

Διαχείριση Υδατικών Πόρων



Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων σε προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων

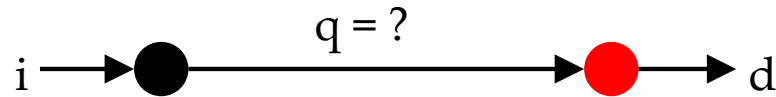
Ανδρέας Ευστρατιάδης & Δημήτρης Κουτσογιάννης
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μέρος Α: Βασικές έννοιες μαθηματικών μοντέλων συστημάτων υδατικών πόρων

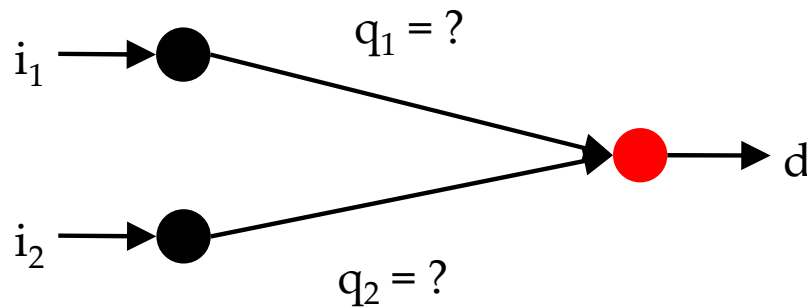
Η έννοια της συστημικής προσέγγισης στη διαχείριση των υδατικών πόρων

- ❑ **Ορισμός συστήματος:** Προσδιορισμός γεωγραφικών ορίων και συνιστωσών φυσικού συστήματος, και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων.
- ❑ **Σχηματοποίηση:** Μετασχηματισμός συνιστωσών πραγματικού συστήματος σε συνιστώσες ενός εννοιολογικού μοντέλου που αναπαριστά το εν λόγω σύστημα.
- ❑ **Μοντελοποίηση:** Μαθηματική διατύπωση φυσικών και λειτουργικών περιορισμών σχηματοποιημένου μοντέλου.
- ❑ **Συλλογή δεδομένων:** Στατικές και δυναμικές (χρονοσειρές) πληροφορίες εισόδου που απαιτούνται από το μαθηματικό μοντέλο.
- ❑ **Παραμετροποίηση:** Ορισμός μεταβλητών ελέγχου (παραμέτρων) που περιγράφουν τις εναλλακτικές διαχειριστικές πολιτικές.
- ❑ **Προσομοίωση:** Αναπαράσταση της δυναμικής λειτουργίας του συστήματος, μέσω εξισώσεων και λογικών εκφράσεων, κωδικοποιημένων σε γλώσσα υπολογιστή.
- ❑ **Βελτιστοποίηση:** Συστηματική διαδικασία αναζήτησης της πλέον πρόσφορης διαχειριστικής πολιτικής, η οποία υλοποιείται ως μια διαδοχή από εναλλακτικές αποφάσεις και αποτιμήσεις των επιπτώσεων κάθε απόφασης, βάσει κριτηρίων που εκφράζονται από κατάλληλους αριθμητικούς δείκτες (μέτρα επίδοσης).
- ❑ **Υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων:** Κριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων μοντέλου, στα πλαίσια της επιχειρησιακής λειτουργίας του συστήματος.

Στοιχειώδεις μαθηματικές διατυπώσεις του διαχειριστικού προβλήματος



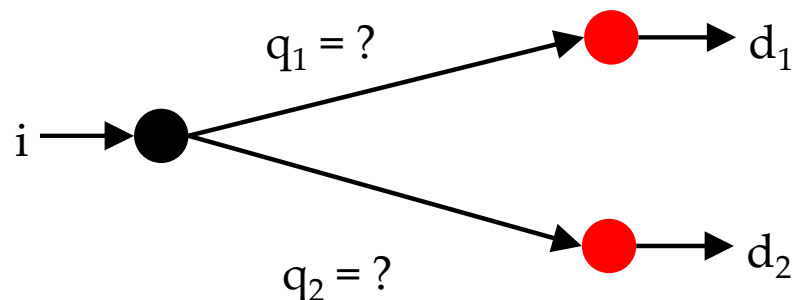
$$q = \min(i, d, u)$$



$$q_1 \leq \min(i_1, u_1)$$

$$q_2 \leq \min(i_2, u_2)$$

$$q_1 + q_2 \leq d$$



$$q_1 \leq \min(d_1, u_1)$$

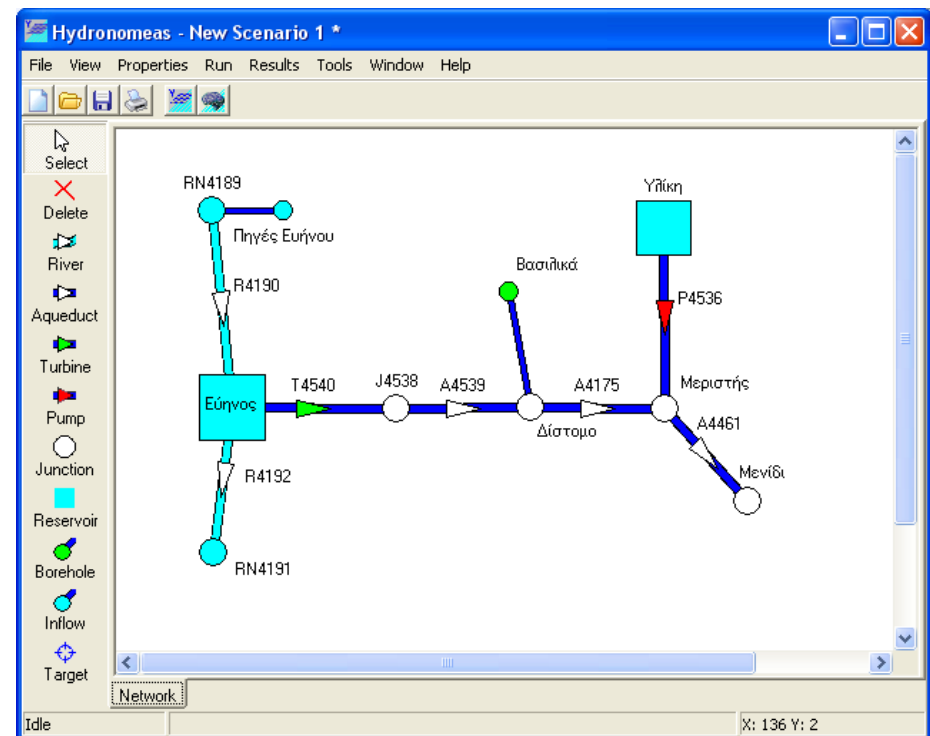
$$q_1 \leq \min(d_2, u_2)$$

$$q_1 + q_2 \leq \min(i, d_1 + d_2)$$

Υπόμνημα: i = προσφορά νερού (εισροή), d = ζήτηση, q = μεταφερόμενη παροχή, u = παροχευτικότητα υδραγωγείου

Συνιστώσες που αναπαρίστανται στα μοντέλα

- ❑ Συνιστώσες φυσικής προσφοράς νερού (λεκάνες απορροής, υδροφορείς)
- ❑ Υδάτινα σώματα (ποτάμια, λίμνες, πηγές)
- ❑ Οικοσυστήματα και προστατευόμενες περιοχές
- ❑ Έργα σύλληψης και αποθήκευσης επιφανειακών υδατικών πόρων
- ❑ Έργα άντλησης υπόγειων νερών
- ❑ Έργα μεταφοράς (υδραγωγεία ανοικτά, υπό πίεση, σίφωνες)
- ❑ Έργα διαχείρισης υδραγωγείων (αντλιοστάσια, ρυθμιστές ροής)
- ❑ Έργα παραγωγής Υ/Η ενέργειας (στρόβιλοι, αντλιοστρόβιλοι)
- ❑ Έργα βελτίωσης της ποιότητας του νερού (μονάδες επεξεργασίας νερού, μονάδες αφαλάτωσης)
- ❑ Περιοχές ή θέσεις ζήτησης νερού



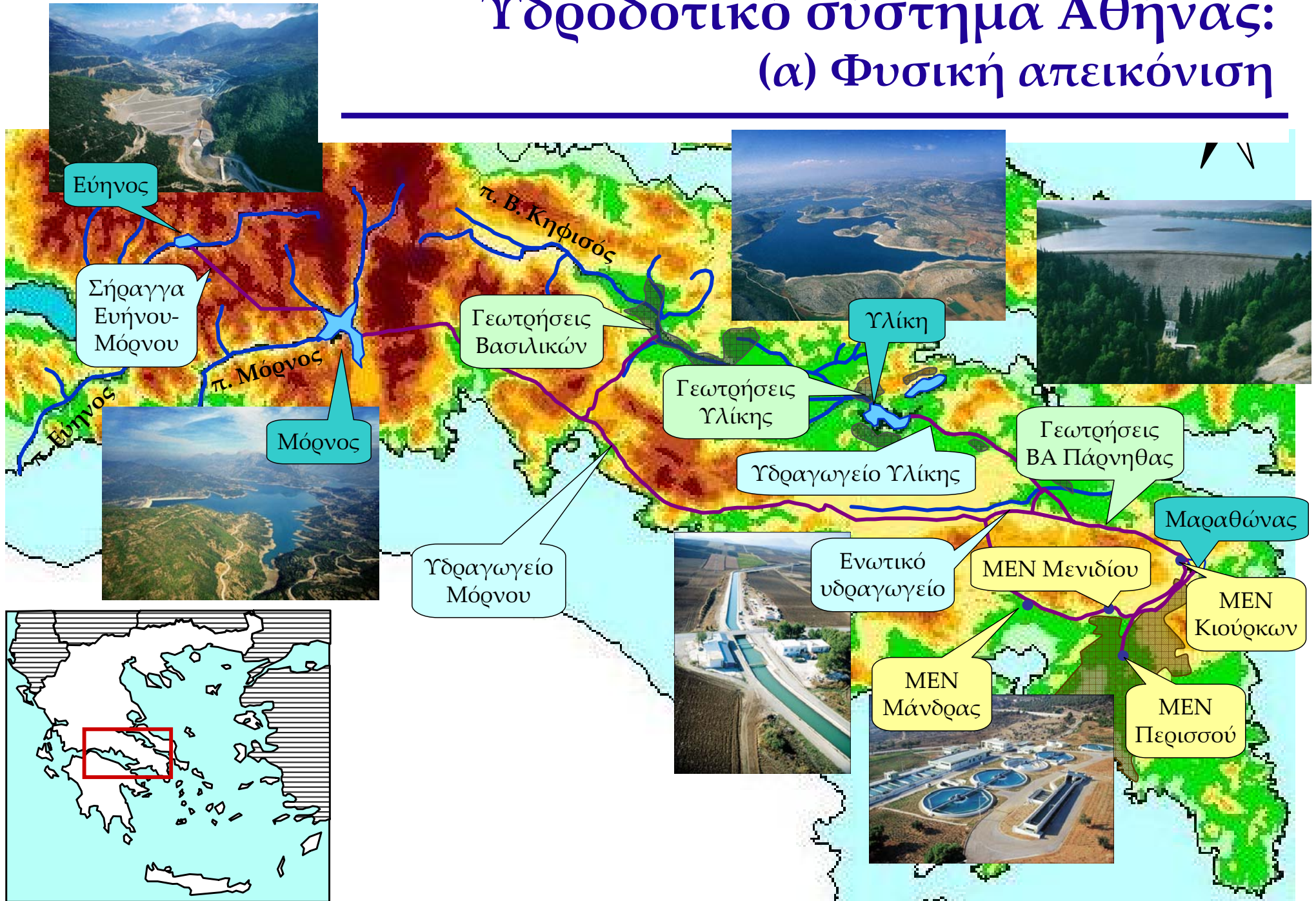
Παραδοσιακή θεώρηση: Ανάλυση κατά συνιστώσες → Δράσεις στο υδροσύστημα

Σύγχρονη θεώρηση: Ανάλυση σε κλίμακα υδροσυστήματος → Δράσεις στις συνιστώσες

Αρχές σχηματοποίησης υδросυστημάτων

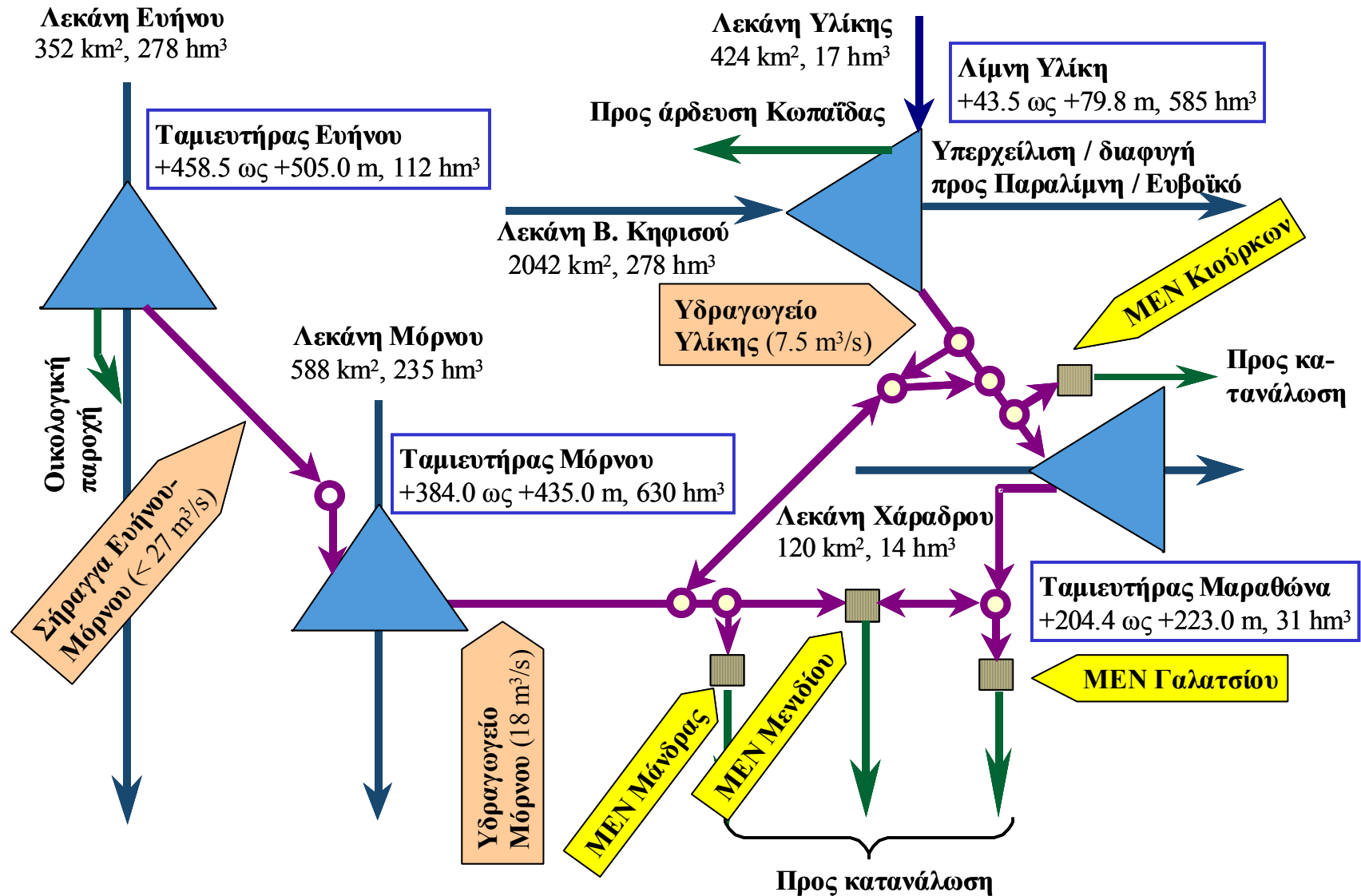
- **Αφαίρεση** (abstraction): Περιορισμός της πολυπλοκότητας του φυσικού συστήματος, ώστε να λαμβάνονται υπόψη μόνο οι συνιστώσες και διεργασίες που αφορούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα, ώστε να διευκολύνεται η μαθηματική του διατύπωση και να μην απαιτείται η συλλογή μη ουσιαστικών (αλλά τεράστιων σε έκταση) πληροφοριών (π.χ. διανομή υδρευτικού νερού εντός των οικισμών, υδραυλική λειτουργία υδραγωγείων και αντλιοστασίων, χαρακτηριστικά υπερχειλιστών).
- **Τυποποίηση** (classification): Ενοποίηση στοιχείων με παρόμοια χαρακτηριστικά σε συνιστώσες (components) του μαθηματικού μοντέλου, με κοινές ιδιότητες, ώστε να περιορίζεται ο πολυμορφισμός και να τυποποιείται η ζητούμενη πληροφορία εισόδου του μοντέλου (π.χ. στην τυπική μηνιαία κλίμακα των διαχειριστικών μοντέλων, στην οποία οι υδραυλικές διεργασίες δεν επηρεάζουν τη δυναμική του συστήματος, τόσο οι αγωγοί υπό πίεση όσο και οι αγωγοί με ελεύθερη ροή μπορούν να θεωρηθούν ενιαία αντικείμενα, δηλαδή συνιστώσες μεταφοράς νερού με χαρακτηριστικό μέγεθος την παροχετευτικότητα).
- **Απλοποίηση** (simplification): Σύμπτυξη συνιστωσών, εφόσον οι επιμέρους διαφορές στα χαρακτηριστικά τους δεν επηρεάζουν την λειτουργία του μοντέλου, ούτε τη διαχειριστική πρακτική. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται σημαντικός χώρος στη μνήμη και περιορίζεται ο υπολογιστικός φόρτος, προς όφελος της υπολογιστικής επίδοσης του μοντέλου (π.χ. ομαδοποίηση γεωτρήσεων που υδρομαστεύουν μια ευρύτερη περιοχή σε ένα εννοιολογικό αντικείμενο που αναπαριστά τη συνολική άντληση, ενοποίηση επιμέρους τμημάτων ενός αγωγού σε ένα στοιχείο μεταφοράς).

Υδροδοτικό σύστημα Αθήνας: (α) Φυσική απεικόνιση

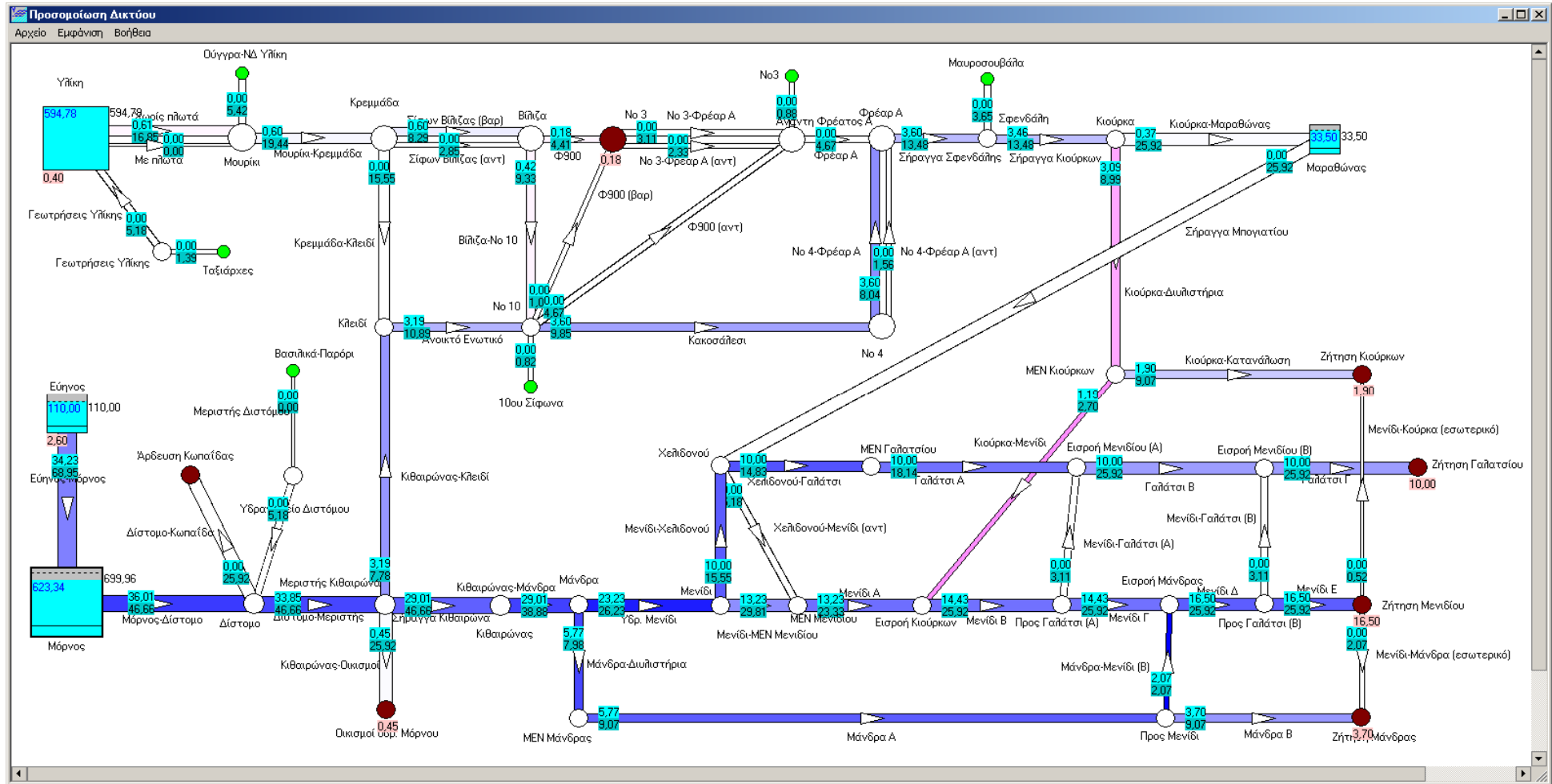


Υδροδοτικό σύστημα Αθήνας:

(β) Σχηματική αναπαράσταση και βασικά μεγέθη



Υδροδοτικό σύστημα Αθήνας: (γ) Δικτυακό μοντέλο υδροσυστήματος



Απεικόνιση δικτυακού μοντέλου σε περιβάλλον Η/Υ (λογισμικό ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ)

*Μέρος Β: Συστήματα υποστήριξης
αποφάσεων σε προβλήματα υδατικών
πόρων – Συνοπτική επισκόπηση*

Ορισμοί των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων (decision support systems, ΣΥΑ)

Γενικός ορισμός (French, 2000)

Τι είναι

Σύστημα λογισμικού

Τι κάνει

Υποστηρίζει τη διαδικασία λήψης των αποφάσεων

Πώς

Βοηθώντας στην κατανόηση των επιπτώσεων των αποφάσεων

Δομικός ορισμός

Σύστημα υπολογιστικών εργαλείων

Ολοκληρωμένο

Διαδραστικό περιβάλλον λειτουργίας

1ο επίπεδο

Οργάνωση και επεξεργασία πληροφορίας

Βάσεις δεδομένων

Συστήματα γεωγραφικής πληροφορίας

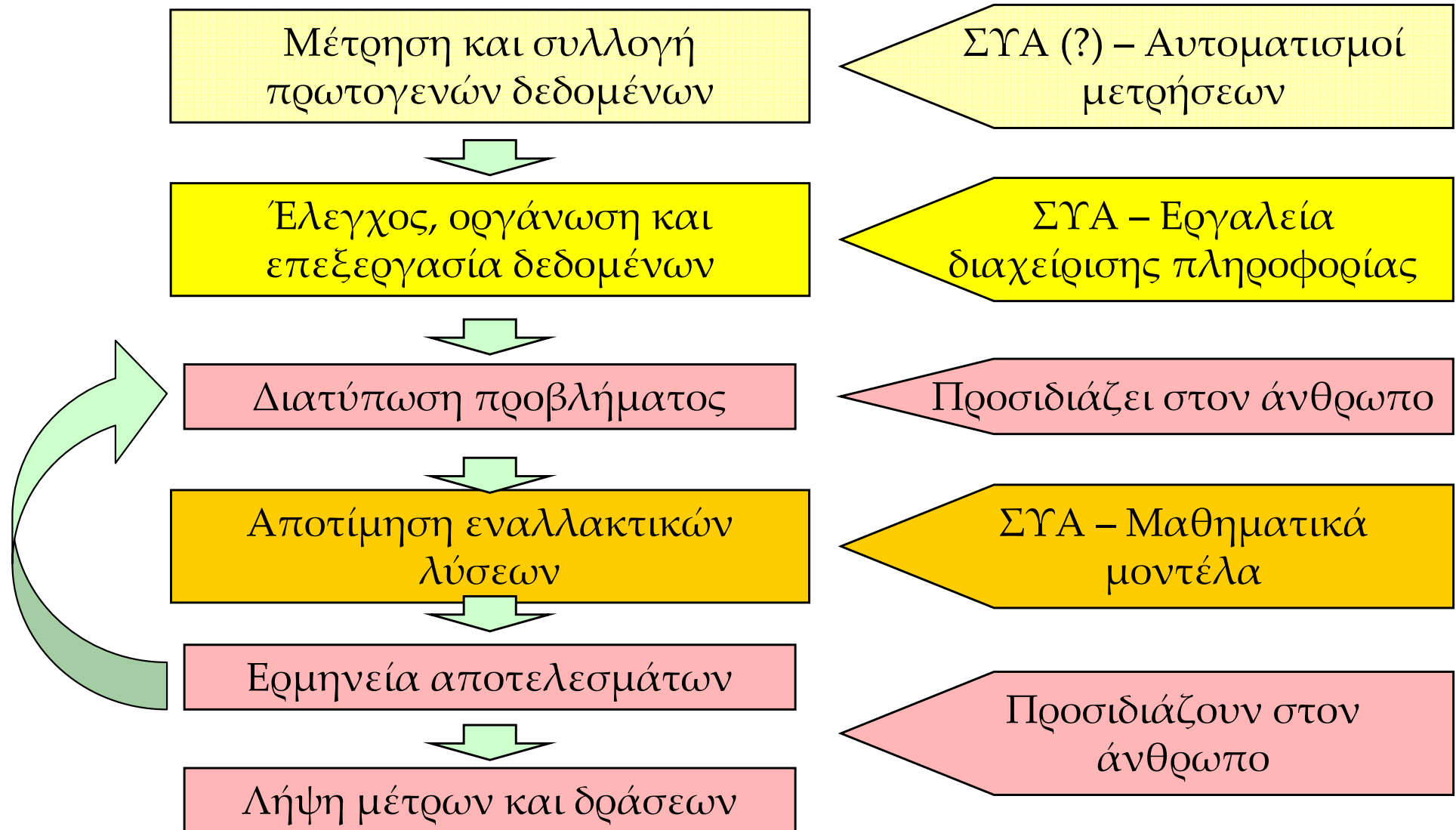
2ο επίπεδο

Ανάλυση συστημάτων

Αλγόριθμοι προσομοίωσης

Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

Δραστηριότητες στη λήψη αποφάσεων και υποστήριξη από τα ΣΥΑ



Πηγή: Sage, 1993, μετά από προσαρμογή

Τυπικές εφαρμογές των ΣΥΑ στη διαχείριση των υδατικών πόρων

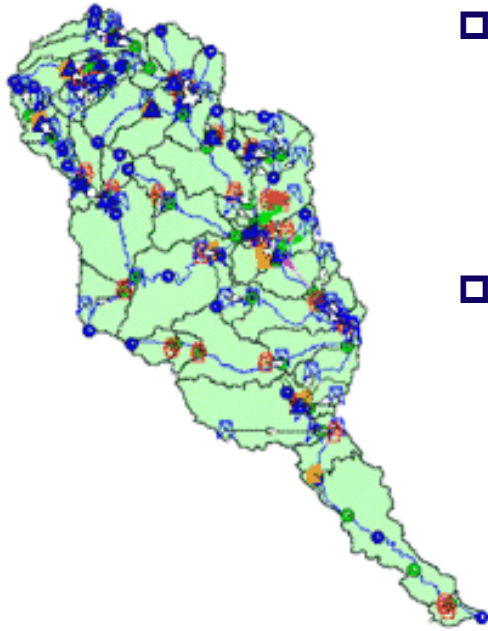
- Διαχείριση υδροσυστημάτων
- Έλεγχος λειτουργίας ταμιευτήρων (για την εξυπηρέτηση στόχων υδροδότησης, παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, ελέγχου ρύπανσης, κτλ.)
- Διαχείριση ποταμών (με χρήση υδραυλικών-υδροδυναμικών μοντέλων)
- Έλεγχος πλημμυρών και διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου (σε λεκάνες ποταμών αλλά και αστικές λεκάνες)
- Διαχείριση υδροφορέων και συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων νερών
- Διαχείριση συστημάτων διανομής νερού (δίκτυα ανοιχτών και κλειστών αγωγών, αντλιοστάσια, κλπ.)
- Έλεγχος βλαβών ή διαρροών σε δίκτυα ύδρευσης
- Έλεγχος ρύπανσης σε λεκάνες απορροής και Δέλτα ποταμών
- Διαχείριση μη σημειακών πηγών ρύπανσης σε γεωργικές περιοχές

Πηγή: Watkins & McKinney, 1995

Χαρακτηριστικές πτυχές των ΣΥΑ

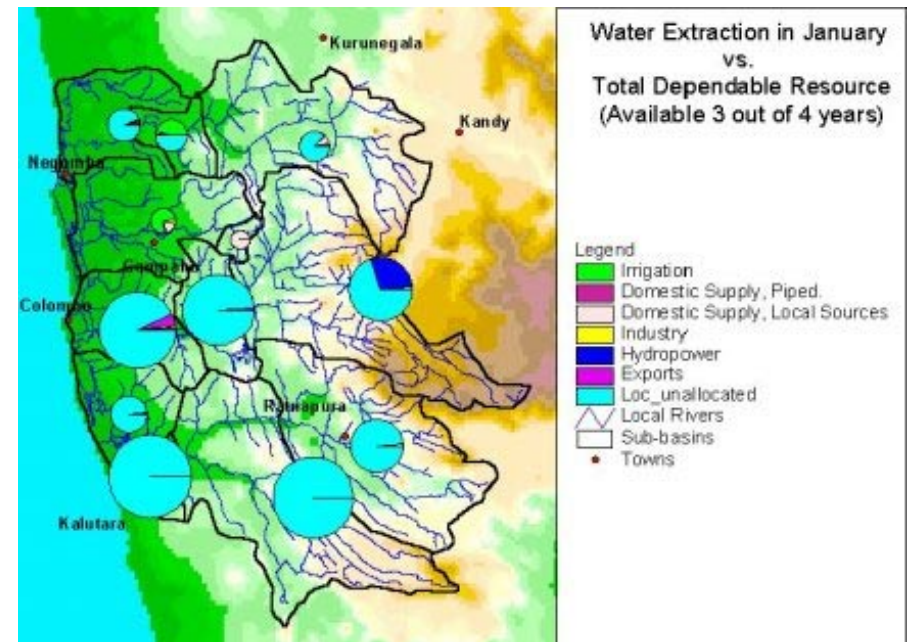
- Αναπτύσσονται από:
 - Πανεπιστήμια-ερευνητικά κέντρα
 - Εταιρείες λογισμικού
- Τα περισσότερα εμπορικά προϊόντα έχουν:
 - Υψηλό κόστος (συννά συνδυάζεται με παροχή υπηρεσιών συμβούλου)
 - Κλειστό κώδικα (δεν επιδέχονται τροποποιήσεις στα μοντέλα)
 - Απλουστευμένο μαθηματικό υπόβαθρο
- Απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό για την:
 - Ανάπτυξη και λειτουργία
 - Συντήρηση και επέκταση
 - Προσαρμογή στις νέες μεθοδολογικές και τεχνολογικές εξελίξεις
- Απαιτούν χρόνο για:
 - Εκμάθηση τεχνολογιών και εργαλείων
 - Συλλογή, τυποποίηση και οργάνωση δεδομένων
 - Προσαρμογή στις νέες απαιτήσεις και πρακτικές

Το μοντέλο MIKE-BASIN (DHI Software)



- Αξιοποιεί τις δυνατότητες του ArcGIS, σε συνδυασμό με υδρολογικά μοντέλα, για τη διερεύνηση διαχειριστικών σεναρίων στην κλίμακα λεκάνης απορροής. Για συστήματα μεγάλων ποταμών, ενσωματώνει μοντέλα διόδευσης.
- Υποστηρίζει πολλαπλές χρήσεις νερού και απλούς κανόνες διαχείρισής τους. Εφόσον υπάρχει έλλειμμα για την ικανοποίηση της συνολικής ζήτησης, τροφοδοτεί τους χρήστες κατά προτεραιότητα.

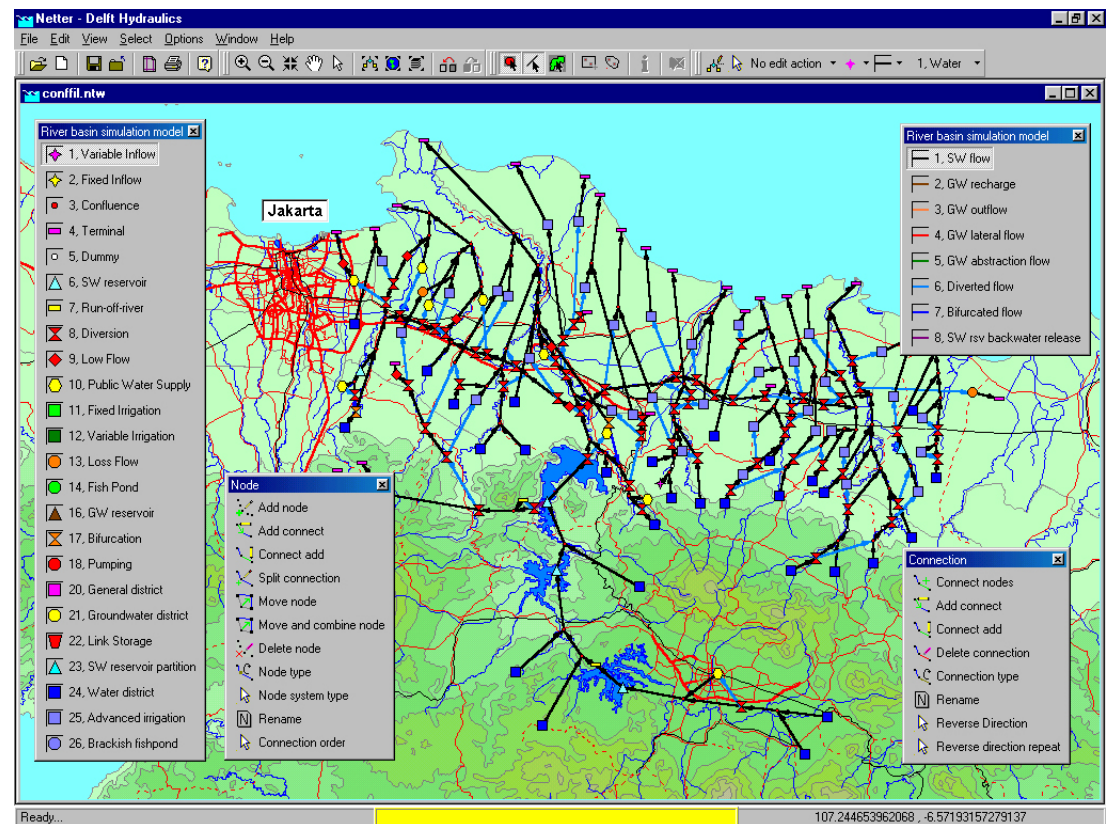
- Εναλλακτικά, χρησιμοποιεί κανόνες διαχείρισης των απολήψεων, που διατυπώνονται εξωτερικά μέσω μακροεντολών σε γλώσσα Visual Basic.
- Με χρήση του ενσωματωμένου επιλυτή (solver) του Excel, παρέχεται η δυνατότητα βελτιστοποίησης των κανόνων λειτουργίας.



Πληροφορίες: <http://www.dhigroup.com/Software/WaterResources/MIKEBASIN.aspx>

Το μοντέλο RIBASIM (Delft Hydraulics)

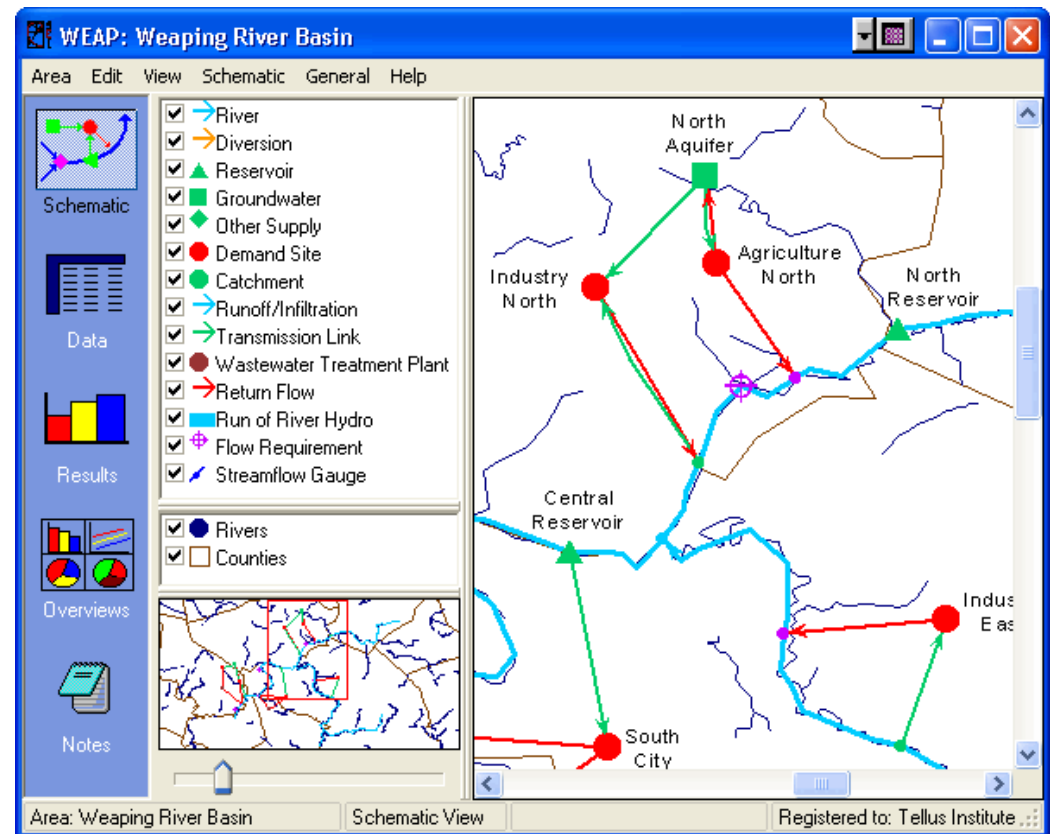
- Αναπαριστά τη συμπεριφορά λεκανών απορροής κάτω από διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες, εκτιμώντας και αξιολογώντας μέτρα σχετικά με τις υποδομές και τον τρόπο διαχείρισης και λειτουργίας του συστήματος.
- Συνδυάζεται με το λογισμικό HYMOS της ίδιας εταιρείας, που υποστηρίζει μια βάση δεδομένων, καθώς και με υδρολογικά (SACRAMENTO) και ποιοτικά μοντέλα (DELWAQ).
- Υποστηρίζει οποιοδήποτε χρονικό βήμα προσομοίωσης.
- Προσομοιώνει την αποστράγγιση από τη γεωργία, τις εκροές των βιομηχανιών και την επαναχρησιμοποίηση του νερού κατάντη.
- Επιτρέπει τη λεπτομερή ανάλυση της ποιότητας του νερού και των φερτών σε ποταμούς και ταμιευτήρες.



Πληροφορίες: <http://www.wldelft.nl/soft/ribasim/int/index.html>

Το μοντέλο WEAP (Stockholm Environment Institute)

- Απλή σύλληψη μοντέλου, που απευθύνεται σε μη εξειδικευμένους χρήστες.
- Με τη βοήθεια εργαλείων συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας, δημιουργείται ένα σενάριο αναφοράς, στο οποίο βασίζονται υποθετικά (what if) σενάρια. Τα τελευταία ξεκινούν από την ίδια χρονική στιγμή και μπορούν να διαφοροποιηθούν σε μια σειρά από δεδομένα εισόδου.
- Για κάθε χρήση νερού ορίζονται προτεραιότητες απόληψης από συγκεκριμένους υδατικούς πόρους, για τη συνολική ζήτηση ή για κάποιο ποσοστό της.
- Υπολογίζονται η προσφορά και ζήτηση νερού, η απορροή, η διήθηση, οι αρδευτικές ανάγκες, οι παροχές και τα αποθέματα, τα ρυπαντικά φορτία, οι ποιοτικές παράμετροι των ποταμών, κ.ά.

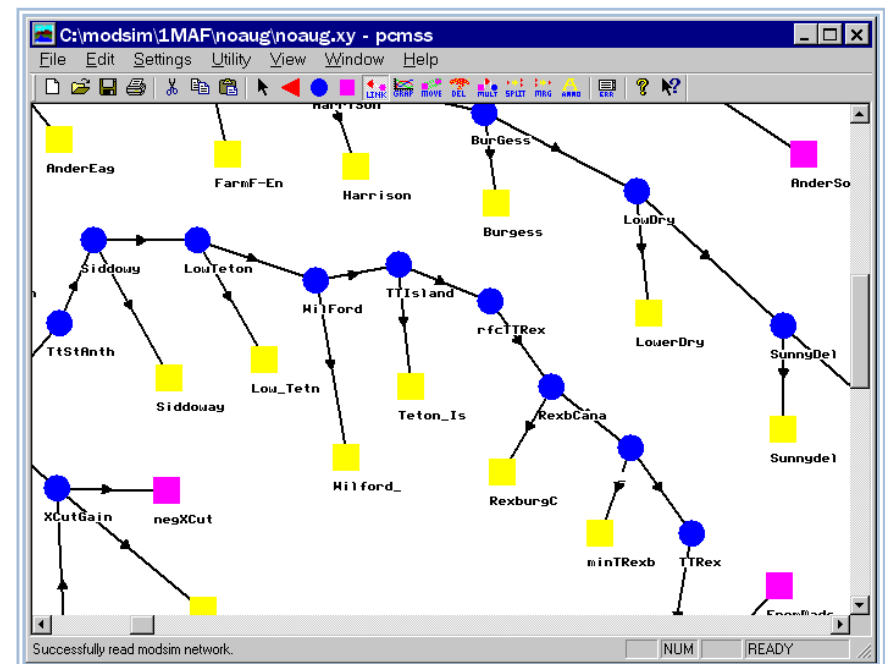


Πληροφορίες: <http://www.weap21.org/>

Το μοντέλο MODSIM (Colorado State University)

- Υποστηρίζει πολύ πληρέστερο μαθηματικό υπόβαθρο, σε σύγκριση με τα κοινά εμπορικά πακέτα, και είναι **ελεύθερα διαθέσιμο** στο Διαδίκτυο.
- Λειτουργεί σε μηνιαίο, εβδομαδιαίο ή ημερήσιο βήμα, με κατάλληλη προσαρμογή των δεδομένων εισόδου, ενώ επιτρέπει διαχρονική μεταβολή των περιορισμών του συστήματος.
- Το μοντέλο προσομοίωσης, δηλαδή η κατανομή των ροών του υδροσυστήματος, διαμορφώνεται ως πρόβλημα δικτυακού γραμμικού προγραμματισμού, εισάγοντας εικονικά κόστη στους κλάδους.
- Για την συνδυασμένη ανάλυση επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων συνδέεται με το μοντέλο MODRSP (παραλλαγή του MODFLOW), ενώ για την προσομοίωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού, λειτουργεί σε συνδυασμό με το μοντέλο QUAL2E, που πραγματοποιεί μονοδιάστατη ανάλυση σε ποταμούς.

Πληροφορίες: <http://modsim.engr.colostate.edu/>



Σύνοψη των ΣΥΑ διαχείρισης υδατικών πόρων

- ❑ Τα λογισμικά της «αγοράς» υλοποιούν απλά μαθηματικά μοντέλα υδατικού ισοζυγίου, που απευθύνονται σε χρήστες περιορισμένης εμπειρίας.
- ❑ Η οργάνωση και οπτικοποίηση των δεδομένων γίνεται με την υποστήριξη συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας.
- ❑ Η σχηματοποίηση του υδροσυστήματος ακολουθεί τη λογική ενός δικτύου κόμβων και κλάδων.
- ❑ Οι υδρολογικές εισοδοι είναι είτε ιστορικές χρονοσειρές είτε πρότυπα του τύπου μέσες μηνιαίες τιμές, κανονικά-ξηρά-υγρά σενάρια εισροών, κλπ.
- ❑ Η διαχείριση των απολήψεων και παροχών βασίζεται σε κανόνες λειτουργίας, που συνήθως προσδιορίζονται εμπειρικά.
- ❑ Η χρήση της βελτιστοποίησης είναι από μηδενική ως περιορισμένη.
- ❑ Τα μοντέλα διαχείρισης υδροσυστημάτων συνδυάζονται με αδρομερείς εκδοχές υφιστάμενων μοντέλων προσομοίωσης φυσικών διεργασιών (υδρολογικών, υδρογεωλογικών, ποιοτικών, υδραυλικών).
- ❑ Πληθώρα υδροσυστημάτων παγκοσμίως έχουν σχεδιαστεί ή λειτουργούν με την υποστήριξη τέτοιων μοντέλων.

Μέρος Γ: Το λογισμικό Υδρονομείας

Τι είναι ο Υδρονομέας;

- Λογισμικό προσομοίωσης και βελτιστοποίησης υδροσυστημάτων κάθε κλίμακας και τοπολογίας, που αναπαριστά:
 - χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος (υδρολογικές εισροές).
 - τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των υδραυλικών έργων.
 - υδατικές ανάγκες και λειτουργικούς περιορισμούς.
- Εντοπίζει την πλέον πρόσφορη πολιτική διαχείρισης, με τη μορφή κανόνων λειτουργίας των κύριων υδραυλικών έργων
- Απαντά σε ερωτήματα όπως:
 - Ποια είναι η μακροπρόθεσμη (ασφαλής) απόδοση ενός συστήματος;
 - Με ποιο επίπεδο αξιοπιστίας μπορούν να επιτευχθούν οι στόχοι και περιορισμοί στη χρήση νερού (ποσοτικοί, ενεργειακοί, περιβαλλοντικοί);
 - Ποιο είναι το ελάχιστο κόστος λειτουργίας του συστήματος;
 - Ποιο είναι το ενεργειακό όφελος του συστήματος από την παραγωγή πρωτεύουσας και δευτερεύουσας υδροηλεκτρικής ενέργειας;
 - Ποιες είναι οι επιπτώσεις υδροκλιματικών αλλαγών στο σύστημα;
 - Ποιες είναι οι επιπτώσεις αλλαγών ή βλαβών στο δίκτυο;

Ιστορική αναδρομή

- ❑ **1989-1991:** Η πρώτη εφαρμογή πληροφορικής (σε MS-DOS) στη Ελλάδα για διαχείριση υδατικών πόρων. Εκτίμηση ασφαλούς δυναμικού Μόρνου-Υλίκης και σχεδιασμός έργων Ευήνου μέσω στοχαστικής προσομοίωσης.
- ❑ **1993-1995:** Πιλοτικό μοντέλο διαχείρισης ταμιευτήρων υδροδότησης της Αθήνας (σε Windows 95/UNIX). Παραμετροποίηση λειτουργίας ταμιευτήρων και βελτιστοποίηση παραμέτρων με γενετικούς αλγορίθμους.
- ❑ **1997-1999:** Λογισμικό γενικού σκοπού (σε Delphi), υποστηριζόμενο από μια σχεσιακή βάση δεδομένων (σε Access). Πιλοτική εφαρμογή στα υδροσυστήματα Αθήνας και Αχελώου-Θεσσαλίας. Βελτιστοποίηση λειτουργίας ταμιευτήρων και Υ/Η έργων.
- ❑ **1999-2003:** Επιχειρησιακό εργαλείο διαχείρισης του υδροσυστήματος της ΕΥΔΑΠ, ενταγμένο σε ΣΥΑ. Βελτιστοποίηση δύο επιπέδων (γραμμική για κατανομή ροών δικτύου, μη γραμμική για έλεγχο αξιοπιστίας και κόστους). Λειτουργία μοντέλου υπό μορφή στοχαστικής πρόγνωσης.
- ❑ **2003-2007:** Ανάπτυξη λογισμικού επιχειρησιακού προσανατολισμού, στα πλαίσια του υπολογιστικού συστήματος ΥΔΡΟΓΑΙΑ. Εφαρμογή στα υδροσυστήματα Δυτικής Θεσσαλίας και Καλύμνου.
- ❑ **2009:** επικαιροποιημένη έκδοση στα πλαίσια έργου συντήρησης της ΕΥΔΑΠ. Αυτόνομη λειτουργία του λογισμικού (αποθήκευση σεναρίων σε μορφή αρχείου).
- ❑ **2010:** Εκτίμηση κόστους αδιύλιστου νερού για την ύδρευση της Αθήνας.

Δεδομένα εισόδου μαθηματικού μοντέλου

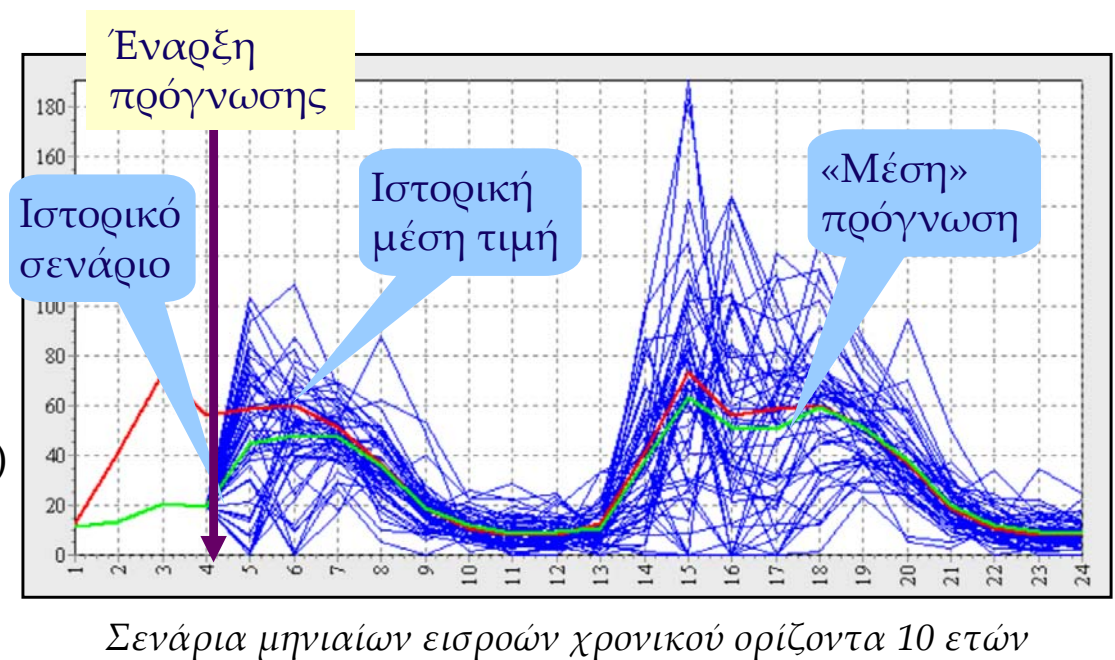
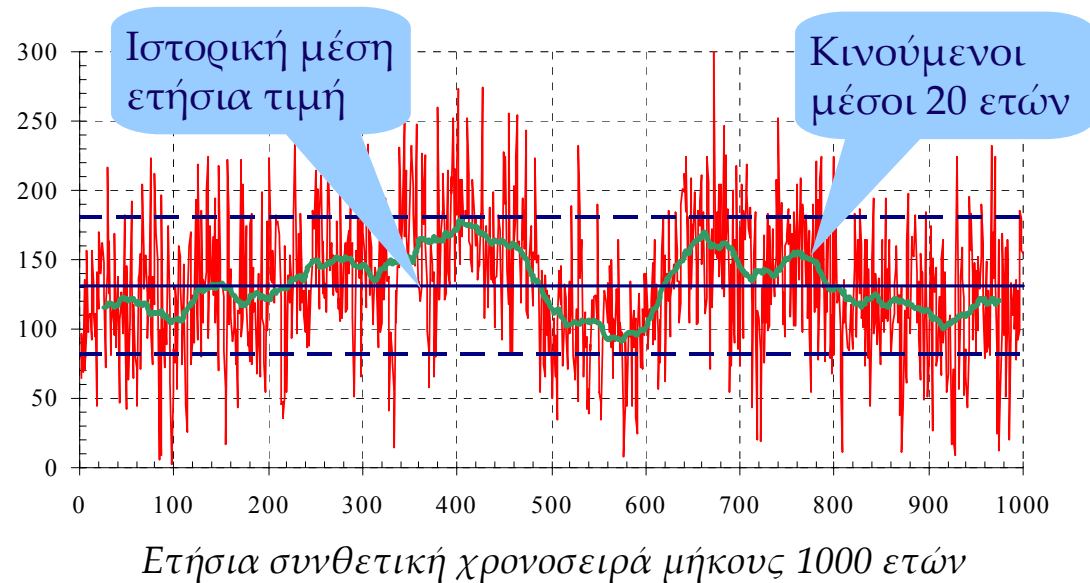
- Ταμιευτήρες
 - Χαρακτηριστικές στάθμες
 - Καμπύλες στάθμης-επιφάνειας και στάθμης-αποθέματος
 - Υδρολογικές εισροές (λόγω απορροής και βροχόπτωσης)
 - Απώλειες λόγω εξάτμισης
 - Σχέσεις στάθμης-διαφυγών
 - Παράμετροι κανόνων λειτουργίας
 - Στάθμη στην έναρξη της προσομοίωσης (αρχική συνθήκη)
- Γεωτρήσεις
 - Μηνιαία αντλητική ικανότητα γεωτρήσεων
 - Παράμετροι κανόνων λειτουργίας
- Υδραγωγεία
 - Παροχετευτικότητα (σταθερή ή μεταβαλλόμενη με το ύψος πτώσης)
 - Απώλειες λόγω διαρροών
- Ενεργειακά δεδομένα
 - Δεδομένα παραγωγής ενέργειας στους υδροστροβίλους
 - Δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας στα αντλιοστάσια
- Στόχοι και περιορισμοί
 - Τύπος στόχου (ύδρευση, άρδευση, παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας, αιχμής, ελάχιστη/μέγιστη στάθμη ταμιευτήρα, ελάχιστη/μέγιστη παροχή ποταμού ή υδραγωγείου)
 - Μηνιαίες και ετήσιες τιμές
 - Επίπεδο προτεραιότητας
 - Αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας
- Μέτρο επίδοσης
 - Μεταβλητές ελέγχου
 - Κριτήρια επίδοσης (π.χ. κόστος, ενέργεια, αξιοπιστία)
 - Συντελεστές βάρους στοχικής (αντικειμενικής) συνάρτησης

Διαχείριση υδρολογικής αβεβαιότητας μέσω στοχαστικής προσομοίωσης

- Ενώ για την ασφαλή διαχείριση του συστήματος θα ήταν επιθυμητή η γνώση των μακροχρόνιων εισροών, εξαιτίας της έντονα μη γραμμικής (χαοτικής) φύσης των υδροκλιματικών διεργασιών, είναι ανέφικτη η πραγματοποίηση προσδιοριστικών προγνώσεων για χρονικό ορίζοντα πέραν των λίγων ημερών.
- Η ανάλυση του συστήματος με χρήση ιστορικών εισροών αντενδείκνυται γιατί:
 - το μήκος τους είναι υπερβολικά μικρό για την εμπειρική εκτίμηση των ζητούμενων πιθανοτήτων αστοχίας (για $\alpha = 1\%$ απαιτείται δείγμα εκροών 1000 ως 10000 ετών).
 - η πιθανότητα επανάληψης των ίδιων χρονοσειρών στο μέλλον είναι μηδενική.
- Η στοχαστική προσέγγιση επιτρέπει ακριβή ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας του συστήματος, με τη χρήση σεναρίων συνθετικών εισροών που αναπαράγουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών.
- Ανάλογα με το διαχειριστικό πρόβλημα, υπάρχουν δύο τύποι προσομοίωσης:
 - **Μόνιμης κατάστασης:** εκτίμηση μακροχρόνιας αξιοπιστίας σε συνθήκες σταθερής ζήτησης, όπου σε κάθε θέση παράγεται μία χρονοσειρά μεγάλου μήκους.
 - **Καταληκτική:** παράγεται ένα ικανό πλήθος σεναρίων πρόγνωσης των εισροών για χρονικό ορίζοντα λίγων ετών, με δεδομένες αρχικές συνθήκες, ενώ επιτρέπεται μεταβολή των χαρακτηριστικών του συστήματος – προκύπτει ένα δείγμα μεταβλητών εξόδου σε κάθε χρονικό βήμα (π.χ. αποθέματα, εκροές), βάσει του οποίου εκτιμάται η αντίστοιχη αξιοπιστία.

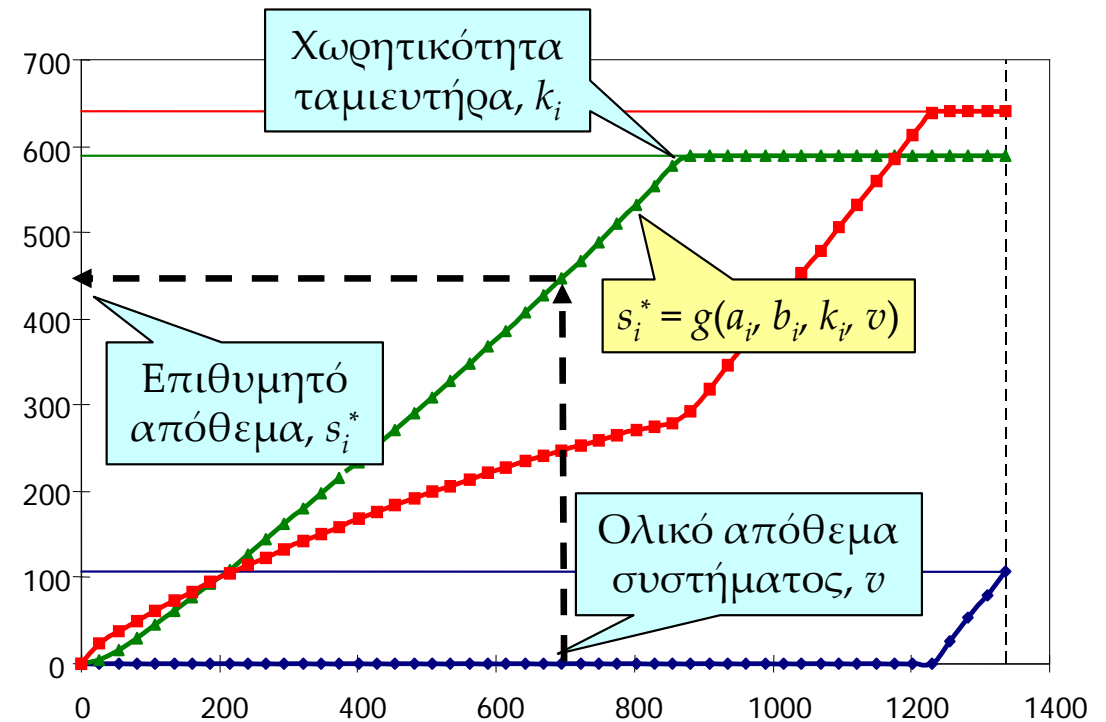
Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών

- Η γέννηση των συνθετικών χρονοσειρών γίνεται με το λογισμικό ΚΑΣΤΑΛΙΑ, που υλοποιεί ένα στοχαστικό μοντέλο πολλών μεταβλητών και δύο χρονικών επιπέδων.
- Οι συνθετικές χρονοσειρές διατηρούν τα ακόλουθα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων, σε μηνιαία και ετήσια κλίμακα:
 - μέσες τιμές, τυπικές αποκλίσεις και συμμετρίες.
 - χρονικές συσχετίσεις διαφόρων τύπων για πολλαπλές χρονικές υστερήσεις (αυτοσυσχετίσεις).
 - ταυτόχρονες από κοινού (χωρικές) συσχετίσεις (ετεροσυσχετίσεις).
 - μακροπρόθεσμη υδρολογική εμμονή (φαινόμενο Hurst).



Κανόνες λειτουργίας ταμιευτήρων

- ❑ Οι κανόνες λειτουργίας είναι νόμοι που ορίζουν το απόθεμα-στόχο κάθε ταμιευτήρα με βάση το αναμενόμενο απολήψιμο απόθεμα του συστήματος, τη συνολική ζήτηση νερού και τους περιορισμούς στάθμης.
- ❑ Οι κανόνες διατυπώνονται συναρτήσει έως δύο παραμέτρων ανά ταμιευτήρα, που μπορεί να μεταβάλλονται εποχιακά.
- ❑ Αν διατίθεται μια στοχαστική πρόγνωση των εισροών του τρέχοντος μήνα, εκτιμώνται οι αντίστοιχες επιθυμητές εκροές. Έτσι, επιτυγχάνεται δραστική μείωση των μεταβλητών ελέγχου, που είναι οι παράμετροι των κανόνων λειτουργίας (ανεξάρτητες του χρονικού ορίζοντα) και όχι οι εκροές ανά μήνα.
- ❑ Αν δεν υπάρχουν ουσιώδεις μεταβολές στα δεδομένα του συστήματος, η διαχείρισή του γίνεται με χρήση των βελτιστοποιημένων νομογραφημάτων, η μορφή των οποίων εξαρτάται αποκλειστικά από τα στατιστικά χαρακτηριστικά των εισροών και όχι από τις ίδιες τις τιμές των χρονοσειρών.



Κανόνες λειτουργίας γεωτρήσεων

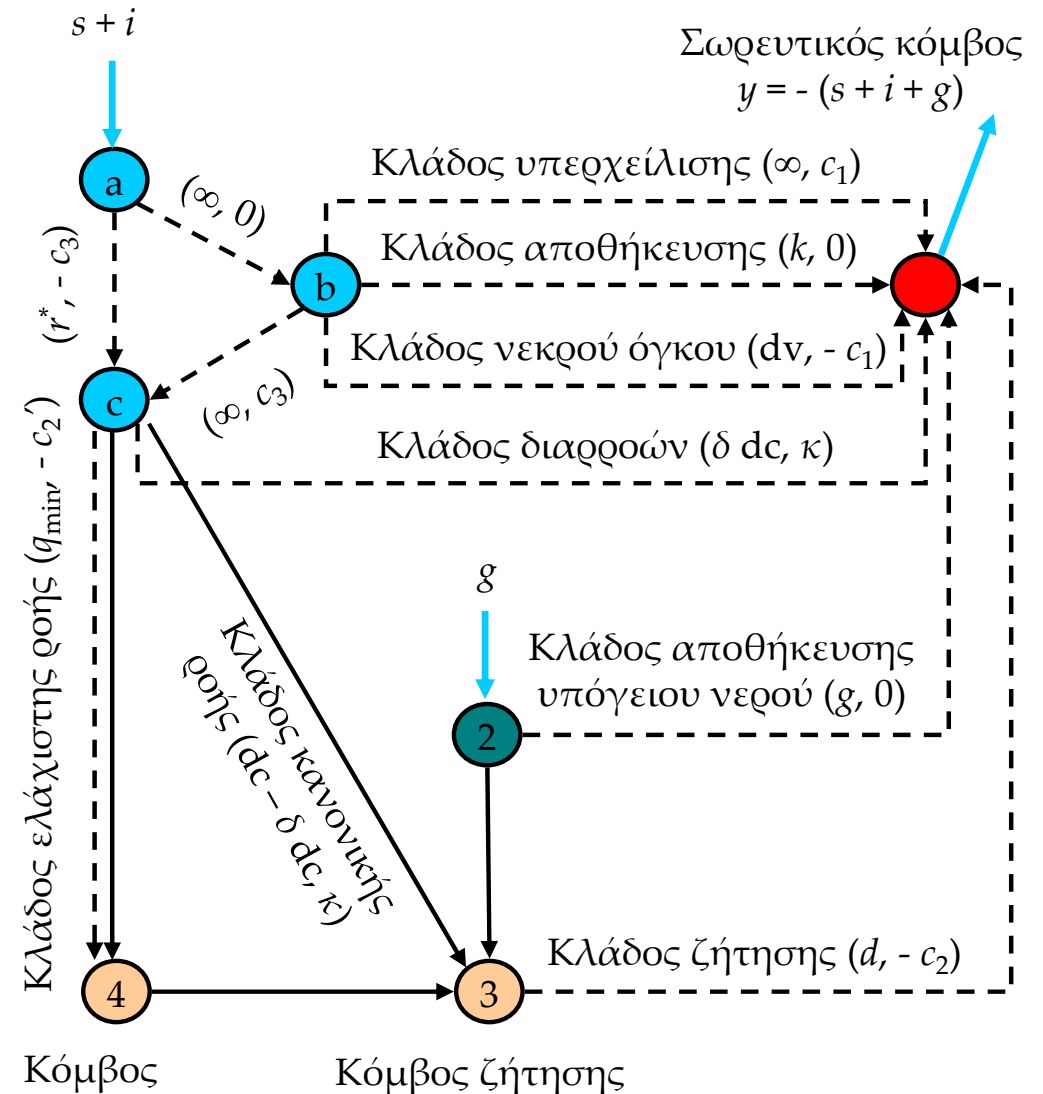
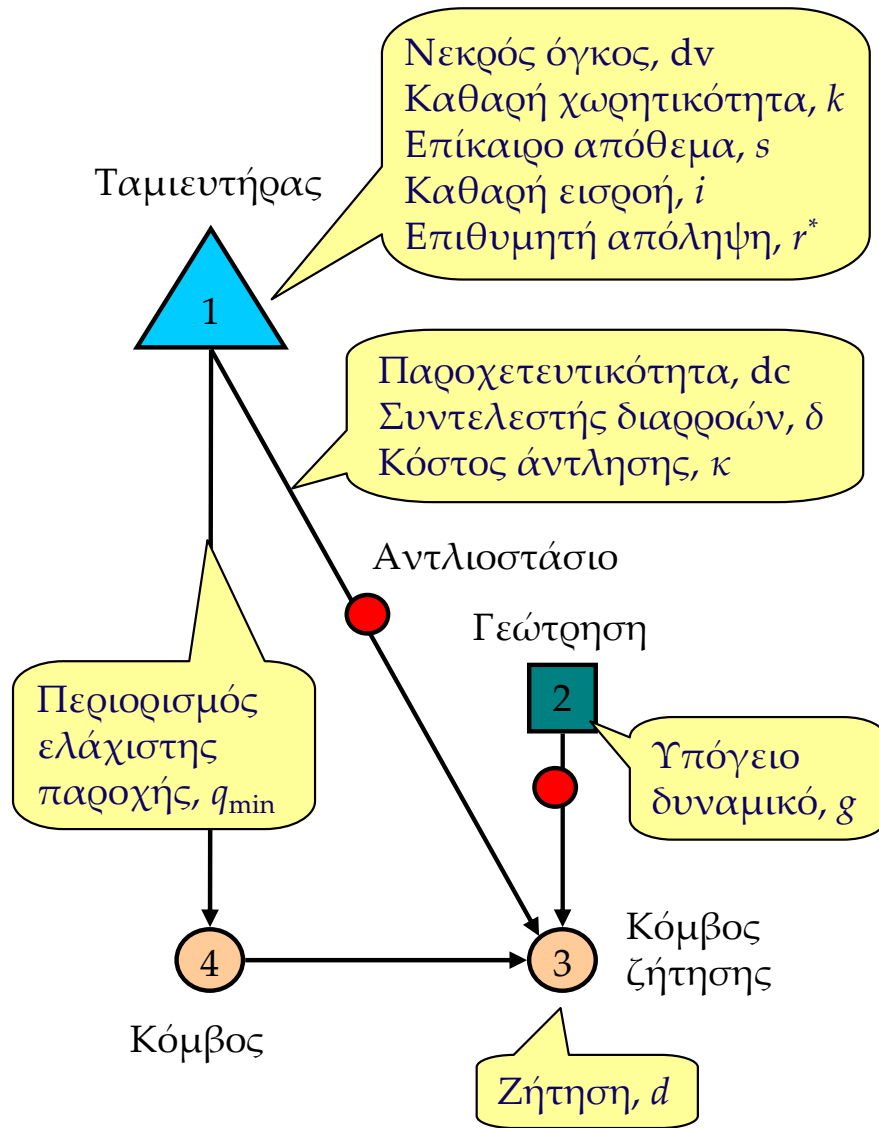
- ❑ Ως προς τη μοντελοποίησή τους, οι γεωτρήσεις ομαδοποιούνται ώστε να αναπαριστούν τη συνολική απόληψη (άντληση) νερού από κάθε υδραυλικά ανεξάρτητο υπόγειο σύστημα (υδροφορέα).
- ❑ Εισάγονται δύο παράμετροι τύπου κατωφλίου ανά ομάδα γεωτρήσεων, που εκφράζουν κρίσιμα όρια του ποσοστού πλήρωσης των ταμιευτήρων.
- ❑ Αν το ποσοστό (= ολικό απόθεμα / ολική χωρητικότητα) υπερβαίνει το άνω όριο, τότε απαγορεύεται η χρήση της συγκεκριμένης ομάδας και οι απολήψεις νερού πραγματοποιούνται αποκλειστικά από τους ταμιευτήρες.
- ❑ Αν το ποσοστό είναι μικρότερο από το κάτω όριο, τότε επιβάλλεται η χρήση της συγκεκριμένης ομάδας, ανεξαρτήτως κόστους.
- ❑ Σε ενδιάμεσες τιμές, η ομάδα γεωτρήσεων ενεργοποιείται ή όχι με βάση οικονομικά κριτήρια (κατανάλωση ενέργειας).

Υδροδοτικό σύστημα Αθήνας: Η ΕΥΔΑΠ έχει αναπτύξει γεωτρήσεις σε τρεις υδροφορείς, της Βορειοανατολικής Πάρνηθας, της Υλίκης και του μέσου ρου Βοιωτικού Κηφισού, που αντιμετωπίζονται ως εφεδρικοί υδατικοί πόροι. Οι γεωτρήσεις δεν χρησιμοποιούνται καθόλου όταν το απολήψιμο δυναμικό των ταμιευτήρων ξεπερνά το 40% της χωρητικότητάς τους, ενώ ενεργοποιούνται κατά προτεραιότητα (χωρίς οικονομικούς όρους) όταν τα αποθέματα κυμαίνονται σε ποσοστό μικρότερο από κάτω από το 25% της ωφέλιμης χωρητικότητας.

Τοποθέτηση προβλήματος προσομοίωσης

- Η γνώση των επιθυμητών αποθεμάτων (ή απολήψεων) δεν επαρκεί για τον προσδιορισμό όλων των μεταβλητών ελέγχου του συστήματος (πραγματικά αποθέματα και απολήψεις, υπερχειλίσσεις, παροχές υδραγωγείων) εφόσον:
 - οι επιθυμητές απολήψεις δεν μπορούν να διοχετευτούν κατάντη εξαιτίας των φυσικών περιορισμών των υδραγωγείων (ανεπαρκής παροχευτικότητα).
 - δεν υπάρχει μονοσήμαντος τρόπος μεταφοράς των απολήψεων από τις πηγές στην κατανάλωση, αλλά εναλλακτικές διαδρομές, και μάλιστα με διαφορετικό κόστος.
 - το σύστημα εξυπηρετεί αντικρουόμενους στόχους με ορισμένη σειρά προτεραιότητας.
 - η συνολική ζήτηση νερού υπερβαίνει τα συνολικά τρέχοντα αποθέματα.
- Προκύπτει ένα σύνθετο πρόβλημα διαχείρισης των ροών του υδροσυστήματος σε κάθε μήνα, για το οποίο τίθενται οι εξής απαιτήσεις, σε σειρά ιεραρχίας:
 - αυστηρή ικανοποίηση των φυσικών περιορισμών των τεχνικών έργων.
 - ικανοποίηση των στόχων και διαχειριστικών περιορισμών, σύμφωνα με την σειρά προτεραιότητας που έχει οριστεί.
 - ελαχιστοποίηση της απόκλισης μεταξύ των πραγματικών και επιθυμητών απολήψεων, ώστε να τηρείται κατά το δυνατόν πιστότερα η πολιτική διαχείρισης που επιβάλλουν οι κανόνες λειτουργίας.
 - ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των υδατικών πόρων κατά μήκος του δικτύου των υδραγωγείων, γεωτρήσεων και αντλιοστασίων.

Μετασχηματισμός σχηματοποιημένου μοντέλου σε μοντέλο διγράφου



Βελτιστοποίηση κατανομής ροών δικτύου

- ❑ Η μηναία κατανομή των μεταβλητών ελέγχου του υδροσυστήματος και η τήρηση των φυσικών και διαχειριστικών περιορισμών ανάγεται σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο επιλύεται σε κάθε χρονικό βήμα.
- ❑ Διατύπωση προβλήματος: ελαχιστοποίηση πραγματικού και εικονικού κόστους μεταφοράς νερού, σε ένα μετασχηματισμένο δίκτυο (διγράφος)
- ❑ Χαρακτηριστικά μεγέθη διγράφου: χωρητικότητες και εικονικά κόστη κλάδων, «εισροές» ανάντη κόμβων (αυτοματοποιημένη διαδικασία υπολογισμού)
- ❑ Δεδομένα εισόδου: διαθέσιμοι υδατικοί πόροι (αποθέματα + εισροές – απώλειες), επιθυμητές απολήψεις βάσει των κανόνων λειτουργίας, επίκαιρη ζήτηση
- ❑ Μεταβλητές ελέγχου: «παροχές» κλάδων διγράφου, που αντιστοιχούν σε όλες τις μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου του υδροσυστήματος
- ❑ Περιορισμοί: εξισώσεις συνέχειας κόμβων και «χωρητικότητες» κλάδων, που αντιπροσωπεύουν είτε φυσικά άνω όρια (παροχετευτικότητες υδραγωγείων, χωρητικότητες ταμιευτήρων) ή επιθυμητά όρια (π.χ. ζήτηση, ελάχιστη παροχή)
- ❑ Τύπος προβλήματος: γραμμικό, με πολλές μεταβλητές και περιορισμούς
- ❑ Αλγόριθμος επίλυσης: ειδική εκδοχή της μεθόδου simplex, κατάλληλη για πολύ μεγάλου μεγέθους προβλήματα αλλά με αραιά μητρώα περιορισμών.
- ❑ Πλεονεκτήματα: ακριβής και γρήγορη λύση

Αποτελέσματα προσομοίωσης

Balance sheets

Reservoirs | Nodes | Conduits | Energy

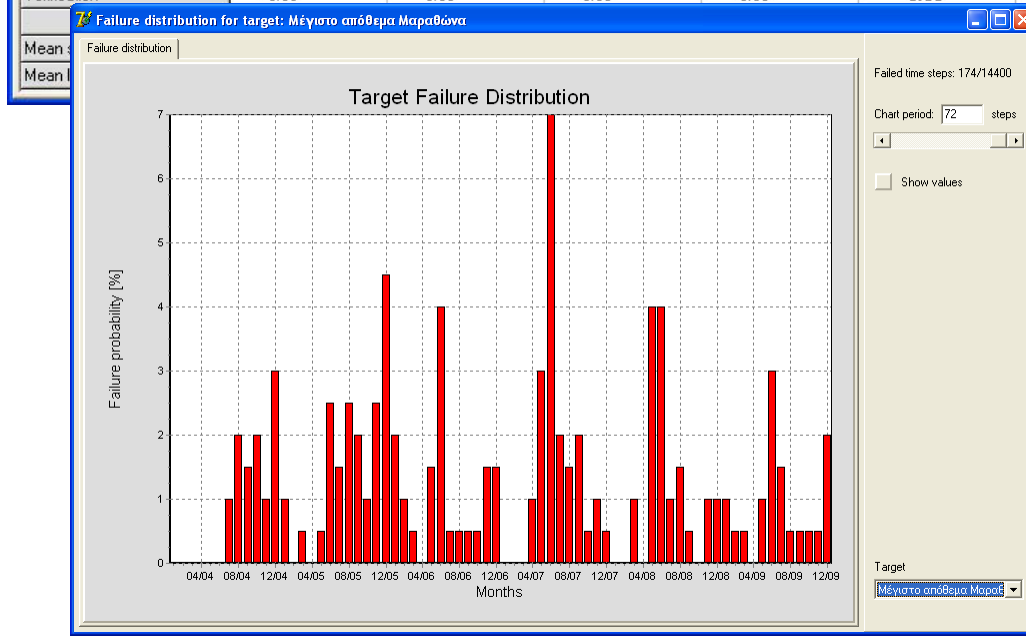
	Υάικη	Μόρνος	Εύηνος	Μαραθώνας	TOTAL
Subcatchment runoff	23.24 (24.03)	15.02 (13.02)	19.31 (17.93)	1.37 (1.73)	58.94
Rainfall	0.12 (0.40)	0.08 (0.29)	0.03 (0.09)	0.02 (0.07)	0.24
Aqueduct inflow		4.42 (7.14)		11.89 (2.69)	16.31
River inflow					0.00
Aquifer inflow					0.00
External inflow					0.00
Returned water					0.00
Leakage	2.82 (4.46)				2.82
Evaporation					0.00
Conduit outflow	6.30 (4.85)	5.08 (9.42)	4.42 (7.14)	1.06 (3.20)	16.86
River outflow			1.29 (4.42)		1.29
Water supply					0.00
Irrigation					0.00
Spill	17.14 (26.98)	18.61 (24.66)	14.61 (13.50)	12.65 (5.93)	63.01
System loss					0.00
Storage usage	-2.90 (21.11)	-4.17 (17.22)	-0.98 (5.24)	-0.44 (3.08)	-8.49
Verification	-0.00	0.00	0.00	-0.00	-0.00

From Date: Ιανουάριος 2004
To Date: Δεκέμβριος 2009
Calculate

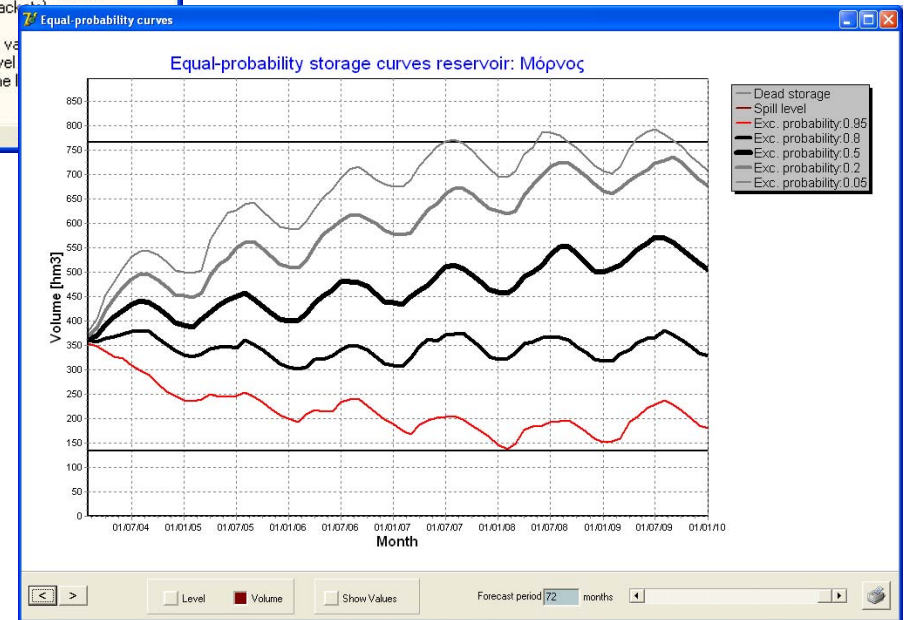
Results for the period 1/2004 to 12/2009 (72 months), based on the last simulation. Last simulation period: 1/1/2004 - 31/12/2009.

All values represent the monthly mean and standard deviation value (in brackets).

Μέσα υδατικά ισοζύγια κόμβων, ταμιευτήρων και υδραγωγείων – Ενεργειακά ισοζύγια αντλιοστασίων, γεωτρήσεων και στροβίλων



Πρόγνωση πιθανοτήτων αστοχίας



Καμπύλες πρόγνωσης αποθεμάτων και παροχών

Βελτιστοποίηση διαχειριστικής πολιτικής

- Διατυπώνεται ένα καθολικό μέτρο επίδοσης, με στάθμιση των κριτηρίων σε μια ενιαία αριθμητική έκφραση, με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών βάρους.
- Οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι οι παράμετροι των κανόνων λειτουργίας (αδιάστατες, με εύρος διακύμανσης από 0 έως 1).
- Δεν εισάγονται άλλοι περιορισμοί εκτός από τα εφικτά όρια των παραμέτρων.
- Η προς βελτιστοποίηση συνάρτηση είναι έντονα μη γραμμική ως προς τις μεταβλητές ελέγχου, δημιουργώντας μια μη κυρτή επιφάνεια απόκρισης, με πολλαπλά τοπικά ακρότατα και ποικίλες γεωμετρικές ιδιαιτερότητες.
- Σε τέτοιου τύπου προβλήματα:
 - δεν υπάρχει αναλυτική λύση, ούτε υπολογιστική διαδικασία (αλγόριθμος) που να εγγυάται τον εντοπισμό της ολικά βέλτιστης λύσης με πεπερασμένο αριθμό δοκιμών.
 - η δυσχέρεια του προβλήματος αυξάνει εκθετικά με το πλήθος των παραμέτρων.
 - κλασικές αριθμητικές τεχνικές (π.χ. μέθοδοι κλίσης) κινδυνεύουν να εγκλωβιστούν εύκολα σε κάποιο από τα τοπικά ακρότατα της συνάρτησης.
 - εφαρμόζονται υβριδικές εξελικτικές μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιούν έναν πληθυσμό τυχαίων σημείων που εξερευνούν ταυτόχρονα διαφορετικές περιοχές του εφικτού χώρου, εξελισσόμενα βάσει προσδιοριστικών και στοχαστικών κανόνων.
 - σκοπός μιας τέτοιας διαδικασίας είναι ο εντοπισμός μιας πρόσφορης (και όχι κατ' ανάγκη της ολικά βέλτιστης) λύσης, με λογικό αριθμό δοκιμών.

Τελικές επισημάνσεις

□ Πλεονεκτήματα:

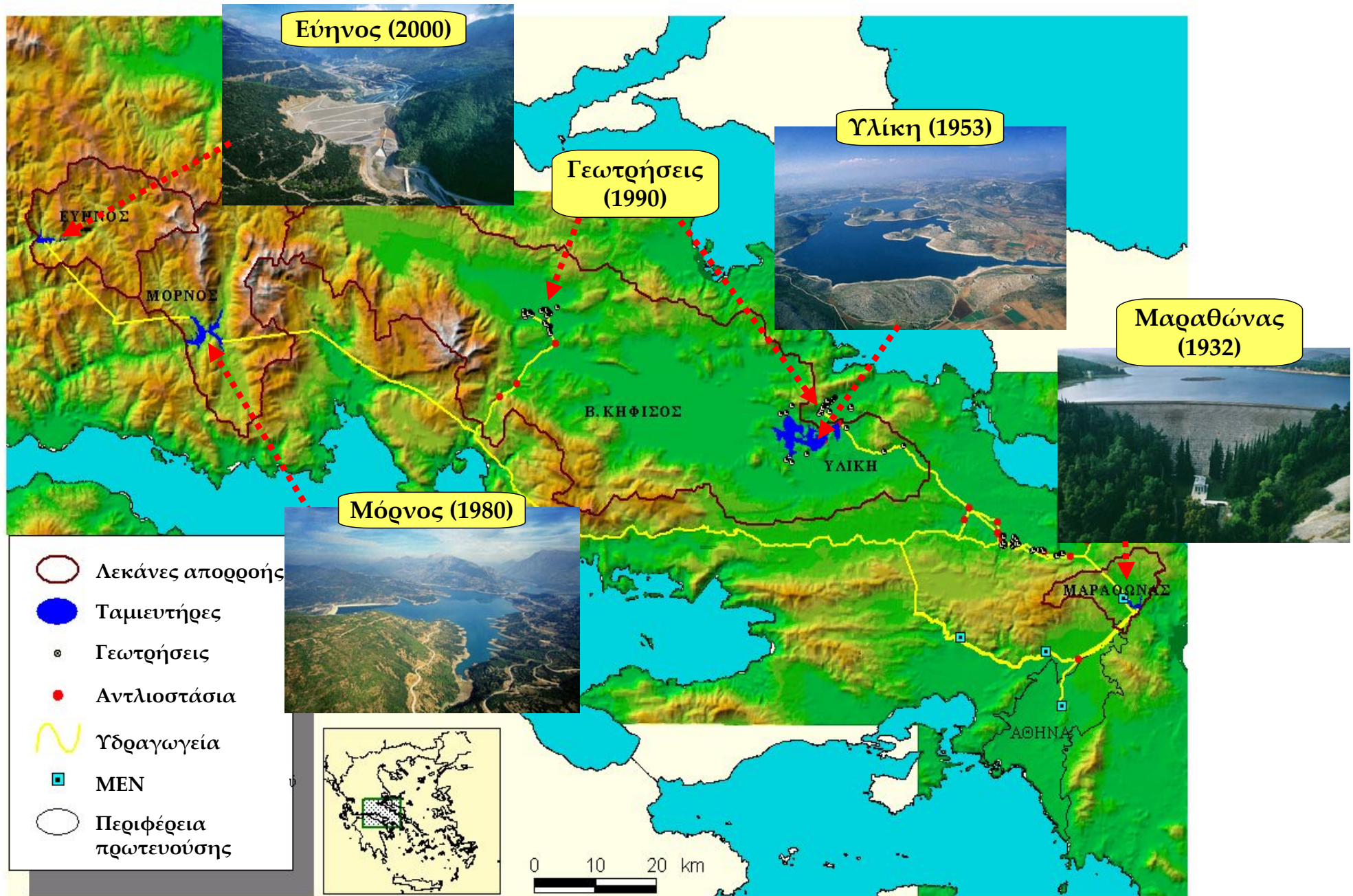
- ολοκληρωμένο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων·
- ευελιξία ως προς την σχηματοποίηση·
- ρεαλιστική αναπαράσταση διεργασιών υδροσυστήματος·
- περιγραφή διαχειριστικών πολιτικών με χρήση πρακτικών κανόνων (νομογραφήματα ταμιευτήρων, όρια ενεργοποίησης γεωτρήσεων)·
- ποσοτικοποίηση υδρολογικής αβεβαιότητας και ρίσκου – στοχαστική πρόγνωση υδρολογικών και διαχειριστικών μεγεθών·
- βελτιστοποίηση λειτουργίας υδροσυστήματος, έναντι πληθώρας κριτηρίων αξιολόγησης (ποσοτικών, πιθανοτικών, οικονομικών, ενεργειακών)·
- φειδωλή παραμετροποίηση, η οποία επιτρέπει σημαντική εξοικονόμηση υπολογιστικού φόρτου (βελτιστοποίηση με μικρό αριθμό δοκιμών).

□ Πεδία εφαρμογής:

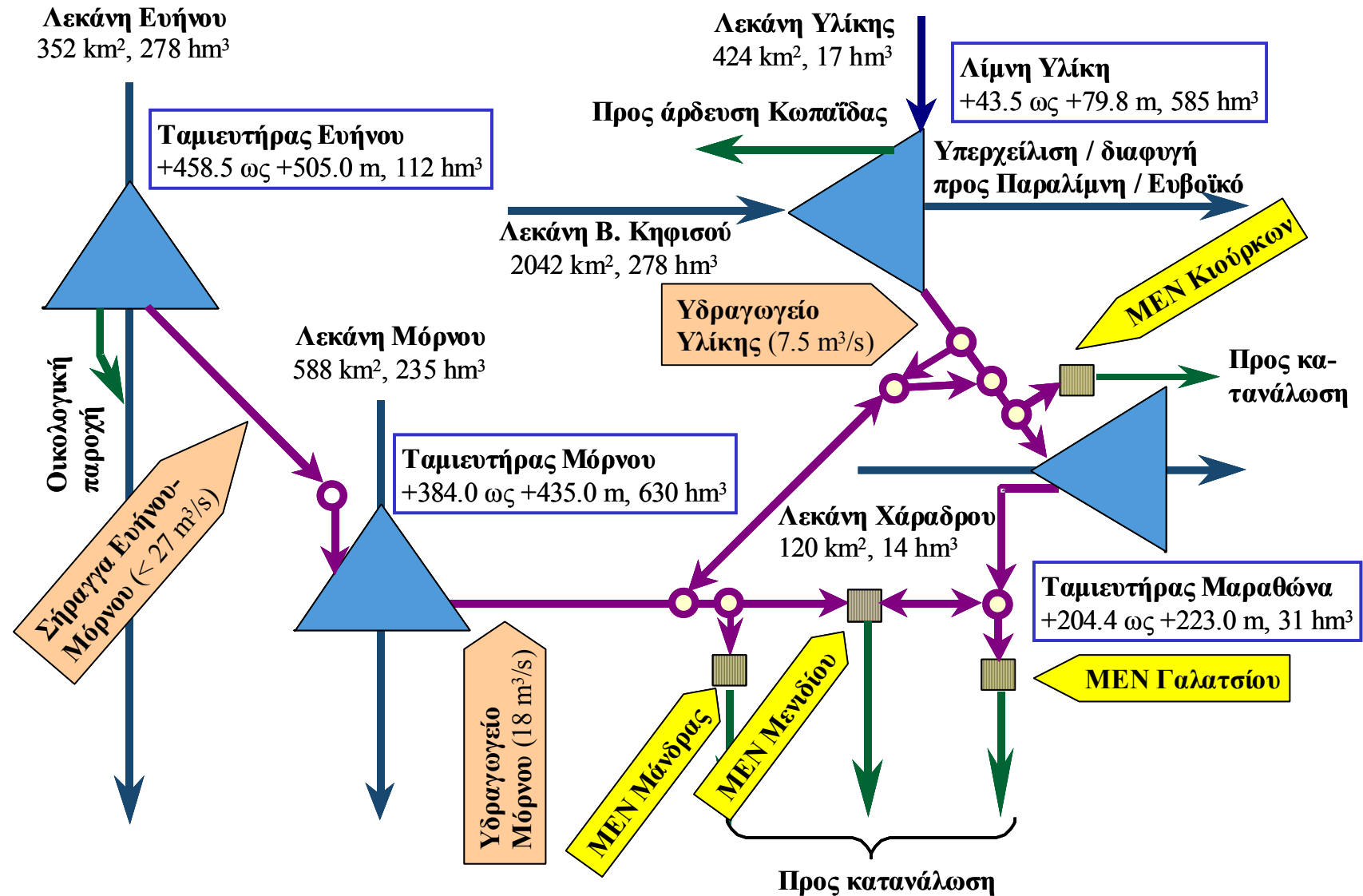
- μελέτες στρατηγικής διαχείρισης συστημάτων υδατικών πόρων·
- επιχειρησιακά σχέδια λειτουργίας υδροσυστημάτων (για λήψη αποφάσεων σε βραχύ χρονικό ορίζοντα)·
- προγραμματισμός νέων έργων (στην κλίμακα υδροσυστήματος)·
- διερεύνηση σεναρίων έκτακτης λειτουργίας (π.χ. βλάβης).

Μέρος Δ: Το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας και η διαχείρισή του

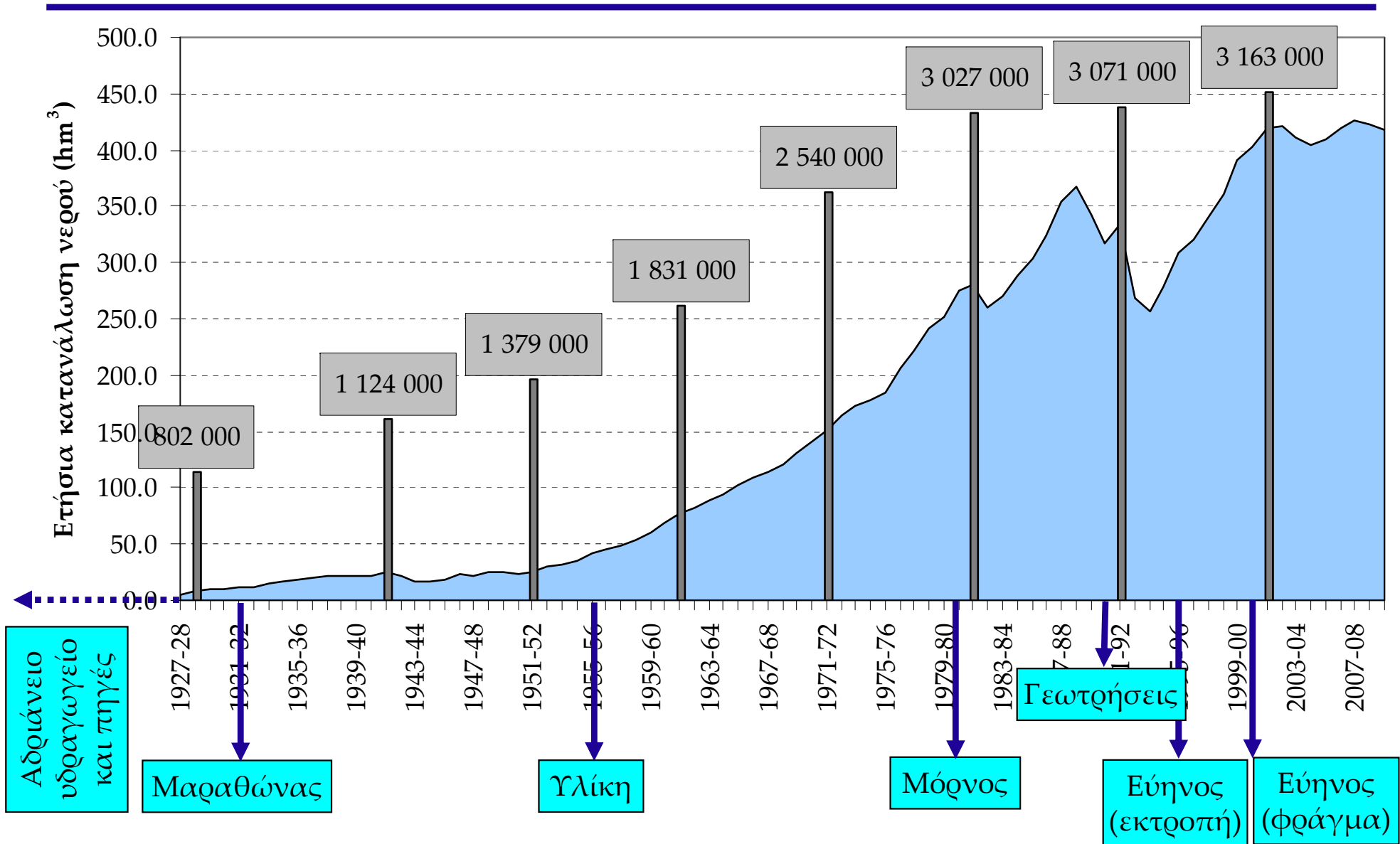
Υδροδοτικό σύστημα Αθήνας



Γενική διάταξη και χαρακτηριστικά μεγέθη



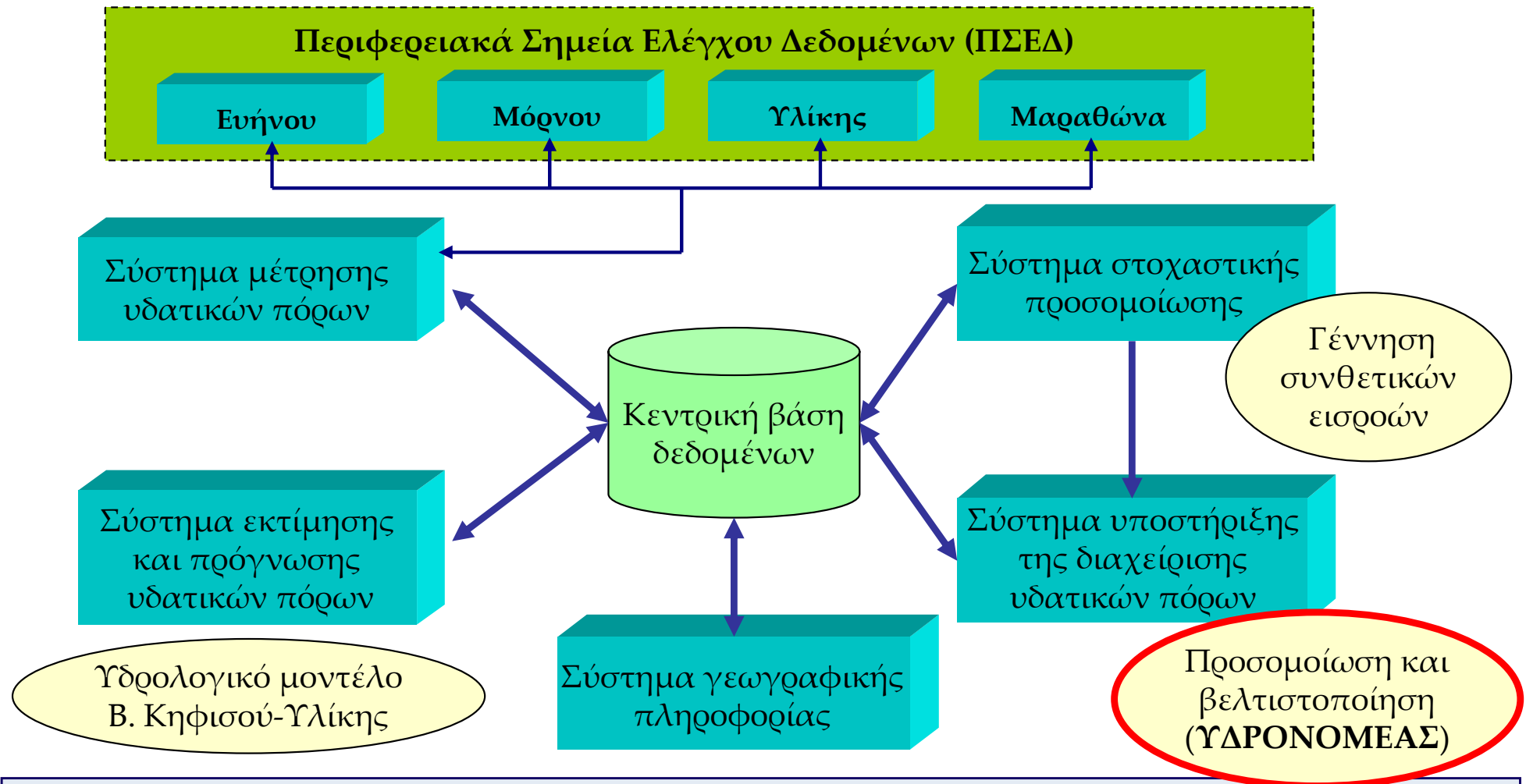
Εξέλιξη κατανάλωσης – πληθυσμού – υδρευτικών έργων



Επίπεδα πολυπλοκότητας στη διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας

- Απαίτηση εξασφάλισης πολύ υψηλής αξιοπιστίας (99%, σε ετήσια βάση).
- Διαχείριση υπό καθεστώς αβεβαιότητας
 - υδροκλιματική αβεβαιότητα (μη προβλέψιμες εισροές).
 - αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη της κατανάλωσης.
 - αβεβαιότητα ως προς τη λειτουργικότητα κρίσιμων έργων.
- Εναλλακτικές διαχειριστικές επιλογές (= βαθμοί ελευθερίας συστήματος)
 - ως προς τις εκροές από τους υδατικούς πόρους (ταμιευτήρες, γεωτρήσεις).
 - ως προς την κατανομή των εκροών στα υδραγωγεία.
- Υψηλό κόστος λειτουργίας υδραγωγείου Υλίκης και γεωτρήσεων (λόγω άντλησης) έναντι μηδενικού κόστους της σήραγγας Ευήνου-Μόρνου και του υδραγωγείου Μόρνου (λειτουργία με βαρύτητα).
- Σημαντικές απώλειες από υπόγειες διαφυγές (κυρίως Υλίκη), υπερχειλίσσεις (Εύηνος) και διαρροές (κυρίως σε τμήματα υδραγωγείων υπό πίεση).
- Ανταγωνιστικές (ως προς την ύδρευση) χρήσεις νερού και περιορισμοί
 - διατήρηση περιβαλλοντικής παροχής $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ κατάντη φράγματος Ευήνου.
 - περιορισμός ρυθμιστικού όγκου Μαραθώνα για αποφυγή κινδύνου υπερχείλισης.
 - αρδευτικές (Κωπαΐδα, Δίστομο) και μικρές υδρευτικές χρήσεις.

Σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (ΣΥΑ) για το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας



Αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας», το οποίο εκπονήθηκε από το ΕΜΠ την περίοδο 1999-2004 (<http://www.itia.ntua.gr/g/projinfo/14/>).

Βιβλιογραφία

- ❑ De Kok, J. L., and H.G. Wind, Design and application of decision-support systems for integrated water management: lessons to be learned, *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(14-15), 571-654, 2003.
- ❑ Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, and D. Xenos, Minimising water cost in the water resource management of Athens, *Urban Water Journal*, 1(1), 3-15, 2004.
- ❑ French, S., *Decision Analysis and Decision Support Systems*, 2000.
- ❑ Koutsoyiannis, D., and A. Economou, Evaluation of the parameterization-simulation-optimization approach for the control of reservoir systems, *Water Resources Research*, 39(6), 1170, 1-17, 2003.
- ❑ Koutsoyiannis, D., A. Efstratiadis, and G. Karavokiros, A decision support tool for the management of multi-reservoir systems, *Journal of the American Water Resources Association*, 38(4), 945-958, 2002.
- ❑ Koutsoyiannis, D., G. Karavokiros, A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Koukouvinos, and A. Christofides, A decision support system for the management of the water resource system of Athens, *Physics & Chemistry of the Earth*, 28(14-15), 599-609, 2003.
- ❑ Nalbantis, I., and D. Koutsoyiannis, A parametric rule for planning and management of multiple reservoir systems, *Water Resources Research*, 33(9), 2165-2177, 1997.
- ❑ Sage, A. P., Associates systems for decision support, *Information & Decision Technologies*, 19, 165-184, 1993.
- ❑ Watkins, D. W., and D. C. McKinney, Recent developments associated with decision support systems in water resources, *U.S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991-1994*, Reviews of Geophysics, Vol. 33 Supplement 1995, American Geophysical Union, 1995.
- ❑ Ευστρατιάδης, Α., Γ. Καραβοκυρός, και Δ. Κουτσογιάννης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης υδατικών συστημάτων «ΥΔΡΟΝΟΜΕΑΣ», *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: ΝΑΜΑ, Τεύχος 9, 91 σελίδες, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιανουάριος 2007.
- ❑ Ευστρατιάδης, Α., Γ. Καραβοκυρός, και Ν. Μαμάσης, Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας - Έτος 2009, *Συντήρηση, αναβάθμιση και επέκταση του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για την διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της ΕΥΔΑΠ*, Τεύχος 1, 116 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 2009.