστοποίησης.

Μεταφράζοντας τη φιλοσοφία του χωρικού κανόνα σε μαθηματική έκφραση έχουμε το εξής:

$$\frac{K_i - S_i}{E[CQ_i]} = \frac{\sum_{j=1}^N K_j - V}{\sum_{j=1}^N E[CQ_j]} \quad (2.1)$$

όπου:

$S_i$ : το απόθεμα του  $i$  ταμιευτήρα στο τέλος της εξεταζόμενης (τρέχουσας) περιόδου

$N$ : ο αριθμός των ταμιευτήρων του συστήματος

$V$ : το συνολικό απόθεμα σε όλους τους ταμιευτήρες

$K_i$ : η χωρητικότητα του ταμιευτήρα  $i$

$E[CQ_i]$ : η αναμενόμενη καθαρή εισροή στον ταμιευτήρα από το τέλος της τρέχουσας περιόδου μέχρι το τέλος του κύκλου φόρτισης.

Με την υπόθεση ότι η κατανομή της μεταβλητής  $CQ_i/E[CQ_i]$  (όπου  $E[ ]$  συμβολίζει αναμενόμενη τιμή) είναι ίδια για όλους τους ταμιευτήρες ο κανόνας Νέας Υόρκης ταυτίζεται με την πιο πάνω εξίσωση [Johnson et al., 1991].

Η παραπάνω έκφραση εκφράζει την αναλογία του κενού χώρου προς την αναμενόμενη αθροιστική εισροή σε κάθε ταμιευτήρα.

Η (2.1) γράφεται :

$$S_i = K_i - \left( \sum_{j=1}^N K_j - V \right) \frac{E[CQ_i]}{\sum_{j=1}^N E[CQ_j]} \quad (2.2)$$

Εάν θεωρηθεί μηδενική η πιθανότητα υπέρβασης της αποθηκευτικής ικανότητας των ταμιευτήρων, μπορούν να επιλεγούν αποθέματα – στόχοι  $S_i$  που να ικανοποιούν το χωρικό κανόνα (2.1), δεδομένου του συνολικού αποθέματος  $V$  και των προβλεπόμενων εισροών. Όπως παρατηρείται, οι μεταβλητές  $S_i$  μπορούν να εκφραστούν ως μία γραμμική συνάρτηση του  $V$ .

Αποδεικνύεται ότι ο κανόνας (2.1) συνιστά τη βέλτιστη πολιτική λειτουργίας απλών συστημάτων παράλληλων ταμιευτήρων με αντικειμενικό στόχο την ελαχιστοποίηση των υπερχειλίσεων [Sand, 1984 • Johnson et al., 1991].

## 2.2 Ο παραμετρικός κανόνας λειτουργίας

### 2.2.1 Παραμετροποίηση προβλημάτων διαχείρισης ταμιευτήρων

Ο τεράστιος αριθμός των μεταβλητών απόφασης στα συστήματα ταμιευτήρων καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη και μερικές φορές απαγορευτική τη χρήση κλασικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Για να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος, οι μέθοδοι αυτές εισάγουν απλοποιήσεις ως προς την αναπαράσταση των φυσικών διαδικασιών και περιορισμών, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε ανακριβείς ή ιδεατές λύσεις.

Προσεγγίζοντας το πρόβλημα της βελτιστοποίησης συστημάτων ταμιευτήρων πολλαπλού σκοπού με έναν τρόπο πιο ρεαλιστικό, πρόσφατη έρευνα απέδειξε την καταλληλότητα της χρήσης παραμετρικών κανόνων λειτουργίας [Nalbantis and Koutsoyannis, 1997]. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μείωση των μεταβλητών του συστήματος από μερικές χιλιάδες σε μόλις  $2(N-1)$ , όπου  $N$  ο αριθμός των ταμιευτήρων του συστήματος. Ο παραμετρικός κανόνας διαχείρισης αποτελεί γενίκευση του χωρικού κανόνα, είναι ωστόσο εφαρμόσιμος σε ένα πολύ μεγαλύτερο φάσμα υδροσυστημάτων. Η απλή του διατύπωση και η προσαρμοστικότητά του σε πρακτικά οποιοδήποτε πρόβλημα τον καθιστούν ως ένα από τα ευχερέστερα μοντέλα διαχείρισης ταμιευτήρων. Ο παραμετρικός κανόνας προϋποθέτει την ύπαρξη καθορισμένων στόχων χρήσης ύδατος.

## 2.2.2 Περιγραφή του παραμετρικού κανόνα

Έστω υδατικό σύστημα αποτελούμενο από  $N$  ταμιευτήρες των οποίων αναζητείται η βέλτιστη πολιτική διαχείρισης. Αρχικά ο κανόνας διατυπώθηκε για περιπτώσεις που οι κύριες χρήσεις ύδατος είναι οι καταναλωτικές (άρδευση, ύδρευση, βιομηχανική χρήση). Οι ταμιευτήρες συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα διαμορφώνοντας ένα δίκτυο οποιασδήποτε τοπολογίας. Από κάθε ταμιευτήρα εκτρέπεται νερό για την ικανοποίηση ενός κοινού στόχου κατάντη, ίσου με τη συνολική ζήτηση  $D$  του συστήματος. Η εξίσωση ισοζυγίου για κάθε ταμιευτήρα  $i$  σε κάθε χρονική περίοδο δίνεται από τη σχέση:

όπου

$$S_i = BS_i + Q_i - R_i - L_i - SP_i \quad (2.3)$$

$BS_i$ : απόθεμα του ταμιευτήρα στην αρχή της περιόδου

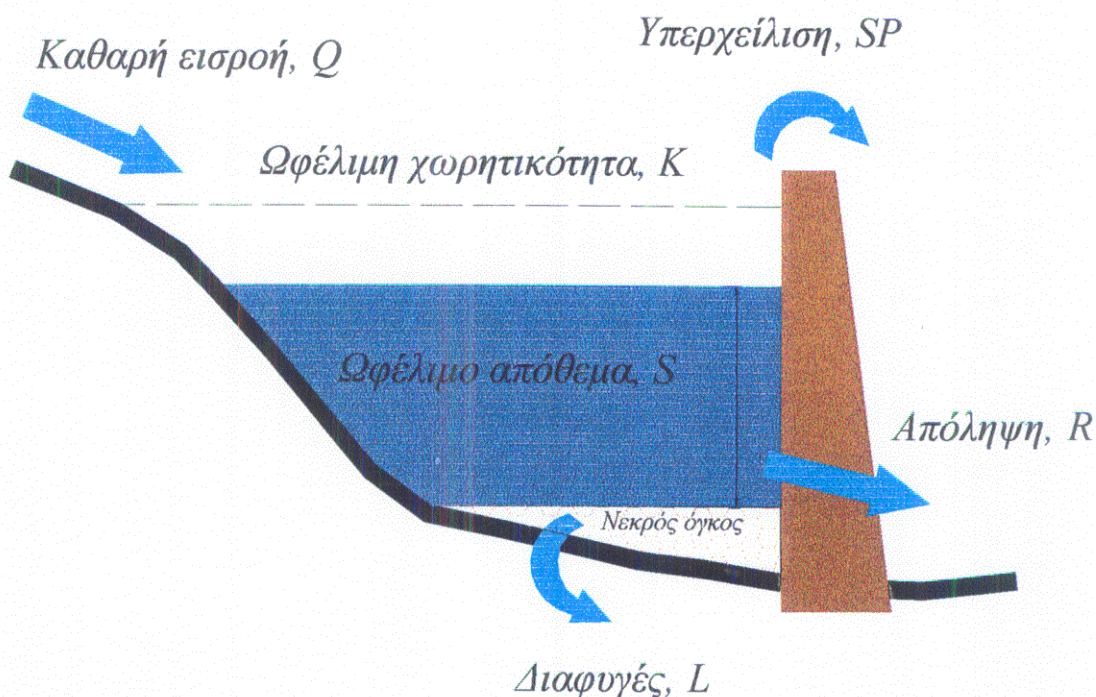
$S_i$ : απόθεμα του ταμιευτήρα στο τέλος της περιόδου

$Q_i$ : εισροές στον ταμιευτήρα

$R_i$ : συνολικές απολήψεις ύδατος

$L_i$ : ολικές απώλειες λόγω διαρροής και εξάτμισης

$SP_i$ : υπερχειλίση.



Σχήμα 1

Έστω  $V$  ο συνολικός όγκος του συστήματος στο τέλος της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Στην απλή περίπτωση του ενός ταμιευτήρα, ο όγκος  $V$  προκύπτει άμεσα με

επίλυση της εξίσωσης (2.3). Στη γενική περίπτωση η κατάσταση του συστήματος περιγράφεται από  $N$  μεταβλητές  $S_i$ , οι οποίες ικανοποιούν την εξίσωση:

$$\sum_{i=1}^N S_i = V \quad (2.4)$$

Θεωρώντας ότι οι απολήψεις από τους ταμιευτήρες ικανοποιούν επακριβώς την κατάντη ζήτηση και υπολογίζοντας κατ' εκτίμηση τις εισροές, τις απώλειες και τις υπερχειλίσεις σε κάθε ταμιευτήρα, ο ολικός όγκος του συστήματος στο τέλος της χρονικής περιόδου είναι:

$$V = \sum_{i=1}^N (BS_i + Q_i - L_i - SP_i) - D \quad (2.5)$$

Ζητούμενο του προβλήματος είναι ο καθορισμός των απολήψεων  $R_i$ , έτσι ώστε το άθροισμά τους να ισούται με τη ζήτηση  $D$ . Αυτό προϋποθέτει κατάλληλη κατανομή του συνολικού όγκου του συστήματος  $V$  στους ταμιευτήρες του συστήματος ώστε να ικανοποιείται η σχέση (2.5). Το πρόβλημα διαθέτει πολλούς βαθμούς ελευθερίας, συνεπώς υπάρχει απεριόριστος αριθμός εναλλακτικών λύσεων. Για τον καθορισμό των κανόνων λειτουργίας του υδατικού συστήματος εισάγονται οι ποσότητες  $S_i^*$ , οι οποίες αντιστοιχούν στο απόθεμα - στόχο κάθε ταμιευτήρα  $i$  στο τέλος κάθε χρονικής περιόδου. Τα πραγματικά αποθέματα  $S_i$ , διαφέρουν από τα αποθέματα - στόχους  $S_i^*$ , εφόσον κατά τον καθορισμό των τελευταίων δε λαμβάνονται υπόψη οι φυσικοί περιορισμοί του προβλήματος. Προτείνεται η κατανομή του συνολικού όγκου  $V$  σύμφωνα με το γραμμικό νόμο [Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997]:

$$S_i^* = a_i + b_i V \quad (2.6)$$

όπου  $a_i$  και  $b_i$   $i = 1, \dots, N$  είναι άγνωστοι παράμετροι.

Σε κάθε σύστημα  $N$  ταμιευτήρων ορίζονται  $2N$  παράμετροι. Λόγω της (2.4) προκύπτουν οι περιορισμοί:

$$\sum_{i=1}^N a_i = 0 \quad \sum_{i=1}^N b_i = 1 \quad (2.7)$$

και συνεπώς ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων είναι τελικά  $2(N-1)$ .

Ορίζοντας τους κανόνες λειτουργίας του συστήματος σύμφωνα με τη γραμμική σχέση (2.6), με τιμές των  $a_i$  και  $b_i$  τέτοιες που να ικανοποιούν τις εξισώσεις (2.7), το μοντέλο διαχείρισης ταμιευτήρων διατυπώνεται παραμετρικά.

### 2.2.3 Έλεγχος του Μοντέλου για διάφορες Πολιτικές Λειτουργίας

Εξετάζονται πέντε αντιπροσωπευτικές πολιτικές λειτουργίας, οι οποίες προκύπτουν από διαφορετική θεώρηση των ιδιοτήτων και των στόχων του υδατικού συστήματος. Σε κάθε σενάριο αντιστοιχεί ένας και μοναδικός στόχος, όπως είναι η ελαχιστοποίηση των υπερχειλίσεων ή των διαρροών. Για να γίνει εφικτή η διατύπωση της λύσης σε αναλυτική μορφή, βασισμένη σε μια θεωρητική αντικειμενική συνάρτηση, αγνοούνται στο στάδιο αυτό

ορισμένοι από τους φυσικούς περιορισμούς του προβλήματος. Αποδεικνύεται ότι στις ακόλουθες πέντε εξεταζόμενες αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις ο γραμμικός παραμετρικός νόμος διαχείρισης είναι επαρκής [Nalbantis and Koutsogiannis, 1997].

**Περιορισμός υπερχειλίσεων:** Ως κύριος στόχος του συστήματος τίθεται η αποφυγή των αδικαιολόγητων υπερχειλίσεων σε έναν ταμιευτήρα, εφόσον δεν έχει εξαντληθεί η αποθηκευτική ικανότητα των υπολοίπων. Όπως προαναφέρθηκε αποδεικνύεται ότι [Johnson et al., 1991] οι βέλτιστοι κανόνες λειτουργίας προκύπτουν με θεώρηση ίσης πιθανότητας υπερχειλίσης για κάθε ταμιευτήρα. Υπό την προϋπόθεση ισοδύναμων κατανομών των  $CQ_i/E[CQ_i]$  για κάθε ταμιευτήρα καταλήγουμε στο γνωστό πια χωρικό κανόνα (2.1). Ο χωρικός κανόνας παίρνει τη μορφή του γραμμικού παραμετρικού κανόνα για  $a_i$  και  $b_i$  ίσα με:

$$a_i = K_i - b_i \sum_{j=1}^N K_j \quad b_i = \frac{E[CQ_i]}{\sum_{j=1}^N E[CQ_j]} \quad (2.8)$$

Ο παραμετρικός κανόνας ισχύει ακόμη και στην περίπτωση που η κατανομή των  $CQ_i/E[CQ_i]$  δεν είναι η ίδια για όλους τους ταμιευτήρες. Πράγματι εάν θεωρηθεί ότι οι ποσότητες  $CQ_i$ , ακολουθούν κατανομή Gauss, προκύπτει γραμμικός νόμος διαχείρισης, με τιμές παραμέτρων ελάχιστα διαφορετικές από αυτές της σχέσης (2.8) [Nalbantis and Koutsogiannis, 1997].

Εφόσον οι ταμιευτήρες βρίσκονται σε περιοχή με κοινό κλιματικό καθεστώς, οι ποσότητες  $b_i$  δεν διαφοροποιούνται σημαντικά από μήνα σε μήνα. Συνεπώς, οι παράμετροι  $a_i$  και  $b_i$  μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητες του χρόνου.

**Περιορισμός απωλειών:** Σε πολλές περιπτώσεις οι διαρροές από τους ταμιευτήρες είναι μη ελεγχόμενες, ειδικά εάν πρόκειται για φυσικές λίμνες με καρστικό υπόβαθρο. Μη ελεγχόμενες είναι ομοίως και οι απώλειες λόγω εξάτμισης, ειδικά εάν αναφέρονται σε ρηχές φυσικές λίμνες. Ας υποθεθεί ότι οι απώλειες λόγω διαρροής και εξάτμισης είναι πολύ πιο σημαντικές των υπερχειλίσεων. Οι απώλειες λόγω διαρροής είναι συνήθως συνάρτηση της στάθμης του ταμιευτήρα, ενώ οι αντίστοιχες λόγω εξάτμισης είναι συνάρτηση της επιφάνειας του. Δεδομένων των σχέσεων στάθμης - όγκου και στάθμης - επιφάνειας για κάθε ταμιευτήρα  $i$ , οι ολικές απώλειες μπορούν να εκφραστούν ως συνάρτηση του όγκου, δηλαδή:

$$L_i = l_i(S_i) \quad (2.9)$$

Εάν ο αντικειμενικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών, με την παραδοχή αύξουσας και κοίλης συνάρτησης  $l_i(S_i)$  για κάθε ταμιευτήρα (υπόθεση η οποία ισχύει σχεδόν πάντα), αποδεικνύεται ότι η βέλτιστη πολιτική διαχείρισης είναι η αποθήκευση όλου του όγκου  $V$  στον ταμιευτήρα  $m$  για τον οποίο η τιμή  $l_m(V)$  είναι η ελάχιστη μεταξύ των  $l_i(V)$  των υπολοίπων ταμιευτηρών. Μαθηματικά, η παραπάνω υπόθεση εκφράζεται μέσω της γραμμικής εξίσωσης (2.6), θέτοντας  $a_i = 0$  για κάθε  $i$ ,  $b_m = 1$  και  $b_i = 0$  για κάθε  $i \neq m$

**Επάρκεια παροχρητευτικότητας:** Ένας τρίτος κανόνας αναφέρεται σε περιόδους μειωμένων αποθεμάτων του συστήματος. Στις περιόδους αυτές αντικειμενικός σκοπός δεν

είναι η αποφυγή των υπερχειλίσεων αλλά η κατάλληλη διαχείριση των απολήψεων, έτσι ώστε να μην αδειάζουν ένας ή περισσότεροι ταμιευτήρες του συστήματος και να οδηγηθούμε σε αστοχία (μη κάλυψη της ζήτησης) όχι εξαιτίας της έλλειψης νερού αλλά εξαιτίας της περιορισμένης παροχетеυτικότητας των κατάντη αγωγών. Σ' αυτή την περίπτωση η βέλτιστη κατανομή προκύπτει με ρύθμιση των όγκων των ταμιευτήρων ανάλογα με τις παροχетеυτικότητες των αγωγών εκροής. Ο παραπάνω κανόνας μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά μέσω της γραμμικής σχέσης (2.6) με συντελεστές:

$$a_i = 0 \quad b_i = \frac{C_i}{\sum_{j=1}^N C_j} \quad (2.10)$$

όπου  $C_i$  η παροχетеυτικότητα του αγωγού μέσω του οποίου γίνονται οι απολήψεις από τον ταμιευτήρα  $i$ .

**Διαχείριση ανάλογα με την τοπολογία:** Στη μέχρι τώρα ανάλυση οι ταμιευτήρες θεωρήθηκαν τοπολογικά ισοδύναμοι, δηλαδή υποθέσαμε ότι κάθε ταμιευτήρας κείται σε διαφορετικό ποταμό και συνδέεται μέσω ανεξάρτητου δικτύου με τον κόμβο κατανάλωσης. Σε πολλές περιπτώσεις ωστόσο, η διαχείριση των ταμιευτήρων δεν μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη της τοπολογίας. Ας υποτεθεί για παράδειγμα υδατικό σύστημα με εν σειρά τοποθέτηση ταμιευτήρων κατά μήκος ενός ποταμού. Στην περίπτωση αυτή οι υπερχειλίσεις από τους ταμιευτήρες, εξαιρουμένου του πλέον κατάντη, δεν αποτελούν απώλειες του συστήματος. Επιπλέον, μπορεί να είναι επιθυμητή η αποθήκευση όλου του όγκου του συστήματος σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο υψόμετρο, για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας (ελαχιστοποίηση των αντλήσεων). Τέλος είναι πάντοτε δυνατή η ροή του νερού από ανάντη προς κατάντη, ενώ η αντίθετη μετακίνηση απαιτεί άντληση. Συνεπώς, ο βέλτιστος τρόπος διαχείρισης συνίσταται στην αποθήκευση όσο το δυνατόν περισσότερου όγκου του συστήματος στον πλέον ανάντη ταμιευτήρα. Μαθηματικά, η παραπάνω υπόθεση εκφράζεται με τη γραμμική εξίσωση (2.6), με συντελεστές  $a_i = 0$  για κάθε  $i$ ,  $b_m = 1$  για τον πλέον ανάντη ταμιευτήρα και  $b_i = 0$  για κάθε  $i \neq m$ .

**Εξασφάλιση επάρκειας για δευτερεύουσες χρήσεις ύδατος:** Σε πολλές περιπτώσεις, εκτός από την κύρια χρήση ύδατος, υπάρχουν και δευτερεύουσες χρήσεις τοπικού χαρακτήρα (άρδευση, περιβαλλοντική χρήση κλπ). Στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να αποφεύγονται καταστάσεις κατά τις οποίες μερικοί ταμιευτήρες είναι σχεδόν άδειοι, ενώ άλλοι είναι σχεδόν γεμάτοι. Έτσι μπορεί να τεθεί κάποιος κανόνας σύμφωνα με τον οποίο το νερό αποθηκεύεται αναλογικά με την αντίστοιχη τοπική ζήτηση  $CLD_i$ , προκειμένου να εξασφαλίζεται ισορροπημένη κάλυψη των δευτερευουσών αναγκών. Η παραπάνω υπόθεση οδηγεί και πάλι στη γραμμική σχέση (2.6) με συντελεστές:

$$a_i = 0 \quad b_i = \frac{E[CLD_i]}{\sum_{j=1}^N E[CLD_j]} \quad (2.11)$$

Έτσι λοιπόν για κάθε μία από τις παραπάνω απλές καταστάσεις οι κανόνες λειτουργίας των ταμειυτήρων μπορούν να εκφραστούν πάντοτε με τη γραμμική σχέση (2.6), μέσω παραμέτρων  $a_i$ , και  $b_i$ , που δίδονται από απλές εξισώσεις. Σε πραγματικές καταστάσεις ζητείται η ταυτόχρονη ικανοποίηση πολλών στόχων. Στις περιπτώσεις αυτές διατηρείται μεν η γραμμικότητα και η παραμετρική έκφραση των κανόνων λειτουργίας, πλην όμως οι παράμετροι  $a_i$ , και  $b_i$  δεν διατυπώνονται μέσω απλών εξισώσεων, εφόσον η αντικειμενική συνάρτηση δεν εκφράζεται πλέον με αναλυτική μορφή [Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997]. Οι τιμές των παραμέτρων μπορούν να αναζητηθούν μέσω διαδικασιών προσομοίωσης και βελτιστοποίησης [Loucks et al., 1981].

#### 2.2.4 Περαιτέρω Ανάπτυξη του Κανόνα και Διερεύνηση Παραμέτρων

Κατά την εισαγωγή της εξίσωσης (2.6) αγνοήθηκαν οι φυσικοί περιορισμοί του συστήματος, σύμφωνα με τους οποίους το απόθεμα - στόχος δεν μπορεί να λάβει αρνητικές τιμές ούτε να ξεπεράσει την αποθηκευτική ικανότητα του ταμειυτήρα. Συνεπώς η (2.6) διορθώνεται έτσι ώστε:

$$S_i^* = \begin{cases} 0 & a_i + b_i V < 0 \\ a_i + b_i V & 0 \leq a_i + b_i V \leq K_i \\ K_i & a_i + b_i V > K_i \end{cases} \quad (2.12)$$

Ορίζοντας ωστόσο τους όγκους  $S_i^*$  σύμφωνα με τη σχέση (2.12), παραβιάζεται γενικά η απαίτηση αθροίσματος τους ίσου με το συνολικό όγκο του συστήματος  $V$ . Για να ισχύουν ταυτόχρονα οι φυσικοί περιορισμοί και η εξίσωση (2.12) εισάγεται μια απλή υπολογιστική διαδικασία. Η ποσότητα  $V - \sum_{j=1}^N S_j^*$  κατανέμεται ανάλογα με την ποσότητα  $S_i^* (1 - S_i^* / K_i)$ , έτσι ώστε η σχέση ( $S_i^* = 0$ ) να αντιστοιχεί σε ( $S_i^{**} = 0$ ) και η σχέση ( $S_i^* = K_i$ ) να αντιστοιχεί σε ( $S_i^{**} = K_i$ ). Με τον τρόπο αυτό δεν επηρεάζονται οι περιπτώσεις κατά τις οποίες προκύπτει, εξαιτίας της (2.12), απαίτηση άδειου ή γεμάτου ταμειυτήρα. Τα τελικά αποθέματα - στόχοι  $S_i^{**}$  δίνονται από τη σχέση:

$$S_i^{**} = S_i^* + \frac{S_i^* (1 - S_i^* / K_i)}{\sum_{j=1}^N S_j^* (1 - S_j^* / K_j)} \left( V - \sum_{j=1}^N S_j^* \right) = S_i^* [1 + \phi (1 - S_i^* / K_i)] \quad (2.13)$$

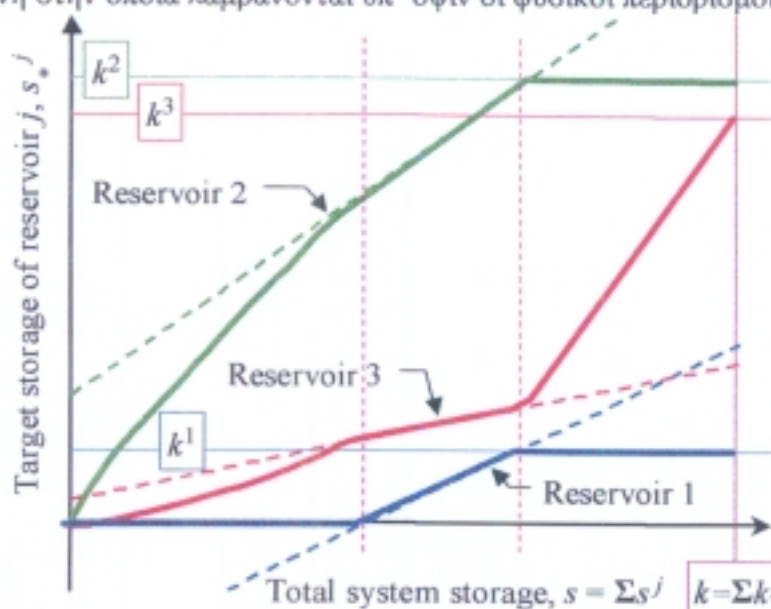


όπου:

$$\phi = \frac{V - \sum_{j=1}^N S_j^*}{\sum_{j=1}^N S_j^* (1 - S_j^* / K_j)} \quad (2.14)$$

Σημειώνεται ότι κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις (όπως για τιμές του  $\phi$  εκτός του διαστήματος  $[-1,1]$ ), η εξίσωση (2.13) μπορεί να δώσει τιμές αποθεμάτων - στόχων που εξακολουθούν να παραβιάζουν τους φυσικούς περιορισμούς. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος ακολουθείται ειδική επαναληπτική διαδικασία. Ο τελικός κανόνας διαχείρισης, εκφραζόμενος με όρους  $S_j^*$ , καθορίζεται πλήρως από τις τιμές των αρχικών παραμέτρων  $a_j$  και  $b_j$ .

Στο σχήμα που ακολουθεί εξηγείται γραφικώς ο παραμετρικός κανόνας λειτουργίας, σε ένα υποθετικό σύστημα τριών ταμιευτήρων στην αρχική γραμμική του μορφή αλλά και στην αμέσως επόμενη στην οποία λαμβάνονται υπ' όψιν οι φυσικοί περιορισμοί.



Αφού διατύπωσαν την πλήρη μαθηματική μορφή του παραμετρικού κανόνα, οι *Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997* απέδειξαν την καταλληλότητα του ως προς:

- Τη γραμμική μορφή της εξίσωσης (2.6)
- Τον αριθμό των παραμέτρων (δύο ανά ταμιευτήρα)
- Τις μη μεταβαλλόμενες εποχιακά τιμές των παραμέτρων

Η αυστηρά μαθηματική τεκμηρίωση των παραπάνω υποθέσεων είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Είναι αποδεδειγμένη η καταλληλότητα της γραμμικής σχέσης (2.6) για τις πέντε απλές περιπτώσεις που εξετάστηκαν πιο πάνω. Σε πιο σύνθετα προβλήματα ωστόσο, η ανάγκη διόρθωσης των αρχικών αποθεμάτων - στόχων σύμφωνα με τις σχέσεις (2.12) και (2.13) εισάγει έντονη μη γραμμικότητα στους κανόνες λειτουργίας. Γενικά όμως η αρχική γραμμική μορφή κρίνεται επαρκής για την παραμετροποίηση του προβλήματος με χρήση δύο παραμέτρων ανά ταμιευτήρα. Οποιοσδήποτε αρχικός κανόνας κι αν χρησιμοποιηθεί, ανεξάρτητα από τη μαθηματική του διατύπωση, μεταβάλλεται αναγκαστικά εξαιτίας των

φυσικών περιορισμών του συστήματος. Συνεπώς, διαφορετικοί αρχικοί κανόνες λειτουργίας μπορεί να έχουν παρόμοια τελική μορφή. Αποδείχθηκε με αριθμητική διερεύνηση [Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997] ότι αν χρησιμοποιηθεί ο δευτεροβάθμιος κανόνας

$$S_i^* = a_i + b_i V + c_i V^2 \quad (2.15)$$

όπου  $a_i$ ,  $b_i$  και  $c_i$  είναι οι παράμετροι κάθε ταμιευτήρα  $i$ , προκύπτουν κανόνες λειτουργίας οι οποίοι αποκλίνουν ελάχιστα από τους αντίστοιχους κανόνες του γραμμικού νόμου (το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, κανονικοποιημένο με βάση την αντίστοιχη χωρητικότητα των ταμιευτήρων είναι μικρότερο από 0.1%). Τα στοιχεία αυτά δικαιολογούν εν μέρει την καταλληλότητα της χρήσης δύο αντί περισσότερων παραμέτρων. Εγείρεται ωστόσο το ερώτημα για το αν είναι κατάλληλη η χρήση μιας μόνο παραμέτρου ανά ταμιευτήρα έτσι ώστε ο αρχικός νόμος λειτουργίας να δίνεται από μια ομογενή γραμμική σχέση της μορφής  $S_i^* = b_i V$ . Και σ' αυτή την περίπτωση αποδεικνύεται ότι προκύπτουν τελικοί κανόνες λειτουργίας οι οποίοι δεν αποκλίνουν περισσότερο από 10% σε σχέση με τον μη ομογενή γραμμικό και τον τετραγωνικό νόμο, ακόμη κι αν η αντίστοιχη απόκλιση ως προς του αρχικούς κανόνες προσεγγίζει το 100%. Εφαρμογή του ομογενούς κανόνα στο υδατικό σύστημα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας κατέδειξε ότι η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι πρακτικά αδιάφορη ως προς τη χρήση των παραμέτρων  $a_i$ . Το συμπέρασμα αυτό ωστόσο δεν μπορεί να γενικευθεί για οποιοδήποτε σύστημα ταμιευτήρων χωρίς προηγούμενη διερεύνηση [Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997].

Η τρίτη υπόθεση αναφέρεται σε μια άλλη μορφή μη γραμμικότητας, η οποία μπορεί να εισαχθεί μέσω εποχιακής μεταβολής των παραμέτρων. Σημειώνεται αρχικά ότι σε συστήματα ταμιευτήρων μεγάλης χωρητικότητας και υπερετήσιας ρύθμισης δεν υπάρχει ανάγκη θεώρησης εποχιακών αποθεμάτων - στόχων, εφόσον η υπερετήσια μεταβολή των αποθεμάτων έχει πολύ μεγαλύτερη σημασία από την εποχιακή μεταβολή. Αντίθετα, σε συστήματα μικρής αποθηκευτικής ικανότητας φαίνεται δικαιολογημένη η θεώρηση αποθεμάτων - στόχων τα οποία εξαρτώνται όχι μόνο από το συνολικό όγκο του συστήματος  $V$  αλλά και από την εποχή του έτους. Με την εισαγωγή δύο ζευγών παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$  ενός για την υγρή και ενός για την ξηρή περίοδο, ο όγκος του συστήματος θα κατανέμεται με διαφορετικό νόμο σε κάθε εποχή. Αν και η τροποποίηση αυτή συνεπάγεται ακριβέστερη αναπαράσταση της λειτουργίας του συστήματος και δεν απαιτεί καμία μετατροπή του αλγορίθμου, προκαλεί ωστόσο σημαντική αύξηση του υπολογιστικού φόρτου, εφόσον διπλασιάζονται οι μεταβλητές του συστήματος [Nalbantis and Koutsoyiannis, 1997].

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται συγκριτικά τέσσερις εκδόσεις του παραμετρικού κανόνα που διαφέρουν ως προς τον αριθμό των παραμέτρων. Ειδικότερα εξετάζονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- 1) δύο ζεύγη παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$  που διαφοροποιούνται ανά εποχή (δύο εποχές το χρόνο, τέσσερις παράμετροι).
- 2) Ένα ζεύγος παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$  σταθερό για όλο το έτος (δύο παράμετροι).

- 3) Δύο παράμετροι  $b_i$  που διαφοροποιούνται ανά εποχή, θεωρώντας παράλληλα  $a_i = 0$  (δύο εποχές το χρόνο, δύο παράμετροι).
- 4) Μια παράμετρος  $b_i$  σταθερή για όλο το έτος, θεωρώντας παράλληλα  $a_i = 0$  (μία παράμετρος).

### 2.2.5 Μοντέλο Προσομοίωσης – Βελτιστοποίησης

Η γενική μεθοδολογία του μοντέλου προσομοίωσης που στηρίζεται στον παραμετρικό κανόνα περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Εισαγωγή των αρχικών τιμών των λειτουργικών συντελεστών  $a_i$  και  $b_i$ , οι οποίοι αποτελούν τις άγνωστες παραμέτρους του συστήματος και τελικώς εκτιμώνται μέσω βελτιστοποίησης.
2. Λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος ταμιευτήρων με ικανοποίηση όλων των φυσικών και των εσωτερικών λειτουργικών περιορισμών του. Σε αυτό ενσωματώνεται μια διαδικασία παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών εισροών. Τελικός στόχος της προσομοίωσης είναι ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης της οποίας και θα ακολουθήσει η βελτιστοποίηση.
3. Διαδικασία βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό των  $a_i$  και  $b_i$ .

Η διαδικασία βελτιστοποίησης προϋποθέτει την εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων, σε κάθε μια απ' τις οποίες εξετάζονται διαφορετικές τιμές παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$ . Σε κάθε προσομοιούμενη χρονική περίοδο εκτελούνται οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

- Εκτιμάται ο συνολικός όγκος  $V$  του συστήματος των δύο ταμιευτήρων σαν το άθροισμα των προηγούμενων αποθεμάτων  $BS_i$  και των καθαρών εισροών  $Q_i$  μείον τη ζήτηση  $D$  που πρέπει να ικανοποιηθεί κατάντη.
- Εφαρμόζεται ο παραμετρικός κανόνας για τον καθορισμό των αποθεμάτων  $S_i$  κάθε ταμιευτήρα.
- Καθορίζονται οι απολήψεις  $R_i$  από κάθε ταμιευτήρα, έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα αποθέματα – στόχοι.
- Έλλειμμα προκύπτει όταν αδειάσουν και οι δύο ταμιευτήρες και ισούται με τη διαφορά μεταξύ ζήτησης και συνολικής απόληψης από το σύστημα των δύο ταμιευτήρων.
- Η υπερχειλίση από κάθε ταμιευτήρα  $i$  προκύπτει από τη σχέση:

$$SP_i = \max \{0, BS_i + Q_i - R_i - L_i - K_i\} \quad (2.16)$$

Η μέθοδος βελτιστοποίησης που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία είναι η μέθοδος των γενετικών αλγορίθμων, τόσο για τη βελτιστοποίηση με βάση τον παραμετρικό κανόνα όσο και για τη μη παραμετρική βελτιστοποίηση. Οι μέθοδοι των γενετικών αλγορίθμων επισκοπούνται στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

### 3. Γενετικοί αλγόριθμοι

#### 3.1 Εισαγωγή

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι αλγόριθμοι αναζήτησης που βασίζονται στους μηχανισμούς της φυσικής επιλογής και της φυσικής γενετικής. Έχοντας σαν δεδομένο ένα αρχικό πλήθος πιθανών μορφών, έναν αρχικό πληθυσμό, και μιμούμενοι βιολογικές διαδικασίες όπως η αναπαραγωγή, η ανταλλαγή γονιδίων και η μετάλλαξη παράγουν νέες γενιές πιθανών μορφών με βάση τη βέλτιστη προσαρμογή αυτών στις συνθήκες του περιβάλλοντος και την ικανότητα επιβίωσης που αυτές διαθέτουν.

Οδηγηθήκαμε στην ανακάλυψη των Γενετικών Αλγορίθμων (Genetic Algorithms) εξαιτίας της ανάγκης για χρήση εύρωστων συστημάτων. Τα φυσικά συστήματα είναι εύρωστα καθώς προσαρμόζονται σε ένα πλήθος από διαφορετικά περιβάλλοντα. Μετατρέποντας το φυσικό αλγόριθμο προσαρμογής και επιλογής σε τεχνητό ελπίζουμε να επιτύχουμε παρόμοια αποτελέσματα με τα φυσικά. Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν επιδείξει τις δυνατότητές τους σε μεγάλο αριθμό αναλυτικών και εμπειρικών μελετών.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο πανεπιστήμιο του Michigan. Ο στόχος των ερευνών τους ήταν διττός. Πρώτον να συνοψίσουν και να εξηγήσουν τις διαδικασίες προσαρμογής των φυσικών συστημάτων και δεύτερον να σχεδιάσουν τεχνητά συστήματα λογισμικού τα οποία να διατηρούν τους βασικούς μηχανισμούς των φυσικών συστημάτων.

Στη φύση, τα άτομα ενός συγκεκριμένου πληθυσμού ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να επιβιώσουν καθώς και για να προσελκύσουν το σύντροφό τους. Τα άτομα που επιτυγχάνουν στις παραπάνω προσπάθειες θα έχουν και το μεγαλύτερο αριθμό απογόνων. Αυτό σημαίνει ότι τα γονίδια των ατόμων που προσαρμόστηκαν καλύτερα στο περιβάλλον τους θα διαδοθούν με αυξημένο ρυθμό στα άτομα των επόμενων γενεών. Η ένωση ισχυρών χαρακτηριστικών από διαφορετικούς προγόνους μπορεί να οδηγήσει σε απογόνους που η προσαρμοστικότητά τους θα είναι μεγαλύτερη από καθέναν από τους γονείς τους ξεχωριστά. Με αυτό τον τρόπο, το συγκεκριμένο είδος εξελίσσεται και προσαρμόζεται όλο και περισσότερο στο περιβάλλον του.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν μιμούμενοι τη φυσική συμπεριφορά, με έναν αρχικό πληθυσμό μορφών, κάθε μια από τις οποίες αντιπροσωπεύει μία πιθανή λύση στο πρόβλημα που μελετάμε. Κάθε μορφή χαρακτηρίζεται από ένα βαθμό καταλληλότητας (*fitness score*), ανάλογα με το πόσο καλή λύση του προβλήματος αυτή αντιπροσωπεύει. Στις καταλληλότερες μορφές δίνονται περισσότερες ευκαιρίες για αναπαραγωγή, διασταυρώνοντάς τις μεταξύ τους. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί καινούργιες μορφές - απογόνους, οι οποίοι μοιράζονται μερικά χαρακτηριστικά που κληρονομήθηκαν από τους

γονείς τους. Τα λιγότερο κατάλληλα άτομα του πληθυσμού έχουν προφανώς τις λιγότερες πιθανότητες να επιλεγούν για αναπαραγωγή και έτσι σιγά-σιγά εκλείπουν.

Έτσι προκύπτει το νέο πλήθος πιθανών λύσεων το οποίο θα περιέχει σε αυξημένο ποσοστό τα χαρακτηριστικά που του προσδίδουν βιωσιμότητα και που κατά την εξελικτική πορεία θα εξαπλωθούν σε ολόκληρο τον πληθυσμό. Ένας σωστά σχεδιασμένος Γενετικός Αλγόριθμος οδηγεί στη σύγκλιση ολόκληρου του πληθυσμού στη βέλτιστη λύση.

Τα μυστικά της προσαρμογής και της επιβίωσης μπορούν να αποκαλυφθούν με την προσεκτική μελέτη βιολογικών παραδειγμάτων. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι δεν είναι οι μόνοι αλγόριθμοι που σχεδιάστηκαν ακολουθώντας φυσικές διαδικασίες. Τα *Νευρωνικά Δίκτυα* είναι βασισμένα στην συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι νευρώνες του εγκεφάλου. Η δύναμη των γενετικών αλγορίθμων βρίσκεται στο γεγονός ότι βασίζονται σε εύρωστες και αξιόπιστες διαδικασίες. Εφαρμόζονται και δίνουν λύσεις σε προβλήματα όπου άλλες τεχνικές αδυνατούν. Τα αίτια της εξάπλωσης της χρήσης των γενετικών αλγορίθμων είναι φανερά. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι υπολογιστικά απλοί αλλά πολύ ισχυροί στην αναζήτηση του βέλτιστου. Επιπλέον δεν περιορίζονται από υποθέσεις που αφορούν την περιοχή πολιτικής, υποθέσεις που αφορούν τη συνέχεια, την ύπαρξη παραγώγων, την παρουσία τοπικών ή ολικών μεγίστων κλπ.

Η χρήση ενός Γενετικού Αλγόριθμου για την επίλυση ενός προβλήματος δεν εγγυάται τη βέλτιστη λύση, αλλά εγγυάται μια πολύ καλή λύση σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Αν ήδη υπάρχει κάποιος ειδικευμένος αλγόριθμος για τη λύση του συγκεκριμένου προβλήματος, αυτός μπορεί να ξεπεράσει ένα Γενετικό Αλγόριθμο σε ακρίβεια λύσης και πιθανότητα και σε υπολογιστικό κόστος. Όταν όμως δεν υπάρχει τέτοιος ειδικευμένος αλγόριθμος η χρήση Γενετικών Αλγορίθμων ενδείκνυται. Ο συνδυασμός ενός ειδικευμένου αλγόριθμου και ενός Γενετικού Αλγόριθμου μπορεί να οδηγήσει σε ένα υβριδικό μοντέλο με αυξημένες ικανότητες επίλυσης προβλημάτων [Shukla et al., 1996 • Gelsey et al., 1995].

### 3.2 Βασικές αρχές

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι ανήκουν στην τάξη των *πιθανοτικών αλγορίθμων* (*probabilistic algorithms*), παρόλα αυτά όμως είναι πολύ διαφορετικοί από τους αλγόριθμους που βασίζονται στην τυχαία έρευνα, καθώς συνδυάζουν και στοιχεία *κατευθυνόμενης έρευνας* (*directed search*). Η δομή ενός απλού Γενετικού Αλγορίθμου είναι η ίδια με αυτή ενός οποιουδήποτε *εξελικτικού αλγορίθμου* (*evolution algorithm*).

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι η ευρύτερη κατηγορία αλγορίθμων που περιλαμβάνει τους γενετικούς αλγορίθμους, την εξελικτική στρατηγική και τον εξελικτικό προγραμματισμό.

Η εξελικτική στρατηγική αναπτύχθηκε τη δεκαετία του '60. Νεότερες προσεγγίσεις πάνω στην εξελικτική στρατηγική έγιναν από τους Rechenberg και Schwefel [Rechenberg., 1994 • Schwefel, 1995].

Η ιδέα της εξέλιξης σαν βασική αρχή της εξελικτικής στρατηγικής ξεκίνησε από προβλήματα πειραματικής βελτιστοποίησης. Οι Rechenberg και Schwefel δούλευαν πάνω σε προβλήματα υδροδυναμικής όταν σκέφτηκαν να αποφασίσουν με τυχαίο τρόπο για την εξέλιξη της βελτιστοποίησης. Έτσι οι πρώτες αλλαγές στους εξελικτικούς αλγορίθμους εφαρμόστηκαν στα πλαίσια της εξελικτικής στρατηγικής. Εξαιτίας των περιορισμών της πειραματικής δομής εξετάζεται μόνο μία λύση κάθε φορά, δηλαδή δε μιλάμε πια για πληθυσμό πιθανών λύσεων αλλά για μια πιθανή λύση (real valued vector), η οποία στη συνέχεια μεταλλάσσεται έως ότου γίνει η βέλτιστη λύση.

Επιστρέφοντας στην τεχνική των γενετικών αλγορίθμων αναφέρουμε ότι κατά την διάρκεια ζωής της γενεάς  $t$ , ο Γενετικός Αλγόριθμος διατηρεί ένα πληθυσμό πιθανών λύσεων,  $P(t) = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_n\}$ , κάθε μία από τις οποίες αξιολογείται για να πάρουμε το μέτρο της καταλληλότητάς της. Στη συνέχεια, σχηματίζουμε τον πληθυσμό της επόμενης γενεάς ( $t+1$ ), επιλέγοντας για διασταύρωση και αναπαραγωγή τα καταλληλότερα άτομα. Κάποια από αυτά υποβάλλονται σε τροποποιήσεις μέσω των γενετικών τελεστών που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Ένας Γενετικός Αλγόριθμος, σχεδιασμένος για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος, πρέπει να έχει τα εξής στοιχεία:

- Έναν τρόπο αναπαράστασης των πιθανών λύσεων στο πρόβλημά μας, έτσι ώστε να μπορεί να μοντελοποιεί το φυσικό πρόβλημα.
- Έναν τρόπο δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων.
- Μία συνάρτηση αξιολόγησης, η οποία να αξιολογεί τις πιθανές λύσεις ανάλογα με την καταλληλότητά τους. Η δράση της πάνω στις πιθανές λύσεις είναι αντίστοιχη με την επίδραση του περιβάλλοντος στις φυσικές διαδικασίες, υπό την έννοια ότι μέσω αυτής θα αποβάλλονται οι ακατάλληλες λύσεις.
- Μηχανισμούς επιλογής των καταλληλότερων ατόμων.
- Γενετικούς τελεστές που θα τροποποιούν τα 'χρωμοσώματα' των ατόμων.
- Προκαθορισμένες τιμές για τις διάφορες παραμέτρους (μέγεθος του πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών κλπ.)

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με τα βασικά αυτά στοιχεία των Γενετικών Αλγορίθμων.

### 3.2.1 Αναπαράσταση του προβλήματος

Κάνουμε την υπόθεση ότι είναι δυνατό να αναπαραστήσουμε μία πιθανή λύση στο πρόβλημά μας με μία σειρά παραμέτρων (τις οποίες ονομάζουμε *χρωμοσώματα*, *chromosomes*, όρος δανεισμένος από τη γενετική). Τα χρωμοσώματα με τη σειρά τους αποτελούνται από τα *γονίδια* (*genes*) τα οποία αναπαριστώνται με δυαδικά ψηφία. Τα χρωμοσώματα, καθώς τα τοποθετούμε σε σειρά, σχηματίζουν μία αριθμοσειρά, την οποία αποκαλούμε *φαινότυπο*. Πρώτος ο J.H. Holland [Holland, 1975] έδειξε ότι η δυαδική αναπαράσταση είναι ο καταλληλότερος τρόπος για την απεικόνιση του γονιδίου και στη συνέχεια του χρωμοσώματος και του φαινοτύπου, κάτι που είναι ακόμα γενικά αποδεκτό.

Εάν για παράδειγμα το πρόβλημά μας είναι η εύρεση της μέγιστης τιμής μιας συνάρτησης τριών μεταβλητών  $f(x, y, z)$ , θα μπορούσαμε να αναπαραστήσουμε κάθε μεταβλητή με ένα χρωμόσωμα 10 γονιδίων. Στην περίπτωση αυτή ο φαινότυπος θα αποτελείται από 3 χρωμοσώματα και θα έχει συνολικά 30 γονίδια—δηλαδή 30 δυαδικά ψηφία. Η μορφή του θα είναι η εξής:

$$x'_i = \langle b_{29}b_{28} \dots b_1b_0 \rangle, \quad (3.1)$$

με τα πρώτα 10 ψηφία να ανήκουν στο πρώτο χρωμόσωμα, τα επόμενα δέκα στο δεύτερο και τα τελευταία δέκα στο τρίτο.

Η αντιστοίχιση της δυαδικής αναπαράστασης με έναν πραγματικό αριθμό γίνεται σε δύο στάδια. Πρώτα μετατρέπουμε τον ακέραιο αριθμό του δυαδικού συστήματος, που είναι η σειρά των δυαδικών στοιχείων που έχουμε, στον αντίστοιχο αριθμό του δεκαδικού συστήματος. Η εξίσωση που περιγράφει την μετατροπή αυτή είναι η εξής:

$$\langle b_{n-1}b_{n-2} \dots b_1b_0 \rangle_2 = \left( \sum_{i=0}^{n-1} b_i 2^i \right)_{10} = v' \quad (3.2)$$

όπου  $v'$  είναι η αναπαράσταση του αριθμού στο δεκαδικό σύστημα, και η σειρά  $\langle b_{n-1}b_{n-2} \dots b_1b_0 \rangle_2$  είναι η δυαδική αναπαράσταση του χρωμοσώματος που εξετάζουμε.

Στη συνέχεια, βρίσκουμε τον πραγματικό αριθμό που αντιστοιχεί στον παραπάνω ακέραιο αριθμό, έχοντας από πριν καθορίσει το εύρος μέσα στο οποίο θα κινείται η τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου και την ακρίβεια της αναπαράστασης (μέσω του αριθμού των δυαδικών σημείων του χρωμοσώματος που δίνουμε στη συγκεκριμένη παράμετρο). Η εξίσωση είναι η εξής:

$$v = v_{\min} + v' \frac{v_{\max} - v_{\min}}{2^n - 1} \quad (3.3)$$

Τη διαδικασία αυτή μπορούμε να ακολουθήσουμε και ανάποδα, για την περίπτωση που θέλουμε να αντιστοιχίσουμε έναν πραγματικό αριθμό σε δυαδική μορφή (όπως για παράδειγμα όταν θέλουμε να δώσουμε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων στα χρωμοσώματα σε κάποια φάση της εξελικτικής διαδικασίας).

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι για να την απεικόνιση των τιμών των χρωμοσωμάτων σε ένα Γενετικό Αλγόριθμο. Μπορούμε να χρησιμοποιούμε απευθείας πραγματικούς αριθμούς στην κωδικοποίηση του χρωμοσώματος (τεχνική η οποία ονομάζεται *real coding*), ή ακόμα και πίνακες αριθμών ή λίστες. Το γεγονός που μας οδηγεί στην υιοθέτηση τέτοιων λύσεων είναι η αδυναμία της απλής δυαδικής αναπαράστασης να χειριστεί πολύπλοκα προβλήματα. Σε επόμενη παράγραφο θα παρουσιαστεί η πραγματική κωδικοποίηση με περισσότερες λεπτομέρειες.

Η δημιουργία του αρχικού πληθυσμού μπορεί να γίνει με τελείως τυχαίο τρόπο, δημιουργώντας μία ομάδα χρωμοσωμάτων – πιθανών λύσεων των οποίων οι σειρές των δυαδικών ψηφίων να έχουν κατασκευαστεί με τυχαία επιλεγμένα 0 και 1. Έχοντας ορίσει το εύρος μέσα στο οποίο θα κινούνται οι τιμές των παραμέτρων του προβλήματος, η δυαδική

απεικόνιση μας εξασφαλίζει ότι οποιαδήποτε τροποποίηση του χρωμοσώματος, μέσω των γενετικών τελεστών, θα δώσει μία λύση που θα βρίσκεται πάλι μέσα στο πεδίο αναζήτησης λύσεων. Μπορούμε επίσης να δώσουμε συγκεκριμένες τιμές στα χρωμοσώματα του αρχικού πληθυσμού, εξασφαλίζοντας έτσι ότι ο Γενετικός Αλγόριθμος θα ξεκινήσει από ένα συγκεκριμένο σημείο του πεδίου λύσεων, αν αυτό είναι κάτι που επιθυμούμε.

### 3.2.2 Αξιολόγηση των πιθανών λύσεων

Για να αποκτήσουμε ένα μέτρο του πόσο καλή είναι μία πιθανή λύση του πρόβλημάτος μας χρειαζόμαστε μία συνάρτησης αξιολόγησης, που θα επιστρέφει το μέτρο της αξίας των πιθανών λύσεων. Τη συνάρτηση αυτή ονομάζουμε *συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function)*. Η συνάρτηση καταλληλότητας είναι διαφορετική κάθε φορά και εξαρτάται από το προς επίλυση πρόβλημα. Με τη βοήθειά της μπορούμε να υπολογίσουμε για μία συγκεκριμένη λύση το *βαθμό καταλληλότητας (fitness score)*, το μέτρο δηλαδή του πόσο καλή είναι η λύση που αντιπροσωπεύει σύνολο των χρωμοσωμάτων μας. Ο στόχος είναι είτε η ελαχιστοποίηση, είτε η μεγιστοποίηση του βαθμού αυτού, ανάλογα με το πρόβλημα που επιλύουμε.

Σε πολλά προβλήματα, και ειδικότερα σε προβλήματα βελτιστοποίησης μιας συνάρτησης, είναι προφανές ότι ο βαθμός καταλληλότητας πρέπει να είναι η τιμή της ίδιας της συνάρτησης που προσπαθούμε να βελτιστοποιήσουμε, για τις τιμές των παραμέτρων που υπολογίζονται από το κάθε χρωμόσωμα. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις συνδυαστικής βελτιστοποίησης στις οποίες η συνάρτηση καταλληλότητας δεν είναι τόσο απλό να καταστρωθεί. Σε τέτοιες περιπτώσεις ένας τρόπος αντιμετώπισης είναι να οριστούν κατάλληλοι συντελεστές βαρύτητας με τη βοήθεια των οποίων να εξάγεται ενιαίος βαθμός καταλληλότητας.

Ο βαθμός καταλληλότητας μας δίνει ένα μέσο αξιολόγησης των ατόμων κάθε γενιάς. Έχοντας αξιολογήσει συνολικά τον πληθυσμό, μπορούμε με ορισμένους μηχανισμούς επιλογής να ξεχωρίσουμε τα άτομα που θα αποτελέσουν τη βάση για την νέα σειρά πιθανών λύσεων και εφαρμόζοντας σε αυτά τους γενετικούς τελεστές να δημιουργήσουμε την επόμενη γενιά πιθανών λύσεων.

Υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας ειδικών μεθόδων οι οποίες να χειρίζονται τους περιορισμούς σε ένα πρόβλημα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια τεχνική αναζήτησης χωρίς περιορισμούς. Σε τελευταία ανάλυση οι φυσικοί μηχανισμοί προσπαθούν ξανά και ξανά περιοριζόμενοι μόνο από την επιβίωση ή όχι των αποτελεσμάτων την προσπαθειών τους. Ομοίως οι γενετικοί αλγόριθμοι πρέπει να περιέχουν συναρτήσεις καταλληλότητας οι οποίες να αντικατοπτρίζουν την ποιότητα καθώς και το εφικτό των λύσεων. Για την ενσωμάτωση των περιορισμών χρησιμοποιήθηκαν σε πλήθος προβλημάτων με επιτυχία μέθοδοι εξωτερικών ποινών. Βάσει αυτών των μεθόδων, όποτε παραβιάζεται ένας περιορισμός, η αντικειμενική συνάρτηση η οποία δεν υπόκειται σε περιορισμούς



επιβαρύνεται κατά ένα ποσό το οποίο σχετίζεται με μία συνάρτηση με την παραβίαση του περιορισμού.

### 3.2.3 Μηχανισμοί επιλογής

Ο μηχανισμός επιλογής καθορίζει τις ευκαιρίες αναπαραγωγής κάθε ατόμου. Στη γενική περίπτωση, άτομα από τον πληθυσμό αντιγράφονται σε μία *δεξαμενή αναπαραγωγής (mating pool)*, με τα καταλληλότερα άτομα να εμφανίζονται περισσότερες από μία φορά, ενώ τα άτομα που αποτελούν κακές λύσεις να εμφανίζονται λιγότερες ή και καμία φορά. Τα άτομα της επόμενης γενιάς δημιουργούνται εφαρμόζοντας πάνω στα άτομα που έχουμε επιλέξει τους γενετικούς τελεστές, με τρόπο που θα δούμε στη συνέχεια. Η συμπεριφορά του Γενετικού Αλγορίθμου εξαρτάται πολύ από τον τρόπο που επιλέγουμε τα άτομα που θα αναπαράξουμε. Όπως θα δούμε παρακάτω, η σωστή λειτουργία του Γενετικού Αλγορίθμου εξασφαλίζεται δίνοντας στα άτομα ευκαιρίες αναπαραγωγής ανάλογα με την καταλληλότητά τους.

Στην εξελικτική διαδικασία υπάρχουν δύο παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο: η *ανομοιομορφία του πληθυσμού (population diversity)*, και η *επιλεκτική πίεση (selective pressure)*. Υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των δύο αυτών παραγόντων: μία αύξηση στην επιλεκτική πίεση υποστηρίζει την πρόωρη σύγκλιση του πληθυσμού πιθανότατα σε κάποιο τοπικό ακρότατο του πεδίου λύσης, επειδή η έρευνα επικεντρώνεται στα καλύτερα άτομα του πληθυσμού χωρίς να εξερευνούμε αρκετά ολόκληρο το πεδίο λύσεων. Αντίθετα, μία ασθενής επιλεκτική πίεση δημιουργεί μεγάλη ανομοιομορφία στον πληθυσμό και οδηγεί σε πλήρη εξερεύνηση του πεδίου λύσεων, αλλά καθιστά τον αλγόριθμο αργό ή/και αναποτελεσματικό επειδή δε φροντίζουμε να εξαντλήσουμε την έρευνα στην περιοχή γύρω από τα καταλληλότερα άτομα. Ένας Γενετικός Αλγόριθμος πρέπει να κρατά μία ισορροπία μεταξύ των δύο αυτών άκρων, και αυτό γίνεται με τη σωστή σχεδίαση και υλοποίηση του μηχανισμού επιλογής.

Έχουν εκφραστεί αρκετές απόψεις για τον τρόπο που πρέπει να λειτουργεί ένας μηχανισμός επιλογής, ώστε να ικανοποιεί τις παραπάνω προϋποθέσεις. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι:

- *Roulette wheel*. Πρόκειται για τον απλούστερο μηχανισμό επιλογής ατόμων προς αναπαραγωγή. Το φυσικό του ανάλογο είναι ένας τροχός ρουλέτας, με εγκοπές τόσες όσες τα άτομα του πληθυσμού και πλάτος κάθε εγκοπής ανάλογο με το βαθμό καταλληλότητας των ατόμων.
- *Elitist model*. Επιβάλλει τη διατήρηση του καλύτερου ατόμου, διαμέσου των γενεών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά με τους υπόλοιπους μηχανισμούς.
- *Expected value model*. Η δεύτερη παραλλαγή του μηχανισμού επιλογής που προτείνει ο DeJong μειώνει το στοχαστικό σφάλμα της ρουτίνας επιλογής, εισάγοντας έναν μετρητή  $M$  για κάθε άτομο  $v$ , στον οποίο δίνεται η αρχική τιμή  $f(v)/\bar{f}$  (ο λόγος του βαθμού

καταλληλότητας του συγκεκριμένου ατόμου προς το μέσο λόγο). Η τιμή του μετρητή αυτού μειώνεται, αν δεν επιλέξουμε το συγκεκριμένο άτομο για αναπαραγωγή. Όταν αυτή πέσει κάτω από το μηδέν, το άτομο αυτό δεν είναι πλέον διαθέσιμο για αναπαραγωγή.

- *Elitist expected model*. Ένας συνδυασμός των παραπάνω δύο μεθόδων.
- *Deterministic sampling, remainder stochastic sampling with/without replacement, stochastic tournament*. Αποτελεί μία σειρά από μηχανισμούς επιλογής με βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, η μέθοδος της *στοχαστικής επιλογής με αντικατάσταση (remainder stochastic sampling with replacement)* εξασφαλίζει ευκαιρίες αναπαραγωγής στα άτομα ανάλογα με το ακέραιο μέρος της αναμενόμενης συχνότητας εμφάνισης τους στον καινούργιο πληθυσμό (ο λόγος  $f(v)/\bar{f}$ ), ενώ ανάλογα με το δεκαδικό μέρος τα άτομα συναγωνίζονται για τις εναπομείνουσες θέσεις.

Υπάρχουν επίσης μέθοδοι που κατατάσσουν τα άτομα κάθε γενιάς, και τους δίνουν ευκαιρίες αναπαραγωγής ανάλογα με την κατάταξη τους, αντί για το βαθμό καταλληλότητάς τους. Αυτό γίνεται γιατί πιστεύεται ότι ένας συνηθισμένος λόγος για την πρόωρη σύγκλιση των Γενετικών Αλγορίθμων είναι η ύπαρξη υπέρ-κατάλληλων ατόμων, με δυσανάλογα μεγάλο βαθμό καταλληλότητας σχετικά με τον υπόλοιπο πληθυσμό. Τέτοια άτομα θα έχουν πάρα πολλούς απογόνους και, εξαιτίας του πεπερασμένου μεγέθους του πληθυσμού, σε σύντομο αριθμό επαναλήψεων θα κυριαρχήσουν και θα οδηγήσουν τον Γενετικό Αλγόριθμο κοντά στη λύση που αυτά αντιπροσωπεύουν.

Τέλος, αντίθετα με όλες αυτές τις μεθόδους οι οποίες απαιτούν τον υπολογισμό μιας διορθωμένης τιμής του βαθμού καταλληλότητας, υπάρχει και η τεχνική της *έμμεσης αναπροσαρμογής του βαθμού καταλληλότητας (implicit fitness remapping)*. Τέτοια είναι και η μέθοδος *επιλογής μέσω διαγωνισμού (tournament selection)*. Στην πιο απλή της μορφή, επιλέγουμε τυχαία δύο άτομα από τον πληθυσμό, και αντιγράφουμε στη δεξαμενή αναπαραγωγής αυτό που έχει τον μεγαλύτερο βαθμό καταλληλότητας από τα δύο, επαναλαμβάνοντας αυτή την διαδικασία μέχρι να έχουμε τον επιθυμητό αριθμό ατόμων για αναπαραγωγή. Περαιτέρω ρύθμιση της επιλεκτικής πίεσης μπορεί να γίνει μεταβάλλοντας τον αριθμό των ατόμων που συναγωνίζονται (όσο μεγαλύτερος ο αριθμός τόσο μεγαλύτερη και η πίεση), ενώ μπορούμε επίσης να εισάγουμε και μία πιθανότητα επιλογής του καλύτερου ατόμου, με την οποία θα δίνεται η δυνατότητα ακόμα και σε σχετικά ακατάλληλα άτομα να αναπαραχθούν (όσο μικρότερη η πιθανότητα αυτή τόσο μικρότερη και η επιλεκτική πίεση).

### 3.2.4 Γενετικοί τελεστές

Την επιλογή των καταλληλότερων ατόμων και τη δημιουργία της δεξαμενής αναπαραγωγής ακολουθεί η δράση των γενετικών τελεστών ακριβώς πριν τη δημιουργία της επόμενης γενιάς. Η διαδικασία έχει ως εξής: Επιλέγοντας ανά δύο τους γονείς, έτσι ώστε να χρησιμοποιήσουμε όλα τα διαθέσιμα άτομα, συνδυάζουμε τα χρωμοσώματα με τη βοήθεια

του μηχανισμού διασταύρωσης. Στα άτομα που προκύπτουν εφαρμόζουμε το μηχανισμό της μετάλλαξης, για να πάρουμε τελικά τα άτομα της επόμενης γενιάς. Η βασική λειτουργία των δύο αυτών γενετικών τελεστών είναι η ακόλουθη:

- Ο μηχανισμός της *διασταύρωσης (crossover)* παίρνει τα δύο άτομα και τα κόβει σε αντίστοιχες, τυχαίες θέσεις. Συνδυάζοντας κομμάτια και από τα δύο αρχικά άτομα, σχηματίζονται δύο καινούργια άτομα, που αποτελούν τους απόγονους των δύο αρχικών γονέων. Ανάλογα με τον αριθμό των σημείων στα οποία κόβουμε τα άτομα έχουμε τη *διασταύρωση μονού σημείου (single-point crossover)*, *διασταύρωση διπλού σημείου (2-point crossover)* κ.ο.κ..

Ο μηχανισμός της διασταύρωσης συνήθως δεν εφαρμόζεται σε όλα τα ζευγάρια γονέων που επιλέγουμε για αναπαραγωγή. Γίνεται μία τυχαία επιλογή, με την πιθανότητα διασταύρωσης να κυμαίνεται τυπικά ανάμεσα στο 0.2 και στο 0.8. Εάν τελικά δε γίνει διασταύρωση, τα χρωμοσώματα των γονέων μεταφέρονται αυτούσια στους απογόνους, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα σε μερικά άτομα να μεταφέρουν όλα τα γονίδια τους στην επόμενη γενιά, χωρίς καμία αλλαγή.

Ο μηχανισμός της διασταύρωσης δίνει την δυνατότητα στο Γενετικό Αλγόριθμο να αξιοποιήσει τις ήδη υπάρχουσες πιθανές λύσεις για να δημιουργήσει μία καινούργια, καλύτερη. Αποτελεί δηλαδή το κομμάτι της κατευθυνόμενης έρευνας που εκτελεί ο Γενετικός Αλγόριθμος, που βασίζεται στην αξιολόγηση των υπάρχοντων δεδομένων για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Όταν έχουμε φτάσει στην περιοχή του πεδίου λύσεων που βρίσκεται το ολικό ακρότατο, ο μηχανισμός της διασταύρωσης είναι αυτός που με την πάροδο των γενεών θα μας οδηγήσει στη βέλτιστη λύση.

- Η *μετάλλαξη (mutation)* εφαρμόζεται σε κάθε άτομο ξεχωριστά. Ο μηχανισμός αυτός εφαρμόζεται πάνω στα γονίδια του χρωμοσώματος, και τα αλλάζει σύμφωνα με κάποια μικρή πιθανότητα (τυπικά η πιθανότητα αυτή έχει τιμή από 0.001 μέχρι 0.05).

Ο μηχανισμός της μετάλλαξης βοηθά το Γενετικό Αλγόριθμο να μην εγκλωβίζεται σε κάποιο τοπικό ακρότατο, αλλά να μπορεί να κινείται σε ολόκληρο το πεδίο λύσεων. Με τη βοήθεια του μηχανισμού αυτού προσδίδεται η αναγκαία τυχειότητα στην έρευνα για τη βέλτιστη λύση, που μας εξασφαλίζει ότι, ανεξάρτητα από την αρχικοποίηση ο Γενετικός Αλγόριθμος θα συγκλίνει στη βέλτιστη λύση.

### 3.2.5 Σύγκλιση

Καθώς ο Γενετικός Αλγόριθμος προχωρά, ολόκληρος ο πληθυσμός θα εξελίσσεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το μέσο και το καλύτερο άτομο να τείνει προς τη βέλτιστη λύση. Η σύγκλιση είναι η πορεία προς την αυξανόμενη ομοιομορφία. Ένα άτομο θεωρούμε ότι έχει συγκλίνει όταν στο 95% του πληθυσμού έχει την ίδια τιμή, ενώ θεωρούμε ότι η μέθοδος έχει συγκλίνει γενικά όταν όλα τα άτομα του πληθυσμού έχουν συγκλίνει.

### 3.3 Διαφορές γενετικών αλγορίθμων από τις παραδοσιακές μεθόδους βελτιστοποίησης

Οι γενετικοί αλγόριθμοι διαφέρουν από τις άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης σε τέσσερα σημεία.

1. Οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν με κωδικοποίηση των μεταβλητών απόφασης και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές.
2. Οι γενετικοί αλγόριθμοι αναζητούν ένα πλήθος σημείων και όχι ένα μεμονωμένο σημείο. Σε πολλές μεθόδους βελτιστοποίησης κινούμαστε από ένα μεμονωμένο σημείο του χώρου πολιτικής στο επόμενο χρησιμοποιώντας ένα κανόνα μετάβασης για τον καθορισμό του επόμενου αυτού σημείου. Αυτή η από σημείο σε σημείο μέθοδος είναι επικίνδυνη γιατί μπορεί να εγκλωβίσει τον αλγόριθμο γύρω από ένα τοπικό μέγιστο του χώρου πολιτικής. Αντίθετα οι Γενετικοί Αλγόριθμοι κινούνται σε ένα πλήθος σημείων ταυτόχρονα, βρίσκοντας πολλά τοπικά μέγιστα συγχρόνως. Έτσι η πιθανότητα εύρεσης μιας λανθασμένης κορυφής μειώνεται σε σχέση με τις μεθόδους που λειτουργούν από σημείο σε σημείο.
3. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν τις πληροφορίες της αντικειμενικής συνάρτησης και όχι παραγώγους ή άλλα παράγωγα στοιχεία αυτής. Πολλές μέθοδοι αναζήτησης απαιτούν αρκετές βοηθητικές πληροφορίες για την κανονική λειτουργία τους. Για παράδειγμα οι τεχνικές βαθμίδας απαιτούν τον υπολογισμό παραγώγων για την εύρεση κάποιου ακρότατου. Άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης απαιτούν πρόσβαση σε παραμέτρους πινάκων. Αντιθέτως οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν απαιτούν τέτοιες δευτερεύουσες πληροφορίες.
4. Οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν με πιθανοτικούς και όχι ντετερμινιστικούς κανόνες. Η χρήση της πιθανότητας δε σημαίνει ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μια απλή τυχαία αναζήτηση. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν την τυχαία επιλογή σαν εργαλείο που μπορεί να οδηγήσει την αναζήτηση σε περιοχές του χώρου πολιτικής με πιθανή βελτίωση.

Συνοψίζοντας, οι τέσσερις παραπάνω διαφορές των γενετικών αλγορίθμων από άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης, συνεισφέρουν στην ευρωστία αυτών.

### 3.4 Βελτιωμένοι γενετικοί αλγόριθμοι

Ένα κύριο μειονέκτημα των Γενετικών Αλγορίθμων είναι η αργή σύγκλιση. Γι' αυτό το λόγο έγιναν πολλές διερευνήσεις του θέματος με σκοπό να επινοηθούν τεχνικές οι οποίες θα επιταχύνουν την σύγκλιση. Αποτέλεσμα των μελετών αυτών ήταν η δημιουργία των βελτιωμένων Γενετικών Αλγορίθμων οι κυριότερες διαφοροποιήσεις των οποίων παρουσιάζονται στις παρακάτω παραγράφους.

### 3.4.1 Κλιμακούμενη ικανότητα επιβίωσης των αριθμοσειρών

Σε προηγούμενη παράγραφο περιγράφηκε ο υπολογισμός της ικανότητας επιβίωσης καθώς και η σημασία της. Στους βελτιωμένους Γενετικούς Αλγορίθμους αφού υπολογιστεί κανονικά η ικανότητα επιβίωσης  $f$  κατόπιν υπολογίζεται η  $f' = f^n$  με τυπική τιμή του  $n=1.005$ . Η ύψωση της ικανότητας επιβίωσης στην δύναμη  $n$  έχει σαν αποτέλεσμα οι πιθανές μορφές που αποτελούν βέλτιστες λύσεις να έχουν ακόμα μεγαλύτερη πιθανότητα επιλογής και άρα γρηγορότερη σύγκλιση στην βέλτιστη λύση. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι η τιμή του  $n$  μπορεί να μην είναι σταθερή σε όλη την χρονική διάρκεια της διαδικασίας. Στην αρχή της διαδικασίας βελτιστοποίησης συνίσταται να χρησιμοποιείται μια μικρή τιμή ίσως και  $n=1$  ώστε να προφυλάσσεται η ποικιλία στις πρώτες γενιές. Μετά την δημιουργία κάποιων γενιών και αφού έχουν αρχίσει να ξεχωρίζουν οι χρήσιμες αριθμοσειρές η τιμή του  $n$  θα αυξάνεται ολοένα και περισσότερο ώστε να επιταχυνθεί η σύγκλιση.

### 3.4.2 Μετάλλαξη γειτονικών γονιδίων

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η μετάλλαξη γίνεται με εντελώς τυχαία μεταβολή ενός ψηφίου. Έτσι η υποσειρά 0000 μπορεί να μεταλλαχθεί στην υποσειρά 1000 η οποία είναι εντελώς διαφορετική. Οι βελτιωμένοι Γενετικοί Αλγόριθμοι καθορίζουν ότι κάθε μετάλλαξη έχει αυξημένη πιθανότητα να μεταλλάξει μια υποσειρά σε γειτονική υποσειρά π.χ. η υποσειρά 0001 μπορεί να μεταλλαχθεί μόνο σε 0000 ή 0010. Αυτό έχει σαν συνέπεια στα προχωρημένα στάδια η μετάλλαξη να μην μεταβάλλει δραματικά τα χαρακτηριστικά ικανοποιητικών μορφών και να επιταχύνεται έτσι η σύγκλιση.

### 3.4.3 Γκρίζα κωδικοποίηση

Όπως προαναφέραμε, ο μηχανισμός της μετάλλαξης χρησιμοποιείται για να προσδώσει μία τυχαιότητα στην έρευνα για την βέλτιστη λύση, αλλά επίσης, όταν έχουμε πλησιάσει αρκετά κοντά σε αυτή, να δημιουργεί και τις μικρές αλλαγές στα χρωμοσώματα έτσι ώστε να την προσεγγίσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο.

Δυστυχώς, η δεύτερη λειτουργία που περιμένουμε να εκτελεί ο μηχανισμός της μετάλλαξης μπλοκάρεται από την ίδια τη φύση της δυαδικής αναπαράστασης των παραμέτρων του προβλήματος μέσα στο Γενετικό Αλγόριθμο. Ας πάρουμε τις δυαδικές απεικονίσεις δύο συνεχόμενων ακεραίων αριθμών, που μέσω της γνωστής μετατροπής σε πραγματικούς θα αντιστοιχούν σε δύο αριθμούς, τόσο κοντά όσο η ακρίβεια με την οποία ζητάμε να παίρνουμε τα αποτελέσματα. Είναι:

$$63_{10} = 0111111_2$$

$$64_{10} = 1000000_2$$

Βλέπουμε ότι υπάρχουν περιπτώσεις που δύο συνεχόμενα βήματα στο πεδίο λύσεων για μία παράμετρο αντιστοιχούν σε τελείως διαφορετική δυαδική αναπαράσταση, τόσο διαφορετική που να είναι εξαιρετικά μικρές οι πιθανότητες μέσω του μηχανισμού της μετάλλαξης να μεταβούμε από την μία στην άλλη.

Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι να χρησιμοποιήσουμε τη γκριζα κωδικοποίηση, για την αποθήκευση των τιμών των παραμέτρων μέσα στο κάθε χρωμόσωμα [Galan et al., 1996]. Η γκριζα κωδικοποίηση αποτελεί και πάλι μία δυαδική απεικόνιση μιας πραγματικής τιμής, η οποία προκύπτει από την κανονική δυαδική απεικόνιση αν πολλαπλασιάσουμε το δυαδικό αριθμό με τον πίνακα *Gray*, που ορίζεται ως εξής:

$$G_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & . & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & . & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & . & 0 & 0 & 0 \\ . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & . & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Η διάσταση του παραπάνω τετραγωνικού πίνακα είναι ίση με το πλήθος των ψηφίων της δυαδικής αναπαράστασης.

Η ιδιότητα της γκρι κωδικοποίησης είναι ότι δύο συνεχόμενες τιμές της παραμέτρου διαφέρουν κατά ένα μόνο ψηφίο στη δυαδική τους αναπαράσταση. Πράγματι, αν πάρουμε τις δύο προηγούμενες τιμές που ελέγξαμε έχουμε:

$$63_{10} = 0111111_2 = 0100000_G$$

$$64_{10} = 1000000_2 = 1100000_G$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι οι δύο παραπάνω συνεχόμενοι αριθμοί διαφέρουν μόνο στο πρώτο τους ψηφίο. Συμπερασματικά παρατηρούμε ότι η γκρι κωδικοποίηση εξομαλύνει την δράση του μηχανισμού μετάλλαξης.

#### 3.4.4 Πραγματική κωδικοποίηση

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως η δυαδική απεικόνιση των παραμέτρων σε ένα Γενετικό Αλγόριθμο είναι αιτία προβλημάτων, τα οποία μπορούν να καθυστερήσουν, αν όχι να εμποδίσουν, την έρευνα για τη βέλτιστη λύση σε ορισμένες περιπτώσεις. Αυτό συναντάται κυρίως σε πολυδιάστατα, μεγάλης ακρίβειας προβλήματα. Για παράδειγμα, για ένα πρόβλημα 100 μεταβλητών, που κυμαίνονται στο εύρος [-500,500] και με ζητούμενη ακρίβεια 6 δεκαδικών ψηφίων, το μήκος της δυαδικής σειράς του χρωμοσώματος φτάνει τα 3000 ψηφία. Αυτό με τη σειρά του σημαίνει ότι πεδίο έρευνας είναι της τάξης του  $10^{1000}$ . Σε τέτοιες εφαρμογές η δυαδική απεικόνιση έχει πολύ φτωχά αποτελέσματα.

Το δυαδικό αλφάβητο έχει επικρατήσει στην έρευνα με Γενετικούς Αλγορίθμους. Αυτή η αναπαράσταση διευκολύνει τη θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων, και επιτρέπει την υλοποίηση των γενετικών τελεστών. Παρόλα αυτά, ο έμμεσος παραλληλισμός που παρατηρείται στη λειτουργία των Γενετικών Αλγορίθμων (λόγω της διατήρησης ενός αριθμού πιθανών λύσεων και την έρευνα ταυτόχρονα σε πολλά σημεία του πεδίου λύσεων) δεν περιορίζεται μόνο στην δυαδική αναπαράσταση. Θα μπορούσαμε λοιπόν

να πειραματιστούμε και με άλλους τρόπους κωδικοποίησης των παραμέτρων μέσα στο άτομο.

Η *πραγματική κωδικοποίηση (real coding)* είναι ένας τέτοιος τρόπος, που βρίσκει ιδιαίτερη χρησιμότητα στη βελτιστοποίηση προβλημάτων με παραμέτρους που παίρνουν τιμές σε συνεχόμενα πεδία [Michalewicz, 1999]. Αντί να χρησιμοποιούμε σειρές δυαδικών ψηφίων για την αναπαράσταση των παραμέτρων του προβλήματος, αποθηκεύουμε κατευθείαν τις πραγματικές τιμές υπό μορφή μονοδιάστατων πινάκων. Η μορφή λοιπόν του χρωμοσώματος είναι η παρακάτω:

$$x_i' = \langle v_1, v_2, \dots, v_n \rangle$$

Τα προφανή πλεονεκτήματα της πραγματικής κωδικοποίησης είναι καταρχήν ότι δεν τίθεται πλέον θέμα ακρίβειας απεικόνισης χρησιμοποιώντας μεταβλητές μονής ή διπλής ακρίβειας για την αποθήκευση της τιμής των παραμέτρων μέσα στο χρωμόσωμα, εξασφαλίζουμε ακρίβεια που θα παίρναμε μόνο αν χρησιμοποιούσαμε πολύ μεγάλο αριθμό δυαδικών ψηφίων στην κλασική υλοποίηση των Γενετικών Αλγορίθμων. Αυτό με την σειρά του θα αύξανε το ήδη μεγάλο μήκος της δυαδικής σειράς στην περίπτωση πολυδιάστατων προβλημάτων και θα επιβράδυνε περισσότερο την έρευνα. Επιπλέον, ο υπολογισμός των τιμών των παραμέτρων είναι πολύ πιο γρήγορη διαδικασία, εφόσον δεν χρειάζεται η μετατροπή από δυαδικό αριθμό σε ακέραιο και κατόπιν σε πραγματικό, ούτε γκρι κωδικοποίηση. Οι απαιτήσεις σε μνήμη RAM για την αποθήκευση του χρωμοσώματος μειώνονται επίσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι στην υλοποίηση των Γενετικών Αλγορίθμων, το δυαδικό ψηφίο καταλαμβάνει ένα, δύο ή τέσσερα bytes (ανάλογα με το αν το αποθηκεύουμε ως μεταβλητή ενός χαρακτήρα ή μία ακέραια μεταβλητή 16 ή 32 bit), και με ένα ελάχιστο πλήθος 8 δυαδικών ψηφίων ανά παράμετρο, απαραίτητο για μία στοιχειώδη ακρίβεια, ξεπερνάμε την απαίτηση σε bytes των μεταβλητών πραγματικών αριθμών. Όσο δε η απαιτούμενη ακρίβεια της δυαδικής αναπαράστασης μεγαλώνει, τόσο μεγαλύτερη γίνεται και η εξοικονόμηση μνήμης από τη χρήση της πραγματικής κωδικοποίησης. Τέλος, ιδιότητες όπως δύο σημεία που βρίσκονται κοντά στον χώρο του προβλήματος να αναπαριστώνται από σημεία επίσης κοντά είναι αυτονόητη για την πραγματική αναπαράσταση, ενώ στην περίπτωση της δυαδικής αναπαράστασης έπρεπε να εξασφαλιστεί εκ των υστέρων (με την χρήση του *Gray coding*).

Υπάρχουν και μειονεκτήματα στην πραγματική κωδικοποίηση στους Γενετικούς Αλγόριθμους, τα οποία μπορούν να παρακαμφθούν σχετικά εύκολα. Ένα από αυτά είναι ότι δεν έχει ακόμα δοθεί θεωρία αντίστοιχη με αυτή των δομικών στοιχείων και των σχημάτων για τη δυαδική απεικόνιση που να μπορεί να εγγυηθεί την σωστή λειτουργία των Γενετικών Αλγορίθμων που βασίζονται στην πραγματική απεικόνιση των παραμέτρων. Η μέχρι τώρα εμπειρία έχει δείξει ότι η πραγματική κωδικοποίηση δίνει εφάμιλλα, αν όχι καλύτερα αποτελέσματα, τουλάχιστον στα προβλήματα για τα οποία επινοήθηκε (συνεχόμενο πεδίο τιμών για τις παραμέτρους που ερευνάμε).

Η κλασική μορφή των γενετικών τελεστών δεν έχει βέβαια εφαρμογή στην περίπτωση μας, οπότε πρέπει να επινοηθεί καινούργια. Προσοχή χρειάζεται στο γεγονός ότι η δυαδική απεικόνιση εξασφάλιζε αυτόματα την αντιστοίχιση οποιασδήποτε πιθανής δυαδικής σειράς σε ένα σημείο μέσα στο πεδίο έρευνας, μέσω του τρόπου που γινόταν η μετατροπή από δυαδικό αριθμό σε ακέραιο και κατόπιν πραγματικό. Στην πραγματική απεικόνιση, πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα ούτως ώστε μετά την εφαρμογή των γενετικών τελεστών να μην προκύπτουν τιμές για τις παραμέτρους έξω από τον πεδίο που ερευνούμε.

- *Μηχανισμός διασταύρωσης*

Ο μηχανισμός της διασταύρωσης, όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, είναι το εργαλείο που έχουμε για να συνδυάσουμε δύο υπάρχουσες λύσεις με την ελπίδα να βρούμε μία καλύτερη. Επομένως, ένας απλός τρόπος να επιτύχουμε κάτι τέτοιο είναι, ανάλογα και με αυτό που γίνεται η διασταύρωση και στη δυαδική απεικόνιση, να κόβουμε τα άτομα, που στην περίπτωση μας είναι σειρές πραγματικών αριθμών, σε τυχαία σημεία, και ανακατεύουμε τα κομμάτια μεταξύ των δύο ατόμων που διασταυρώνουμε.

- *Μηχανισμός Μετάλλαξης*

Ο μηχανισμός της μετάλλαξης είναι το μέσο για την εξερεύνηση όλου του πεδίου λύσεων, λόγω της τυχειότητας που προσδίδει στην έρευνα του Γενετικού Αλγορίθμου. Επομένως, το ανάλογο της τυχαίας αλλαγής των ψηφίων στη δυαδική απεικόνιση είναι η αλλαγή της τιμής της παραμέτρου στην οποία επιδρά ο μηχανισμός της μετάλλαξης με μία τυχαία τιμή από το πεδίο τιμών της. Η *ομοιόμορφη μετάλλαξη (uniform mutation)* κάνει ακριβώς αυτό: επιδρά σε κάθε μία από τις παραμέτρους, λαμβάνοντας βέβαια υπόψη μία πιθανότητα μετάλλαξης, και στις περιπτώσεις που εφαρμόζεται αλλάζει την τιμή με μία άλλη, τυχαία από το πεδίο τιμών της συγκεκριμένης παραμέτρου.

Το πρόβλημα της ομοιόμορφης μετάλλαξης είναι ότι η ολοκληρωτική τυχειότητα με την οποία βρίσκεται η καινούργια τιμή της συνάρτησης δεν είναι επιθυμητή όσο ο πληθυσμός πλησιάζει προς τη σύγκλιση. Στη φάση αυτή, είναι πιο επιθυμητό η μετάλλαξη να αλλάζει ελάχιστα την παράμετρο, ούτως ώστε να μπορεί να γίνει μία τοπική εξερεύνηση του πεδίου λύσεων, κοντά στην περιοχή που έχουμε εντοπίσει τη βέλτιστη λύση. Η συμπεριφορά αυτή επιτυγχάνεται με την *ανομοιόμορφη μετάλλαξη (non-uniform mutation)*, με την οποία το εύρος μέσα στο οποίο μπορεί να βρίσκεται η τυχαία καινούργια τιμή της μεταβλητής δεν είναι ίσο με το αρχικό πεδίο τιμών, αλλά όσο εξελίσσεται ο πληθυσμός το εύρος αυτό μειώνεται.

### **3.5 Μαθηματικά και τεχνικά χαρακτηριστικά εξελικτικού επιλυτή**

Ο εξελικτικός επιλυτής που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση τόσο των παραμέτρων του παραμετρικού κανόνα όσο και των απολήψεων κάθε χρονικού βήματος μιας μεγάλης χρονικής περιόδου στη μη παραμετρική επίλυση είναι ένα έτοιμο πακέτο



εξελικτικού αλγορίθμου. Έχει αναπτυχθεί από τη Frontline Systems και χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες μαθηματικές και τεχνικές λεπτομέρειες:

- Χρησιμοποιεί την πραγματική απεικόνιση των παραμέτρων και όχι τη δυαδική ή κάποιον άλλο τύπο κωδικοποιημένης απεικόνισης. Χειρίζεται συνεχείς και ακέραιες μεταβλητές.
- Για τη δημιουργία της νέας γενιάς πιθανών λύσεων γίνεται χρήση του μηχανισμού διασταύρωσης (crossover), του μηχανισμού μετάλλαξης (mutation) καθώς και συνδυασμός των παραπάνω. Ειδικότερα χρησιμοποιείται η ομοιόμορφη μετάλλαξη (uniform mutation), η περιορισμένη μετάλλαξη (bounds mutation) και ο κυρτός συνδυασμός (convex combination) στη διασταύρωση. Χρησιμοποιούνται επίσης τεχνικές οι οποίες αποτελούν πνευματική ιδιοκτησία της Frontline Systems (δεν έχουν δημοσιευτεί).
- Σαν μηχανισμός επιλογής των καταλληλότερων ατόμων προς αναπαραγωγή χρησιμοποιείται η επιλογή μέσω διαγωνισμού (tournament selection). Η μέθοδος αποκλεισμού των ακατάλληλων ατόμων αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της Frontline Systems. Ο πληθυσμός κάθε γενιάς αντικαθίσταται σταδιακά από τον πληθυσμό της επόμενης.
- Ο χειρισμός των περιορισμών γίνεται βάσει ενός συνδυασμού συναρτήσεων ποινής (penalty functions) και μεθόδων αποκατάστασης των περιορισμών (constraint repair methods). Κάποιες παράμετροι του αλγορίθμου επιλέγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης.

## 4. Εφαρμογή

### 4.1 Εισαγωγή - Γενική μεθοδολογία

Για τη μελέτη των διαφόρων συστημάτων ταμιευτήρων της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης, με βάση το οποίο καταστρώθηκαν και επιλύθηκαν οι ακόλουθες τρεις ομάδες προβλημάτων:

1. εκτιμήθηκαν οι μέγιστες δυνατές απολήψεις του συστήματος των δύο ταμιευτήρων
2. εκτιμήθηκαν οι απολήψεις του συστήματος έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος άντλησης του νερού στους ταμιευτήρες και τέλος
3. υπολογίστηκαν οι ποσότητες παραγόμενης ενέργειας και το προκύπτον μέγιστο οικονομικό όφελος από αυτή.

Οι τρεις αυτές ομάδες προβλημάτων επιλύονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη

Το μοντέλο προσομοιώνει συνολικά ένα υποθετικό υδροσύστημα το οποίο αποτελείται από:

1. Δύο υδρολογικές λεκάνες επιφάνειας 500 και 600 km<sup>2</sup>
2. Δύο ταμιευτήρες με ωφέλιμες χωρητικότητες είτε 150 και 300 hm<sup>3</sup> (σύστημα Α), είτε 150 και 253,2 hm<sup>3</sup> (σύστημα Β) – (βλ. και εδάφιο 4.8)

Το μοντέλο συμπεριλαμβάνει στην προσομοίωση είτε την ικανοποίηση των καταναλωτικών χρήσεων, οι οποίες αφορούν στην παροχή αρδευτικού νερού και νερού ύδρευσης και τα κόστη μεταφοράς τους (ομάδα προβλημάτων 1 και 2) είτε την παραγωγή ενέργειας θεωρώντας ανά ένα Υ/Η σταθμό σε κάθε ταμιευτήρα (ομάδα προβλημάτων 3) .

Για την υδρολογική προσομοίωση αμελήσαμε τη βροχόπτωση και την εξάτμιση από την επιφάνεια του ταμιευτήρα και μοντελοποιήσαμε μόνο τη μέση μηνιαία εισροή στον ταμιευτήρα. Το μέγεθος της καθαρής εισροής εισάγεται ως ισοδύναμο ύψος (mm) και ακολουθεί η αναγωγή του σε όγκο (hm<sup>3</sup>) παίρνοντας υπόψη την έκταση κάθε υδρολογικής λεκάνης. Η μηνιαία κατανομή των εισροών σε κάθε ταμιευτήρα φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 1** Μηνιαία κατανομή των εισροών (%).

Μήνας	a/a	Μέση εισροή <sup>a</sup>	
		Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Νοε	1	2.2	2.7
Δεκ	2	8.2	8.2
Ιαν	3	22.0	21.0
Φεβ	4	25.3	24.0
Μαρ	5	20.2	19.3

Απρ	6	10.3	10.2
Μαι	7	5.2	5.4
Ιουν	8	2.6	3.0
Ιουλ	9	1.3	1.8
Αυγ	10	0.6	1.2
Σεπ	11	0.3	0.9
Οκτ	12	1.8	2.3
Έτος		100.0	100.0

<sup>a</sup> Η μέση ετήσια εισροή που εκφράζεται σε ισοδύναμο ύψος νερού λαμβάνεται ίση με 225.0 mm και 316.5 mm για τη λεκάνη απορροής των ταμιευτήρων 1 και 2, αντίστοιχα.

Η περίοδος μελέτης περιλαμβάνει 50 υδρολογικά έτη για επιλύσεις που αφορούν την άρδευση και 16 υδρολογικά έτη για επιλύσεις που αφορούν την ύδρευση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η γενική μεθοδολογία του μοντέλου που στηρίζεται στον παραμετρικό κανόνα περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Εισαγωγή των αρχικών τιμών των λειτουργικών συντελεστών  $a_i$  και  $b_i$ , οι οποίοι αποτελούν τις άγνωστες παραμέτρους του συστήματος και τελικώς εκτιμώνται μέσω βελτιστοποίησης.
2. Λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος ταμιευτήρων με ικανοποίηση όλων των φυσικών και των εσωτερικών λειτουργικών περιορισμών του. Σε αυτό ενσωματώνεται μια διαδικασία παραγωγής συνθετικών χρονοσειρών εισροών. Τελικός στόχος της προσομοίωσης είναι ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης της οποίας και θα ακολουθήσει η βελτιστοποίηση.
3. Διαδικασία βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό των  $a_i$  και  $b_i$ .

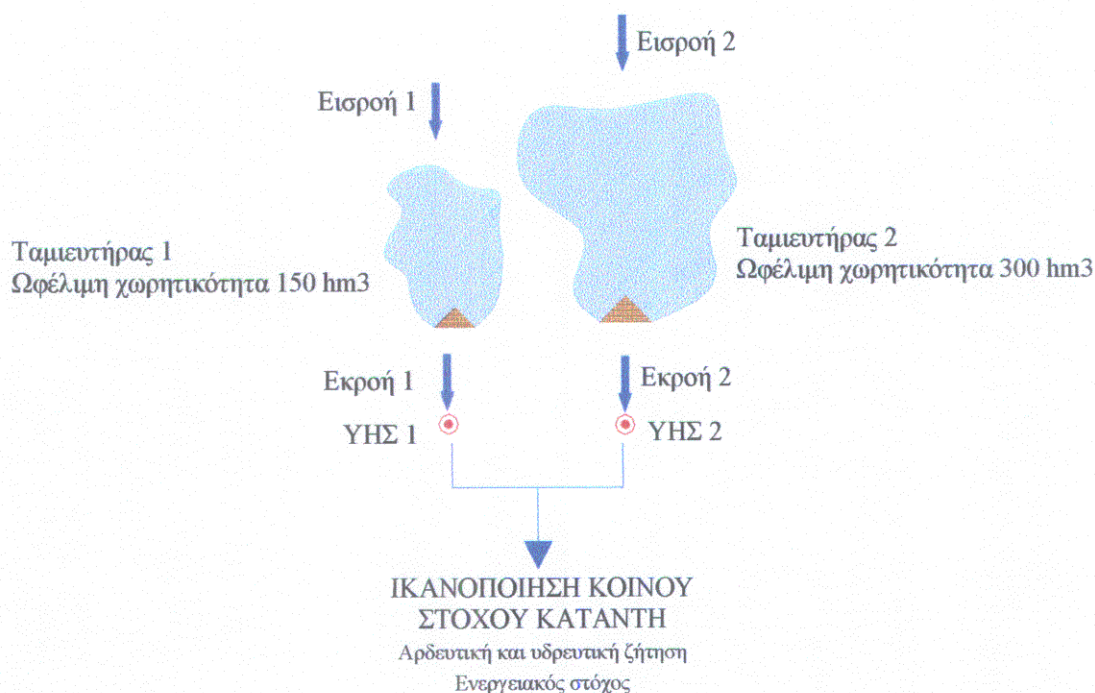
Η γενική μεθοδολογία του μοντέλου που στηρίζεται στην άμεση, μη παραμετρική βελτιστοποίηση του συνόλου των απολήψεων περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Κατασκευή της αντικειμενικής συνάρτησης και όλων των φυσικών και των εσωτερικών λειτουργικών περιορισμών του.
2. Βελτιστοποίηση ως προς τις απολήψεις του συστήματος (οι οποίες συνδέονται με το ενεργειακό οικονομικό όφελος, την αρδευτική απόληψη, την υδρευτική απόληψη και το κόστος διαχείρισης του νερού) σε τρόπο ώστε να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι εξωτερικοί λειτουργικοί περιορισμοί του.

Η γενική μεθοδολογία που ακολουθείται αναλύεται στις επόμενες ενότητες.

## 4.2 Δυναμική συστήματος

Εξετάζουμε το σύστημα των δύο ταμιευτήρων, το οποίο τροφοδοτείται από φυσικές εισροές και τροφοδοτεί μια σειρά από χρήσεις νερού. Από κάθε ταμιευτήρα γίνεται απόληψη νερού για την ικανοποίηση ενός κοινού στόχου κατάντη, ίσου με τη συνολική ζήτηση  $D$  του συστήματος. Για το υπό μελέτη σύστημα έχουμε τριών ειδών εκροές (μία για κάθε πρόβλημα): εκροή για ύδρευση, εκροή για άρδευση και εκροή προς κατάντη υδροηλεκτρικό σταθμό.



Σχήμα 2

Η εξίσωση ισοζυγίου για κάθε ταμιευτήρα  $i$  σε κάθε χρονική περίοδο περιγράφεται από την εξίσωση (2.3).

Σε καθέναν από τους ταμιευτήρες του συστήματος αντιστοιχεί και διαφορετική χρονοσειρά μέσω μηνιαίων βροχοπτώσεων, καθώς και ξεχωριστή λεκάνη απορροής. Η μόνη σύνδεση που έχουν μεταξύ τους οι δύο ταμιευτήρες του συστήματος είναι η από κοινού προσπάθεια ικανοποίησης του κατάντη στόχου.

### 4.2.1 Υπόγειες διαφυγές

Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει τις απώλειες λόγω υπόγειων διαρροών των ταμιευτήρων της παρούσας εργασίας είναι της μορφής:

$$L_i = \alpha_i + \beta_i BS_i \quad (4.1)$$

όπου:

$a_i, \beta_i$  συντελεστές της εξίσωσης με αυθαίρετες τιμές, που για το σύστημα Α είναι  $\alpha_1 = 1, \beta_1 = 0,01$  για τον πρώτο ταμιευτήρα και  $\alpha_2 = 0, \beta_2 = 0$  για το δεύτερο ταμιευτήρα (ο δεύτερος ταμιευτήρας θεωρήθηκε ότι δεν έχει απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών). Αντίστοιχα για το σύστημα Β είναι  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{IT} = 0$  και  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_{IE} = 0,01$

$BS_i$  ωφέλιμο απόθεμα του ταμιευτήρα στο τέλος του προηγούμενου χρονικού βήματος.

#### 4.2.2 Περιορισμοί

Τα μεγέθη της εξίσωσης (2.3) υπόκεινται σε μια σειρά φυσικών περιορισμών που διατυπώνονται ως εξής:

- Απόθεμα

$$0 \leq S_i \leq K_i \quad (4.2)$$

όπου  $K_i$  είναι η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα. Το φυσικό κατώτατο όριο του αποθέματος στον ταμιευτήρα είναι το 0.

- Απολήψεις νερού:

$$R_i \geq 0 \quad (4.3)$$

υφίστανται όταν υπάρχει απόθεμα νερού στους ταμιευτήρες του συστήματος. Στην εργασία αυτή και για τις επιλύσεις που αφορούν την μεγιστοποίηση του ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους θεωρήθηκε ότι οι απολήψεις νερού περιορίζονται από παροχετευτικότητες του συστήματος αγωγών υδροληψίας - στροβίλων. Οι τιμές τους λήφθηκαν ίσες με  $50, 100 \text{ hm}^3 / \text{μήνα}$  και  $28, 47.264 \text{ hm}^3 / \text{μήνα}$  για τα συστήματα των ταμιευτήρων Α και Β αντίστοιχα. Η αρδευτική και υδρευτική απόληψη θεωρήθηκε ότι δεν περιορίζονται από παροχετευτικότητες αγωγών κατάντη.

- Υπερχείλιση:

$$SP_i = \max \{0, BS_i + Q_i - R_i - L_i - K_i\} \quad (4.4)$$

Εκτός από τους φυσικούς περιορισμούς υπάρχει και μια σειρά εξωτερικών περιορισμών, οι οποίοι αναλύονται στην ενότητα 4.10.

### 4.3 Γενικά χαρακτηριστικά ταμιευτήρων

Τα χαρακτηριστικά κάθε ταμιευτήρα που ενδιαφέρουν στην προσομοίωση είναι τα ακόλουθα:

1. Η καμπύλη στάθμης – ωφέλιμου αποθέματος που περιγράφεται από μια συνάρτηση της μορφής  $S_i = f_i(z_i)$ , όπου  $z_i$  η στάθμη στον  $i$  ταμιευτήρα. Η συνάρτηση  $f_i(\cdot)$  τυπικά περιγράφεται από μια ακολουθία συντεταγμένων  $(z_i, S_i)$  μέσω της οποίας είναι δυνατή η εκτίμηση του αποθέματος για οποιαδήποτε στάθμη. Στην παρούσα μελέτη

θεωρήθηκε ότι αποδίδεται από μια σχέση της μορφής  $S_i = kz_i^\lambda$ , όπου  $z_i$  η στάθμη στον  $i$  ταμιευτήρα μετρούμενη από τη στάθμη υδροληψίας και  $k$  και  $\lambda$  παράμετροι.

2. Η ελάχιστη στάθμη λειτουργίας  $z_{\min}$ , η οποία αντιστοιχεί σε μηδενικό ωφέλιμο απόθεμα  $S_i$  και η οποία, αν μετρηθεί με αφετηρία τη στάθμη υδροληψίας είναι προφανώς μηδέν.
3. Η μέγιστη (κανονική) στάθμη λειτουργίας  $z_{\max}$ , η οποία αντιστοιχεί σε μέγιστο ολικό απόθεμα  $K_i = f_i(z_{\max})$ .

#### 4.4 Γενικά χαρακτηριστικά στροβίλων

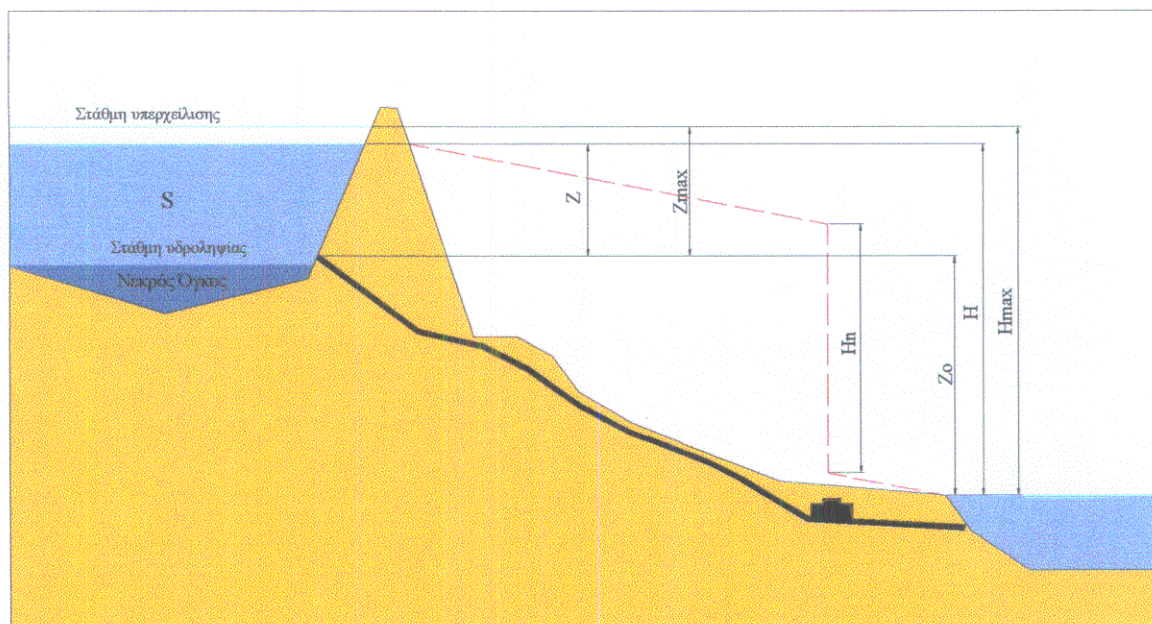
Η ποσότητα ενέργειας που παράγεται όταν ένας δεδομένος όγκος νερού  $R$  (εκροή από ταμιευτήρα) διέλθει από τους στροβίλους (τουρμπίνες) ενός σταθμού παραγωγής δίνεται από την εξίσωση [Κουτσογιάννης, 1996]

$$E = \rho g R H_n \eta \quad (4.5)$$

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

$$H_n = H - h_f - h_k \quad (4.6)$$

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 κατ' αρχήν ένα μεγάλο φάσμα παροχών για ένα δεδομένο ύψος πτώσης  $H_n$ , λόγοι λειτουργικοί και οικονομικοί οδηγούν συνήθως σε μονοσήμαντη σχέση παροχής-ύψους.



**Σχήμα 3**

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 (4.5) γράφεται

$$E = \psi R H \quad (4.7)$$

όπου  $E$  η ενέργεια σε GWh,  $R$  ο όγκος νερού σε  $\text{hm}^3$ ,  $H$  το ολικό ύψος πτώσης σε hm, και  $\psi$  η ειδική ενέργεια (= ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα ύψους πτώσης) σε  $\text{GWh} / \text{hm}^4$ , που δίνεται από τη σχέση

$$\psi = 0,2725n \frac{H_n}{H} \quad (4.8)$$

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

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από σύστημα δύο ταμιευτήρων υπολογίστηκε το πηλίκο του ενεργειακού στόχου  $E$  που τέθηκε προς ικανοποίηση, προς την εκροή από κάθε ταμιευτήρα η οποία διερχόμενη από τους στροβίλους παράγει την αντίστοιχη ποσότητα ενέργειας. Για τον υπολογισμό αυτού του πηλίκου χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη στάθμης – αποθέματος κάθε ταμιευτήρα μια

συνάρτηση της μορφής  $S_i = kz_i^\lambda$ , όπου  $z_i$  η στάθμη στον  $i$  ταμιευτήρα μετρούμενη από τη στάθμη υδροληψίας και  $k$  και  $\lambda$  παράμετροι. Για τη μέγιστη (κανονική) στάθμη λειτουργίας  $z_{imax}$ , η οποία αντιστοιχεί σε μέγιστο ολικό απόθεμα, η συνάρτηση στάθμης – αποθέματος γίνεται  $K_i = kz_{imax}^\lambda$ . Διαιρώντας κατά μέλη έχουμε:

$$\frac{S_i}{K_i} = \left( \frac{z_i}{z_{\max}} \right)^\lambda \Rightarrow z = z_{\max} \left( \frac{S_i}{K_i} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (4.9)$$

Το ύψος πτώσης που υπεισέρχεται στην εξίσωση (4.7) ισούται με  $z_i + z_0$ .

Με βάση τις σχέσεις 4.7 και 4.9 υπολογίζουμε το πηλίκο του ενεργειακού στόχου  $E$  προς την εκροή  $R_i$  από κάθε ταμιευτήρα:

$$\frac{E}{R_i} = \psi \left[ z_0 + z_{\max} \left( \frac{S_i}{K_i} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \right] \quad (4.10)$$

όπου:

$z_0$ : η υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης υδροληψίας ανάντη και της στάθμης νερού στη διώρυγα φυγής

$S_i$  το απόθεμα του ταμιευτήρα

$K_i$  η ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα

Η υδροηλεκτρική ενέργεια επιδιώκεται να παραμένει σταθερή για κάθε μήνα του έτους, αφού η σταθερή ενέργεια δηλαδή αυτή που παράγεται με σταθερό ρυθμό κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης διατίθεται με υψηλότερη τιμή μονάδας. Για την αποφυγή των υπερχειλίσεων όταν οι ταμιευτήρες είναι σχεδόν γεμάτοι, παράγεται ενέργεια σε περίσσεια σε σχέση με τη σταθερή ενέργεια σε αύξηση της εκροής από τον ταμιευτήρα. Αυτή είναι η δευτερεύουσα ενέργεια και διατίθεται σε χαμηλότερη τιμή μονάδας. Ο ταμιευτήρας υπερχειλίζει μόνο όταν η εκροή ξεπερνά την παροχτευτικότητα  $c$  ( $\text{hm}^3/\mu\eta\gamma\alpha$ ) των αγωγών κατάντη της υδροληψίας.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έχουν ληφθεί οι ακόλουθες τιμές:

Σύστημα Α ταμιευτήρας 1:  $\lambda = 3$ ,  $z_0 = 30 \text{ m}$ ,  $\psi = 0,25 \text{ GWh/hm}^3$ ,  $c = 50 \text{ hm}^3/\mu\eta\gamma\alpha$

ταμιευτήρας 2:  $\lambda = 3$ ,  $z_0 = 20 \text{ m}$ ,  $\psi = 0,25 \text{ GWh/hm}^3$ ,  $c = 100 \text{ hm}^3/\mu\eta\gamma\alpha$

Σύστημα Β ταμιευτήρας 1:  $\lambda = 3$ ,  $z_0 = 30 \text{ m}$ ,  $\psi = 0,25 \text{ GWh/hm}^3$ ,  $c = 28 \text{ hm}^3/\mu\eta\gamma\alpha$

ταμιευτήρας 2:  $\lambda = 3$ ,  $z_0 = 30 \text{ m}$ ,  $\psi = 0,25 \text{ GWh/hm}^3$ ,  $c = 47,3 \text{ hm}^3/\mu\eta\gamma\alpha$

ισοδύναμος ταμιευτήρας:  $\lambda = 3$ ,  $z_0 = 30 \text{ m}$ ,  $\psi = 0,25 \text{ GWh/hm}^3$ ,  $c = 75,3 \text{ hm}^3/\mu\eta\gamma\alpha$

## 4.5 Αρδευτικές – υδρευτικές ανάγκες

Η μηνιαία κατανομή των αρδευτικών απολήψεων (παραδοχή) φαίνεται στον παρακάτω πίνακα

**Πίνακας 2** Ποσοστιαία κατανομή αρδευτικών απολήψεων ανά μήνα



Μήνας	Ποσοστό ζήτησης, %
Απρίλιος	5.0
Μάιος	10.0
Ιούνιος	20.0
Ιούλιος	23.0
Αύγουστος	22.0
Σεπτέμβριος	15.0
Οκτώβριος	5.0
Σύνολο	100.0

Αντίστοιχα η μηνιαία κατανομή των υδρευτικών απολήψεων είναι η εξής:

**Πίνακας 3** Ποσοστιαία κατανομή υδρευτικών απολήψεων (ζήτηση Αθήνας) ανά μήνα

Μήνας	Ποσοστό ζήτησης, %
Νοέμβριος	7.7
Δεκέμβριος	7.7
Ιανουάριος	7.7
Φεβρουάριος	7.1
Μάρτιος	7.8
Απρίλιος	7.7
Μάιος	8.6
Ιούνιος	9.2
Ιούλιος	9.6
Αύγουστος	9.0
Σεπτέμβριος	9.3
Οκτώβριος	8.6
Σύνολο	100.0

## 4.6 Περιγραφή μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης παραμετροποιημένου συστήματος

### 4.6.1 Μεγιστοποίηση αρδευτικών – υδρευτικών απολήψεων, ελαχιστοποίηση κόστους άντλησης νερού στους ταμιευτήρες.

Το πρώτο βήμα στο χτίσιμο του μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος δύο ταμιευτήρων είναι η γέννηση μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών με μέγεθος διαφορετικό κάθε φορά ανάλογα με το πρόβλημα που επιλύουμε. Χρησιμοποιείται ένα απλό

πολυμεταβλητό στοχαστικό υδρολογικό μοντέλο που βασίζεται στο μοντέλο PAR(1) αλλά με μερικές απλοποιήσεις για τον περιορισμό του αριθμού των παραμέτρων. Ειδικότερα έχει γίνει η παραδοχή σταθερών σε όλους τους μήνες τιμών των συντελεστών μεταβλητότητας, ασυμμετρίας, αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης. Ειδικά σε ότι αφορά τους μηνιαίους συντελεστές μεταβλητότητας, υιοθετούνται δύο εναλλακτικές τιμές και για τους δύο ταμιευτήρες, διαμορφώνοντας έτσι δυο υδρολογικά σενάρια. Αυτά αναφέρονται σαν σενάριο υψηλής μεταβλητότητας (ΥΜ) και χαμηλής μεταβλητότητας (ΧΜ), με μηνιαίο συντελεστή μεταβλητότητας 0.50 και 0.70 αντίστοιχα

Οι γενικές είσοδοι του μοντέλου γέννησης συνθετικών χρονοσειρών είναι:

- Αριθμός θέσεων  $n$  (αριθμός ταμιευτήρων): ακέραιος αριθμός στην περίπτωσή μας ίσος με δύο (2).
- Μέσες τιμές των 12 μηνιαίων μεταβλητών του προβλήματος.
- Συντελεστής μεταβλητότητας, ένας για κάθε θέση.
- Συντελεστής ασυμμετρίας, ένας για κάθε θέση.
- Συντελεστής αυτοσυσχέτισης τάξης 1<sup>ης</sup>, ένας για κάθε θέση.
- Συντελεστές ετεροσυσχέτισης τάξης 0<sup>ης</sup>, ένας για κάθε συνδυασμό δύο θέσεων.

Οι τιμές των παραπάνω βασικών χαρακτηριστικών του μοντέλου δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 4** Βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου PAR(1) για τις εισροές στους ταμιευτήρες (παραδοχή, σταθερά για όλους τους μήνες).

	Σενάριο Χαμηλής Μεταβλητότητας		Σενάριο Υψηλής Μεταβλητότητας	
	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2	Ταμιευτήρας 1	Ταμιευτήρας 2
Συντ. μεταβλητότητας	0.5	0.5	0.7	0.7
Συντ. ασυμμετρίας	1.0	1.5	1.0	1.5
Συντ. αυτοσυσχέτισης	0.7	0.8	0.7	0.8
Συντ. ετεροσυσχέτισης	0.6		0.6	

Το μέγεθος της βροχόπτωσης εισάγεται ως ισοδύναμο ύψος (mm) και ακολουθεί η αναγωγή του σε όγκο ( $\text{hm}^3$ ) παίρνοντας υπόψη την έκταση κάθε υδρολογικής λεκάνης.

Ακολουθεί ο υπολογισμός του αποθέματος σε κάθε ταμιευτήρα για τη χρονική στιγμή  $t$  καθώς και του συνολικού ελλείμματος που παρουσιάζεται όταν οι απολήψεις από τους

ταμιευτήρες δεν ικανοποιούν τη ζήτηση. Αυτός γίνεται με εφαρμογή συνάρτησης η οποία έχει σαν ορίσματα το απόθεμα σε κάθε ταμιευτήρα τη χρονική στιγμή  $t-1$ , τις εισροές στον ταμιευτήρα τη χρονική στιγμή  $t$ , τη ζήτηση που πρέπει να ικανοποιηθεί από τις απολήψεις των ταμιευτήρων και τους λειτουργικούς συντελεστές  $a_i$  και  $b_i$ .

Στις επιλύσεις που αφορούν τη μεγιστοποίηση των αρδευτικών – υδρευτικών απολήψεων, η μέγιστη δυνατή αθροιστική ετήσια ζήτηση που μπορεί να ικανοποιήσει το σύστημα των ταμιευτήρων καθώς και οι λειτουργικοί συντελεστές  $a_i$  και  $b_i$  αποτελούν τις άγνωστες παραμέτρους του συστήματος και εκτιμώνται μέσω βελτιστοποίησης.

Στις επιλύσεις που αφορούν την ελαχιστοποίηση του αρδευτικού – υδρευτικού κόστους, η ζήτηση που καλείται να ικανοποιηθεί το σύστημα των ταμιευτήρων είναι δεδομένη και ίση με το 90% της μέγιστης δυνατής ζήτησης που έχει προηγουμένως υπολογιστεί. Οι λειτουργικοί συντελεστές  $a_i$  και  $b_i$  αποτελούν τις άγνωστες παραμέτρους του συστήματος και εκτιμώνται μέσω βελτιστοποίησης.

Μια περαιτέρω διερεύνηση σε ότι αφορά στους λειτουργικούς συντελεστές  $a_i$  και  $b_i$  οδηγεί στην επίλυση των παραπάνω προβλημάτων με τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς αυτών:

1. αρχικά χρησιμοποιούνται δύο ζεύγη των παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$  άρα οι λειτουργικοί συντελεστές προς βελτιστοποίηση είναι τέσσερις. Υπάρχει δηλαδή η δυνατότητα χρήσης διαφορετικού ζεύγους λειτουργικών συντελεστών κατά τη διάρκεια του υδρολογικού έτους. Έτσι για κάποιους μήνες τα αποθέματα κάθε ταμιευτήρα καθορίζονται βάσει του πρώτου ζεύγους παραμέτρων και για τους υπόλοιπους μήνες βάσει του δεύτερου ζεύγους παραμέτρων.
2. ακολουθεί ο κλασσικός τρόπος επίλυσης με ένα ζεύγος παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$ , δηλαδή οι λειτουργικοί συντελεστές προς βελτιστοποίηση μειώνονται στους δύο.
3. η επόμενη επίλυση έχει και αυτή δύο λειτουργικούς συντελεστές προς βελτιστοποίηση, αλλά αυτή τη φορά είναι δύο διαφορετικά  $b_i$ . Τα  $a_i$  τίθενται ίσα με μηδέν. Έτσι για κάποιους μήνες τα αποθέματα κάθε ταμιευτήρα καθορίζονται βάσει της πρώτης παραμέτρου  $b_i$  και για τους υπόλοιπους μήνες βάσει της δεύτερης παραμέτρου  $b_i$ .
4. τέλος χρησιμοποιείται μία μόνο παράμετρος  $b_i$  για τον καθορισμό των αποθεμάτων κάθε ταμιευτήρα.

Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται η προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος των δύο ταμιευτήρων. Σε κάθε προσομοιούμενη χρονική περίοδο εκτελούνται οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

- Εκτιμάται ο συνολικός όγκος  $V$  του συστήματος των δύο ταμιευτήρων σαν το άθροισμα των προηγούμενων αποθεμάτων και των καθαρών εισροών μείον τη ζήτηση που πρέπει να ικανοποιηθεί κατάντη.

- Εφαρμόζεται ο παραμετρικός κανόνας για τον καθορισμό των αποθεμάτων κάθε ταμιευτήρα.
- Καθορίζονται οι απολήψεις από κάθε ταμιευτήρα, έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα αποθέματα – στόχοι.
- Έλλειμμα προκύπτει όταν αδειάσουν και οι δύο ταμιευτήρες και ισούται με τη διαφορά μεταξύ ζήτησης και συνολικής απόληψης από το σύστημα των δύο ταμιευτήρων.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης προϋποθέτει την εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων, σε κάθε μια απ' τις οποίες εξετάζονται διαφορετικές τιμές παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$ .

#### 4.6.2 Μεγιστοποίηση οφέλους από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η εισαγωγή των εισροών – εισόδων στο μοντέλο γίνεται όπως έχει ήδη αναφερθεί. Στη συνέχεια υπολογίζονται για κάθε ταμιευτήρα οι όγκοι των εκροών και των αποθεμάτων καθώς και το ποσό της ενέργειας που παράγεται.

Οι παραπάνω υπολογισμοί εκτελούνται με εφαρμογή συνάρτησης η οποία έχει σαν ορίσματα το απόθεμα σε κάθε ταμιευτήρα τη χρονική στιγμή  $t-1$ , τις εισροές στον ταμιευτήρα τη χρονική στιγμή  $t$ , τον ενεργειακό στόχο που πρέπει να ικανοποιηθεί και τους λειτουργικούς συντελεστές  $a_i$  και  $b_i$ . Στις επιλύσεις που αφορούν τη μεγιστοποίηση του ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους, ο ενεργειακός στόχος που καλείται να ικανοποιήσει το σύστημα των ταμιευτήρων καθώς και οι λειτουργικοί συντελεστές  $a_i$  και  $b_i$  αποτελούν τις άγνωστες παραμέτρους του συστήματος και εκτιμώνται μέσω βελτιστοποίησης.

Εφαρμόζονται και εδώ οι τέσσερις διαφορετικοί συνδυασμοί των λειτουργικών συντελεστών  $a_i$  και  $b_i$  που περιγράφηκαν στην παράγραφο 4.6.1

Η σημαντική διαφορά από την προηγούμενη περίπτωση (4.6.1) είναι ότι εδώ δεν είναι γνωστή η απόληψη  $R$  σε ογκομετρικούς όρους αλλά είναι γνωστός ο στόχος παραγωγής ενέργειας  $E$  ο οποίος και πρέπει να μετατραπεί σε όγκο νερού με τη μεσολάβηση του μεγέθους  $E/R$ , το οποίο υπολογίζεται σύμφωνα με όσα εκτέθηκαν στο εδάφιο 4.4. Ο σχετικός υπολογισμός είναι αναγκαστικά επαναληπτικός.

Σε κάθε προσομοιούμενη χρονική περίοδο εκτελούνται οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

- Προσδιορίζεται η καθαρή εισροή σε κάθε ταμιευτήρα, με αφαίρεση των υπόγειων διαφυγών από τις εισροές εισόδους στο μοντέλο, καθώς και η συνολική καθαρή εισροή στο σύστημα των δύο ταμιευτήρων.
- Ξεκινώντας από μια αρχική τιμή για τη συνολική απόληψη από το σύστημα των δύο ταμιευτήρων υπολογίζουμε το συνολικό απόθεμα το οποίο ισούται με το άθροισμα των προηγούμενων αποθεμάτων του συστήματος και της συνολικής καθαρής εισροής μείον την αρχική τιμή της συνολικής απόληψης.
- Το συνολικό αυτό απόθεμα κατανέμεται στους ταμιευτήρες βάσει του παραμετρικού κανόνα. Στη συνέχεια υπολογίζεται η απόληψη από κάθε ταμιευτήρα και βάσει αυτής η ενέργεια που παράγεται. Στο εδάφιο (4.4) παρουσιάζεται ειδικότερα ο τρόπος

υπολογισμού της ενέργειας από την απόληψη νερού από ταμιευτήρα. Ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία σύγκλισης μέχρι που τελικά η παραγόμενη ενέργεια να γίνει ίση με τον ενεργειακό στόχο, εφόσον αυτό είναι φυσικά δυνατό (δηλ. εφόσον δεν αδειάζουν οι ταμιευτήρες). Παράλληλα σε αυτή τη διαδικασία εξασφαλίζεται η ισότητα του κατανεμημένου βάσει του παραμετρικού κανόνα αποθέματος κάθε ταμιευτήρα με το απόθεμα που υπολογίζεται ως το άθροισμα του προηγούμενου αποθέματος και της καθαρής εισροής μείον την απόληψη από τον εν λόγω ταμιευτήρα.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης προϋποθέτει την εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων, σε κάθε μια απ' τις οποίες εξετάζονται διαφορετικές τιμές παραμέτρων  $a_i$  και  $b_i$ .

## **4.7 Περιγραφή λειτουργικών περιορισμών και βελτιστοποίησης του συνόλου των απολήψεων (μη παραμετρική προσέγγιση)**

### **4.7.1 Μεγιστοποίηση αρδευτικών – υδρευτικών απολήψεων, ελαχιστοποίηση κόστους άντλησης νερού στους ταμιευτήρες.**

Η λειτουργία του συστήματος των δύο ταμιευτήρων στην περίπτωση που η βελτιστοποίηση αφορά το σύνολο των απολήψεων (ως μεταβλητών απόφασης), έχει εντελώς διαφορετική δομή από αυτή του παραμετροποιημένου συστήματος.

Οι είσοδοι του μοντέλου είναι οι μηνιαίες συνθετικές χρονοσειρές οι οποίες είναι ήδη γνωστές από το στοχαστικό μοντέλο και ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης με παραμετροποιημένο κανόνα λειτουργίας.

Ξεκινάμε θεωρώντας γνωστά τα αποθέματα στους δύο ταμιευτήρες κατά τη χρονική στιγμή  $t_0$ . Στην επόμενη χρονική στιγμή  $t_1$  και με βάση τα αποθέματα του προηγούμενου χρονικού βήματος, υπολογίζονται οι υπόγειες διαφυγές των ταμιευτήρων.

Στη συνέχεια και για μια αρχική τιμή της μέσης ετήσιας ζήτησης, εκτιμάται η μέση μηνιαία απαίτηση σε αρδευτικό νερό ή σε νερό ύδρευσης σαν ποσοστό επί της μέσης ετήσιας ζήτησης. Οι στόχοι απόληξης σε κάθε χρονικό βήμα από τον πρώτο ταμιευτήρα είναι οι προς βελτιστοποίηση μεταβλητές απόφασης. Οι στόχοι απόληξης από το δεύτερο ταμιευτήρα δίνονται σαν η διαφορά μεταξύ της μέσης μηνιαίας ζήτησης και του αντίστοιχου στόχου απόληξης από τον πρώτο ταμιευτήρα.

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης δεν αντιπροσωπεύουν πάντα τις εφικτές απολήψεις. Αυτό συμβαίνει όταν το απόθεμα του προηγούμενου χρονικού βήματος και ο όγκος των εισροών στον ταμιευτήρα μείον τον όγκο των υπόγειων διαφυγών είναι μικρότερος του στόχου απόληξης από τον εν λόγω ταμιευτήρα. Για τον υπολογισμό της πραγματικής – εφικτής απόληξης από κάθε ταμιευτήρα εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικά σκεπτικά. Σύμφωνα με το πρώτο, κάθε ταμιευτήρας στοχεύει στο να ικανοποιήσει το στόχο απόληξής του και μόνο, που προκύπτει μετά το τέλος της βελτιστοποίησης. Δεν υπάρχει

δηλαδή αλληλοσυσχέτιση των δύο ταμιευτήρων. Έτσι είναι πιθανό να εμφανιστεί έλλειμμα στο σύστημα ενώ υπάρχει ακόμη απόθεμα σε έναν από τους δύο ταμιευτήρες. Εδώ η επιλογή αφήνεται στο γενετικό αλγόριθμο ο οποίος σε αυτή την περίπτωση αποφασίζει ότι είναι προτιμότερο να παρουσιαστεί έλλειμμα στο σύστημα, παρά τη δυνατότητα αποφυγής του, με σκοπό να αποφευχθούν δυσμενέστερες καταστάσεις σε επόμενα χρονικά βήματα. Σύμφωνα με το δεύτερο σκεπτικό, επιβάλλεται η κάλυψη του ελλείμματος που ενδεχομένως να παρουσιαστεί στον πρώτο ταμιευτήρα. Στην περίπτωση αυτή η διαφορά μεταξύ στόχου και εφικτής – πραγματικής απόληψης καλύπτεται από το δεύτερο ταμιευτήρα. Εάν και ο δεύτερος ταμιευτήρας δεν μπορεί να καλύψει τη διαφορά που παρουσιάζεται στον πρώτο ταμιευτήρα ή το δικό του στόχο απόληψης τότε παρουσιάζεται έλλειμμα στο σύστημα. Ο όγκος του ελλείμματος υπολογίζεται επακριβώς και παρατίθεται στην αντίστοιχη χρονοσειρά.

Τέλος υπολογίζεται ο όγκος της υπερχείλισης κάθε ταμιευτήρα. Υπερχείλιση παρουσιάζεται όταν ο όγκος του αποθέματος του ταμιευτήρα και οι εισροές σε αυτόν μείνουν τους όγκους της απόληψης και των υπόγειων διαφυγών ξεπερνούν την ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα.

#### 4.7.2 Μεγιστοποίηση οφέλους από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Οι είσοδοι του μοντέλου είναι οι μηνιαίες συνθετικές χρονοσειρές οι οποίες είναι ήδη γνωστές από το μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του παραμετροποιημένου συστήματος.

Τίθενται τυχαίες σε πρώτη προσέγγιση τιμές της εκροής από καθέναν από τους δύο ταμιευτήρες του συστήματος.

Η ενέργεια που παράγεται από την εκροή που διέρχεται από τους στροβίλους του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κάθε ταμιευτήρα υπολογίζεται σαν το γινόμενο της εκροής από τον ταμιευτήρα επί το ηλίκιο ενεργειακού στόχου προς απόληψη. Αυτό έχει υπολογιστεί βάσει των χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα και της καμπύλης στάθμης – αποθέματος, η οποία περιγράφεται από μια συνάρτηση της μορφής  $S_i = kz_i^\lambda$ , όπου  $z_i$  η στάθμη στον  $i$  ταμιευτήρα.

Το απόθεμα σε κάθε ταμιευτήρα υπολογίζεται σαν το άθροισμα του προηγούμενου αποθέματος και της εισροής μείον την εκροή και τις υπόγειες διαφυγές.

Τέλος υπολογίζεται ο όγκος της υπερχείλισης κάθε ταμιευτήρα. Υπερχείλιση παρουσιάζεται όταν ο όγκος του αποθέματος του ταμιευτήρα και οι εισροές σε αυτόν μείνουν τους όγκους της απόληψης και των υπόγειων διαφυγών ξεπερνούν την ωφέλιμη χωρητικότητα του ταμιευτήρα, και με την προϋπόθεση ότι η απόληψη κάλυψε την παροχτετευτικότητα του συστήματος αγωγού υδροληψίας – στροβίλων.

Η βελτιστοποίηση αφορά το σύνολο των μεταβλητών απόφασης δηλαδή το σύνολο των εκροών από κάθε ταμιευτήρα. Επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του ενεργειακού

(οικονομικού) οφέλους. Η παραγωγή ενέργειας επιτυγχάνεται με την παροχέτευση της κατάλληλης ποσότητας νερού από το σύστημα των δύο ταμιευτήρων σε κάθε χρονικό βήμα. Ο στόχος παραγωγής ενέργειας είναι σταθερός για όλα τα χρονικά βήματα, αλλά οι απαιτούμενες ποσότητες νερού μεταβάλλονται δυναμικά, ανάλογα με τις στάθμες ανάντη και κατόντη του υδροηλεκτρικού σταθμού.

Η παραγόμενη ενέργεια διακρίνεται σε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα. Η πρωτεύουσα ενέργεια είναι η ποσότητα που μπορεί να παράγεται χωρίς καμιά διακοπή, ή με πολύ μικρή διακοπή\*, στο σύνολο της περιόδου λειτουργίας του συστήματος (Mays and Tung, 1992, σ. 283). Στην παρούσα μελέτη, πρωτεύουσα ενέργεια θεωρείται αυτή που είναι διαθέσιμη στο 97% του χρόνου. Η ενέργεια που παράγεται επιπλέον της πρωτεύουσας ενέργειας (π.χ. κατά τις περιόδους πολύ μεγάλων εισροών, οι οποίες υπερβαίνουν τη ρυθμιστική ικανότητα του ταμιευτήρα) είναι δευτερεύουσα ενέργεια. Η πρωτεύουσα ενέργεια έχει μεγαλύτερη αξία από τη δευτερεύουσα, δεδομένου ότι (α) είναι προβλέψιμη (με υψηλή αξιοπιστία πρόβλεψης), (β) είναι συνεχώς διαθέσιμη, και (γ) μπορεί να είναι ενέργεια αιχμής.

#### 4.8 Επίλυση με τη μέθοδο του Ισοδύναμου Ταμιευτήρα

Θα μπορούσε κάποιος να υποστηρίξει ότι αν ο αριθμός των μεταβλητών ελέγχου αυξηθεί πολύ στη μη παραμετρική βελτιστοποίηση, θα γίνει πολύ δύσκολος ο εντοπισμός των βέλτιστων τιμών ακόμα και με τη χρήση εξελικτικών αλγορίθμων. Για αυτό επινοήσαμε και χρησιμοποιήσαμε σαν ένα επιπρόσθετο μέσο σύγκρισης μια προσεγγιστική μέθοδο που ονομάσαμε μέθοδο του ισοδύναμου ταμιευτήρα, η οποία έχει μόνο μία μεταβλητή ελέγχου. Σε αυτή τη μέθοδο, η οποία εφαρμόζεται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που θα αναλυθούν στη συνέχεια, το σύστημα ταμιευτήρων αντικαθίσταται από έναν υποθετικό ταμιευτήρα με χαρακτηριστικά τα οποία κατά κάποιο τρόπο συγχωνεύουν αυτά των διαφορετικών ταμιευτήρων του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο απλοποιούμε δραστικά το πρόβλημα κάνοντάς το μονοδιάστατο και αποφεύγοντας την παραμετροποίηση αφού ο μεμονωμένος ταμιευτήρας δεν περιέχει βαθμούς ελευθερίας. Το αρχικό σκεπτικό πίσω από την προσέγγιση του ισοδύναμου ταμιευτήρα είναι ότι ένας μεμονωμένος ταμιευτήρας που συγχωνεύει τα χαρακτηριστικά ενός πλήρους συστήματος θα επιδείκνυε πιθανότητα καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με ένα σύστημα ξεχωριστών ταμιευτήρων. Για παράδειγμα, θα ήταν ίσως χειρότερο να αποθηκευτεί νερό σε δύο ξεχωριστούς ταμιευτήρες παρά σε έναν του οποίου η αποθηκευτική ικανότητα θα ισούνταν με το άθροισμα των επιμέρους αποθηκευτικών ικανοτήτων των ξεχωριστών ταμιευτήρων, γιατί στην περίπτωση του ενός ταμιευτήρα η πιθανότητα υπερχειλίσεως είναι μικρότερη από αυτή που υπάρχει για τους δύο ταμιευτήρες. Αν αυτό είναι αλήθεια τότε η απόδοση του μεμονωμένου ισοδύναμου

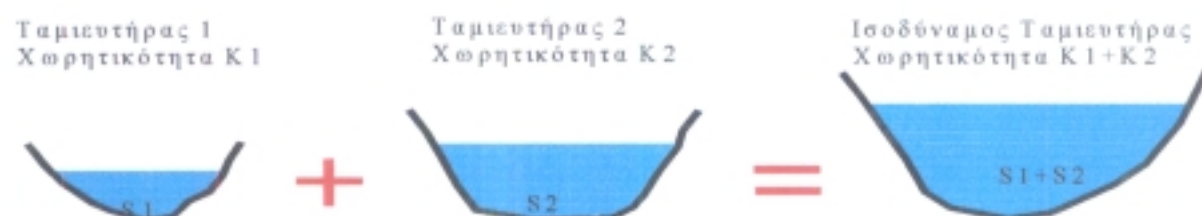
---

\* Ως διακοπή νοείται αυτή που αναφέρεται στη διαθεσιμότητα αποθεμάτων και όχι αυτή που σχετίζεται με λειτουργικές ανάγκες και συνθήκες του συστήματος παραγωγής ενέργειας. Κατά συνέπεια η διακοπή αναφέρεται σε κλίμακα μεγαλύτερη της ημερήσιας, π.χ. μηνιαία, και όχι σε ωριαία ή μικρότερη.

ταμειυτήρα θα είναι ένα άνω όριο της απόδοσης του συστήματος και είναι πραγματικά ενδιαφέρον να γνωρίζουμε αυτό το άνω όριο. Επιπλέον είναι κάτι απλό να υπολογιστεί αυτό με ακρίβεια χάρη στην απλότητα του προβλήματος (μονοδιάστατο πρόβλημα). Όμως, όπως θα δούμε και πιο κάτω, ότι όσα προαναφέραμε δεν είναι ακριβώς έτσι, αφού το σύστημα των ξεχωριστών ταμειυτήρων προσφέρει κάποιους βαθμούς ελευθερίας, των οποίων η αξιοποίηση μπορεί να αυξήσει την απόδοση του συστήματος. Αν και η απόδοση του μεμονωμένου ισοδύναμου ταμειυτήρα δεν είναι ένα άνω όριο του συστήματος, μας παρέχει ένα καλό και εύκολα υπολογίσιμο μέσο σύγκρισης.

Η μέθοδος του ισοδύναμου ταμειυτήρα έχει νόημα να εφαρμοστεί μόνο κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις που αφορούν στα χαρακτηριστικά του συστήματος ταμειυτήρων. Συγκεκριμένα θα μπορούσε να θεωρηθεί επιτρεπτή η 'ένωση' των δύο ταμειυτήρων σε ένα αν οι συνθήκες εισροής – αποθήκευσης νερού σε καθέναν από τους δύο είναι παρόμοιες. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβαίνει εφόσον εκπληρώνονται τα ακόλουθα:

α) οι ωφέλιμες χωρητικότητες των ταμειυτήρων είναι ανάλογες των καθαρών εισροών τους. Στην εφαρμογή μας η ωφέλιμη χωρητικότητα του ισοδύναμου ταμειυτήρα ισούται με το άθροισμα των χωρητικότητων των επιμέρους ταμειυτήρων.



**Σχήμα 4**

β) οι εξισώσεις που διέπουν τις υπόγειες διαφυγές έχουν τους ίδιους σταθερούς συντελεστές, έτσι ώστε για δεδομένο συνολικό όγκο αποθήκευσης, οι ολικές απώλειες να είναι ανεξάρτητες από τον ταμειυτήρα στον οποίο γίνεται η αποθήκευση. Στην εφαρμογή μας οι συντελεστές των υπόγειων διαφυγών έχουν τις τιμές:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{IT} = 0$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_{IT} = 0,01$$

γ) οι εξισώσεις στάθμης – όγκου των ταμειυτήρων είναι της ίδιας μορφής και έχουν τους ίδιους σταθερούς συντελεστές. Το ίδιο συμβαίνει για τις σταθερές του συστήματος αγωγού υδροληψίας – στροβίλων, σε τρόπο ώστε όταν οι στάθμες στους επιμέρους



ταμειυτήρες είναι ίδιες, οι παραγόμενες ενέργειες ανά μονάδα διερχόμενου όγκου νερού να είναι επίσης ίδιες. Για την εφαρμογή μας έχουμε:

$$\Psi_1 = \Psi_2 = \Psi_{IT}$$

$$z_{o1} = z_{o2} = z_{oIT}$$

$$z_{\max 1} = z_{\max 2} = z_{\max IT}$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_{IT}$$

Οι προϋποθέσεις αυτές ισχύουν για τον τύπο συστήματος 2 (χωρητικότητες 150 και 253.2 hm<sup>3</sup>).

Τα μεγέθη που επιθυμούμε να προσεγγίσουμε, είναι η μέγιστη δυνατή μέση ετήσια αρδευτική και υδρευτική απόληψη καθώς και ο ενεργειακός στόχος ο οποίος οδηγεί στη μεγιστοποίηση του ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους.

Είναι φανερό ότι η συγκεκριμένη εφαρμογή εφόσον καθοριστεί ο στόχος απόληξης ή ο ενεργειακός στόχος δεν παρουσιάζει βαθμούς ελευθερίας, άρα και δυνατότητα βέλτιστων επιλογών, αφού το σύστημα ταμειυτήρων ανάγεται σε ένα μοναδικό ταμειυτήρα και έτσι η μελέτη του απλοποιείται σημαντικά. Στόχος της εν λόγω εφαρμογής είναι η θέσπιση ενός απόλυτου μέτρου σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν κατά τη βελτιστοποίηση λειτουργίας του συστήματος ταμειυτήρων. Έτσι θα μπορούμε να ελέγξουμε αν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης λειτουργίας του συστήματος ταμειυτήρων είναι όντως πάρα πολύ κοντά σε αυτά του ιδεατού ταμειυτήρα, οπότε η λύση μας δεν θα μπορούσε να είναι πολύ καλύτερη από αυτή που ήδη έχουμε επιτύχει.

#### 4.9 Κατάστρωση της αντικειμενικής συνάρτησης

Στις επιλύσεις που αφορούν την απόληξη αρδευτικού νερού ή νερού ύδρευσης επιδιώκεται η ικανοποίηση της αρδευτικής ή υδρευτικής ανάγκης του συγκεκριμένου χρονικού βήματος. Με δεδομένη αξιοπιστία επιδιώκεται η κάλυψη της ζήτησης με όσο το δυνατό μικρότερο έλλειμμα και όσο το δυνατό μεγαλύτερα αποθέματα. Έτσι η αντικειμενική συνάρτηση καθορίζεται από τα παραπάνω και είναι η εξής: ‘μεγαλύτερη δυνατή ζήτηση - ανηγμένο έλλειμμα + ανηγμένη διαφορά αποθέματος στην αρχή και στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης’. Η κατανομή του στόχου απόληξης σε κάθε χρονικό βήμα είναι προκαθορισμένη από τις ανάγκες άρδευσης ή ύδρευσης.

Στις επιλύσεις που αφορούν στο κόστος άρδευσης ή ύδρευσης επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση αυτού. Χρησιμοποιούμε το 90% της μέγιστης ποσότητας αρδευτικού νερού ή του νερού ύδρευσης που έχει υπολογιστεί ότι μπορεί να προσφερθεί από το σύστημα των δύο ταμειυτήρων από τις προηγούμενες επιλύσεις. Για να υπάρχει ‘ανταγωνισμός’ μεταξύ των δύο ταμειυτήρων θέτουμε τιμή μονάδας κόστους στον ταμειυτήρα με τις μεγαλύτερες διαρροές μεγαλύτερη από την τιμή μονάδας κόστους στον ταμειυτήρα με τις μικρότερες διαρροές. Τα οικονομικά δεδομένα (τιμές μονάδας) που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή, προκειμένου να μορφωθεί και να βελτιστοποιηθεί ο δείκτης επίδοσης του συστήματος,

είναι υποθετικά και συγκεκριμένα ίσα με μία νομισματική μονάδα για τον πρώτο ταμιευτήρα και με μισή νομισματική μονάδα για τον δεύτερο ταμιευτήρα.

Το μέσο ετήσιο κόστος παροχής αρδευτικού νερού και νερού ύδρευσης του υδροσυστήματος είναι

$$c_1 V_1 + c_2 V_2 \quad (4.11)$$

όπου  $c_1$  και  $c_2$  το μοναδιαίο κόστος παροχής αρδευτικού νερού ή νερού ύδρευσης στους ταμιευτήρες 1 και 2 αντίστοιχα και  $V_1$  και  $V_2$  ο μέσος ετήσιος όγκος αρδευτικού νερού ή νερού ύδρευσης που παρέχεται από τους ταμιευτήρες 1 και 2 αντίστοιχα.

Στις επιλύσεις που αφορούν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του οφέλους που προκύπτει από την παραγωγή της, θεωρώντας ότι η πρωτεύουσα ενέργεια επιφέρει κέρδη διπλάσια της δευτερεύουσας.

Λόγω των διαφορετικών αξιών της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας ενέργειας το συνολικό μέσο ετήσιο όφελος από την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι

$$c_{\Pi} E_{\Pi} + c_{\Delta} E_{\Delta} \quad (4.12)$$

όπου  $c_{\Pi}$  και  $c_{\Delta}$  η μοναδιαία αξία της πρωτεύουσας ενέργειας, της δευτερεύουσας ενέργειας, αντίστοιχα,  $E_{\Pi}$  και  $E_{\Delta}$  η μέση ετήσια πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ενέργεια στο υδροσύστημα, αντίστοιχα.

Η μέση ετήσια ποσότητα συνολικής ενέργειας  $E$  του συστήματος των δύο ταμιευτήρων υπολογίζεται άμεσα από την αντίστοιχη χρονοσειρά. Η πρωτεύουσα ενέργεια  $E_{\Pi}$  προκύπτει επίσης από την αντίστοιχη χρονοσειρά και, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα (4.7.2) είναι αυτή που είναι διαθέσιμη στο 97% του χρόνου. Τέλος, η δευτερεύουσα ενέργεια προκύπτει ως η διαφορά συνολικής και πρωτεύουσας, ήτοι

$$E_{\Delta} = E - E_{\Pi} \quad (4.13)$$

#### 4.10 Εξωτερικοί περιορισμοί

Ήδη στην ενότητα 4.2.2 έχουν δοθεί οι φυσικοί περιορισμοί του συστήματος. Στην περίπτωση του παραμετροποιημένου συστήματος οι εν λόγω περιορισμοί ενσωματώνονται στο μοντέλο προσομοίωσης, το οποίο αναλαμβάνει την τήρησή τους. Για το λόγο αυτό τους ονομάζουμε εσωτερικούς περιορισμούς. Ωστόσο, υπάρχουν και ορισμένου άλλου λειτουργικοί περιορισμοί, η τήρηση των οποίων δεν μπορεί να ενσωματωθεί στην προσομοίωση, αλλά ελέγχεται εκ των υστέρων, αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση. Αυτοί οι περιορισμοί, που τους ονομάζουμε εξωτερικούς, αφορούν στην αξιοπιστία του συστήματος και τυχόν άλλα συνολικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του συστήματος.

Οι ίδιοι περιορισμοί ισχύουν φυσικά και για την περίπτωση της μη παραμετρικής επίλυσης, όπου εδώ προστίθενται στους υπόλοιπους περιορισμούς και ο χειρισμός τους

γίνεται κατά τον ίδιο τρόπο (δεν υπάρχει διάκριση εσωτερικών και εξωτερικών περιορισμών).

Η αξιοπιστία του συστήματος ως προς την κάλυψη ενός δεδομένου στόχου ορίζεται με διάφορους τρόπους. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο ορισμό

$$\alpha_T = P(R_T = D_T) \quad (4.14)$$

όπου  $\alpha_T$  το επίπεδο αξιοπιστίας σε ετήσια βάση,  $R_T$  η πραγματική απόληψη (θεωρούμενη ως τυχαία μεταβλητή) στην περίοδο  $T = 1$  έτος και  $D_T$  η ζήτηση στην ίδια περίοδο, ενώ με  $P(\cdot)$  συμβολίζουμε την πιθανότητα. Πρακτικά, με τον παραπάνω ορισμό η αξιοπιστία είναι ίση με την πιθανότητα κάλυψης της ζήτησης σε χρονική βάση ίση με  $T$ . Εμπειρικά η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται ως ο λόγος  $k'/k$  όπου  $k'$  είναι ο αριθμός των περιόδων στις οποίες ικανοποιείται η ζήτηση και  $k$  ο συνολικός αριθμός των περιόδων προσομοίωσης. Αντί της αξιοπιστίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η πιθανότητα αστοχίας σε ετήσια βάση, που ορίζεται ως

$$\beta_T = 1 - \alpha_T = P(R_T < D_T) \quad (4.15)$$

και εμπειρικά υπολογίζεται ως ο λόγος  $k''/k$  όπου  $k''$  είναι ο αριθμός των περιόδων στις οποίες δεν ικανοποιείται η ζήτηση και  $k$  ο συνολικός αριθμός των περιόδων προσομοίωσης.

Ο εξωτερικός περιορισμός που σχετίζεται με την αξιοπιστία διατυπώνεται ως

$$\alpha^T \geq \alpha^{*,T} \quad \text{ή} \quad \beta^T \leq \beta^{*,T} \quad (4.16)$$

όπου  $\alpha^{*,T}$  και  $\beta^{*,T}$  το αποδεκτό επίπεδο αξιοπιστίας και το αποδεκτό επίπεδο αστοχίας, αντίστοιχα.

Στην παρούσα μελέτη ο παραπάνω περιορισμός αναφέρεται στην κάλυψη των καταναλωτικών αναγκών από την απόληψη αρδευτικού νερού και νερού ύδρευσης. Τα αποδεκτά επίπεδα αξιοπιστίας τέθηκαν ίσα με 94% για την περίπτωση της αρδευτικής ζήτησης και 93.75% για την υδρευτική ζήτηση. Τα αντίστοιχα ποσοστά αστοχίας είναι 6% και 6.25% και αντιστοιχούν σε 3 αστοχίες στα 50 χρόνια για την κάλυψη της αρδευτικής ζήτησης και 1 αστοχία στα 16 χρόνια για την κάλυψη της υδρευτικής ζήτησης. Ας σημειωθεί ότι στην περίπτωση της ύδρευσης θα ήταν επιθυμητό ένα επίπεδο αξιοπιστίας μικρότερο του 6.25%, αλλά αυτό δεν είναι δυνατό στη συγκεκριμένη εφαρμογή (μία αστοχία είναι η ελάχιστη δυνατή για να έχουν νόημα οι υπολογισμοί).

Το επίπεδο αξιοπιστίας για την παραγωγή ενέργειας ορίζεται κατά παρόμοιο τρόπο και εκτιμάται από τις χρονοσειρές της παραγόμενης ενέργειας. Ορίζεται επίσης το αποδεκτό επίπεδο αξιοπιστίας (που, όπως προαναφέρθηκε στη μελέτη αυτή θεωρείται 97%). Ωστόσο, στην περίπτωση της παραγωγής ενέργειας η χρήση του επιπέδου αξιοπιστίας είναι διαφορετική: δεν εισάγεται περιορισμός ανάλογος με αυτόν της σχέσης (4.16), αλλά όπως

είδαμε στην ενότητα 4.7.2. το επίπεδο αξιοπιστίας χρησιμοποιείται για τη διάκριση πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας.

#### 4.11 Μέθοδος βελτιστοποίησης

Το προς βελτιστοποίηση μέγεθος στις επιλύσεις που αφορούν στην κάλυψη των καταναλωτικών (αρδευτικών – υδρευτικών) αναγκών είναι η αθροιστική ετήσια ζήτηση. Πιο συγκεκριμένα η προς μεγιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση (η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο εδάφιο (4.9)) είναι:

$$D + \frac{(S_n - S_0)}{T} - \frac{Def_{ολ}}{T} \quad (4.17)$$

όπου:

$T$  η περίοδος προσομοίωσης

$Def$  το συνολικό έλλειμμα που παρουσιάζεται στο σύστημα κατά την περίοδο προσομοίωσης.

$S_0, S_n$  το απόθεμα στο σύστημα των ταμιευτήρων στην αρχή και στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης

Για την παραμετρική επίλυση οι μεταβλητές απόφασης είναι οι συντελεστές  $a_i$  και  $b_i$  του παραμετρικού κανόνα. Οι εξωτερικοί περιορισμοί του προβλήματος εισάγονται υπό μορφή ανισώσεων και αφορούν το αποδεκτό επίπεδο αστοχίας  $\beta^*, T$ . Για τις επιλύσεις που αφορούν την άρδευση θέτουμε  $\beta^*, T \leq 0.06$  ενώ για τις επιλύσεις που αφορούν την ύδρευση θέτουμε  $\beta^*, T \leq 0.0625$ .

Για τη μη παραμετρική επίλυση οι μεταβλητές απόφασης είναι οι απολήψεις κάθε χρονικού βήματος. Οι λειτουργικοί περιορισμοί στους οποίους υπόκειται το σύστημα είναι:

$$\begin{aligned} S_i &= BS_i + Q_i - R_i - L_i - SP_i \\ L_i &= a_i + \beta_i BS_i \\ SP_i &= \max\{0, BS_i + Q_i - R_i - L_i - K_i\} \\ 0 &\leq S_i \leq K_i \\ R_i &\geq 0 \\ Def &= \max\{0, D - (R_1 + R_2)\} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Βάσει αυτών υπολογίζονται οι χρονοσειρές των αποθεμάτων, των εκροών (μεταβλητές απόφασης) των υπερχειλίσεων και των ελλειμμάτων. Οι εξωτερικοί περιορισμοί του προβλήματος είναι ίδιοι με αυτούς της παραμετρικής επίλυσης που προαναφέρθηκαν.

Για το δεύτερο πρόβλημα βέλτιστης διαχείρισης που μελετήθηκε, δηλαδή την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς του αρδευτικού και υδρευτικού νερού, προχωρούμε σε ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης

$$c_1 V_1 + c_2 V_2$$

που παρουσιάστηκε στο εδάφιο 4.9. Η διαδικασία που ακολουθείται κατά την παραμετρική αλλά και τη μη παραμετρική προσέγγιση, τα αποδεκτά επίπεδα αστοχίας καθώς και οι

λειτουργικοί περιορισμοί που περιγράφουν τη μη παραμετρική επίλυση είναι ίδιοι με αυτούς που περιγράφηκαν προηγουμένως στο πρόβλημα μεγιστοποίησης των απολήψεων.

Τέλος στις επιλύσεις που αφορούν στην μεγιστοποίηση του ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους η προς μεγιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση (η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο εδάφιο (4.9)) είναι:

$$c_{\Pi}E_{\Pi} + c_{\Delta}E_{\Delta}$$

Για την παραμετρική επίλυση οι μεταβλητές απόφασης είναι οι συντελεστές  $a_i$  και  $b_i$  του παραμετρικού κανόνα.

Το επίπεδο αξιοπιστίας για την παραγωγή ενέργειας ορίστηκε ίσο με 97% ή ισοδύναμα το αποδεκτό επίπεδο αστοχίας ισούται με 3%, όπως αναφέρεται στο εδάφιο 4.9. Επιτρέπεται δηλαδή για χρονικό διάστημα 6 μηνών στη διάρκεια της χρονικής περιόδου προσομοίωσης των 16 ετών η αδυναμία κάλυψης του ενεργειακού στόχου της πρωτεύουσας ενέργειας από το σύστημα των ταμιευτήρων. Στην περίπτωση της παραγωγής ενέργειας το επιπέδου αξιοπιστίας δεν εισάγει εξωτερικό περιορισμό ανάλογο με αυτόν της σχέσης (4.16), αλλά όπως είδαμε στην ενότητα 4.7.2. το επίπεδο αξιοπιστίας χρησιμοποιείται για τη διάκριση πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ενέργειας.

Για τη μη παραμετρική επίλυση οι μεταβλητές απόφασης είναι οι απολήψεις κάθε χρονικού βήματος. Οι λειτουργικοί περιορισμοί στους οποίους υπόκειται το σύστημα είναι:

$$\begin{aligned} L_i &= a_i + \beta_i BS_i \\ S_i &= \min \{K_i, BS_i + Q_i - R_i - L_{ii}\} \\ 0 &\leq S_i \leq K_i \\ R_i &\geq 0 \\ E_i &= R_i \psi \left[ z_0 + z_{\max} \left( \frac{S_i}{K_i} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \right] \end{aligned} \quad (4.19)$$

Για την αποφυγή σκόπμιου αδειάσματος των ταμιευτήρων (από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης) στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης απαιτείται ακόμα ένας περιορισμός

$$S_n \geq S_0 \quad (4.20)$$

Βάσει αυτών υπολογίζονται οι χρονοσειρές των αποθεμάτων, των εκροών (μεταβλητές απόφασης) και των ενεργειών.

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του παραμετρικού κανόνα αλλά και η βελτιστοποίηση των απολήψεων κάθε χρονικού βήματος γίνεται από τον επιλυτή της Frontline Systems Premium Solver Plus τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάστηκαν στο εδάφιο (3.5).

## 4.12 Πρόγραμμα υπολογιστή

Διαμορφώθηκαν δύο μοντέλα προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος ταμιευτήρων. Το πρώτο αναπαριστά τη λειτουργία του συστήματος ταμιευτήρων

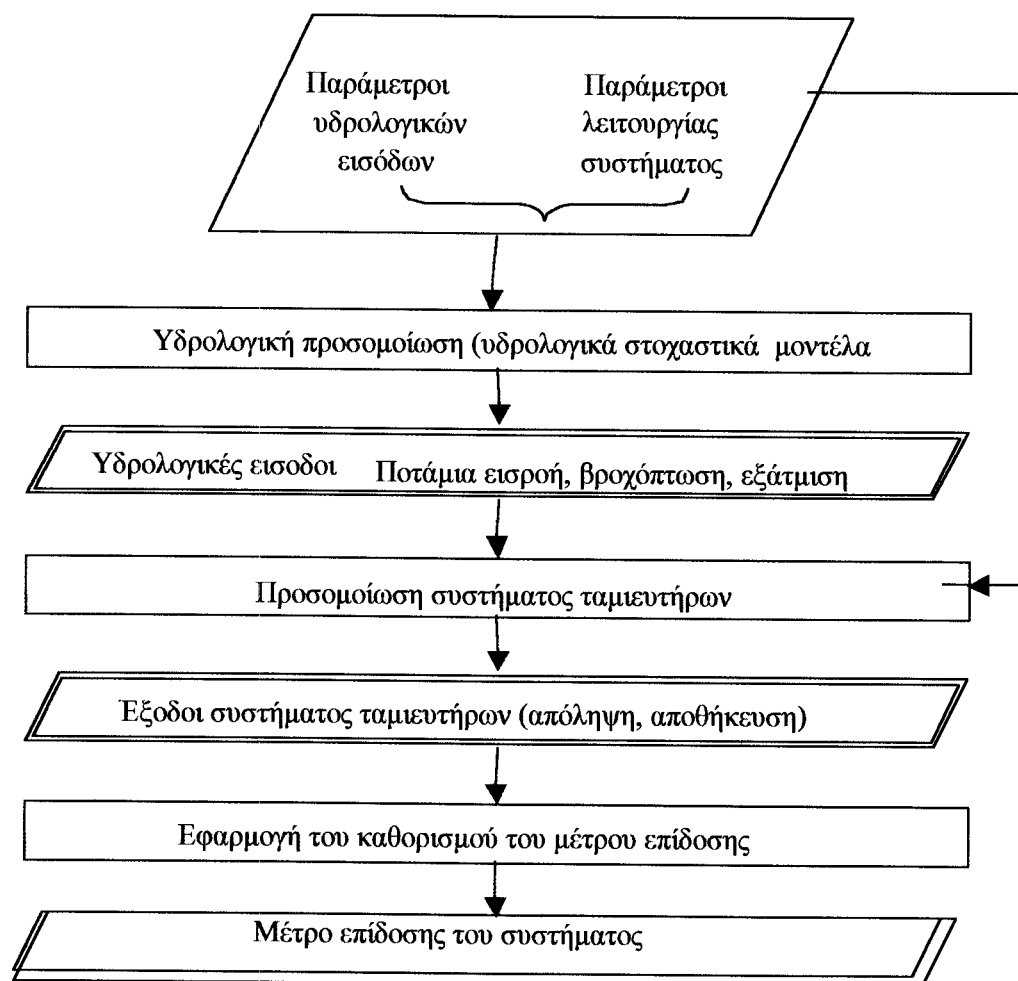
καταλήγοντας στη διαμόρφωση καταναλωτικού στόχου. Το δεύτερο αναπαριστά τη λειτουργία του συστήματος ταμιευτήρων καταλήγοντας στη διαμόρφωση ενεργειακού στόχου. Τα μοντέλα προσομοίωσης έχουν συνδυαστεί με το ίδιο πολυμεταβλητό στοχαστικό υδρολογικό μοντέλο (SMUSH) για τη στοχαστική προσομοίωση των εισροών. Το SMUSH έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα Pascal και δίνεται σε μορφή βιβλιοθήκης δυναμικής σύνδεσης. Έτσι μπορεί να κληθεί από οποιοδήποτε άλλο πρόγραμμα. Τα μοντέλα προσομοίωσης έχουν κωδικοποιηθεί σε γλώσσα Visual Basic η οποία είναι ενσωματωμένη στο λογιστικό πακέτο EXCEL. Το μοντέλο προσομοίωσης καταλήγει στον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης και οι παράμετροι του γενικευμένου παραμετρικού κανόνα διαχείρισης υπολογίζονται με βελτιστοποίηση.

Για την αξιολόγηση – βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο επιλυτής του EXCEL Premium Solver Plus.

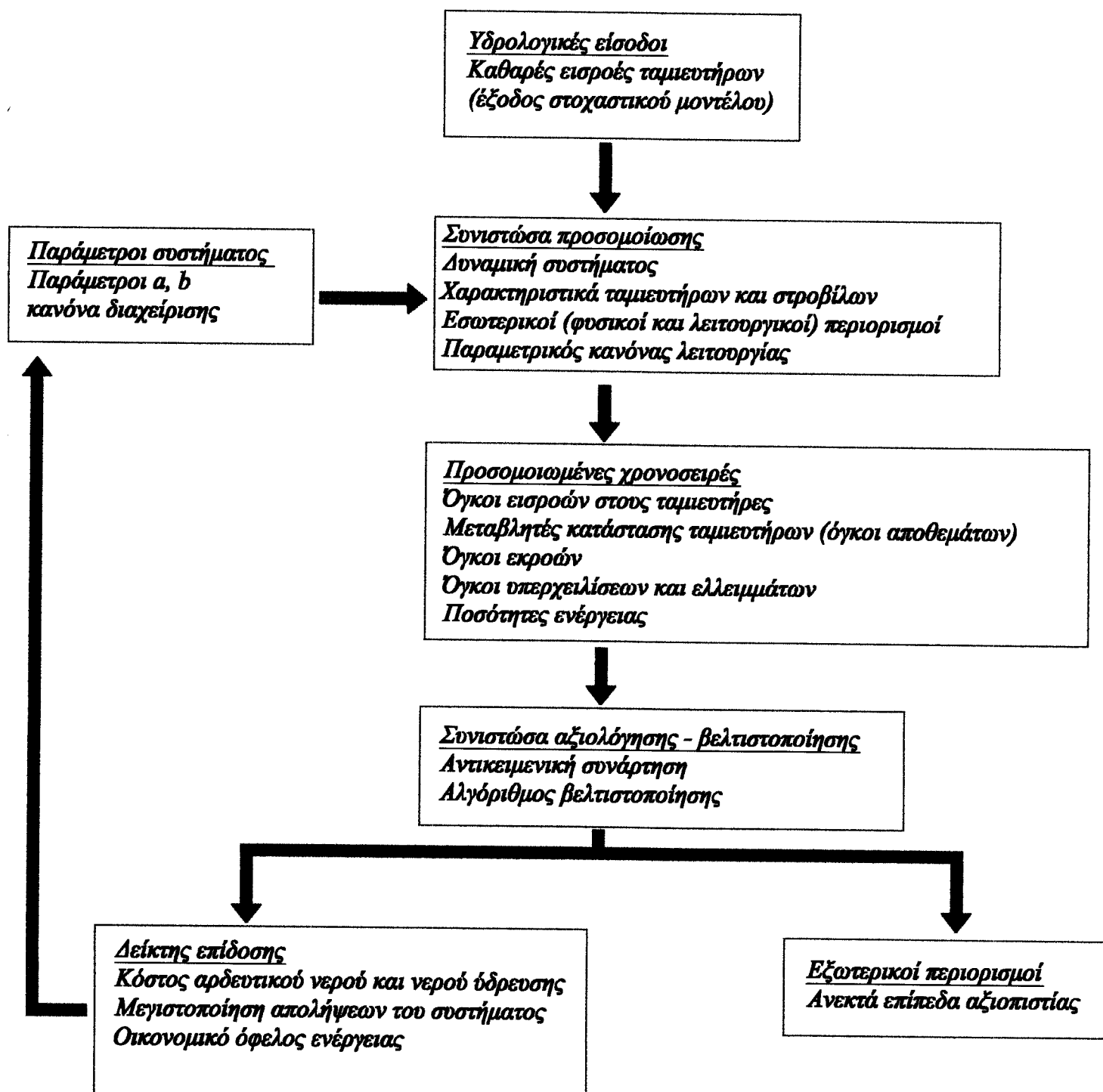
Η διάρθρωση του συνολικού μοντέλου, οι διασυνδέσεις των συνιστωσών του και τα κύρια βήματα της πορείας επίλυσης που ακολουθεί, φαίνονται στο Σχήμα 5.

Ακολουθεί το Σχήμα 6 στο οποίο παρουσιάζεται η διάρθρωση και η πορεία επίλυσης του παραμετροποιημένου προβλήματος.

Τέλος στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η διάρθρωση και η πορεία επίλυσης του μη παραμετροποιημένου προβλήματος.

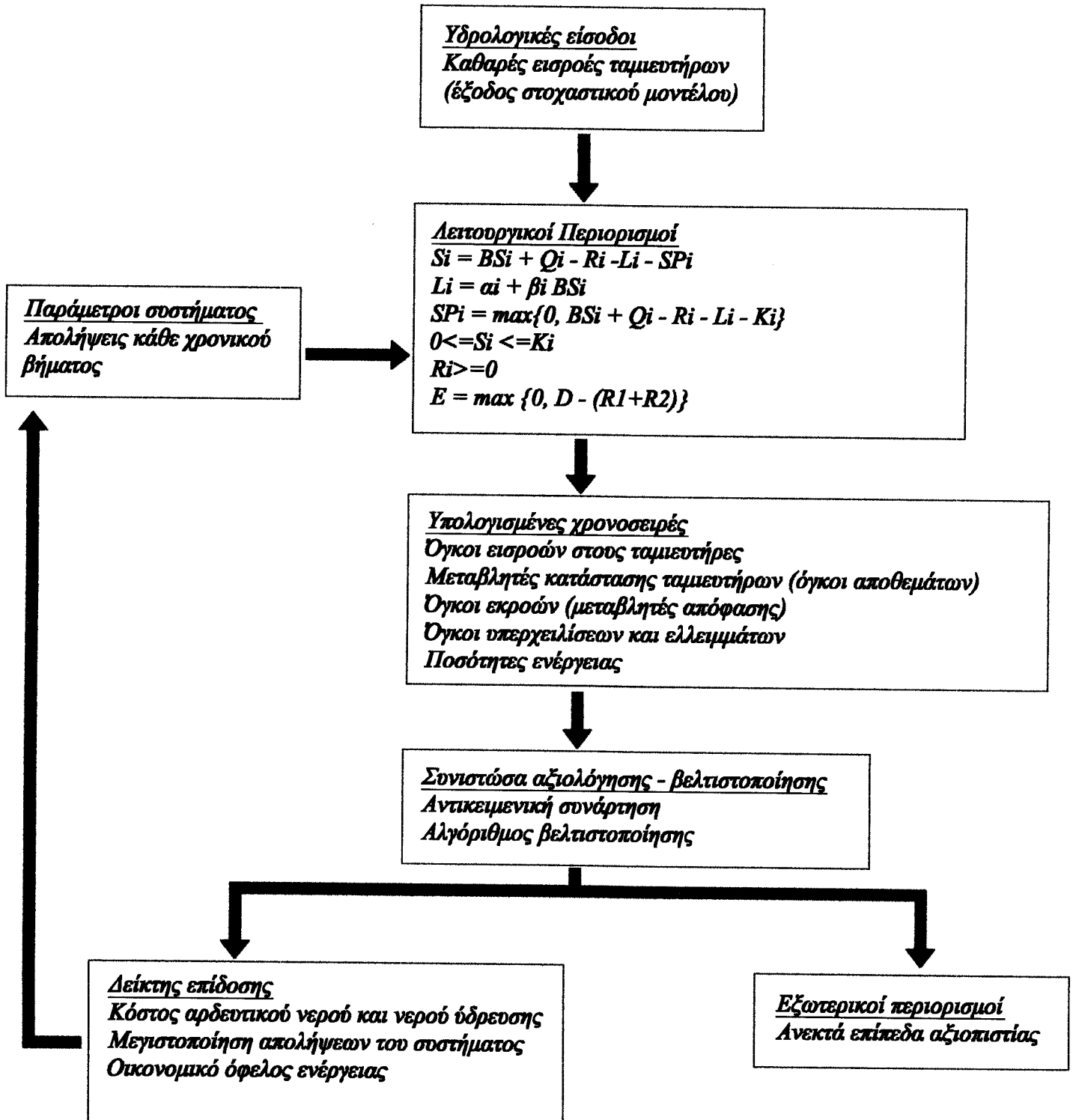


**Σχήμα 5** Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας επίλυσης των προβλημάτων συστημάτων ταμιευτήρων και διασυνδέσεις των συνιστωσών τους. Τα τετράγωνα αναπαριστούν τα βήματα της διαδικασίας επίλυσης ενώ τα παραλληλόγραμμα αναπαριστούν τις εισόδους και εξόδους δεδομένων.



Σχήμα 6 Διάρθρωση και πορεία επίλυσης του παραμετροποιημένου προβλήματος





Σχήμα 7 Διάρθρωση και πορεία επίλυσης του μη παραμετροποιημένου προβλήματος

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Με βάση τις παραδοχές και λοιπές θεωρήσεις που αναπτύχθηκαν, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που περιγράφηκε αναλυτικά στα κεφάλαια 2, 3 και 4 για όλες τις υπό μελέτη περιπτώσεις.

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, αναπτύχθηκαν και επιλύθηκαν 41 προβλήματα. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βέλτιστης λύσης που προσδιορίστηκε για κάθε ένα από τα προβλήματα αυτά. Συγκεκριμένα στον πίνακα 5 παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά των προβλημάτων που εξετάστηκαν και στους πίνακες 6, 7 και 8 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα συνοπτικά αποτελέσματα των εφαρμογών του μοντέλου. Παρουσιάζονται επίσης ενδεικτικά χαρακτηριστικά διαγράμματα της χρονικής διακύμανσης των μεγεθών του αποθέματος, της απόληψης, της υπερχειλίσης και του ελλείμματος σε κάθε ταμιευτήρα χωριστά αλλά και αθροιστικά στο σύστημα των δύο ταμιευτήρων για τα προβλήματα με αριθμούς 39, 40 και 41. Τα χαρακτηριστικά αυτά διαγράμματα παρουσιάζονται στο σύνολό τους (για όλα τα προβλήματα) στο παράρτημα. Για το πρόβλημα 39 δίνονται επίσης ενδεικτικά οι γραφικές παραστάσεις των παραμετρικών κανόνων λειτουργίας.

Για την ανάγνωση των αποτελεσμάτων υπενθυμίζεται ότι στα βασικά χαρακτηριστικά των δεδομένων προβλήματος παρατίθενται δύο τύποι συστήματος: το σύστημα Α και το σύστημα Β. Αυτά αναφέρονται στα ζεύγη των διαφορετικών χωρητικοτήτων των ταμιευτήρων που για το σύστημα Α είναι 150 και 300 hm<sup>3</sup> ενώ για το σύστημα Β είναι 150 και 253.2 hm<sup>3</sup> για τους ταμιευτήρες 1 και 2 αντίστοιχα. Το σύστημα Β χρησιμοποιήθηκε στις επιλύσεις που περιλαμβάνουν και την προσέγγιση του Ισοδύναμου Ταμιευτήρα.

Χρησιμοποιούνται επίσης δύο διαφορετικά υδρολογικά σενάρια. Αυτά διαμορφώνονται με αλλαγή του συντελεστή μεταβλητότητας της χρονοσειράς μηνιαίων εισροών από 0.5 σε 0.7.

Στον πίνακα 5 γίνεται η παράθεση όλων των βασικών χαρακτηριστικών δεδομένων κάθε προβλήματος δηλαδή ο τύπος της κατανάλωσης, το μέγεθος της μηνιαίας συνθετικής χρονοσειράς, η μέθοδος βελτιστοποίησης, ο αριθμός των εποχών και το πλήθος των μεταβλητών απόφασης.

Στους πίνακες 6, 7 και 8 και ειδικότερα στις στήλες που αναφέρονται στα αποτελέσματα των όγκων, καταγράφεται η εισροή στο σύστημα, η κατάντη ζήτηση, η μέση υπερχειλίση, η μέση υπόγεια διαφυγή, η ανηγμένη διαφορά αποθέματος στην αρχή και στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης, ο επιτευχθείς όγκος των απολήψεων και το μέσο έλλειμμα. Καταγράφεται επίσης η επιτευχθείσα τιμή του περιορισμού αξιοπιστίας καθώς και η απόδοση κάθε προσέγγισης σε σχέση με τη μη παραμετρική προσέγγιση.

Τα οικονομικά αποτελέσματα αφορούν στις επιλύσεις που αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση του αρδευτικού – υδρευτικού κόστους και στη μεγιστοποίηση του

ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους. Παρατίθεται η επιτευχθείσα τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς και το ανηγμένο κόστος ή όφελος.

**Πίνακας 5** Καθορισμός προβλημάτων που εξετάζονται.

Κατηγορία προβλήματος (στόχος)	Ομάδα	Χρήση νερού <sup>a</sup>	Τύπος συστήματος	Υδρολογικό σενάριο <sup>b</sup>	Διάρκεια προσομοίωσης	Αριθμός Προβλήματος	Μέθοδος <sup>c</sup> εποχών	Πλήθος Πλήθουςμεταβλητών απόφασης
Μεγιστοποίηση απόληξης <sup>d</sup>	I	ΑΡΔ	Α	ΧΜ	50	1	ΙΠΒ	2
						2	ΙΠΒ	1
						3	ΙΠΒ	2
						4	ΙΠΒ	1
						5	ΜΠ	-
351								
II	ΑΡΔ	Α	ΥΜ	50		6	ΙΠΒ	2
						7	ΜΠ	-
351								
III	ΑΡΔ	Β	ΧΜ	50		8	ΙΠΒ	2
						9	ΙΤ	-
						10	ΜΠ	-
						351		
IV	ΥΔΡ	Α	ΧΜ	16		11	ΙΠΒ	2
						12	ΙΠΒ	1
						13	ΙΠΒ	2
						14	ΙΠΒ	1
						15	ΜΠ	-
193								

**Πίνακας 5** Καθορισμός προβλημάτων που εξετάζονται.

Κατηγορία προβλήματος (στόχος)	Ομάδα	Χρήση νερού <sup>a</sup>	Τύπος συστήματος	Υδρολογικό σενάριο <sup>b</sup>	Διάρκεια προσομοίωσης	Αριθμός Προβλήματος	Μέθοδος <sup>c</sup>	Πλήθος εποχών	Πλήθος μεταβλητών απόφασης
V	ΥΔΡ	Α	ΥΜ	ΥΜ	16	16	ΙΠΒ	2	5
						17	ΜΠ	-	193
VI	ΥΔΡ	Β	ΧΜ	ΧΜ	16	18	ΙΠΒ	2	5
						19	ΙΤ	-	1
						20	ΜΠ	-	193
VII	ΥΔΡ	Α	ΧΜ	ΧΜ	50	21	ΙΠΒ	2	4
						22	ΜΠ	-	350
VIII	ΑΡΔ	Α	ΥΜ	ΥΜ	50	23	ΙΠΒ	2	4
						24	ΜΠ	-	350
IX	ΥΔΡ	Α	ΧΜ	ΧΜ	16	25	ΙΠΒ	2	4
						26	ΜΠ	-	192
X	ΥΔΡ	Α	ΥΜ	ΥΜ	16	27	ΙΠΒ	2	4
						28	ΜΠ	-	192

συνεχίζεται

**Πίνακας 5** Καθορισμός προβλημάτων που εξετάζονται.

Κατηγορία προβλήματος (στόχος)	Ομάδα	Χρήση νερού <sup>a</sup>	Τύπος συστήματος	Υδρολογικό σενάριο <sup>b</sup>	Διάρκεια προσομοίωσης	Αριθμός Προβλήματος	Μέθοδος <sup>c</sup>	Πλήθος εποχών	Πλήθος μεταβλητών απόφασης
Μεγιστοποίηση οφέλους από την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας	XI	YHE	A	XM	16	29	ΠΠΒ	2	5
						31	ΠΠΒ	1	3
						31	ΠΠΒ	2	3
						32	ΠΠΒ	1	2
						33	ΜΠ	-	384
	XII	YHE	A	YM	16	34	ΠΠΒ	2	5
						35	ΠΠΒ	1	3
						36	ΠΠΒ	2	3
						37	ΠΠΒ	1	2
						38	ΜΠ	-	384
	XIII	YHE	B	XM	16	39	ΠΠΒ	2	5
						40	ΙΤ	-	1
						41	ΜΠ	-	384

<sup>a</sup> ΑΡΔ: άρδευση, ΥΔΡ: ύδρευση, ΥΗΕ: παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.

<sup>b</sup> ΧΜ: χαμηλή μεταβλητότητα, ΥΜ: υψηλή μεταβλητότητα.

<sup>c</sup> ΠΠΒ: παραμετροποίηση-προσομοίωση-βελτιστοποίηση; ΙΤ: ισοδύναμος ταμειντήρας; ΜΠ: μη παραμετρική βελτιστοποίηση.

<sup>d</sup> αποδεκτό επίπεδο αξιοπιστίας 0.9375.

**Πίνακας 6** Αποτελέσματα των προβλεψιμάτων της 1ης κατηγορίας (μεγιστοποίηση της ζήτησης).

Ομάδα προβλεψιμάτων	Πρόβλημα	Μέσοι ετήσιοι όγκοι (hm <sup>3</sup> )					Επιτευχθείσα		Μείωση της		
		Εισροή Ζήτηση	Υπερχείλιση	Διαφυγή	Διαφορά αποθέματος <sup>a</sup>	Απόληψη Έλλειμμα <sup>b</sup>	Ανηγμένη απόληψη <sup>c</sup>	αξιοπιστία (%)	απόδοσης <sup>d</sup> (%)		
I (ΑΡΔ/Α/ΧΜ)	1 (ΠΠΒ/5)	311.9	244.4	48.7	20.3	-0.7	243.7	0.7	243.0	94.00	0.00
	2 (ΠΠΒ/3)	311.9	242.7	48.5	22.2	-0.8	242.0	0.7	241.2	94.00	-0.72
	3 (ΠΠΒ/3)	311.9	241.3	55.7	16.0	-0.4	240.7	0.7	240.3	94.00	-1.11
	4 (ΠΠΒ/2)	311.9	240.1	52.2	20.8	-0.5	239.3	0.7	238.9	94.00	-1.68
	5 (ΜΠ/351)	311.9	244.4	48.7	20.3	-0.7	243.7	0.7	243.0	94.00	0.00
II (ΑΡΔ/Α/ΥΜ)	6 (ΠΠΒ/5)	317.1	217.5	85.3	16.0	-0.2	216.0	1.5	215.8	94.00	-0.20
	7 (ΜΠ/351)	317.1	217.5	84.3	16.5	-0.2	216.5	1.1	216.2	94.00	0.00
III (ΑΡΔ/Β/ΧΜ)	8 (ΠΠΒ/5)	311.9	235.7	49.7	29.3	-1.1	234.0	1.7	232.9	94.00	-0.12
	9 (Π/1)	311.9	235.7	48.5	30.3	-1.1	234.2	1.5	233.1	94.00	-0.05
	10 (ΜΠ/351)	311.9	236.8	49.3	29.4	-1.1	234.3	2.4	233.2	94.00	0.00

συνεχίζεται

**Πίνακας 6** Αποτελέσματα των προβλημάτων της 1ης κατηγορίας (μεγιστοποίηση της ζήτησης).

Ομάδα προβλημάτων	Πρόβλημα	Μέσοι ετήσιοι όγκοι (hm <sup>3</sup> )					Επιτευχθείσα		Μείωση της απόδοσης <sup>d</sup> (%)		
		Εισροή	Ζήτηση	Υπερχείλιση	Διαφυγή	Διαφορά αποθέματος <sup>a</sup>	Απόληψη Έλλειμμα <sup>b</sup>	Ανηγμένη απόληψη <sup>c</sup>		αξιοπιστία	
IV (ΥΔΡ/Α/ΧΜ)	11 (ΠΠΒ/5)	298.2	258.3	23.8	11.0	5.7	257.6	0.6	263.3	93.75	0.00
	12 (ΠΠΒ/3)	298.2	256.8	29.6	8.4	4.0	256.2	0.6	260.2	93.75	-1.18
	13 (ΠΠΒ/3)	298.2	254.6	18.8	19.3	6.1	253.9	0.6	260.1	93.75	-1.25
	14 (ΠΠΒ/2)	298.2	250.0	20.9	21.7	6.3	249.4	0.6	255.6	93.75	-2.93
	15 (ΜΠ/193)	298.2	258.3	23.8	11.0	5.7	257.6	0.6	263.3	93.75	0.00
V (ΥΔΡ/Α/ΥΜ)	16 (ΠΠΒ/5)	297.6	228.2	48.7	14.4	6.7	227.8	0.4	234.5	93.75	0.00
	17 (ΜΠ/193)	297.6	228.2	48.7	14.4	6.7	227.8	0.4	234.5	93.75	0.00
VI (ΥΔΡ/Β/ΧΜ)	18 (ΠΠΒ/5)	298.2	240.6	23.5	30.0	4.7	240.1	0.6	244.7	93.75	0.00
	19 (ΠΤ/1)	298.2	240.6	23.5	30.0	4.7	240.1	0.6	244.7	93.75	0.00
	20 (ΜΠ/193)	298.2	240.6	23.5	29.9	4.7	240.1	0.6	244.7	93.75	0.00

<sup>a</sup>  $(s_n - s_0) / n$ . <sup>b</sup> Ζήτηση – Απόληψη.

<sup>c</sup> Μέτρο επίδοσης = Απόληψη – Διαφορά αποθέματος.

<sup>d</sup> Σε σχέση με το δείκτη επίδοσης του ΜΠ προβλήματος.



**Πίνακας 7** Αποτελέσματα των προβλημάτων των προβλημάτων δεύτερης κατηγορίας (ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης).

Ομάδα προβλημάτων	Πρόβλημα	Μέσοι ετήσιοι όγκοι (hm <sup>3</sup> )					Επιτεύγεια Κόστος <sup>d</sup>		Μείωση απόδοσης <sup>e</sup> (%)			
		Εισροή	Ζήτηση	Υπερχείλιση	Διαφυγή	Διαφορά αποθέματος <sup>a</sup>	Απόληψη	Έλλειμμα <sup>b</sup>		Ανηγγμένη απόληψη <sup>c</sup> (%)	αξιοπιστία	
VII (ΑΡΔ/Α/ΧΜ)	21 (ΠΠΒ/4)	311.5	218.5	70.2	27.3	-2.3	216.7	2.3	214.4	96.00	223.5	0.00
	22 (ΜΠ/350)	311.5	218.5	70.2	27.3	-2.3	216.7	2.3	214.4	94.00	223.5	0.00
VIII (ΑΡΔ/Α/ΥΜ)	23 (ΠΠΒ/4)	317.1	191.7	101.4	27.7	-0.7	188.7	3.0	187.9	96.00	192.6	0.00
	24 (ΜΠ/350)	317.1	191.7	101.4	27.7	-0.7	188.7	3.0	187.9	94.00	192.6	0.00
X (ΥΔΡ/Α/ΧΜ)	25 (ΠΠΒ/4)	298.2	230.5	39.6	25.5	2.3	230.8	0.2	233.1	93.75	242.2	-0.24
	26 (ΜΠ/192)	298.2	230.5	39.0	26.8	1.8	230.4	0.5	232.3	93.75	241.6	0.00
XI (ΥΔΡ/Α/ΥΜ)	27 (ΠΠΒ/4)	297.6	205.4	58.8	27.3	6.4	205.1	0.3	211.5	93.75	213.3	0.00
	28 (ΜΠ/192)	297.6	205.4	58.8	27.3	6.4	205.1	0.3	211.5	93.75	213.3	0.00

<sup>a</sup>  $(s_n - s_0) / n$ . <sup>b</sup> Ζήτηση-Απόληψη. <sup>c</sup> Απόληψη – Διαφορά αποθέματος. <sup>d</sup> Ελαχιστοποιημένος δείκτης επίδοσης. <sup>e</sup> σε σχέση με το δείκτη επίδοσης του ΜΠ

προβλήματος.

**Πίνακας 1** Αποτελέσματα των προβλημάτων τρίτης κατηγορίας (μεγιστοποίηση του οφέλους από την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας).

Ομάδα προβλημάτων	Πρόβλημα	Μέσοι ετήσιοι όγκοι (hm <sup>3</sup> )				Ετήσια ενέργεια (GWh)			Μείωση της			
		Εισοδή	Υπερχείλιση Διαφυγή	Διαφορά αποθέματος <sup>a</sup>	Απόληψη	Ανηγμένη απόληψη <sup>b</sup>	Στόχος	Πρωτεύουσα Δευτερεύουσα Κόστος <sup>c</sup> απόδοσης <sup>d</sup>		ενέργεια	ενέργεια	
XI (ΥΗΕ/Α/ΧΜ)	29 (ΠΠΒ/5)	298.2	0.1	21.1	7.6	269.4	276.9	48.7	48.7	7.9	52.7	-1.21
	31 (ΠΠΒ/3)	298.2	0.1	23.9	7.9	266.2	274.1	48.2	48.2	7.7	52.1	-2.34
	31 (ΠΠΒ/3)	298.2	0.0	21.1	7.6	269.4	277.0	48.9	48.9	7.5	52.6	-1.30
	32 (ΠΠΒ/2)	298.2	0.1	23.9	7.9	266.2	274.2	48.2	48.2	7.7	52.1	-2.35
	33 (ΜΠ/384)	298.2	0.0	20.9	0.0	277.3	277.3	-	48.6	9.5	53.3	0.00
XII (ΥΗΕ/Α/ΥΜ)	34 (ΠΠΒ/5)	297.6	0.9	20.4	8.0	268.3	276.3	43.8	43.8	12.3	50.0	-1.63
	35 (ΠΠΒ/3)	297.6	0.9	23.2	8.4	265.1	273.5	43.0	43.0	12.5	49.3	-2.96
	36 (ΠΠΒ/3)	297.6	0.9	20.4	8.0	268.3	276.3	43.8	43.8	12.3	50.0	-1.63
	37 (ΠΠΒ/2)	297.6	0.9	23.2	8.4	265.1	273.5	43.0	43.0	12.5	49.3	-2.97
	38 (ΜΠ/384)	297.6	0.0	20.2	0.0	277.5	277.5	-	43.8	14.0	50.8	0.00
XIII (ΥΗΕ/Β/ΧΜ)	39 (ΠΠΒ/5)	298.2	2.4	30.9	5.9	258.9	264.8	47.8	47.8	4.3	49.9	-2.08
	40 (ΠΤ/1)	298.2	2.4	31.2	6.0	258.6	264.6	47.5	47.5	4.4	49.7	-2.48
	41 (ΜΠ/384)	298.2	0.0	29.9	0.3	268.0	268.3	-	47.6	6.7	50.9	0.00

<sup>a</sup>  $(s_n - s_0) / n$ .

<sup>b</sup> Απόληψη - Διαφορά αποθέματος.

<sup>c</sup> Μεγιστοποιημένος δείκτης επίδοσης.

<sup>d</sup> σε σχέση με το δείκτη επίδοσης του μη παραμετρικού προβλήματος

Σχολιάζοντας τα αποτελέσματα των πινάκων 6, 7 και 8 θα είχαμε να παρατηρήσουμε τα ακόλουθα:

1. Τα προβλήματα 1 έως 5 αναφέρονται στον ίδιο τύπο συστήματος (σύστημα Α) με ίδιο υδρολογικό σενάριο (συντελεστής μεταβλητότητας 0.5) και ίδιο τύπο χρήσης νερού (άρδευση). Επίσης είναι ίδιο το προς βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση) μέγεθος (απόληψη) καθώς και ο περιορισμός ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία (6%). Αυτό που διαφέρει είναι η μεθοδολογία επίλυσης. Στα προβλήματα 1 έως 4 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4, 2, 2, και 1 παράμετρο προς βελτιστοποίηση αντίστοιχα, όπως αναλυτικότερα αναφέρθηκε στο εδάφιο 4.6.1.) ενώ στο πρόβλημα 5 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης και πιο συγκεκριμένα ακολουθείται η δεύτερη εναλλακτική παραδοχή που αφορά στην εφικτή απόληψη από κάθε ταμιευτήρα, όπως αναλύεται στην ενότητα 4.7.1. Σε όλες τις άλλες επιλύσεις που αφορούν τη μη παραμετρική βελτιστοποίηση ακολουθείται η πρώτη εναλλακτική παραδοχή που αφορά στην εφικτή απόληψη από κάθε ταμιευτήρα και που επίσης αναλύεται στην ενότητα 4.7.1.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 6) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση, παρόλες τις 350 μεταβλητές απόφασης που περιλαμβάνει, (συν μία ακόμη για το στόχο απόληξης) δεν κατόρθωσε να βελτιώσει καθόλου τα αποτελέσματα της παραμετρικής μεθόδου (δηλαδή 4+1 μεταβλητές απόφασης). Εξάλλου η μείωση του αριθμού των παραμέτρων σε 2 ή 1 επιφέρει μια μείωση της βέλτιστης απόληξης κατά 0.72% έως 1.68% που βέβαια δεν είναι σημαντική, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμη και με μία παράμετρο προς βελτιστοποίηση ο παραμετρικός κανόνας δίνει αρκετά ικανοποιητική λύση.

2. Στα προβλήματα 6 και 7 ο τύπος συστήματος, ο τύπος χρήσης νερού, το προς βελτιστοποίηση μέγεθος και ο περιορισμός ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία είναι όμοια με αυτά των προβλημάτων 1 έως 5. Το βασικό χαρακτηριστικό δεδομένο που διαφέρει είναι το υδρολογικό σενάριο για το οποίο ο συντελεστής μεταβλητότητας γίνεται 0.7. Στο πρόβλημα 6 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4 παραμέτρους προς βελτιστοποίηση) ενώ στο πρόβλημα 7 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 6) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση, έδωσε μια βελτίωση 0.2% σε σχέση με την παραμετρική, η οποία δεν αξιολογείται ως ιδιαίτερα σημαντική. Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που επιτεύχθηκαν είναι, όπως άλλωστε και αναμενόταν, μικρότερες αυτών των προβλημάτων 1 έως 5 λόγω της κατά 28.5% αύξησης του συντελεστή μεταβλητότητας των μηνιαίων εισροών.

3. Τα προβλήματα 8 έως 10 αναφέρονται στον τύπο συστήματος Β, στο ίδιο υδρολογικό σενάριο (συντελεστής μεταβλητότητας 0.5) και στον ίδιο τύπο χρήσης νερού

(άρδευση). Επίσης είναι ίδιο το προς βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση) μέγεθος (απόληψη) καθώς και ο περιορισμός ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία (6%). Εφαρμόζονται τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες επίλυσης. Στο πρόβλημα 8 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4 παραμέτρους προς βελτιστοποίηση). Στο πρόβλημα 9 εφαρμόζεται η μέθοδος του ισοδύναμου ταμιευτήρα ενώ στο πρόβλημα 10 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 6) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση επιφέρει αύξηση της βέλτιστης απόληψης κατά 0.07% σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται με τη μέθοδο του ισοδύναμου ταμιευτήρα και αύξηση κατά 0.12% σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται βάσει της παραμετρικής μεθόδου. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης λειτουργίας του συστήματος ταμιευτήρων με το μη παραμετρικό τρόπο επίλυσης είναι πάρα πολύ κοντά και ελάχιστα βελτιωμένα σε σχέση με αυτά του ιδεατού ταμιευτήρα. Αυτό συμβαίνει γιατί το σύστημα των δύο ταμιευτήρων και ο ισοδύναμος ταμιευτήρας αποτελούν παρόμοια και όχι ταυτόσημα συστήματα άρα και οι τιμές της μέγιστης απόληψης για τις δύο μεθόδους είναι πολύ κοντά μεταξύ τους.

4. Τα προβλήματα 11 έως 15 αναφέρονται στον ίδιο τύπο συστήματος (σύστημα Α) με ίδιο υδρολογικό σενάριο (συντελεστής μεταβλητότητας 0.5) και ίδιο τύπο χρήσης νερού (ύδρευση). Επίσης είναι ίδιο το προς βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση) μέγεθος (απόληψη) καθώς και ο περιορισμός ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία (6.25%). Αυτό που διαφέρει είναι η μεθοδολογία επίλυσης. Στα προβλήματα 11 έως 14 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4, 2, 2, και 1 παράμετρο προς βελτιστοποίηση αντίστοιχα, όπως αναλυτικότερα εκτέθηκε στο εδάφιο 4.6.1.) ενώ στο πρόβλημα 15 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 6) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση, παρόλες τις 192 μεταβλητές απόφασης που περιλαμβάνει, (συν μία ακόμη για το στόχο απόληψης) δεν κατόρθωσε να βελτιώσει καθόλου τα αποτελέσματα της παραμετρικής μεθόδου (δηλαδή 4+1 μεταβλητές απόφασης). Εξάλλου η μείωση του αριθμού των παραμέτρων σε 2 ή 1 επιφέρει μια μείωση της βέλτιστης απόληψης κατά 1.18% έως 2.93% που βέβαια δεν είναι σημαντική, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμη και με μία παράμετρο προς βελτιστοποίηση ο παραμετρικός κανόνας δίνει αρκετά ικανοποιητική λύση

5. Στα προβλήματα 16 και 17 ο τύπος συστήματος, ο τύπος χρήσης νερού, το προς βελτιστοποίηση μέγεθος και ο περιορισμός ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία είναι όμοια με αυτά των προβλημάτων 11 έως 15. Το βασικό χαρακτηριστικό δεδομένο που διαφέρει είναι το υδρολογικό σενάριο για το οποίο ο συντελεστής μεταβλητότητας γίνεται 0.7. Στο πρόβλημα 16 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο

(με 4 παραμέτρους προς βελτιστοποίηση) ενώ στο πρόβλημα 17 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 6) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση, έδωσε τα ίδια αποτελέσματα με την παραμετρική προσέγγιση. Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που επιτεύχθηκαν είναι, όπως άλλωστε και αναμενόταν μικρότερες αυτών στα προβλήματα 11 έως 15 λόγω της κατά 28.5% αύξησης του συντελεστή μεταβλητότητας των μηνιαίων εισροών.

6. Τα προβλήματα 18 έως 20 αναφέρονται στον τύπο συστήματος B, στο ίδιο υδρολογικό σενάριο (συντελεστής μεταβλητότητας 0.5) και στον ίδιο τύπο χρήσης νερού (ύδρευση). Επίσης είναι ίδιο το προς βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση) μέγεθος (απόληψη) καθώς και ο περιορισμός ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία (6.25%). Εφαρμόζονται τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες επίλυσης. Στο πρόβλημα 18 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4 παραμέτρους προς βελτιστοποίηση). Στο πρόβλημα 19 εφαρμόζεται η μέθοδος του ισοδύναμου ταμιευτήρα ενώ στο πρόβλημα 20 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 6) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση έδωσε τα ίδια αποτελέσματα με την παραμετρική προσέγγιση αλλά και με την προσέγγιση του ισοδύναμου ταμιευτήρα.

7. Τα προβλήματα 21 και 22 αναφέρονται στον ίδιο τύπο συστήματος (σύστημα A) με ίδιο υδρολογικό σενάριο (συντελεστής μεταβλητότητας 0.5) και ίδιο τύπο χρήσης νερού (άρδευση). Το προς βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση) μέγεθος είναι το κόστος μεταφοράς αρδευτικού νερού. Ο περιορισμός ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία είναι 6%. Ακολουθούνται και εδώ οι δύο μεθοδολογίες επίλυσης. Στο πρόβλημα 21 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4 παραμέτρους προς βελτιστοποίηση) ενώ στο πρόβλημα 22 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 7) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση, παρόλες τις 192 μεταβλητές απόφασης που περιλαμβάνει, δεν κατόρθωσε να βελτιώσει καθόλου τα αποτελέσματα της παραμετρικής μεθόδου (δηλαδή 4 μεταβλητές απόφασης). Παρατηρούμε όμως ότι δεν εξαντλούνται τα περιθώρια αστοχίας και η τιμή του περιορισμού αξιοπιστίας φτάνει μόλις στο 4%. Αυτό μας αφήνει κάποιες επιφυλάξεις για το αν το κόστος μεταφοράς του αρδευτικού νερού θα μειωνόταν περαιτέρω αν ο περιορισμός αξιοπιστίας έφτανε στο επιτρεπόμενο όριο δηλαδή στο 6%.

8. Στα προβλήματα 23 και 24 ο τύπος συστήματος, ο τύπος χρήσης νερού, το προς βελτιστοποίηση μέγεθος και ο περιορισμός ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία είναι όμοια με αυτά των προβλημάτων 21 και 22. Το βασικό χαρακτηριστικό δεδομένο που διαφέρει είναι το υδρολογικό σενάριο για το οποίο ο συντελεστής

μεταβλητότητας γίνεται 0.7. Στο πρόβλημα 23 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4 παραμέτρους προς βελτιστοποίηση) ενώ στο πρόβλημα 24 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 7) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση, έδωσε τα ίδια αποτελέσματα με την παραμετρική προσέγγιση. Πρέπει όμως να παρατηρήσουμε ότι η παραμετρική μέθοδος επίλυσης δεν εξαντλεί τα όρια αστοχίας (4%) ενώ για τη μη παραμετρική μέθοδο επίλυσης η αστοχία έχει φτάσει στο επιτρεπόμενο όριο δηλαδή στο 6%. Αυτό μας αφήνει κάποιες επιφυλάξεις για το αν το κόστος μεταφοράς του αρδευτικού νερού θα μειωνόταν περαιτέρω αν ο περιορισμός αξιοπιστίας έφτανε στο επιτρεπόμενο όριο δηλαδή στο 6%.

9. Τα προβλήματα 25 και 26 αναφέρονται στον ίδιο τύπο συστήματος (σύστημα Α) με ίδιο υδρολογικό σενάριο (συντελεστής μεταβλητότητας 0.5) και ίδιο τύπο χρήσης νερού (ύδρευση). Το προς βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση) μέγεθος είναι το κόστος μεταφοράς υδρευτικού νερού. Ο περιορισμός ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία είναι 6.25%. Ακολουθούνται και εδώ οι δύο μεθοδολογίες επίλυσης. Στο πρόβλημα 25 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4 παραμέτρους προς βελτιστοποίηση) ενώ στο πρόβλημα 26 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 7) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση, παρόλες τις 192 μεταβλητές απόφασης που περιλαμβάνει, κατόρθωσε να βελτιώσει τα αποτελέσματά της σε σχέση με αυτή της παραμετρικής μεθόδου (δηλαδή 4 μεταβλητές απόφασης) μόνο κατά 0.24%. Η αστοχία του συστήματος φτάνει και κατά τις δύο προσεγγίσεις το μέγιστο επιτρεπτό όριο.

10. Στα προβλήματα 27 και 28 ο τύπος συστήματος, ο τύπος χρήσης νερού, το προς βελτιστοποίηση μέγεθος και ο περιορισμός ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία είναι όμοια με αυτά των προβλημάτων 25 και 26. Το βασικό χαρακτηριστικό δεδομένο που διαφέρει είναι το υδρολογικό σενάριο για το οποίο ο συντελεστής μεταβλητότητας γίνεται 0.7. Στο πρόβλημα 27 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4 παραμέτρους προς βελτιστοποίηση) ενώ στο πρόβλημα 28 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 7) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση, παρόλες τις 192 μεταβλητές απόφασης που περιλαμβάνει, δεν κατόρθωσε να βελτιώσει καθόλου τα αποτελέσματα της παραμετρικής μεθόδου (δηλαδή 4 μεταβλητές απόφασης). Τα περιθώρια αστοχίας στις δύο αυτές περιπτώσεις έχουν εξαντληθεί (6.25%).

11. Τα προβλήματα 29 έως 33 αναφέρονται στον ίδιο τύπο συστήματος (σύστημα Α) με ίδιο υδρολογικό σενάριο (συντελεστής μεταβλητότητας 0.5) και ίδιο τύπο χρήσης νερού (παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας). Επίσης είναι ίδιο το προς

βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση) μέγεθος (ενεργειακό – οικονομικό όφελος). Το αποδεκτό επίπεδο αξιοπιστίας όπως προαναφέρθηκε στη μελέτη αυτή θεωρείται 97%, δηλαδή επιτρέπεται παραγωγή ενέργειας μικρότερης της πρωτεύουσας για χρόνο ίσο με το 3% της συνολικής περιόδου προσομοίωσης. Στα προβλήματα 29 έως 32 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4, 2, 2, και 1 παράμετρο προς βελτιστοποίηση αντίστοιχα,) ενώ στο πρόβλημα 3 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 8) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση, παρόλες τις 384 μεταβλητές απόφασης που περιλαμβάνει, κατόρθωσε να βελτιώσει τα αποτελέσματα της παραμετρικής μεθόδου (δηλαδή 4 μεταβλητές απόφασης) μόλις κατά 1.21%. Εξάλλου η μείωση του αριθμού των παραμέτρων σε 2 ή 1 επιφέρει μια μείωση του οικονομικού οφέλους κατά 1,30% έως 2.35% που βέβαια δεν είναι σημαντική, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμη και με μία παράμετρο προς βελτιστοποίηση ο παραμετρικός κανόνας δίνει αρκετά ικανοποιητική λύση.

12. Στα προβλήματα 34 έως 38 ο τύπος συστήματος, ο τύπος χρήσης νερού, το προς βελτιστοποίηση μέγεθος και ο περιορισμός ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία είναι όμοια με αυτά των προβλημάτων 29 έως 33. Το βασικό χαρακτηριστικό δεδομένο που διαφέρει είναι το υδρολογικό σενάριο για το οποίο ο συντελεστής μεταβλητότητας γίνεται 0.7. Στα προβλήματα 34 έως 37 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4, 2, 2, και 1 παράμετρο προς βελτιστοποίηση αντίστοιχα) ενώ στο πρόβλημα 38 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 8) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση, (384 μεταβλητές απόφασης), κατόρθωσε να βελτιώσει τα αποτελέσματα της παραμετρικής μεθόδου (με 4 μεταβλητές απόφασης) κατά 1.63%. Εξάλλου η μείωση του αριθμού των παραμέτρων σε 2 ή 1 επιφέρει μια μείωση του οικονομικού οφέλους κατά 1.63% έως 2.97%, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμη και με μία παράμετρο προς βελτιστοποίηση ο παραμετρικός κανόνας δίνει αρκετά ικανοποιητική λύση.

13. Τέλος τα προβλήματα 39 έως 41 αναφέρονται στον τύπο συστήματος B, στο ίδιο υδρολογικό σενάριο (συντελεστής μεταβλητότητας 0.5) και στον ίδιο τύπο χρήσης νερού (παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας). Επίσης είναι ίδιο το προς βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση) μέγεθος (ενεργειακό – οικονομικό όφελος) καθώς και η μέγιστη επιτρεπόμενη αστοχία. Εφαρμόζονται τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες επίλυσης. Στο πρόβλημα 39 ακολουθείται το παραμετρικό μοντέλο (με 4 παραμέτρους προς βελτιστοποίηση). Στο πρόβλημα 40 εφαρμόζεται η μέθοδος του ισοδύναμου ταμειυτήρα και στο πρόβλημα ενώ στο πρόβλημα 41 ακολουθείται ο μη παραμετρικός τρόπος επίλυσης.

Από τα αποτελέσματα (πίνακας 8) προκύπτει ότι η μη παραμετρική βελτιστοποίηση επιφέρει αύξηση του ενεργειακού οφέλους κατά 2.48% σε σχέση με αυτή που

επιτυγχάνεται με τη μέθοδο του ισοδύναμου ταμιευτήρα και αύξηση κατά 2.08% σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται βάσει της παραμετρικής μεθόδου. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης λειτουργίας του συστήματος ταμιευτήρων με το μη παραμετρικό τρόπο επίλυσης είναι πάρα πολύ κοντά και ελάχιστα δυσμενέστερα σε σχέση με αυτά του ιδεατού ταμιευτήρα.

Συγκεντρώνοντας τα παραπάνω αναλυτικά αποτελέσματα των επιλύσεων που έγιναν καταλήγουμε στα παρακάτω:

Τα αποτελέσματα της ομάδας προβλημάτων I στον πίνακα 6 δείχνουν ότι η μέθοδος παραμετροποίηση προσομοίωση βελτιστοποίηση με 5 μεταβλητές ελέγχου (πρόβλημα 1, 2 παράμετροι ανά εποχή × 2 εποχές + ετήσια ζήτηση) καταλήγουν πρακτικά στην ίδια απόδοση με αυτή της μη παραμετρικής μεθοδολογίας με 351 μεταβλητές ελέγχου (πρόβλημα 5). Όταν ο αριθμός των παραμέτρων στη μεθοδολογία παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση γίνεται μικρότερος από 5 (προβλήματα 2-4) υπάρχει μια μικρή μείωση στην απόδοση, αλλά ακόμη και με μία παράμετρο (πρόβλημα 4, δύο μεταβλητές απόφασης), η παραμετροποίηση είναι πολύ αποτελεσματική καθώς η μείωση στην απόδοση είναι μόνο 1.68%. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και των άλλων ομάδων προβλημάτων της ίδιας κατηγορίας ανεξάρτητα από τη χρήση του νερού (ύδρευση ή άρδευση). Η μείωση της απόδοσης είναι της τάξης του 0-0.2% για τα παραμετροποιημένα σχήματα με τέσσερις παραμέτρους και φτάνουν στο 2.9% για το παραμετροποιημένο σχήμα μίας μόνο παραμέτρου. Είναι αξιοσημείωτο ότι η μέθοδος του ισοδύναμου ταμιευτήρα που εφαρμόστηκε στις ομάδες προβλημάτων III and VI (προβλήματα 9 και 19 αντίστοιχα) κατέληξε σε απόδοση πρακτικά το ίδιο καλή με αυτή της μη παραμετρικής μεθόδου καθώς και της παραμετρικής μεθόδου με 4 παραμέτρους.

Επιπλέον, στον πίνακα 7 παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της παραμετρικής μεθόδου με 4 παραμέτρους είναι σχεδόν όμοια με αυτά της μη παραμετρικής μεθόδου με 350 μεταβλητές (άρδευση) ή 192 μεταβλητές (ύδρευση). Η μεγαλύτερη διαφορά στην απόδοση (ελαχιστοποίηση κόστους) παρουσιάζεται στην ομάδα προβλημάτων IX και είναι 0.24%, μια πολύ μικρή τιμή.

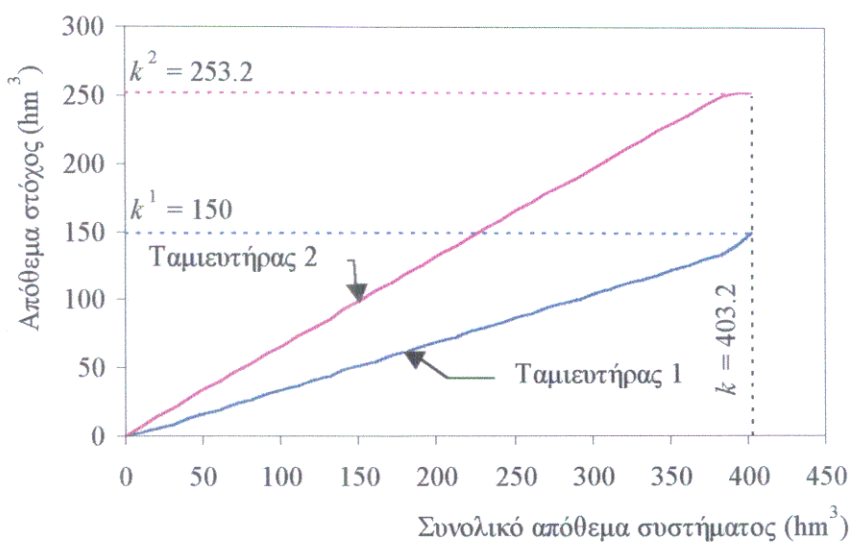
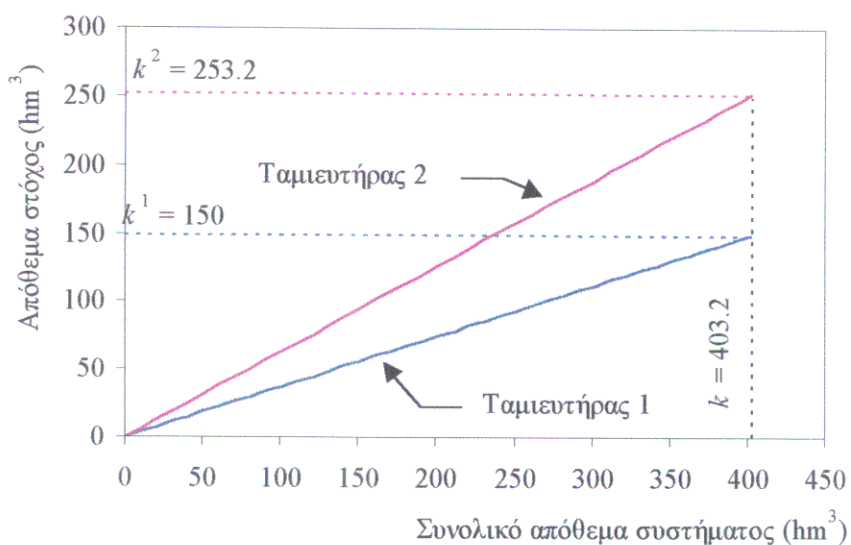
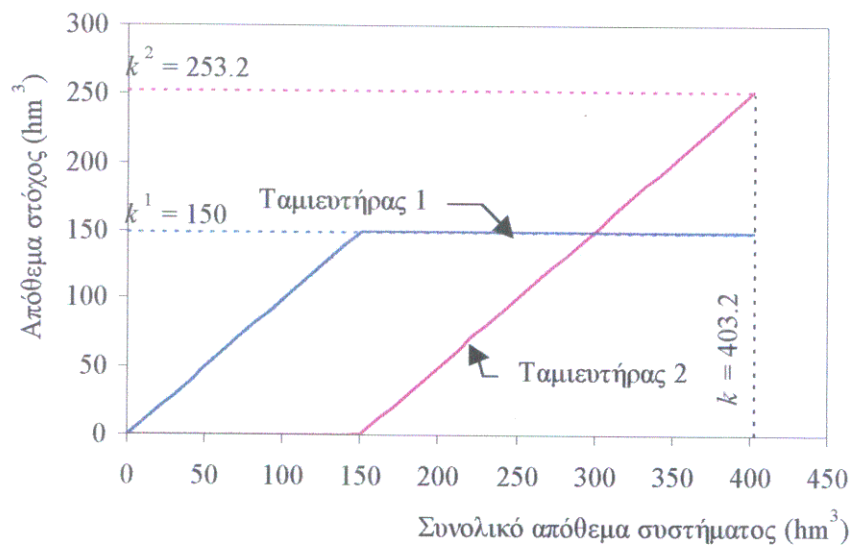
Κάποιες πιο σημαντικές τιμές στην απόδοση εμφανίζονται σε προβλήματα της τρίτης κατηγορίας, δηλαδή στα προβλήματα μεγιστοποίησης του οικονομικού οφέλους από την παραγωγή ενέργειας. Η μεγαλύτερη διαφορά στην απόδοση της μη παραμετρικής μεθόδου με 4 παραμέτρους σε σχέση με αυτή της παραμετρικής είναι 2.1%, και εμφανίζεται στην ομάδα προβλημάτων XIII (προβλήματα 39-41). Αξιοσημείωτο είναι όμως ότι η παραμετρική μέθοδος (πρόβλημα 39) λειτουργεί ελαφρώς καλύτερα από τη μέθοδο του ισοδύναμου ταμιευτήρα (πρόβλημα 40).

Για να αποκτήσουμε μια καλύτερη αντίληψη της συμπεριφοράς των τριών μεθόδων παραθέτουμε τα λεπτομερή αποτελέσματα σε μια σειρά διαγραμμάτων για τα προβλήματα



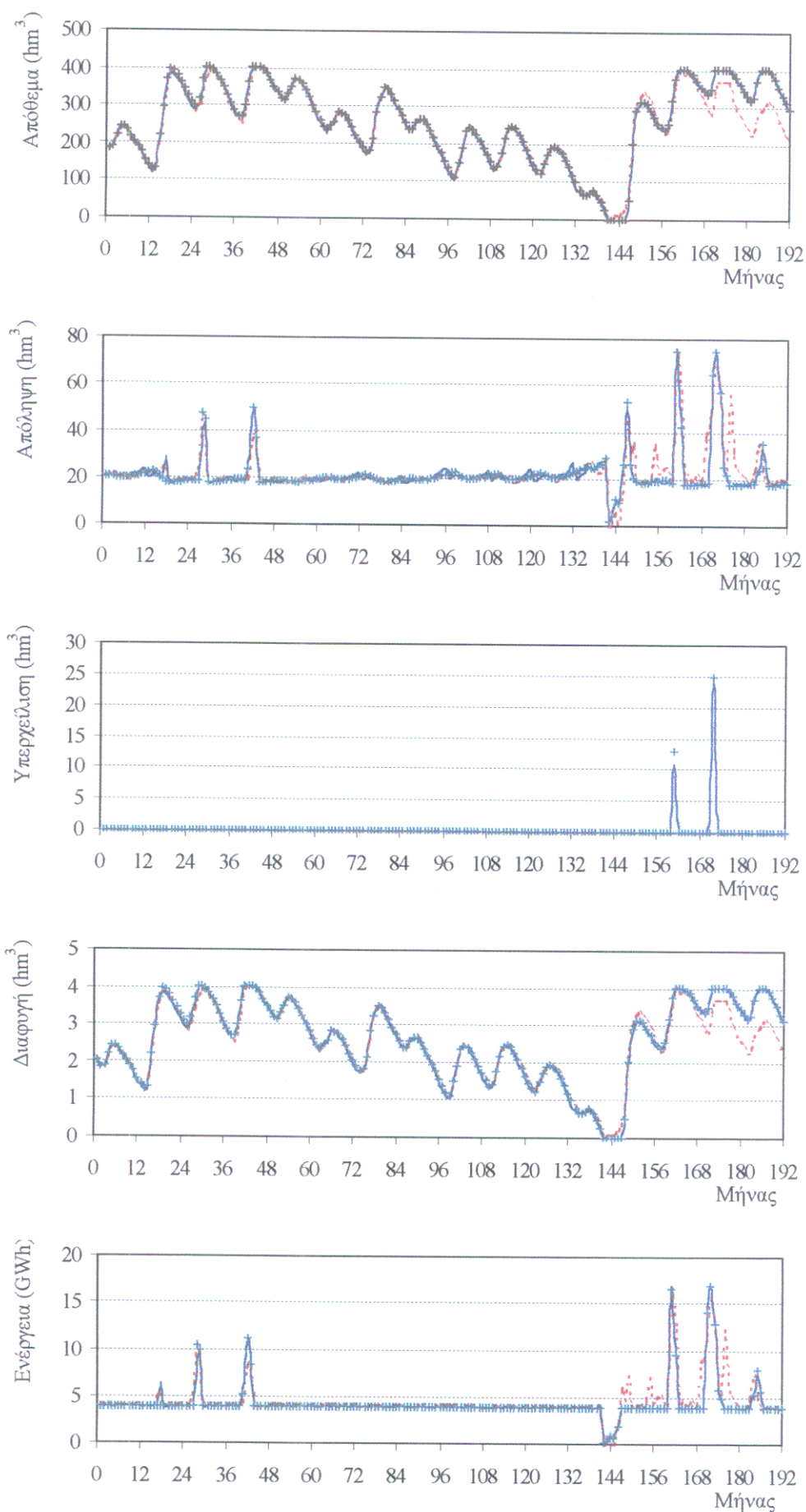
39-41 της ομάδας XIII, που μοιάζουν τα πιο ενδιαφέροντα, μιας και δίνουν τις μεγαλύτερες διαφορές στα αποτελέσματα μεταξύ των τριών μεθόδων.

Έτσι το σχήμα 8 δίνει μια γραφική αναπαράσταση των παραμετρικών κανόνων λειτουργίας για το πρόβλημα 39. Παρατηρούμε ότι η διαδικασία βελτιστοποίησης κατέληξε σε διαφορετικούς κανόνες για την υγρή περίοδο (Νοέμβριο έως Απρίλιο) και για την ξηρή περίοδο (Μάιο έως Οκτώβριο), οι οποίοι αμφότεροι απέχουν από το χωρικό κανόνα του Clark. Μάλιστα στην προκειμένη περίπτωση ο κανόνας του Clark συμπίπτει με το συμμετρικό κανόνα. Υπενθυμίζουμε ότι το σύστημα ταμιευτήρων που χρησιμοποιείται σε αυτό το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από συμμετρία και ο τελευταίος κανόνας απεικονίζει τη συμμετρία της λειτουργίας του συστήματος. Εάν είχαμε υιοθετήσει το χωρικό κανόνα για τη λειτουργία του συστήματος, το αποτέλεσμά μας θα ήταν 49.7 μονάδες, όμοια με την τιμή που προέκυψε από την μέθοδο του ισοδύναμου ταμιευτήρα (πρόβλημα 40). Ερευνητικά, με το σπάσιμο της συμμετρίας και χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους για την υγρή και την ξηρή περίοδο, μπορέσαμε να αυξήσουμε κατ' ελάχιστο το αποτέλεσμα στις 49.9 μονάδες. Ειδικότερα η αύξηση προέρχεται από τη σημαντική αλλαγή του κανόνα κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου. Σε αυτή την περίοδο η πιθανότητα υπερχείλισης είναι ασήμαντη και είναι ίσως καλύτερο να αποθηκεύουμε όσο περισσότερο νερό μπορούμε στον μικρότερο ταμιευτήρα 1, γιατί σε αυτή την περίπτωση θα έχουμε μεγαλύτερο υδραυλικό φορτίο για την ίδια ποσότητα νερού. Αυτό ακριβώς παρουσιάζεται από τον κανόνα της ξηρής περιόδου που φαίνεται στο μέσο του σχήματος 8. Ακόμα και αν η αύξηση της απόδοσης κατά 0.2 μονάδες είναι μικρή (0.4%), αποδεικνύει ότι το σύστημα ταμιευτήρων λειτουργούμενο με τον παραμετρικό κανόνα μπορεί να είναι πιο αποδοτικό από τον μεμονωμένο ισοδύναμο ταμιευτήρα που συγχονεύει τα χαρακτηριστικά των ξεχωριστών ταμιευτήρων του συστήματος.



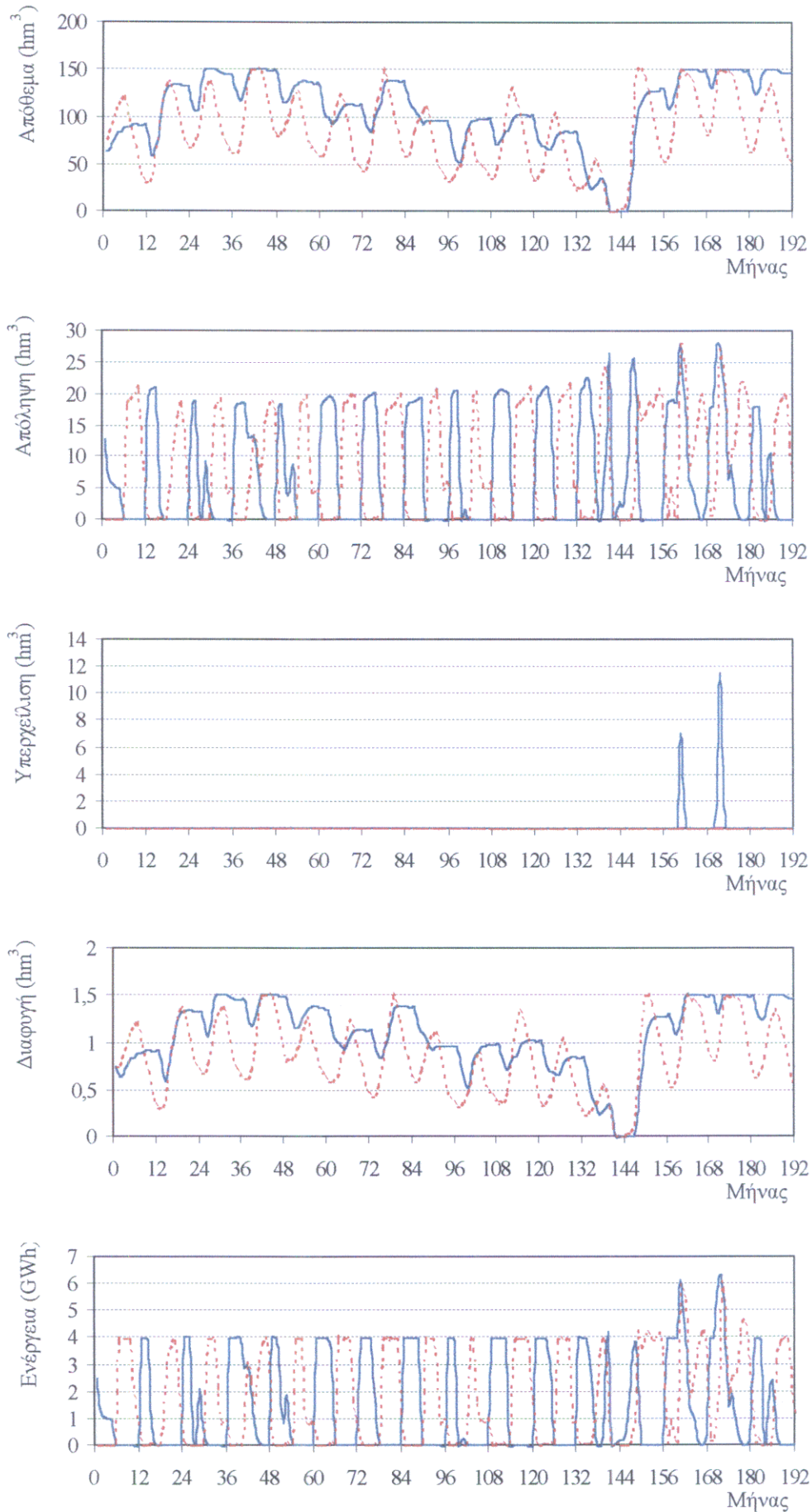
**Σχήμα 8** Γραφική αναπαράσταση του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας για το πρόβλημα 39. απεικονίζονται κατά σειρά παραμετρικός κανόνας για την υγρή περίοδο (Μάιος – Οκτώβριος), ο παραμετρικός κανόνας για την ξηρή περίοδο και ο συμμετρικός κανόνας (για λόγους σύγκρισης)

Στο σχήμα 9 απεικονίζεται η εξέλιξη στο χρόνο του αποθέματος, της απώλησης, της υπόγειας διαφυγής, της υπερχειίλισης και της παραγόμενης ενέργειας από το σύστημα των δύο ταμιευτήρων στην ομάδα προβλημάτων XIII (προβλήματα 39-41). Οι καμπύλες της μεθόδου παραμετροποίηση – προσομοίωση - βελτιστοποίηση (πρόβλημα 39) δεν ξεχωρίζουν από αυτές της μεθόδου του ισοδύναμου ταμιευτήρα (πρόβλημα 40), που σημαίνει ότι ο παραμετρικός κανόνας οδηγεί το σύστημα πολύ κοντά στη στη ‘συμμετρική’ εξέλιξη του ισοδύναμου ταμιευτήρα, αν και μια μικρή διαφορά υπάρχει (δεν φαίνεται στο σχήμα) η οποία είναι υπεύθυνη για την μικρή βελτίωση στην απόδοση (0.4%) για την οποία έχουμε ήδη μιλήσει. Συνεχίζοντας παρατηρούμε ότι οι καμπύλες της μεθόδου παραμετροποίηση – προσομοίωση - βελτιστοποίηση (πρόβλημα 39) δεν ξεχωρίζουν από αυτές της μη παραμετρικής μεθόδου (πρόβλημα 41) για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα εκτός από τους μήνες 140-192. Ειδικότερα παρατηρούμε ότι και η μέθοδος παραμετροποίηση – προσομοίωση - βελτιστοποίηση αλλά και η μέθοδος του ισοδύναμου ταμιευτήρα οδηγούν το σύστημα σε υπερχειίλιση κατά τους μήνες 161 και 171-172, ενώ η μη παραμετρική μέθοδος απέφυγε την υπερχειίλιση αυξάνοντας τις απολήψεις κατά τους προηγούμενους μήνες και παράγοντας επιπλέον δευτερεύουσα ενέργεια. Επιπροσθέτως η μη παραμετρική μέθοδος αύξησε τις απολήψεις κατά τους τελευταίους μήνες της περιόδου προσομοίωσης έτσι ώστε το ολικό απόθεμα στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης ( $s_n$ ) να εξισωθεί με αυτό στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης ( $s_0$ ). Υπενθυμίζουμε ότι στα προβλήματα αυτής της κατηγορίας επιβάλλαμε τον περιορισμό  $s_n \geq s_0$ . Έτσι στη μη παραμετρική επίλυση η παραπάνω σχέση έγινε ένας δεσμευτικός περιορισμός ενώ στις άλλες δύο μεθόδους ο περιορισμός δεν ήταν δεσμευτικός (υπάρχει διαφορά  $s_n - s_0$ ). Αυτά τα δύο δεδομένα εξηγούν το πως η μη παραμετρική μέθοδος κατάφερε να δώσει καλύτερα αποτελέσματα.

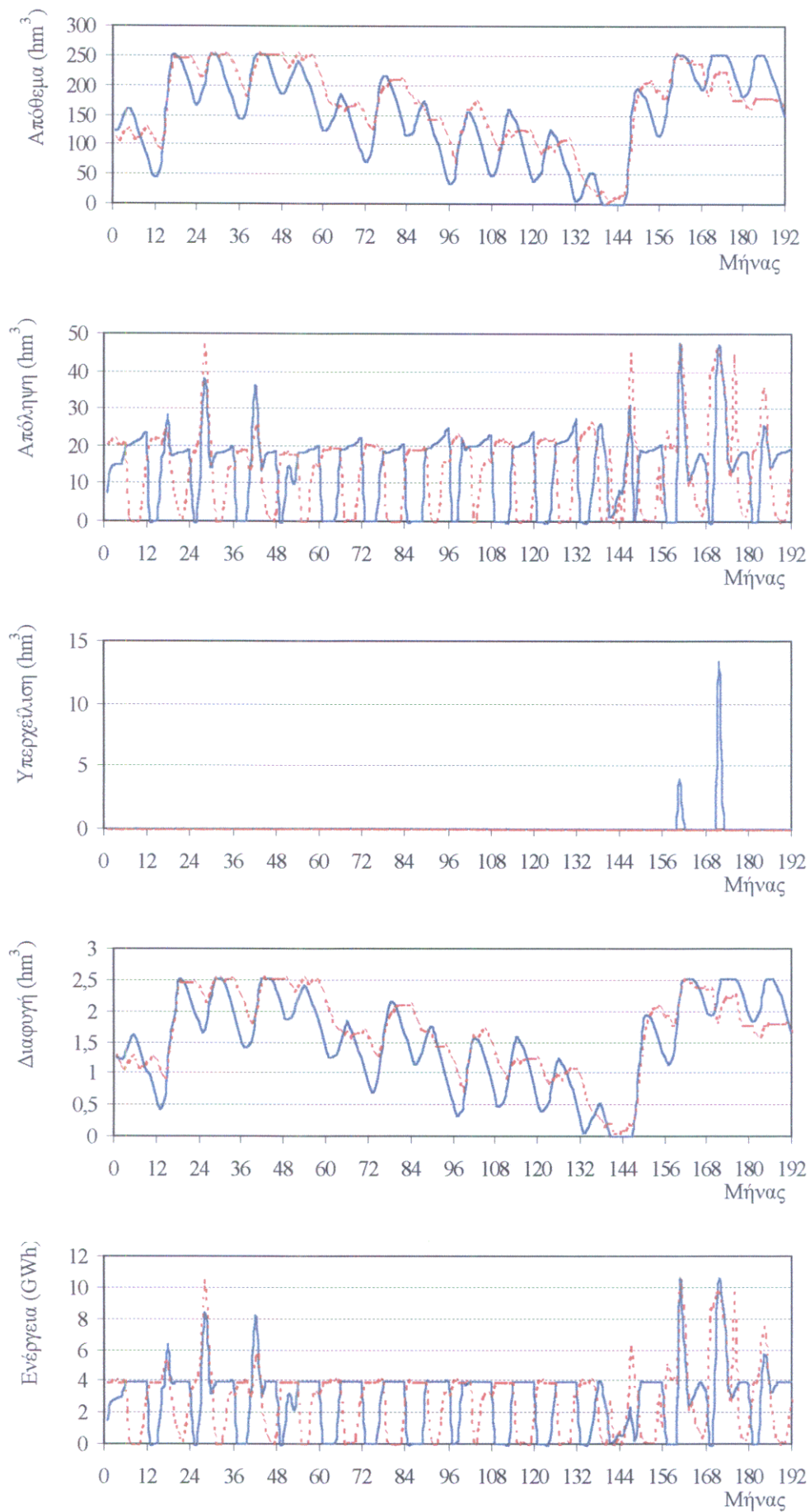


**Σχήμα 9** Χρονική εξέλιξη του αποθέματος, της απόληψης, της υπερχειλίσης, της υπόγειας διαφυγής και της ενέργειας του συστήματος ταμιευτήρων (προβλήματα 39-41). ΠΠΒ : συνεχής γραμμή, IT : σταυροί, ΜΠ : διακεκομμένη γραμμή.

Μία επιπλέον παρατήρηση σε ότι αφορά την εξέλιξη στο χρόνο της συμπεριφοράς του συστήματος δίνεται από το σχήμα 10 και το σχήμα 11 τα οποία αναφέρονται ξεχωριστά στους ταμιευτήρες 1 και 2 αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι οι δύο μέθοδοι (παραμετρική, μη παραμετρική) οδήγησαν τους μεμονωμένους ταμιευτήρες σε πολύ διαφορετική εξέλιξη, παρ' όλο που οι συνολικές ποσότητες στο σύστημα ταμιευτήρων ήταν πολύ κοντά η μία στην άλλη. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι και οι δύο ταμιευτήρες υπερχείλισαν ταυτόχρονα κατά τις δύο περιόδους υπερχείλισεων που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Εάν υπερχείλιζε μόνο ο ένας ταμιευτήρας ενώ ο άλλος είχε κενό χώρο για αποθήκευση νερού, αυτό θα ήταν ένδειξη ακαταλληλότητας ή λανθασμένου καθορισμού του παραμετρικού κανόνα στο μοίρασμα των αποθεμάτων σε κάθε ταμιευτήρα. Αντιστρόφως, η ταυτόχρονη υπερχείλιση επιβεβαιώνει την καλή λειτουργία του παραμετρικού κανόνα.



**Σχήμα 10** Χρονική εξέλιξη του αποθέματος, της απόληξης, της υπερχειλίσης, της υπόγειας διαφυγής και της ενέργειας του ταμιευτήρα 1 (προβλήματα 39-41). ΠΠΒ : συνεχής γραμμή, ΜΠ : διακεκομμένη γραμμή.



**Σχήμα 11** Χρονική εξέλιξη του αποθέματος, της απόληψης, της υπερχείλισης, της υπόγειας διαφυγής και της ενέργειας του ταμιευτήρα 2 (προβλήματα 39-41). ΠΙΠΒ : συνεχής γραμμή, ΜΠ : διακεκομμένη γραμμή.

Συνεχίζοντας τις παρατηρήσεις που αναφέρονται στο πως η μη παραμετρική προσέγγιση βελτίωσε κατά 2.1% την απόδοση του συστήματος είναι σχεδόν ξεκάθαρο ότι αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθορίζονται οι απολήψεις σε προηγούμενα χρονικά βήματα έτσι ώστε να γίνεται σωστή διαχείριση των εισροών των μελλοντικών χρονικών βημάτων. Αυτό όμως υπονοεί ότι οι μελλοντικές εισροές είναι εκ των προτέρων γνωστές, κάτι που δεν είναι εφικτό. Για παράδειγμα δεν μπορεί να προνοηθεί το μήνα 150 ότι το σύστημα θα υπερχειλίσει κατά το μήνα 161 ώστε να αυξήσουμε την απόληψη του μήνα 150, όπως πραγματικά έκανε η μη παραμετρική μέθοδος. Έτσι η βελτίωση που επιτυγχάνεται δεν είναι μια αληθινή βελτίωση.

Για τη διερεύνηση των παραπάνω εφαρμόσαμε και τις τρεις μεθόδους 20 επιπλέον φορές χρησιμοποιώντας διαφορετικές χρονοσειρές εισροών ίδιου μήκους (16 έτη) που τις παράγαμε με το ίδιο στοχαστικό μοντέλο. Οι σειρές επιλέχθηκαν έτσι ώστε η μέση ετήσια εισροή των 16 χρόνων να μη διαφέρει από αυτή που αρχικά χρησιμοποιήθηκε περισσότερο από 5%. Δεν πραγματοποιήσαμε καμιά βελτιστοποίηση αλλά χρησιμοποιήσαμε τις τιμές των μεταβλητών ελέγχου που είχαν ήδη υπολογιστεί στα προβλήματα 39-41. Ο μέσος δείκτης επίδοσης (κέρδος) από τις 20 προσομοιώσεις ήταν 49.2 και 49.1 για τη μέθοδο παραμετροποίηση - προσομοίωση - βελτιστοποίηση και για τον ισοδύναμο ταμειυτήρα αντίστοιχα, δηλαδή πολύ κοντά στις τιμές 49.9 και 49.7 που φαίνονται στον πίνακα 7 για τα προβλήματα 39 και 41, αντίστοιχα. Όμως η αντίστοιχη τιμή κατέβηκε στο 34.7 για τη μη παραμετρική μέθοδο, κάτι που δείχνει ότι η μέθοδος παραμετροποίηση - προσομοίωση - βελτιστοποίηση έχει πολύ καλύτερη απόδοση εάν οι μελλοντικές εισροές δεν μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια, όπως όντως συμβαίνει στην πραγματικότητα.

Παρόμοιες διερευνήσεις, χρησιμοποιώντας 20 εναλλακτικές χρονοσειρές εισροών, έγιναν και για τα άλλα προβλήματα και σε όλες τις περιπτώσεις αποδείχθηκε ότι η μέθοδος παραμετροποίηση - προσομοίωση - βελτιστοποίηση υπερκέρασε τη μη παραμετρική μέθοδο. Έτσι στην ομάδα προβλημάτων V στην κατηγορία μεγιστοποίησης της ζήτησης, όπου οι δύο μέθοδοι (παραμετρική, μη παραμετρική) αρχικώς κατέληξαν στα ίδια αποτελέσματα, η μέση (για τα 20 τρεξίματα) επιτευχθείσα αξιοπιστία για την παραμετρική μέθοδο ήταν 94.1% (η ελάχιστη επιτρεπόμενη είναι 93.75%) και το μέτρο επίδοσης (ανηγμένη ζήτηση) ήταν 229.3. Για τη μη παραμετρική μέθοδο επιτεύχθηκε αξιοπιστία 89.4%, η οποία είναι κάτω του επιτρεπτού επιπέδου 93.75%, και μέτρο επίδοσης 225.2, το οποίο είναι κατά 1.8% χειρότερο από αυτό της παραμετρικής μεθόδου. Στην ομάδα προβλημάτων IX, η οποία ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων μείωσης κόστους, η μικρή (κατά 0.24%) ανωτερότητα της μη παραμετρικής μεθόδου ανατράπηκε μετά τις παρόμοιες εναλλακτικές διερευνήσεις. Έτσι το μέτρο επίδοσης του παραμετρικού κανόνα ήταν 242.3 και η επιτευχθείσα αξιοπιστία 97.5%, και τα δύο καλύτερα από αυτά της μη παραμετρικής μεθόδου, τα οποία ήταν 242.8 και 96.6%, αντίστοιχα. Σε αυτές τις προσομοιώσεις αλλάξαμε ελαφρώς τον αλγόριθμο της μη παραμετρικής μεθόδου έτσι ώστε αν ο ένας ταμειυτήρας αδειάζει να επιτρέπεται η αύξηση



της απόληψης από τον άλλο ταμιευτήρα, ακόμη και αν κάτι τέτοιο δεν προέκυπτε από τις τιμές των μεταβλητών ελέγχου. Χωρίς αυτή την αλλαγή τα αποτελέσματα της μη παραμετρικής μεθόδου θα ήταν χειρότερα από αυτά που έχουμε ήδη αναφέρει.

Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι παρότι χρησιμοποιήθηκε ένας πολύ ισχυρός εξελικτικός αλγόριθμος, λόγω του μεγάλου αριθμού μεταβλητών του προβλήματος, η μη παραμετρική μέθοδος δεν οδηγούσε πάντοτε σε αποτελέσματα τόσο καλά όσο αυτά της παραμετρικής μεθόδου εάν οι αρχικές της τιμές ήταν αυθαίρετες. Αντιθέτως μάλιστα πολλές φορές έδινε αποτελέσματα πολύ χειρότερα από αυτά της παραμετρικής μεθόδου και ήταν απαραίτητη η αρχικοποίηση με τα αποτελέσματα που προέκυπταν από την παραμετρική μέθοδο για τη βελτίωση της απόδοσης της μη παραμετρικής. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και αν επιλεχθεί η μη παραμετρική μέθοδος για τη μοντελοποίηση ενός συστήματος ταμιευτήρων, η παραμετρική μέθοδος θα είναι και πάλι χρήσιμη για την αρχικοποίηση του μη παραμετρικού μοντέλου.

Τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζει μια περαιτέρω διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για την κατηγορία προβλημάτων V (μεγιστοποίηση υδρευτικής απόληψης) κατά την οποία παραμένει σταθερή η χρονοσειρά των εισροών στο σύστημα των ταμιευτήρων αλλά οι απολήψεις από τους ταμιευτήρες παίρνουν εντελώς τυχαίες τιμές. Εκτελούνται σαράντα (40) τέτοιες δοκιμές. Η αστοχία του συστήματος παραμένει σταθερή και ίση με 12,5% για το σύνολο των εν λόγω δοκιμών. Συγκρίνοντάς τη με το μέσο όρο της αστοχίας που παρουσιάζεται στο σύστημα κατά τη μη παραμετρική προσέγγιση για τις τυχαίες χρονοσειρές εισροών μπορούμε να συμπεράνουμε ότι κατά τη μη παραμετρική προσέγγιση αν ξεφύγουμε από τις συγκεκριμένες τιμές των εισροών για τις οποίες έχουμε βελτιστοποιήσει το σύστημα, η αστοχία του συστήματος πλησιάζει κατά μέσο όρο την αστοχία που θα είχαμε στο σύστημα με εντελώς τυχαία διαχείριση αυτού.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα της εκτεταμένης ανάλυσης αυτής της μελέτης υποδεικνύουν καθαρή ανωτερότητα της παραμετρικής μεθόδου έναντι της μη παραμετρικής προσέγγισης.

## 6. Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα

Προσεγγίστηκε το πρόβλημα βέλτιστης διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων αφ' ενός με παραμετροποίηση του προβλήματος και βελτιστοποίηση των παραμέτρων αυτού και αφ' έτερου με άμεση βελτιστοποίηση του συνόλου των απολήψεων όλων των χρονικών βημάτων. Στόχος ήταν η αξιολόγηση της μεθόδου παραμετροποίησης σε σχέση με τη μέθοδο μη παραμετρικής βελτιστοποίησης. Η αξιολόγηση της πρώτης μεθόδου έγινε μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων της με αυτά της δεύτερης μεθόδου. Σαν μια επιπλέον σύγκριση ως προς τις δύο παραπάνω μεθόδους χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος του “ισοδύναμου ταμιευτήρα”.

Η παραμετρική μέθοδος βασίστηκε σε πρόσφατη έρευνα [Nalbantis and Koutsoyannis, 1997], η οποία απέδειξε την καταλληλότητα της χρήσης παραμετρικών κανόνων λειτουργίας στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης συστημάτων ταμιευτήρων. Ο παραμετρικός κανόνας διαχείρισης αποτελεί γενίκευση του χωρικού κανόνα και συνιστά το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας.

Ως σύστημα ελέγχου διαμορφώθηκε ένα υποθετικό σύστημα δύο ταμιευτήρων στο οποίο αποδόθηκαν κάποια εύλογα χαρακτηριστικά. Το σύστημα προσομοιώθηκε με μηνιαίο χρονικό βήμα για μια περίοδο από 16 έως 50 χρόνια, ανάλογα με το προς βελτιστοποίηση πρόβλημα. Μελετήθηκαν διεξοδικά τρία προβλήματα βέλτιστης διαχείρισης συστημάτων ταμιευτήρων:

1. εκτιμήθηκαν οι μέγιστες δυνατές εκροές του συστήματος των δύο ταμιευτήρων
2. εκτιμήθηκαν οι εκροές του συστήματος έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος μεταφοράς του νερού και τέλος
3. υπολογίστηκαν οι ποσότητες παραγόμενης ενέργειας και το προκύπτον μέγιστο οικονομικό όφελος από αυτή.

Η παραμετρική προσέγγιση του προβλήματος ξεκίνησε με την εισαγωγή των αρχικών τιμών των λειτουργικών συντελεστών παραμέτρων. Συνέχισε με τη λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος ταμιευτήρων με ικανοποίηση όλων των φυσικών και των εσωτερικών λειτουργικών περιορισμών του. Ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης ήταν άλλοτε 4 (δύο ζεύγη παραμέτρων), άλλοτε 2 και άλλοτε 1. Τελικός στόχος της προσομοίωσης ήταν ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία και βελτιστοποιήθηκε. Μέσω της βελτιστοποίησης υπολογίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων.

Η άμεση, μη παραμετρική βελτιστοποίηση του συνόλου των απολήψεων έπεται της κατασκευής της αντικειμενικής συνάρτησης και όλων των φυσικών και των εσωτερικών λειτουργικών περιορισμών του προβλήματος. Η βελτιστοποίηση ως προς τις απολήψεις του συστήματος γίνεται σε τρόπο ώστε να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι εξωτερικοί λειτουργικοί περιορισμοί αυτού. Ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης ήταν άλλοτε 350 (μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης, ελαχιστοποίηση αρδευτικού κόστους), άλλοτε 192

(μεγιστοποίηση υδρευτικής απόληψης, ελαχιστοποίηση υδρευτικού κόστους) και άλλοτε 384 (μεγιστοποίηση ενεργειακού οφέλους).

Στα πλαίσια της εργασίας σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν 41 παραλλαγές των τριών αρχικών προβλημάτων βελτιστοποίησης καθένα από τα οποία αντιμετωπίστηκε με τις τρεις μεθόδους επίλυσης (παραμετρικός κανόνας, ισοδύναμος ταμιευτήρας, μη παραμετρική βελτιστοποίηση). Οι παραλλαγές είχαν να κάνουν με την εφαρμογή δύο διαφορετικών υδρολογικών σεναρίων, με τα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων και με το πλήθος των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση κατά την εφαρμογή του γενικευμένου παραμετρικού κανόνα διαχείρισης.

Τα αποτελέσματα των εφαρμογών ανακεφαλαιώθηκαν και συγκρίθηκαν στους συγκεντρωτικούς πίνακες 6, 7 και 8 που έχει ήδη παρουσιαστεί. Η συγκριτική μελέτη των στοιχείων αυτών των πινάκων, καθώς και η όλη ανάλυση που προηγήθηκε μας επιτρέπουν να εξαγάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα που αποτελούν και πλεονεκτήματα της παραμετρικής μεθόδου έναντι της μη παραμετρικής:

1. Η παραμετρική μέθοδος είναι ιδιαίτερα απλή συγκρινόμενη με τη μη παραμετρική μέθοδο. Η απλότητα αυτή απεικονίζεται στο γεγονός ότι ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης της παραμετρικής μεθόδου είναι εξαιρετικά μικρός σε σχέση με αυτόν της μη παραμετρικής προσέγγισης. Στην πρώτη περίπτωση μιλάμε για κάποιες μονάδες μεταβλητών απόφασης ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο αριθμός αυτός φτάνει τις εκατοντάδες, χιλιάδες, ακόμη και δεκάδες χιλιάδες μεταβλητών (ανάλογα με την περίοδο προσομοίωσης του προβλήματος).
2. Ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος της παραμετρικής μεθόδου αυξάνει γραμμικά με τον αριθμό των χρονικών βημάτων της προσομοίωσης. Η αντίστοιχη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου της μη παραμετρικής μεθόδου μπορεί να είναι ακόμη και εκθετική σε σχέση με την αντίστοιχη χρονική περίοδο προσομοίωσης.
3. Η παραμετρική μέθοδος είναι εξ ορισμού συνδεδεμένη με το μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος. Ενοποιεί τις στοχαστικές και ντετερμινιστικές συνιστώσες αυτού, και περιγράφει τη δυναμική του συστήματος με μεγάλη ακρίβεια αποφεύγοντας απλοποιήσεις στις εσωτερικές διεργασίες της προσομοίωσης (π.χ. γραμμικοποιήσεις).
4. Η παραμετρική μέθοδος είναι θεωρητικά συνεπής με τη στοχαστική φύση των προβλημάτων ταμιευτήρων. Ενσωματώνει έννοιες όπως η πιθανότητα, η αξιοπιστία, η αναμενόμενη τιμή κλπ και αποδίδει σε αυτές συγκεκριμένες τιμές.
5. Οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης δεν εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη χρονοσειρά εισροών (ή από οποιοδήποτε άλλο μέγεθος στοχαστικής φύσης) που εισάγεται σαν δεδομένο εισόδου στο μοντέλο προσομοίωσης. Έτσι η αλλαγή των δεδομένων εισόδου, δηλαδή η μεταβολή της σειράς εισροών στο σύστημα (χωρίς βέβαια μεταβολή των στατιστικών χαρακτηριστικών της) δεν συνεπάγεται αλλαγή στις τιμές των παραμέτρων του προβλήματος. Οι βέλτιστες αυτές τιμές ενσωματώνουν τα

χαρακτηριστικά του συστήματος ταμιευτήρων, τα χαρακτηριστικά των εισροών, τους περιορισμούς του προβλήματος και τους αντικειμενικούς στόχους της επίλυσης. Έτσι οι τιμές των παραμέτρων πρέπει να αλλάξουν εάν και το σύστημα που μελετάται μετατραπεί (π.χ. με πρόσθεση ενός νέου ταμιευτήρα) ή εάν το υδρολογικό καθεστώς αλλάξει (π.χ. αλλάξει η μέση ετήσια εισροή σαν αποτέλεσμα κλιματικής αλλαγής) ή διαμορφωθεί κάποιος καινούριος αντικειμενικός στόχος ή μεταβληθούν οι περιορισμοί του συστήματος (π.χ. επίτευξη υψηλότερου επιπέδου αξιοπιστίας). Τέτοιου είδους αλλαγές μπορούν με απλό τρόπο να αντιμετωπιστούν καθώς η παραμετρική προσέγγιση είναι πολύ απλή και γενική.

6. Με χρήση της παραμετρικής προσέγγισης και βελτιστοποίηση των παραμέτρων της, η λειτουργία του συστήματος μπορεί να επιτευχθεί με απλή εφαρμογή του παραμετρικού κανόνα λειτουργίας (ακόμη και της γραφικής του μορφής) χωρίς καθόλου τρεξίματα του μοντέλου προσομοίωσης. Ακολουθώντας τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι οι παράμετροι του μοντέλου και κατά συνέπεια η πολιτική λειτουργίας του συστήματος δεν εξαρτώνται από την πρόγνωση των τιμών των εισροών, πρόγνωση η οποία σε γενικές γραμμές δεν μπορεί παρά να είναι φτωχή.

Σε πρακτικό πια επίπεδο και βάσει των 41 προβλημάτων που εξετάστηκαν στα πλαίσια της εργασίας αναδεικνύεται ότι η μέθοδος παραμετροποίηση – προσομοίωση – βελτιστοποίηση αν εφαρμοστεί με δύο ζεύγη παραμέτρων ανά ταμιευτήρα, ένα για την ξηρή και ένα για την υγρή περίοδο, καταλήγει σε αποτελέσματα ισοδύναμα με αυτά της μη παραμετρικής μεθόδου μεγάλου αριθμού μεταβλητών, παρά την τεράστια διαφορά που υπάρχει στον αριθμό των μεταβλητών απόφασης μεταξύ των δύο μεθόδων. Ειδικότερα στις περιπτώσεις που ο αντικειμενικός στόχος είναι η μεγιστοποίηση των απολήψεων ή η ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς, οι λύσεις που επιτεύχθηκαν ήταν σχεδόν ταυτόσημες. Η μέθοδος του ισοδύναμου ταμιευτήρα έδωσε, όπου αυτή ήταν εφαρμόσιμη, αποτελέσματα ταυτόσημα με τις άλλες δύο μεθόδους. Επίσης η παραμετρική μέθοδος, ακόμη και με μία παράμετρο ανά ταμιευτήρα, κατέληξε σε πολύ καλά αποτελέσματα μόνο κατά 3% (ή και λιγότερο) κατώτερα από αυτά της μη παραμετρικής μεθόδου.

Στην περίπτωση που ο αντικειμενικός στόχος είναι η μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους από την παραγωγή ενέργειας, η μη παραμετρική μέθοδος βελτίωσε φαινομενικά τα αποτελέσματά της σε σχέση με αυτά που έδωσε η παραμετρική μέθοδος (με δύο ζεύγη παραμέτρων ανά ταμιευτήρα) κατά 2.1%. Όμως μια πιο προσεκτική διερεύνηση των αποτελεσμάτων όλων των μεθόδων έδειξε ότι αυτή η βελτίωση βασίζεται στην υπόθεση ότι οι μελλοντικές εισροές είναι πλήρως προβλέψιμες για ένα αυθαίρετα μεγάλο χρονικό διάστημα. Μια τέτοια υπόθεση είναι αβάσιμη. Θεωρώντας λοιπόν άγνωστες τις χρονοσειρές των εισροών, όπως άλλωστε συμβαίνει στην πραγματικότητα, η μη παραμετρική μέθοδος καταλήγει σε συμπεράσματα φανερά κατώτερα από αυτά της παραμετρικής μεθόδου.

Συμπερασματικά και με βάση όλα όσα αναφέρθηκαν πιο πάνω, τα αποτελέσματα της εκτεταμένης ανάλυσης αυτής της μελέτης υποδεικνύουν καθαρή ανωτερότητα της παραμετρικής μεθόδου έναντι της μη παραμετρικής προσέγγισης.

## Βιβλιογραφία

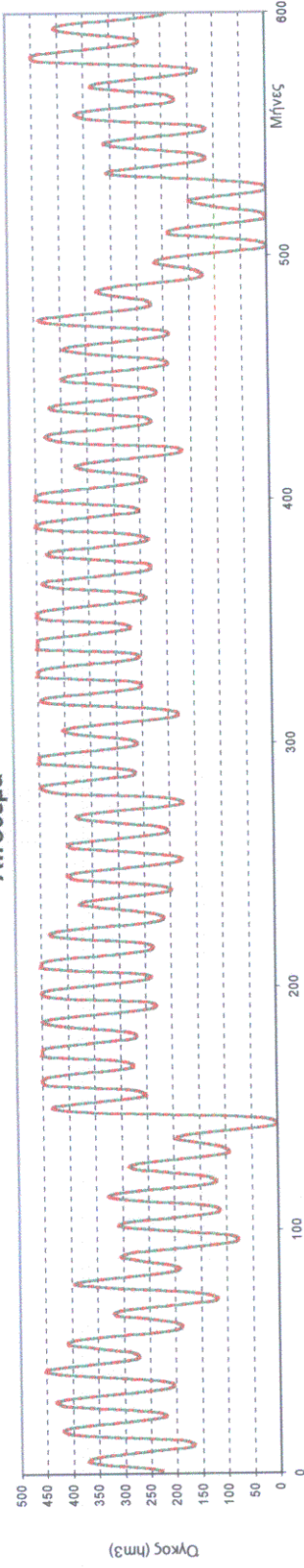
- Ευστρατιάδης Α., Ζερβός Ν., 1999. Διπλωματική Εργασία, *Βέλτιστη διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων. Εφαρμογή στο σύστημα Αχελώου – Θεσσαλίας*, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης, Δ., 1996. Μελέτη λειτουργίας ταμιευτήρων, *Γενική διάταξη έργων εκτροπής Αχελώου προς Θεσσαλία*, Εργοδότης: Μελετητής: ΕΥΔΕ Αχελώου, Σύμβουλοι: Γ. Καλαούζης, ELECTROWATT, Π. Μαρίνος, Δ. Κουτσογιάννης, Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, 420 σσ., Αθήνα.
- Μιμίκου, Μ., 1994. *Τεχνολογία Συστημάτων Υδατικών Πόρων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, ISBN 960-7510-04-6.
- Banzhaf B., Nordin P., Keller R., Francone F., 1998. *Genetic Programming An Introduction On the Automatic Evolution of Computer Programs and Its Applications*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc. San Francisco, California
- Bower, B. T., M. M. Hufschmidt, and W. H. Reedy, 1962. *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.
- Clark, E. J., 1950. *New York control curves*, Journal of American Water Works Association, 42(9), 823-827.
- Clark, E. J., 1956. Impounding reservoirs, Journal of American Water Works Association, 48(4), 349-354.
- Cohon, J. N., 1978. *Multiobjective Programming and Planning*, Academic Press, ISBN 0-12-178350-2
- Foufoula-Georgiou, E., and P. K. Kitanidis, 1988. *Gradient dynamic programming for stochastic optimal control of multidimensional water resources systems*, Water Resour. Res., 24(8), 1345-1359
- Foufoula-Georgiou, E., 1991. *Convex Interpolation for gradient dynamic programming*, Water Resour. Res., 27(1), 31-36.
- Galan M., Winterm G., Montero G., Greiner D., Periaux J., Mantel B., 1996. *A Transonic Flow Shape Optimization using Genetic Algorithms*, Computational Methods in Applied Sciences '96, John Wiley & Sons.
- Gelsey A., Knight D., Gao S., Schwabacher M., 1995. *NPARC Simulation and Redesign of the NASA P2 Hypersonic Inlet*, AIAA Paper 95-2760.
- Cembrowicz R. G., *Application of genetic algorithms in water distribution systems*
- Georgakakos, A. P., and D. H. Marks, 1987. *A new method for the real time operation of reservoir systems*, Water Resour. Res., 23(7), 1376-1390.
- Georgakakos, A. P., 1989. *Extended linear quadratic Gaussian control: Further extensions*, Water Resour. Res., 25(2), 191-201.
- Goldberg David E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, ISBN 0-201-15767-5
- Haimes, Y. Y., 1977. *Hierarchical Analyses of Water Resources Systems*, McGraw-Hill, N.Y.
- Haith, D., 1982. *Environmental Systems Optimization*, John Willey & Sons, ISBN 0-471-08287-2.
- Holland J.H., 1975. *Adaption in Natural and Artificial Systems*, MIT Press.
- Johnson, S. A., J. R. Stedinger, K. Staschus, 1991. *Heuristic operating policies for reservoir system simulation*, Water Resources Research, 27(5), 673, 685.

- Johnson, S. A., J. R. Stedinger, C. A. Shoemaker, Y. Li, and J. A. Tejada-Guibert, 1993. *Numerical solution of continuous-state dynamic programs using linear and spline interpolation*, Oper. Res., 41(3), 484-500
- Kitanidis, P. K., and Fouloula-Georgiou, 1987. *Error analysis of conventional discrete and gradient dynamic programming*, Water Resour. Res., 23(5), 845-858.
- Loucks, D.P., J. R. Stedinger, and D. A. Haith, 1981. *Water Resource Systems Planning and Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., ISBN 0-13-945923-5
- Loucks, D. P., and O. T. Sigvaldason, 1982. 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-8253, 1-103.
- Mays, L. W. and Y. K. Tung, 1996. *Systems Analysis in Water Resources Handbook*, McGraw-Hill, New York, ISBN 0-07-041150-6.
- Michalewicz Z., 1999. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs Third, Revised and Extended Edition*, Springer-Verlang.
- Nalbantis, I., and D. Koutsoyiannis, 1997. *A parametric rule for planning and management of multiple reservoir systems*, Water Resources Research, Vol 33, NO 9.
- ReVelle Charles, 1999. *Optimizing Reservoir Resources. Including a New Model for Reservoir Reliability*, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-18877-8.
- Sand, G. M., 1984. *An Analytical Investigation of Water Supply Reservoirs in Parallel*, Ph.D. theses, Cornell University, Ithaca, N.Y.
- Schwefel H., 1995. *Evolution and Optimum Seeking*, John Wiley & Sons, Inc.
- Stedinger, J. R., B.F. Sule, and D. Pei, 1983. *Multiple reservoir system screening models*, Water Resources Research, 19(6), 1383-1393.
- Shukla V., Gelsy A., Schwabacher M., Smith D., Knight D., 1996. *Automated Redesign of the NASA P8 Hypersonic Inlet using Numerical Optimization*, AIAA Paper 96-2549.
- Wasimi, S., and P.K. Kitanidis, 1983. *Real time forecasting and daily operation of a multireservoir system during floods by linear quadratic Gaussian control*, Water Resour. Res., 19(6), 1522.
- Yeh, W. W.-G., 1985. *Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review*, Water Resources Research, 21(12), 1797-1818.
- Young, G. K., 1967. *Finding reservoir operating rules*, Proc. Am. Soc. Civ. Eng., 93(HY6), 297-321.

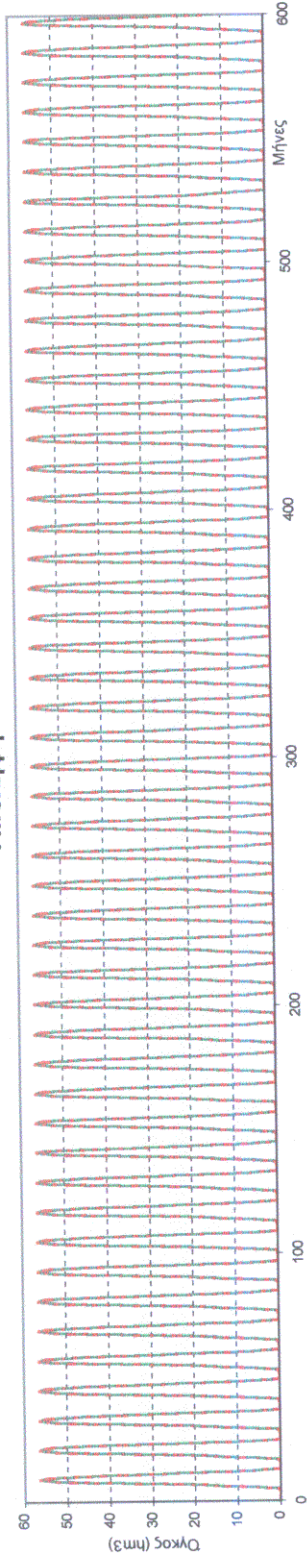
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**



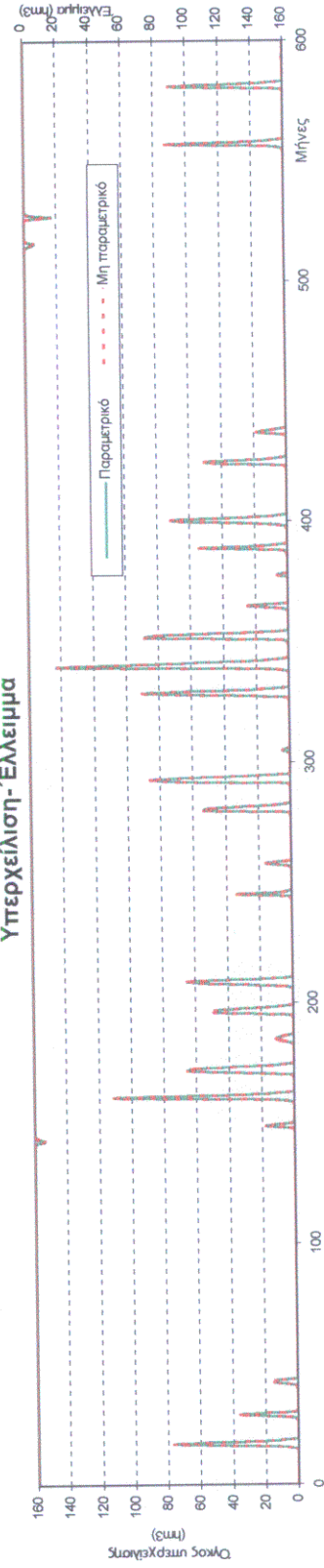
### Απόθεμα



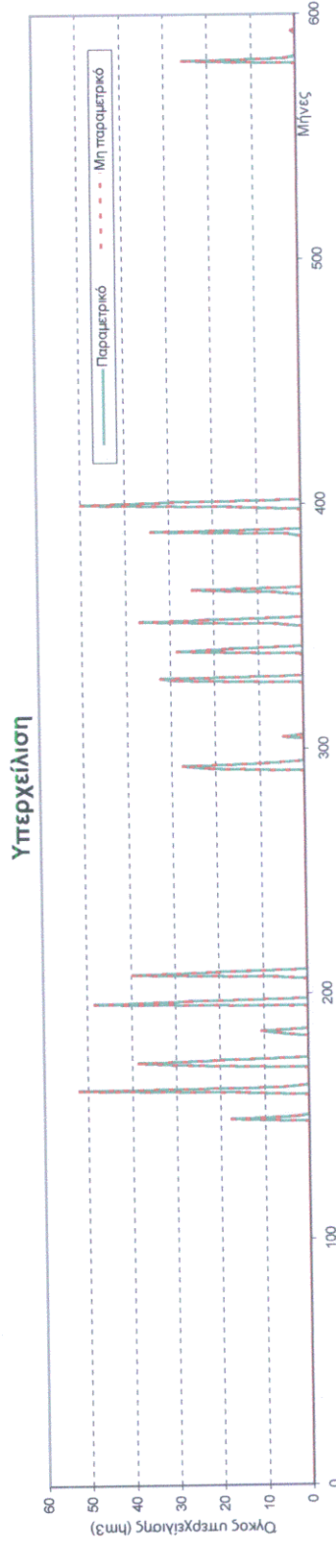
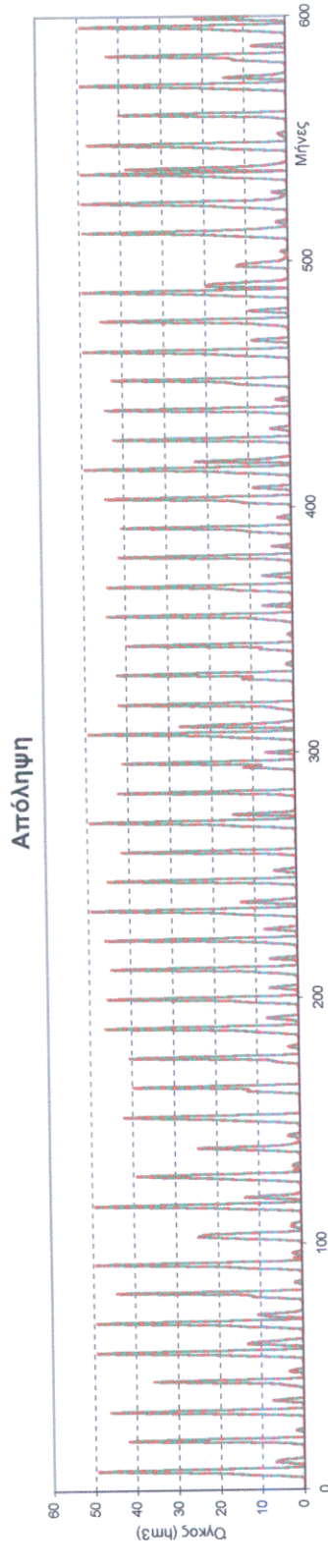
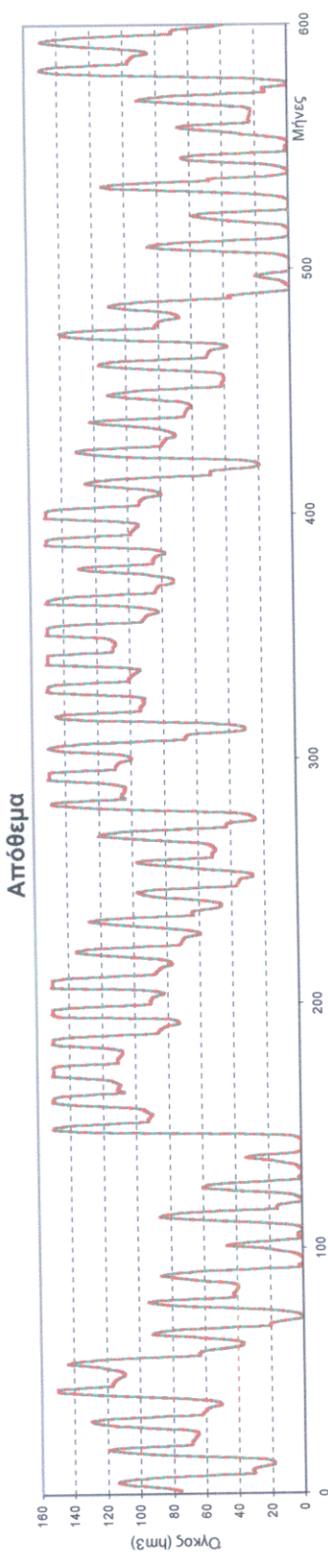
### Απόληψη



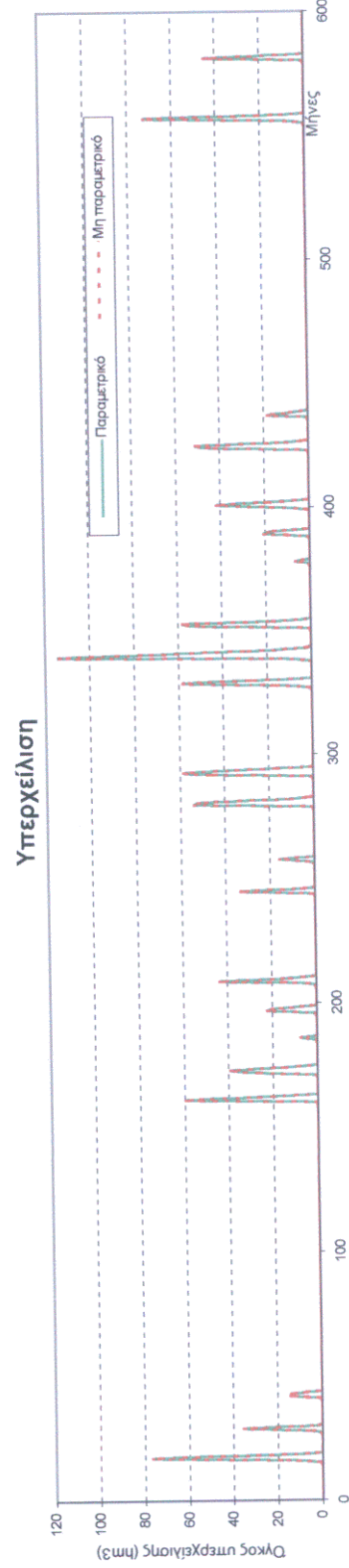
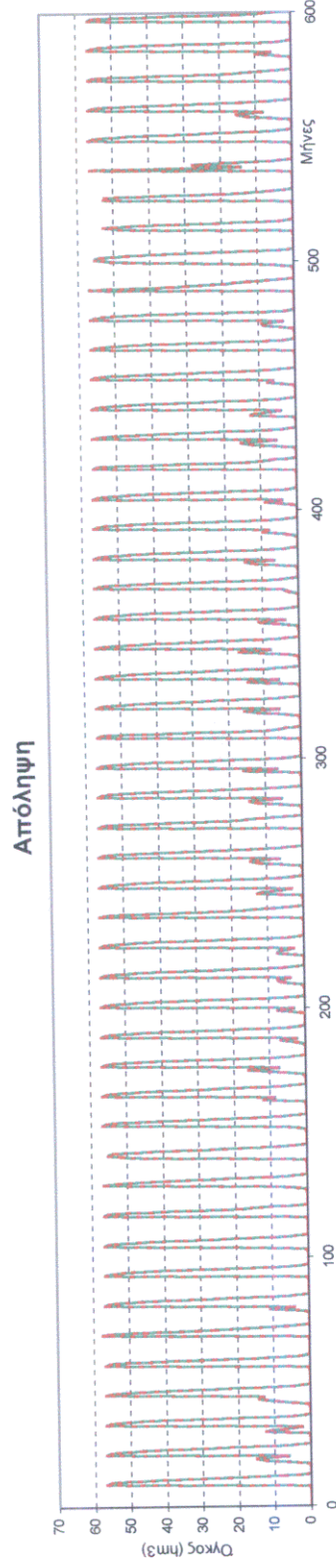
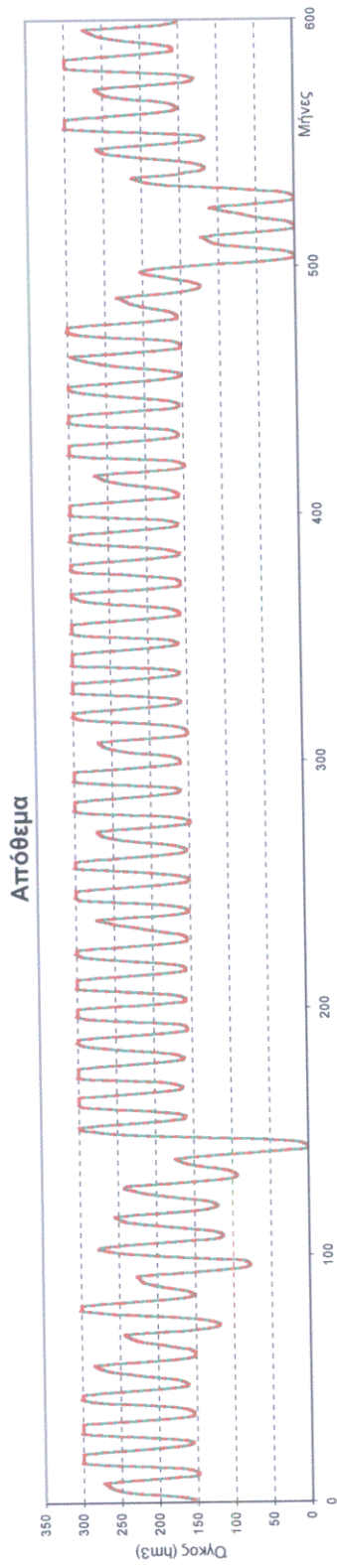
### Υπερχείλιση-Έλλειμμα



Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης\*  
Σύστημα δύο ταμειωτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληψης, υπερχείλισης και ελλείμματος

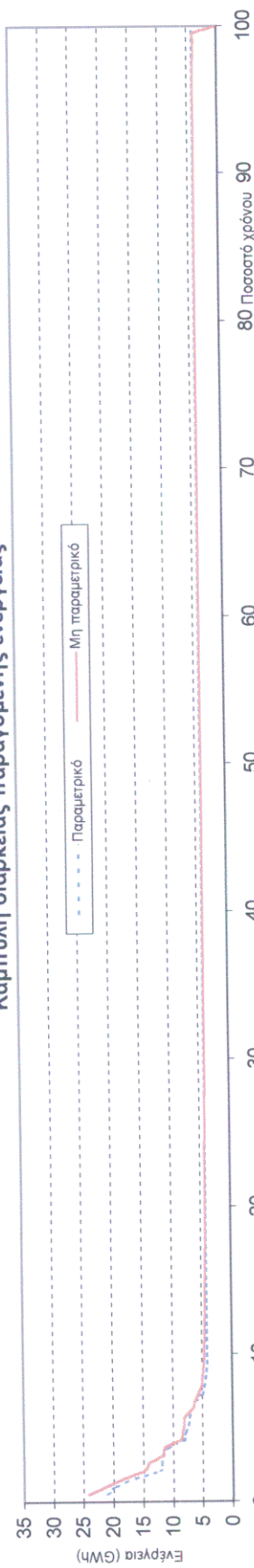


Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης \*  
 Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχειλίσης



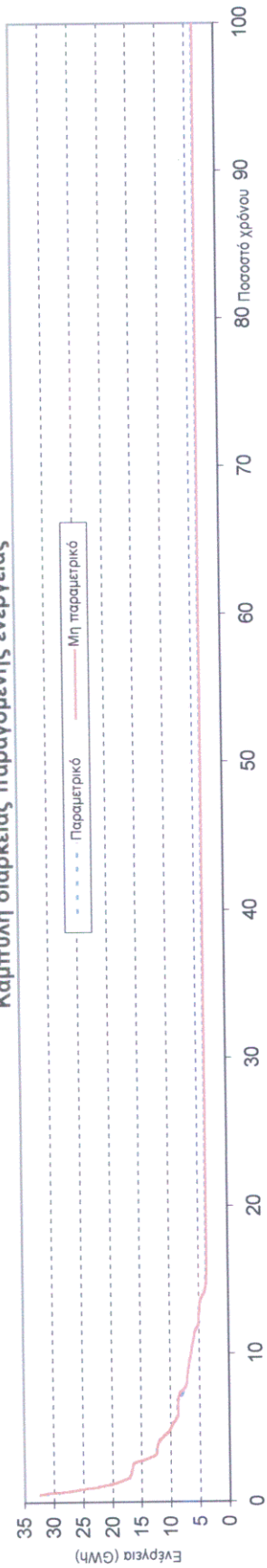
Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης\*  
 Ταμειυτήρας 2 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
 Επιδέσμευση όγκου αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης

### Καμπύλη διάρκειας παραγόμενης ενέργειας



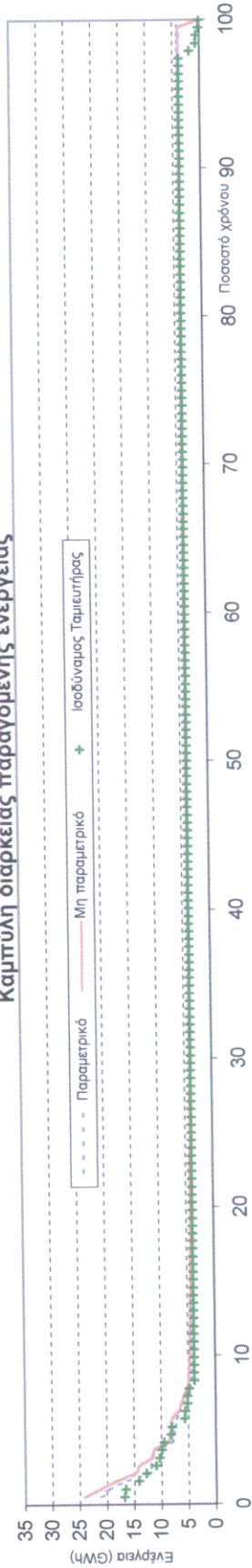
Σύστημα δύο ταμειυτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)

### Καμπύλη διάρκειας παραγόμενης ενέργειας

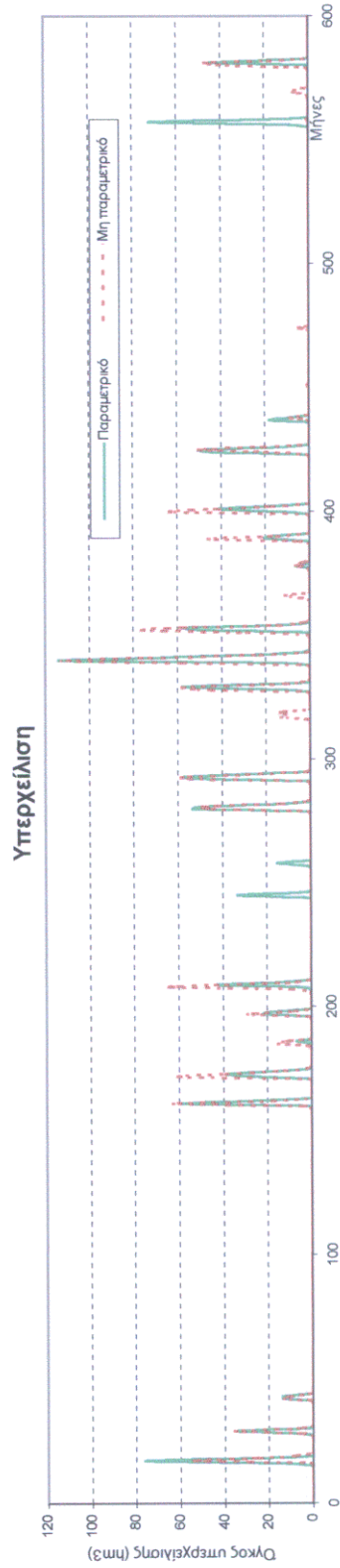
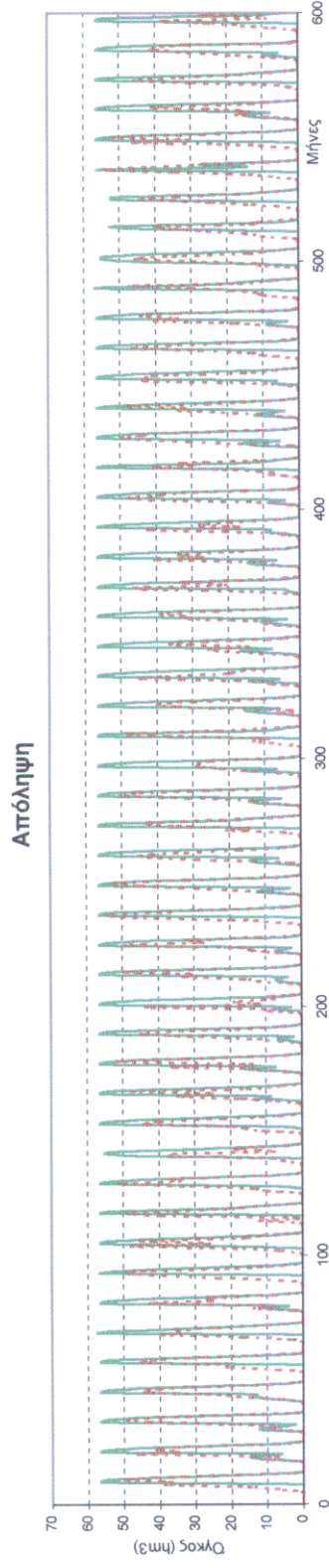
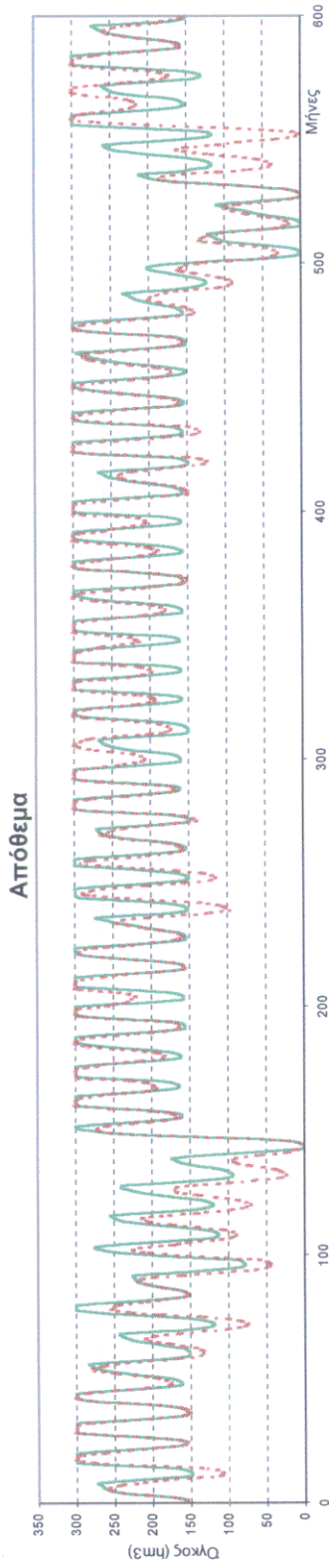


Σύστημα δύο ταμειυτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)

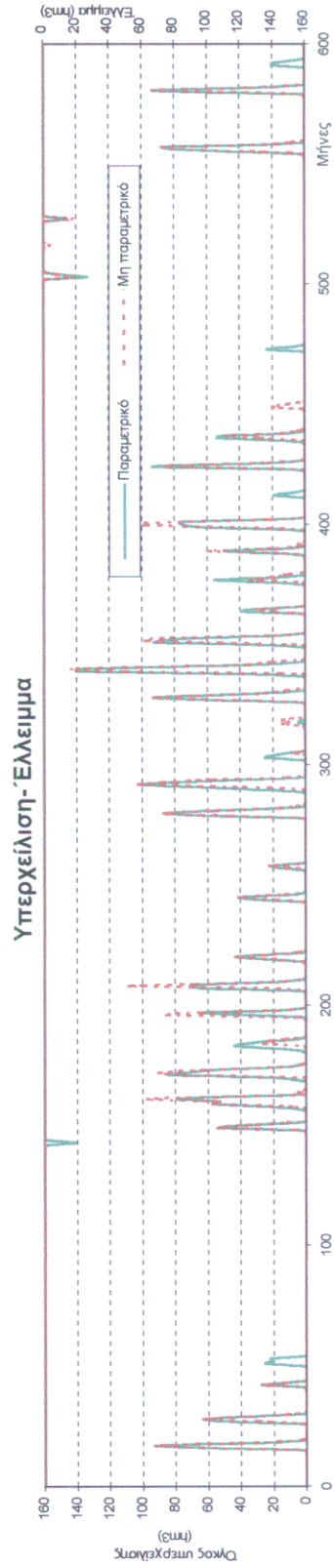
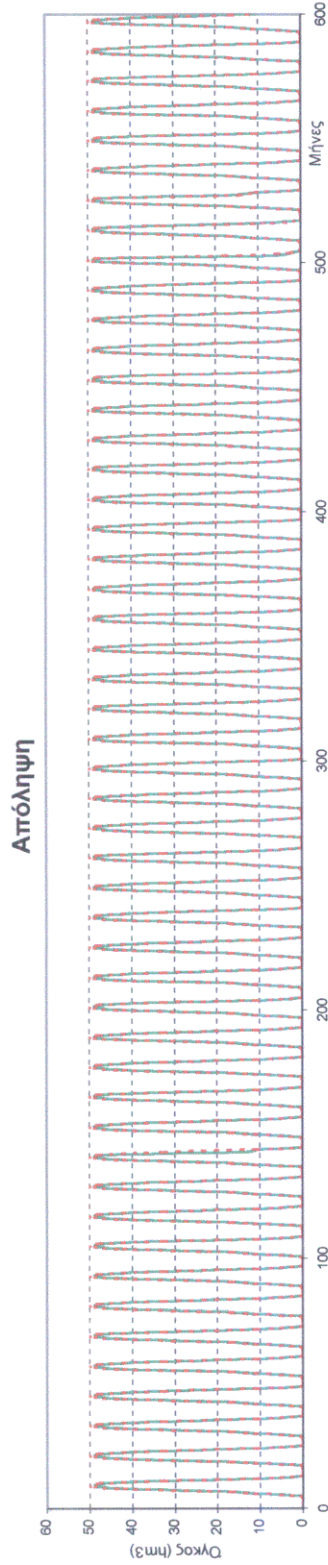
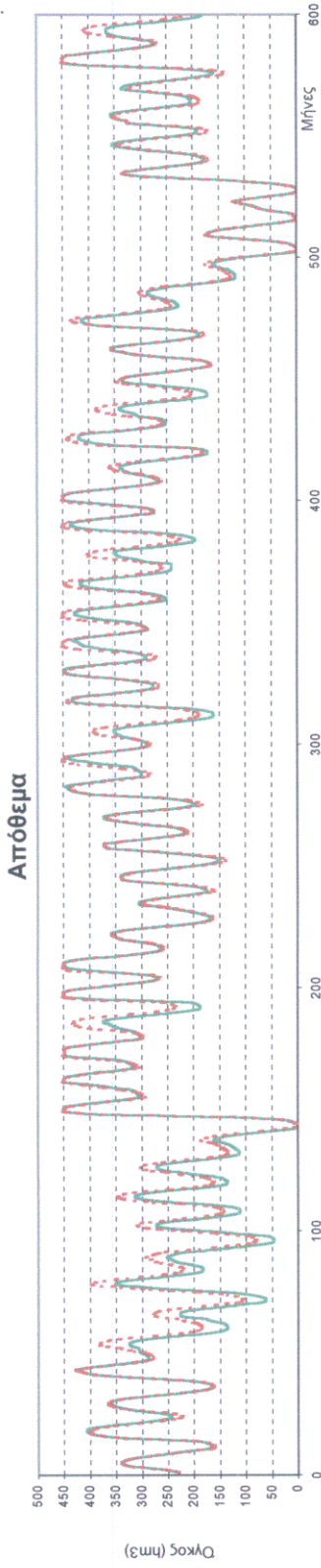
### Καμπύλη διάρκειας παραγόμενης ενέργειας



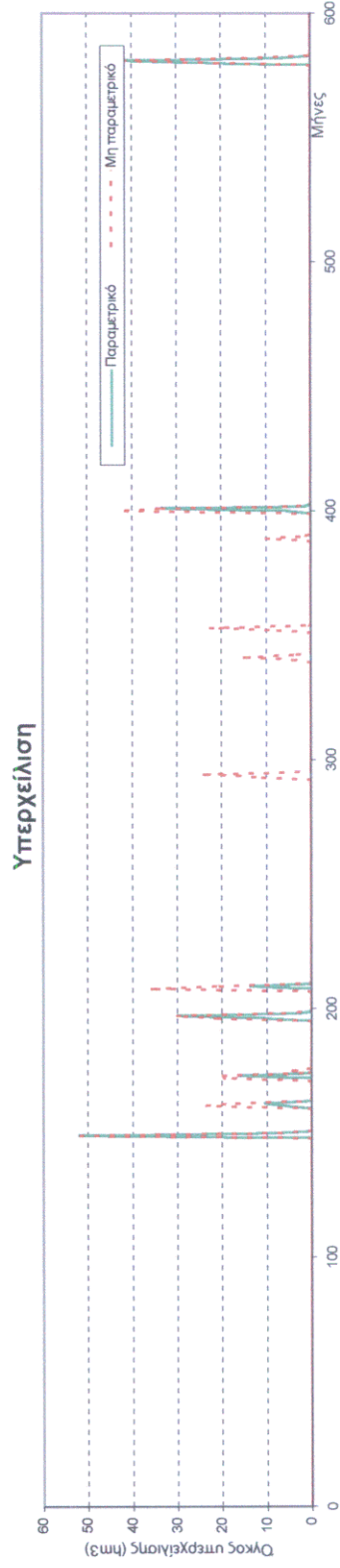
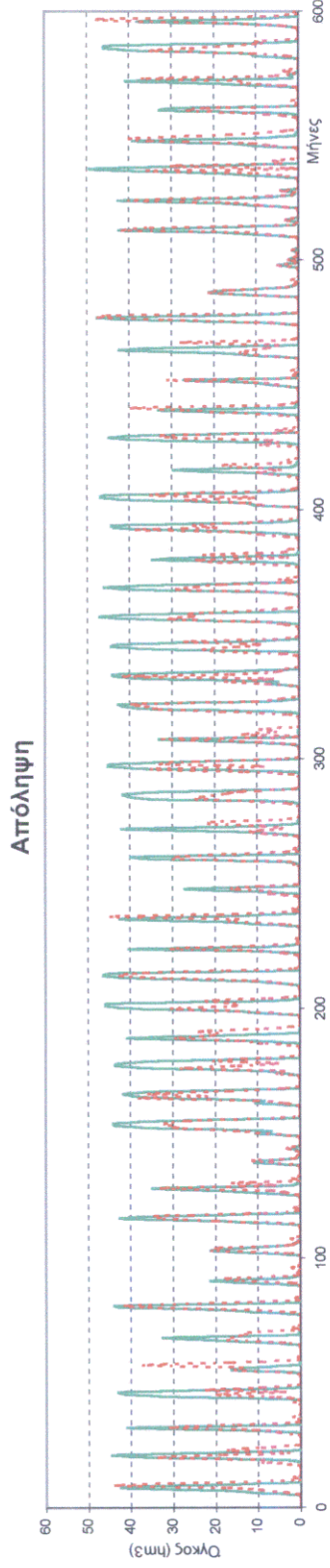
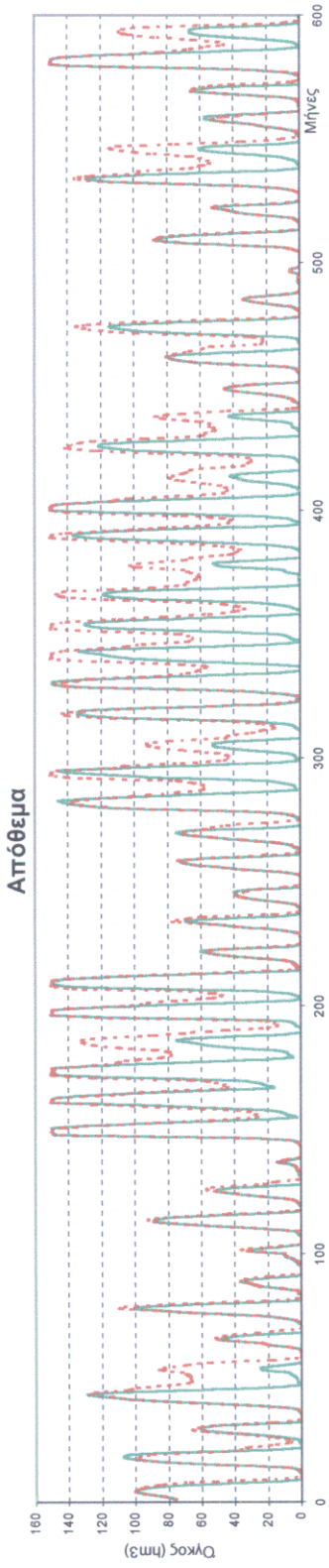
Σύστημα δύο ταμειυτήρων (σύστημα Β, σενάριο εισροών 1)  
Ισοδύναμος ταμειυτήρας



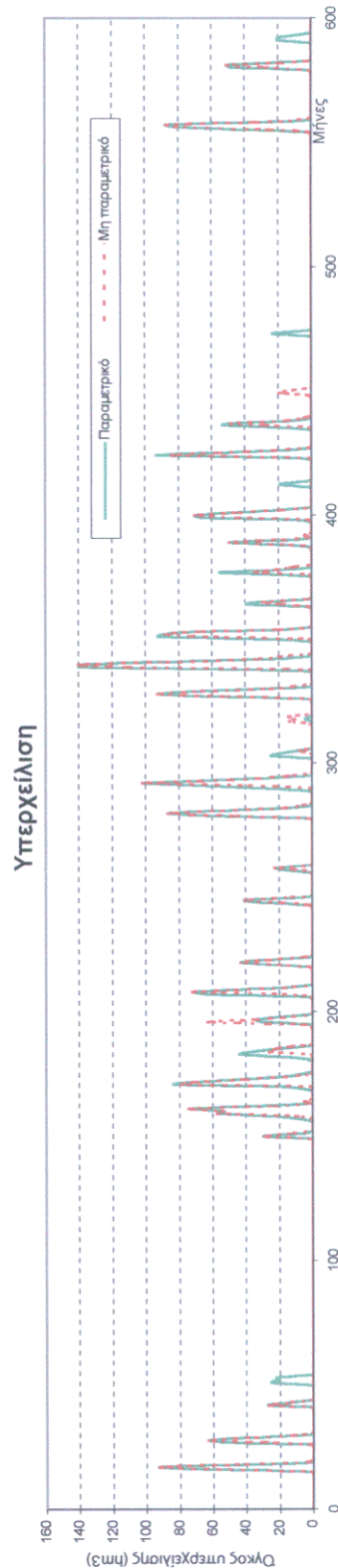
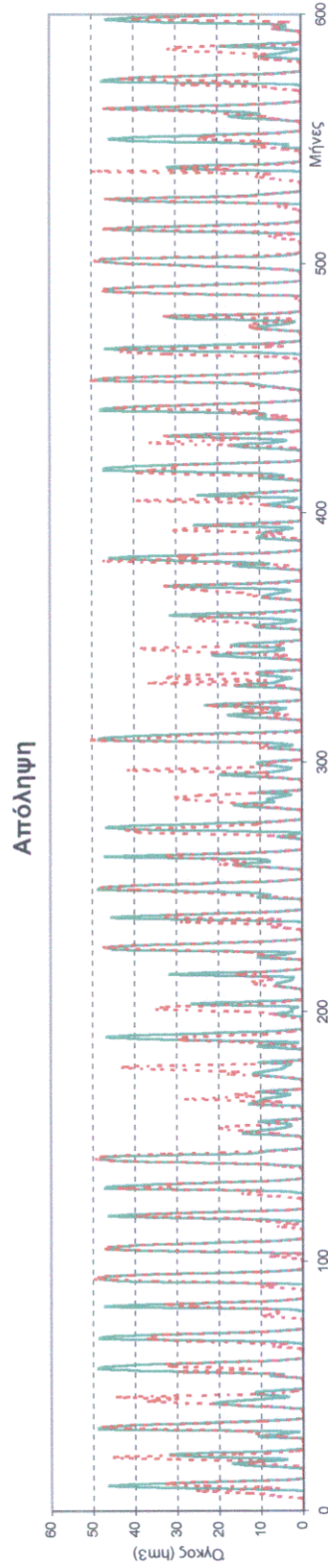
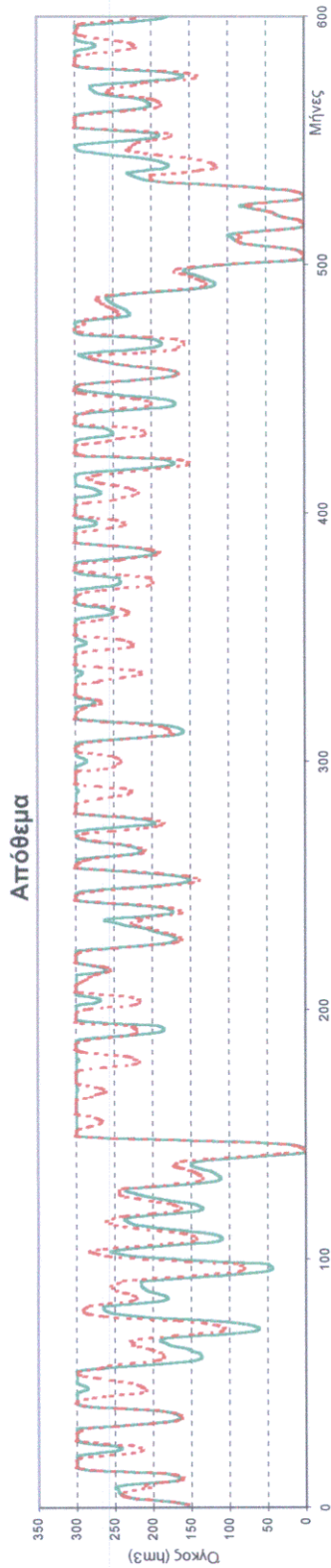
Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης  
 Ταμιευτήρας 2 (σύστημα Α, σεναρίο εισροών 1)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης



Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης \*  
 Σύστημα δύο ταμειυτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληψης, υπερχείλισης και ελλείμματος



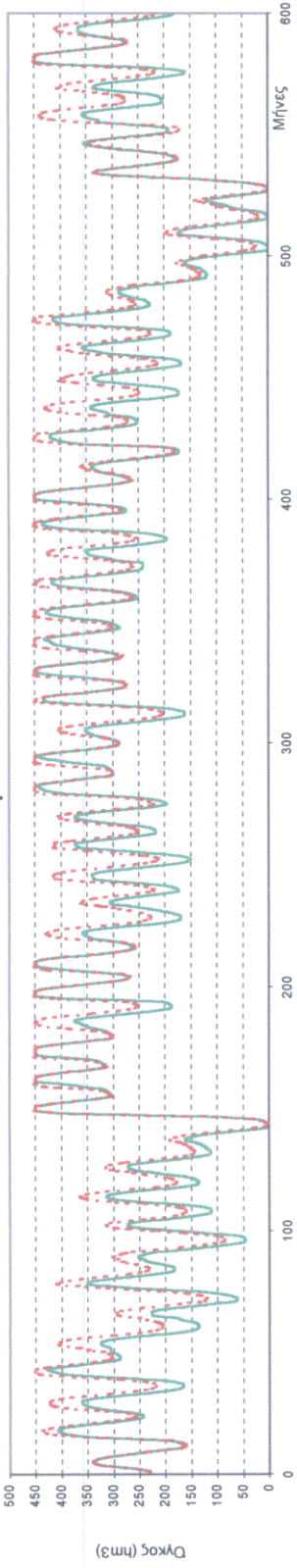
Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης \*  
 Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης



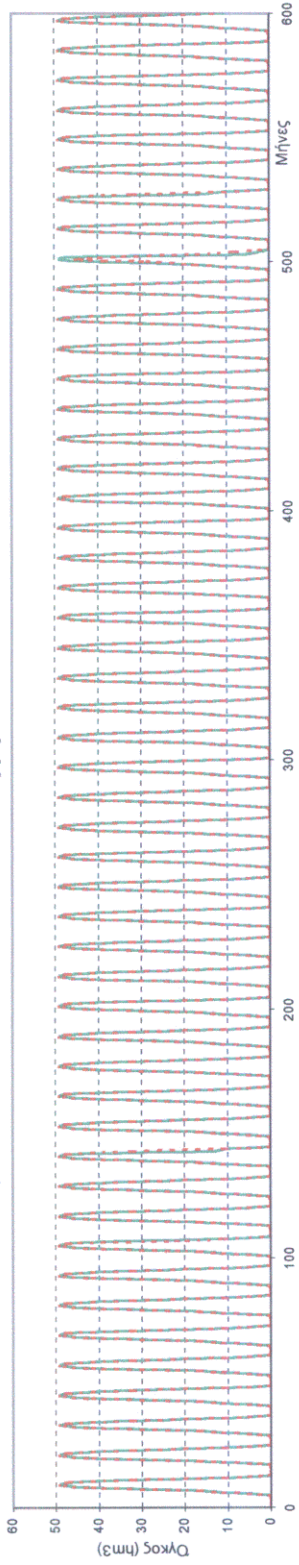
Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης \*  
 Ταμειυτήρας 2 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης



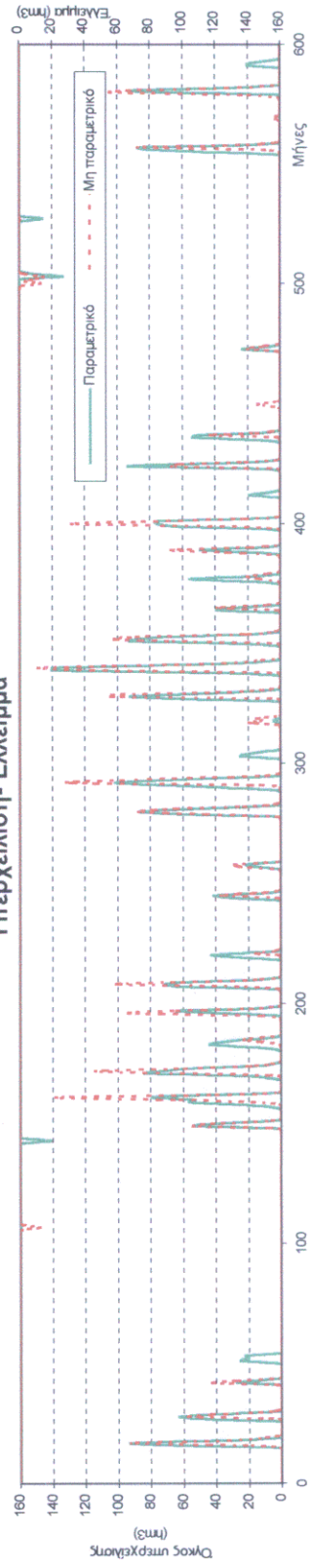
### Αποθέμα



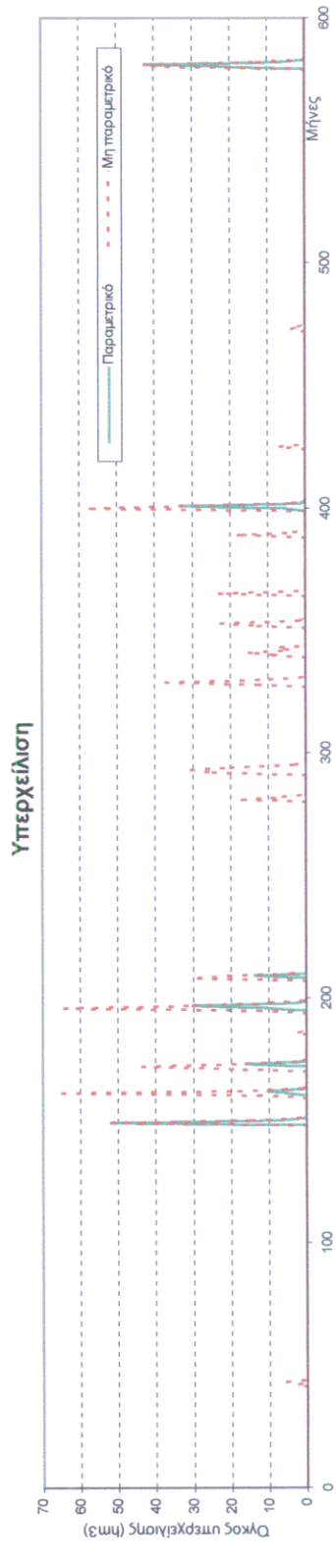
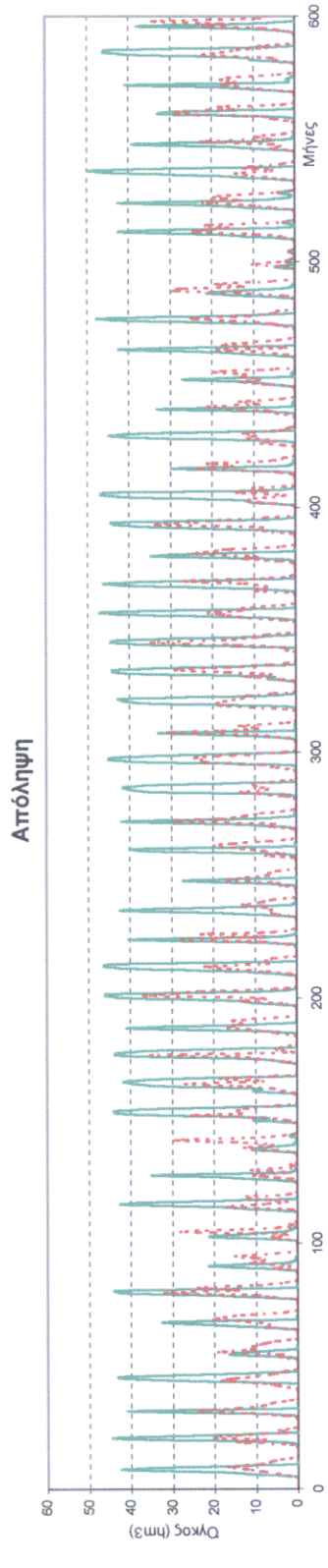
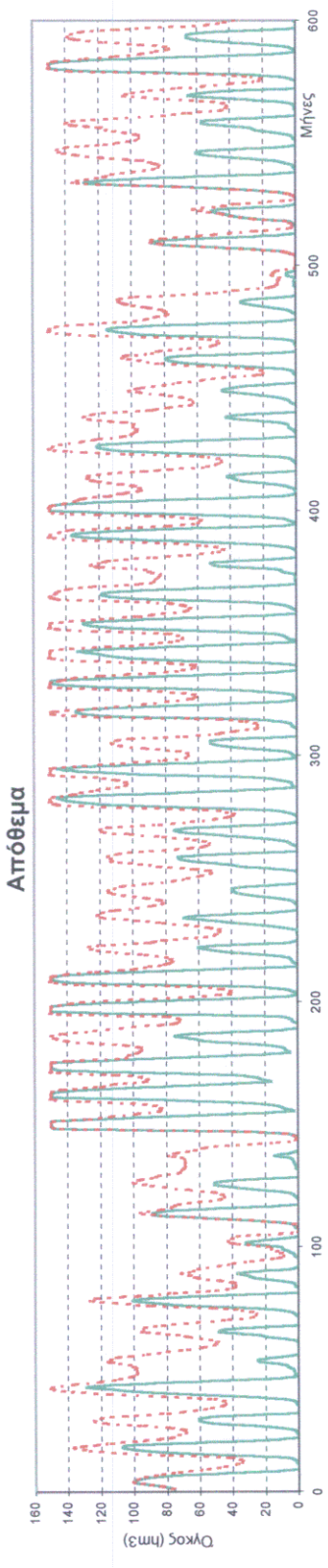
### Απόληψη



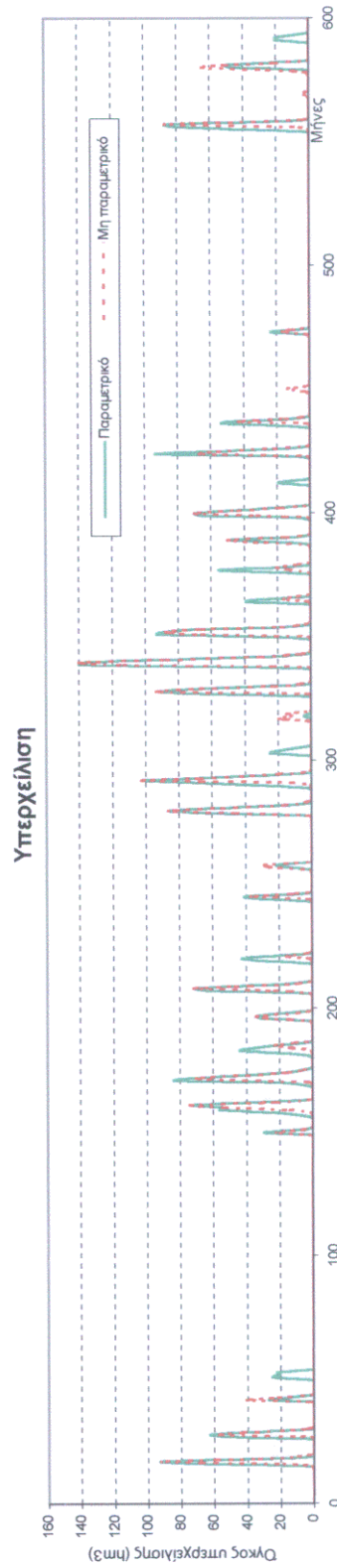
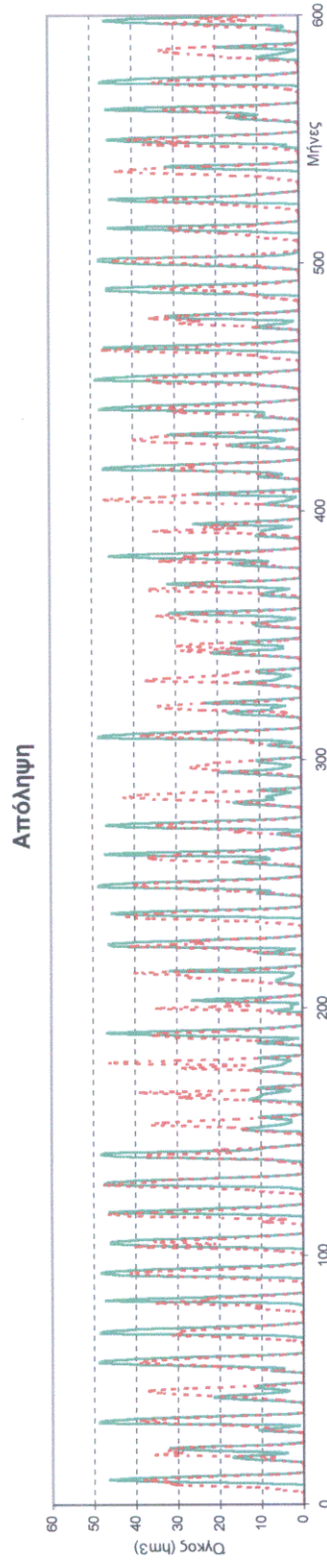
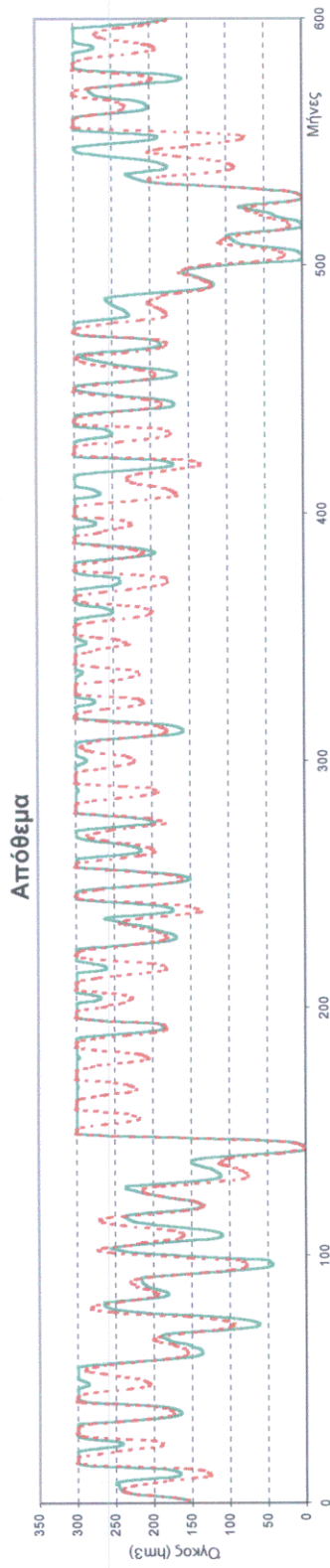
### Υπερχείλιση-Έλλειμμα



Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης  
Σύστημα δύο ταμειωτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληψης, υπερχείλισης και ελλείμματος

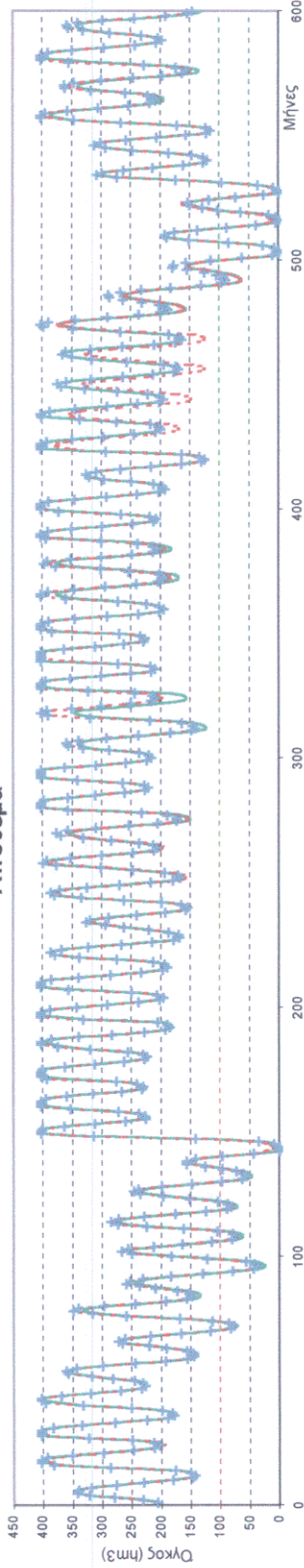


Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης  
 Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης

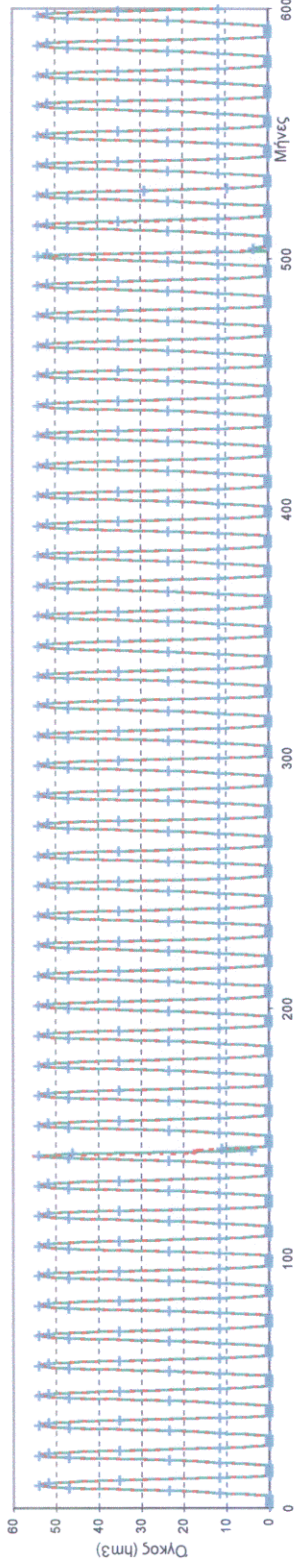


Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης  
 Ταμειυτήρας 2 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης

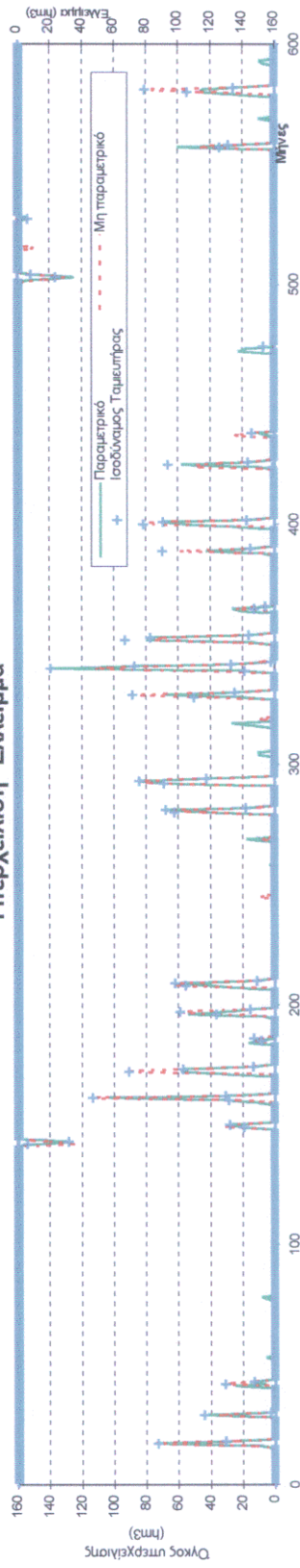
### Απόθεμα



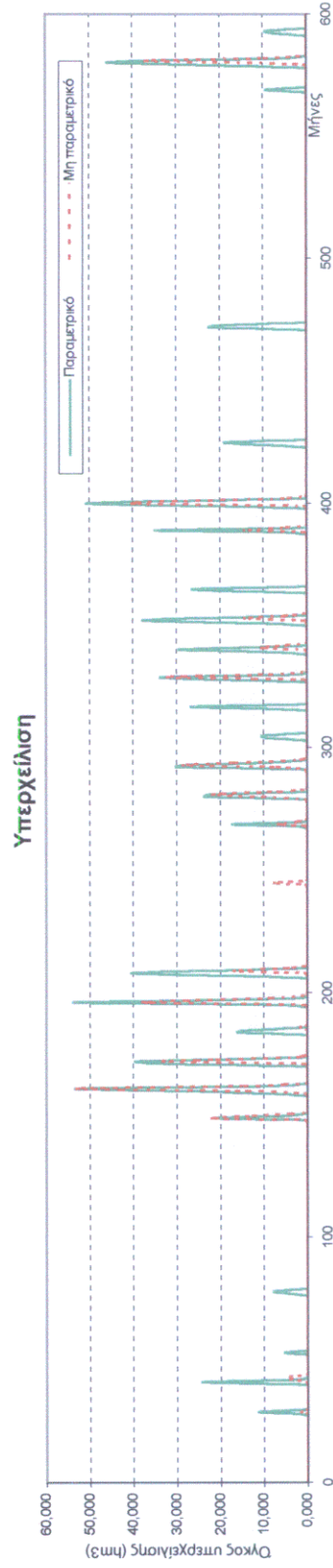
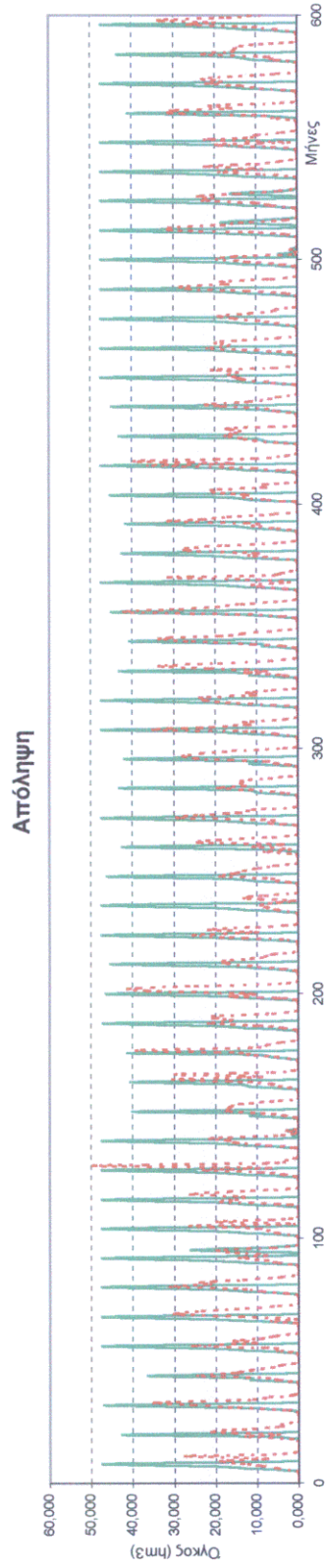
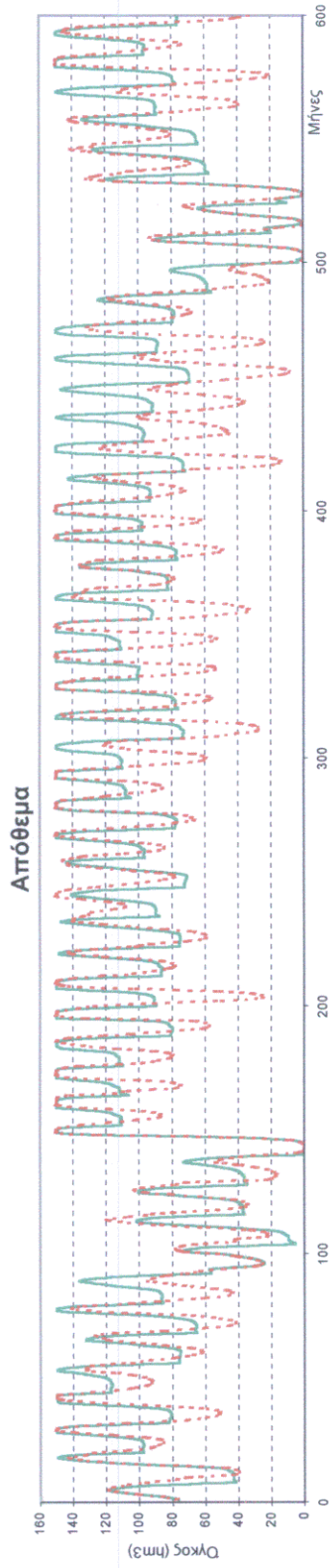
### Απόληψη



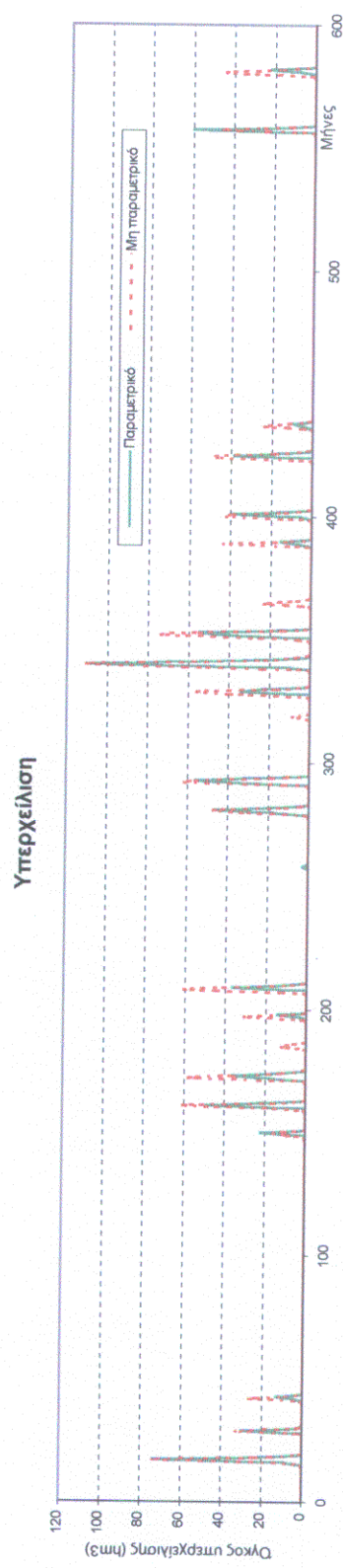
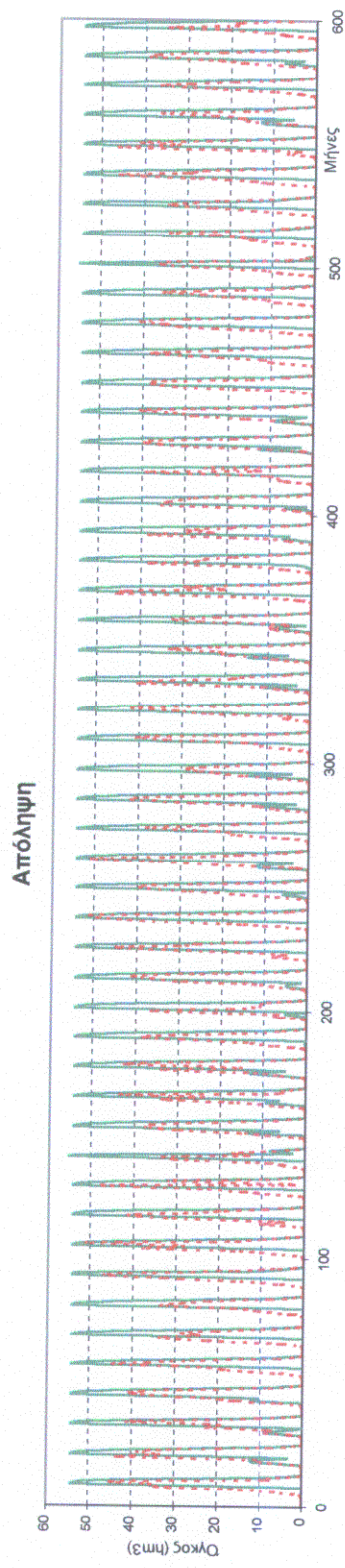
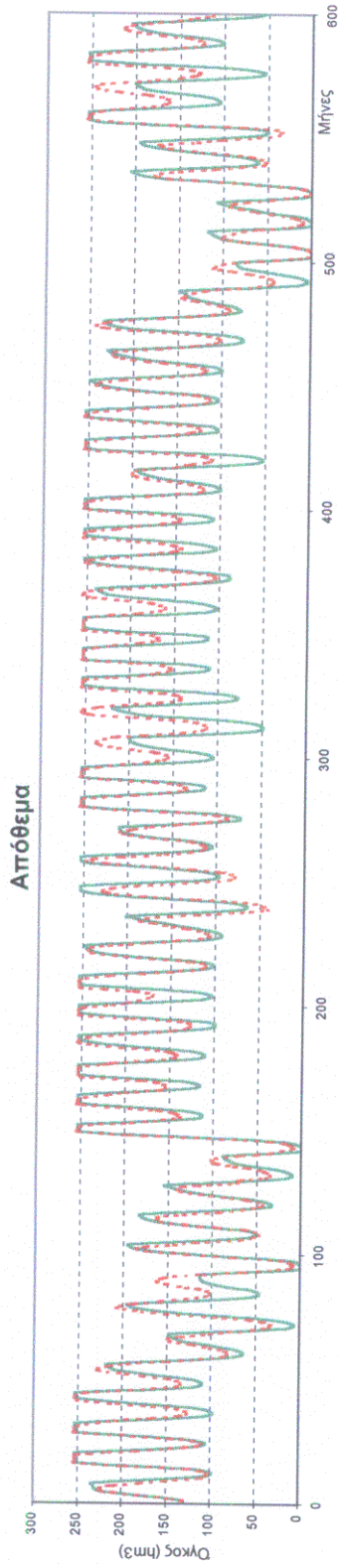
### Υπερχείλιση-Έλλειμμα



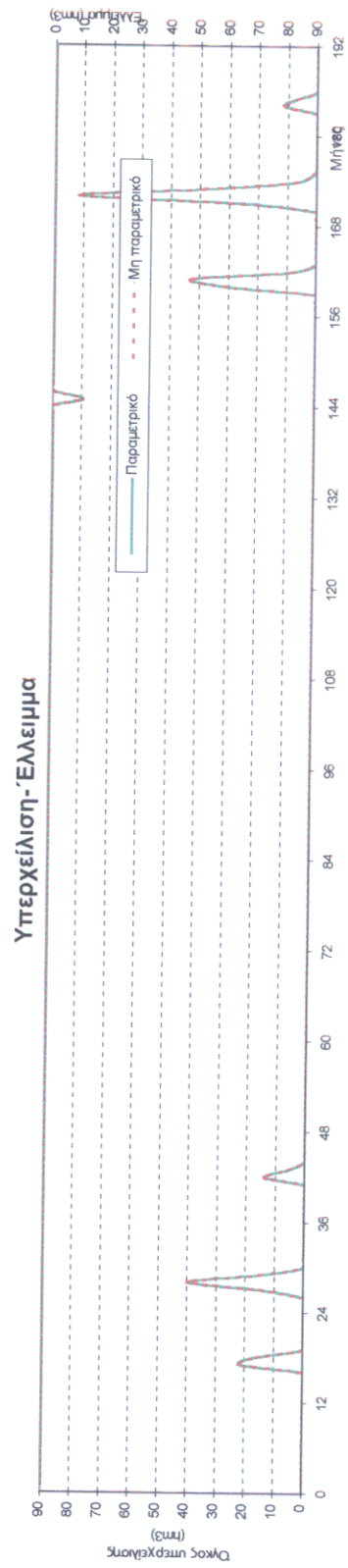
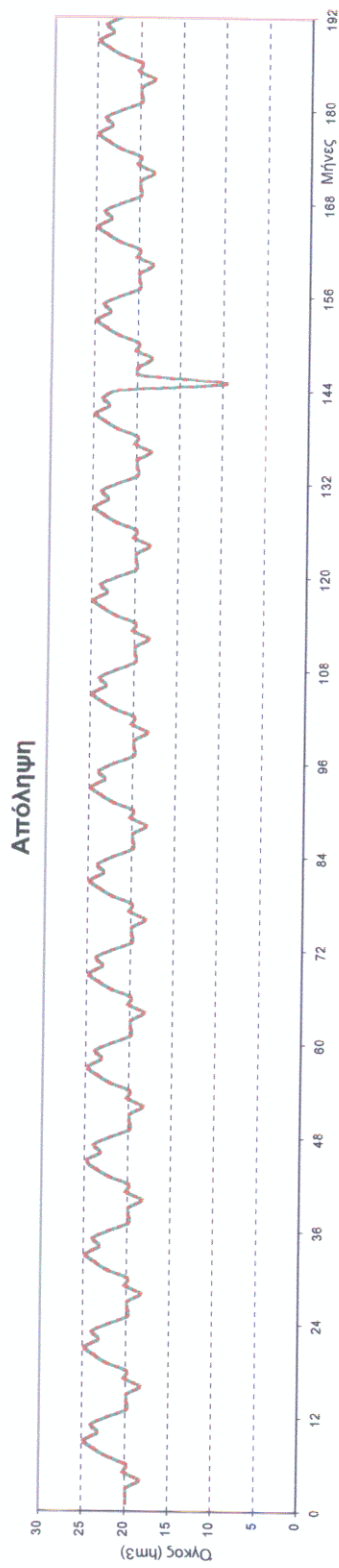
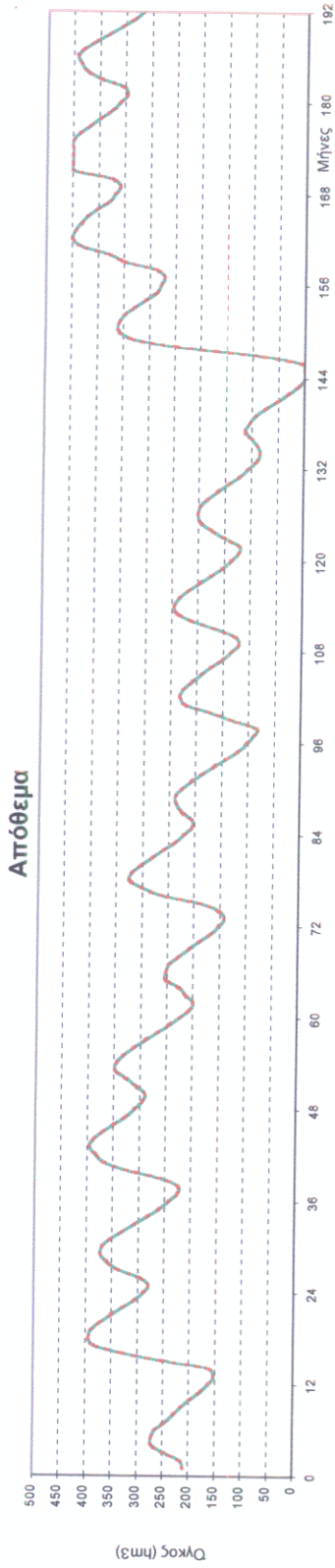
Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης  
Σύστημα δύο ταμιευτήρων (σύστημα Β, σενάριο εισροών 1)  
Ιδεατός ισοδύναμος ταμιευτήρας  
Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληψης, υπερχείλισης και ελλείμματος



Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης  
 Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Β, σενάριο εισροών 1)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης

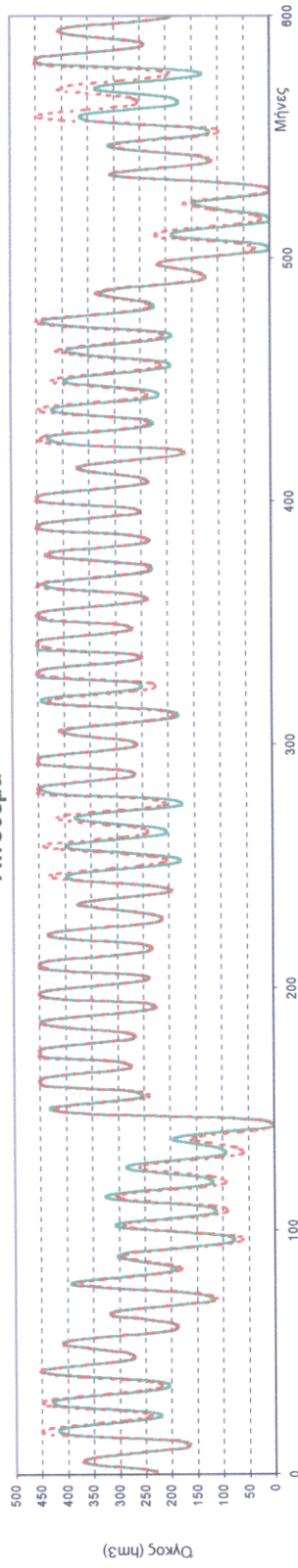


Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης  
 Ταμειυτήρας 2 (σύστημα Β, σενάριο εισροών 1)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης

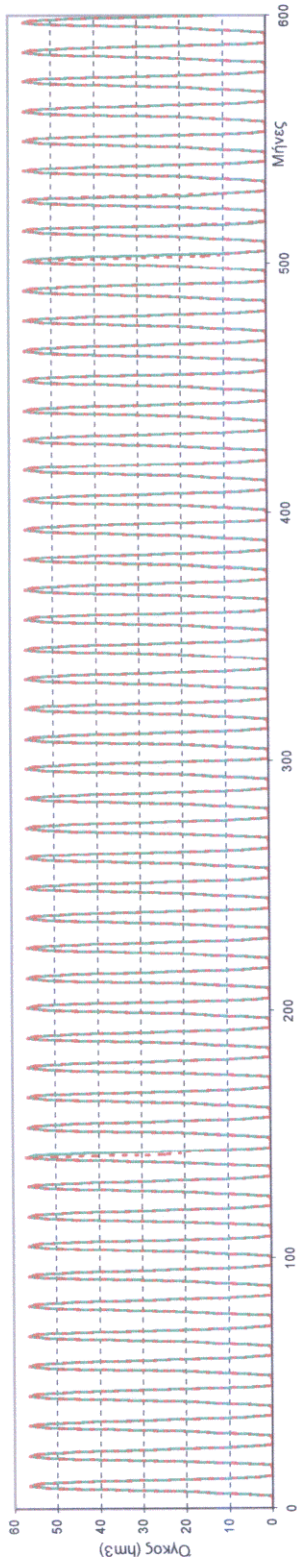


Μεγιστοποίηση υδρευτικής απόληψης  
 Σύστημα δύο ταμειωτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
 Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληψης, υπερχείλισης και ελλείμματος

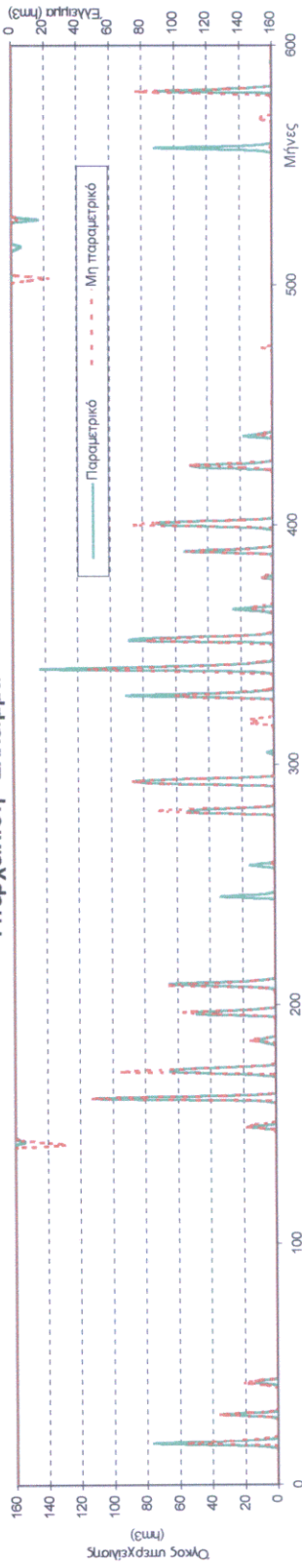
### Απόθεμα



### Απόληψη

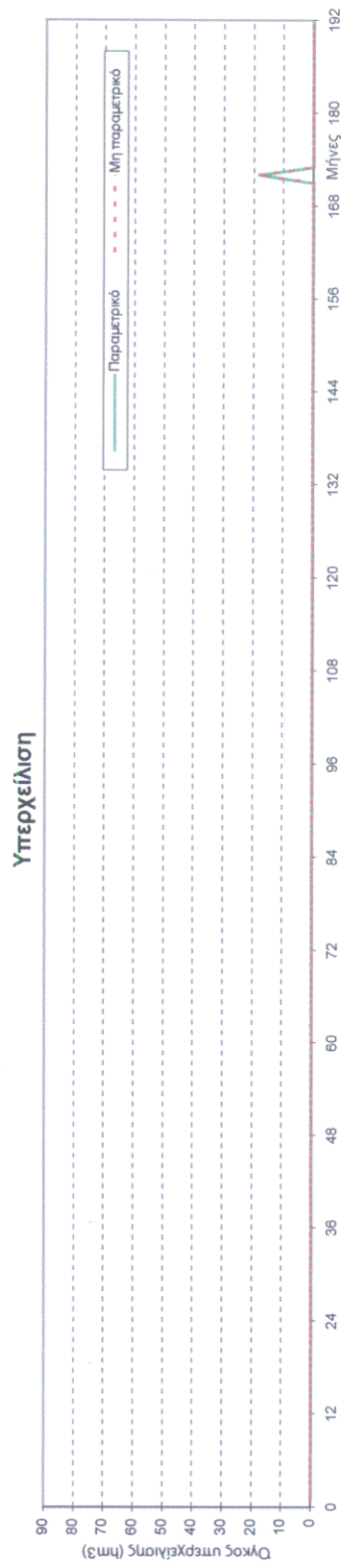
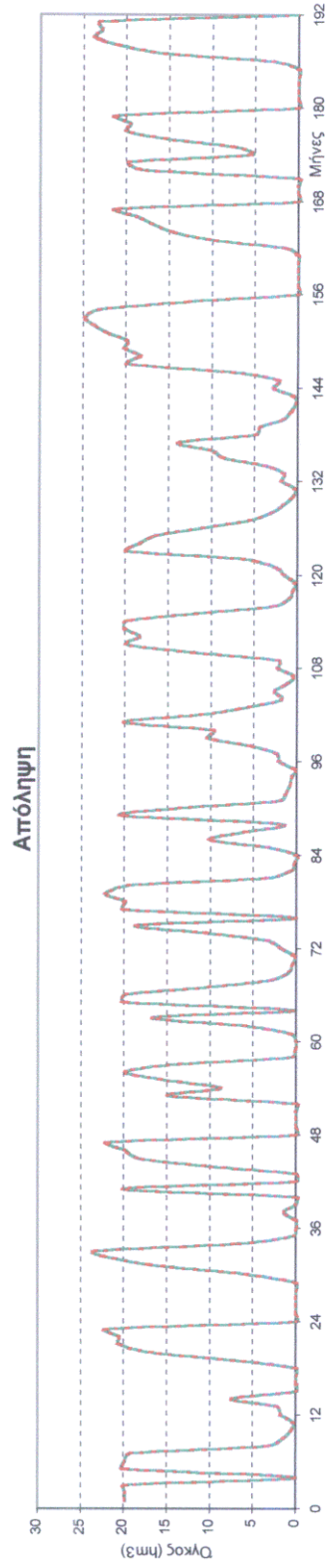
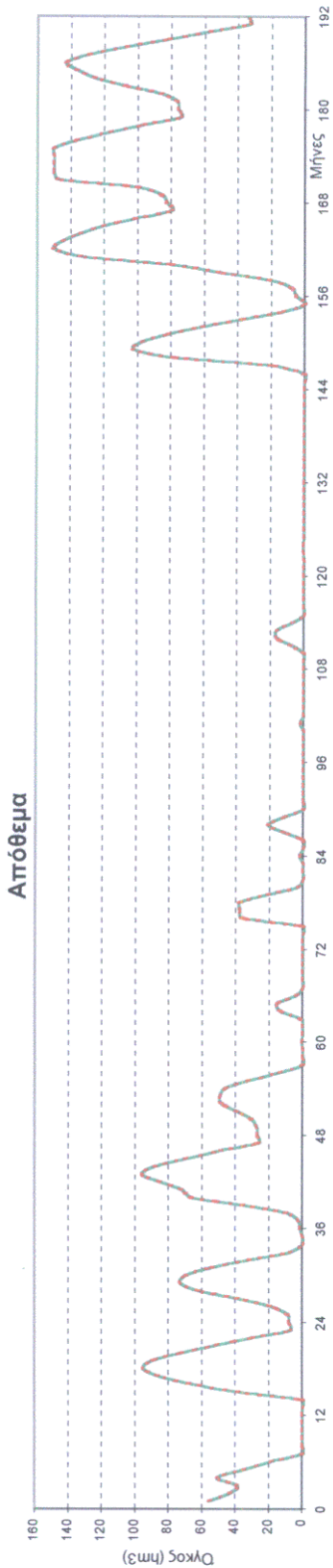


### Υπερχείλιση-Έλλειμμα



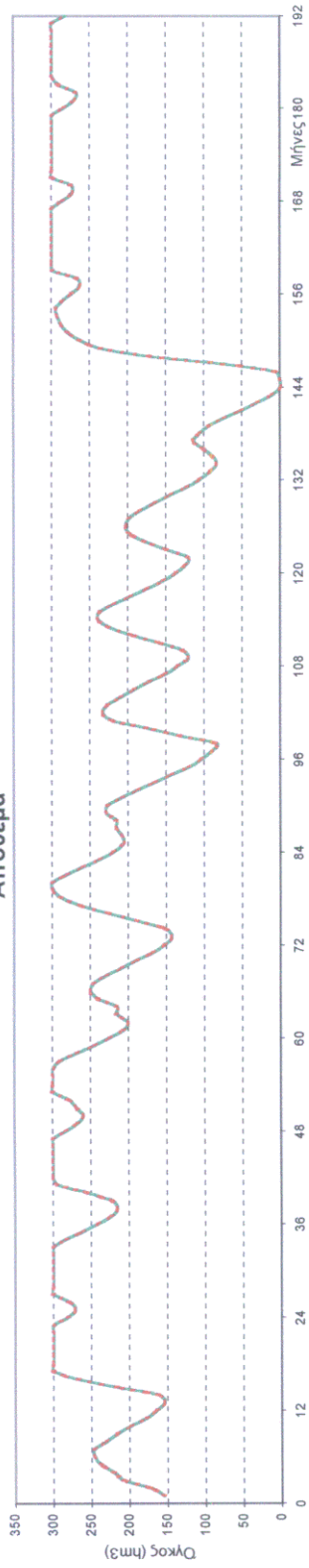
Μεγιστοποίηση αρδευτικής απόληψης  
Σύστημα δύο ταμειυτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληψης, υπερχείλισης και ελλείμματος



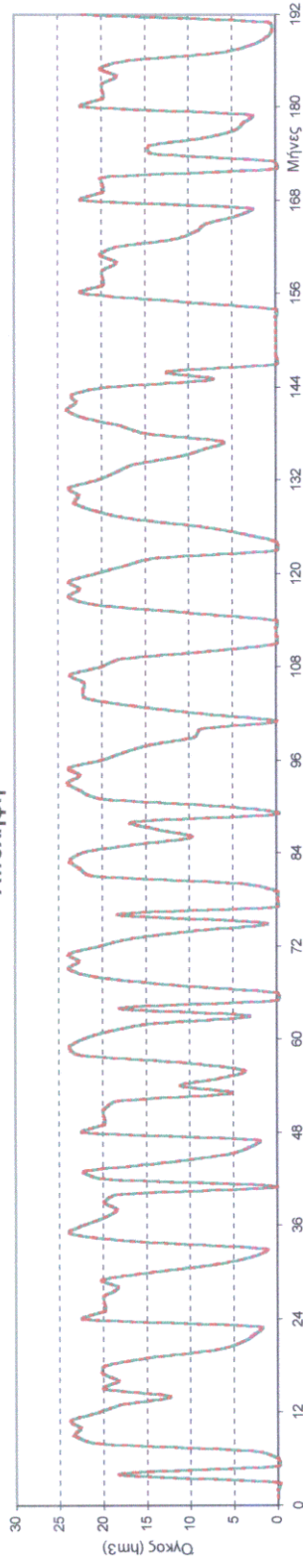


Μεγιστοποίηση υδρευτικής απόληψης  
 Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης

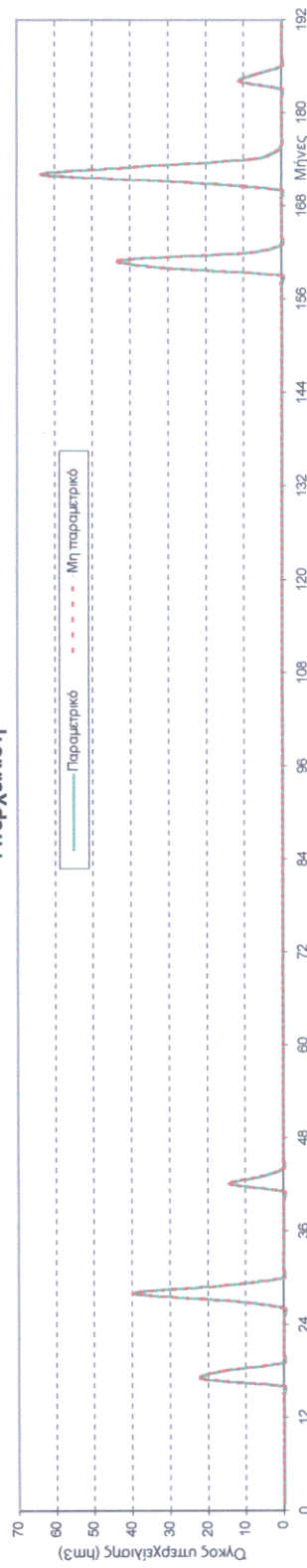
### Απόθεμα



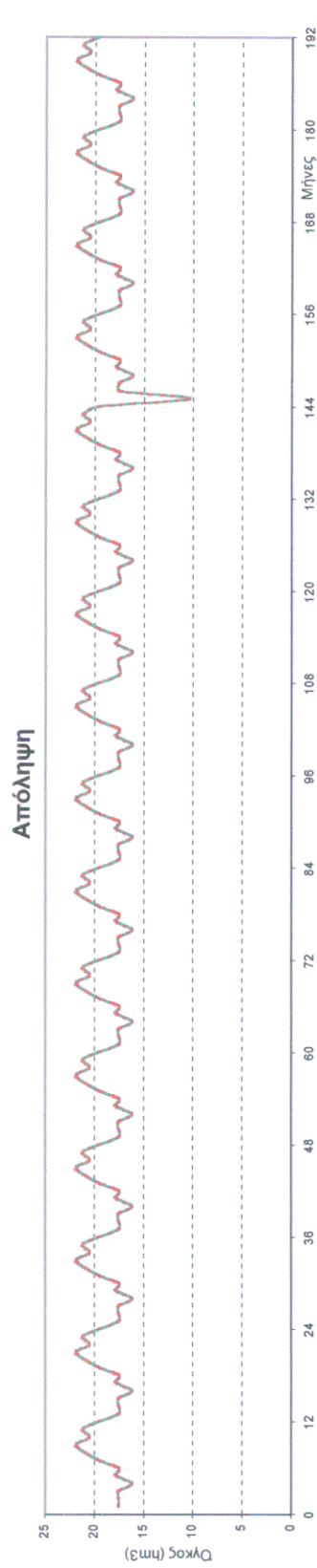
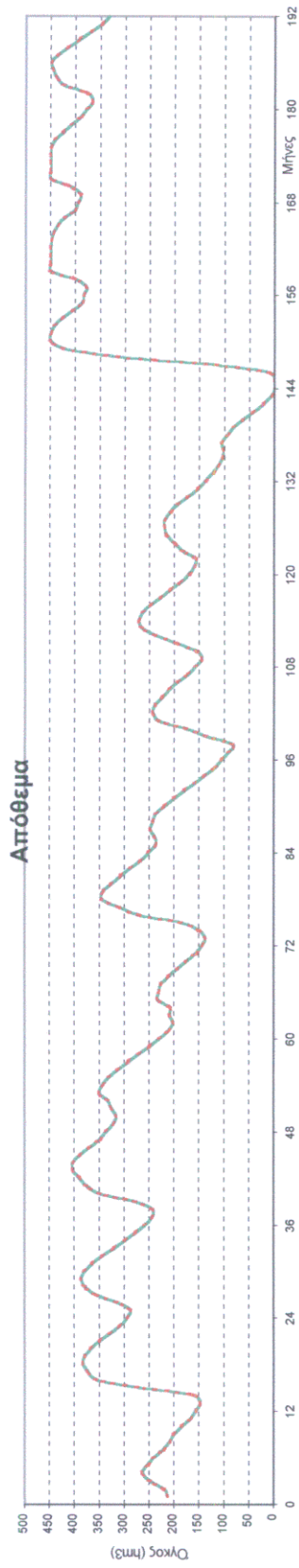
### Απόληψη



### Υπερχείλιση

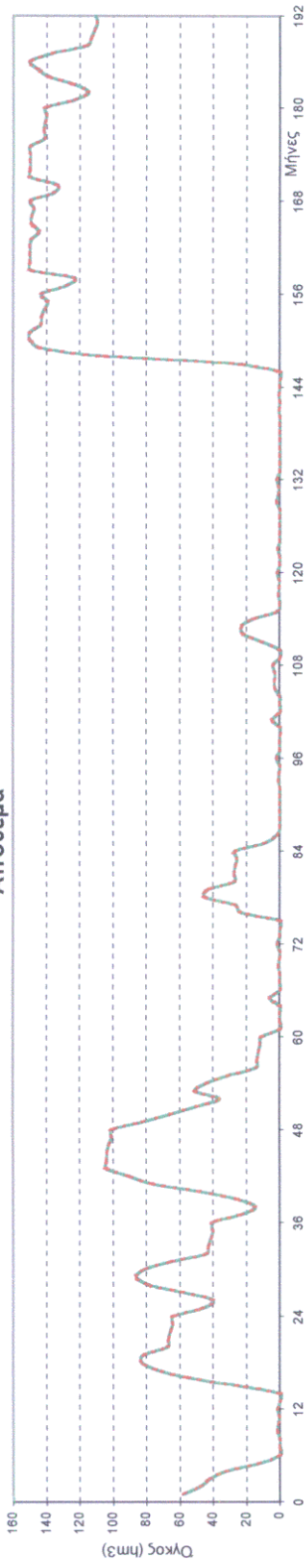


Μεγιστοποίηση υδρευτικής απόληψης  
Ταμειυτήρας 2 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης

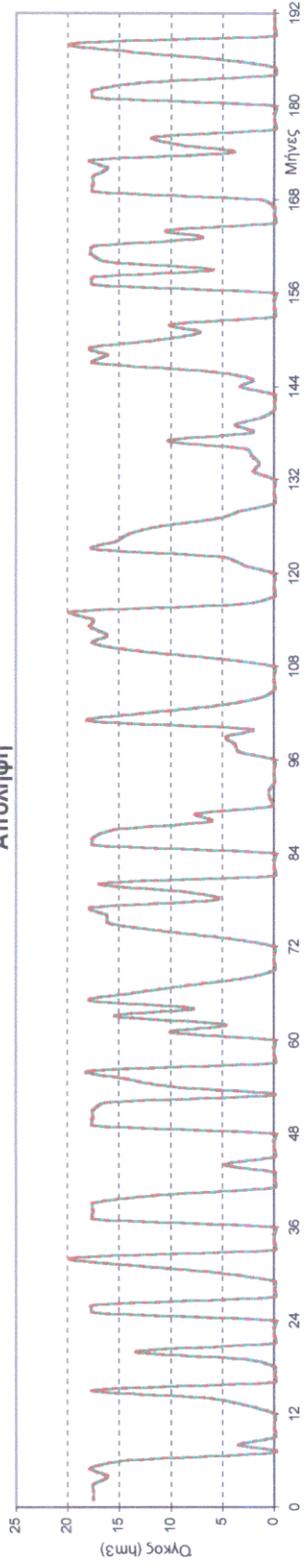


Μεγιστοποίηση υδρευτικής απόληψης  
 Σύστημα δύο ταμειωτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληψης, υπερχείλισης και ελλείμματος

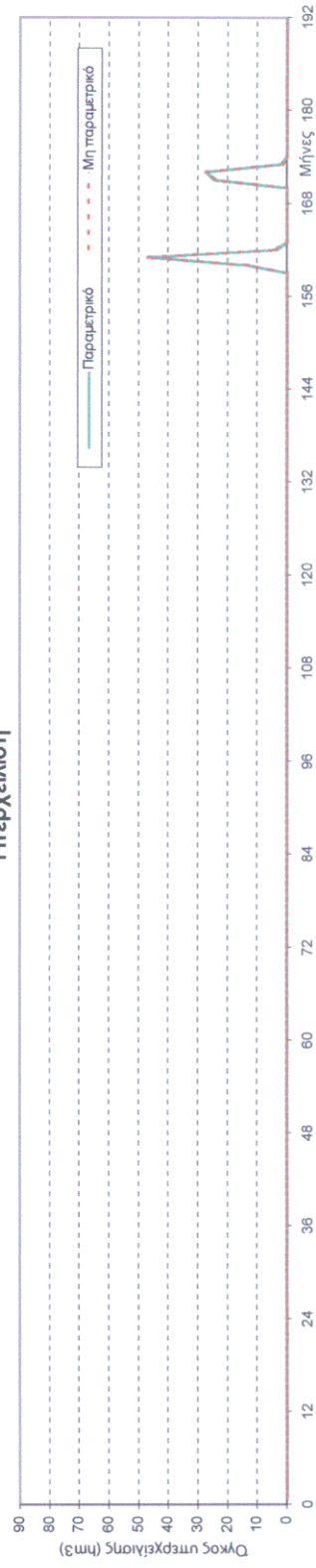
### Απόθεμα



### Απόληψη

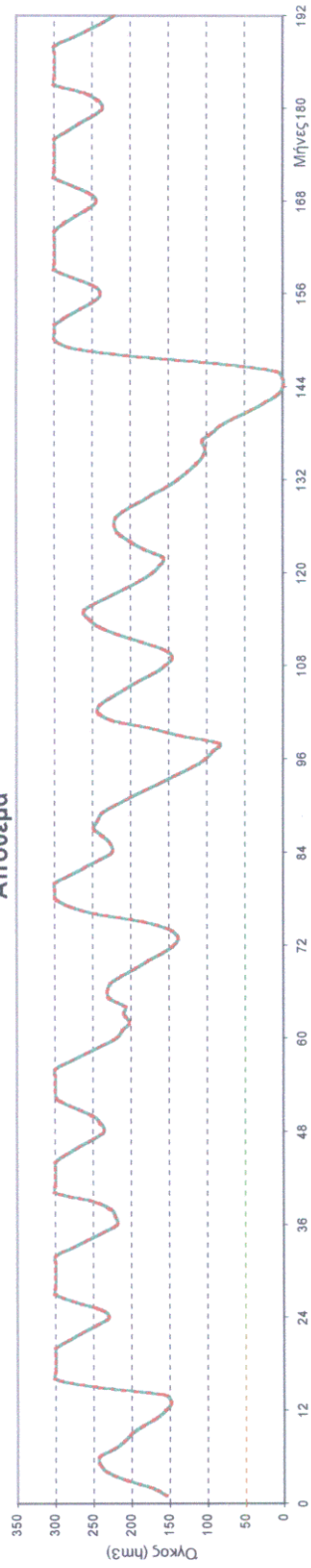


### Υπερχείλιση

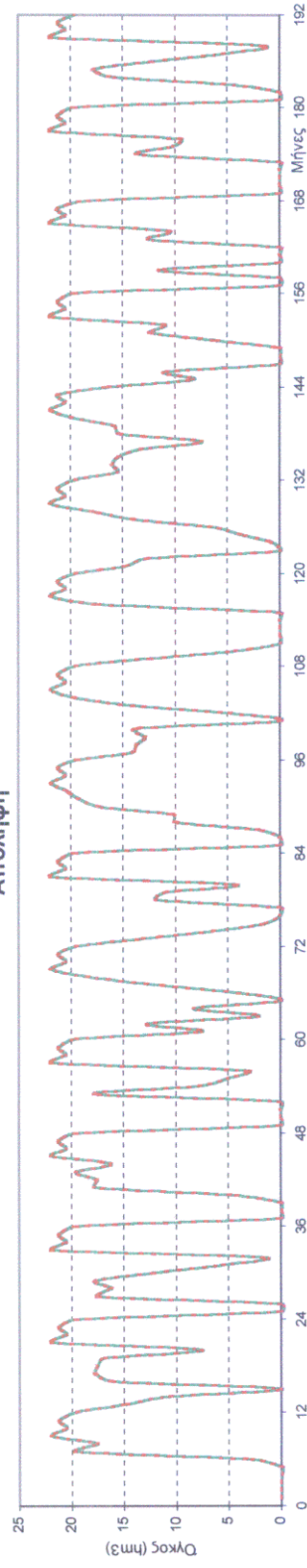


Μεγιστοποίηση υδρευτικής απόληψης  
Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης

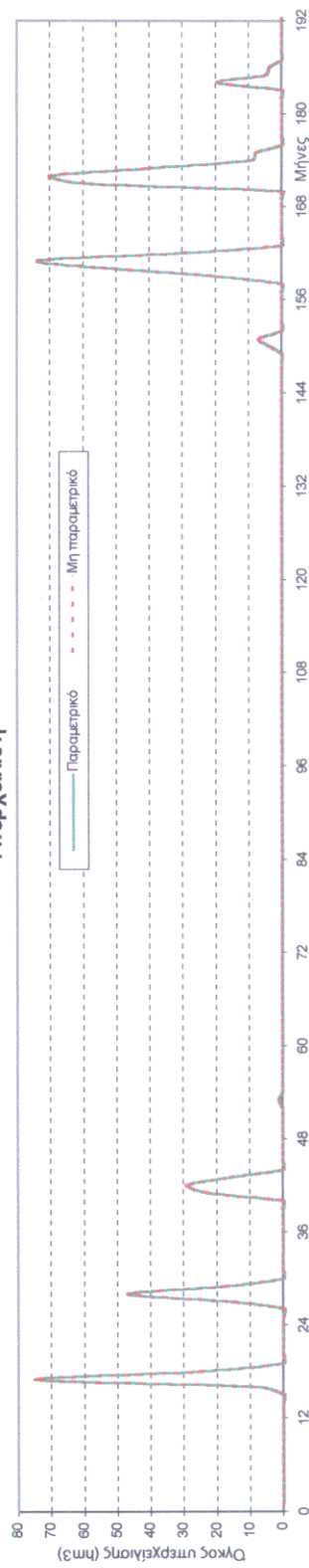
### Απόθεμα



### Απόληψη

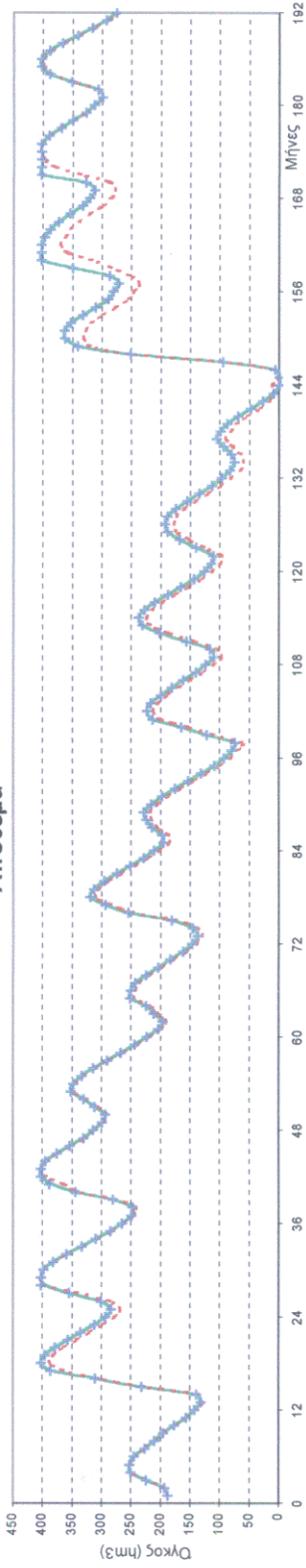


### Υπερχείλιση

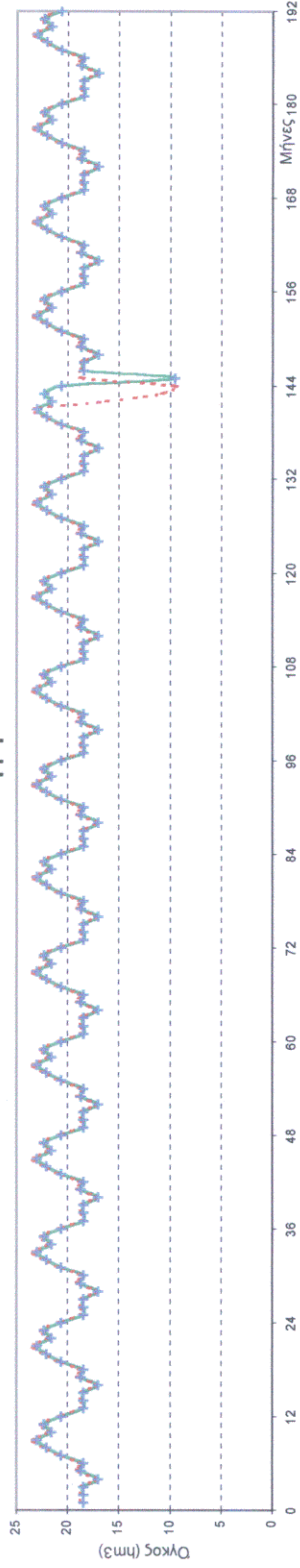


Μεγιστοποίηση υδρευτικής απόληψης  
Ταμειυτήρας 2 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης

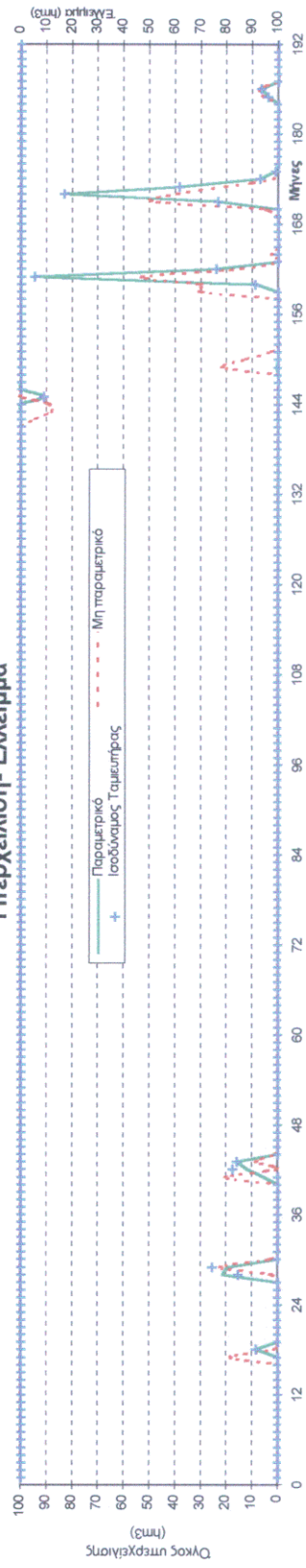
### Απόθεμα



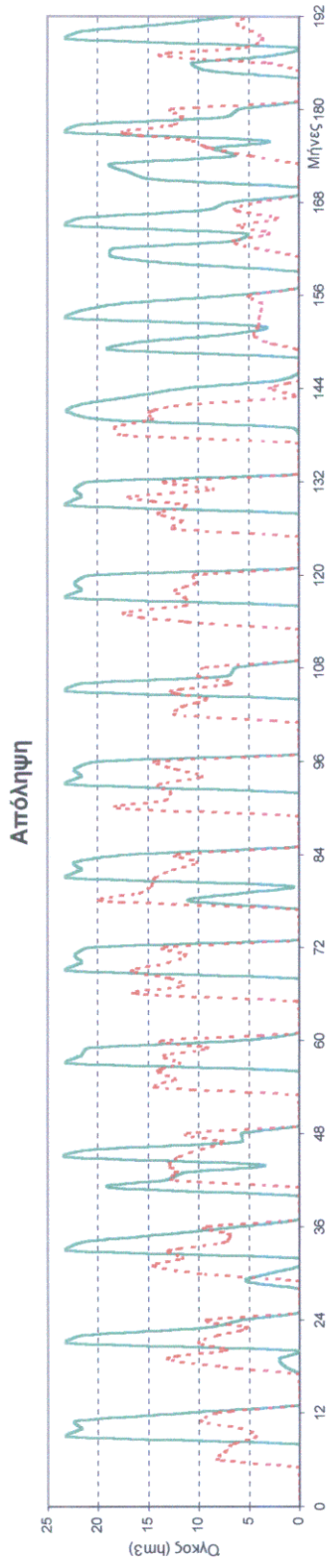
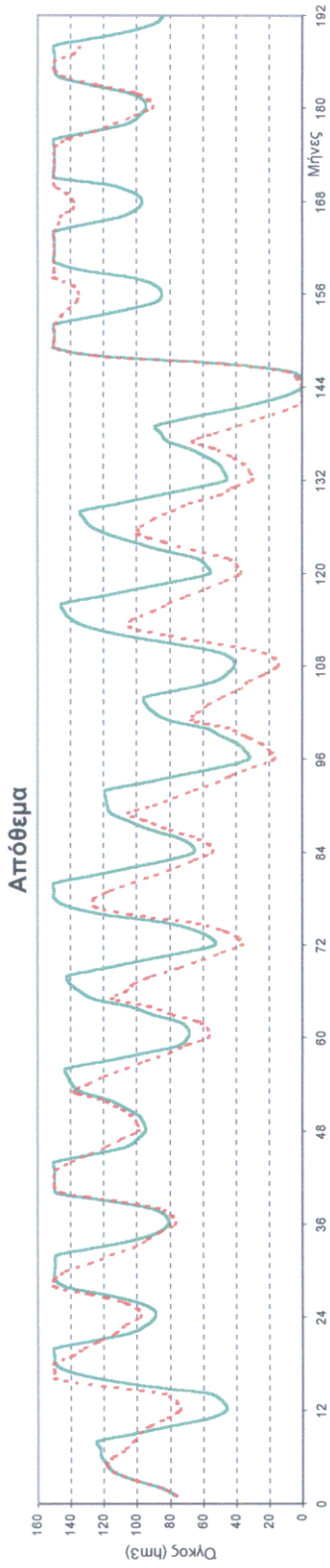
### Απόληψη



### Υπερχείλιση- Έλλειμμα

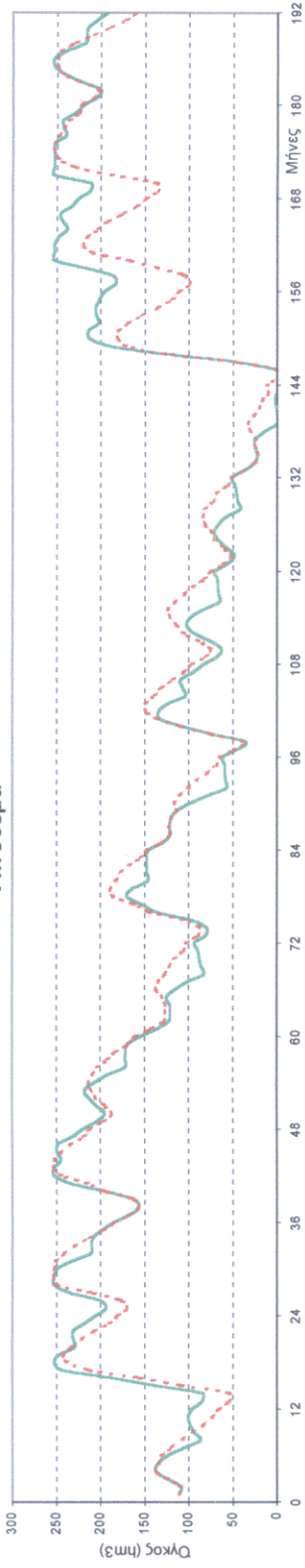


Μεγιστοποίηση υδρευτικής απόληψης  
 Σύστημα δύο ταμιευτήρων (σύστημα Β, σενάριο εισροών 1)  
 Ιδεατός ισοδύναμος ταμιευτήρας  
 Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληψης, υπερχείλισης και ελλείμματος

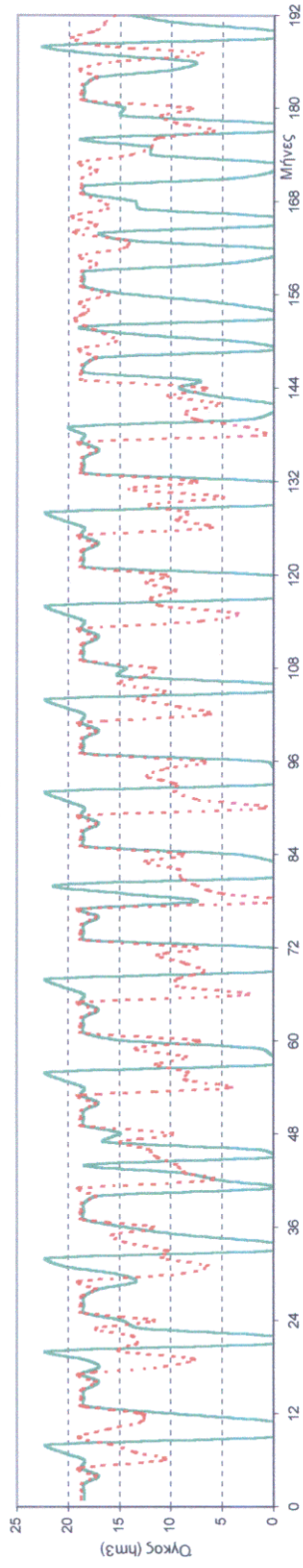


Μεγιστοποίηση υδρευτικής απόληψης  
 Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Β, σενάριο εισροών 1)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης

### Απόθεμα



### Απόληψη



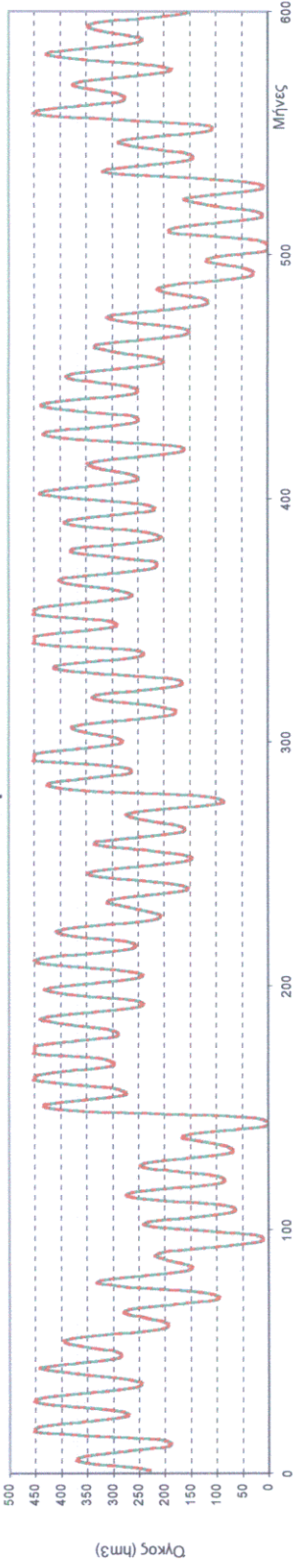
### Υπερχείλιση



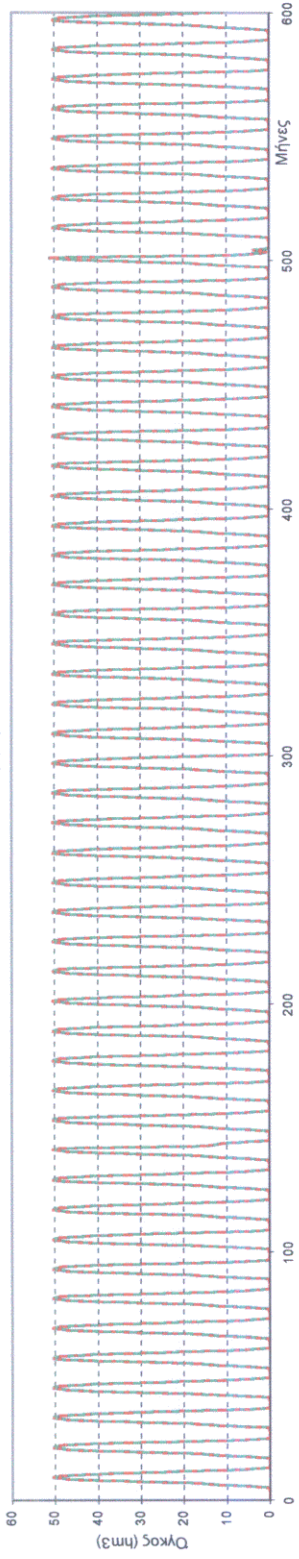
Μεγιστοποίηση υδρευτικής απόληψης  
Ταμειυτήρας 2 (σύστημα Β, σενάριο εισροών 1)  
Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης



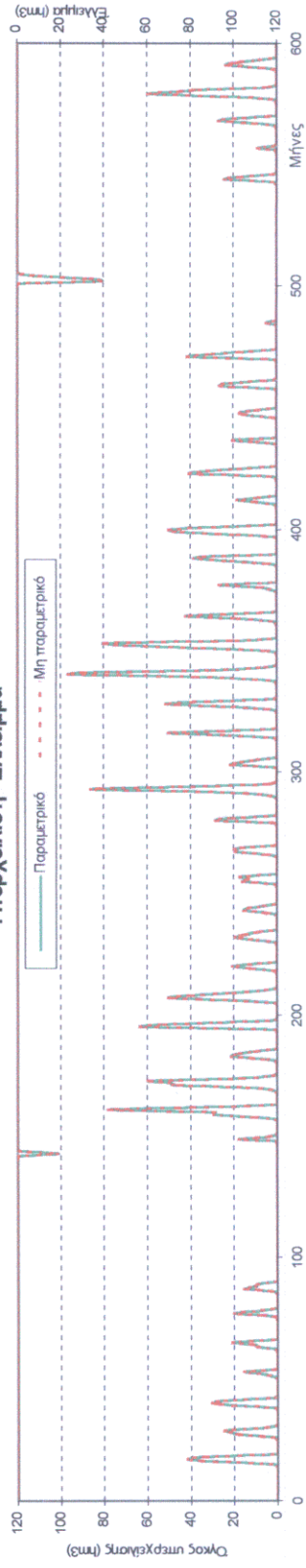
### Απόθεμα



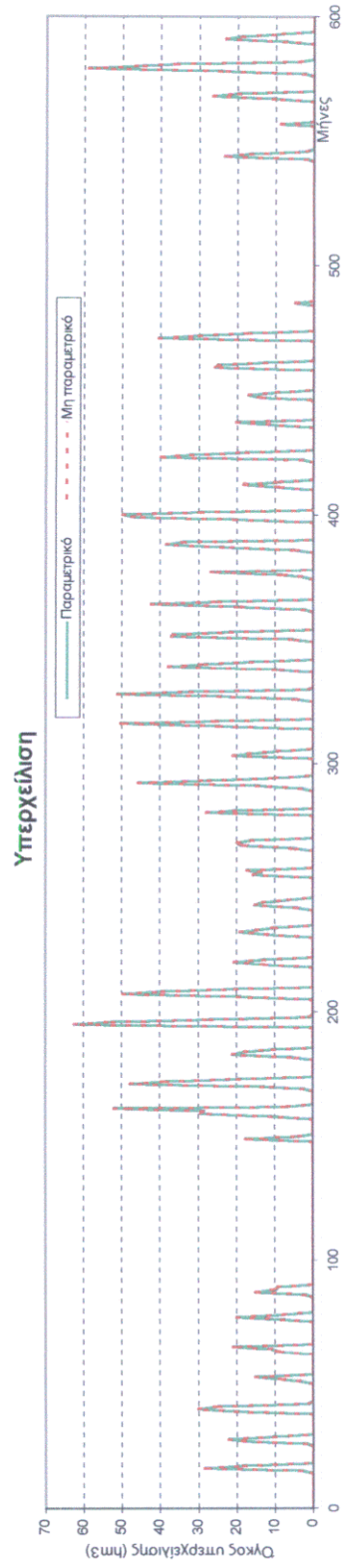
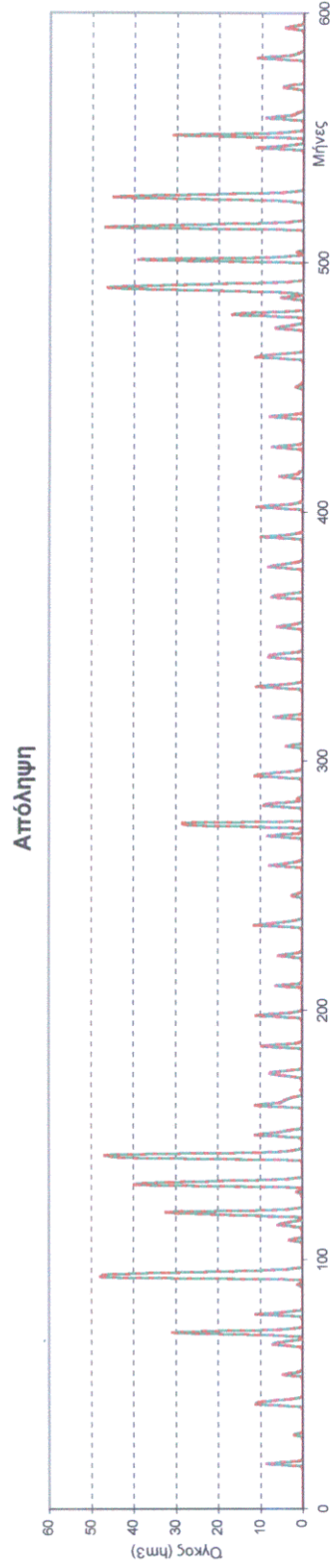
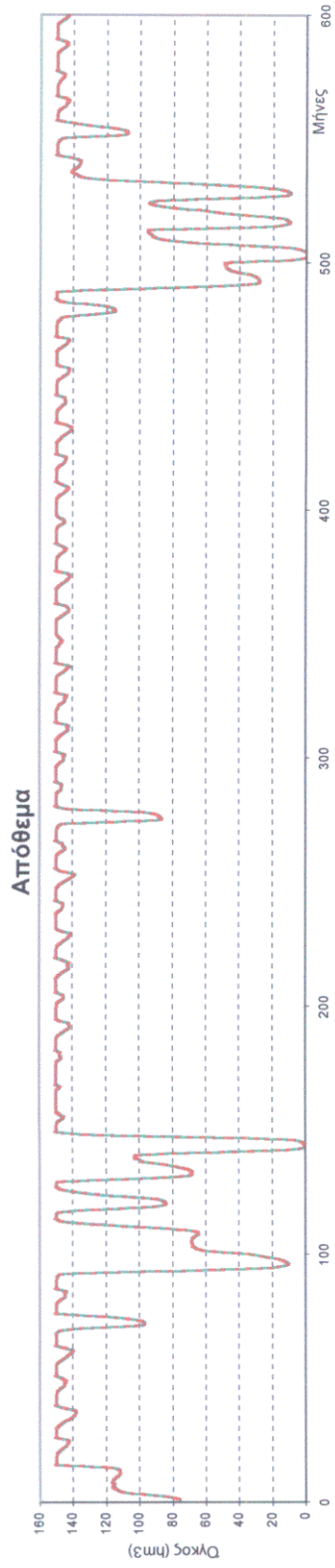
### Απόληψη



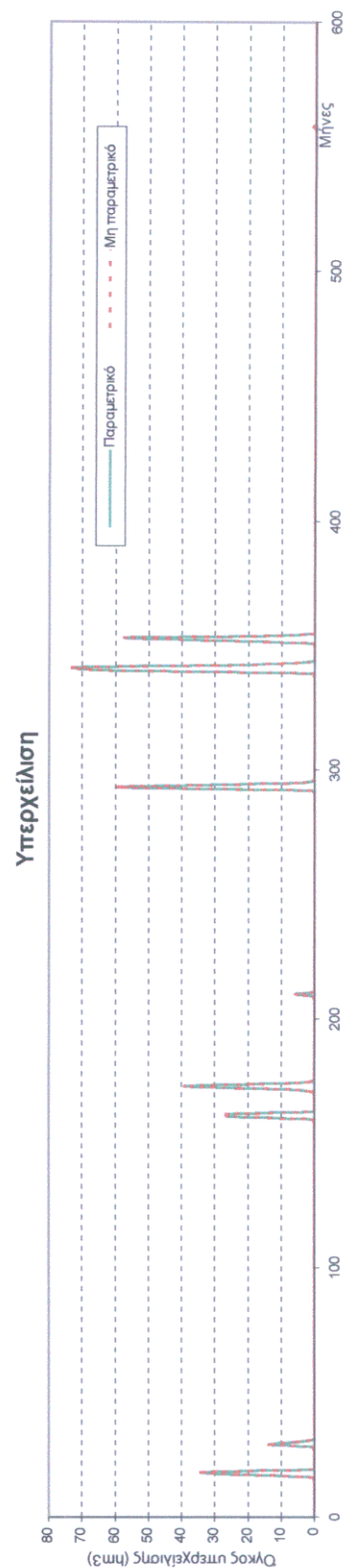
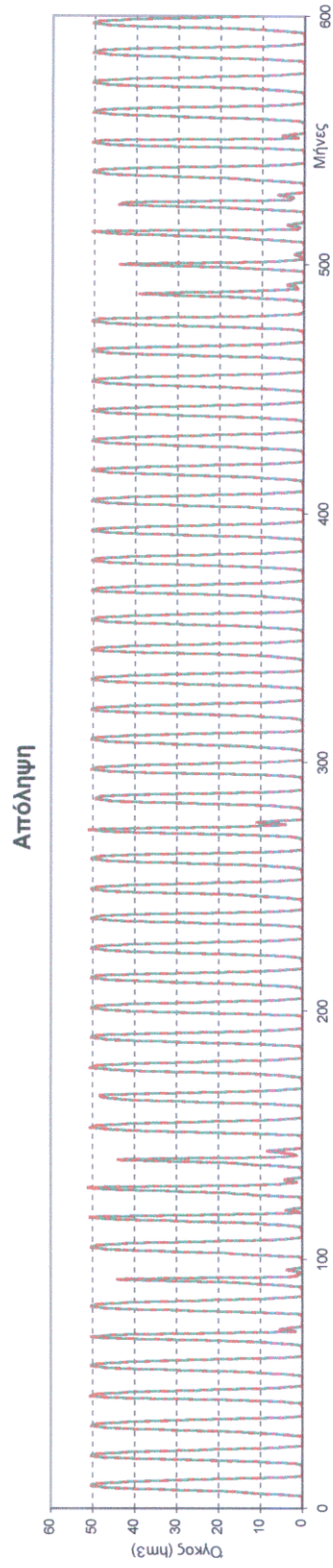
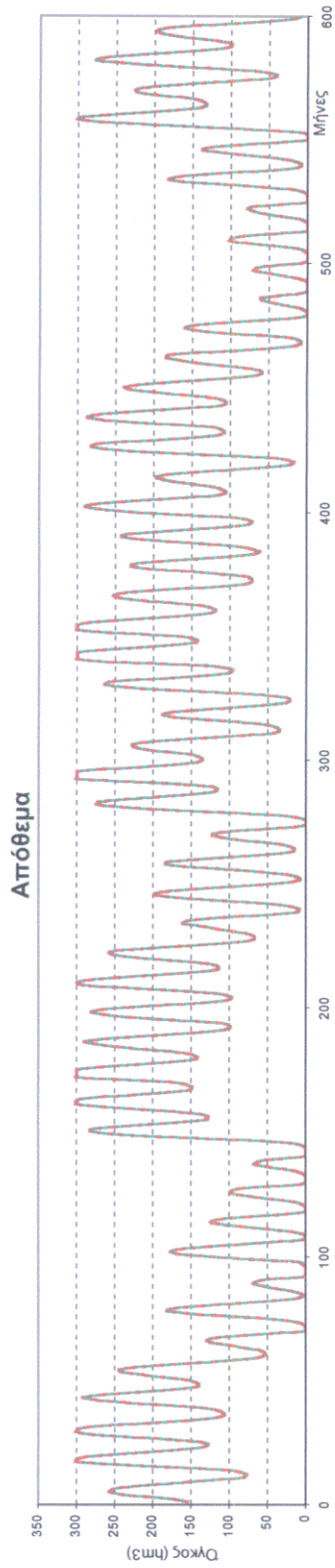
### Υπερχείλιση-Έλλειμμα



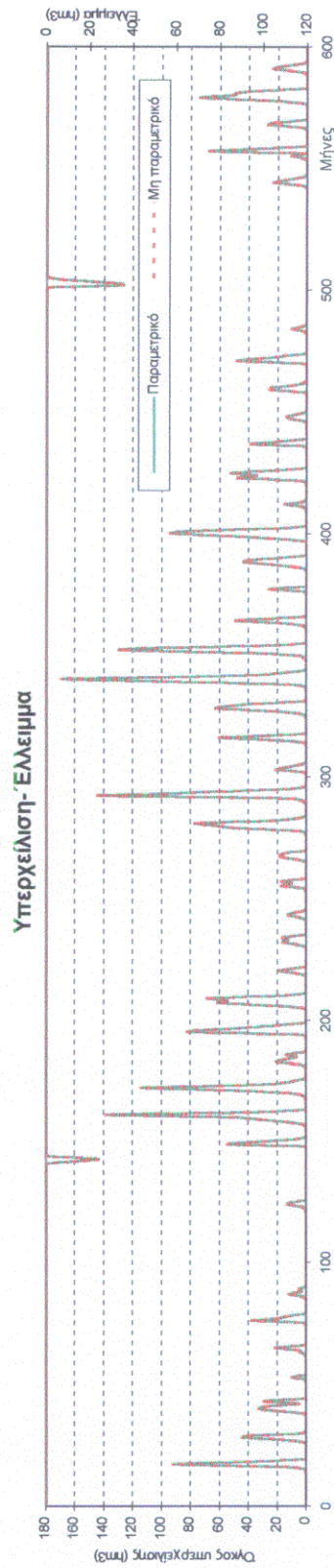
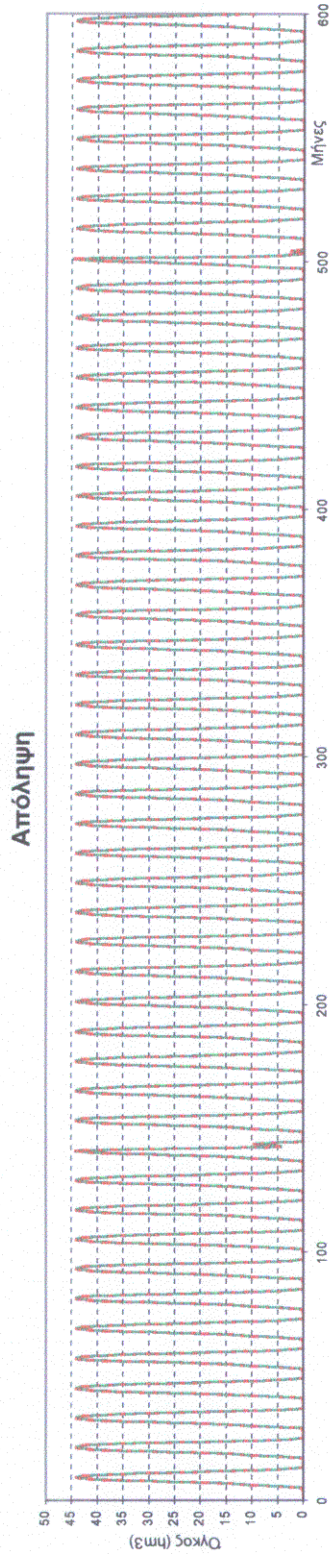
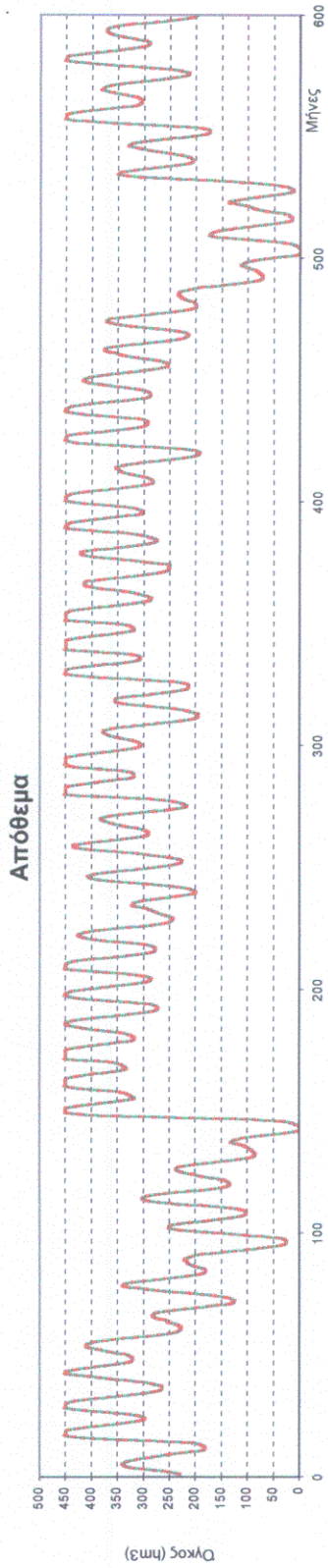
Ελαχιστοποίηση αρδευτικού κόστους  
Σύστημα δύο ταμιευτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληξης, υπερχείλισης και ελλείμματος



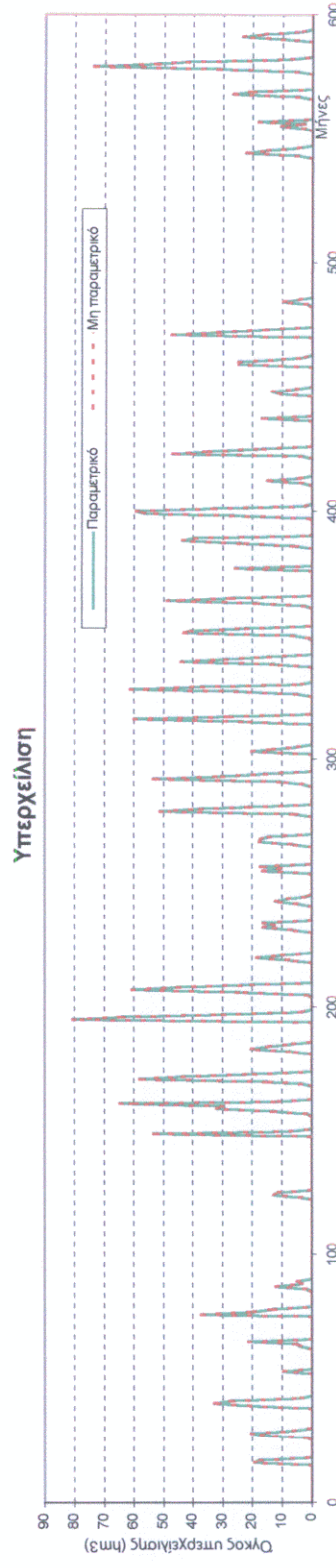
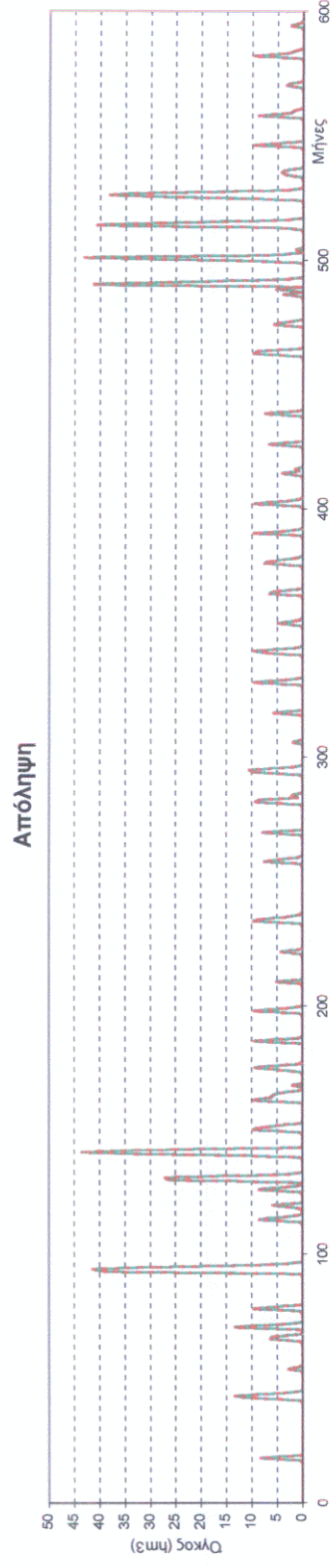
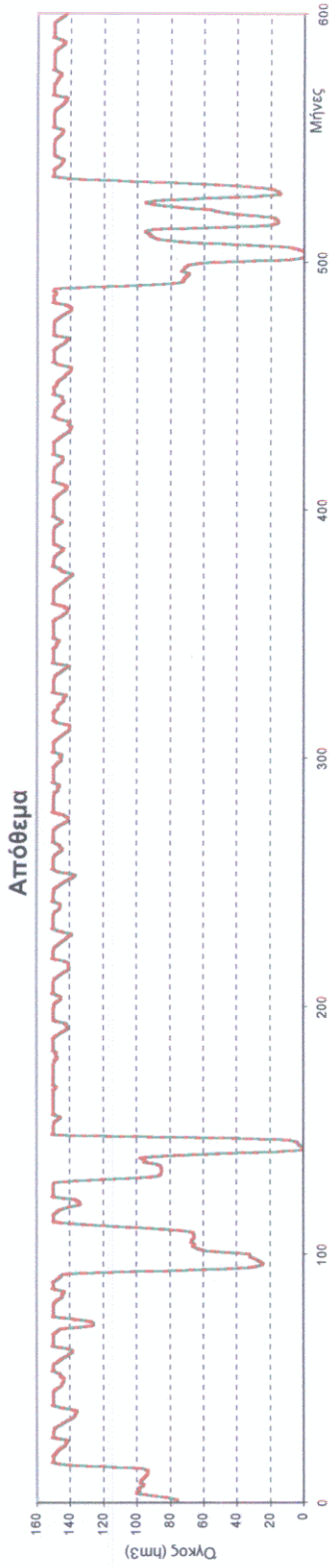
Ελαχιστοποίηση αρδευτικού κόστους  
 Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης



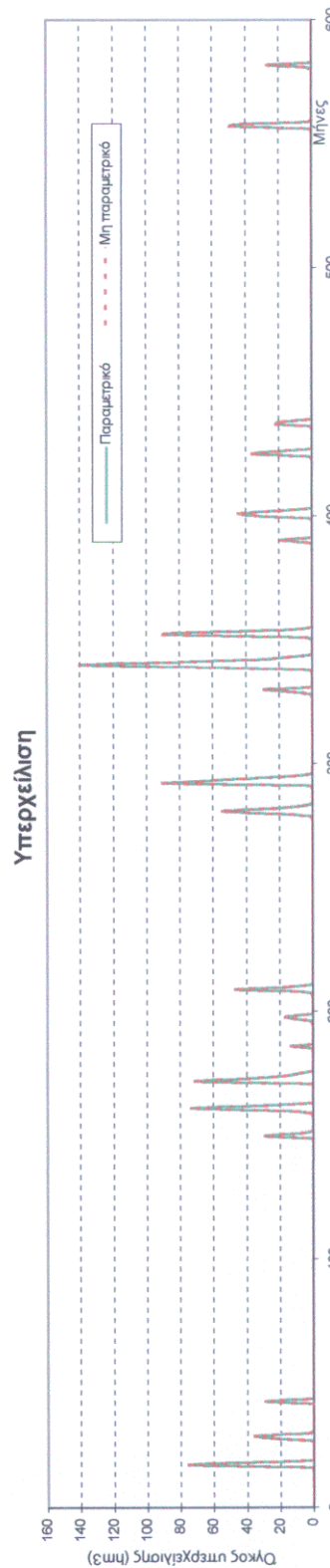
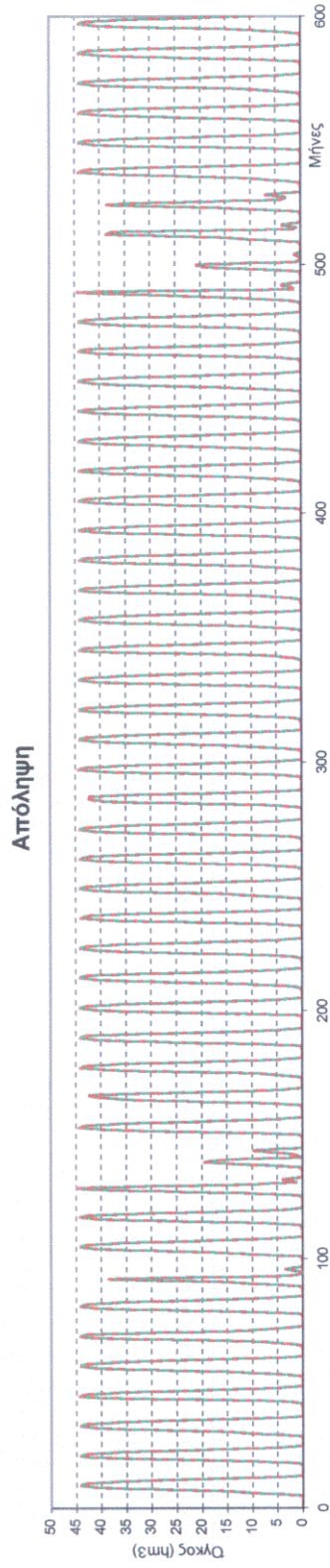
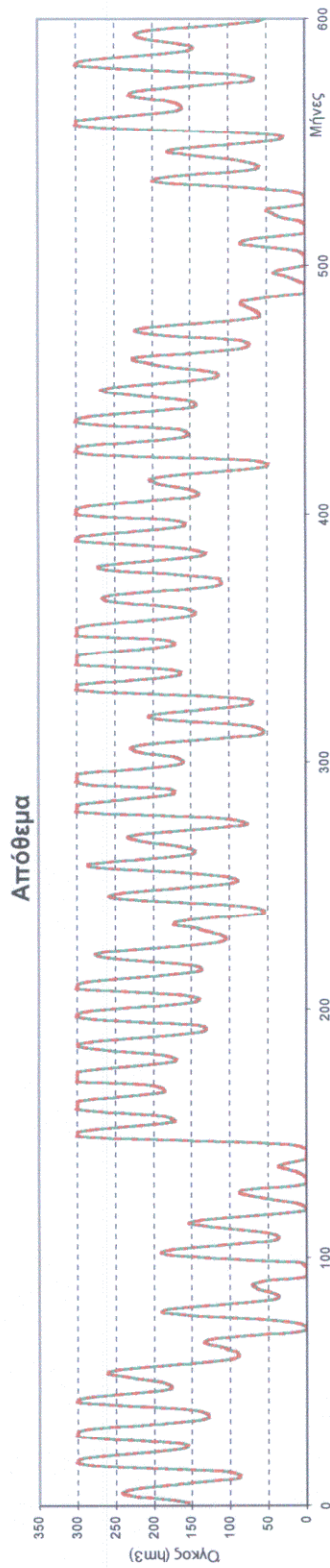
Ελαχιστοποίηση αρδευτικού κόστους  
 Ταμειούχρας 2 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης



Ελαχιστοποίηση αρδευτικού κόστους  
 Σύστημα δύο ταμειωτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληξης, υπερχείλισης και ελλείμματος

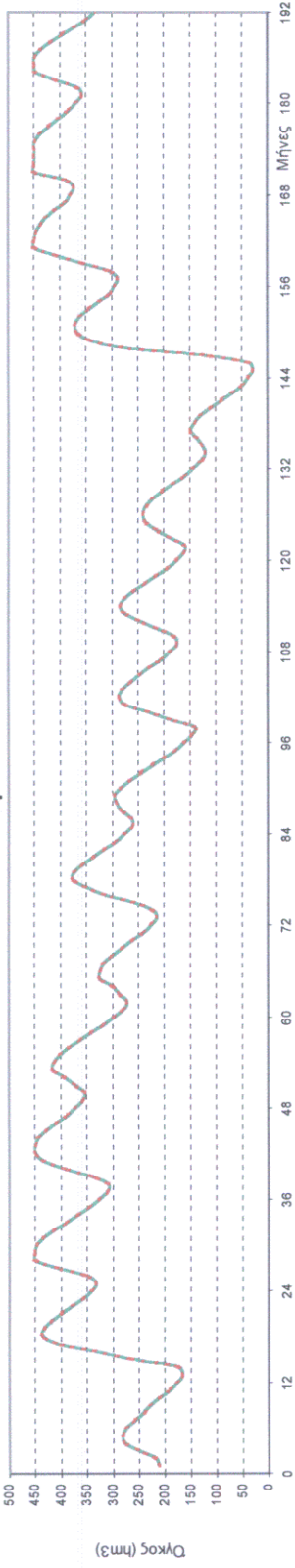


Ελαχιστοποίηση αρδευτικού κόστους  
 Ταμειούχρας 1 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης

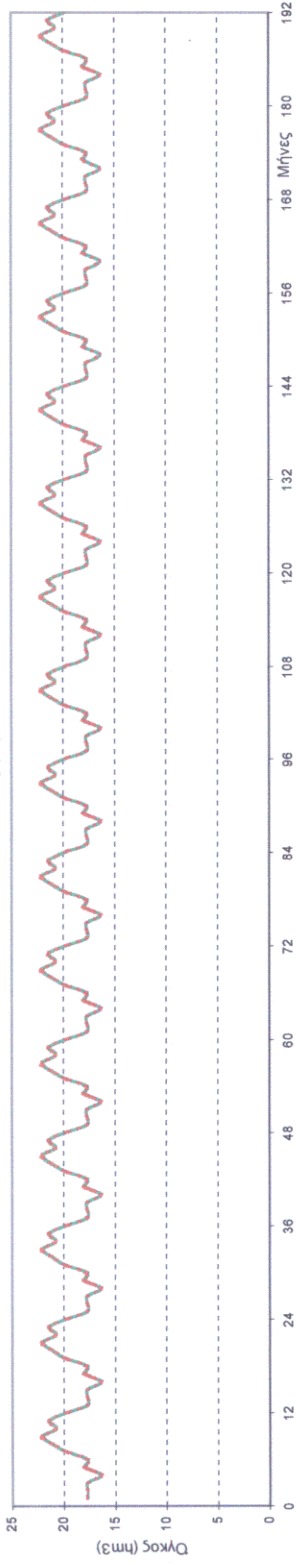


Ελαχιστοποίηση αρδευτικού κόστους  
 Ταμειεύρας 2 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης

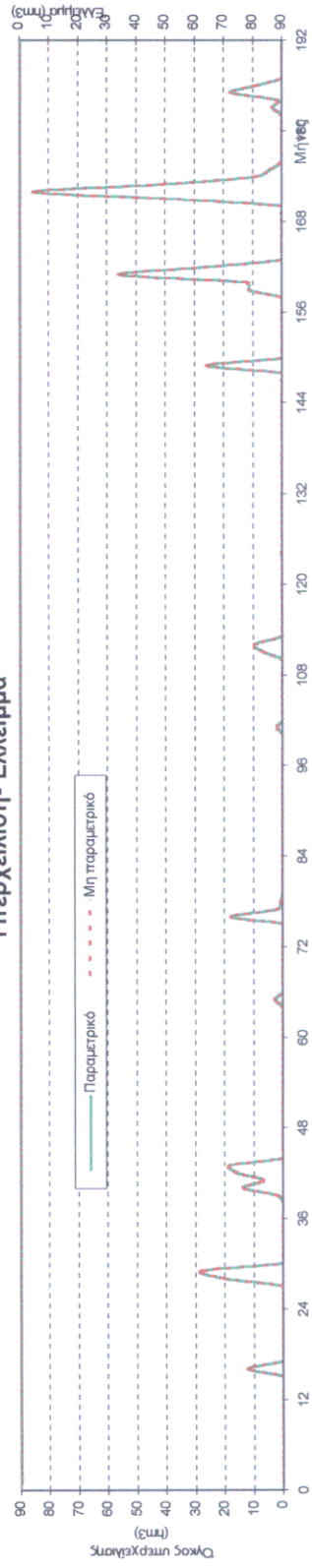
### Αποθέμα



### Απόληψη

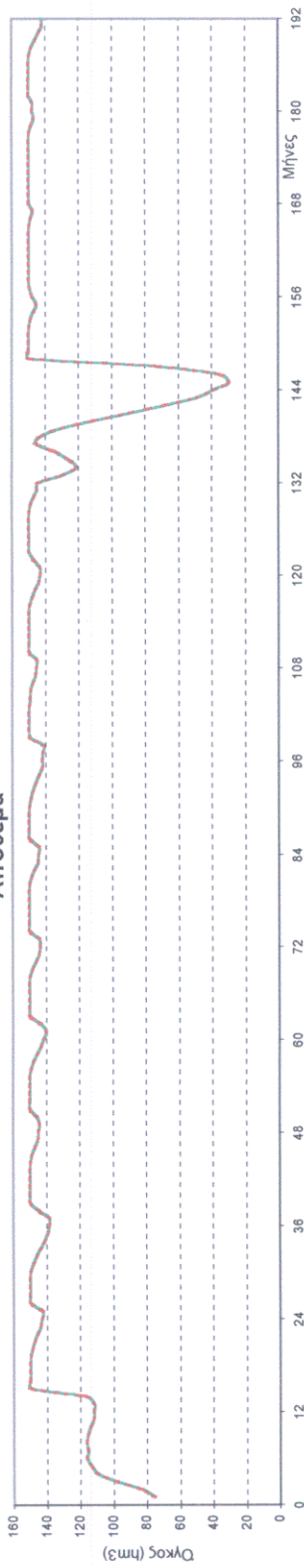


### Υπερχείλιση-Έλλειμμα

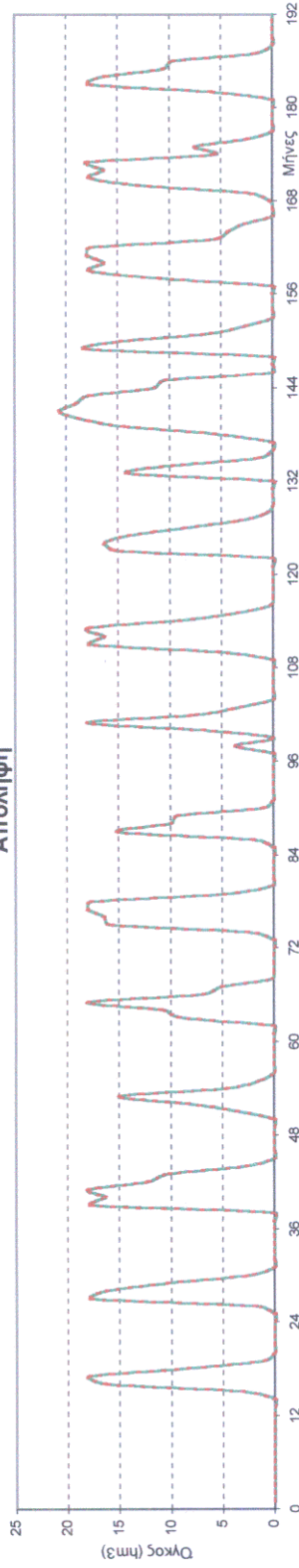


Ελαχιστοποίηση υδρευτικού κόστους  
Σύστημα δύο ταμιευτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληξης, υπερχείλισης και ελλείμματος

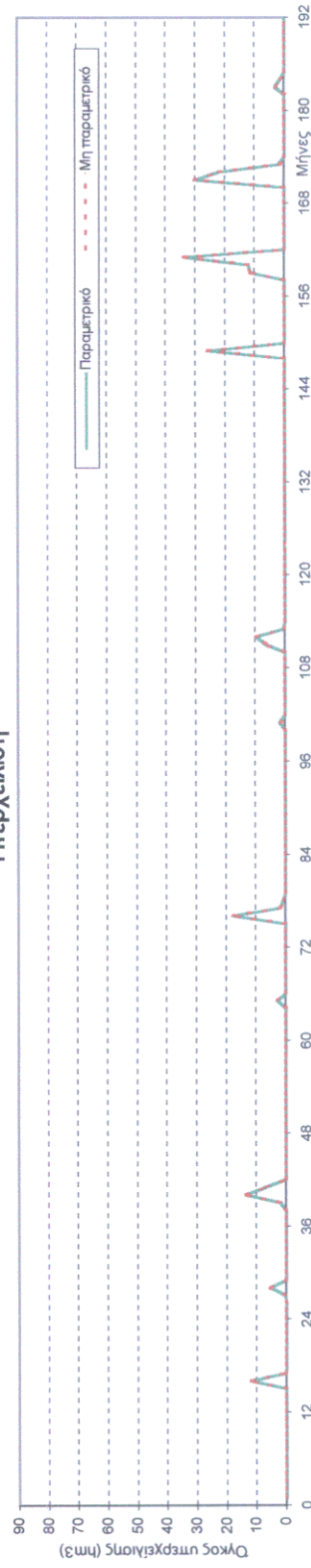
### Απόθεμα



### Απόληψη



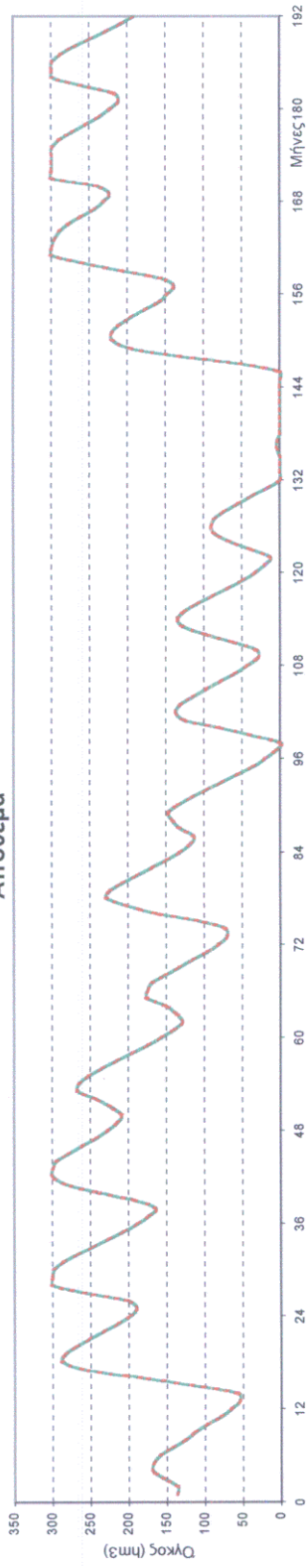
### Υπερχείλιση



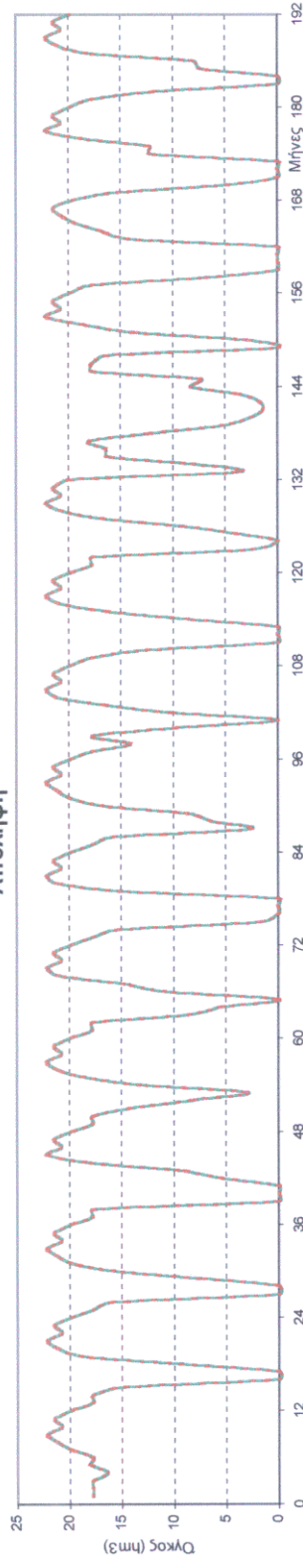
Ελαχιστοποίηση υδρευτικού κόστους  
Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
Επιμέρους όγκο αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης



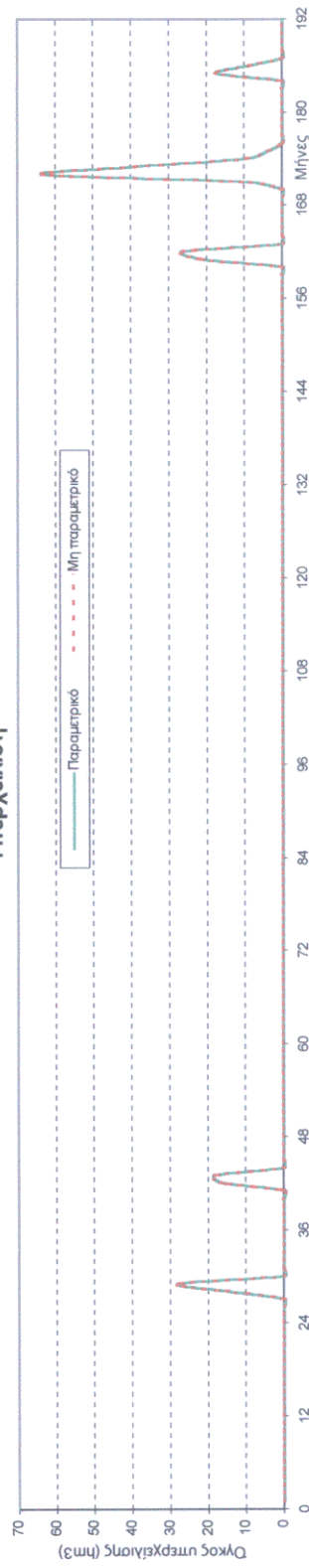
### Απόθεμα



### Απόληψη

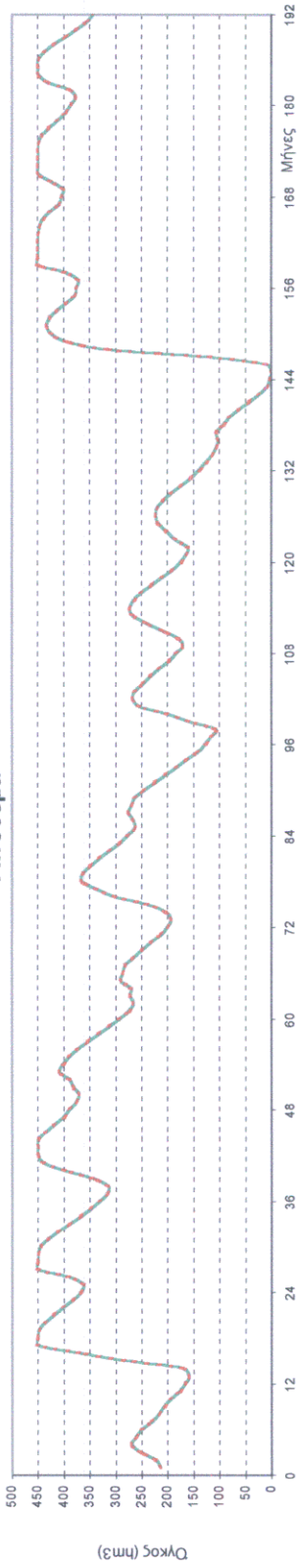


### Υπερχείλιση

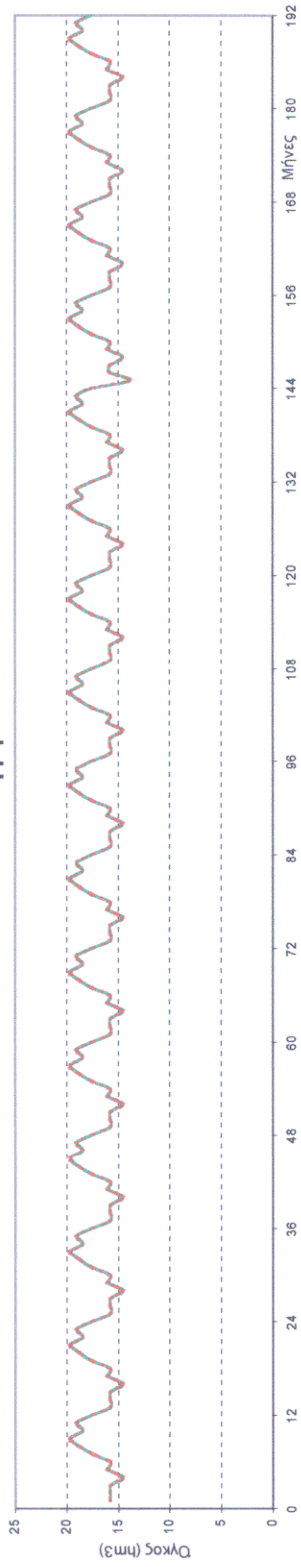


Ελαχιστοποίηση υδρευτικού κόστους  
Ταμειυτήρας 2 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης

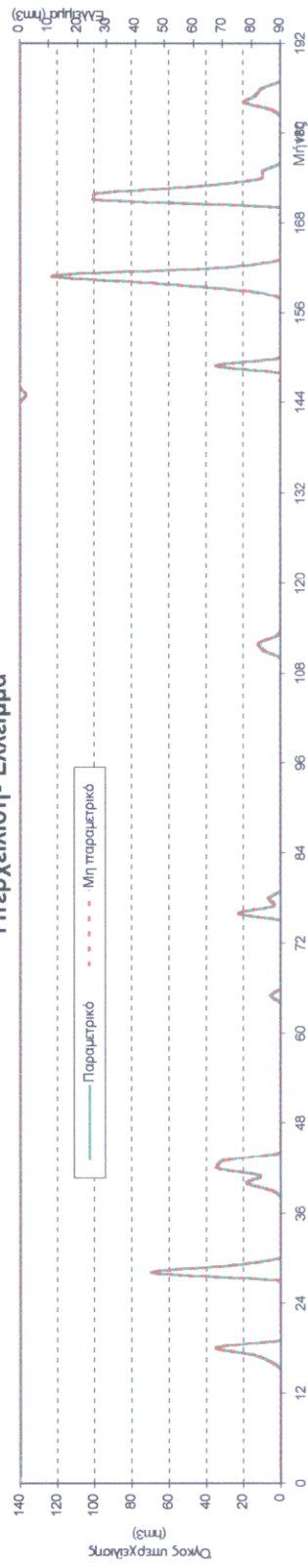
### Απόθεμα



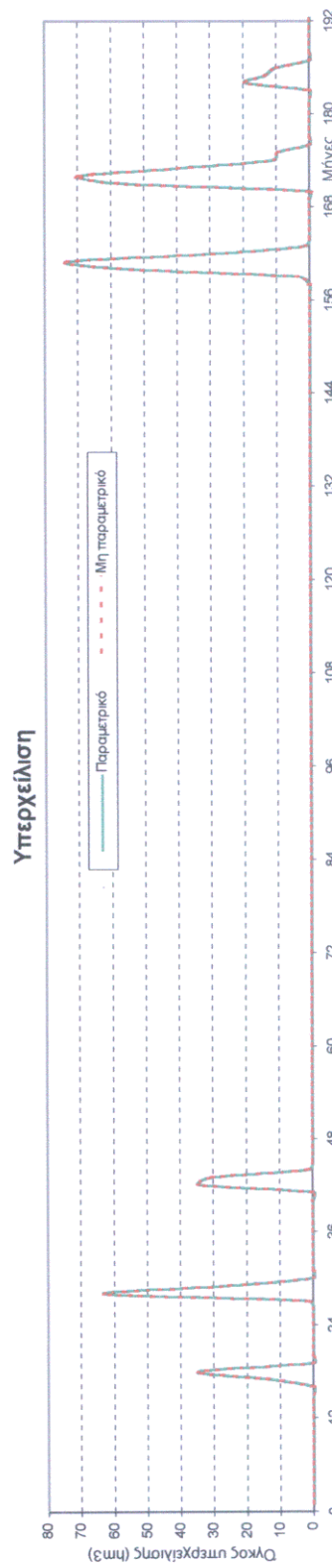
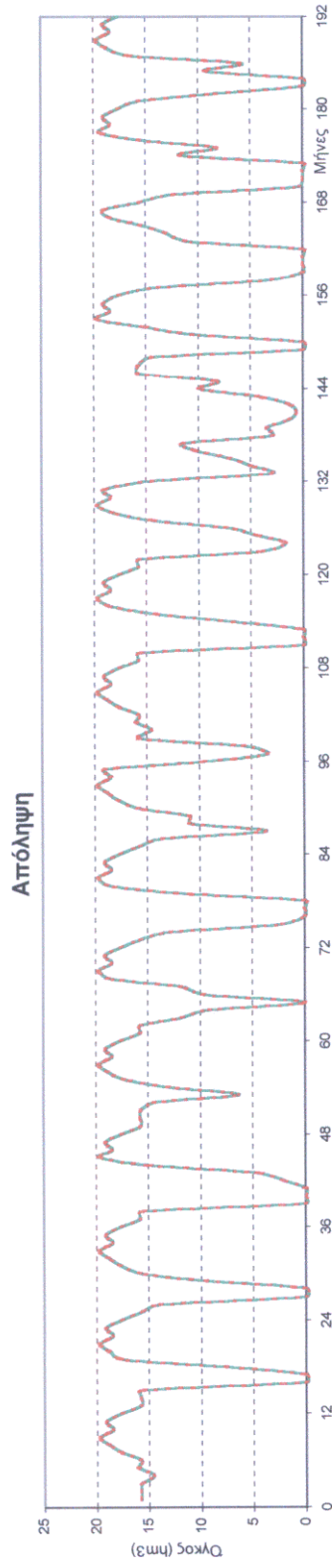
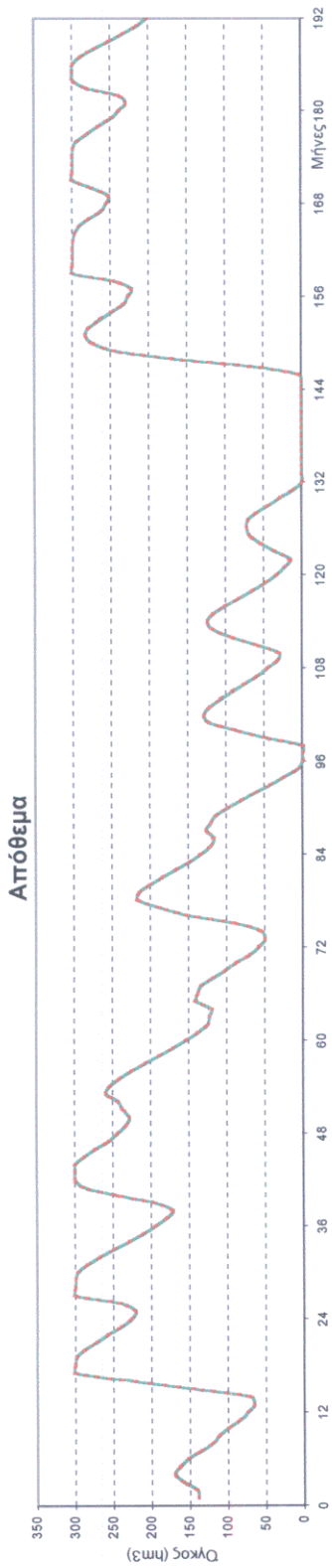
### Απόληψη



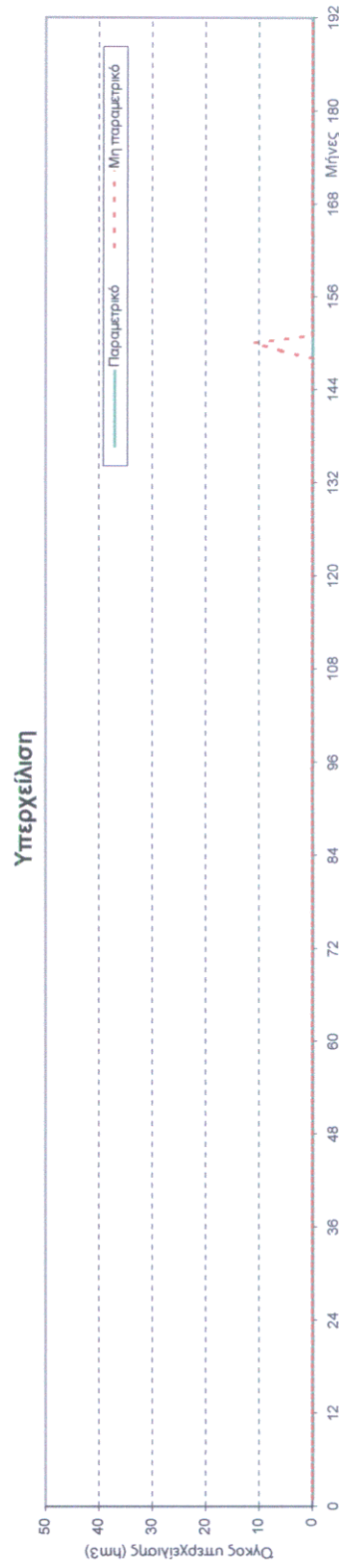
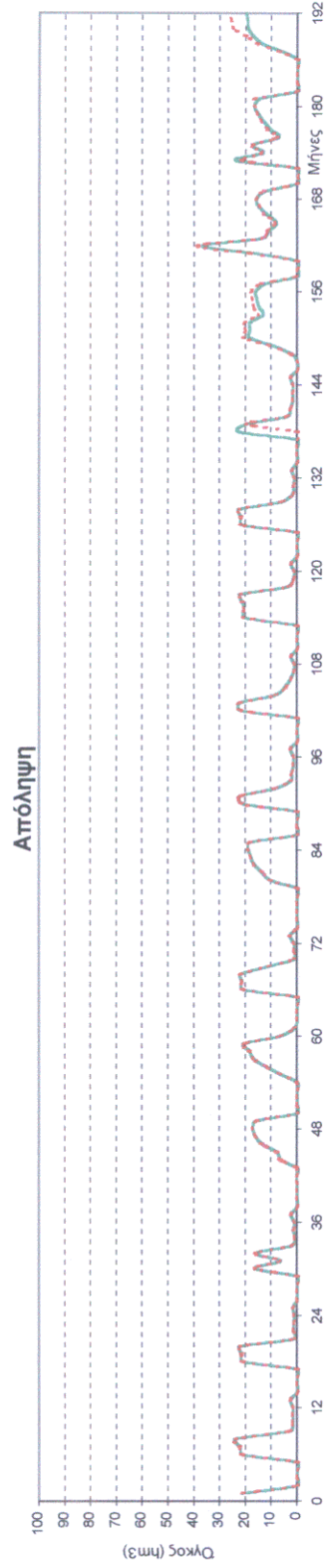
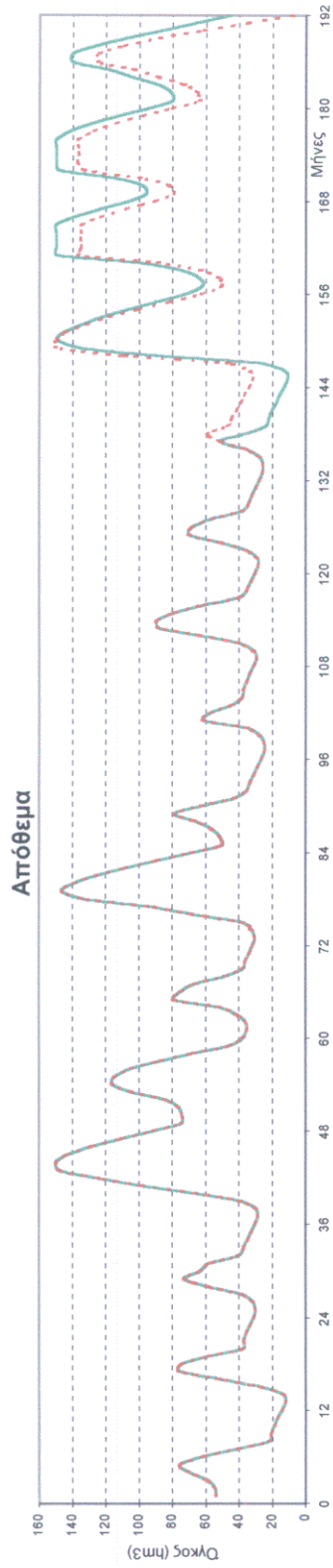
### Υπερχείλιση-Έλλειμμα



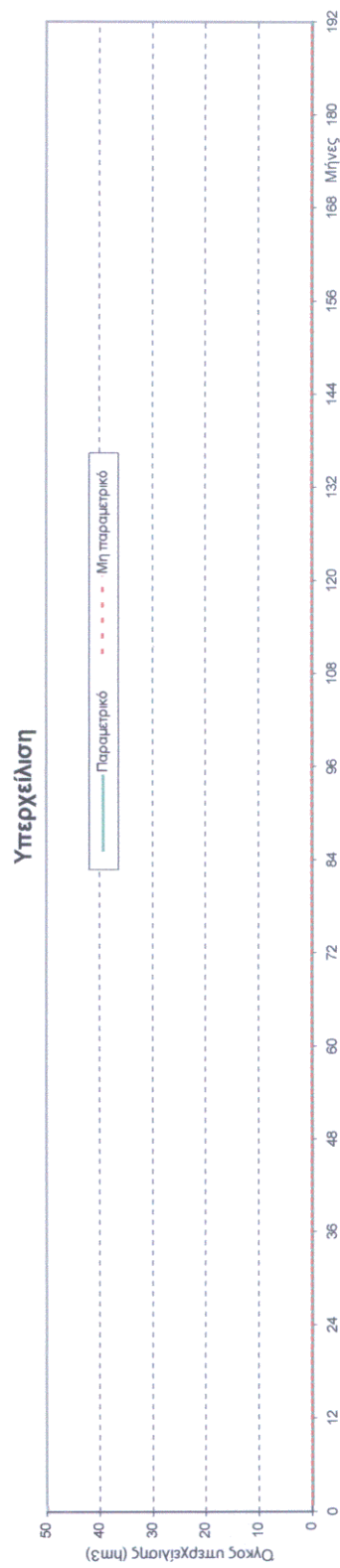
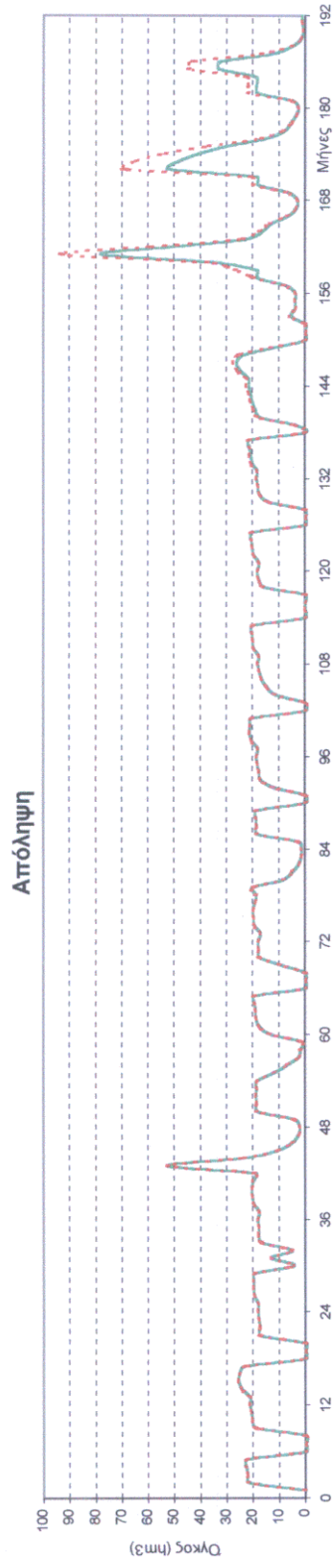
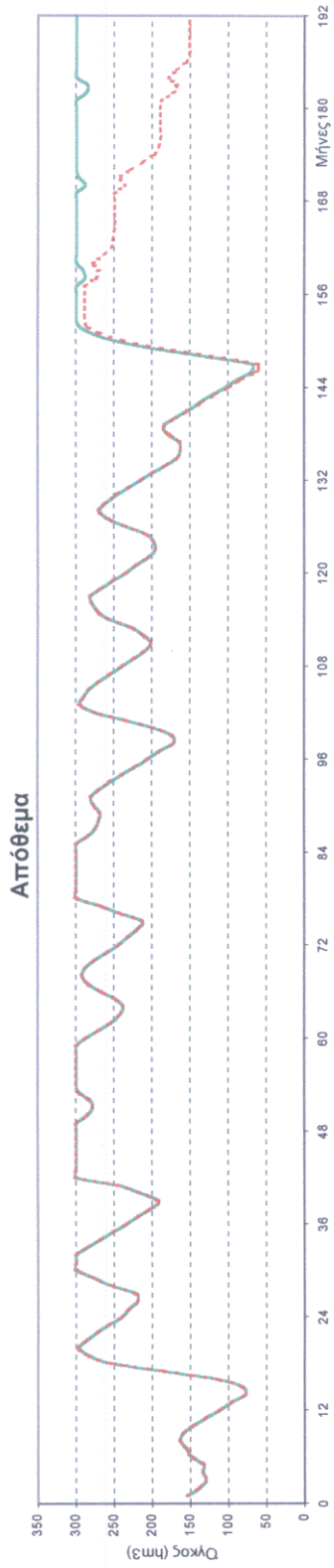
Ελαχιστοποίηση υδρευτικού κόστους  
Σύστημα δύο ταμειωτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληξης, υπερχείλισης και ελλείμματος



Ελαχιστοποίηση υδρευτικού κόστους  
 Ταμειούχρας 2 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Επιμέρους όγκο αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης

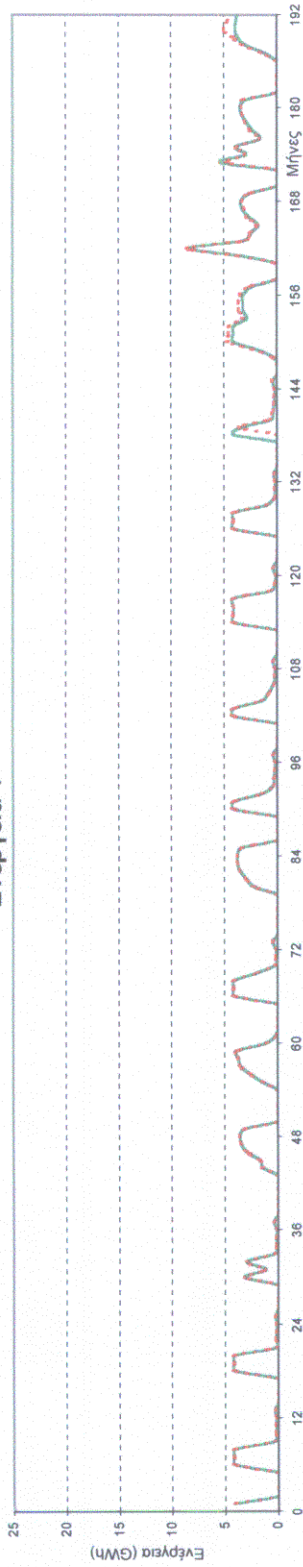


Μεγιστοποίηση ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους  
 Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης

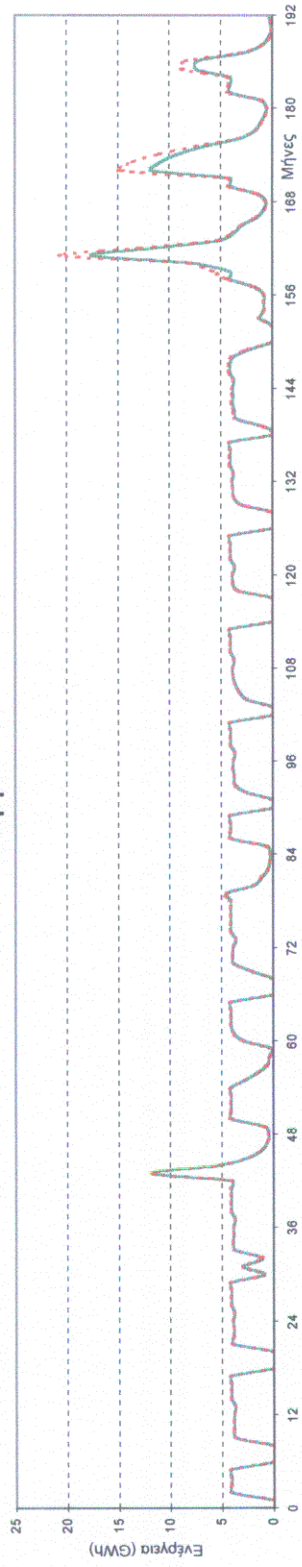


Μεγιστοποίηση ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους  
 Ταμειυτήρας 2 (σύστημα Α, σεναρίο εισροών 1)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψης και υπερχείλισης

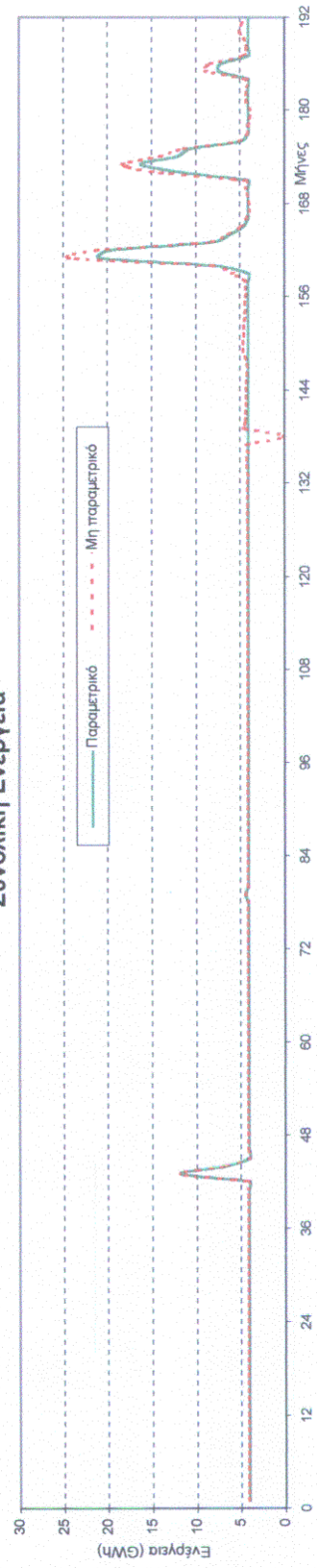
### Ενέργεια 1



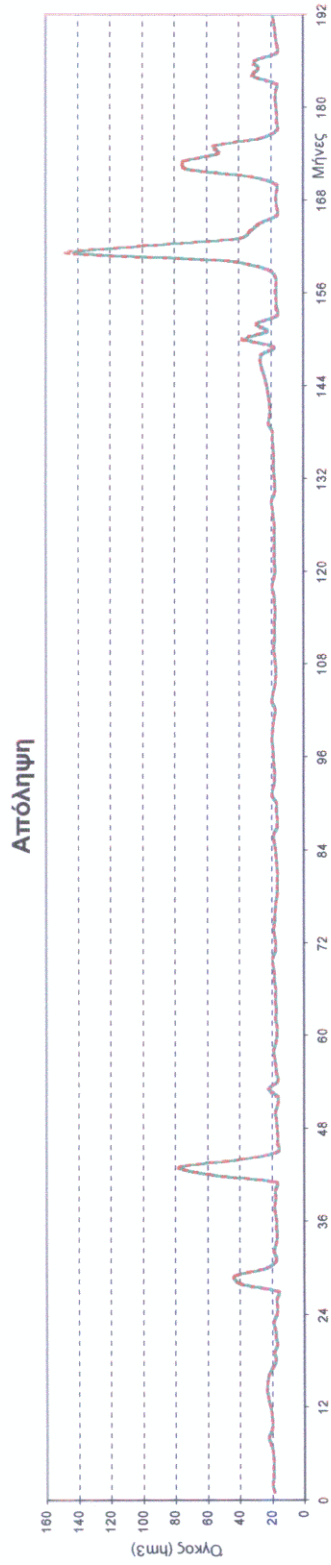
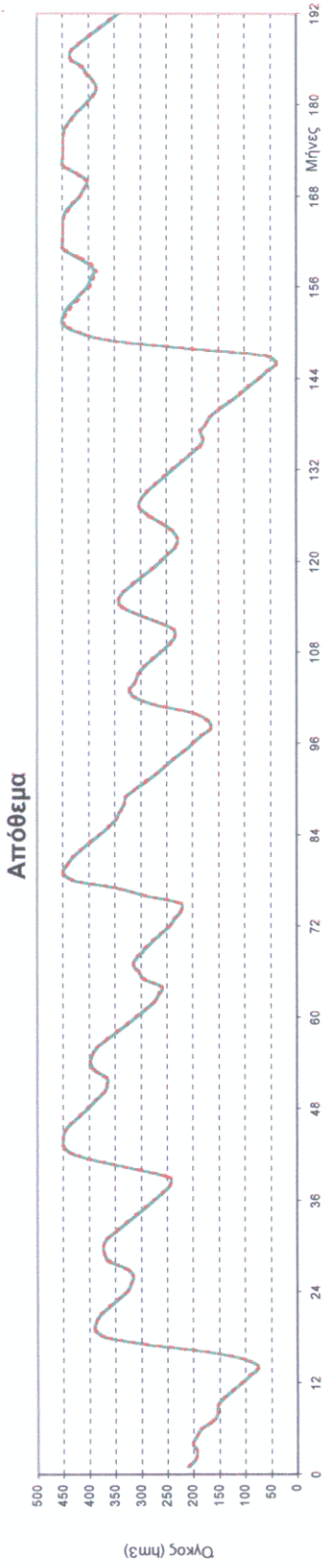
### Ενέργεια 2



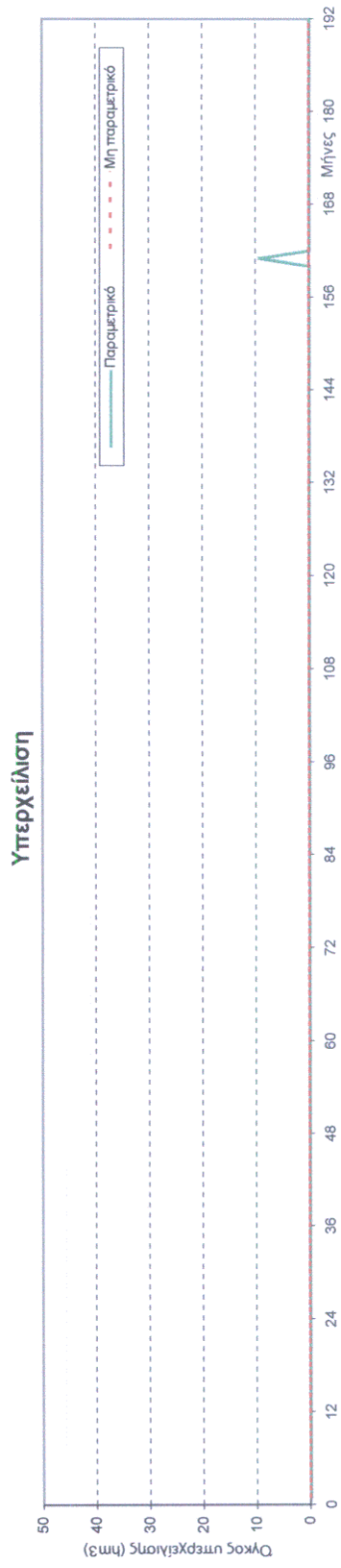
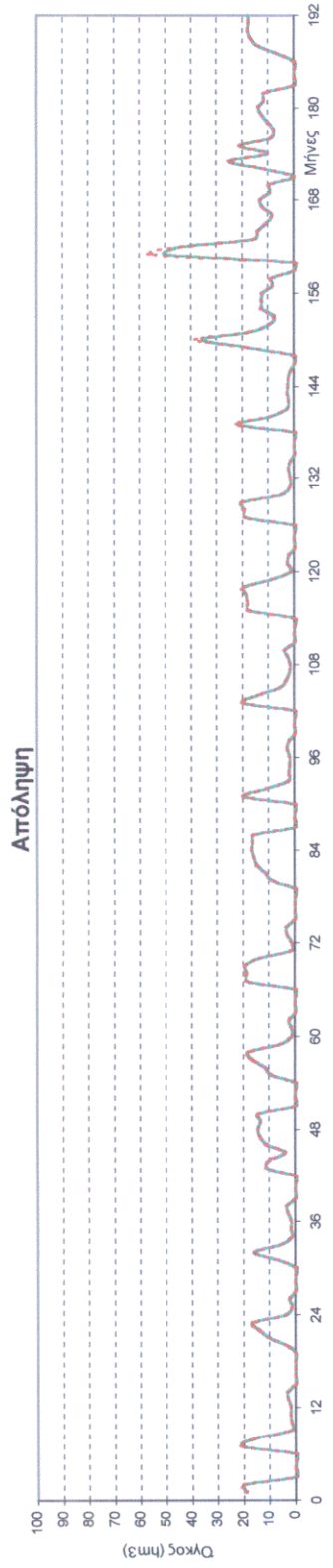
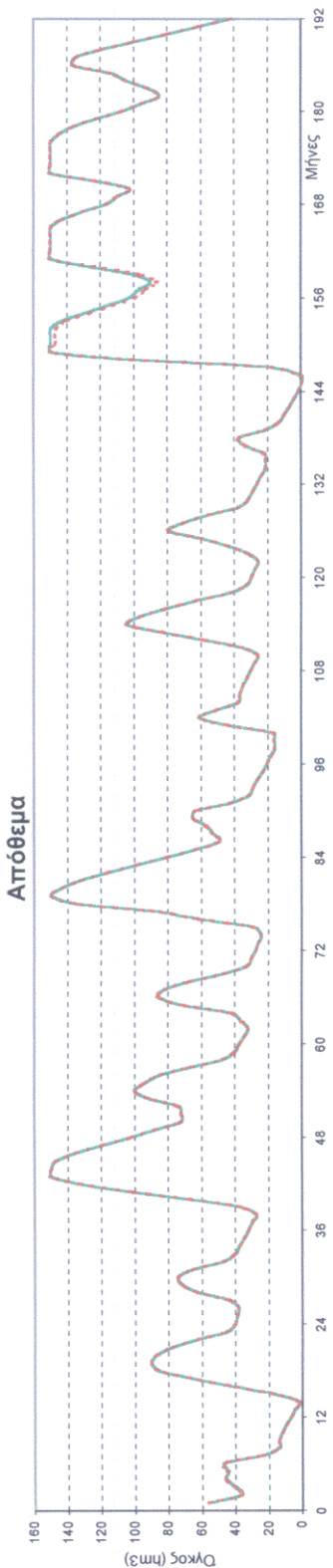
### Συνολική Ενέργεια



Μεγιστοποίηση ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους  
Επιμέρους ποσά ενέργειας (ταμειωτήρας 1, ταμειωτήρας 2)  
Συνολική ενέργεια συστήματος (σύστημα Α, σενάριο εισροών 1)

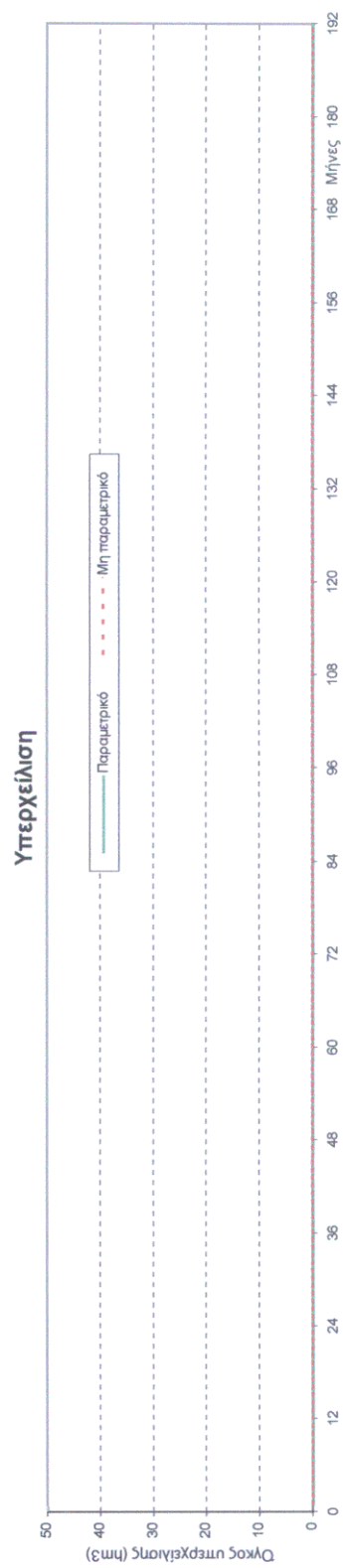
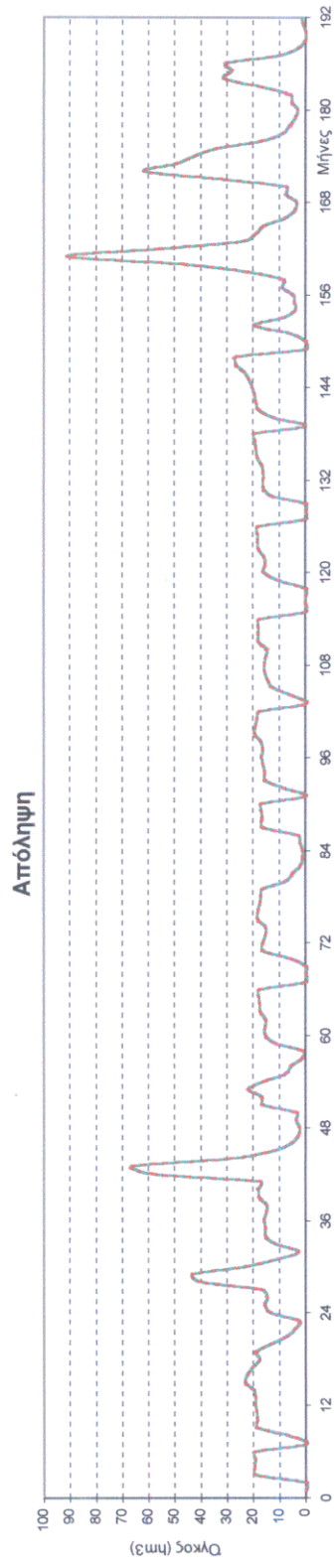
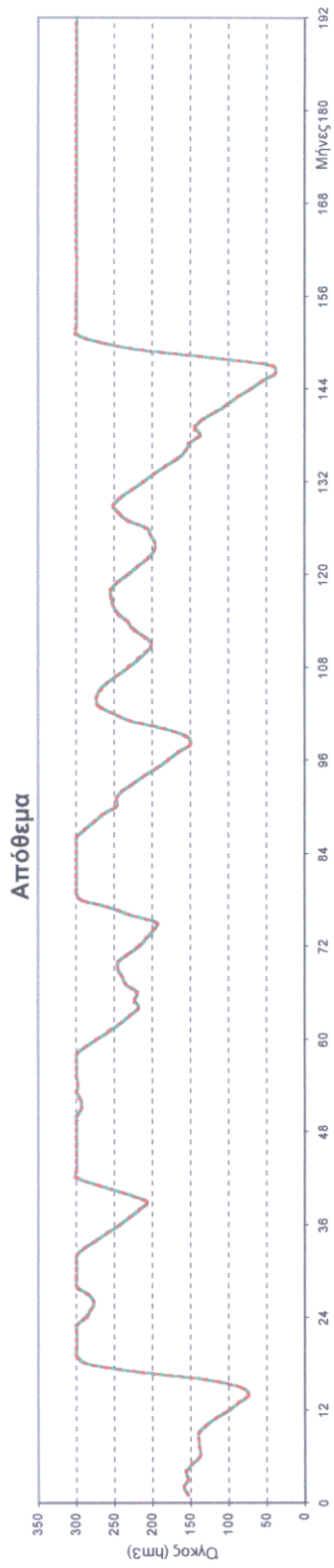


Μεγιστοποίηση ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους  
 Σύστημα δύο ταμειωτήρων (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληξης και υπερχείλισης



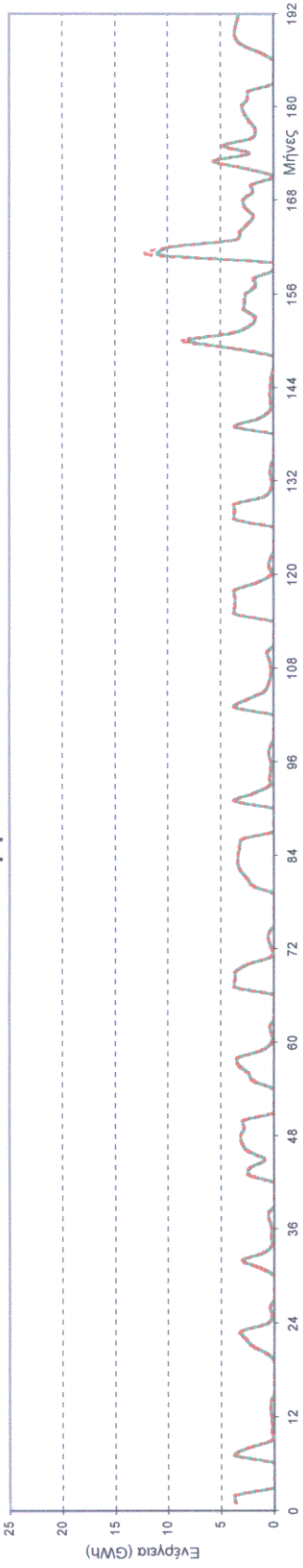
Μεγιστοποίηση ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους  
 Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης



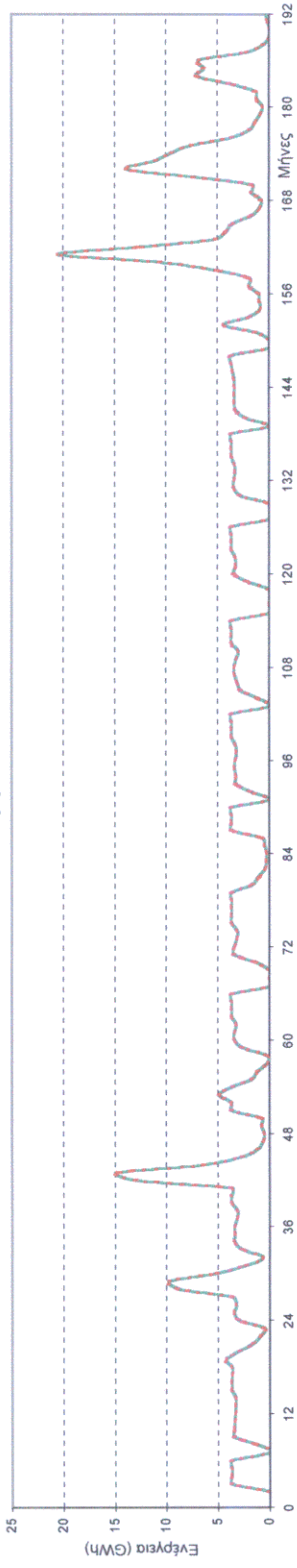


Μεγιστοποίηση ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους  
 Ταμειυτήρας 2 (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληξης και υπερχείλισης

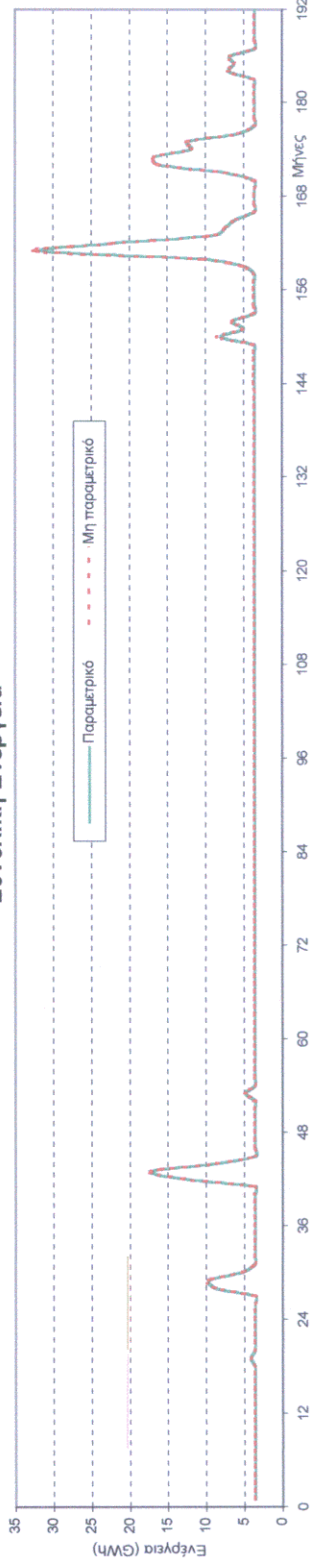
### Ενέργεια 1



### Ενέργεια 2

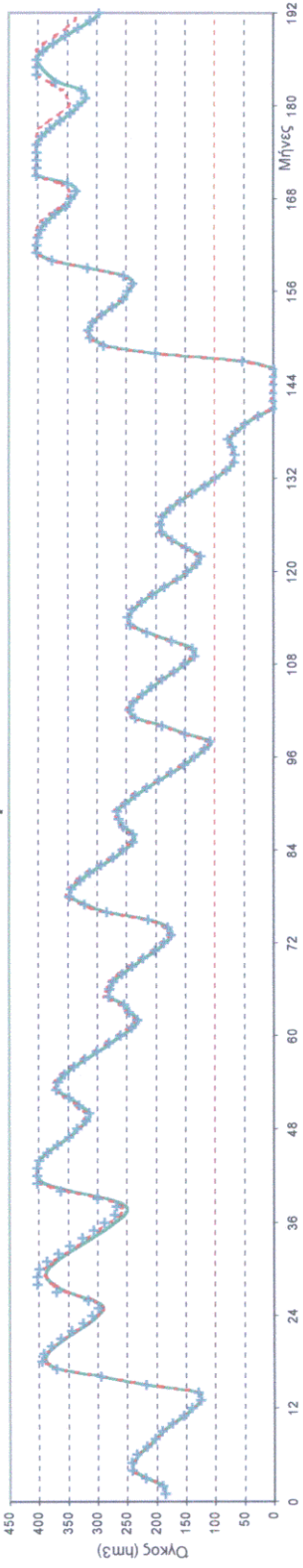


### Συνολική Ενέργεια

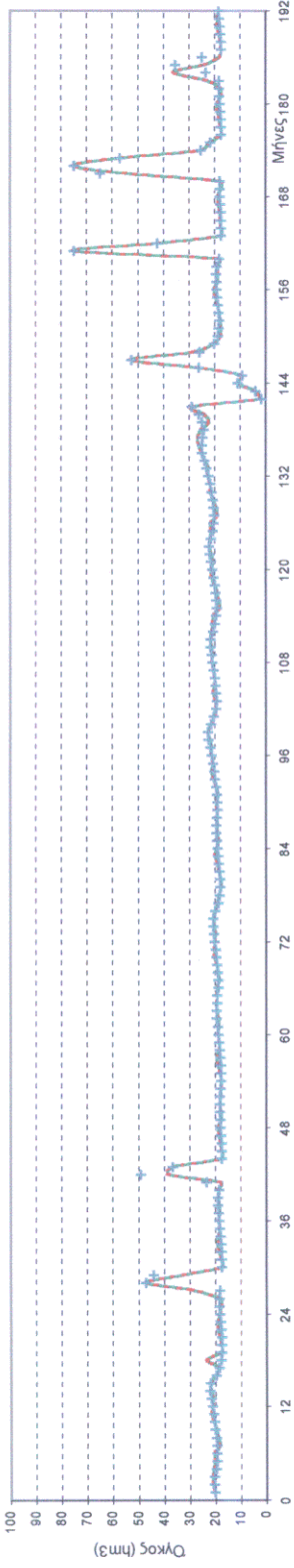


Μεγιστοποίηση ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους  
Επιμέρους ποσά ενέργειας (ταμειωτήρας 1, ταμειωτήρας 2)  
Συνολική ενέργεια συστήματος (σύστημα Α, σενάριο εισροών 2)

### Απόθεμα



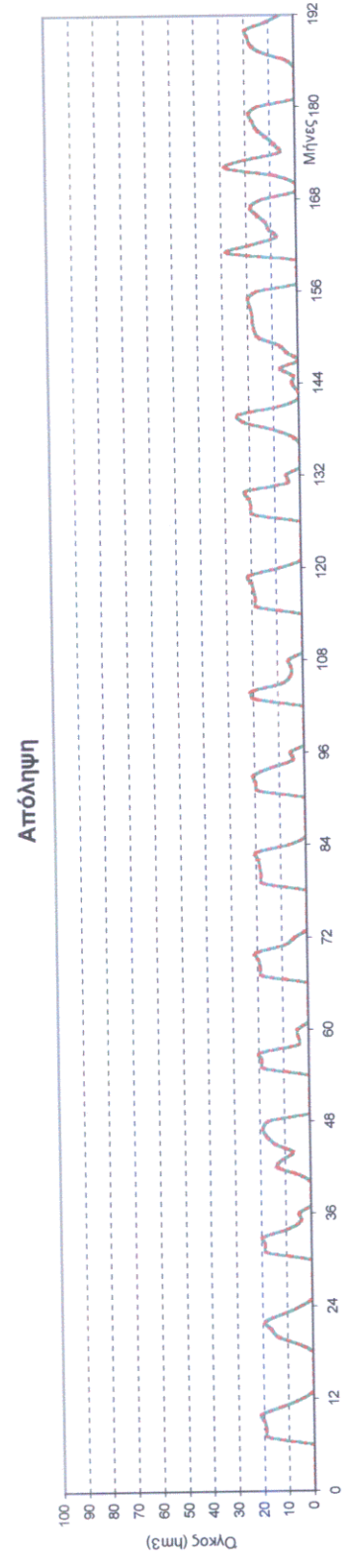
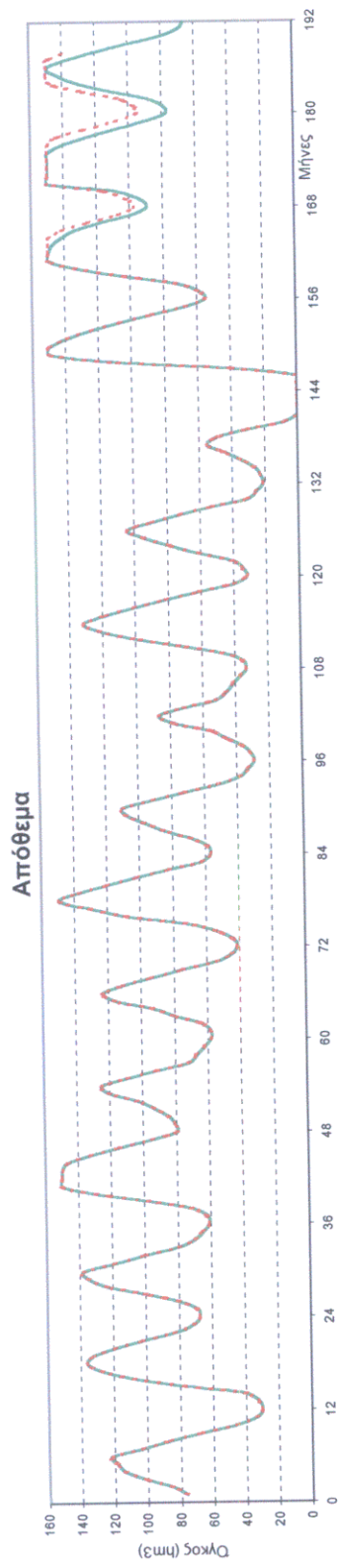
### Απόληψη



### Υπερχείλιση

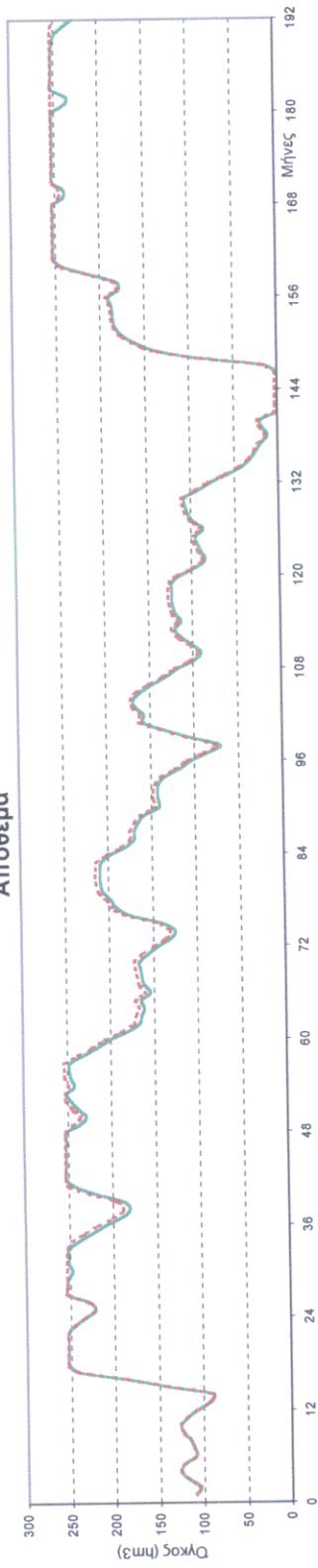


Μεγιστοποίηση ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους  
Σύστημα δύο ταμιευτήρων (σύστημα Β, σενάριο εισροών 1)  
Ιδεατός ισοδύναμος ταμιευτήρας  
Συνολικοί όγκοι αποθέματος, απόληξης και υπερχείλισης

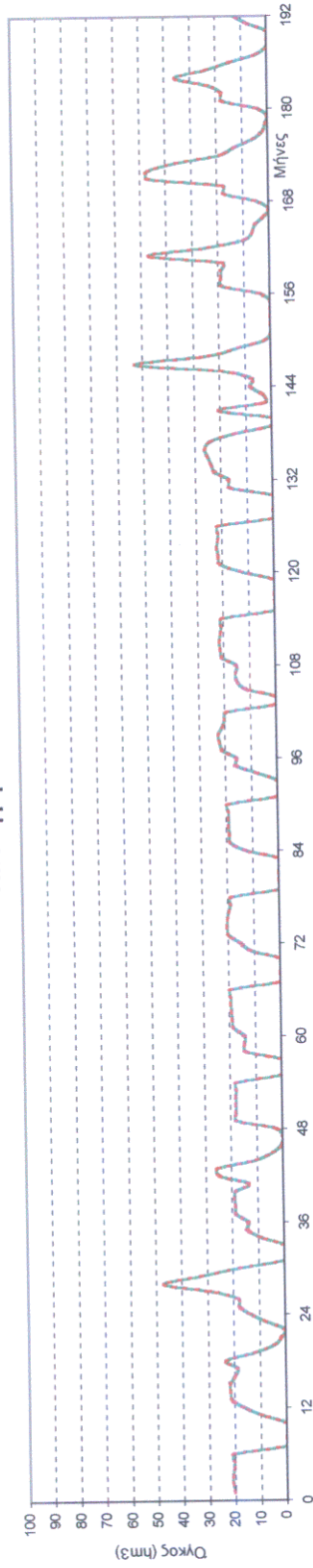


Μεγιστοποίηση ενεργειακού (οικονομικού) σφέλους  
 Ταμειυτήρας 1 (σύστημα Β, σενάριο εισροών 1)  
 Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης

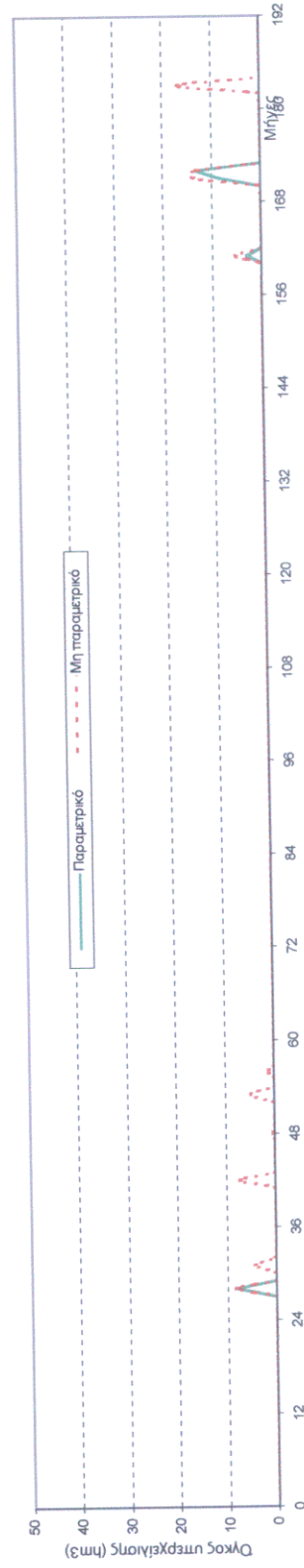
### Αποθέμα



### Απόληψη

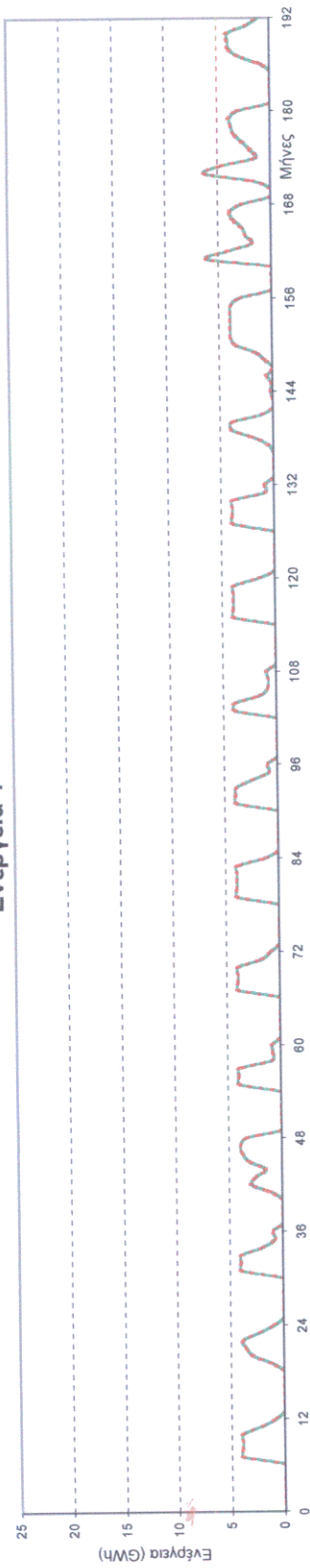


### Υπερχείλιση

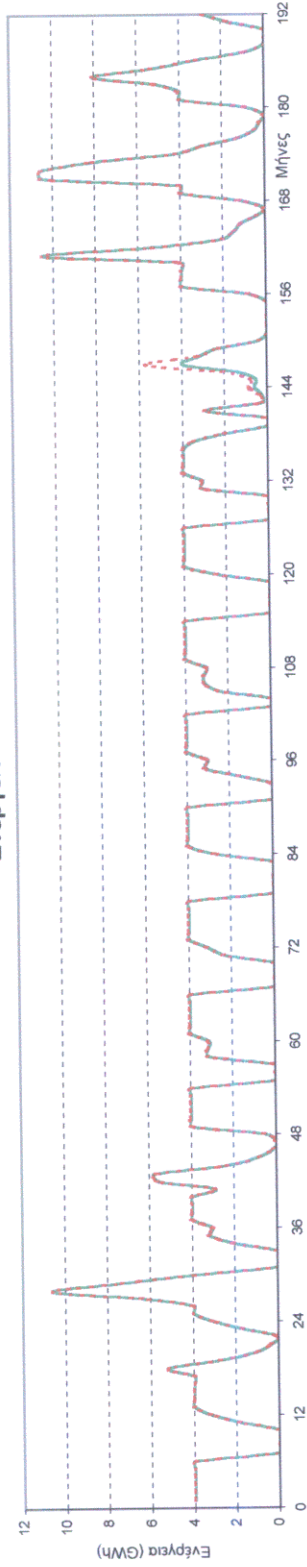


Μεγιστοποίηση ενεργειακού (οικονομικού) σφέλους  
Ταμειυτήρας 2 (σύστημα Β, σενάριο εισροών 1)  
Επιμέρους όγκοι αποθέματος, απόληψη και υπερχείλισης

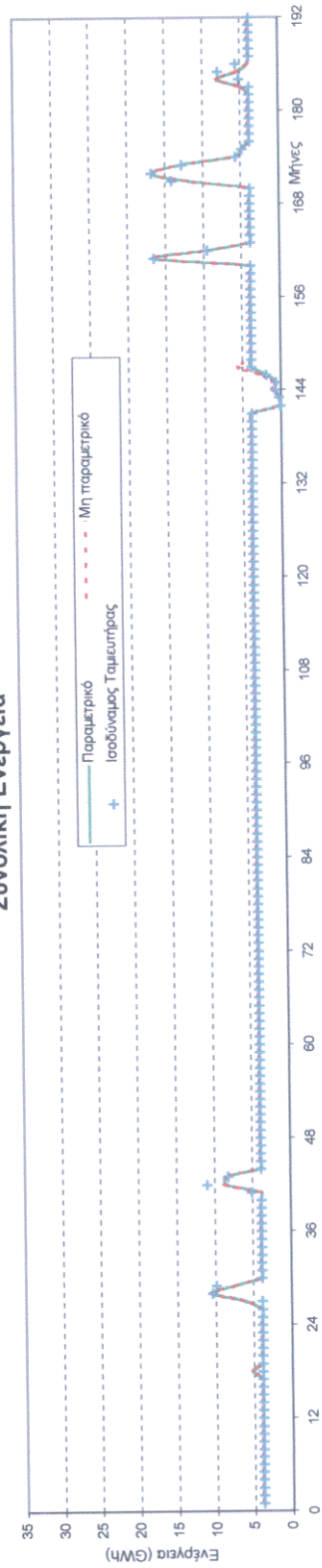
### Ενέργεια 1



### Ενέργεια 2



### Συνολική Ενέργεια



Μεγιστοποίηση ενεργειακού (οικονομικού) οφέλους  
Επιμέρους ποσά ενέργειας (ταμειυτήρας 1, ταμειυτήρας 2)  
Συνολική ενέργεια συστήματος και Ισοδύναμο Ταμειυτήρα (σύστημα Β, σενάριο εισροών 1)