

Σημειώσεις στο πλαίσιο του μαθήματος:

Βελτιστοποίηση συστημάτων υδατικών πόρων – Υδροπληροφορική



Βασικές έννοιες ανάλυσης συστημάτων υδατικών πόρων – Προσομοίωση

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Η έννοια της συστημικής προσέγγισης στα προβλήματα υδατικών πόρων

- **Σύστημα:** Σύνολο ανεξάρτητων μεταξύ τους στοιχείων, το οποίο χαρακτηρίζεται από:
 - ένα σύνορο που καθορίζει αν το στοιχείο ανήκει στο σύστημα ή το περιβάλλον
 - αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον (είσοδοι και έξοδοι), και
 - σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του και των εισόδων και εξόδων
- **Σύστημα υδατικών πόρων ή υδροσύστημα** (water resource system, hydrosystem): Σύστημα αποτελούμενο από φυσικά υδάτινα σώματα και τεχνικά έργα, που συνεργαζόμενα επιτυγχάνουν:
 - αξιοποίηση του νερού ως φυσικού πόρου ή/και
 - προστασία από την καταστροφική δράση του νερού ως φυσικού κινδύνου
- **Ανάλυση συστημάτων** (systems analysis): Μεθοδολογική αντιμετώπιση πολύπλοκων δομών ή φαινομένων, για τα οποία δεν υπάρχει αναλυτική λύση. Αποσκοπεί στην αναγνώριση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί ένα σύστημα, χωρίς λεπτομερειακή θεώρηση των σχέσεων ή φυσικών διεργασιών που το διέπουν.
- **Ανάλυση συστημάτων υδατικών πόρων:** Συστηματική διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λειτουργίας ενός υδροσυστήματος (σε επίπεδο σχεδιασμού ή/και διαχείρισης), που βασίζεται σε μια διαδοχή από εναλλακτικές αποφάσεις (decisions) και αξιολογήσεις (evaluations) των επιπτώσεων κάθε απόφασης.

Παράδειγμα συστημικής προσέγγισης: πώς εκφράζεται ένα πρόβλημα απόληψης νερού από μία πηγή

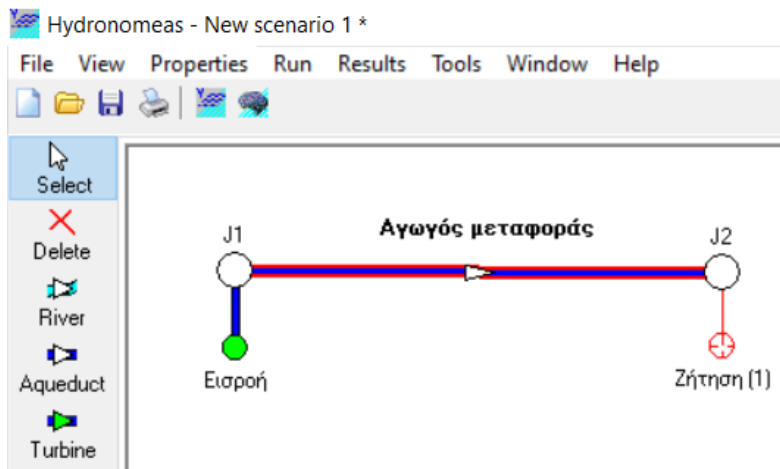


Το φυσικό σύστημα

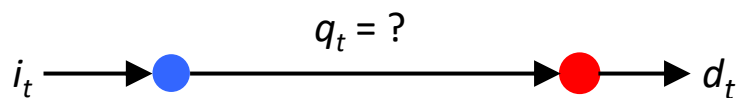
- ❑ Πολύπλοκο
- ❑ Απεριόριστη πληροφορία
- ❑ Ζητούμενο η λήψη αποφάσεων και η εφαρμογή τους στην πράξη

Το μοντέλο

- ❑ Απλό αλλά όχι υπεραπλουστευμένο
- ❑ Αναγνώριση και συλλογή μόνο της ουσιώδους πληροφορίας
- ❑ Μαθηματική διατύπωση (μεταβλητές, περιορισμοί, κριτήρια επίδοσης)
- ❑ Υλοποίηση ή επιλογή μοντέλου (κώδικας, πόροι, ταχύτητα, ακρίβεια)
- ❑ Επίλυση – σενάρια
- ❑ Ερμηνεία αποτελεσμάτων
- ❑ Έλεγχος – επαλήθευση – αξιολόγηση

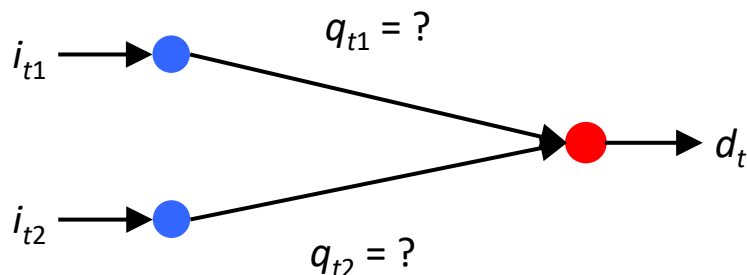


Στοιχειώδεις μαθηματικές διατυπώσεις προβλημάτων διαχείρισης υδατικών πόρων (συστημική προσέγγιση)



$$q_t = \min(i_t, d_t, u)$$

$$P(q_t < d_t) \geq \alpha$$

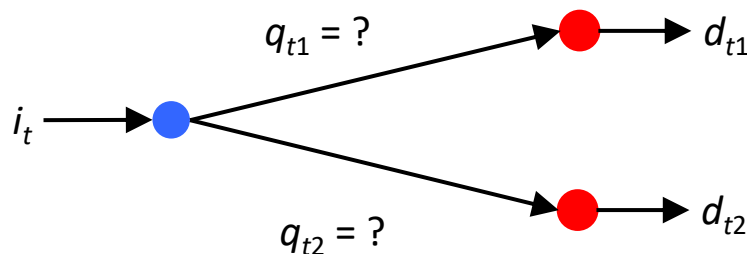


$$q_{t1} \leq \min(i_{t1}, u_1)$$

$$P(q_{t1} + q_{t2} < d_t) \geq \alpha$$

$$q_{t2} \leq \min(i_{t2}, u_2)$$

$$q_{t1} + q_{t2} \leq d_t$$



$$q_{t1} \leq \min(d_{t1}, u_1)$$

$$P(q_{t1} < d_{t1}) \geq \alpha_1$$

$$q_{t1} \leq \min(d_{t2}, u_2)$$

$$P(q_{t2} < d_{t2}) \geq \alpha_2$$

$$q_{t1} + q_{t2} \leq i_t$$

i_t : προσφορά νερού, d_t : ζήτηση νερού, q_t : απόληψη νερού (μεταβλητή απόφασης), u : χωρητικότητα αγωγού (φυσικός περιορισμός), α : επιτρεπόμενη πιθανότητα αστοχίας (λειτουργικός ή θεσμικός περιορισμός)

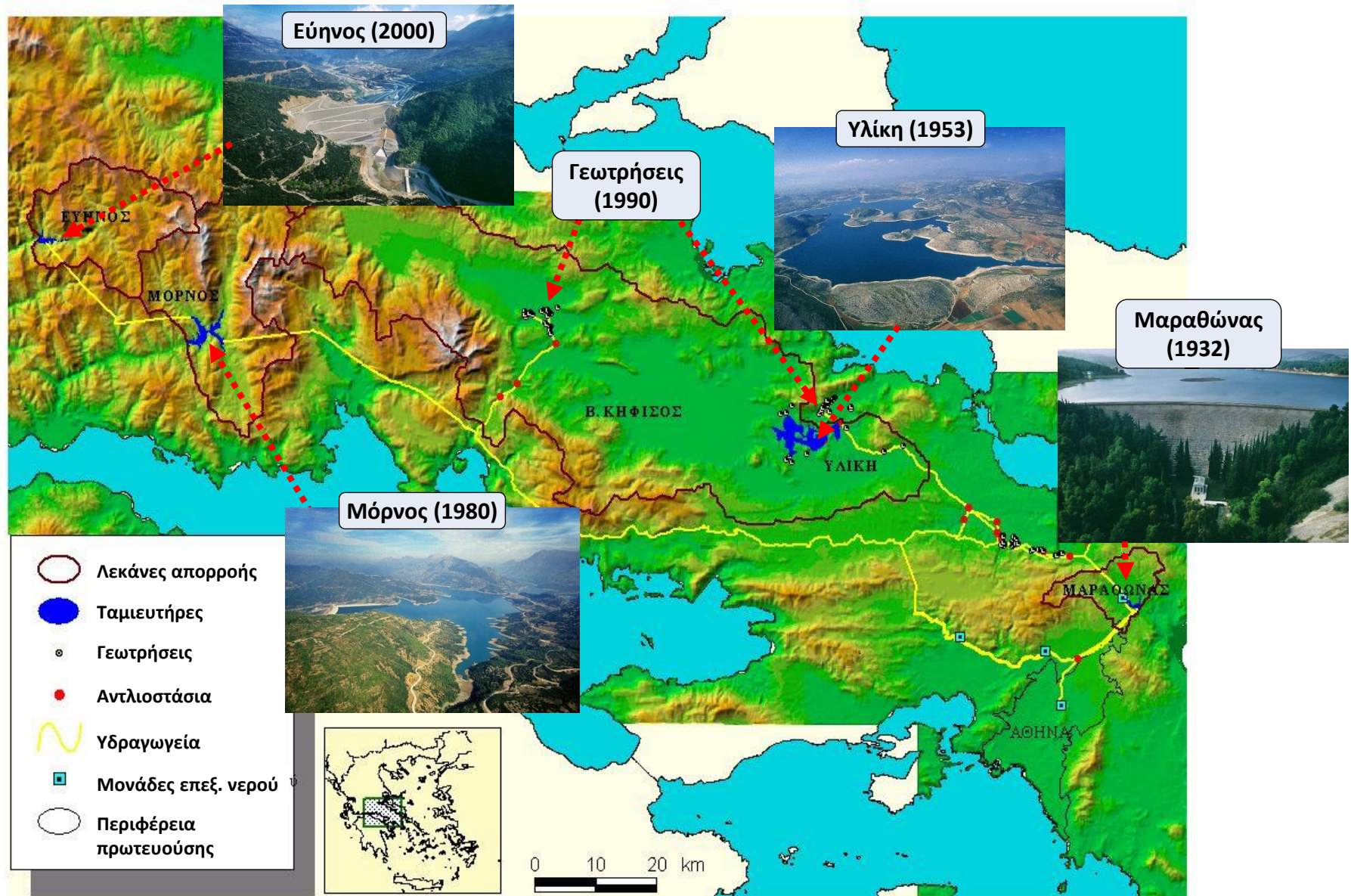
Συστημική προσέγγιση: βήματα

1. **Ορισμός συστήματος:** Προσδιορισμός γεωγραφικών ορίων και συνιστωσών φυσικού συστήματος, και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων.
2. **Σχηματοποίηση:** Μετασχηματισμός συνιστωσών πραγματικού συστήματος σε συνιστώσες ενός εννοιολογικού μοντέλου που αναπαριστά το εν λόγω σύστημα.
3. **Μοντελοποίηση:** Μαθηματική διατύπωση φυσικών και λειτουργικών περιορισμών σχηματοποιημένου μοντέλου.
4. **Συλλογή δεδομένων:** Στατικές (ιδιότητες, παράμετροι) και δυναμικές (χρονοσειρές) πληροφορίες εισόδου που απαιτούνται από το μαθηματικό μοντέλο.
5. **Παραμετροποίηση:** Ορισμός μεταβλητών ελέγχου (παραμέτρων) που περιγράφουν εναλλακτικές δομές και τρόπους λειτουργίας του συστήματος.
6. **Προσομοίωση:** Σύνολο υποθέσεων για την αναπαράσταση της δυναμικής λειτουργίας του συστήματος, μέσω εξισώσεων και λογικών εκφράσεων, κωδικοποιημένων σε γλώσσα υπολογιστή.
7. **Βελτιστοποίηση:** Συστηματική διαδικασία αναζήτησης της πλέον πρόσφορης λειτουργίας του συστήματος, βάσει κριτηρίων που εκφράζονται μέσω αριθμητικών δεικτών ως συνάρτηση των μεταβλητών ελέγχου (μέτρα επίδοσης).
8. **Υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων:** Κριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων μοντέλου, προκειμένου να αξιοποιηθούν επιχειρησιακά (π.χ., για σχεδιασμό έργων, εφαρμογή διαχειριστικών μέτρων, κτλ.).

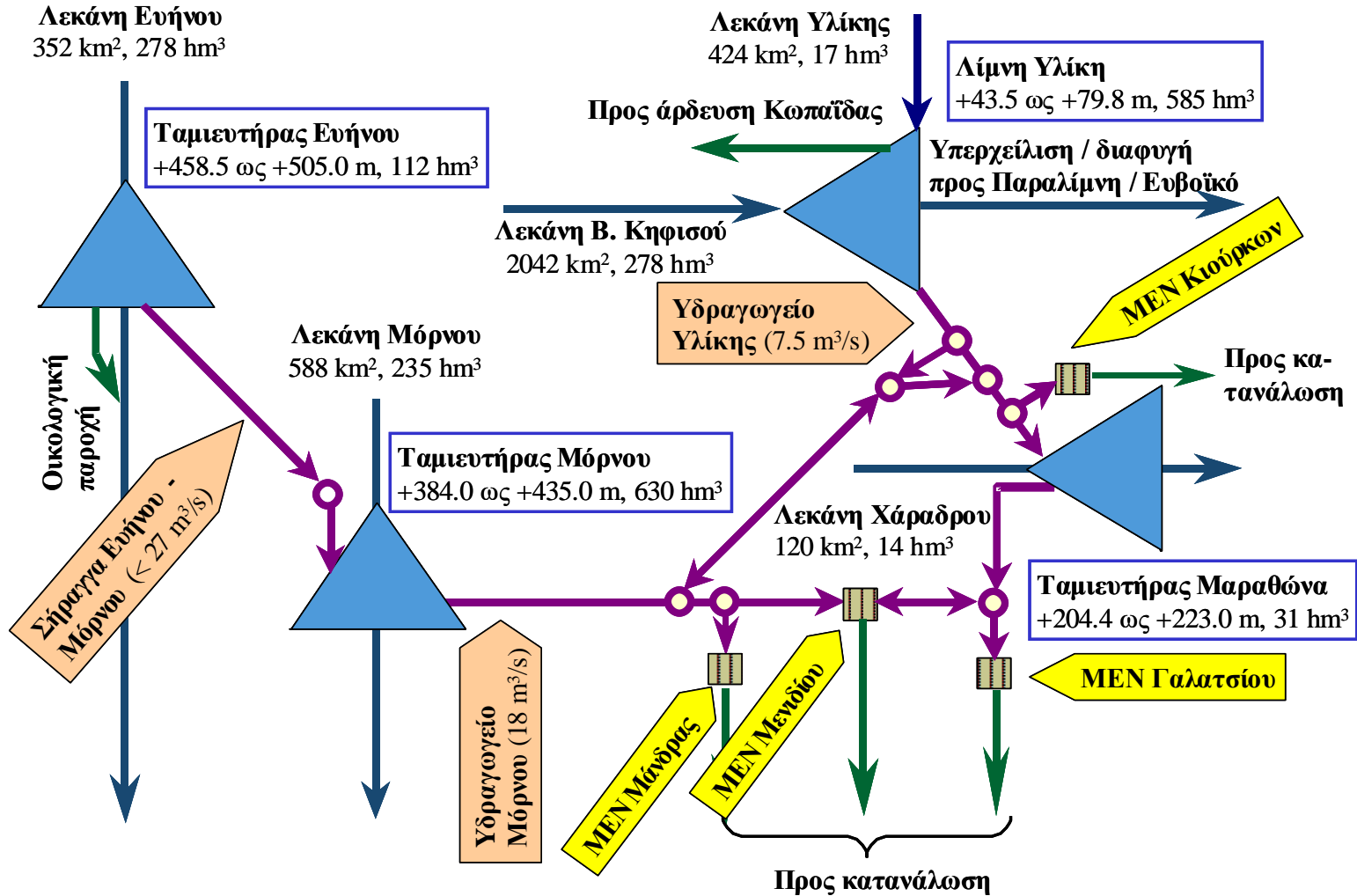
Αρχές σχηματοποίησης συστημάτων υδατικών πόρων

- **Αφαίρεση** (abstraction): Περιορισμός της πολυπλοκότητας του φυσικού συστήματος, ώστε να λαμβάνονται υπόψη μόνο οι συνιστώσες και διεργασίες που αφορούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα, προκειμένου να διευκολύνεται η μαθηματική του διατύπωση και να μην απαιτείται η συλλογή μη ουσιαστικών πληροφοριών.
 - **Παράδειγμα:** Στα υδρολογικά μοντέλα πλημμυρών κλίμακας επεισοδίου (event-based) αγνοούνται οι απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής.
- **Τυποποίηση** (classification): Ενοποίηση στοιχείων με παρόμοια χαρακτηριστικά σε συνιστώσες του μαθηματικού μοντέλου, με κοινές ιδιότητες, ώστε να περιορίζεται ο πολυμορφισμός και να τυποποιείται η ζητούμενη πληροφορία εισόδου.
 - **Παράδειγμα:** Στην μηνιαία κλίμακα των τυπικών 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 ως κοινές οντότητες, δηλαδή συνιστώσες μεταφοράς νερού με δεδομένη παροχетеυτικότητα.
- **Απλοποίηση** (simplification): Σύμπτυξη συνιστωσών, εφόσον οι επιμέρους διαφορές στα χαρακτηριστικά τους δεν επηρεάζουν την λειτουργία του μοντέλου. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται σημαντικός χώρος στη μνήμη και περιορίζεται ο υπολογιστικός φόρτος, προς όφελος της υπολογιστικής επίδοσης του μοντέλου.
 - **Παράδειγμα:** Σε μοντέλο υπόγειων νερών κλίμακας λεκάνης απορροής, γίνεται ομαδοποίηση των γεωτρήσεων κάθε υπολογιστικού στοιχείου (κύτταρο) σε μια εννοιολογική οντότητα που αναπαριστά τη συνολική άντληση από την αντίστοιχη έκταση.

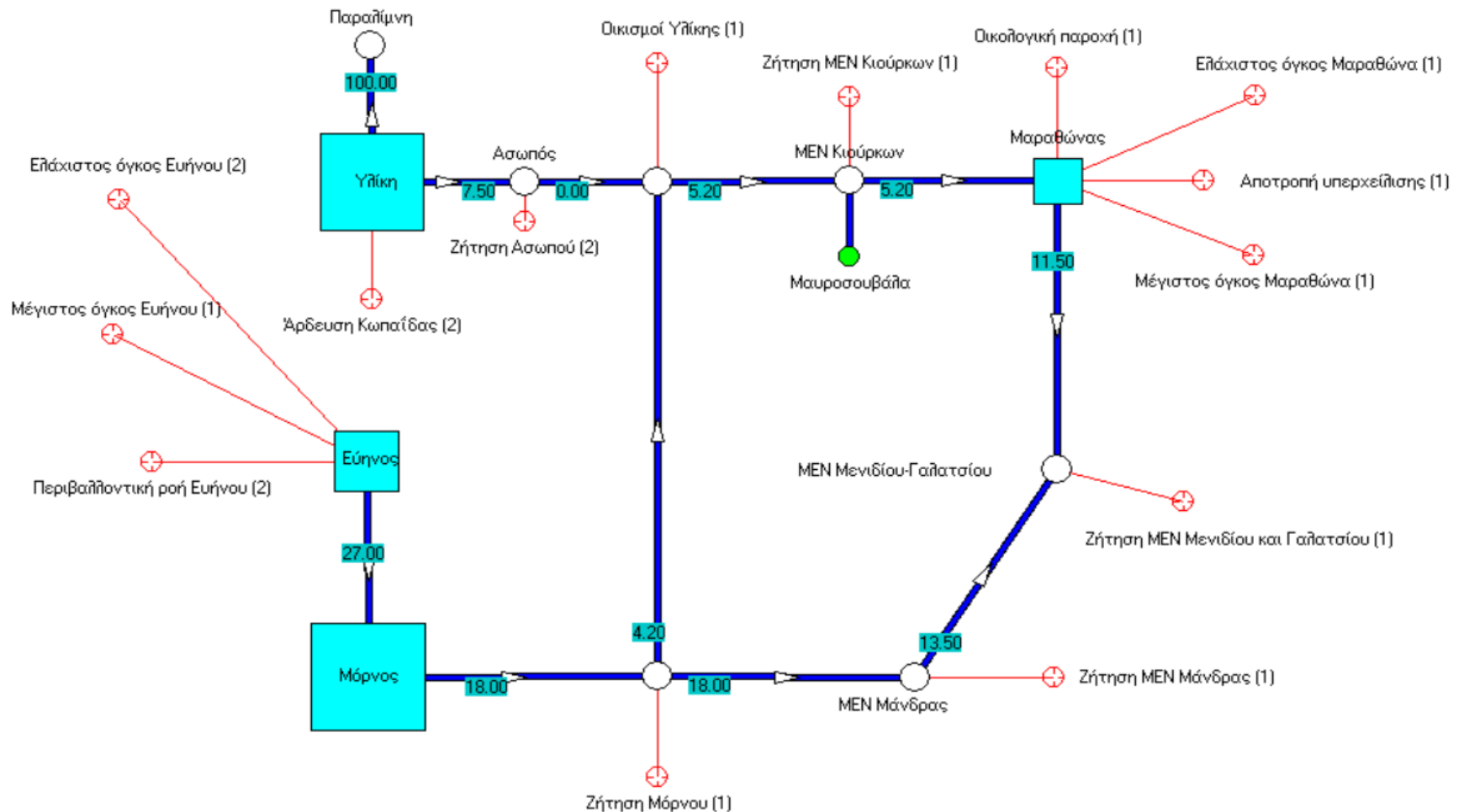
Υδροδοτικό σύστημα Αθήνας: Φυσική απεικόνιση



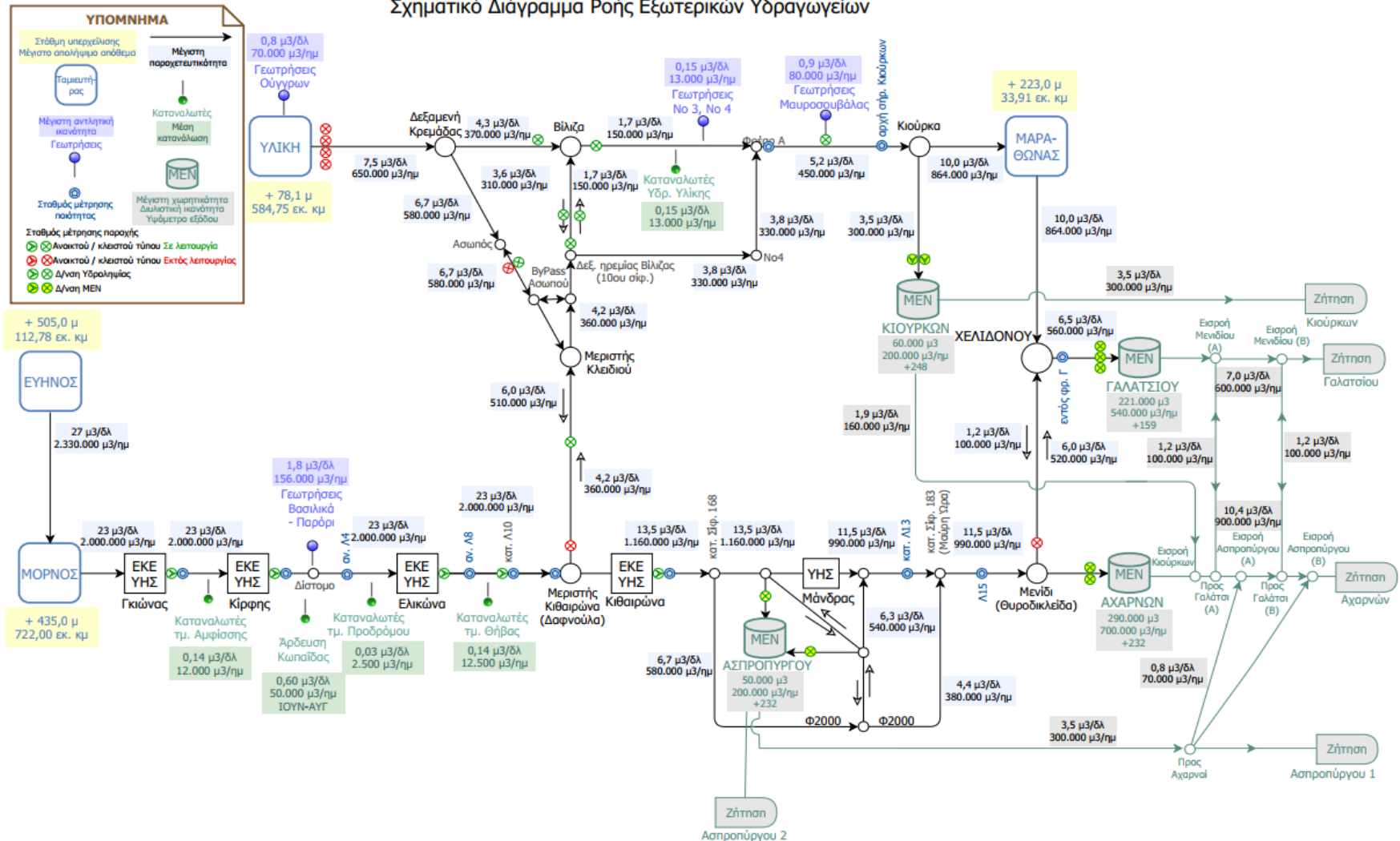
Υδροδοτικό σύστημα Αθήνας: Απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση & βασικά μεγέθη



Υδροδοτικό σύστημα Αθήνας: Υπολογιστική υλοποίηση με το λογισμικό Υδρονομέας (σηματοποίηση → μοντελοποίηση)

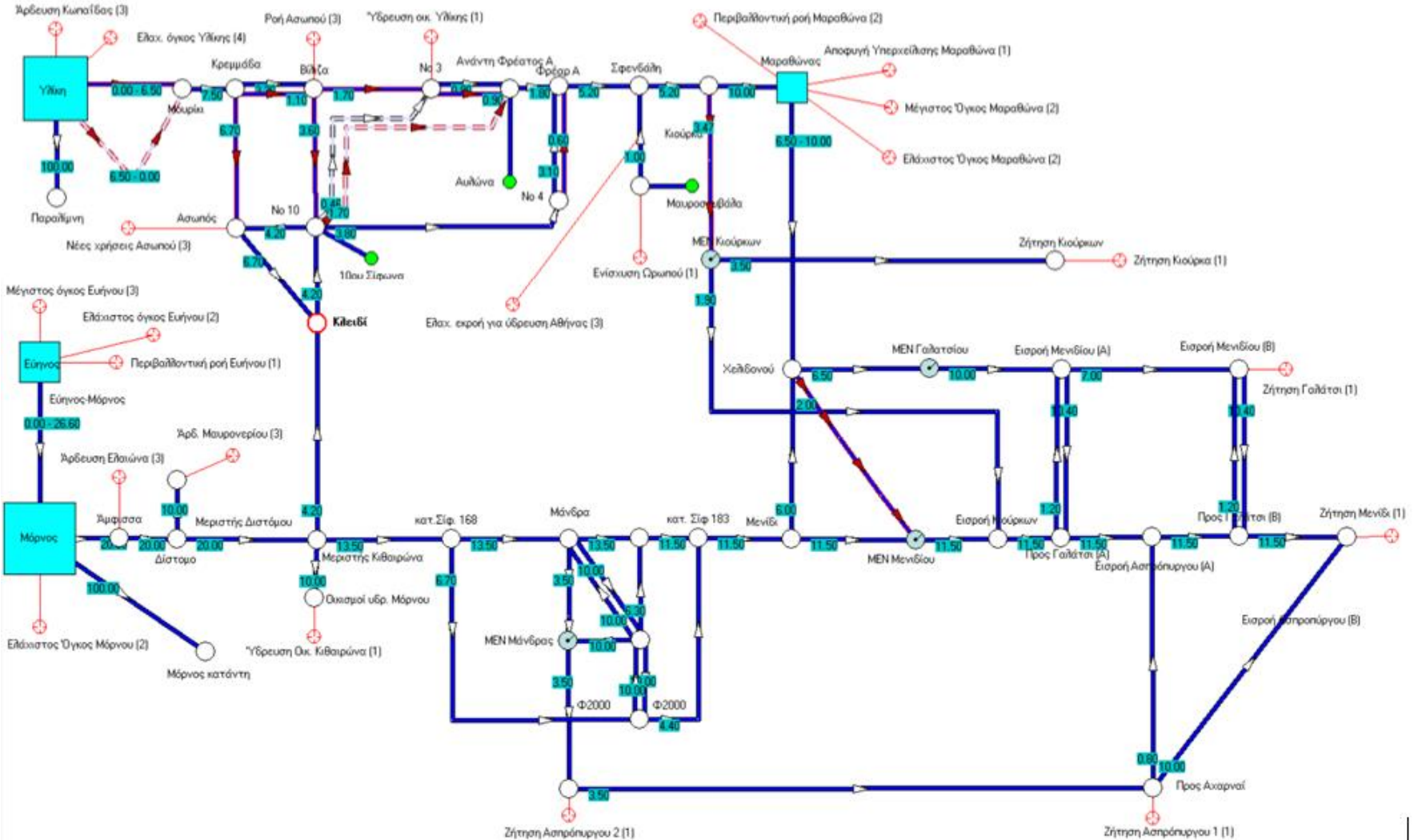


Υδροδοτικό σύστημα Αθήνας: Λεπτομερέστερη σχηματική αναπαράσταση



Υπ. Διαχείρισης και Συντονισμού Διεύθυνση Υδροληψίας Φεβρουάριος 2021 v2

Υδροδοτικό σύστημα Αθήνας: Λεπτομερέστερη μοντελοποίηση με το λογισμικό Υδρονομέας



Αβεβαιότητα & προσομοίωση

□ Αποδοχή της αβεβαιότητας

- Αδυναμία μακροπρόθεσμης ακριβούς (ντετερμινιστικής) πρόγνωσης των μεταβλητών εισόδου («φορτίσεις») του συστήματος
- Αδυναμία μακροπρόθεσμης πρόγνωσης της κατάστασης του συστήματος (μη προβλέψιμες αλλαγές στις ιδιότητες και μηχανισμούς του συστήματος)
- Χρήση προγνώσεων πιθανοτικού – στατιστικού τύπου

□ Αποδοχή της διακινδύνευσης (ρίσκο)

- Αδυναμία εξασφάλισης πλήρους ασφάλειας ή εγγυημένης επίδοσης του συστήματος (δεν μπορούμε να βάλουμε όρια στη φύση)
- Υιοθέτηση ανεκτού επιπέδου διακινδύνευσης, σε όρους πιθανότητας

□ Ποσοτικοποίηση αβεβαιότητας μέσω προσομοίωσης

- Σκοπός της προσομοίωσης: μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος με «δειγματοληπτική» τεχνική, όταν η εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων είναι ανέφικτη ή ιδιαίτερα δυσχερής (**προσομοίωση = υπολογιστικό πείραμα**).
- Εμπειρική εκτίμηση πιθανοτικών μεγεθών μέσω δειγματοληψίας.
- Ντετερμινιστική προσομοίωση: γνωστές μεταβλητές εισόδου (π.χ., από μετρήσεις)
- Στοχαστική προσομοίωση: μεταβλητές εισόδου που παράγονται συνθετικά, με τρόπο ώστε να διατηρούν μια δεδομένη στατιστική και στοχαστική δομή.

Παράδειγμα: Λειτουργία ταμιευτήρα



Παράδειγμα: Προσομοίωση ταμιευτήρα

□ Δεδομένα εισόδου

- Χρονοσειρά εισροών, I_t
- Χρονοσειρά ζήτησης, D_t
- Ωφέλιμη χωρητικότητα, K
- Αρχικό απόθεμα, S_0 (αρχική συνθήκη)

□ Μεταβλητές συστήματος

- Χρονοσειρά αποθέματος, S_t (μεταβλητή κατάστασης)
- Χρονοσειρά εκροών, R_t (μεταβλητή απόφασης)
- Χρονοσειρά απωλειών λόγω υπερχειλίσης, Y_t

□ Μοντέλο προσομοίωσης → διακριτοποιημένη εξίσωση υδατικού ισοζυγίου

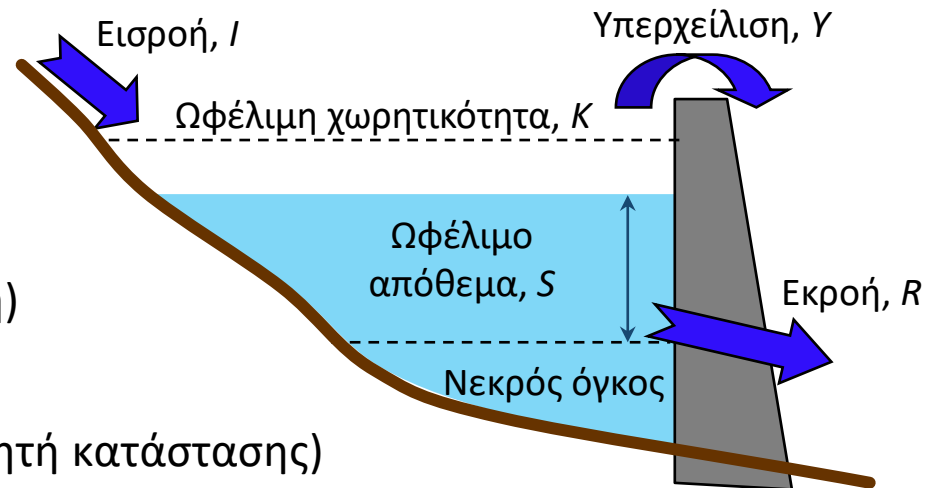
$$S_t = S_{t-1} + I_t - R_t - Y_t$$

$$R_t = \min(S_{t-1} + I_t, D_t)$$

$$Y_t = \max(0, S_{t-1} + I_t - R_t - K)$$

□ Απλοποιήσεις & παραδοχές

- Διακριτοποίηση διεργασιών που πραγματοποιούνται σε συνεχή χρόνο
- Υλοποιείται πρώτη η εισροή, μετά η εκροή και στο τέλος η υπερχειλίση
- Αγνοούνται άλλες συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου (εξάτμιση, βροχή, διαφυγές)



Μέτρα επίδοσης: αξιοπιστία κάλυψης της ζήτησης

- **Επίπεδο αξιοπιστίας στη βάση του χρονικού βήματος** (π.χ. μηνιαία) = πιθανότητα κάλυψης της ζήτησης σε χρονική βάση ίση με το υπολογιστικό βήμα:

$$\alpha = P(R_t = D_t)$$

- Εμπειρικά υπολογίζεται ως ο λόγος n'/n , όπου n' είναι ο αριθμός των χρονικών βημάτων στα οποία ικανοποιείται η ζήτηση και n ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων προσομοίωσης.

- **Επίπεδο αξιοπιστίας σε ετήσια βάση** = πιθανότητα κάλυψης της αθροιστικής ζήτησης, σε χρονική βάση τους έτους:

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

- Εμπειρικά υπολογίζεται ως ο λόγος N'/N , όπου N' είναι ο αριθμός των ετήσιων περιόδων στις οποίες ικανοποιείται η ζήτηση και N ο συνολικός αριθμός των περιόδων προσομοίωσης (όπου $n = k N$, π.χ. $k = 12$ αν το υπολογιστικό βήμα είναι μηνιαίο).

- **Ογκομετρική έκφραση αξιοπιστίας:**

$$\alpha_v = E[R_t] / E[D_t]$$

όπου $E[X]$ η αναμενόμενη (μέση) τιμή της μεταβλητής X . Η μέση ζήτηση $E[D_t]$ είναι γνωστή (αν η ζήτηση είναι σταθερή, ισούται με την σταθερή αυτή τιμή), ενώ η μέση εκροή υπολογίζεται εμπειρικά, ως ο μέσος όρος των προσομοιωμένων απολήψεων κατά την περίοδο της προσομοίωσης.

Η σχέση χωρητικότητας-ζήτησης-αξιοπιστίας

- Για δεδομένα υδρολογικά χαρακτηριστικά των εισροών, η **αξιοπιστία** συναρτάται άμεσα με την **ωφέλιμη χωρητικότητα** του ταμιευτήρα, K , και την **ζήτηση** D (θεωρείται σταθερή σε ετήσια βάση).
- Κατηγορίες προβλημάτων:
 - Διαστασιολόγηση: Δεδομένα D , α_T – Ζητούμενο K
 - Λειτουργία: Δεδομένα K , α_T – Ζητούμενο D
 - Λειτουργία: Δεδομένα K , D – Ζητούμενο α_T
- Η σχέση μεταξύ των τριών μεγεθών, δηλαδή της αξιοπιστίας (ή, ισοδύναμα, της πιθανότητας αστοχίας), της ωφέλιμης χωρητικότητας και της ζήτησης, αποτελεί **χαρακτηριστικό μέγεθος** του ταμιευτήρα.
- Λόγω της μαθηματικής πολυπλοκότητας του προβλήματος, η σχέση αυτή δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί με αναλυτικές μεθόδους (εκτός από εξαιρετικά απλές περιπτώσεις), οπότε προκύπτει **αριθμητικά**, μέσω προσομοίωσης.
- Η **ακρίβεια της προσομοίωσης** εξαρτάται από το **μέγεθος του δείγματος** (ήτοι το πλήθος των προσομοιωμένων ετών, N).
- Όσο υψηλότερο το ζητούμενο επίπεδο αξιοπιστίας, τόσο μεγαλύτερο δείγμα είναι αναγκαίο για την επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας → **στοχαστική προσομοίωση**

