

ΔΕΥΤΕΡΟ ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΝΕΔΡΙΟ:  
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ - ΒΙΩΣΙΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ -  
ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ  
ΥΔΑΤΟΣ ΤΗΝ 4η ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 2007-2013»

## Βελτιστοποίηση της λειτουργίας του υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

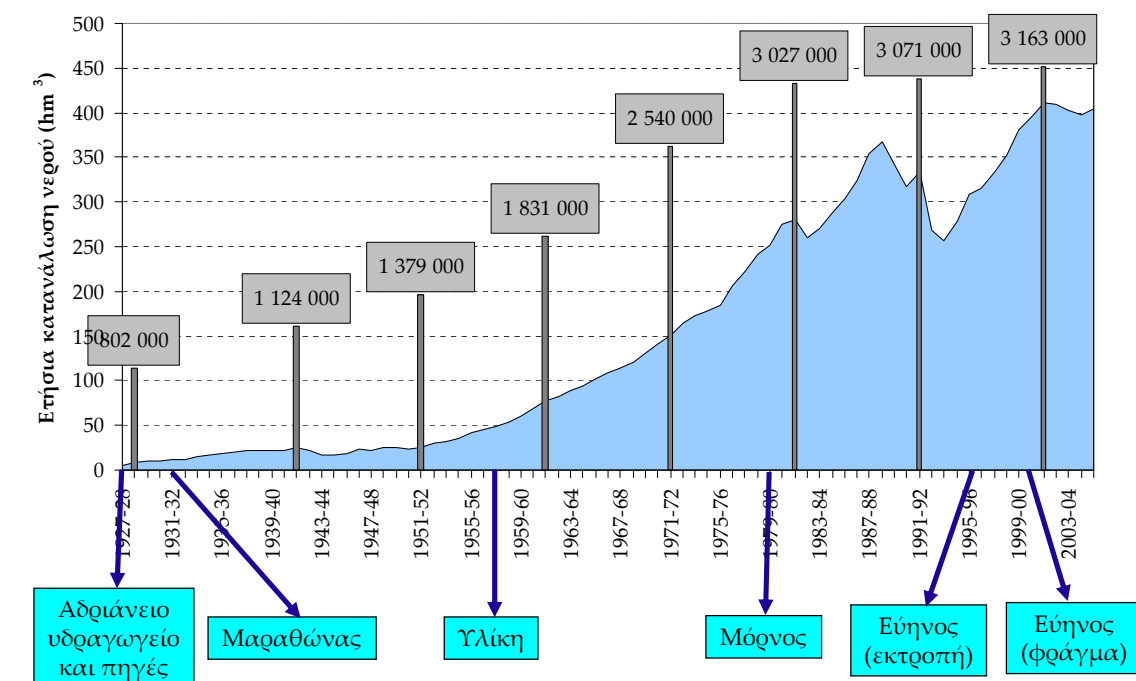
Ανδρέας Ευστρατιάδης, Δημήτρης Κουτσογιάννης & Νίκος Μαμάσης

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο



## Εξέλιξη κατανάλωσης –πληθυσμού – υδρευτικών έργων



Α. Ευστρατιάδης, Α. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

3

## Χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος

- **Επίπεδα πολυπλοκότητας στη διαχείριση του συστήματος:**
  - Δυνατότητα πολλαπλών εναλλακτικών λύσεων ως προς τους υδατικούς πόρους (ταμιευτήρες, γεωτρήσεις) όσο και τις διαδρομές μεταφοράς.
  - Υψηλό κόστος λειτουργίας του υδραγωγείου Υλίκης και των γεωτρήσεων (λόγω άντλησης) έναντι μηδενικού κόστους της σήραγγας Ευήνου-Μόρνου και του υδραγωγείου Μόρνου (λειτουργία με βαρύτητα).
  - Σημαντικές απώλειες από υπόγειες διαφυγές (Υλίκη), υπερχειλίσσεις (Εύηνος) και διαρροές (σε τμήματα υδραγωγείων υπό πίεση).
  - Ανταγωνιστικές χρήσεις νερού.
  - Αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη της προσφοράς και ζήτησης, σε αντιδιαστολή με την ανάγκη εξασφάλισης υψηλής αξιοπιστίας.
- **Προβλήματα σχετικά με την ασφάλεια του συστήματος:**
  - Μεγάλη απόσταση των κύριων πηγών νερού από την κατανάλωση.
  - Παλαιότητα και ανεπαρκής παροχετευτικότητα ορισμένων υδραγωγείων.
  - Απουσία σημαντικού όγκου ταμίευσης κοντά στην Αθήνα, περιορισμός του ρυθμιστικού όγκου του Μαραθώνα (για αποφυγή υπερχείλισης).
  - Έλλειψη ολοκληρωμένου δικτύου διασυνδέσεων μονάδων επεξεργασίας.
  - Υψηλός ρυθμός αύξησης της κατανάλωσης.

Α. Ευστρατιάδης, Α. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

4

## Ερωτήματα σχετικά με το υδατικό σύστημα

- ❑ Ποια είναι η μέγιστη ετήσια δυνατότητα απόληψης από τους ταμιευτήρες και τις γεωτρήσεις, για δεδομένο υδρολογικό καθεστώς και δεδομένη αξιοπιστία; Με ποια πολιτική και ποιο κόστος εξασφαλίζεται η παραπάνω απόληψη;
- ❑ Ποια είναι η βέλτιστη πολιτική διαχείρισης για την κάλυψη της υδρευτικής ζήτησης με υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας (π.χ. 99%), για μακροχρόνιο χρονικό ορίζοντα; Ποιο είναι το ελαχιστοποιημένο κόστος της πολιτικής αυτής;
- ❑ Πώς θα εξελιχθεί η διαθεσιμότητα υδατικών πόρων τους επόμενους μήνες, για εναλλακτικά σενάρια εισροών; Ποια είναι η επίπτωση στο μέλλον (π.χ. σε ορίζοντα 10 ετών) ενός συγκεκριμένου διαχειριστικού μέτρου;
- ❑ Ποιες είναι οι επιπτώσεις ενός υπό μελέτη έργου (π.χ. νέου αγωγού, ενίσχυση υδραγωγείου, αντλιοστασίου, κτλ.) καθώς και ο χρόνος ένταξης του συστήμα;
- ❑ Πόσο εφικτή, από την άποψη ποσοτικής επάρκειας σε νερό, είναι η επέκταση των δραστηριοτήτων της ΕΥΔΑΠ (π.χ. υδροδότηση άλλων περιοχών);
- ❑ Ποιες είναι οι επιπτώσεις ενός αρνητικού κλιματικού σεναρίου (έμμονη ξηρασία, κλιματική αλλαγή) και πώς αυτό πρέπει να αντιμετωπιστεί;
- ❑ Πόσο επαρκείς είναι οι υφιστάμενες πηγές και τα αντίστοιχα έργα για την κάλυψη ειδικών συνθηκών ή έκτακτων περιστατικών (π.χ. μακροχρόνια βλάβη τμημάτων υδραγωγείων);

## Το ερευνητικό έργο: «Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας»

- ❑ **Ανάθεση:** ΕΥΔΑΠ
- ❑ **Ανάδοχος:** Τομέας Υδατικών Πόρων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- ❑ **Περίοδος εκτέλεσης:** Μάρτιος 1999 - Μάρτιος 2004
- ❑ **Προϋπολογισμός:** 230 000 000 δραχμές (706 048 ευρώ)
- ❑ **Ερευνητική ομάδα ΕΜΠ:** 20 άτομα (+7 σύμβουλοι)
- ❑ **Ομάδα επίβλεψης ΕΥΔΑΠ:** 16 άτομα
- ❑ **Ερευνητικές δημοσιεύσεις:** 25 (8 άρθρα περιοδικών)
- ❑ **Αντικείμενο του έργου:** (α) ανάπτυξη συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας για την απεικόνιση και εποπτεία του εξωτερικού υδροδοτικού συστήματος, (β) ανάπτυξη συστήματος μέτρησης των υδατικών πόρων, (γ) ανάπτυξη συστήματος εκτίμησης και πρόγνωσης των υδατικών πόρων, με προσδιοριστικά και στοχαστικά υδρολογικά μοντέλα (δ) ανάπτυξη συστήματος υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων, με μοντέλα προσομοίωσης-βελτιστοποίησης και (ε) συνεργασία και μεταφορά τεχνογνωσίας στην ΕΥΔΑΠ για τα παραπάνω.

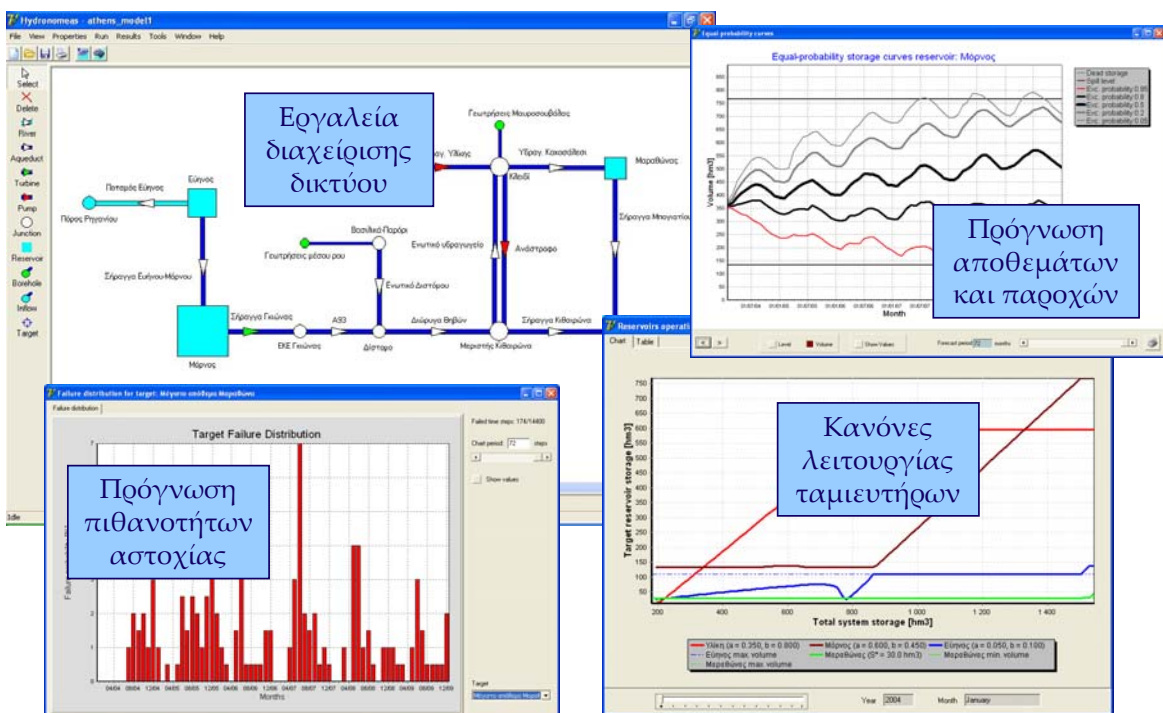
# Σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (ΣΥΑ) για το υδροσύστημα της Αθήνας



Α. Ευστρατιάδης, Α. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

7

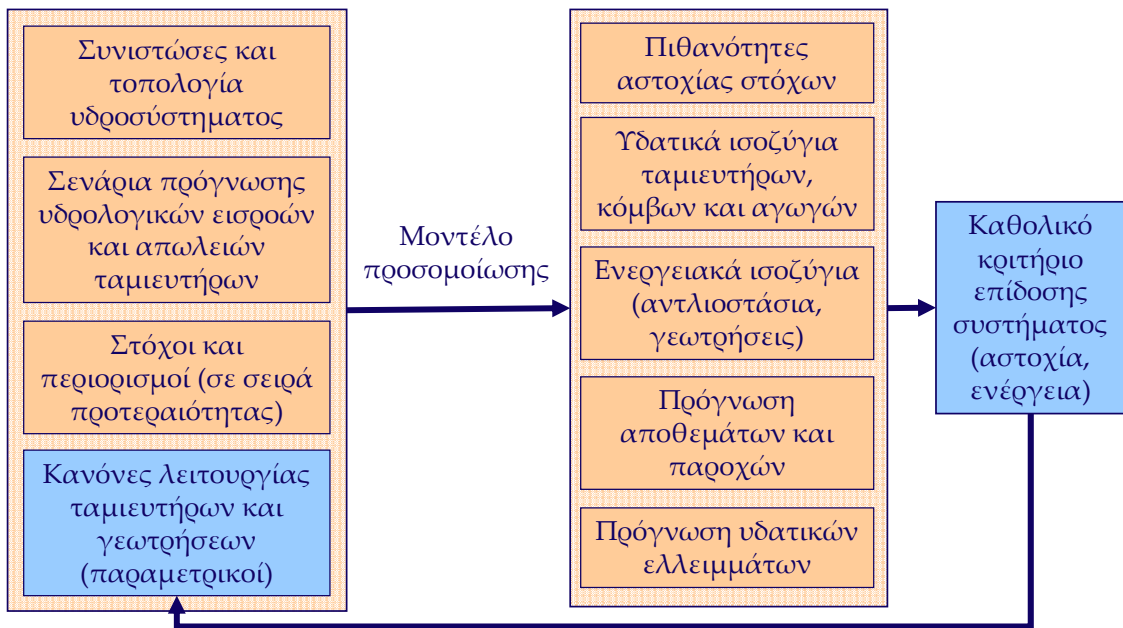
## Το λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ



Α. Ευστρατιάδης, Α. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

8

# Μεθοδολογικό υπόβαθρο

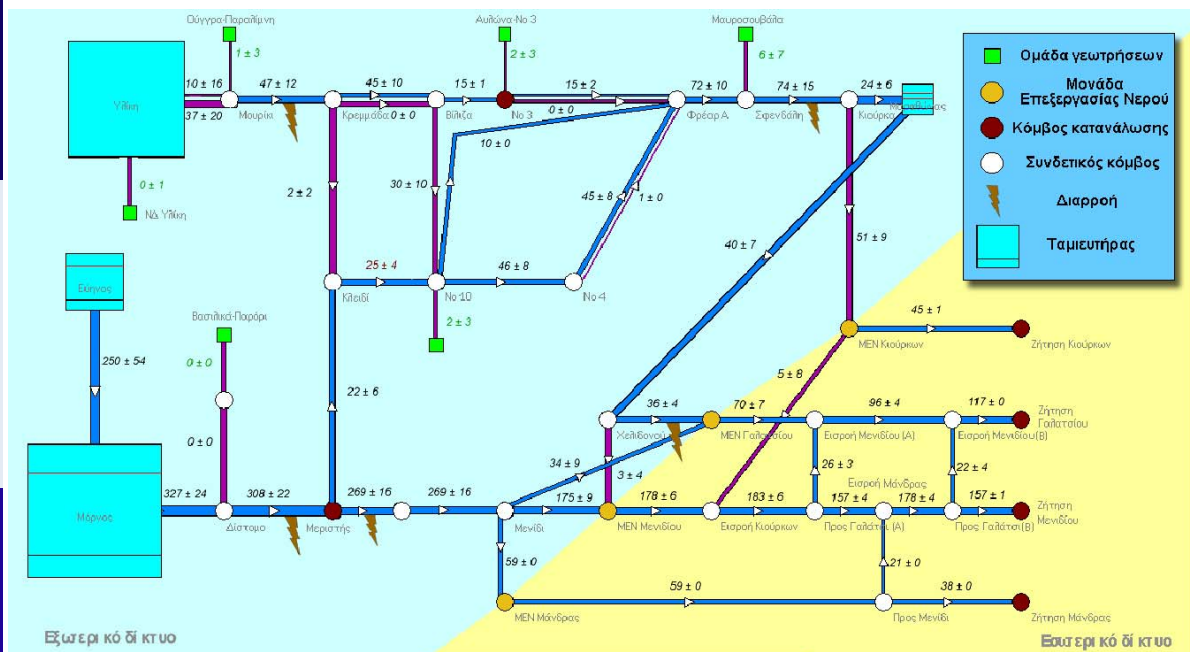


## Μοντέλο βελτιστοποίησης

A. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

9

# Σχηματοποίηση υδροσυστήματος

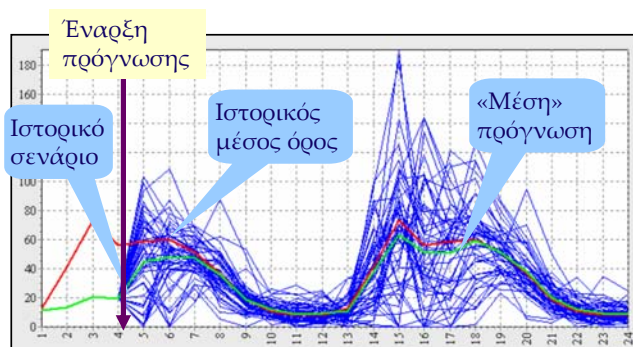


A. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

10

## Γέννηση σεναρίων συνθετικών εισροών

- Η χρήση συνθετικών εισροών επιβάλλεται για την **ποσοτικοποίηση της υδρολογικής αβεβαιότητας** και την αποτίμηση επιπέδων αξιοπιστίας της τάξης του 99%, που τίθεται ως ασφαλές όριο για το συγκεκριμένο σύστημα.
- Εφαρμόζεται το στοχαστικό μοντέλο **ΚΑΣΤΑΛΙΑ** που γεννά συνθετικές χρονοσειρές που διατηρούν τα ακόλουθα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων, σε **μηνιαία** και **ετήσια** κλίμακα:
  - τις μέσες τιμές, τυπικές αποκλίσεις και συμμετρίες·
  - τις χρονικές και χωρικές συσχετίσεις·
  - την υδρολογική εμμονή (φαινόμενο Hurst).
- Ανάλογα με τον τύπο της προσομοίωσης (μόνιμης κατάστασης ή καταληκτική) το μοντέλο παράγει:
  - μεμονωμένες χρονοσειρές πολύ μεγάλου μήκους·
  - πολλά σεναρία πρόγνωσης μικρού μήκους, που ξεκινούν από την τρέχουσα τιμή.



A. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

11

## Στόχοι και περιορισμοί υδροσυστήματος

- Ύδρευση Αθηνών, επιμερισμένη κατάντη των τεσσάρων μονάδων επεξεργασίας νερού (Μενίδι, Γαλάτσι, Κιούρκα, Μάνδρα).
- Αποφυγή υπερχείλισης ταμιευτήρα Μαραθώνα (για προστασία κατάντη περιουσιών).
- Διατήρηση περιβαλλοντικής παροχής  $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$  κατάντη φράγματος Ευήνου.
- Θέσπιση επιθυμητών ορίων διακύμανσης του αποθέματος Μαραθώνα (μεταβλητών ανά μήνα).
- Διατήρηση κατωφλίων αποθέματος (ελάχιστων, μέγιστων) στο Μόρνο και τον Ευήνο (σταθερά όλο το χρόνο).
- Ύδρευση οικισμών και διαφόρων εγκαταστάσεων κατά μήκος των υδραγωγείων Μόρνου και Υλίκης.
- Διατήρηση ελάχιστης παροχής κατά μήκος του υδραγωγείου Υλίκης (για συντήρηση των αντλιοστασίων).
- Αρδευση Κωπαΐδας, με άντληση από την Υλίκη.

**Λοιπές παραδοχές:** (α) απώλειες 10% κατά τη μεταφορά του νερού από τις πηγές στην κατανάλωση, (β) μείωση της ονομαστικής παροχετευτικότητας των υδραγωγείων κατά 12%, για την κάλυψη των ημερήσιων αιχμών, (γ) θεώρηση των γεωτρήσεων ως εφεδρικών πόρων.

A. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

12

# Παραμετροποίηση διαχείρισης υδροσυστήματος – Κανόνες λειτουργίας

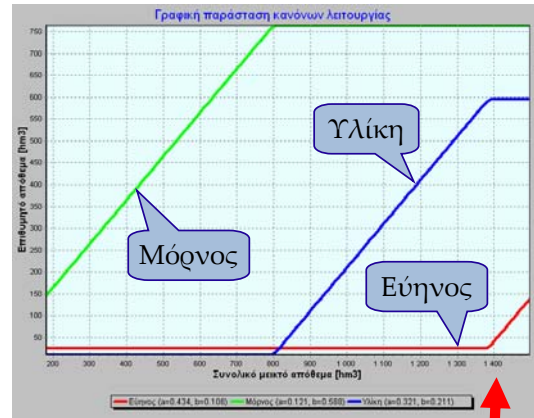
- **Κανόνες λειτουργίας ταμιευτήρων:**
  - Καθορίζουν το απόθεμα-στόχο κάθε ταμιευτήρα με βάση το αναμενόμενο απολήψιμο απόθεμα του συστήματος, τη συνολική ζήτηση νερού για καταναλωτικές χρήσεις και τους φυσικούς και λειτουργικούς περιορισμούς διακύμανσης της στάθμης.
  - Διατυπώνονται συναρτήσει μίας ή δύο παραμέτρων ανά ταμιευτήρα, που μπορεί να μεταβάλλονται εποχιακά.
  - Περιγράφονται μέσω εύχρηστων νομογραφημάτων.
- **Κανόνες λειτουργίας ομάδων γεωτρήσεων:**
  - Χρησιμοποιούν δύο παραμέτρους ανά ομάδα, που εκφράζουν κρίσιμα όρια του ποσοστού πλήρωσης των ταμιευτήρων.
  - Αν το ποσοστό (= ολικό απόθεμα / ολική χωρητικότητα) υπερβαίνει το άνω όριο, τότε απαγορεύουν τη χρήση της ομάδας.
  - Αν το ποσοστό είναι μικρότερο από το κάτω όριο, τότε επιβάλλεται η χρήση της ομάδας, ανεξαρτήτως κόστους.
  - Σε ενδιάμεσες τιμές, η ομάδα γεωτρήσεων ενεργοποιείται με βάση οικονομικά κριτήρια.

# Επίπεδα εφαρμογής της βελτιστοποίησης

- **Βελτιστοποίηση καθολικού μέτρου επίδοσης:**
  - Διατύπωση προβλήματος: ελαχιστοποίηση του μέσου ετήσιου κόστους (για κατανάλωση ενέργειας), με διατήρηση αξιοπιστίας 99% για την κάλυψη των στόχων ύδρευσης της Αθήνας
  - Μεταβλητές ελέγχου: παράμετροι κανόνων λειτουργίας
  - Τύπος προβλήματος: έντονα μη γραμμικό αλλά με μικρό αριθμό μεταβλητών, επίλυση με εξελικτικό αλγόριθμο
- **Βελτιστοποίηση κατανομής ροών δικτύου (σε κάθε χρονικό βήμα, για δεδομένες τιμές των παραμέτρων):**
  - Διατύπωση προβλήματος: ελαχιστοποίηση πραγματικού και εικονικού κόστους μεταφοράς νερού, σε ένα μετασχηματισμένο δίκτυο (διγράφος)
  - Μεταβλητές ελέγχου: «παροχές» κλάδων διγράφου, που αντιστοιχούν στις μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου του υδροσυστήματος
  - Περιορισμοί: εξισώσεις συνέχειας κόμβων και «χωρητικότητας» κλάδων, που αντιπροσωπεύουν πραγματικές παροχετευτικότητες ή επιθυμητά όρια των μεταβλητών
  - Τύπος προβλήματος: γραμμικό, με πολλές μεταβλητές και περιορισμούς, ακριβής επίλυση με ειδική εκδοχή της μεθόδου simplex

## Παράδειγμα 1: Μεγιστοποίηση απολήψιμου υδατικού δυναμικού

- Ζητείται η μεγιστοποιημένη απόληψη από τους υφιστάμενους υδατικούς πόρους, επιφανειακούς και υπόγειους (γεωτρήσεις), για επίπεδο αξιοπιστίας 99%.
- Θεωρείται απεριόριστη παροχευτικότητα υδραγωγείων και 10% απώλειες λόγω διαρροών.
- Εξετάζονται διάφορες πολιτικές χρήσης των γεωτρήσεων, με βάση τα κατώφλια ενεργοποίησής τους.



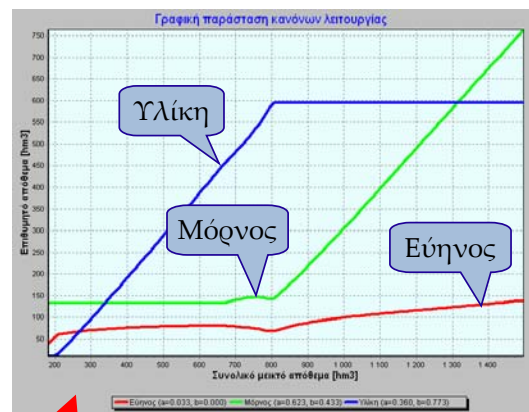
Χρήση γεωτρήσεων	Υψηλή	Μέση	Χαμηλή	Μηδενική
Ολική απόληψη για ύδρευση (hm <sup>3</sup> /έτος)	570	550	510	440
Μέση απόληψη από ταμιευτήρες (hm <sup>3</sup> /έτος)	518	528	504	400
Μέση απόληψη από γεωτρήσεις (hm <sup>3</sup> /έτος)	52	22	6	0
Μέση εκροή από τα διωλιστήρια (hm <sup>3</sup> /έτος)	513	500	459	396

A. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

15

## Παράδειγμα 2: Ελαχιστοποίηση αντλήσεων σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης

- Ζητείται η ελαχιστοποιημένη κατανάλωση ενέργειας, για ετήσια ζήτηση 400 hm<sup>3</sup>, με 99% αξιοπιστία.
- Εισάγονται οι πραγματικοί περιορισμοί του δικτύου.
- Θεωρείται συντηρητική (μέση) χρήση των γεωτρήσεων (ενεργοποίηση για ποσοστό πλήρωσης των ταμιευτήρων μικρότερο από 40%).
- Εξετάζονται διάφορες διατάξεις του δικτύου (σημερινή, μελλοντική, χωρίς ενωτικό υδραγωγείο Μόρνου-Υλίκης).



Διάταξη υδραγωγείων	Σημερινή	Μελλοντική	Χωρίς ενωτικό
Πιθανότητα αστοχίας ύδρευσης	0.010	0.009	0.090
Μέση κατανάλωση ενέργειας (GWh/έτος)	59.6	24.9	132.9
Μέση απόληψη από γεωτρήσεις (hm <sup>3</sup> /έτος)	18.1	10.7	13.0

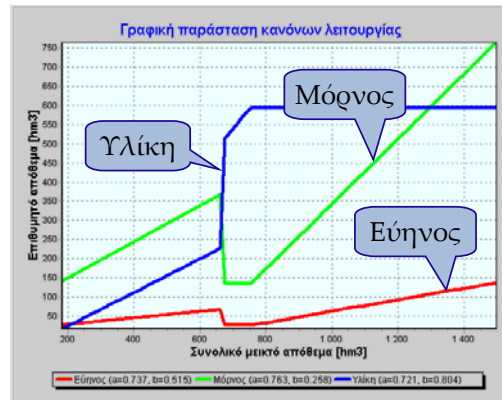
A. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

16



## Παράδειγμα 3: Βελτιστοποίηση διαχειριστικής πολιτικής έτους 2002-03

- Θεωρούνται οι συνθήκες αποθεμάτων της 1/12/2002 (σύνολο 432 hm<sup>3</sup>).
- Παράγονται 200 σενάρια εισροών, μήκους 10 ετών, που είναι στατιστικά συνεπή με τις συνθήκες χαμηλής υδροφορίας της περιόδου 2000-2002.
- Τίθεται σταθερός στόχος ετήσιας ζήτησης 425 hm<sup>3</sup>.
- Εξετάζονται εναλλακτικές διατάξεις του ενωτικού υδραγωγείου.



Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις 12/2002-9/2003

Παροχευτικότητα ενωτικού	Μικρή (1.0 m <sup>3</sup> /s)	Μηδενική	Κανονική (3.0 m <sup>3</sup> /s)
Ετήσια πιθανότητα αστοχίας	0.015	0.015	0.010
Εκροή από Μόρνο (hm <sup>3</sup> )	327.4 (23.9)	304.3 (17.5)	344.2 (34.8)
Εκροή από Υλίκη (hm <sup>3</sup> )	47.3 (12.1)	69.1 (9.8)	31.7 (22.3)
Εκροή από γεωτρήσεις (hm <sup>3</sup> )	11.2 (16.5)	11.7 (16.7)	10.6 (15.8)

A. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

17

## Περισσότερες πληροφορίες

- Επικοινωνία:

[andreas@itia.ntua.gr](mailto:andreas@itia.ntua.gr); [dk@itia.ntua.gr](mailto:dk@itia.ntua.gr); [nikos@itia.ntua.gr](mailto:nikos@itia.ntua.gr)

- Δικτυακός τόπος ερευνητικού έργου:

<http://www.itia.ntua.gr/g/projinfo/14/>

- Δημοσιεύσεις σχετικές με το έργο:

[http://www.itia.ntua.gr/g/project\\_publications/14/](http://www.itia.ntua.gr/g/project_publications/14/)

- Δικτυακός τόπος πληροφοριακού συστήματος ΥΔΡΟΓΑΙΑ (περιλαμβάνει εφαρμογές λογισμικού σχετικές με τη διαχείριση συστημάτων υδατικών πόρων που αναπτύχθηκαν στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ):

<http://www.odysseusproject.gr/>

A. Ευστρατιάδης, Δ. Κουτσογιάννης & Ν. Μαμάσης, Βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροδοτικού συστήματος Αθήνας

18