



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Διαχείριση Υδατικών Πόρων

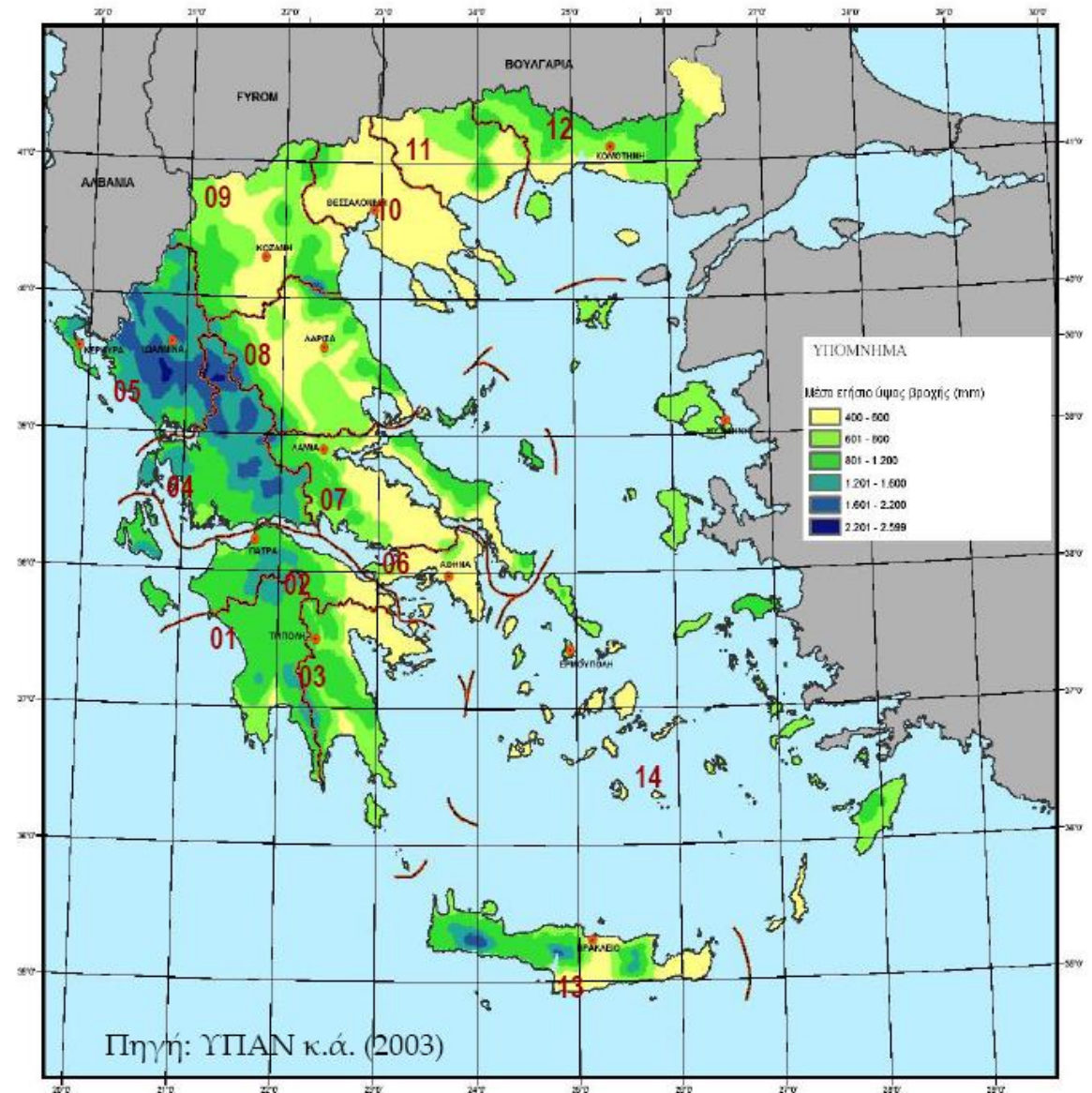
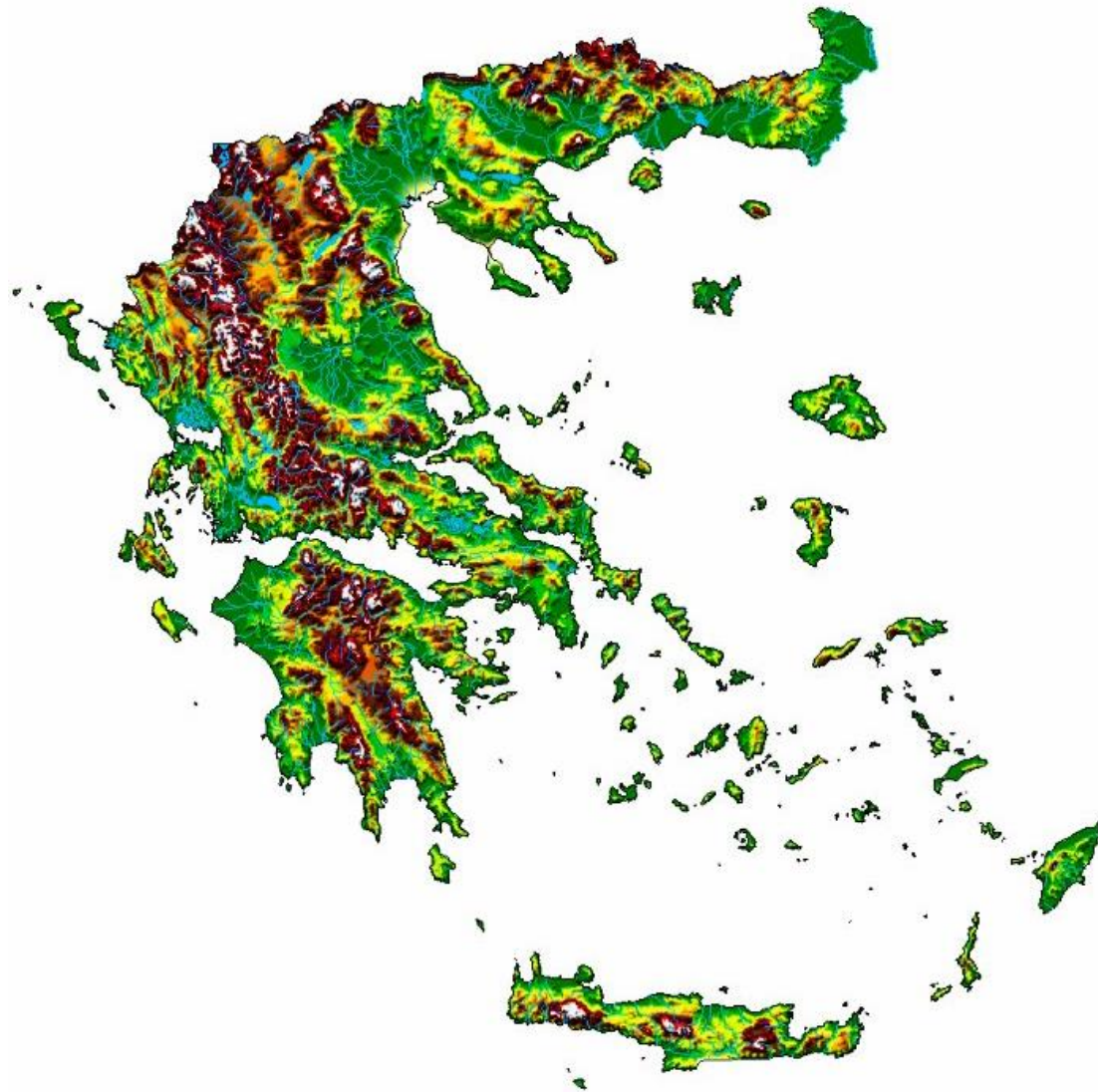
Χρήστος Μακρόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Διαχείριση Υδατικών Πόρων: δομή μαθήματος

- Το μάθημα αποτελείται από τα εξής μέρη:
 - [Έργα]: Σχεδιασμός Ταμιευτήρων (Ωφέλιμος Όγκος και έργα ασφαλείας)
 - [Ειδικά θέματα Υδρολογίας]: Κατανομές, Ακραίες Τιμές, Χρονοσειρές
 - [Συστήματα]: Διαχείριση πολλών ταμιευτήρων ως σύνολο - θεωρία συστημάτων, θεωρία παιγνίων, διακινδύνευση/αξιοπιστία, αβεβαιότητα
 - [Βελτιστοποίηση]: μαθηματική βελτιστοποίηση, κλασικοί/γενετικοί αλγόριθμοι.

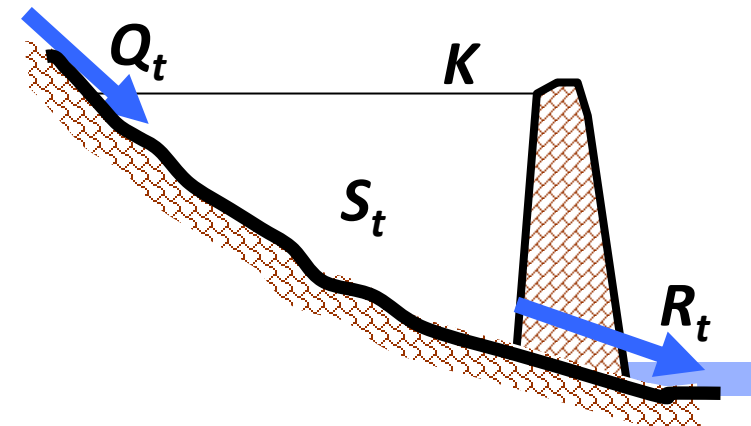
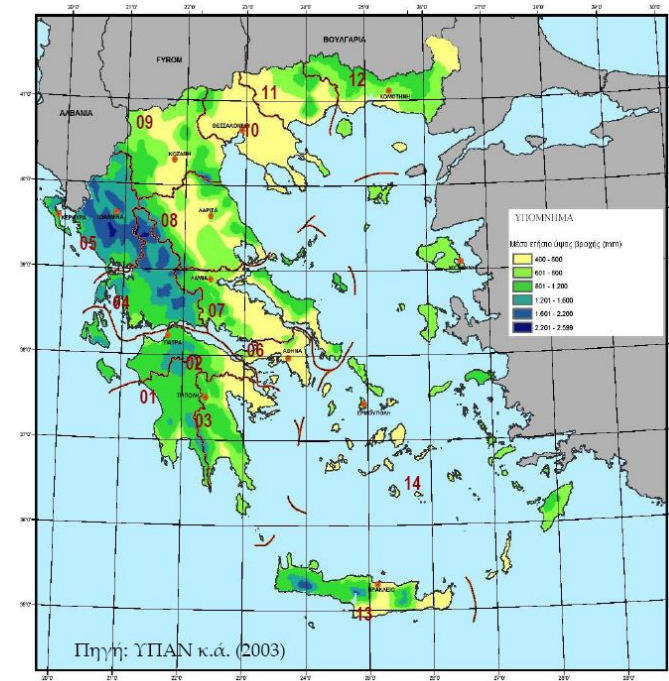
Θέμα Εξαμήνου: (i) σχεδιασμός ταμιευτήρα και (ii) διαχείριση συστήματος ταμιευτήρων (βασισμένο στο Φράγμα Πλαστήρα)

Έργα/Υποδομές για τη διαχείριση



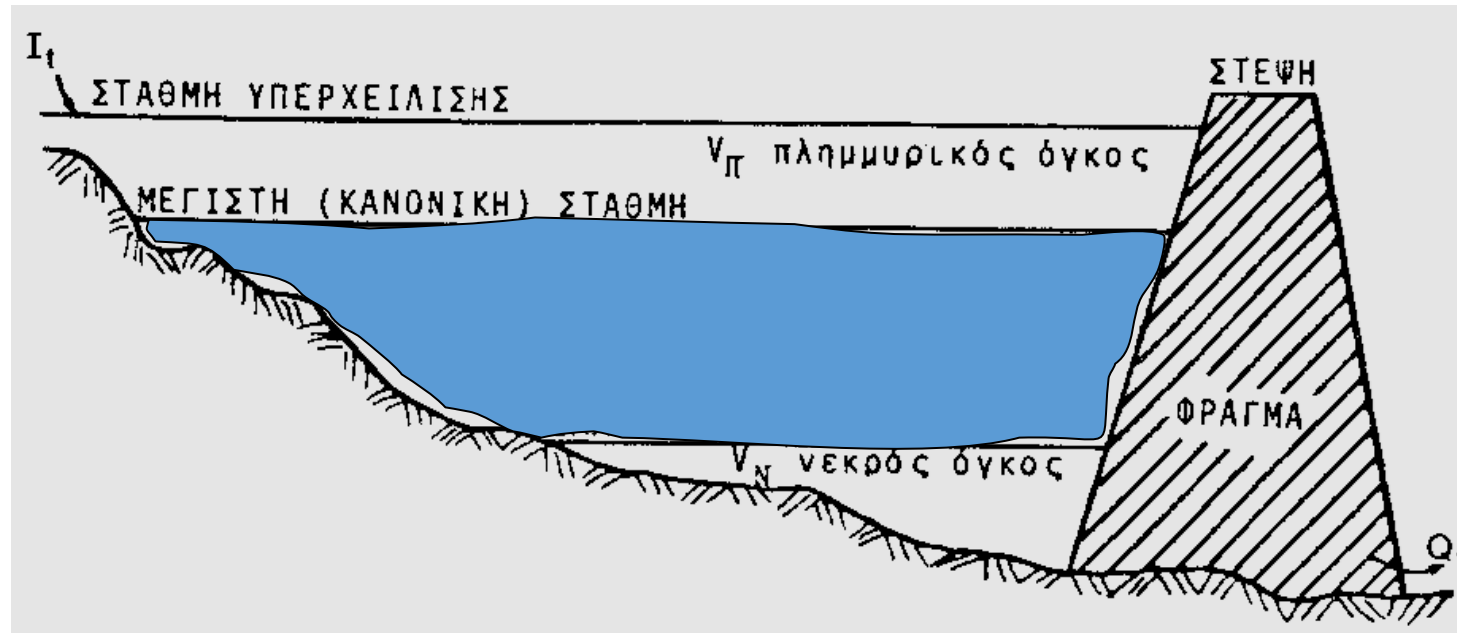
Έργα/Υποδομές για τη διαχείριση

- «Δυστυχώς» το νερό είναι σε λάθος μέρος, λάθος χρόνο, λάθος ποσότητα!
- Επεμβαίνουμε στον Υδρολογικό Κύκλο
 - **Αλλάζοντας την κατανομή** νερού στο **χώρο** και τον **χρόνο**
 - Ταμιευτήρες, Υδραγωγεία



Σημαντικοί όγκοι: Ωφέλιμος όγκος, (V_{Ω})

- Όγκος μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης (κανονικής) στάθμης λειτουργίας.
- Απ' αυτόν γίνεται η **υδροληψία** και η **ρύθμιση της ροής** του ποταμού. Η μέγιστη (κανονική) στάθμη λειτουργίας του έργου καθορίζει επίσης το **υδροηλεκτρικό δυναμικό** του έργου, αφού η κανονική παραγωγή ενέργειας γίνεται για στάθμες μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης.



Τι μας ενδιαφέρει από τους Ταμιευτήρες;

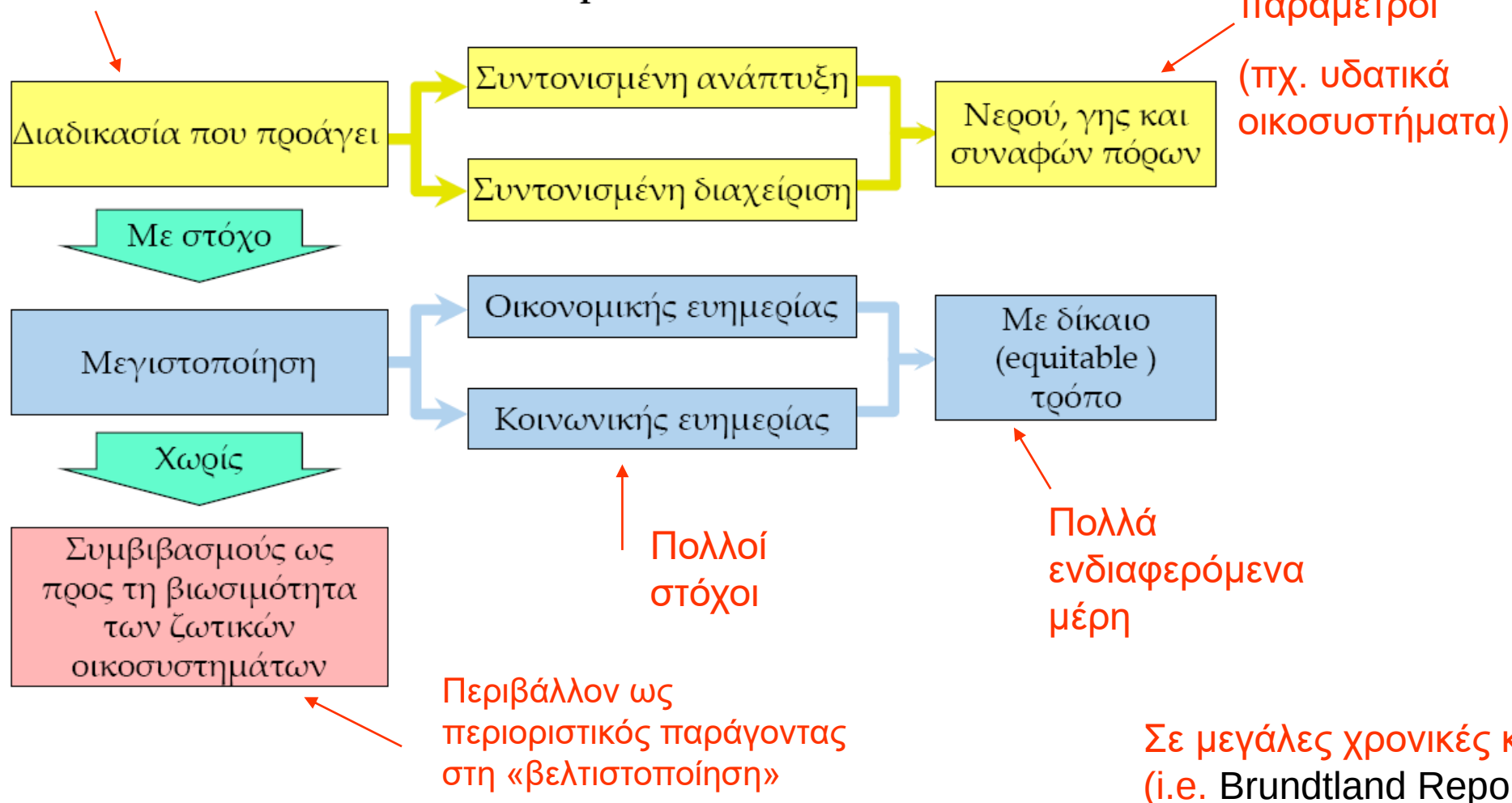
- **Σχεδιασμός** (πόσο νερό έχουμε να δώσουμε)
 - Διαστασιολόγηση
 - Πλημμύρα σχεδιασμού υπερχειλιστή και εκτροπής
 - Νεκρός όγκος/Φερτά
- **Λειτουργία** στο πλαίσιο ενός συστήματος (σε ποιόν και από πού το δίνουμε)
 - Ανταγωνιστικές χρήσεις
 - Πολλαπλοί ταμιευτήρες

... ο συνδυασμός των οποίων είναι το κεντρικό αντικείμενο της **διαχείρισης υδατικών πόρων**

Τί είναι όμως η Διαχείριση Υδατικών Πόρων

Διαδικασία: όχι τόσο
προδιαγεγραμμένο
αποτέλεσμα

Global Water Partnership (2000) & Loucks et al. (2005)



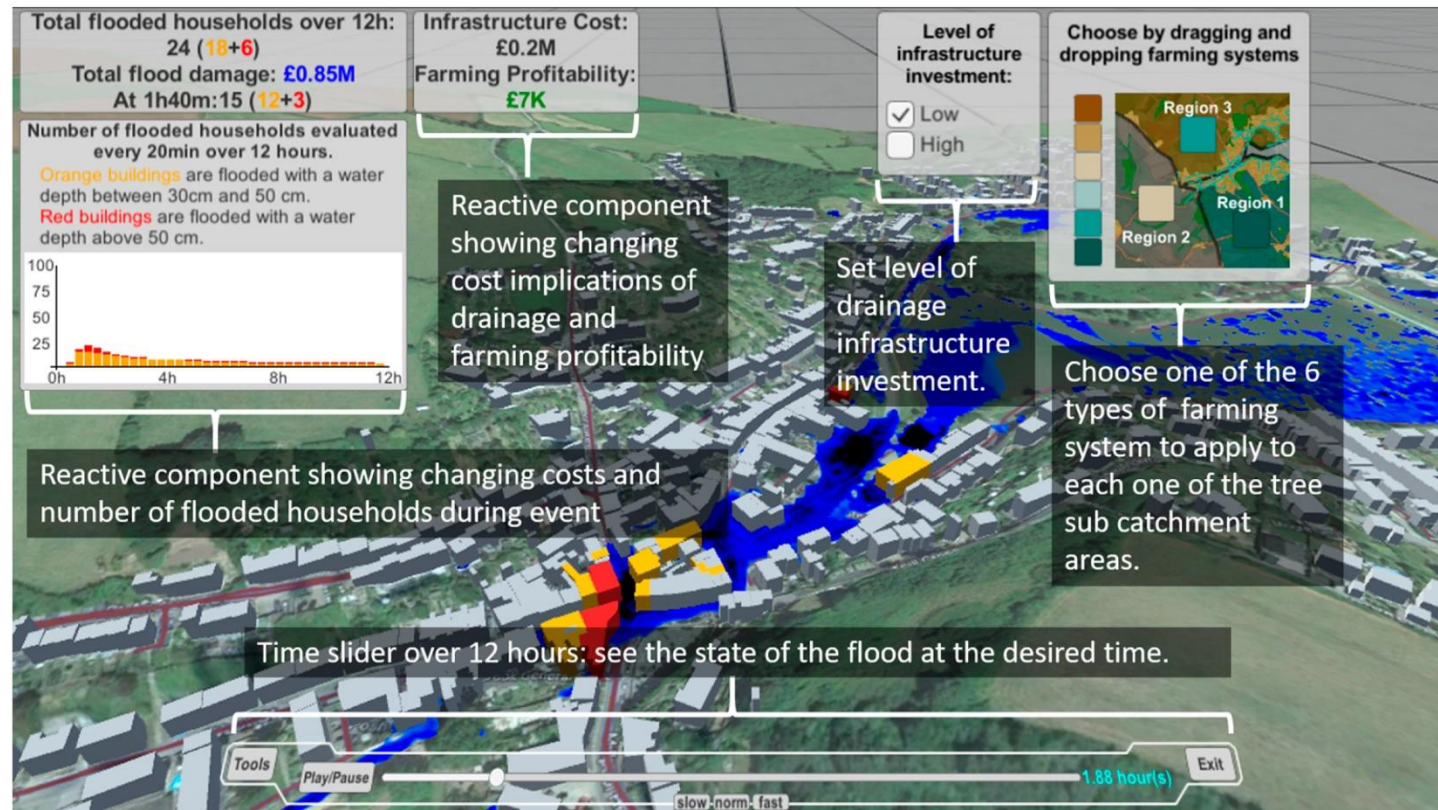
Brundtland Report (1987)



"**Sustainable** development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs."

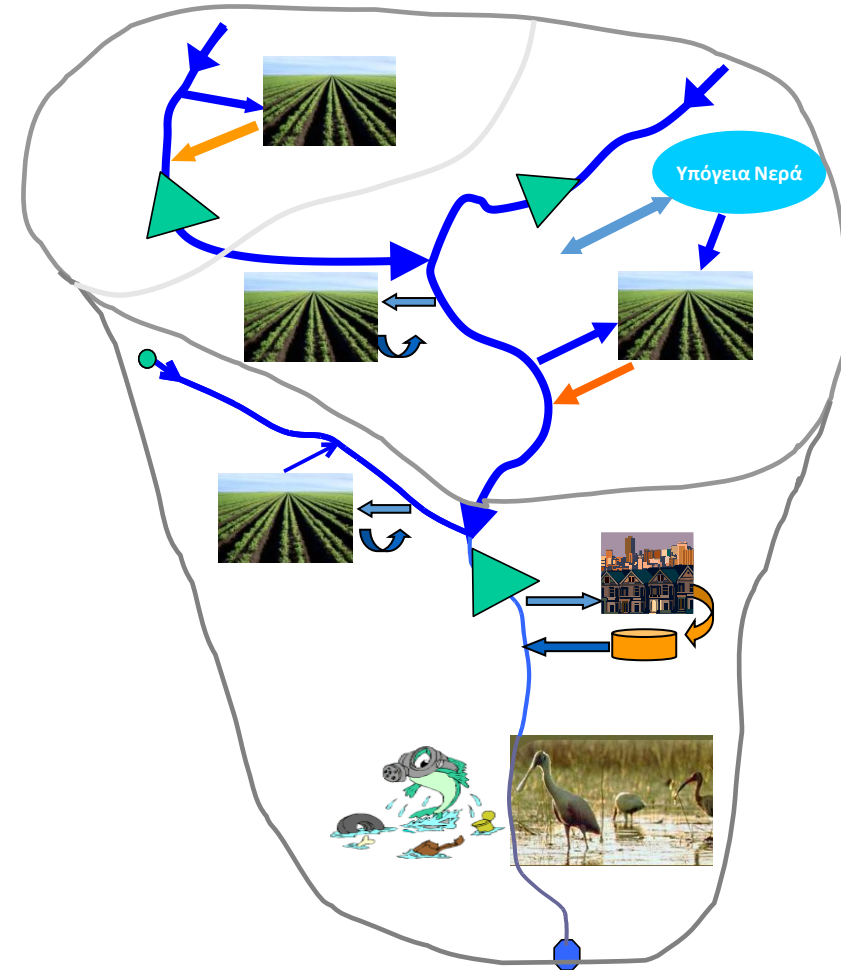
Τι σημαίνουν όμως αυτά για ένα μηχανικό;

- Μακροπρόθεσμος σχεδιασμός:
 - (στοχαστικές) χρονοσειρές
 - Σενάρια
- Πολλά κριτήρια:
 - Πολυκριτηριακή ανάλυση (βάρη)
 - Πολυκριτηριακοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης (pareto)
- Πολλά ενδιαφερόμενα μέρη:
 - Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων
 - Μοντέλα ως εργαλεία σκέψης
 - Serious games (!) VR/AR (!!)



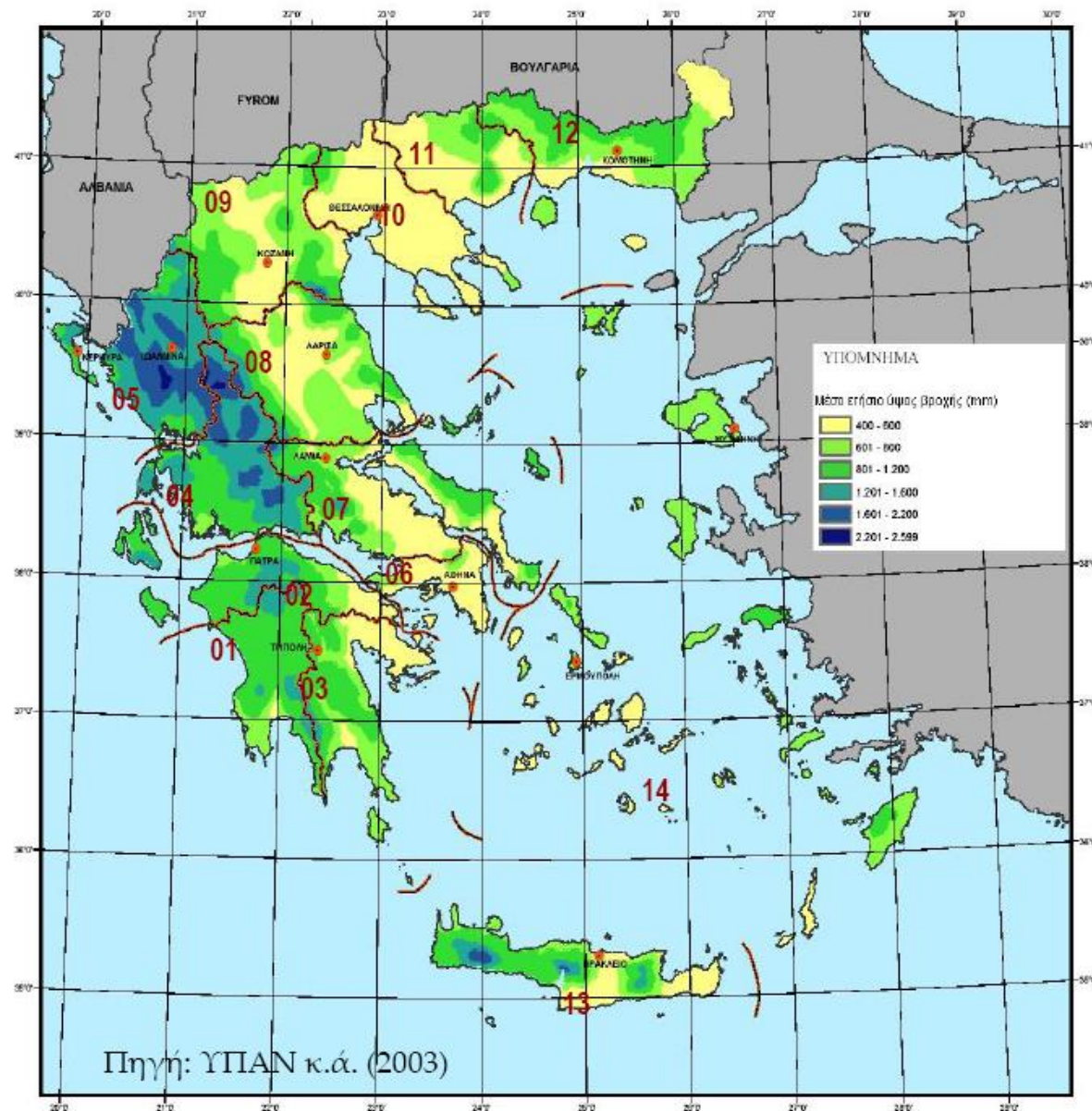
Ειδικοί στόχοι διαχείρισης υδατικών πόρων

- **Προμήθεια** νερού επαρκούς ποσότητας και κατάλληλης ποιότητας για την ικανοποίηση «**αναγκών**»
- **Προστασία** των υδατικών πόρων από τη ρύπανση
- **Διατήρηση** των οικοσυστημάτων και του φυσικού περιβάλλοντος
- **Προστασία** από ακραία φαινόμενα (πλημμύρες & ξηρασίες)
- Μεγιστοποίηση της **κοινής ωφέλειας** από τους υδατικούς πόρους
- **Μέριμνα** για τη διατήρηση των αναγκαίων αποθεμάτων στο μέλλον και αποφυγή μη αναστρέψιμων επεμβάσεων
- Διατήρηση υψηλού επιπέδου **αξιοπιστίας** (περιορισμός της αβεβαιότητας)



Διαχείριση σε επίπεδο **λεκάνης απορροής**

Διαχείριση Υδατικών Πόρων στην Ελλάδα



Υδατικά Διαμερίσματα

- 01: Δυτική Πελοπόννησος
- 02: Βόρεια Πελοπόννησος
- 03: Ανατολική Πελοπόννησος
- 04: Δυτική Στερεά Ελλάδα
- 05: Ήπειρος
- 06: Αττική
- 07: Ανατολική Στερεά Ελλάδα
- 08: Θεσσαλία
- 09: Δυτική Μακεδονία
- 10: Κεντρική Μακεδονία
- 11: Ανατολική Μακεδονία
- 12: Θράκη
- 13: Κρήτη
- 14: Νησιά Αιγαίου

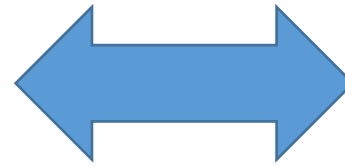
Προβλήματα; Πολλά!

- Ανομοιόμορφη χωρική και χρονική κατανομή των υδατικών **πόρων**
- Ανομοιόμορφη χωρική και χρονική κατανομή της **ζήτησης**
- Έντονη γεωμορφολογία
- Εξάρτηση Β. Ελλάδας από ποταμούς που πηγάζουν από άλλες χώρες
- Μεγάλη ακτογραμμή
- Σημαντικός αριθμός νησιών χωρίς επαρκείς υδατικούς πόρους

Ζήτηση (hm³)

ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ	ΑΡΔΕΥΣΗ	ΥΔΡΕΥΣΗ	ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΑ	ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	ΣΥΝΟΛΟ
ΥΔ ΔΥΤΙΚΗΣ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ (EL01)	171.10	27.50	1.50	18.80	218.90
ΥΔ ΒΟΡΕΙΑΣ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ (EL02)	406.40	61.80	3.20	8.70	480.10
ΥΔ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ (EL03)	339.50	27.70	1.60	7.70	376.50
ΥΔ ΔΥΤΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ (EL04)	493.00	39.00	8.00	2.00	542.00
ΥΔ ΗΠΕΙΡΟΥ (EL05)	376.00	58.00	10.00	4.50	448.50
ΥΔ ΑΤΤΙΚΗΣ (EL06)	66.68	416.17	2.06	18.45	503.36
ΥΔ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ (EL07)	796.08	49.61	7.46	29.18	882.33
ΥΔ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ (EL08)	1306.00	94.00	13.00	9.00	1422.00
ΥΔ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ (EL09)	636.01	166.25	8.25	68.46	878.97
ΥΔ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ (EL10)	953.08	177.85	7.23	40.42	1178.58
ΥΔ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ (EL11)	772.00	58.90	2.50	4.10	837.50
ΥΔ ΘΡΑΚΗΣ (EL12)	941.40	60.50	3.90	14.10	1019.90
ΥΔ ΚΡΗΤΗΣ (EL13)	415.00	78.10	4.60	0.75	498.45
ΥΔ ΝΗΣΩΝ ΑΙΓΑΙΟΥ (EL14)	111.36	90.66	2.39	0.05	204.46
ΣΥΝΟΛΟ	7783.61	1406.04	75.69	226.21	9491.55

...μικρές λεκάνες απορροής



Υδατικά Διαμερίσματα

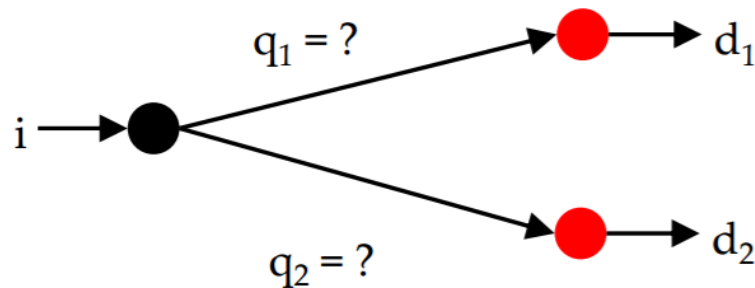
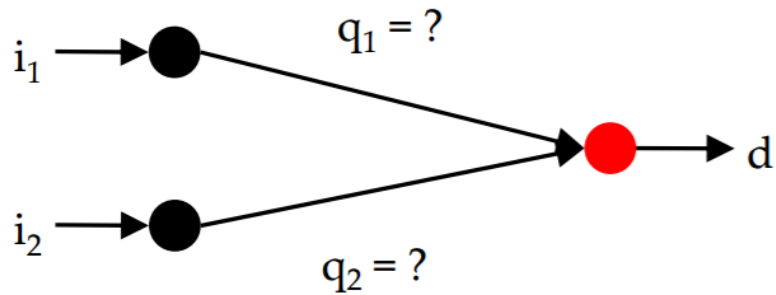
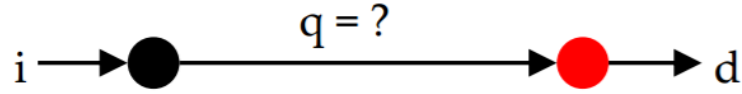
- ❑ 01: Δυτική Πελοπόννησος
- ❑ 02: Βόρεια Πελοπόννησος
- ❑ 03: Ανατολική Πελοπόννησος
- ❑ 04: Δυτική Στερεά Ελλάδα
- ❑ 05: Ήπειρος
- ❑ 06: Αττική
- ❑ 07: Ανατολική Στερεά Ελλάδα
- ❑ 08: Θεσσαλία
- ❑ 09: Δυτική Μακεδονία
- ❑ 10: Κεντρική Μακεδονία
- ❑ 11: Ανατολική Μακεδονία
- ❑ 12: Θράκη
- ❑ 13: Κρήτη
- ❑ 14: Νησιά Αιγαίου

Διαχειριστικό Πλαίσιο

- Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60)
 - Νόμος 3199/2003 για την Προστασία και Διαχείριση των Υδάτων
 - (Πρώην) Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΥΠΕΚΑ)
- Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά 60/2000/ΕΚ
- Νόμος 3199/2003-Εναρμόνιση Οδηγίας 2000/60/ΕΚ
- Προεδρικό Διάταγμα 51/2007 «Καθορισμός μέτρων και διαδικασιών για την ολοκληρωμένη προστασία και διαχείριση των υδάτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ»
- ΚΥΑ - Έγκριση Γενικών Κανόνων Κοστολόγησης και Τιμολόγησης Υπηρεσιών Ύδατος

<http://www.ypeka.gr/Portals/0/Files/Ydatikoi%20Poroi/Odhgia%20Plaisio/Odigia%20Plaisio.pdf>

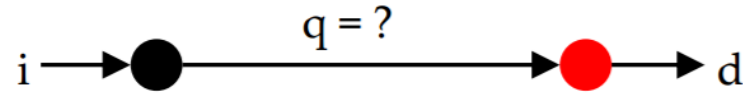
Βασικά Διαχειριστικά Προβλήματα



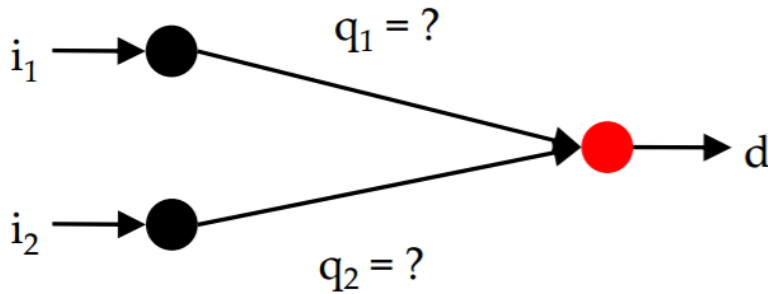
Υπόμνημα: i = προσφορά νερού (εισροή), d = ζήτηση, q = μεταφερόμενη παροχή, u = παροχευτικότητα υδραγωγείου

Ποια τα βασικά μας εργαλεία για κάθε στοιχείο των βασικών προβλημάτων;

Κατ' αρχάς
πόσο είναι
το i ;



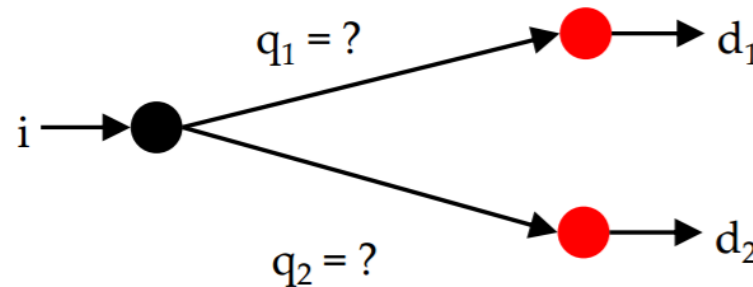
$$q = \min(i, d, u)$$



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

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

$$q_1 + q_2 \leq d$$



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

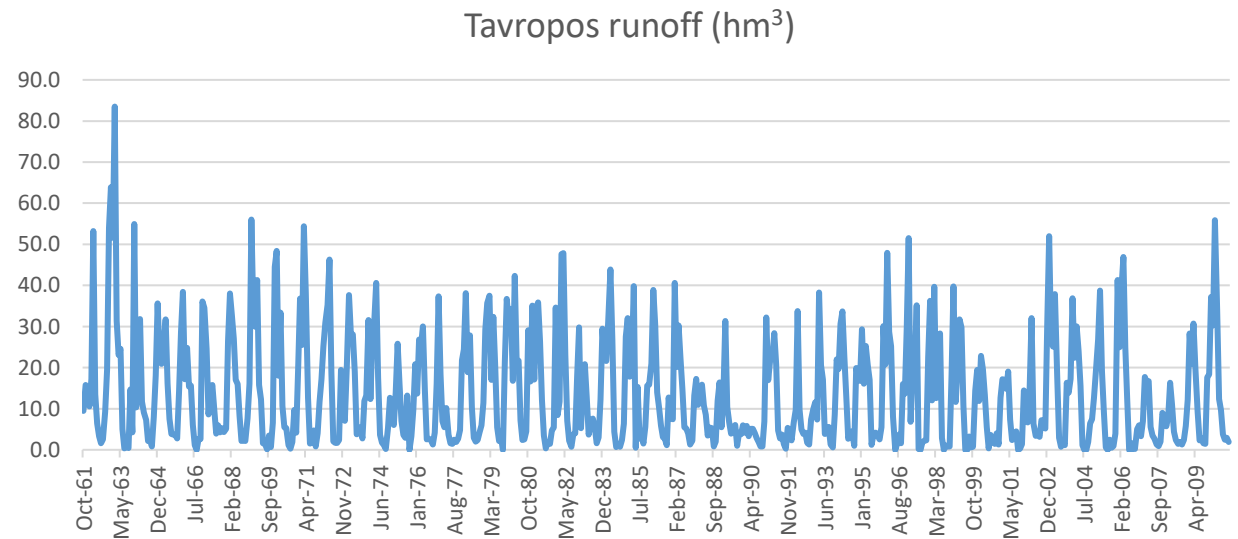
$$q_1 \leq \min(d_2, u_2)$$

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

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

Υπολογίζοντας το i - Χρονοσειρές

- Θα είναι η χρονοσειρά εισροών που χρησιμοποιήθηκε στο σχεδιασμό ακριβώς η ίδια και στο μέλλον κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του έργου; (!)
- Προφανώς – όχι!! (αν και συνήθως χρησιμοποιούμε κάποια ιδιαίτερα δυσμενή χρονιά για τον υπολογισμό)
- Άρα ο ταμιευτήρας μάλλον **δε** θα μπορεί να ικανοποιεί την απαιτούμενη ζήτηση (και πιθανώς να αδειάσει).
- Η «εξασφαλισμένη» παροχή δεν είναι ιδιαίτερα εξασφαλισμένη...
- **Στοχαστικές χρονοσειρές**



Χρονοσειρά: ένα σύνολο παρατηρήσεων $x(t)$ της $X(t)$, για μεταβαλλόμενο χρόνο t .

Συνθετικές χρονοσειρές

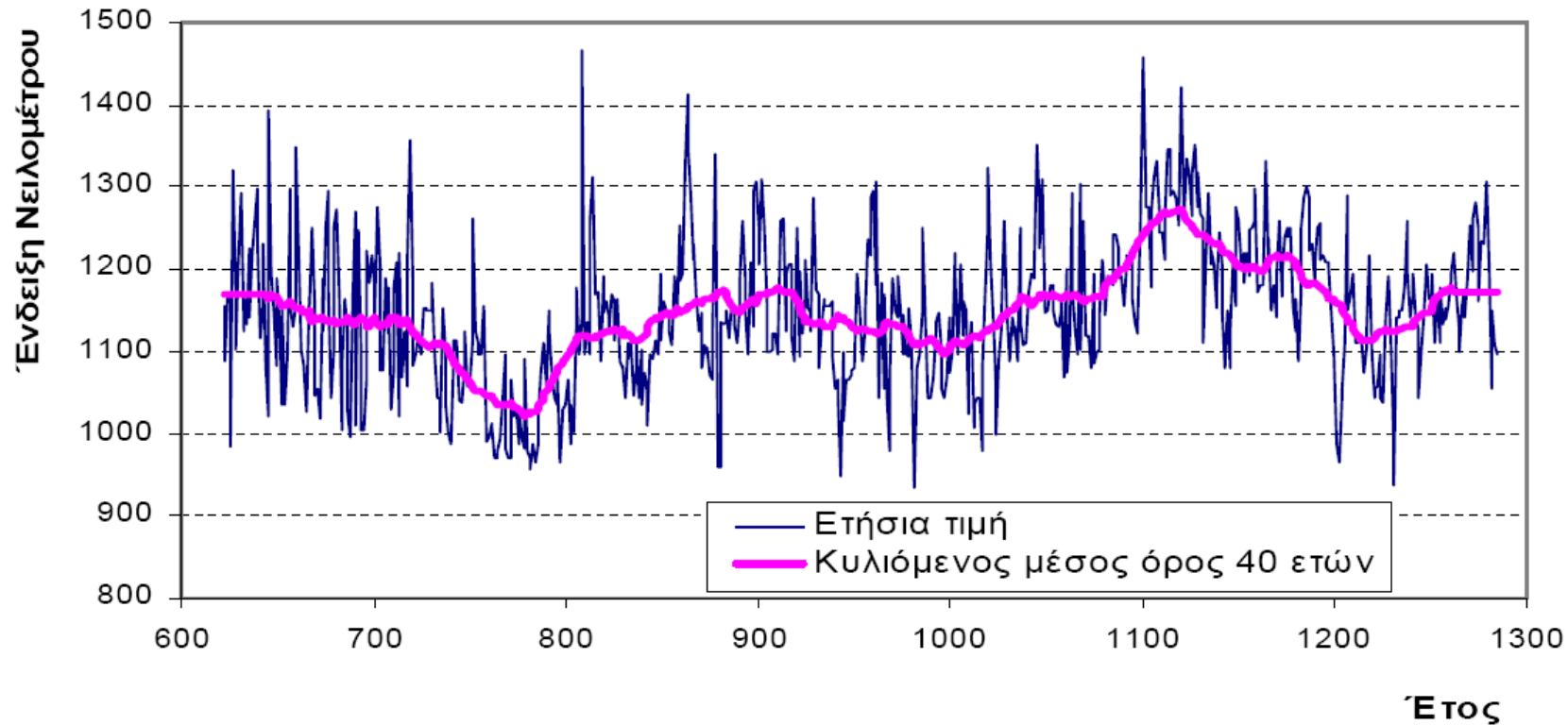
- Λόγω έλλειψης παρατηρήσεων μας ενδιαφέρει να **παράγουμε** συνθετικές χρονοσειρές:
 - Οι οποίες πρέπει όμως να **διατηρούν τα χαρακτηριστικά** των ιστορικών χρονοσειρών.
 - Να είναι **πιθανό** να παρατηρηθούν
 - Να αναπαράγουν τα **ενδιαφέροντα** χαρακτηριστικά (για το υπο σχεδίαση σύστημα: πχ χαμηλές εισροές για ταμειευτήρες, βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης για αντιπλημμυρικά έργα κτλ)
- Για να δημιουργήσουμε χρονοσειρές πρέπει να μπορούμε να παράγουμε **στοχαστικές μεταβλητές μέσω στοχαστικών ομοιωμάτων.**

Ένα βασικό χαρακτηριστικό: Εμμονή

- Η εμμονή, είναι μια μακράς διάρκειας στατιστική ιδιότητα της σειράς των παροχών (και των βροχών) σύμφωνα με την οποία **περίοδοι υψηλών παροχών τείνουν να ακολουθήσουν άλλες περιόδους υψηλών πάλι παροχών**, ενώ το ίδιο φαινόμενο συσπείρωσης παρατηρείται και στις περιόδους χαμηλών παροχών.
- Με άλλα λόγια: Τα υγρά χρόνια τείνουν να συμβούν **κατά ομάδες** και ομοίως τα ξηρά
- Ο Hurst (1965), ανέλυσε 1050 χρόνια στοιχείων από το Νείλο και βρήκε ότι η μεταβλητότητα (variability) των παροχών, είναι **μεγαλύτερη** όταν αυτές βρίσκονται σε φυσική χρονική ακολουθία, παρά όταν οι ίδιες παροχές συνέβαιναν σε **τυχαία ακολουθία**

Ελάχιστη στάθμη του ποταμού Νείλου

Γιατί μάζευαν τα στοιχεία αυτά;



Από Δ. Κουτσογιάννη, Εκτίμηση και διαχείριση αβεβαιότητας

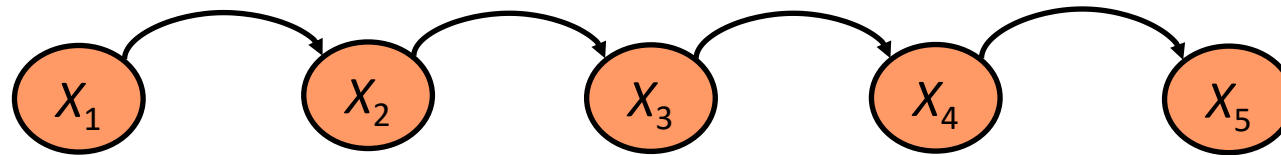
Επιρροή της εμμονής

- Διαστασιολόγηση με χρήση συνθετικών σειρών που έχουν υπολογιστεί από ομοιώματα που δε διατηρούν την εμμονή, θα οδηγήσει **σε τι όγκους αποθήκευσης;**
- **Θα οδηγήσει σε μικρότερους όγκους** απ' ότι αν χρησιμοποιηθούν ομοιώματα διατήρησης εμμονής, για μια δεδομένη τιμή διακινδύνευσης $\varepsilon\%$.
- Άρα η χρήση (πιο σύνθετων) ομοιωμάτων με διατήρηση της εμμονής οδηγεί σε **πιο συντηρητικούς και αξιόπιστους σχεδιασμούς** σε ταμειυτήρες, ψηλού βαθμού εκμετάλλευσης.

Ένα (απλό) είδος χρονοσειρών: Markov

Χρονοσειρές στις οποίες η τιμή (κατάσταση του συστήματος) για το χρόνο $t+1$ εξαρτάται **μόνο** από την τιμή (κατάσταση του συστήματος) στο χρόνο t

$$F_X[X(t+k) \mid X(t), X(t-1), X(t-2), \dots] \\ = F_X[X(t+k) \mid X(t)] \quad (\text{πχ. τάξεως } k=1)$$



Παραδείγματα:

όγκος ταμιευτήρα, υπόγειου υδροφορέα κτλ

Αλυσίδες Markov

- Αλυσίδες Markov (Markov chains): ανελίξεις Markov που παίρνουν μόνο **διακριτές τιμές**.
- Περιγράφονται πλήρως με τον ορισμό **Πιθανοτήτων Μετάβασης** (που δεν αλλάζουν με τον χρόνο)

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{ij} = \Pr[Q_{y+1} = q_j \mid Q_y = q_i] \\ \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \quad \text{for all } i \end{array} \right.$$

Ανελίζεις Markov: Παράδειγμα

Αν βρέχει σήμερα (t)



40% να βρέχει αύριο (t+1)

60% να μη βρέχει αύριο (t+1)

Αν δεν βρέχει σήμερα (t)



20% να βρέχει αύριο (t+1)

80% να μη βρέχει αύριο (t+1)

Στη περίπτωση αυτή οι
πιθανότητες μετάβασης είναι:
(βλ. γραμμές (i) αθροίζουν 1)

$$P = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.6 \\ 0.2 & 0.8 \end{pmatrix}$$

Παράδειγμα:

- Ποια η πιθανότητα να παρακολουθήσουμε την ακολουθία: $[\beta, \beta, -\beta, \beta]$
- Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις πιθανότητες μετάβασης για να **κατασκευάσουμε** μια ακολουθία 10 ημερών;

Εκτίμηση διαδρομών πιθανοτήτων

- Αν βρέχει σήμερα η πιθανότητα να βρέχει αύριο είναι 90%
- Αν δε βρέχει σήμερα η πιθανότητα να μη βρέχει αύριο είναι 80%

$$P = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$$

Ερώτηση:

Αν **δε βρέχει** σήμερα, ποια
η πιθανότητα να **βρέχει** σε
δύο μέρες;

Επίλυση

$$\Pr[-B \rightarrow ? \rightarrow B] =$$

$$\Pr[-B \rightarrow B \rightarrow B] + \Pr[-B \rightarrow -B \rightarrow B] =$$

$$0.2 * 0.9 + 0.8 * 0.2 = 0.34$$

$$P^2 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.83 & 0.17 \\ 0.34 & 0.66 \end{bmatrix}$$

Και σε τρεις μέρες;

$$P^3 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.83 & 0.17 \\ 0.34 & 0.66 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.781 & 0.219 \\ 0.438 & 0.562 \end{bmatrix}$$

- Πχ. Αν **δε βρέχει** σήμερα, ποια η πιθανότητα να **μη βρέχει** σε **τρεις μέρες**;

Πολλαπλασιασμός πινάκων: υπενθύμιση

1η γραμμή X 1η στήλη = Στοιχείο 1ης γραμμής, 1ης στήλης

$$\mathbf{BA} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -3 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2(-3) + 0 \cdot 2 & - \\ - & - \\ - & - \end{pmatrix}$$

1η γραμμή X 2η στήλη = Στοιχείο 1ης γραμμής, 2ης στήλης

$$\mathbf{BA} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -3 & 0 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -6 & 2 \cdot 0 + 0 \cdot 1 \\ - & - \\ - & - \end{pmatrix}$$

Δημιουργία χρονοσειρών: Στοχαστικά ομοιώματα

Για **στάσιμες** σειρές:

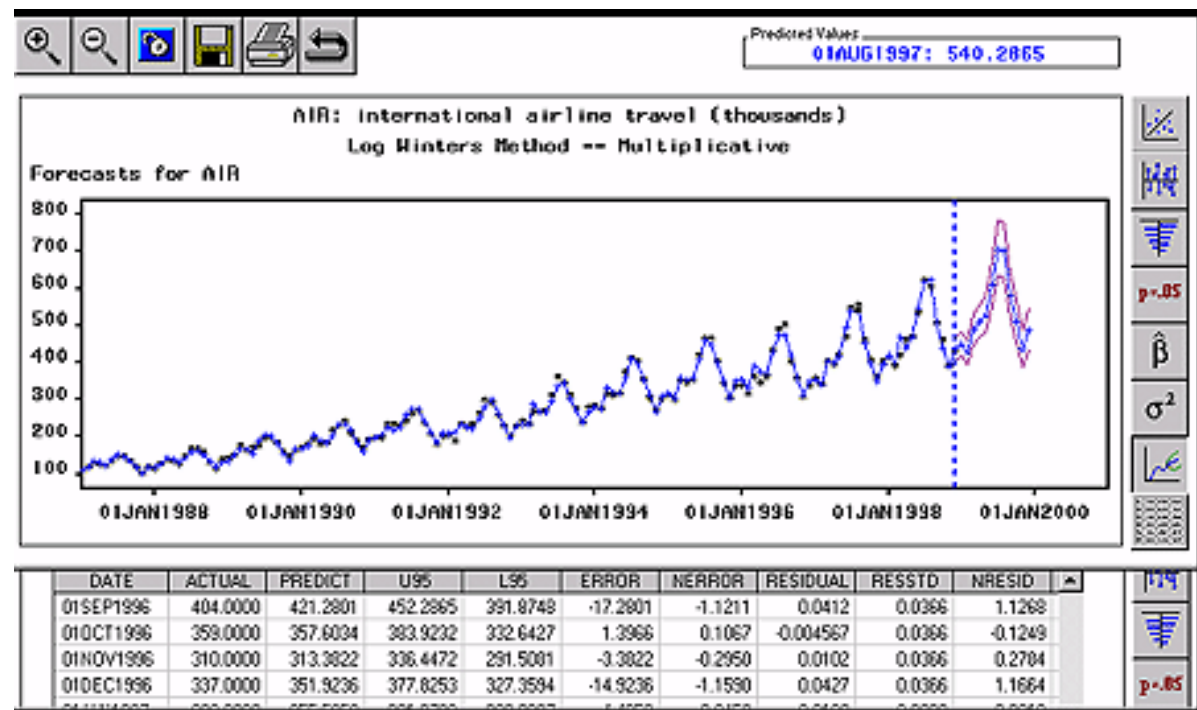
- Ομοίωμα αυτοσυσχέτισης $AR(p)$
- Ομοίωμα κυλιομένων μέσων όρων $MA(q)$
- Σύνθετο $ARMA(p,q)$ ομοίωμα (Box-Jenkins)

Για τις **μη στάσιμες** σειρές:

- Ομοιώματα $ARIMA(p,d,q)$, που περιέχουν και μηχανισμό διαφορίσης (μονιμοποίησης της σειράς).
- *FFGN (fast fractional gaussian noises)*, που διατηρούν και την εμμονή της σειράς.

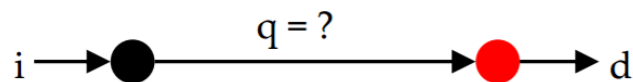
Πρόβλεψη;

- Δε θα πρέπει να γίνεται η παρανόηση ότι οι συνθετικές χρονοσειρές (πχ των 100 χρόνων) αποτελούν υδρολογική **πρόγνωση**, ότι δηλαδή προβλέπει ο μελετητής το μέλλον!!
- Οι προσομοιωμένες συνθετικές σειρές δε αντιπροσωπεύουν τίποτε άλλο παρά **στατιστικά ισοδύναμες** σειρές με την παρατηρημένη.



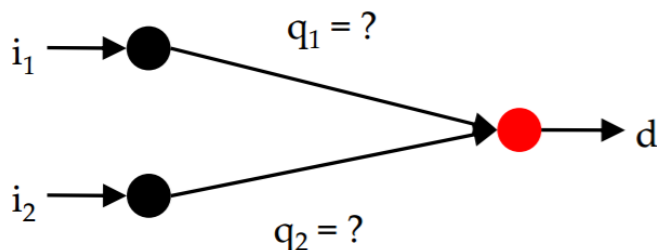
Πίσω στα Διαχειριστικά Προβλήματα...

για να βρούμε τα q , πρέπει:



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

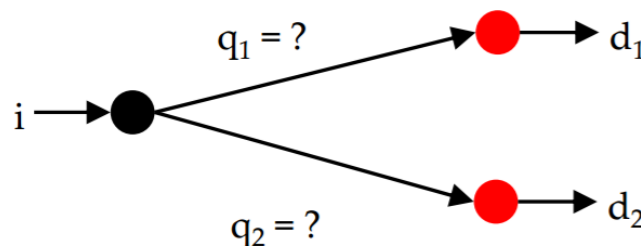
(ας πούμε ότι)
αντιμετωπίσαμε
το i



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

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

$$q_1 + q_2 \leq d$$



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

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

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

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

1. να είμαστε σίγουροι ότι ισχύουν οι περιορισμοί σε κάθε χρονικό βήμα και
2. να βρούμε το 'καλύτερο' q που τους ικανοποιεί

Τα βασικά εργαλεία της Διαχείρισης:

Μαθηματικά μοντέλα και Βελτιστοποίηση

- Χρειαζόμαστε μια συστηματική διαδικασία αναζήτησης της «βέλτιστης» διαχειριστικής πολιτικής ενός υδροσυστήματος, που βασίζεται σε μια διαδοχή από εναλλακτικές αποφάσεις (decisions) και αξιολογήσεις (evaluations) των επιπτώσεων κάθε απόφασης.
- Για να το κάνουμε αυτό χρειαζόμαστε:
 - **Μαθηματικό μοντέλο υδροσυστήματος:** Σύνολο υποθέσεων σχετικά με την λειτουργία του συστήματος, εκφρασμένων με τη μορφή μαθηματικών ή λογικών σχέσεων και κωδικοποιημένων σε γλώσσα προγραμματισμού.
 - Ένα εργαλείο **αναζήτησης 'βέλτιστων'** αποφάσεων: Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

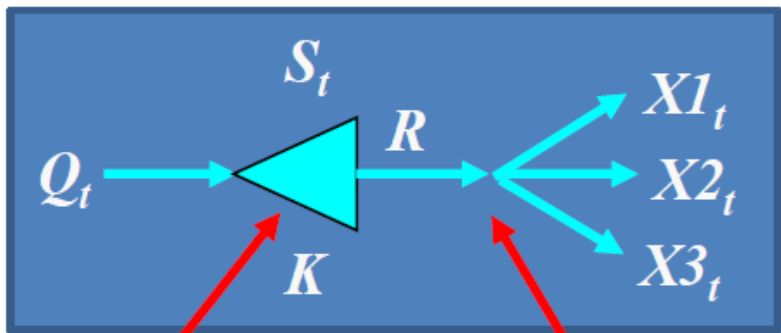
Μοντέλα (ή Μαθηματικά Ομοιώματα)

- Περιγράφουν τη δομή (στατικά στοιχεία) και την κατάσταση (δυναμικά στοιχεία) του συστήματος:
- Η περιγραφή γίνεται μέσω των **εξισώσεων της κατάστασης** (state equations) του συστήματος, οι οποίες συσχετίζουν μεταξύ τους τις **παραμέτρους** (parameters) του μοντέλου με τις **εισόδους** για να παράγουν **εξόδους**.
- Σκοπός μας (αρχικά) είναι να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους ώστε το μοντέλο να ακολουθεί όσο πιο κοντά γίνεται τη πραγματικότητα (**βαθμονόμηση**)
- Το μοντέλο λειτουργεί εντός περιοριστικών διατάξεων (σε μορφή ανισο-εξισώσεων), οικονομικές, πολιτικές, φυσικές, ηθικές κ.λ.π. (constraints). Άλλες απ' αυτές ποσοτικοποιούνται και άλλες όχι.

Έχετε ήδη ασχοληθεί με ένα μοντέλο...

Βήματα:

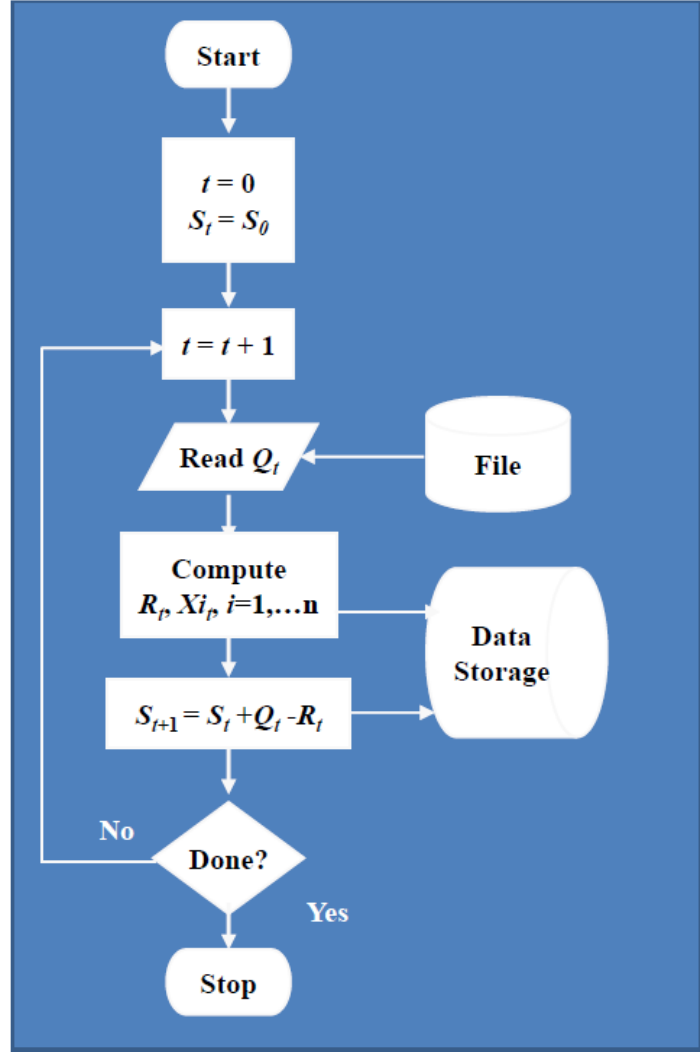
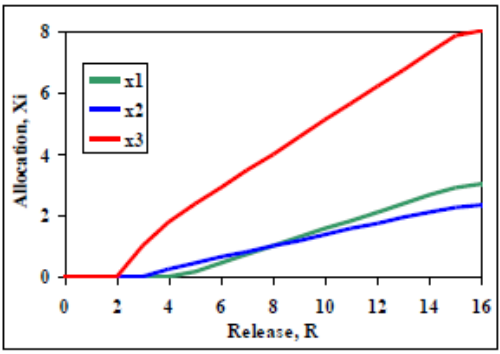
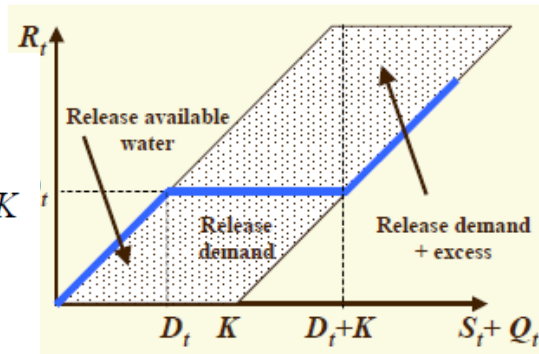
- Υπολογισμός Ισοζυγίου
- Προσδιορισμός εκροής
- Υπολογισμός κατανομής της εκροής αυτής στους χρήστες



Operating Policy

Allocation Policy

$$R_t = \begin{cases} S_t + Q_t & \text{if } S_t + Q_t < D_t \\ D_t & \text{if } D_t < S_t + Q_t < D_t + K \\ S_t + Q_t - K & \text{if } S_t + Q_t > D_t + K \end{cases}$$



Η Αρχή της Ελλιπούς Γνώσης

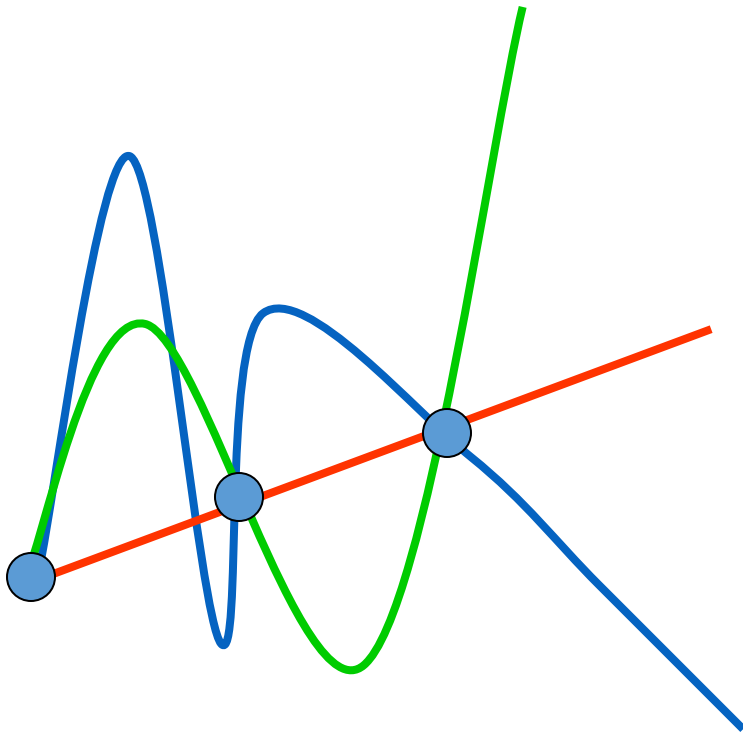
- Ένα μοντέλο είναι εξ ορισμού ελλιπές
- Η αρχή αυτή μπορεί να συναχθεί από πολλές άλλες (βασικές!) αρχές:
 - Πχ. από την αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg, από την οποία συνεπάγεται ότι η πληροφορία που μπορεί να λάβει ένα σύστημα ελέγχου, είναι απαραίτητως ημιτελής.

Βασική αρχή: Ockham's Razor

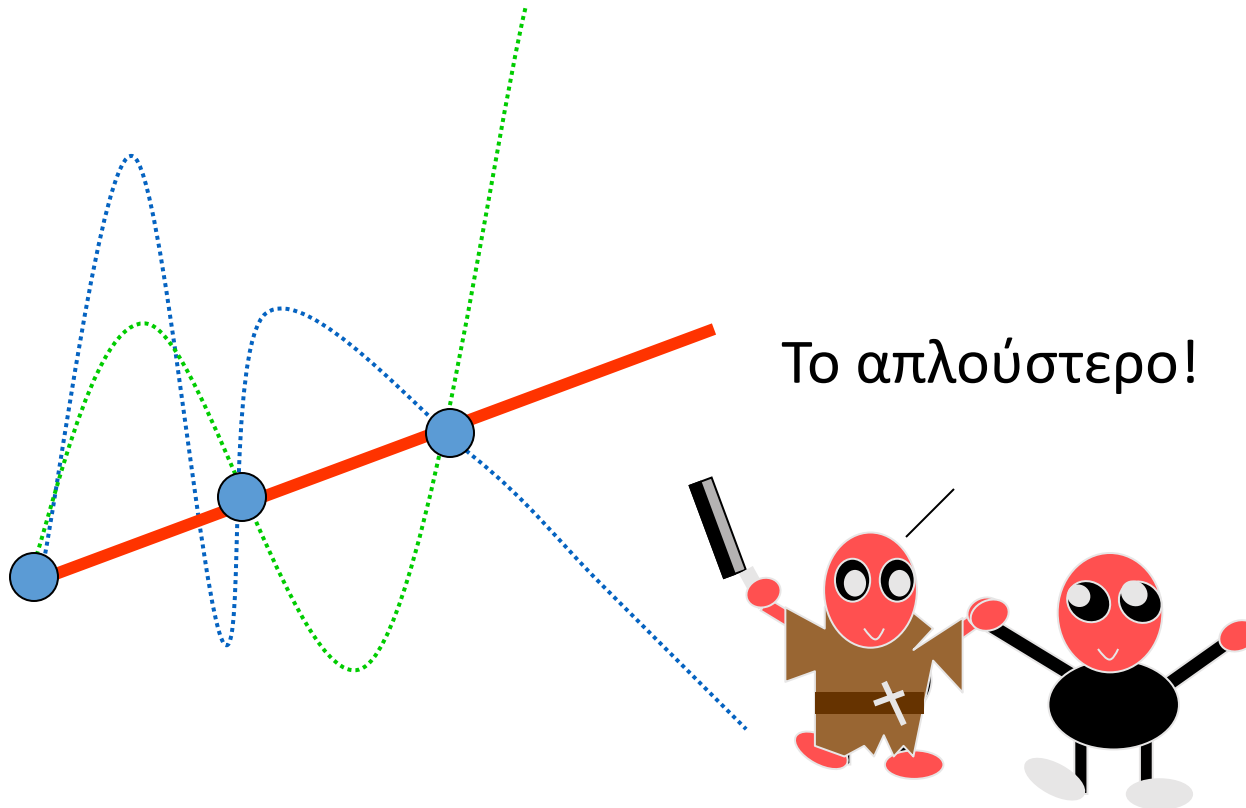
- William of Ockham (1290-1349): *Αν πολλές θεωρίες (ή μοντέλα) εξηγούν το ίδιο πράγμα, επέλεξε την απλούστερη*



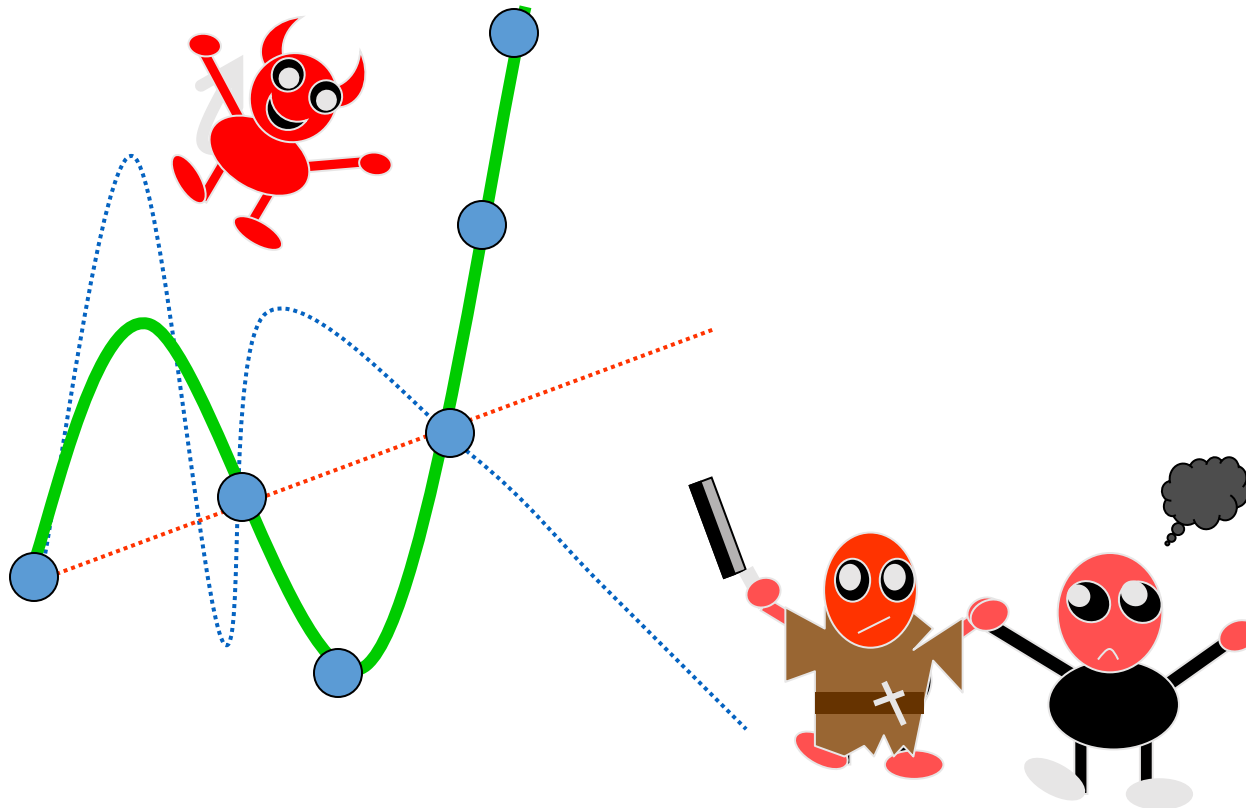
Ποιό μοντέλο είναι σωστό;



Ο Οckham λέει:

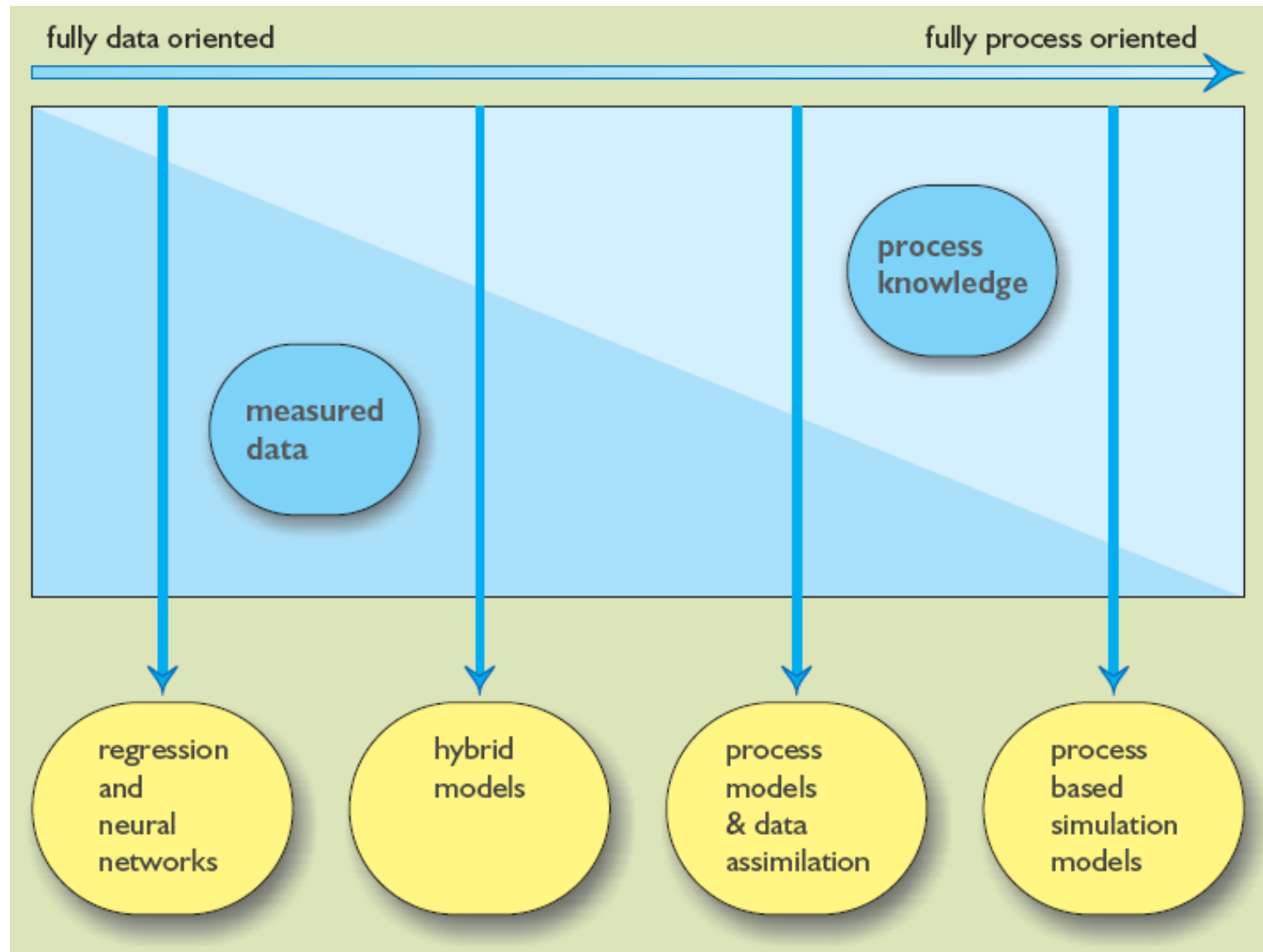


Ίσως όμως και όχι πάντα...

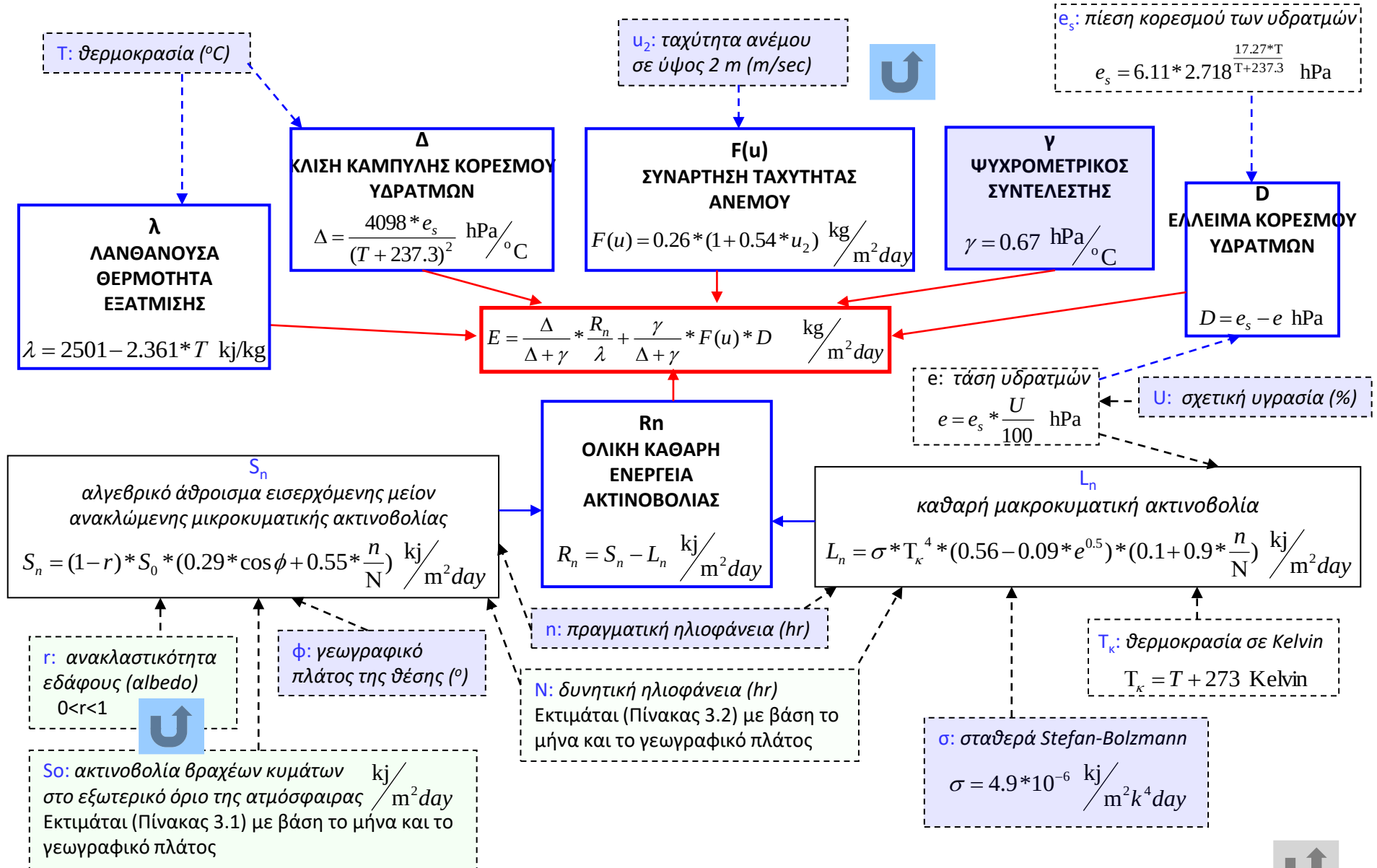


Συστήματα – Μοντέλα - Προσομοίωση

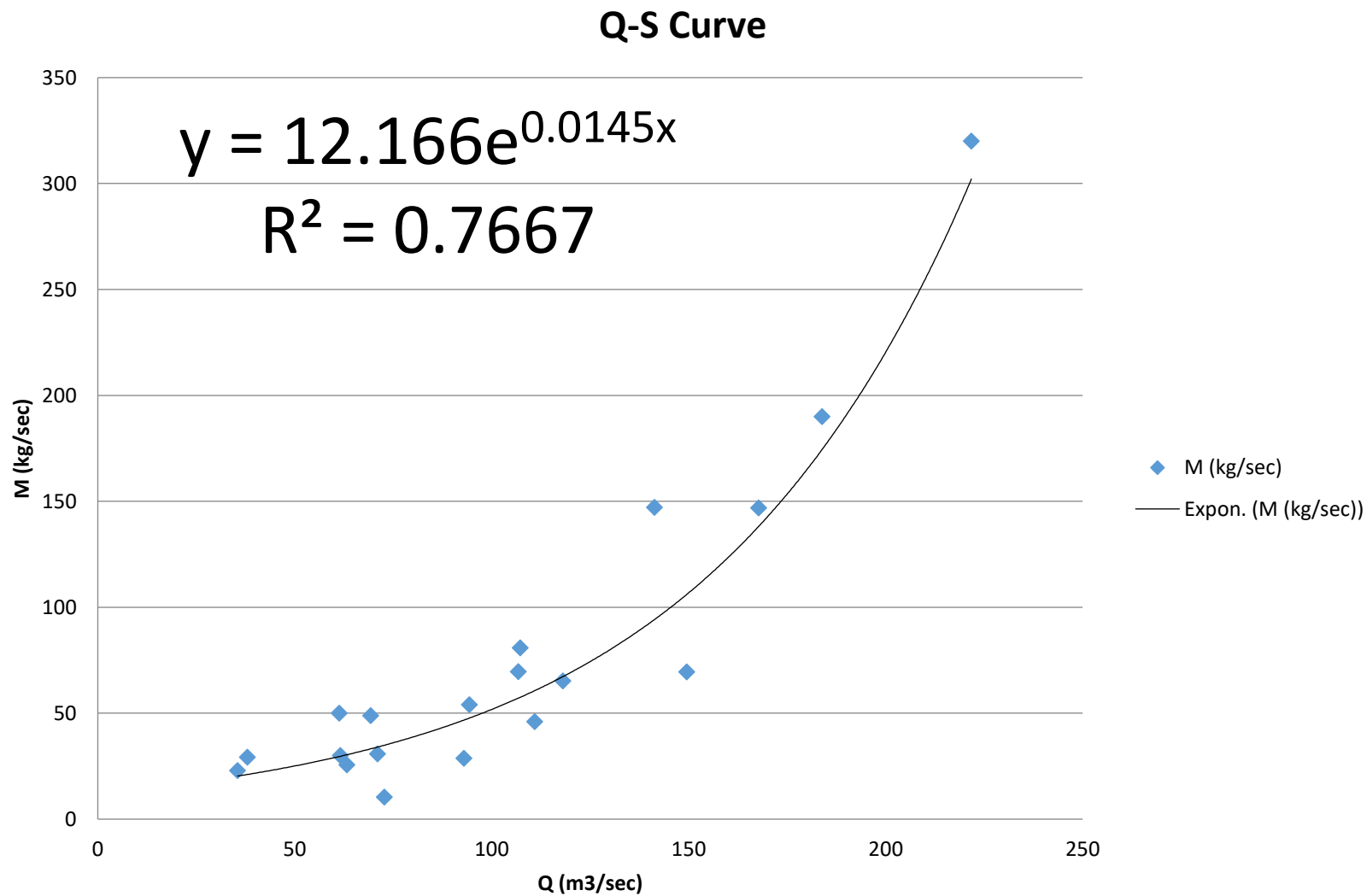
(Γενικοί) Τύποι Μαθηματικών Μοντέλων



Μέθοδος Penman (Δυνητική Ε από υδάτινη επιφάνεια)



Η παλινδρόμηση είναι επίσης ένα μοντέλο...



Σκοπός της δημιουργίας μοντέλων (Προσομοίωσης)

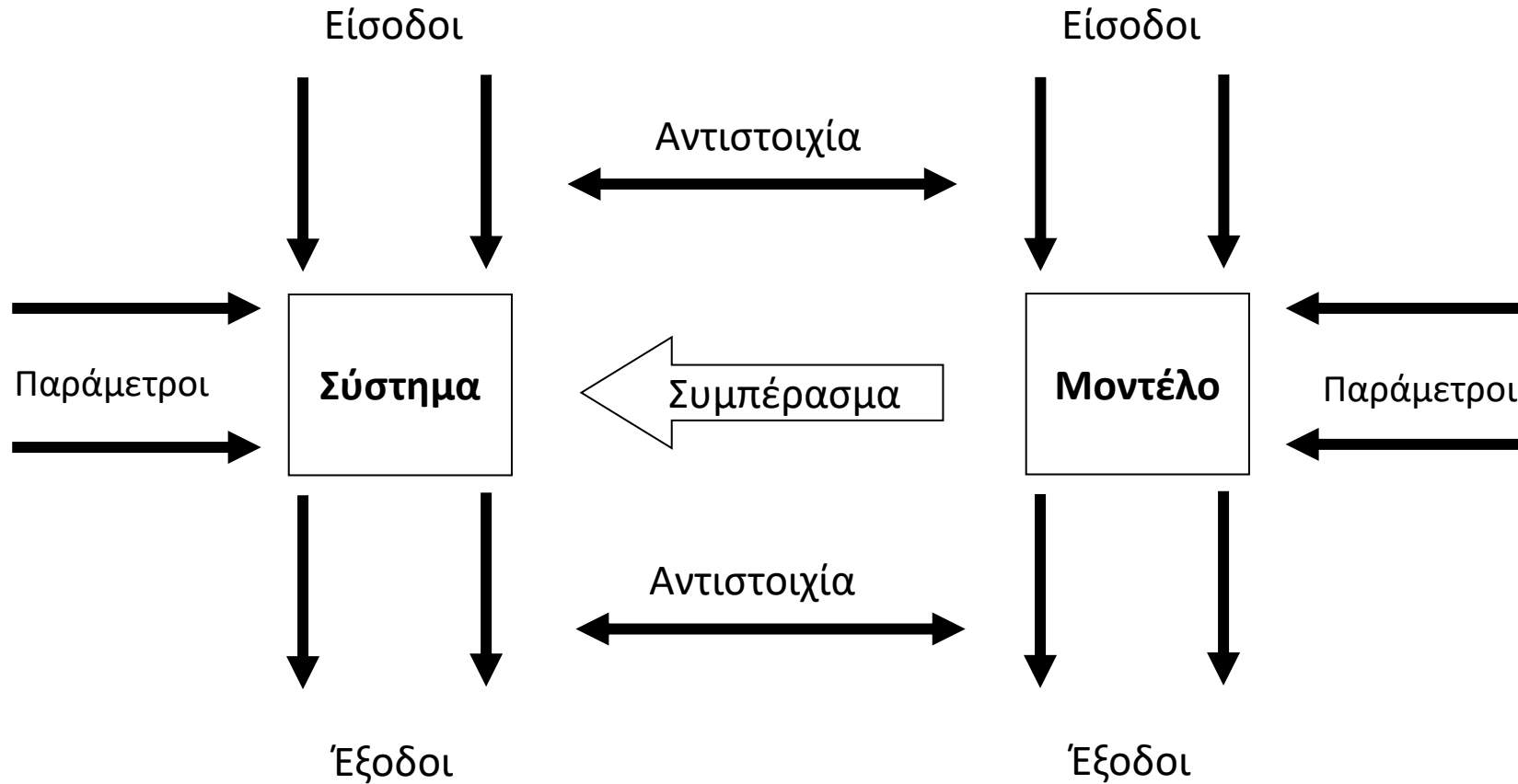
Μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος σε δύο (συνήθως) βασικά βήματα:

- Έλεγχο υποθέσεων ή θεωριών σχετικά με την συμπεριφορά ενός συστήματος (ή απλά **βαθμονόμηση!**)
- **Πρόβλεψη** ή εκτίμηση της μελλοντικής συμπεριφοράς ενός συστήματος

Κριτήρια Καλού Μοντέλου

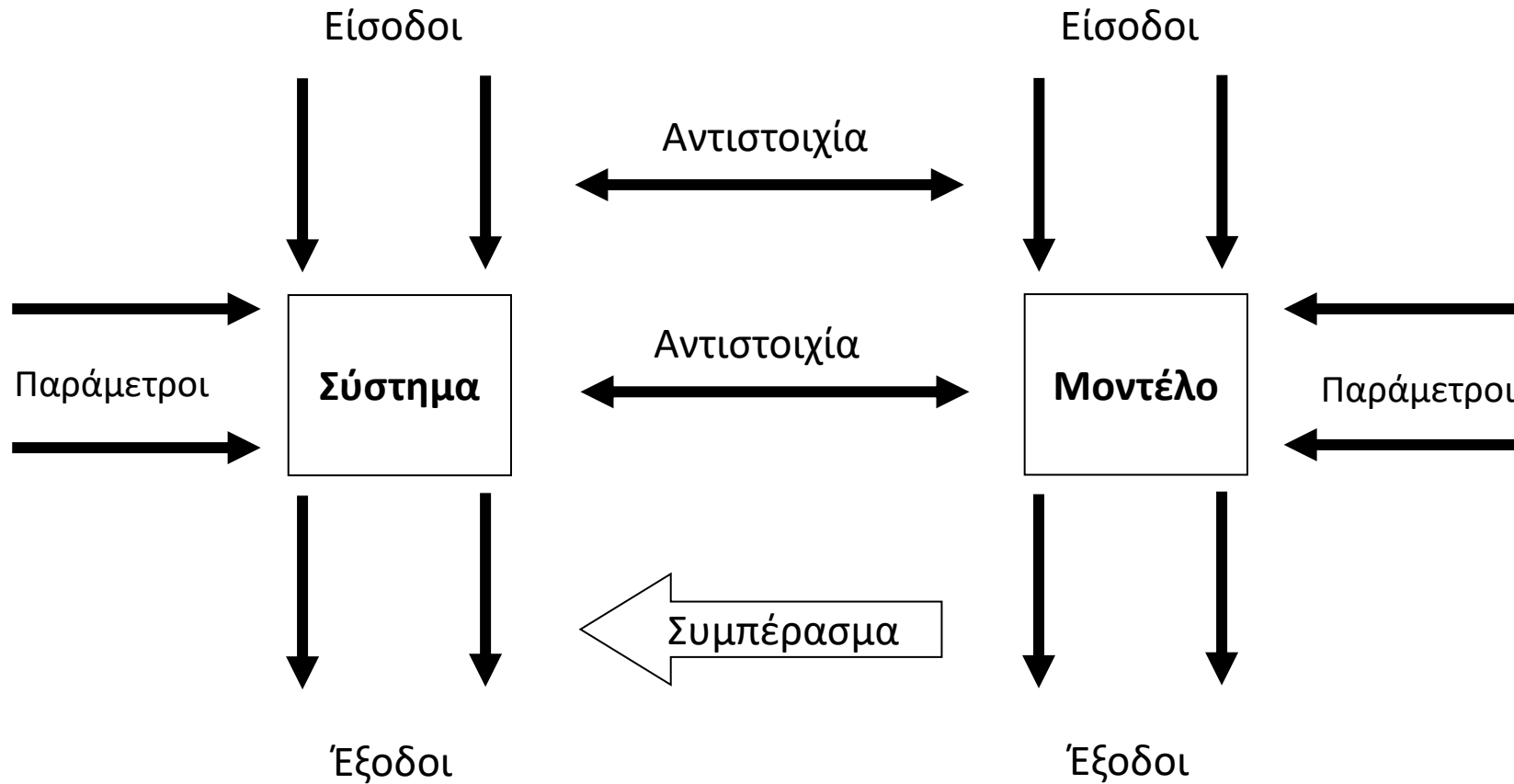
- Αντιπροσωπεύει πιστότερα ένα «σύστημα»
- Ανταποκρίνεται στους συγκεκριμένους (μας) σκοπούς
- Είναι εύκολο στην κατανόηση από τον χρήστη και μπορεί να μεταβληθεί εύκολα

Αντιστοιχία Μοντέλου-Συστήματος: Βήμα 1



α) Θεωρία για τη λειτουργία
του συστήματος (ή απλά
βαθμονόμηση)

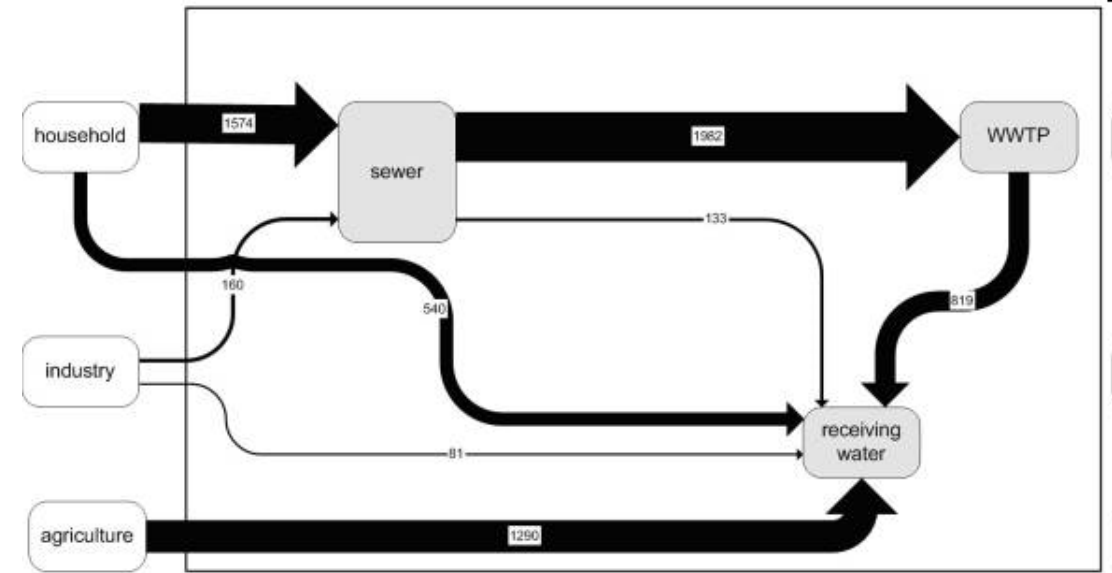
Αντιστοιχία Μοντέλου-Συστήματος: Βήμα 2



**β) Πρόβλεψη Συμπεριφοράς
του συστήματος στο μέλλον**

Τί είναι όμως σύστημα;

- **Σύστημα:** (system): 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)
 - σχέσεις μεταξύ των **στοιχείων** του και των εισόδων και εξόδων (Mays & Tung, 1992).



Ανάλυση Συστημάτων

- Ανάλυση συστημάτων (systems analysis): Μεθοδολογική αντιμετώπιση πολύπλοκων δομών ή φαινομένων, για τα οποία δεν υπάρχει αναλυτική λύση.

Από πού προκύπτει ένα σύστημα?

- Μία διάκριση, χωρίζει τον κόσμο σε δύο μέρη, στο «σύστημα» και στο «περιβάλλον»
- Βέβαια, ο κόσμος γύρω μας δεν είναι χωρισμένος σε συστήματα, υποσυστήματα και περιβάλλοντα...
- Ποιο το σύνορο για ένα υδροσύστημα;

Κάποια ορολογία...

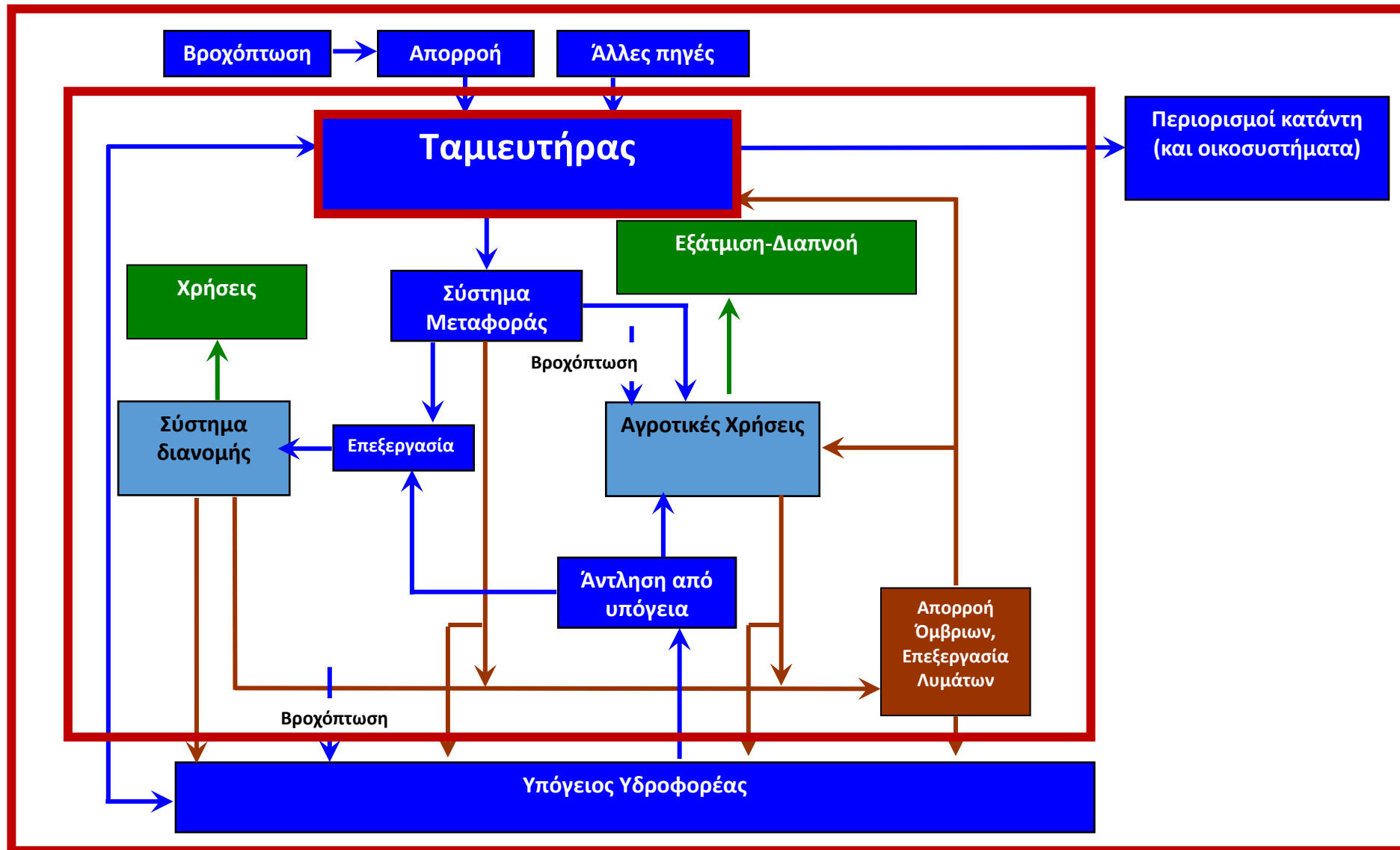
Στοιχεία ενός συνόλου

- Είναι τα μέρη του συνόλου
 - Δυναμικά όχι στατικά
 - Λειτουργικές διαδικασίες
- Ενδιαφέροντα στοιχεία συστήματος
 - Εισροή (ύλη, πληροφορία?, ενέργεια)
 - Επεξεργασία (παραγωγή, διατήρηση, ρύθμιση)
 - Εκροή (υπηρεσία, προϊόν, πληροφορία, ενέργεια)

Περιβάλλον

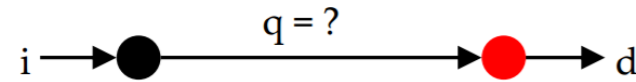
- Δεν αποτελεί μέρος του συστήματος
- Δεν ελέγχεται από το σύστημα
- Επιδρά στο σύστημα
 - Προσφέρει δεδομένα εισόδου
 - Συμπεριφορά / απόδοση
- Δέχεται επίδραση από το σύστημα
 - Δέχεται αποτελέσματα εξόδου

Παράδειγμα: Διάγραμμα μιας Λεκάνης Απορροής

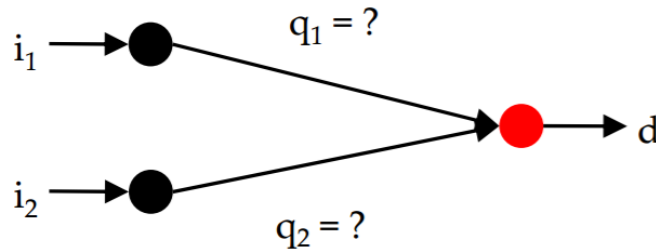


Και πάλι (!) πίσω στα Διαχειριστικά Προβλήματα...

(ας πούμε ότι)
αντιμετωπίσαμε
το i



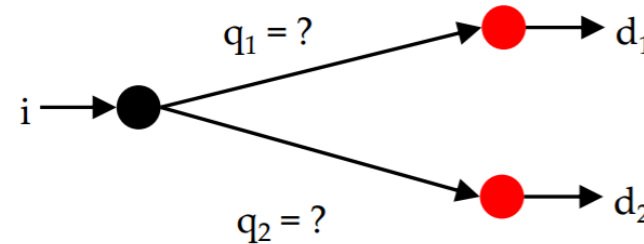
$$q = \min(i, d, u)$$



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

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

$$q_1 + q_2 \leq d$$



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

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

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

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

(και ας πούμε
ότι) φτιάξαμε
και ένα μοντέλο
ώστε να
ξέρουμε ότι
ισχύουν οι
περιορισμοί
του συστήματος
σε **κάθε χρονικό**
βήμα και

Τί σημαίνει ένα
 q να είναι
‘καλύτερο’ από
ένα άλλο q ;

Πως υπολογίζουμε την επίδοση ενός συστήματος;

- **Αξιοπιστία:** πόσο συχνά αστοχεί το σύστημα;
- **Ανθεκτικότητα:** πόσο γρήγορα ανακάμπτει ένα σύστημα μετά από μια αστοχία;
- **Ευαισθησία:** πόσο μεγάλες είναι οι επιπτώσεις από μια αστοχία;

- **Reliability** - How often does system fail? If X_T is upper limit

$$\text{Reliability}[X] = \frac{\# \text{ of times } X_t \geq X_T}{n}$$

- **Resilience** - How quickly does system recover from failure?

$$\text{Resilience}[X] = \frac{\# \text{ of times satisfactory state follows unsatisfactory state}}{\# \text{ times unsatisfactory state occurred}}$$

- **Vulnerability** - How bad are the consequences of failure?

$$\text{Vulnerability}[X] = \sum_{X_T - X_t \geq 0} \frac{X_T - X_t}{\# \text{ times unsatisfactory state occurred}}$$

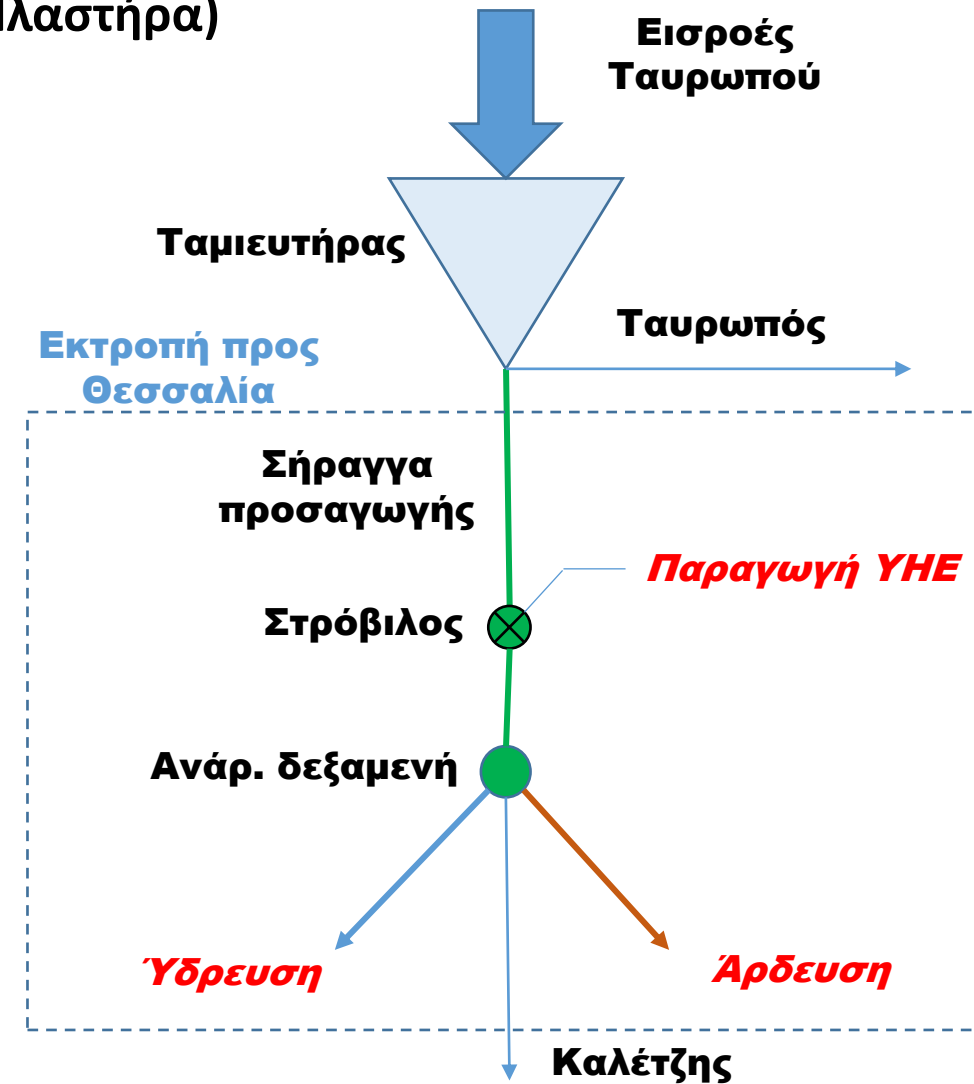
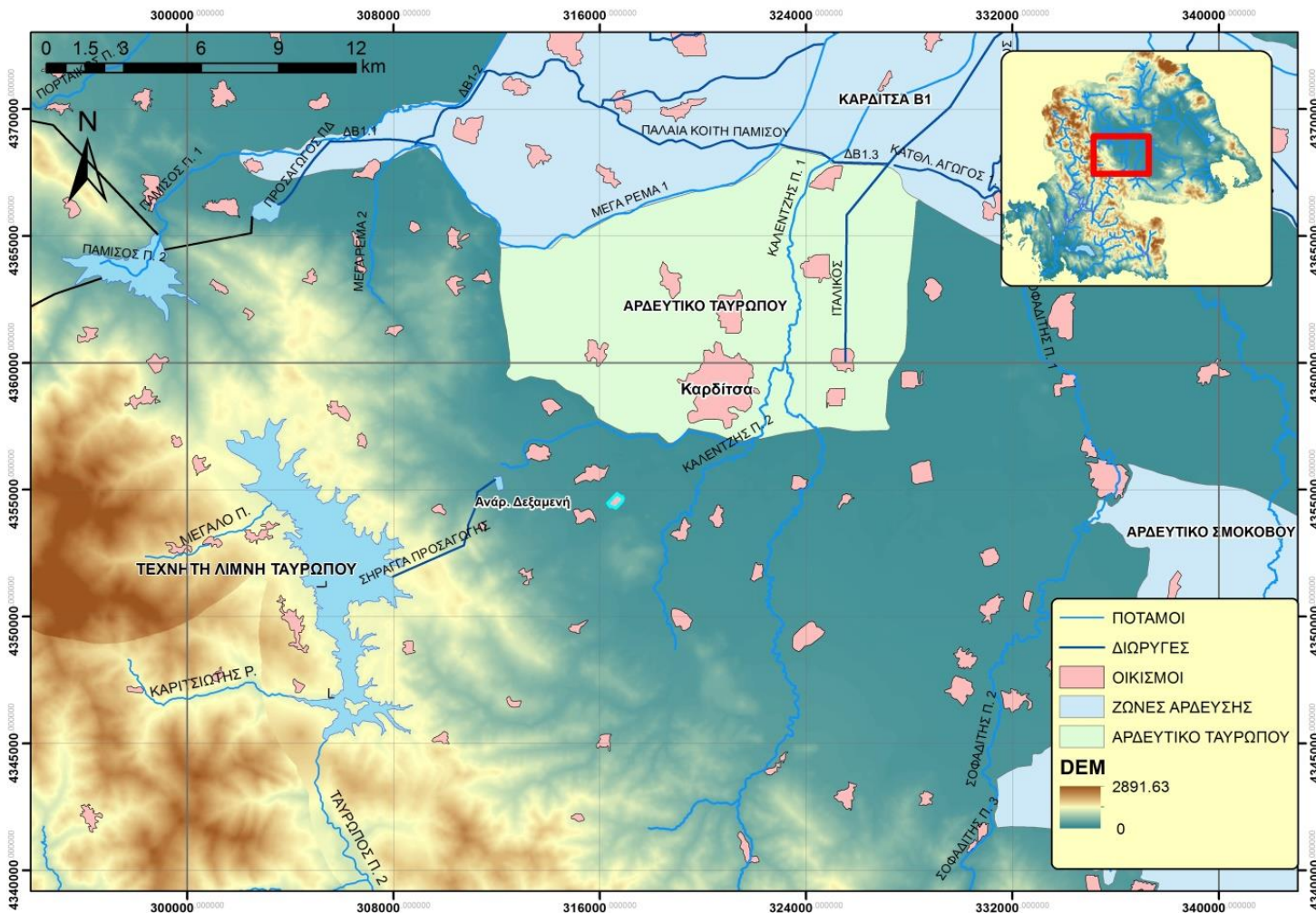
Προφανώς κάθε τρόπος υπολογισμού καταλήγει σε διαφορετικό σχεδιασμό ή/και κανόνα λειτουργίας (διαφορετική *Αντικειμενική (ή Στοχική) Συνάρτηση*)

Άσκηση 1: Ταμιευτήρας πολλαπλού σκοπού



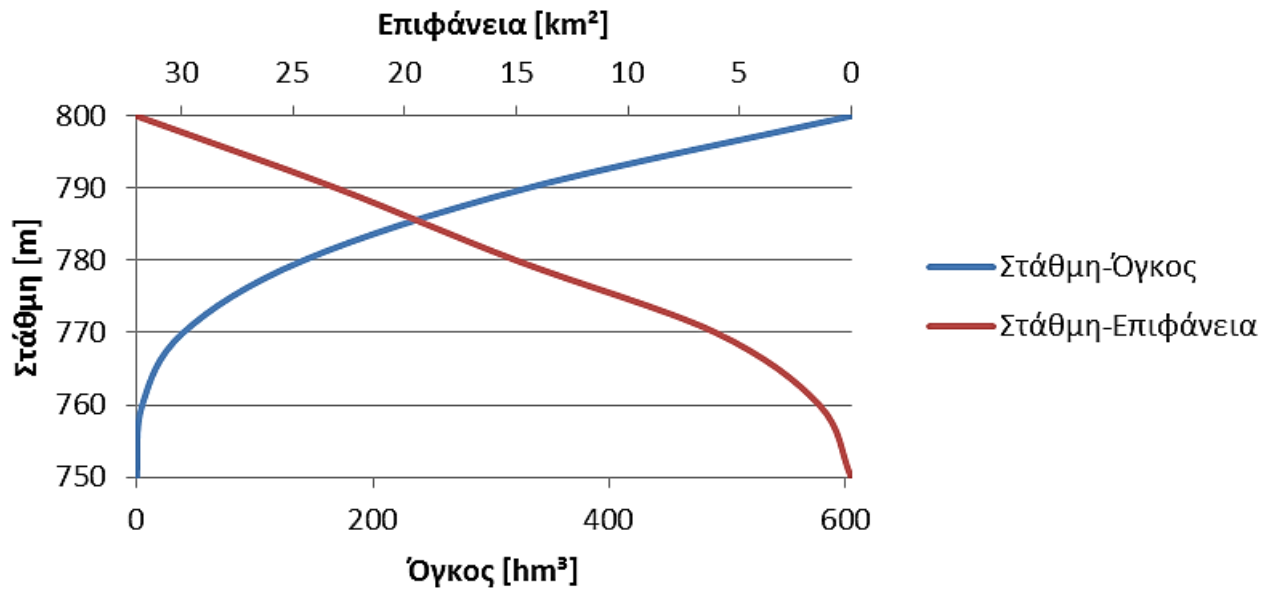
Άσκηση 1: Ταμιευτήρας πολλαπλού σκοπού

Ταμιευτήρας Ταυρωπού (Λίμνη Πλαστήρα)



Άσκηση 1: Ταμιευτήρας πολλαπλού σκοπού

Ταμιευτήρας Πλαστήρα



Πραγματικά δεδομένα

- Έκταση λεκάνης απορροής: 161.3 km²
 - ΑΣΛ: +792 m (S_{max} = 373 hm³)
 - ΚΣΛ: +776 m (S_{min} = 85 hm³)
 - Εγκατεστημένη ισχύς ΥΗΣ: 129.9 MW
 - Μέγιστο ύψος πτώσης: 577 m
 - Μέγιστη παροχετευτικότητα αγωγού (Q_{max}) = 54.6 hm³/μήνα
 - **Αναρρυθμιστική** δεξαμενή 0.6 hm³ κατάντι του φράγματος.
-
- Σχεδιασμός και κατασκευή ως αμιγώς ΥΗΕ το **1961**
 - Στόχος ΥΗΕ σχεδιασμού: **250 GWh/έτος**
 - Το **1965** όμως ξεκινάνε και άλλες ζητήσεις και πιέσεις (και μπαίνουν μπροστά τα θερμοηλεκτρικά της ΔΕΗ)

Άσκηση 1: Ταμιευτήρας πολλαπλού σκοπού

Απλοποιημένο* Ισοζύγιο ταμιευτήρα

$$S_t = S_{t-1} + I_t - X_t - W_t$$

* χωρίς διαφυγές, εξάτμιση, βροχή στην επιφάνεια του ταμιευτήρα

όπου:

S_t το απόθεμα στο βήμα t

I_t η εισροή στο βήμα t

D_t η ζήτηση στο βήμα t

X_t η απόληψη στο βήμα t : $X_t = \min(S_{t-1} + I_t - S_{min}, D_t, Q_{max})$

W_t η υπερχειλίση στο βήμα t : $W_t = \max(0, (S_{t-1} + I_t - X_t) - S_{max})$

Έλλειμμα: $Def_t = D_t - X_t$

Ειδικά για ΥΗΕ:

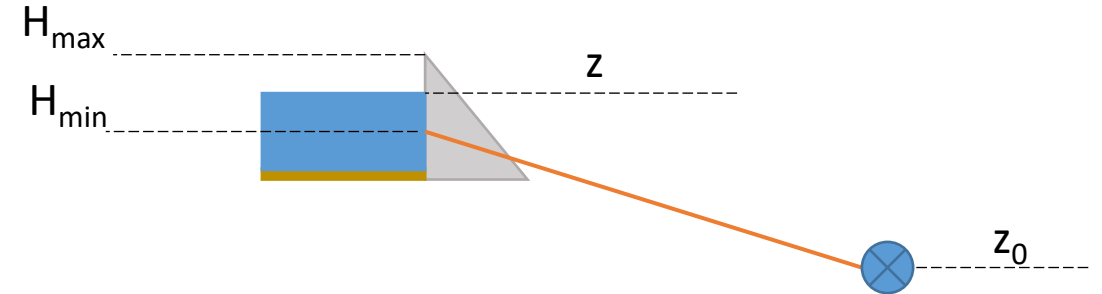
$$\text{Ζήτηση } D_t = V = \frac{E^*}{\psi(z - z_0)}$$

Έλλειμμα ενέργειας $DefEnergy_t = E^* - \psi X_t(z - z_0)$

$\Delta V = \min(W_t, Q')$ για παραγωγή δευτερεύουσας ενέργειας.

Παροχετευτικότητα $Q' = Q_{max} - X_t$. Νέα $X'_t = X_t + \Delta V$.

$W'_t = W_t - \Delta V$ και $S_t = S_{t-1} + I_t - X'_t - W'_t$



Απλοποιημένη εξίσωση παραγωγής ενέργειας

$$E = \psi V(z - z_0)$$

όπου:

ψ η ειδική ενέργεια (GWh/hm^4)

Από σχέση ισχύος στροβίλου:

$$I = (\rho g) Q H \eta$$

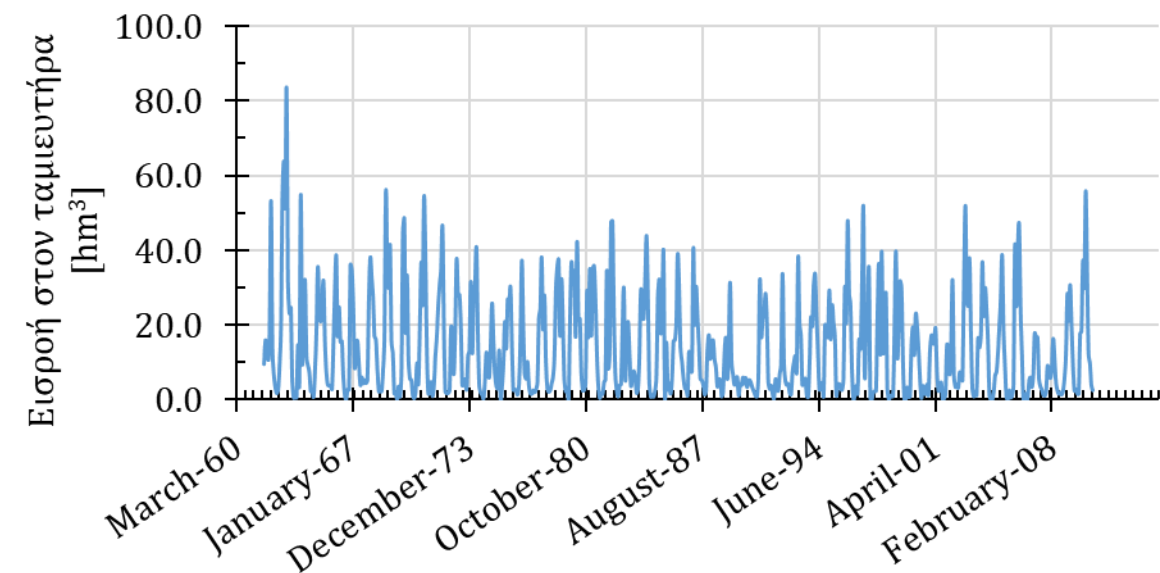
$$\psi = 0.2725 \eta \frac{H_n}{H}$$

$$H_n = H - h_f - h_k$$

$$\psi = \psi(H)$$

Παραδοχή γραμμικών απώλειών 10% και σταθερού $\eta=0.93 \rightarrow$ σταθερό $\psi = 0.23$

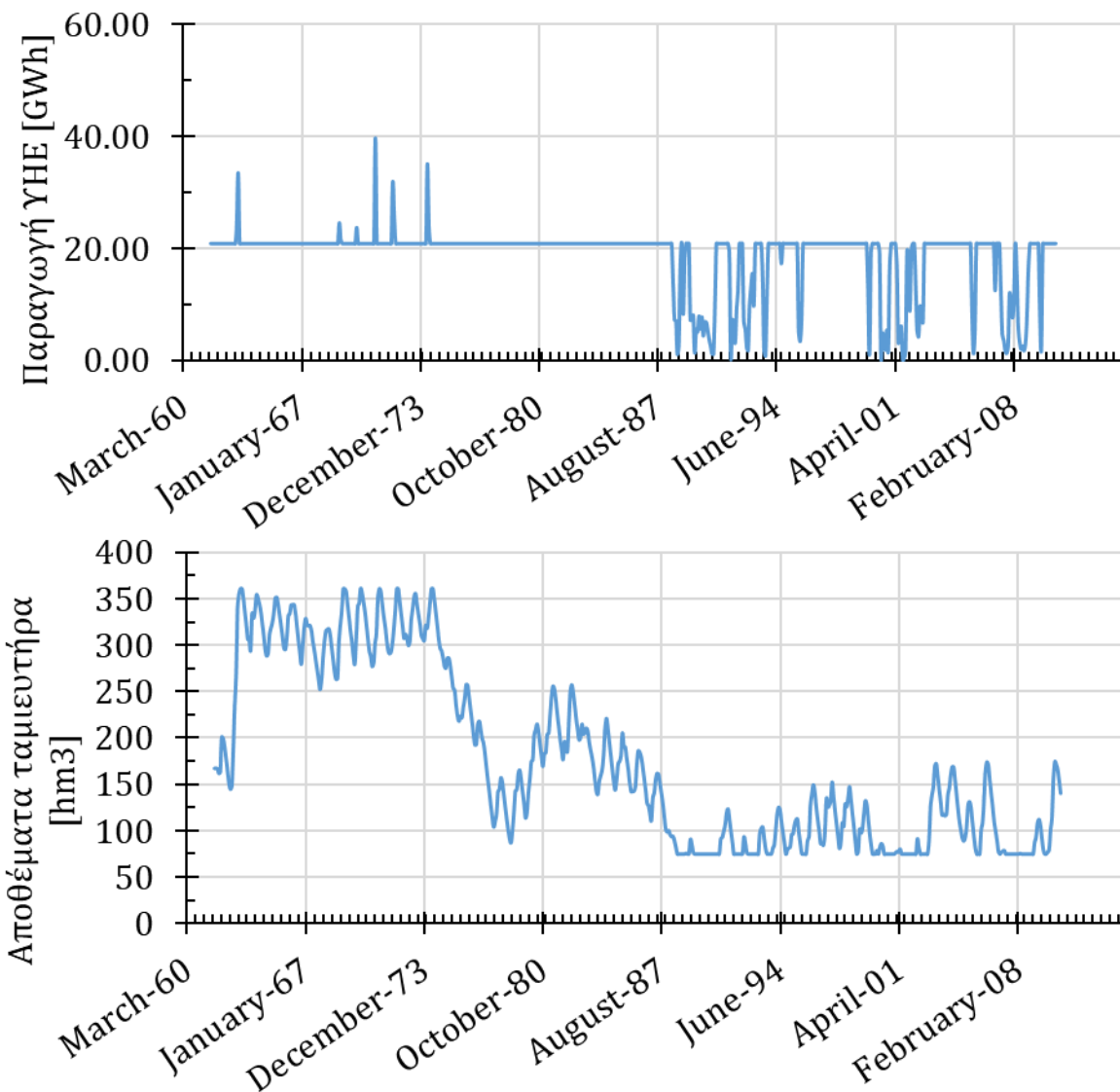
Προσομοίωση του ταμιευτήρα με τα ιστορικά δεδομένα παροχών και λειτουργία ως καθαρά ενεργειακού έργου, με μηνιαίο στόχο **$D = 20.83 \text{ GWh}$** (250 GWh ετησίως):



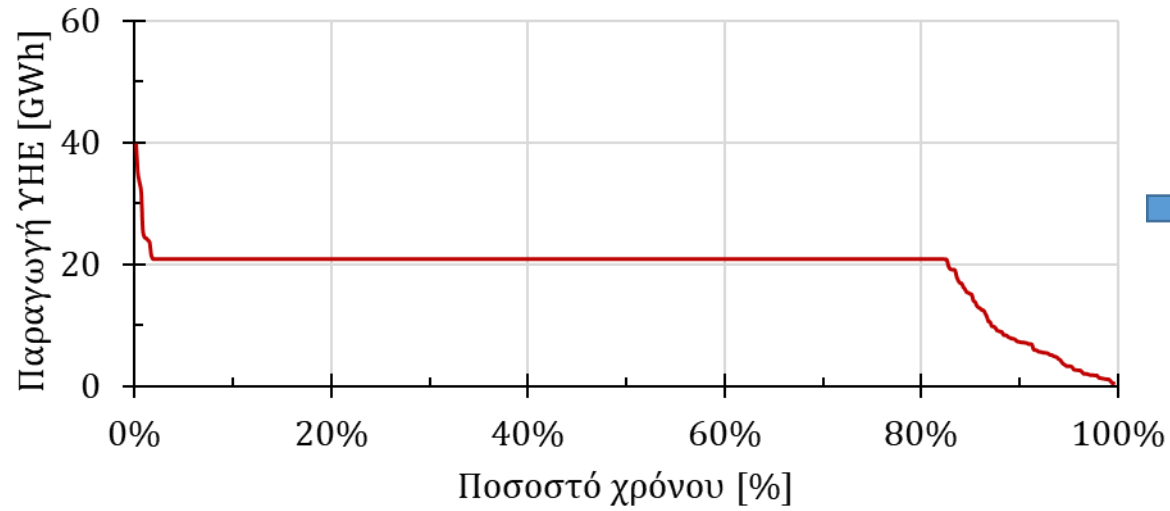
Μηνιαία αξιοπιστία παραγωγής ΥΗΕ (P):

$$\frac{\# \text{ steps } P_t \geq D}{n} = 82.31\%$$

Μέσο μηνιαίο έλλειμμα ΥΗΕ: $\frac{\sum_{t=1}^n D - P_t}{n} = 2.34 \text{ GWh}$



Καμπύλη ενέργειας για D=20.83

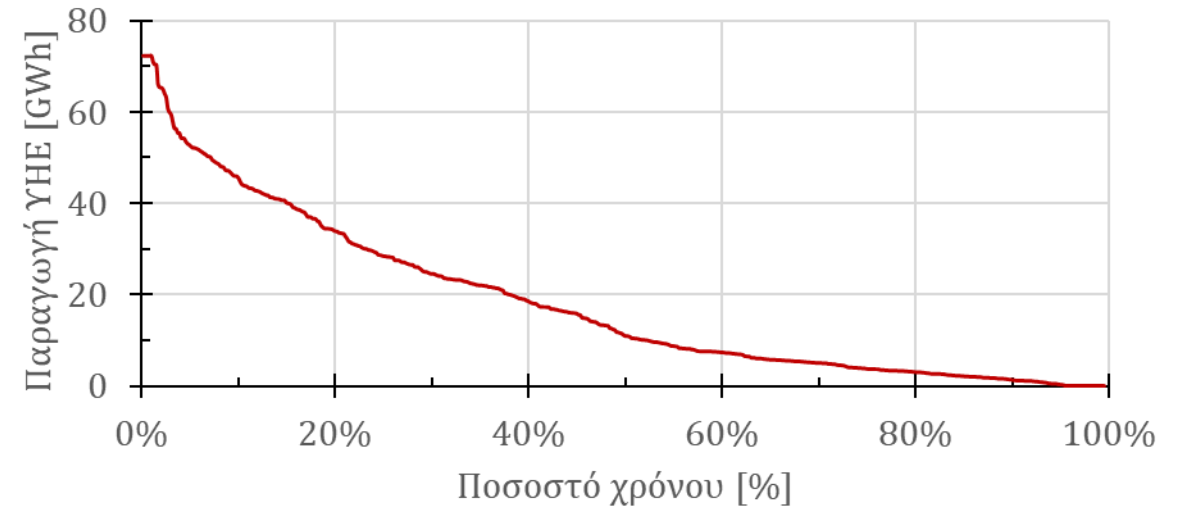


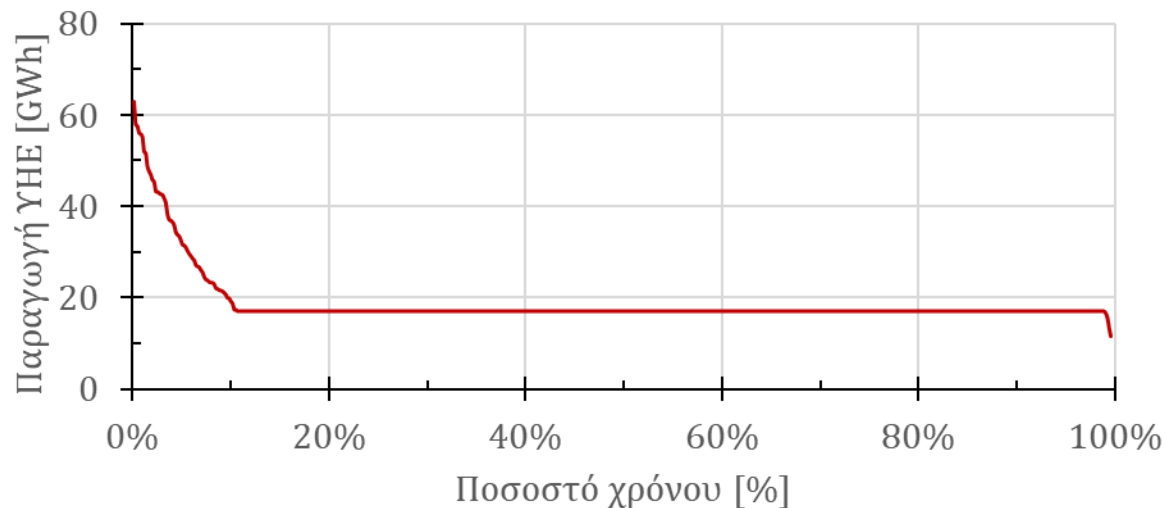
1-F(X) =	Firm Energy
0.01	25.49
0.05	20.83
0.1	20.83
0.2	20.83
0.3	20.83
0.4	20.83
0.5	20.83
0.6	20.83
0.7	20.83
0.8	20.83
0.9	7.18
0.95	3.21
0.99	1.05

Καμπύλη ενέργειας για D=15

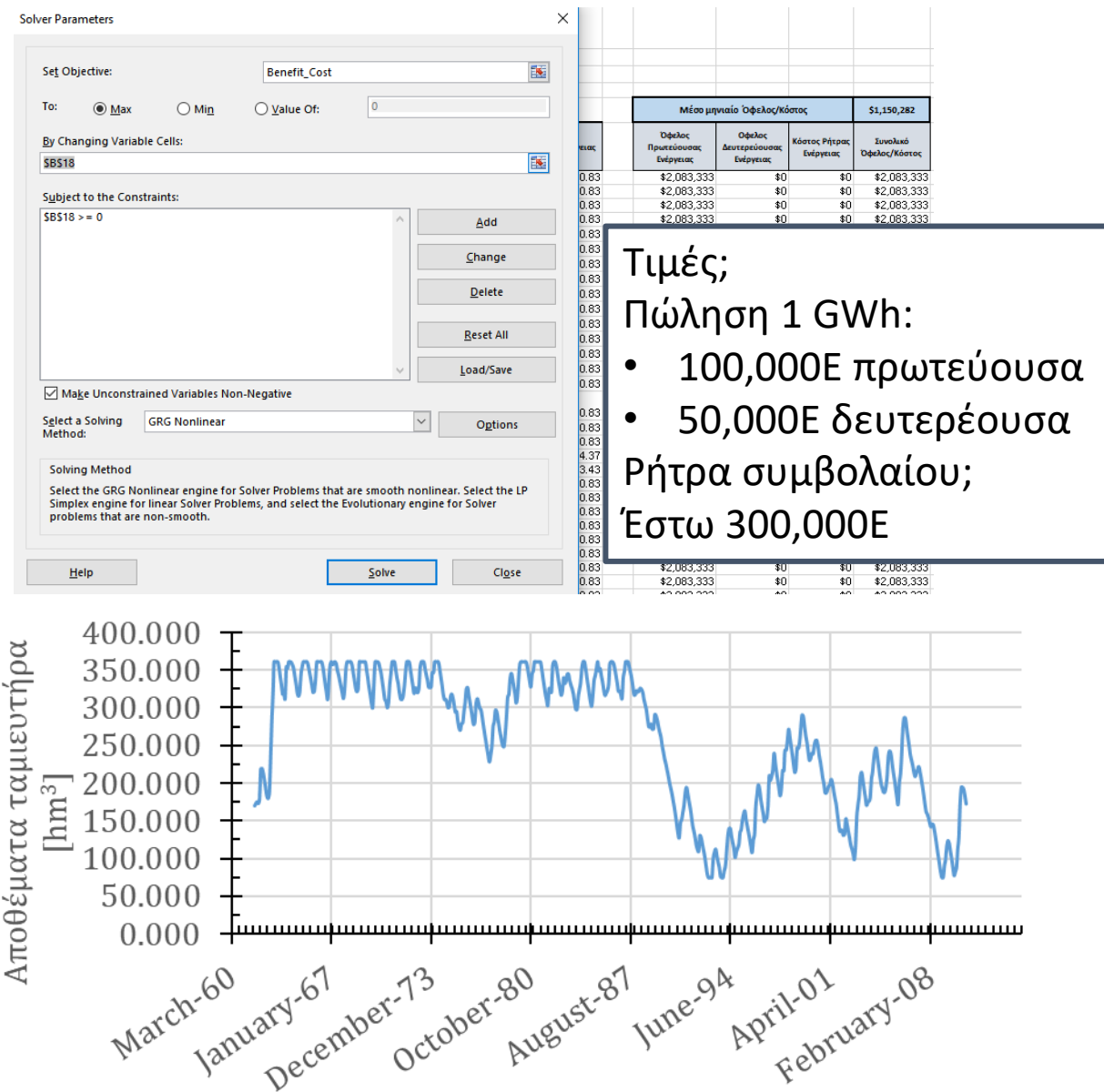
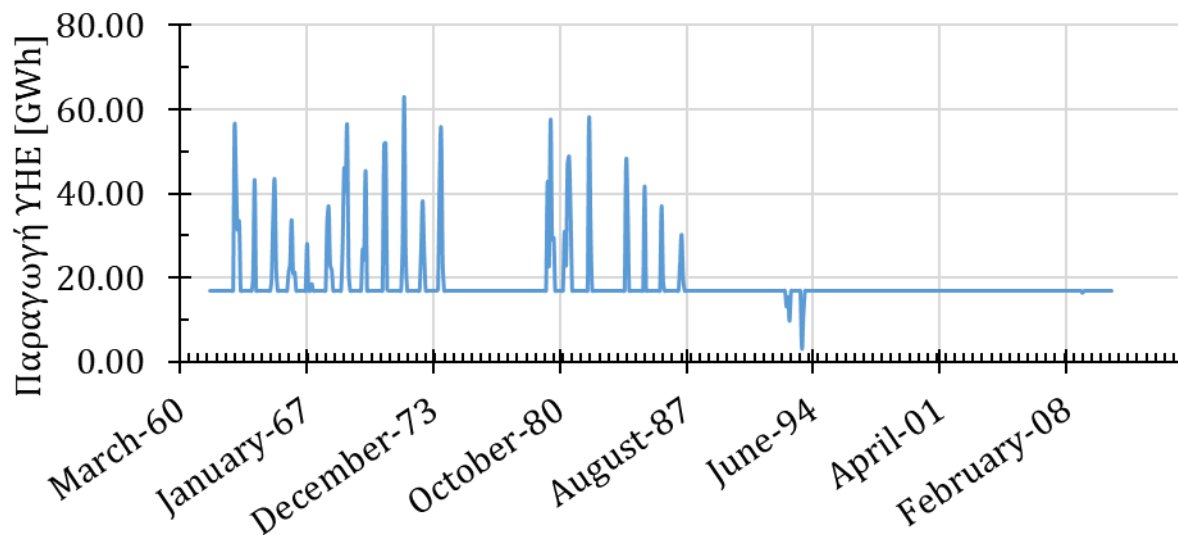


Καμπύλη ενέργειας για D=0





Βέλτιστη τιμή: 16.93



Ο ταμιευτήρας σύντομα εξυπηρετήσει και άλλες ανταγωνιστικές χρήσεις. Μάλιστα σήμερα, τίθενται σε προτεραιότητα (!)

- Υδροληψία ύδρευσης της πόλης της Καρδίτσας και 37 οικισμών → περίπου 2.0 hm³/μήνα - σταθερά
- Αρδευτικό δίκτυο ΤΟΕΒ Ταυρωπού: Το συλλογικό αρδευτικό δίκτυο 160 000 στρεμμάτων (καθαρή γεωργική γη ~120 000 στρέμματα).
- Αρδευτικό έργο Μοσχάτου-Ξυνονερίου-Ρούσσου (6 000 στρεμμάτων – άντληση) μέσω καταθλιπτικών αγωγών.
- Αρδευτικό έργο Μεσενικόλα (3 200 στρεμμάτα – άντληση).
- Υδροληψία για συμπλήρωση της άρδευσης στην περιοχή της Αγιοπηγής.
- Τουρισμός → ανάγκη διατήρησης υψηλής στάθμης (> +782)

Κατανομή αρδευτικής ζήτησης (hm ³) (υπολογισμός βάση τύπου καλλιεργειών και ΚΥΑ)								
Κόμβος	Αρδ. Έκταση (στρ)	Σύνολο hm ³	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ
ΤΟΕΒ Ταυρωπού	114 300	80.01	4.00	8.80	18.88	24.16	21.12	3.04
Μεσενικόλας	3 200	2.24	0.11	0.25	0.53	0.68	0.59	0.09
Ξυνονέρι	6 000	4.20	0.21	0.46	0.99	1.27	1.11	0.16
Αγιοπηγή	22 771	15.94	0.80	1.75	3.76	4.81	4.21	0.61
Σύνολο	14 6271	102.39	5.12	11.26	24.16	30.92	27.03	3.90

Κυμαίνεται ως και > 185/hm³ ετησίως !

Προσομοίωση του ταμιευτήρα με τα ιστορικά δεδομένα παροχών και λειτουργία ως **υδρευτικού και αρδευτικού έργου (μόνο)**, με ετήσιους στόχους $D_Y = 20 \text{ hm}^3$ και $D_A = 150 \text{ hm}^3$. Ύδρευση σε **πρώτη** προτεραιότητα.

Νέο Ισοζύγιο

$$S_t = S_{t-1} + I_t - X_Y$$

$$S'_t = S_t - X_A - W_t$$

όπου:

$$X_Y = \min(S_{t-1} + I_t - S_{min}, D_Y, Q_{max})$$

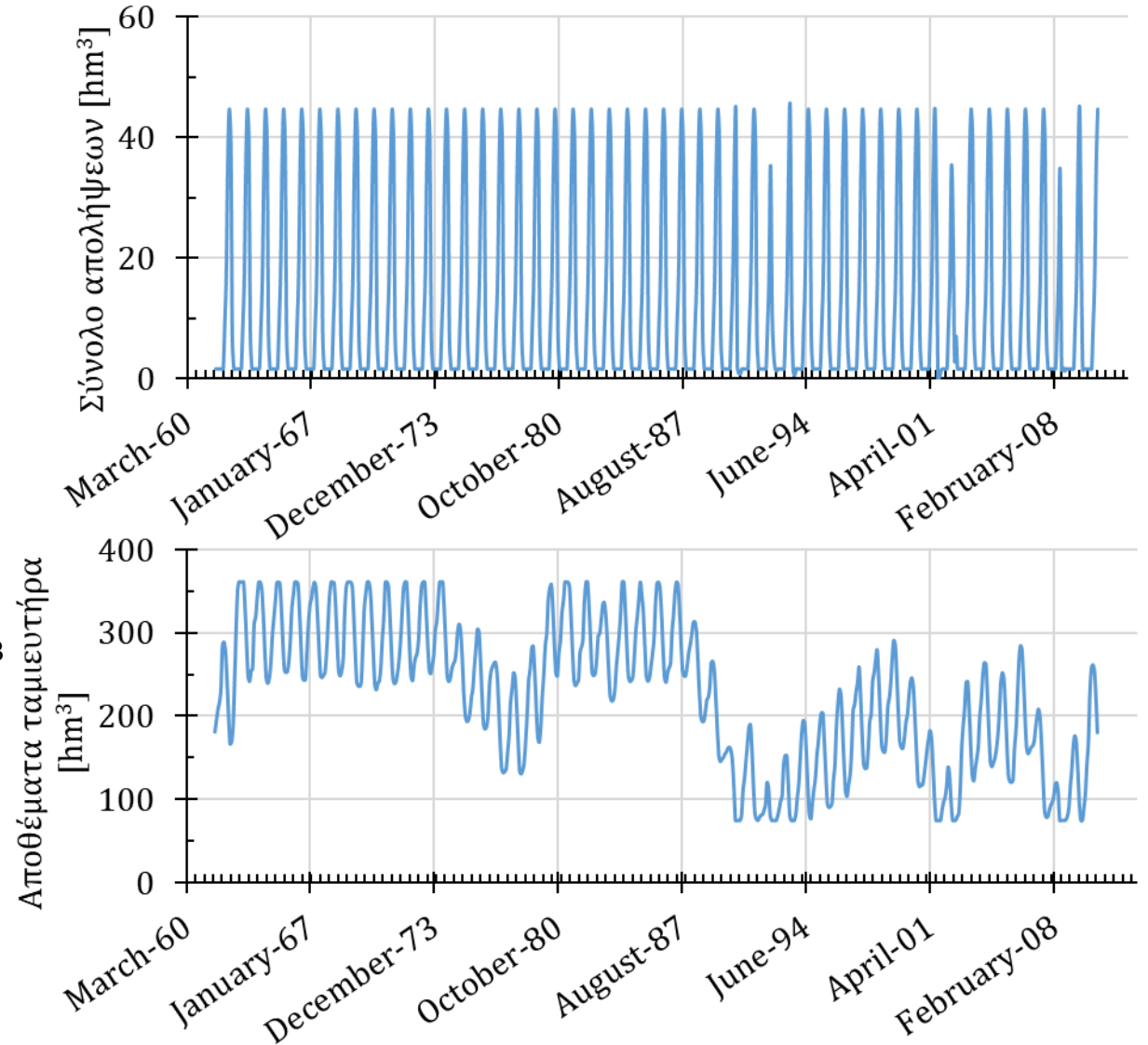
$$X_A = \min(S_{t-1} + I_t - S_{min}, D_A, Q_{max}')$$

Μηνιαία **αξιοπιστία** Ύδρευσης: $\frac{\# \text{ steps } X_Y \geq D_Y}{n} = \mathbf{98.1\%}$

Μέσο μηνιαίο **έλλειμμα** Ύδρευσης: $\frac{\sum_{t=1}^n D_Y - X_Y}{n} = 0.013 \text{ hm}^3$

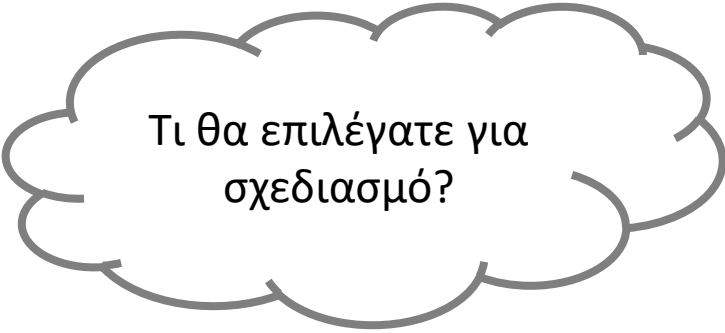
Μηνιαία **αξιοπιστία** Άρδευσης: $\frac{\# \text{ steps } X_A \geq D_A}{n} = 93.9\%$

Μέσο μηνιαίο **έλλειμμα** Άρδευσης: $\frac{\sum_{t=1}^n D_A - X_A}{n} = 1.13 \text{ hm}^3$



Τι εικόνα δίνουν τα άλλα κριτήρια επίδοσης;

- **Ανθεκτικότητα** σε μηνιαία κλίμακα Ύδρευσης: $1 - \frac{\# \text{ times } X_{Y,i} \leq D_{Y,i} \ \& \ X_{Y,i-1} \leq D_{Y,i-1}}{\# \text{ steps } X_Y \geq D_Y} = 63.6\%$
- Ανθεκτικότητα σε μηνιαία κλίμακα Άρδευσης: $1 - \frac{\# \text{ times } X_{A,i} \leq D_{A,i} \ \& \ X_{A,i-1} \leq D_{A,i-1}}{\# \text{ steps } X_A \geq D_A} = 38.9\%$
- **Ευαισθησία** σε μηνιαία κλίμακα Ύδρευσης: $\frac{\sum_{t=1}^n D_Y - X_Y}{\# \text{ steps } X_Y \leq D_Y} = 0.68 \text{ hm}^3$
- Ευαισθησία σε μηνιαία κλίμακα Άρδευσης: $\frac{\sum_{t=1}^n D_A - X_A}{\# \text{ steps } X_A \leq D_A} = 18.45 \text{ hm}^3$



Τι θα επιλέγατε για
σχεδιασμό?

(ή και τα ίδια σε **άλλη χρονική κλίμακα**;))

- Αξιοπιστία σε **μηνιαία** κλίμακα Ύδρευσης : $\frac{\# \text{ steps } X_Y \geq D_Y}{n} = 98.1\%$
- Αξιοπιστία σε **μηνιαία** κλίμακα Άρδευσης : $\frac{\# \text{ steps } X_A \geq D_A}{n} = 93.9\%$
- Αξιοπιστία σε **ετήσια** κλίμακα Ύδρευσης: $\frac{\# \text{ years } \sum_{i=1}^{12} X_{Y,i} \geq \sum_{i=1}^{12} D_{Y,i}}{n} = 83.7\%$
- Αξιοπιστία σε **ετήσια** κλίμακα Άρδευσης: $\frac{\# \text{ years } \sum_{i=1}^{12} X_{A,i} \geq \sum_{i=1}^{12} D_{A,i}}{n} = 85.7\%$

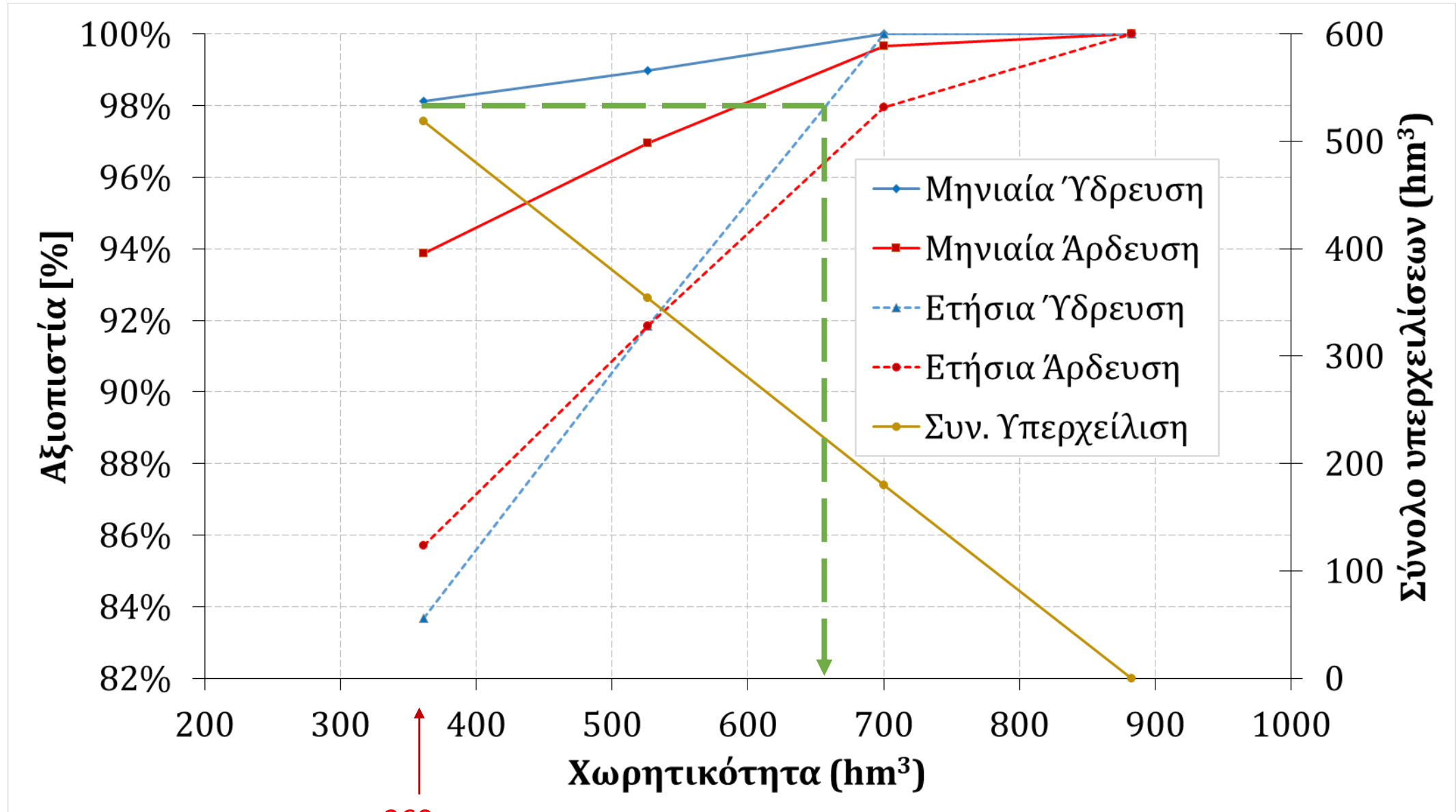
Τι θα γινόταν αν αποφασίζαμε να ορίσουμε την αξιοπιστία σε σχέση με τη **ποσότητα** (κάλυψη αναγκών) αντί για τη **συχνότητα**;

- Αξιοπιστία ύδρευσης: $\frac{\sum_{t=1}^n X_Y}{\sum_{t=1}^n D_Y} = 99.2\%$

- Αξιοπιστία ύδρευσης: $\frac{\sum_{t=1}^n X_Y}{\sum_{t=1}^n D_Y} = 95.5\%$

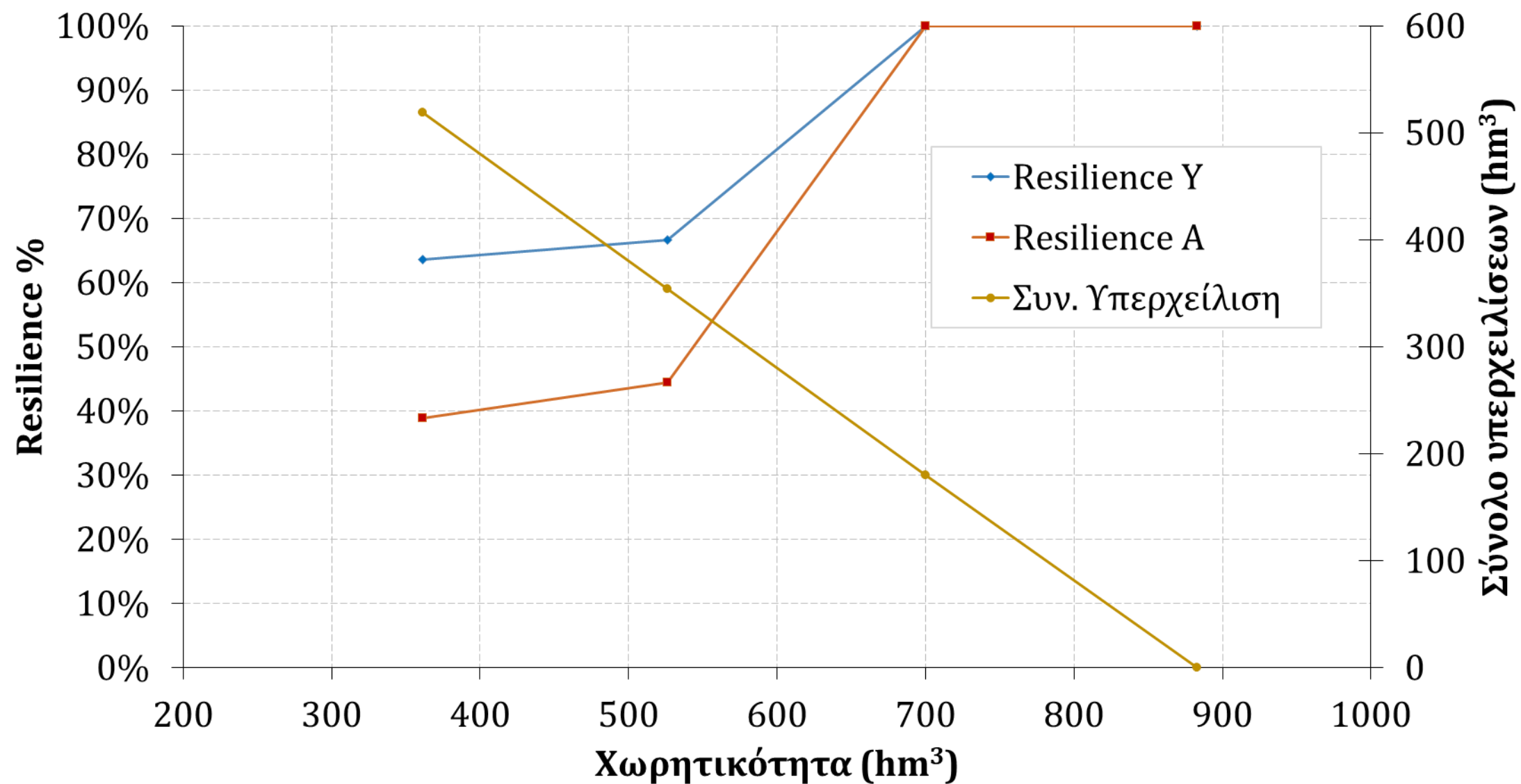
Υπάρχει διαφορά στην επιλογή χρονικής κλίμακας υπολογισμού στη περίπτωση αυτή;

Διαφορετικές κλίμακες μέτρων επίδοσης = διαφορετικές διαστάσεις έργων;



360
πραγματικά

Ομοίως με το μέτρο ανθεκτικότητας



- Προσομοίωση του ταμιευτήρα με τα ιστορικά δεδομένα παροχών και λειτουργία ως **υδρευτικού** και **αρδευτικού** έργου, με ετήσιους στόχους $D_Y = 20 \text{ hm}^3$ και $D_A=150 \text{ hm}^3$, και και νέο στόχο παραγωγής **ενέργειας** D_P .
- Ύδρευση σε πρώτη προτεραιότητα, άρδευση δεύτερη, ΥΗΕ τρίτη (παράγεται ενέργεια και από τις άλλες απολήψεις)

Νέο Ισοζύγιο

$$S_t = S_{t-1} + I_t - X_Y$$

$$S'_t = S_t - X_A$$

$$S''=S'_t - X_P - W_t$$

όπου:

$$X_P = \max(V - (X_A + X_Y), 0)$$

