



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ, ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ &  
ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

## Βέλτιστη Διαχείριση Συστημάτων Ταμιευτήρων Εφαρμογή στο Σύστημα Αχελώου - Θεσσαλίας

Διπλωματική εργασία: Ανδρέας Ευστρατιάδης

Νίκος Ζερβός

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 1999

# Διάρθρωση παρουσίασης

## Θεωρητικό υπόβαθρο

- Παραμετρικές μέθοδοι ανάλυσης συστημάτων ταμιευτήρων

## Χαρακτηριστικά του προγράμματος *Υδρονομέας*

## Περιγραφή βασικών λειτουργιών *Υδρονομέας*

- Διαδικασίες προσομοίωσης
- Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

## Εφαρμογή στο υδατικό σύστημα Αχελώου - Θεσσαλίας

## Συμπεράσματα - Προτάσεις

## Επίδειξη προγράμματος

# Θεωρητική ανάπτυξη

## Μαθηματικά εργαλεία μελέτης συστημάτων ταμιευτήρων

- Τεχνικές ανάλυσης συστημάτων
  - Βελτιστοποίηση διαχείρισης
  - Χονδροειδής προσέγγιση των φυσικών διεργασιών
  - Υπολογιστικός φόρτος (εκτεταμένος αριθμός μεταβλητών απόφασης)
- Κανόνες λειτουργίας
  - Ακριβής αναπαράσταση (προσομοίωση) της λειτουργίας του συστήματος
  - Αδυναμία καθορισμού βέλτιστης πολιτικής διαχείρισης

## Παραμετροποίηση προβλημάτων διαχείρισης ταμιευτήρων

- Συνδυασμός προσομοίωσης και βελτιστοποίησης
- Προσομοίωση λειτουργίας με χρήση λίγων παραμέτρων
- Περιορισμός των μεταβλητών απόφασης  $\Rightarrow$  πλεονέκτημα στη βελτιστοποίηση
- Δυνατότητα προσαρμογής σε ευρύ φάσμα υδροσυστημάτων

# Παραμετρικός κανόνας (1)

## Θεωρητικό υπόβαθρο

- Κανόνας Νέας Υόρκης (NYR, 1950): Ελαχιστοποίηση υπερχειλίσεων σε συστήματα παραλλήλων ταμειυτήρων

$$\text{prob}(\text{CQ}_i \geq K_i - S_i) = \text{const}$$

- Χωρικός κανόνας (1962): Διατύπωση του NYR ως κανόνα λειτουργίας

$$\frac{K_i - S_i}{E[\text{CQ}_i]} = \frac{\sum_{j=1}^N K_j - V}{\sum_{j=1}^N E[\text{CQ}_j]}$$

## Μαθηματική διατύπωση (Nalbantis & Koutsoyiannis, 1997)

- Ο ωφέλιμος όγκος του συστήματος κατανέμεται σύμφωνα με το γραμμικό νόμο

$$S_i^* = a_i + b_i V$$

- Επειδή  $\sum_{i=1}^N S_i = V$  προκύπτουν οι περιορισμοί  $\sum_{i=1}^N a_i = 0$ ,  $\sum_{i=1}^N b_i = 1$

## Παραμετρικός κανόνας (2)

- Διορθώσεις για την ικανοποίηση των φυσικών περιορισμών

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

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

### Παρατηρήσεις

- Λόγω των διορθώσεων προκύπτουν μη γραμμικοί κανόνες λειτουργίας
- Δυνατότητα απλοποιημένης διατύπωσης με παράλειψη των συντελεστών  $a_i$

## Παραμετρική διατύπωση στόχων παραγωγής ενέργειας

- Εάν επιδιώκεται μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας σε σύστημα με υδροηλεκτρικά έργα, οι ενεργειακοί στόχοι μπορούν να διατυπωθούν παραμετρικά ως προς τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος

$$E_p^* = e_p \cdot \lambda \cdot \sum_{p=1}^M P_p^{\text{inst}}$$

- Φυσικός περιορισμός

$$e_p \leq \frac{P_p^{\text{inst}}}{\sum_{p=1}^M P_p^{\text{inst}}}$$

- Περιορισμός ως προς το εύρος ενεργειακής απόδοσης (συνήθως 15 - 20 %)

$$E^{\min} \leq \sum_{p=1}^M e_p \leq E^{\max}$$

# Το πρόγραμμα Υδρονομέας και τα χαρακτηριστικά του

## Δυνατότητες του προγράμματος

- Αμφίδρομη επικοινωνία με τη βάση δεδομένων
- Διαμόρφωση δικτύου οποιασδήποτε τοπολογίας
- Εισαγωγή και ιεράρχηση ποικίλων τύπων στόχων
- Βελτιστοποίηση ως προς 4 τύπους αντικειμενικών συναρτήσεων
- Προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος για διάφορες επιλογές
- Γραφική αναπαράσταση της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο
- Παρουσίαση αναλυτικών αποτελεσμάτων

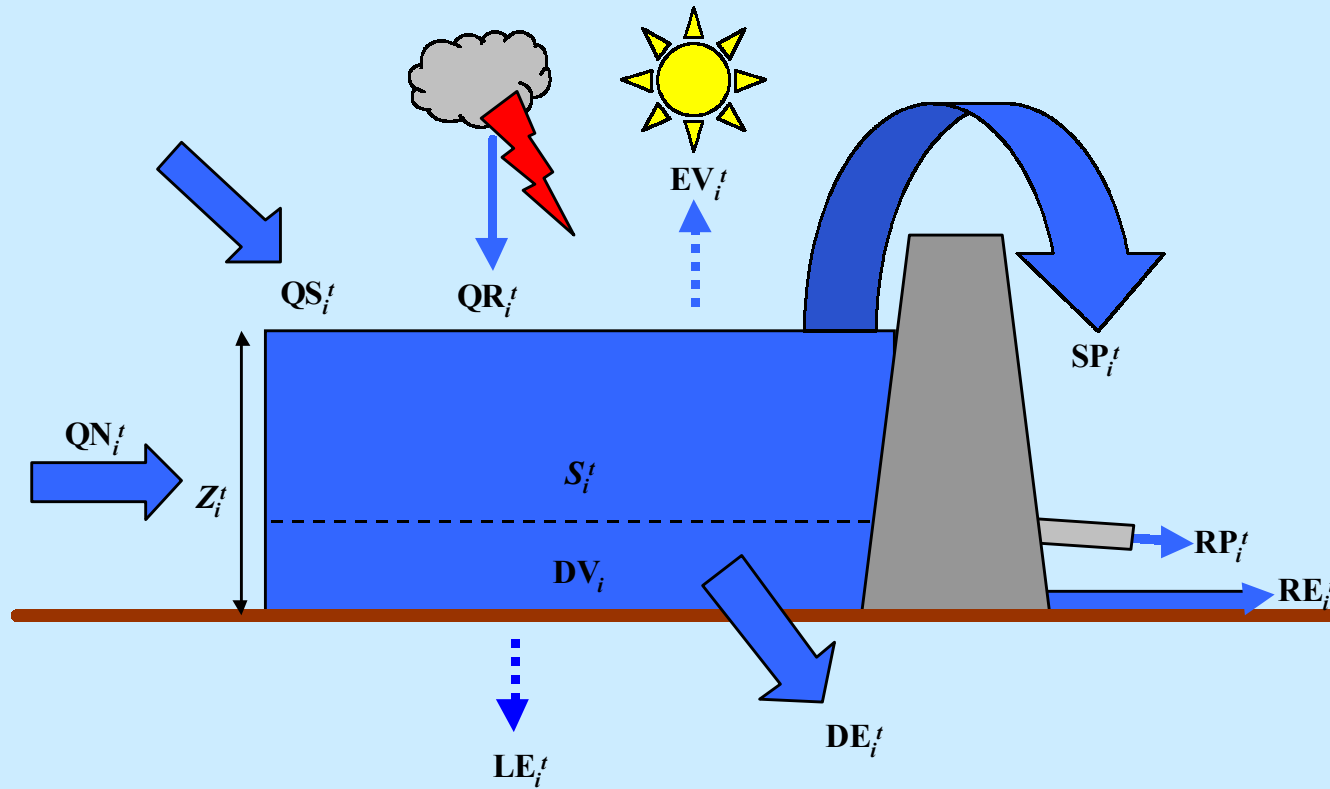
## Δομικά στοιχεία του υδατικού συστήματος

- Ταμιευτήρες και απλοί κόμβοι χωρίς αποθηκευτική ικανότητα
- Αγωγοί μονής ή αμφίδρομης φοράς ροής, με ή χωρίς παράλληλη φυσική ροή
- Μονάδες μετατροπής ενέργειας (υδροστρόβιλοι, αντλίες, αντλιοστρόβιλοι)
- Στόχοι αναφερόμενοι σε στοιχεία του υδατικού συστήματος

## Δυναμική του συστήματος

- Το χρονικό διάστημα προσομοίωσης διακριτοποιείται σε βήματα
- Σε κάθε βήμα ισχύει η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου

$$S_i^{t+1} = S_i^t + QS_i^t + QR_i^t + QN_i^t - EV_i^t - LE_i^t - DE_i^t - R_i^t - SP_i^t$$





# Γενικά χαρακτηριστικά ταμιευτήρων

## Ιδιότητες

- Αποθηκευτική ικανότητα
- Νεκρός όγκος
- Καμπύλες στάθμης - όγκου - επιφάνειας
- Έκταση υπολεκάνης απορροής
- Χρονοσειρές βροχής - απορροής - εξάτμισης
- Υπόγειες διαφυγές

## Υπόγειες διαφυγές

Θεωρούνται συνάρτηση της στάθμης του ταμιευτήρα

$$LE_i^t = A_i^t \cdot Z_i^{t3} + B_i^t \cdot Z_i^{t2} + C_i^t \cdot Z_i^t + E_i^t + W_i^t$$

## Περιορισμός αποθέματος

$$0 \leq S_i^t \leq K_i$$

# Γενικά χαρακτηριστικά αγωγών

## Ιδιότητες

- Κόμβοι σύνδεσης
- Δυνατότητα αμφίδρομης ροής
- Δυνατότητα παράλληλης φυσικής ροής (ποταμός)
- Σταθερή ή εξαρτώμενη από το ύψος πτώσης παροχετευτικότητα
- Υψόμετρα τροφοδοσίας και εξαγωγής
- Μέγιστο χρονικό ποσοστό χρήσης κατά την ορθή και ανάστροφη φορά ροής
- Απαγόρευση χρήσης αγωγού για ορισμένες λειτουργίες

## Περιορισμοί παροχετευτικότητας

- Γενικός περιορισμός

$$Q_j^t \leq C_j \cdot DC_j^t$$

- Επιπλέον περιορισμός για αγωγούς αμφίδρομης ροής

$$Q_j^t / DC_j^t + RQ_j^t / RDC_j^t \leq 1$$

# Γενικά χαρακτηριστικά μονάδων μετατροπής ενέργειας

## Ιδιότητες

- Μονοσήμαντη σύνδεση με αγωγό
- Εγκατεστημένη ισχύς
- Καμπύλη ύψους πτώσης - ειδικής ενέργειας - παροχής

## Υπολογισμός ενέργειας

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ή καταναλισκόμενης ενέργειας χρησιμοποιείται η εξίσωση

$$E_p^t = \psi_p^t \cdot V_p^t \cdot H_p$$

όπου  $\psi = 0.2725 \eta \cdot H_n / H$  εάν παράγεται ενέργεια μέσω υδροστροβίλων

$\psi = 0.2725 / \eta \cdot H / H_n$  εάν καταναλώνεται ενέργεια μέσω αντλιών

# Γενικά χαρακτηριστικά στόχων

## Ιδιότητες

- Τύπος και διαχειριστής στόχου
- Μηνιαίες τιμές και δυνατότητα διαχρονικής αύξησης (γραμμικής ή εκθετικής)
- Μέγιστη επιτρεπτή αστοχία

## Τύποι και διαχειριστές στόχων

Κατανάλωση νερού για άρδευση,  
ύδρευση ή άλλες χρήσεις

Παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας

Ελάχιστη ροή

Ροή περιβαλλοντικής διατήρησης

Μέγιστος ή ελάχιστος όγκος

Απλός κόμβος ή ταμιευτήρας

Στρόβιλος ή αντλιοστρόβιλος

Αγωγός

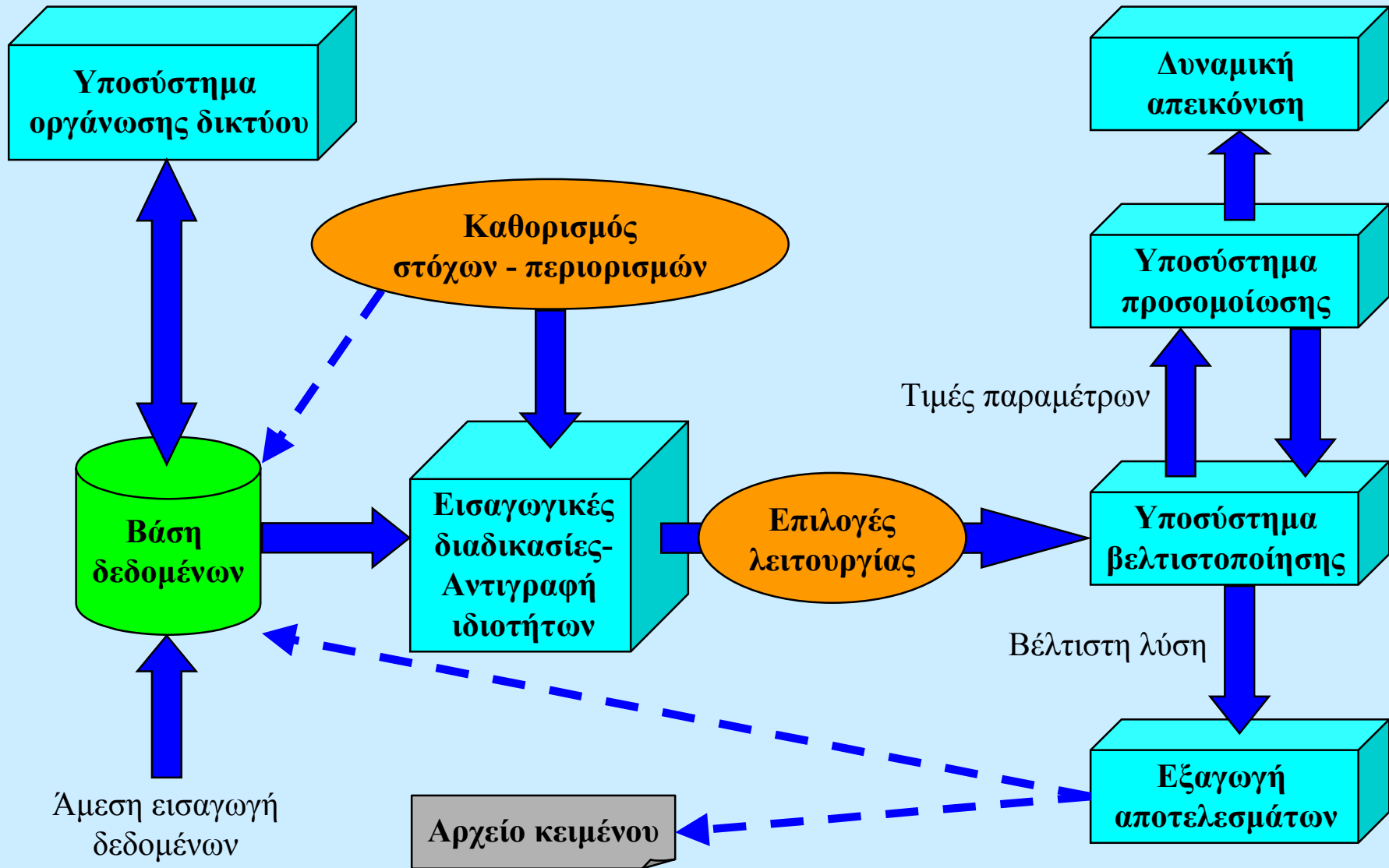
Αγωγός με παράλληλη φυσική ροή

Ταμιευτήρας

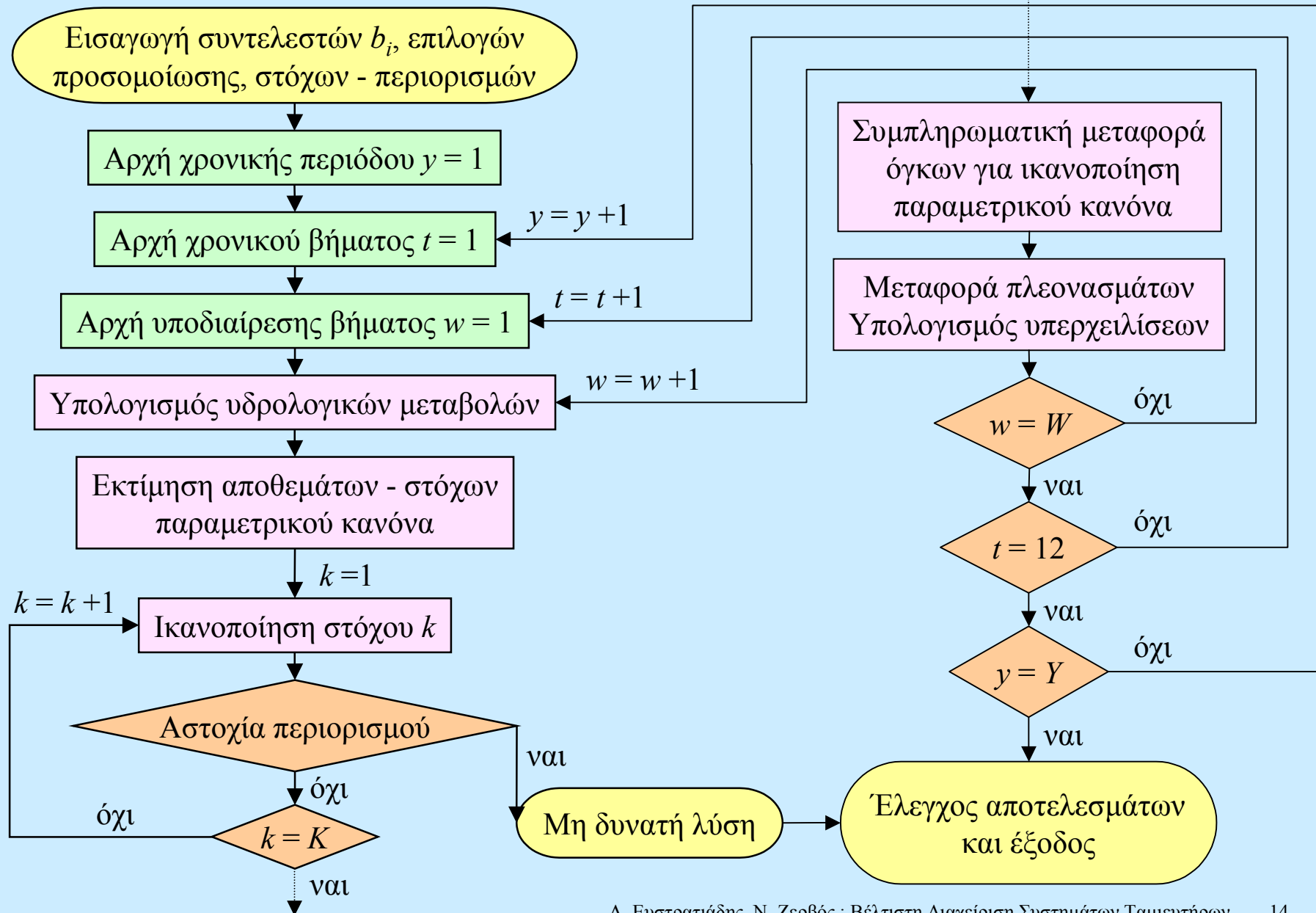
## Παρατηρήσεις

- Οι στόχοι ικανοποιούνται με προκαθορισμένη σειρά προτεραιότητας
- Υπέρβαση αστοχίας συνεπάγεται μη συμβατή (αδύνατη) λύση

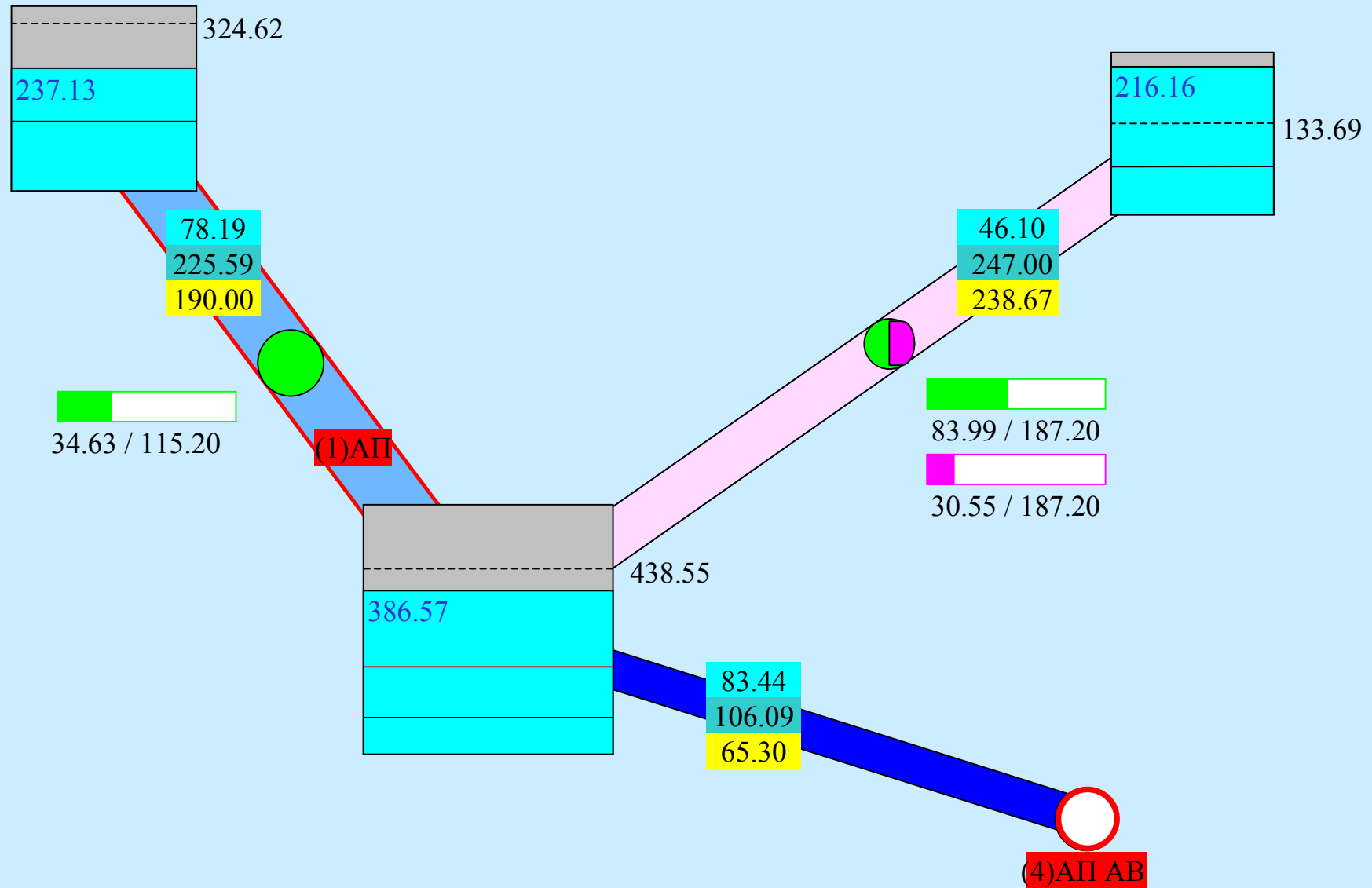
# Λειτουργίες του Υδρονομέα



## Διαδικασίες προσομοίωσης



## Δυναμική απεικόνιση προσομοίωσης



# Στοιχεία βελτιστοποίησης (1)

## Αντικειμενική συνάρτηση

- Ελαχιστοποίηση αστοχίας ποσοτικά ορισμένου στόχου
- Μεγιστοποίηση τιμής στόχου με καθορισμένη αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας
- Μεγιστοποίηση συνολικής παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας αιχμής με καθορισμένους ενεργειακούς στόχους
- Μεγιστοποίηση συνολικής παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας αιχμής με αναζήτηση ενεργειακών στόχων

## Ορισμός αστοχίας

- Αστοχία ως προς τις χρονικές περιόδους
- Αστοχία ως προς τα χρονικά βήματα
- Αστοχία κάλυψης όγκου ζήτησης



## Στοιχεία βελτιστοποίησης (2)

### Ελαχιστοποίηση αστοχίας ποσοτικά ορισμένου στόχου

- Αναζήτηση βέλτιστων τιμών παραμέτρων  $b_i$  με διαδοχικές προσομοιώσεις
- Διαμόρφωση ομοιόμορφου καννάβου με καθορισμό βήματος διακριτοποίησης
- Δυνατότητα πύκνωσης γύρω από τη βέλτιστη λύση
- Επιλογή βελτίστου με βάση τον προεπιλεγμένο τύπο αστοχίας

### Μεγιστοποίηση συνολικής παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας αιχμής με καθορισμένους ενεργειακούς στόχους

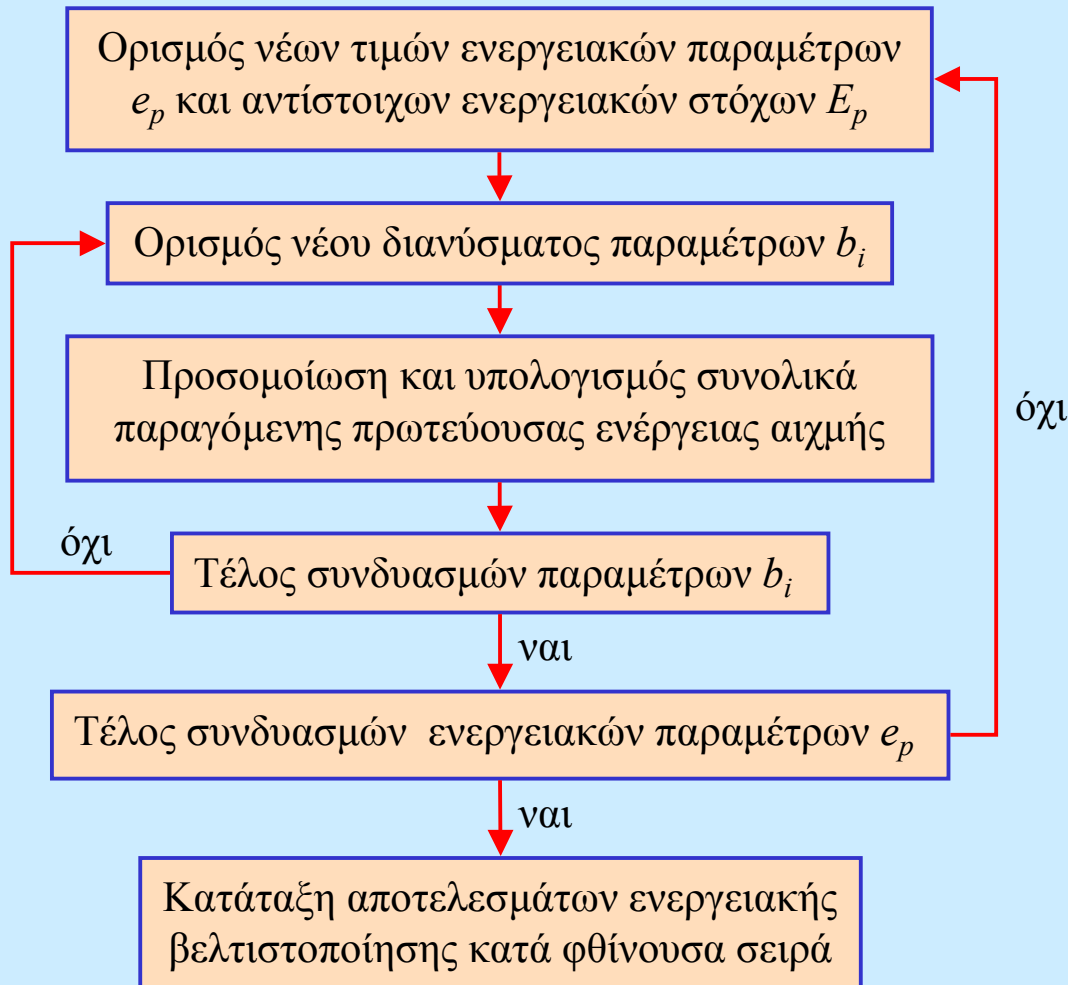
- Επιλογή βελτίστου με βάση την παραγόμενη ενέργεια

### Μεγιστοποίηση τιμής στόχου με καθορισμένη αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας

- Προσέγγιση μέγιστης τιμής στόχου με μέθοδο διχοτόμησης και διαδοχικές αναζητήσεις του βέλτιστου κανόνα λειτουργίας

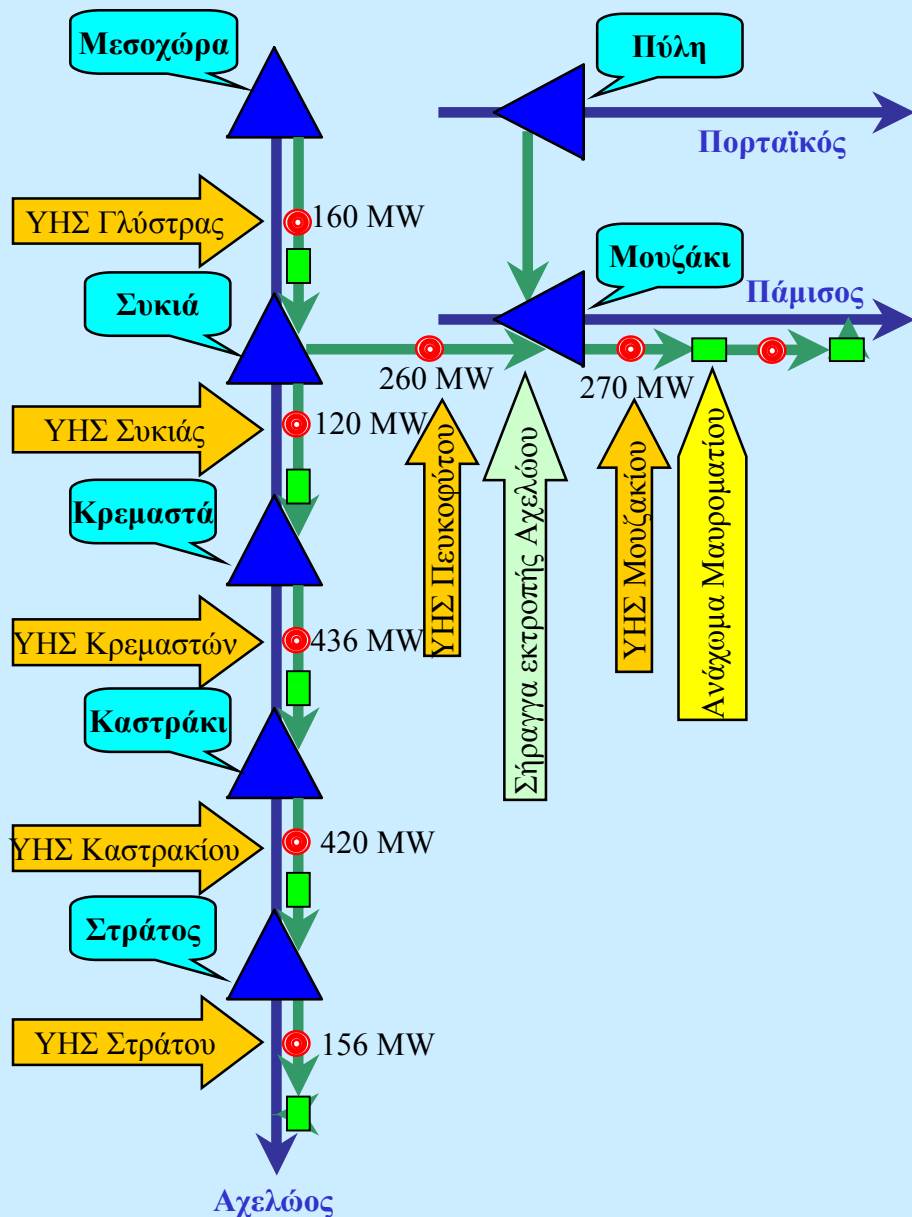
## Στοιχεία βελτιστοποίησης (3)

Μεγιστοποίηση συνολικής παραγόμενης ενέργειας με αναζήτηση ενεργειακών στόχων



- Προσδιορισμός εύρους ενεργειακής απόδοσης
- Ορισμός βήματος μεταβολής ενεργειακών παραμέτρων
- Δυνατότητα καθορισμού ελάχιστων τιμών στόχων παραγωγής ενέργειας

## Η περιοχή μελέτης



### Αρδευτικές ανάγκες

- Κύριοι αρδευτικοί κόμβοι σε Στράτο και Μαυρομάτι (450 και 600 hm<sup>3</sup> αντίστοιχα)
- Τοπική ζήτηση 4 hm<sup>3</sup> στην Πύλη

### Περιβαλλοντικοί περιορισμοί

- Ελάχιστη παροχή περιβαλλοντικής διατήρησης στον Αχελώο 1.5 m<sup>3</sup>/s κατάντη Μεσοχώρας, 5 m<sup>3</sup>/s κατάντη Συκιάς και 21 m<sup>3</sup>/s στις εκβολές
- Ελάχιστη παροχή κατάντη Πύλης και Μουζακίου 0.15 m<sup>3</sup>/s
- Επιπλέον 0.35 m<sup>3</sup>/s κατάντη Πύλης για εμπλουτισμό υπόγειου υδροφορέα

## Εξεταζόμενα σενάρια

### Σχήμα Έργων Α (Μεσοχώρα, Συκιά, Πύλη και Μουζάκι)

Σενάριο	Υποδιαίρεση χρ. βήματος	Απόληψη στο Μαυρομάτι ( $\text{hm}^3$ )	Αντληση	Παραγόμενη ενέργεια Πευκοφύτου/Μουζακίου
A <sub>1</sub>	1	600	Ναι	Πρωτεύουσα
A <sub>2</sub>	4	600	Ναι	Πρωτεύουσα
A <sub>3</sub>	1	700	Ναι	Πρωτεύουσα
A <sub>4</sub>	1	600	Όχι	Πρωτεύουσα
A <sub>5</sub>	1	600	Όχι	Μόνο δευτερεύουσα

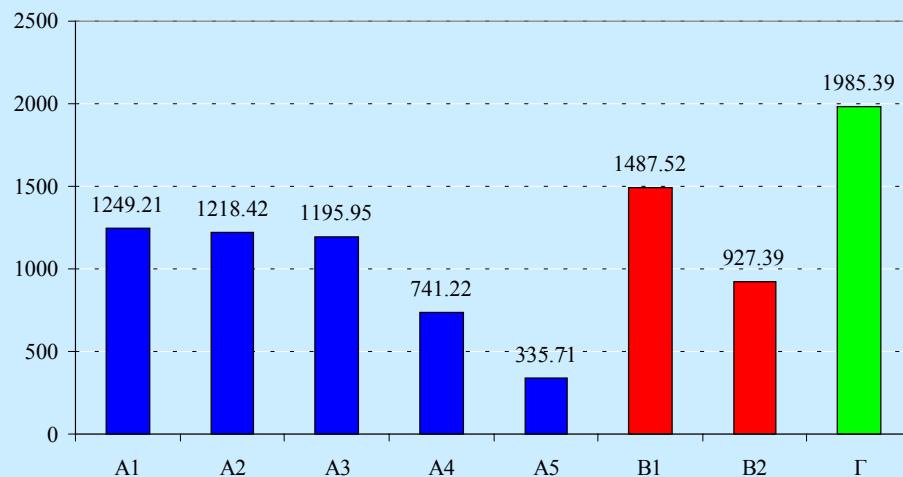
### Σχήμα Έργων Β (Μεσοχώρα, Συκιά, Κρεμαστά, Καστράκι και Στράτος)

- Σενάριο B<sub>1</sub>: χωρίς εκτροπή
- Σενάριο B<sub>2</sub>: εκτροπή 600  $\text{hm}^3$  ετησίως από ταμιευτήρα Συκιάς

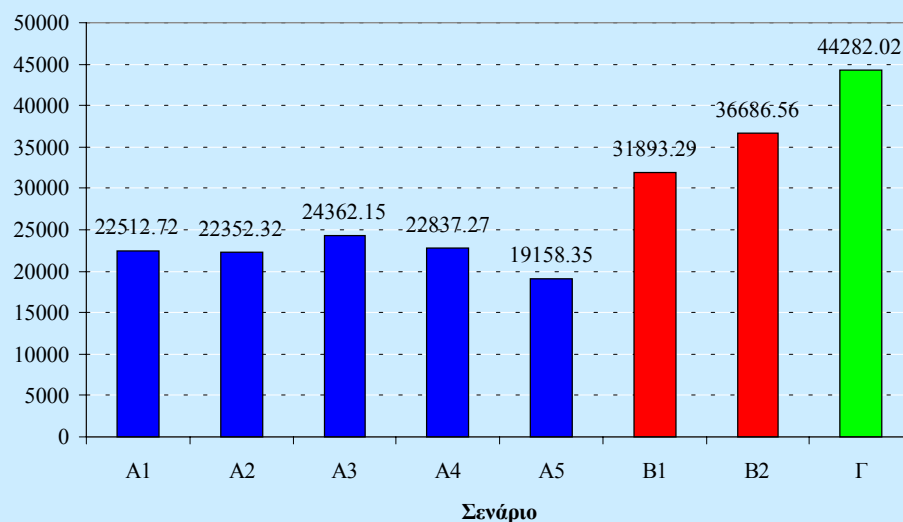
### Σχήμα Έργων Γ (Πλήρες σύστημα)

# Αποτελέσματα

Μέση ετήσια παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας (GWh)



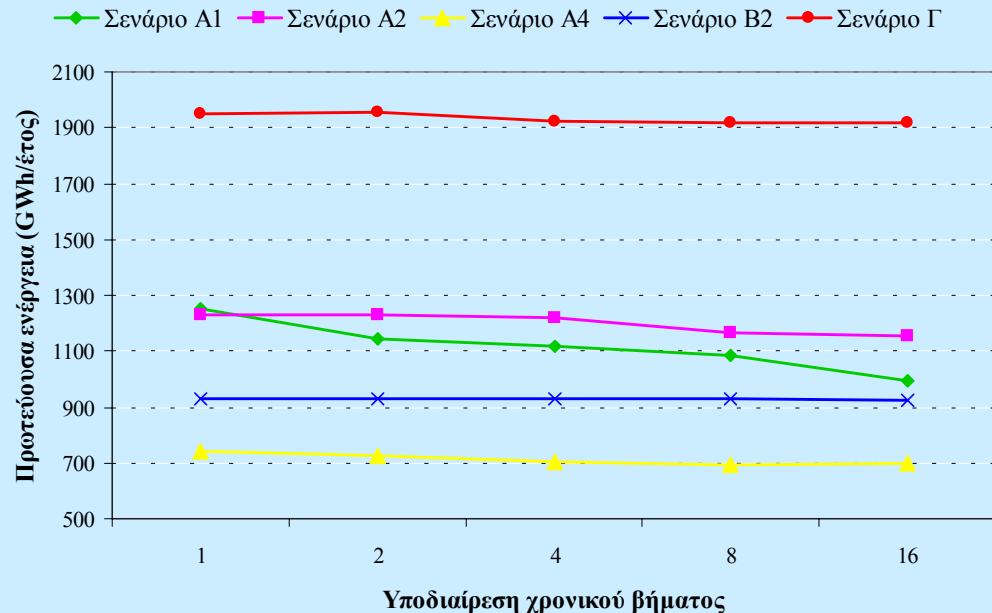
Μέσο ετήσιο οικονομικό όφελος (εκατ. δρχ.)



## Παρατηρήσεις

- Ικανοποίηση καταναλωτικών και περιβαλλοντικών περιορισμών με πρακτικά μηδενικές αστοχίες
- Δυνατότητα αύξησης αρδευτικής απόληψης στη Θεσσαλία (A<sub>3</sub>)
- Σημαντική μείωση πρωτεύουσας ενέργειας με χρήση συμβατικών υδροστροβίλων (A<sub>4</sub> και A<sub>5</sub>)
- Σύστημα ταμιευτήρων Αχελώου: μείωση πρωτεύουσας ενέργειας αλλά αύξηση οφέλους στην περίπτωση εκτροπής από Συκιά (B<sub>1</sub> και B<sub>2</sub>)
- Κατασκευή ρυθμιστικών έργων Θεσσαλίας (Γ) : ευνοϊκή ως προς την ενεργειακή και οικονομική απόδοση

# Ανάλυση ευαισθησίας



## Υποδιαίρεση χρονικού βήματος προσομοίωσης

- Γενικά δεν επηρεάζει την ακρίβεια των λύσεων
- Απαραίτητη σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. Σενάριο A<sub>1</sub>)
- Συστήνεται διερεύνηση

## Αρχικοί όγκοι ταμιευτήρων

- Δεν επηρεάζουν την ακρίβεια των λύσεων εκτός αν κυμαίνονται στα όρια του νεκρού όγκου

## Κάνναβος αναζήτησης βέλτιστων συντελεστών παραμετρικού κανόνα

- Ενδείκνυται υψηλή ανάλυση για μικρό αριθμό ταμιευτήρων (<6), ιδιαίτερα χρονοβόρα ωστόσο για μεγαλύτερα συστήματα
- Αυξημένη πιθανότητα προσέγγισης τοπικού βελτίστου σε περίπτωση αδρής διακριτοποίησης κύριου καννάβου

# Γενικά συμπεράσματα

## Αξιολόγηση του μαθηματικού μοντέλου

- Η μέθοδος παραμετροποίησης αποδείχθηκε επαρκής για την προσομοίωση και βελτιστοποίηση πολύπλοκων υδατικών συστημάτων
- Τα αποτελέσματα κρίνονται αξιόπιστα βάσει συγκρίσεων με υφιστάμενες μελέτες

## Αξιολόγηση του προγράμματος

- Αντιμέτωπιση ευρέος φάσματος υδροσυστημάτων
- Ελεγχόμενη εισαγωγή στοιχείων
- Παροχή πληθώρας επιλογών στον χρήστη
- Φιλικό περιβάλλον εργασίας
- Ευπροσάρμοστο σε μελλοντικές επεκτάσεις ή αναθεωρήσεις

## Προτάσεις

- Ενσωμάτωση ταχύτερου αλγορίθμου βελτιστοποίησης
- Επέκταση προγράμματος σε επιχειρησιακό επίπεδο
- Αξιοποίηση νέων δυνατοτήτων πληροφορικής - διασύνδεση με άλλες εφαρμογές