

# Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα

## 8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών



# Ταμειευτήρες

---

**Ανδρέας Ευστρατιάδης & Παναγιώτης Παπανικολάου**

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2017-18

# Ταμιευτήρες: έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων πολλαπλού σκοπού

- Εξυπηρέτηση πολλαπλών χρήσεων νερού:
  - Καταναλωτικές χρήσεις (ύδρευση, άρδευση)
  - Αποθήκευση και παραγωγή Υ/Η ενέργειας
  - Αντιπλημμυρική προστασία (πλήρης συγκράτηση συνήθων πλημμυρών, ανάσχεση μεγάλων πλημμυρών)
  - Έμμεσα οφέλη από τουριστική αξιοποίηση
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις
  - Σημαντική διαφοροποίηση της φυσικής υδρολογικής δίαιτας του ποταμού (εξομάλυνση ροών, μειωμένη συχνότητα και μέγεθος πλημμυρικών παροχών)
  - Μεταβολές υπόγειας υδροφορίας
  - Συγκράτηση φερτών (μη αναστρέψιμη επίπτωση)
  - Παρεμπόδιση κυκλοφορίας ψαριών
  - Αλλαγή οικοσυστήματος από ποτάμιο σε λιμναίο
  - Αισθητική όχληση σε περίπτωση έντονων διακυμάνσεων στάθμης (αποκάλυψη «νεκρής» ζώνης)
  - Περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη φάση κατασκευής (ως επί το πλείστον αναστρέψιμες)



**Ταμιευτήρας Πλαστήρα:** ύδρευση, άρδευση, Υ/Η ενέργεια, τουρισμός



**Ταμιευτήρας Μόρνου:** ύδρευση

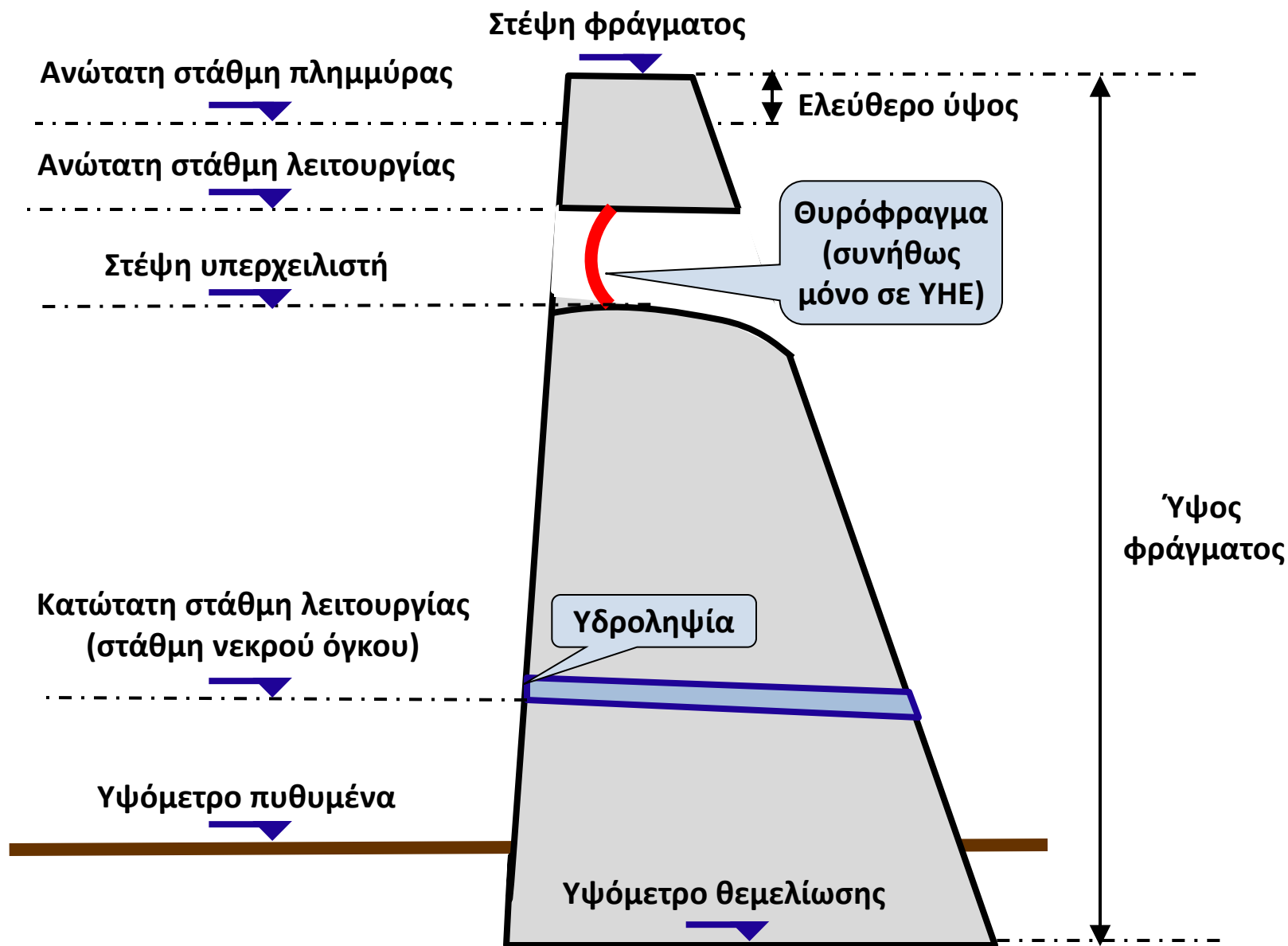


**Ταμιευτήρας Πολυφύτου:** ύδρευση, άρδευση, Υ/Η ενέργεια, ψύξη ΑΗΣ

# Βασικές έννοιες ταμιευτήρων

- ❑ **Ταμιευτήρας ή λεκάνη κατάκλυσης:** κλειστή κοιλότητα που δημιουργείται ανάντη ενός φράγματος, τα όρια της οποίας μεταβάλλονται ανάλογα με τον αποθηκευμένο όγκο νερού
- ❑ **Πυθμένας:** χαμηλότερο υψομετρικά σημείο ταμιευτήρα (στον πόδα του φράγματος)
- ❑ **Κατώτατη στάθμη λειτουργίας:** ελάχιστη τιμή στάθμης νερού στον ταμιευτήρα, πάνω από την οποία μπορεί να παραληφθεί νερό από τα έργα υδροληψίας
- ❑ **Ανώτατη στάθμη λειτουργίας:** ανώτερο υψομετρικό όριο για την έναρξη της υπερχειλίσης
  - στέψη υπερχειλιστή (ελεύθεροι υπερχειλιστές, χωρίς θυροφράγματα)
  - άνω παρειά θυροφραγμάτων (εκχειλιστές)
- ❑ **Ανώτατη στάθμη πλημμύρας:** μέγιστη στάθμη που εκτιμάται ότι μπορεί να ανέλθει το νερό στη διάρκεια της πλημμύρας σχεδιασμού του υπερχειλιστή
- ❑ **Νεκρός όγκος:** χωρητικότητα ταμιευτήρα μέχρι την ΚΣΛ, που στο πέρας της ζωής του έργου προβλέπεται να καταληφθεί από φερτά (μη απολήψιμο απόθεμα)
- ❑ **Ωφέλιμο απόθεμα:** όγκος νερού που μπορεί να αξιοποιηθεί για διάφορες χρήσεις, που υπολογίζεται αφαιρώντας το νεκρό όγκο από το συνολικό απόθεμα
- ❑ **Ωφέλιμη χωρητικότητα:** μέγιστος απολήψιμος όγκος νερού (μέγιστο ωφέλιμο απόθεμα), που ορίζεται ως η διαφορά αποθέματος μεταξύ της ΑΣΛ και της ΚΣΛ
- ❑ **Πλημμυρικός όγκος:** μέγιστος όγκος πλημμύρας που μπορεί να ανασχεθεί στον ταμιευτήρα, θεωρώντας την ΑΣΛ κατά την έναρξη της πλημμύρας σχεδιασμού
- ❑ **Καμπύλες ταμιευτήρα:** σχέσεις στάθμης-επιφάνειας και στάθμης-αποθέματος

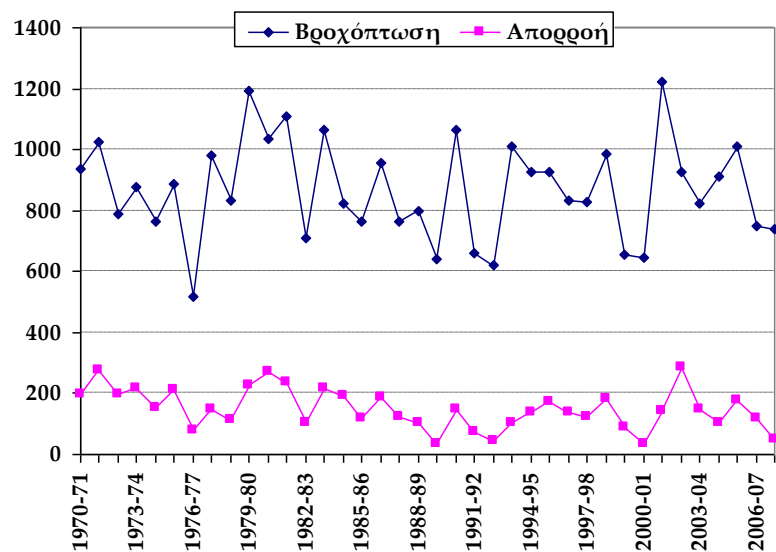
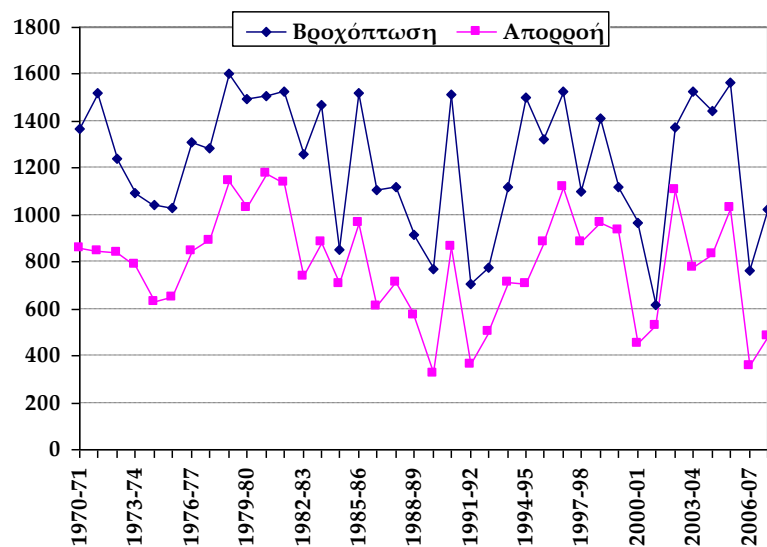
# Χαρακτηριστικά υψομετρικά μεγέθη



# Κριτήρια επιλογής περιοχής ταμίευσης: Υδρολογία

Η απορροή που παράγεται σε μια θέση ποταμού εξαρτάται από τις **υδροκλιματικές συνθήκες** (βροχόπτωση, θερμοκρασία, κτλ.) και τα **φυσιογραφικά χαρακτηριστικά** της λεκάνης, που είναι:

- μορφολογία (γεωμετρία, ανάγλυφο, υδρογραφικό δίκτυο)
- εδαφολογικά χαρακτηριστικά (υδατοπερατότητα, υδραυλική αγωγιμότητα)
- χρήσεις γης και φυτοκάλυψη



## Εύηνος (ανάντη φράγματος)

Δυτική Ελλάδα, πλούσια σε βροχοπτώσεις, εδάφη μέτριας και χαμηλής περατότητας

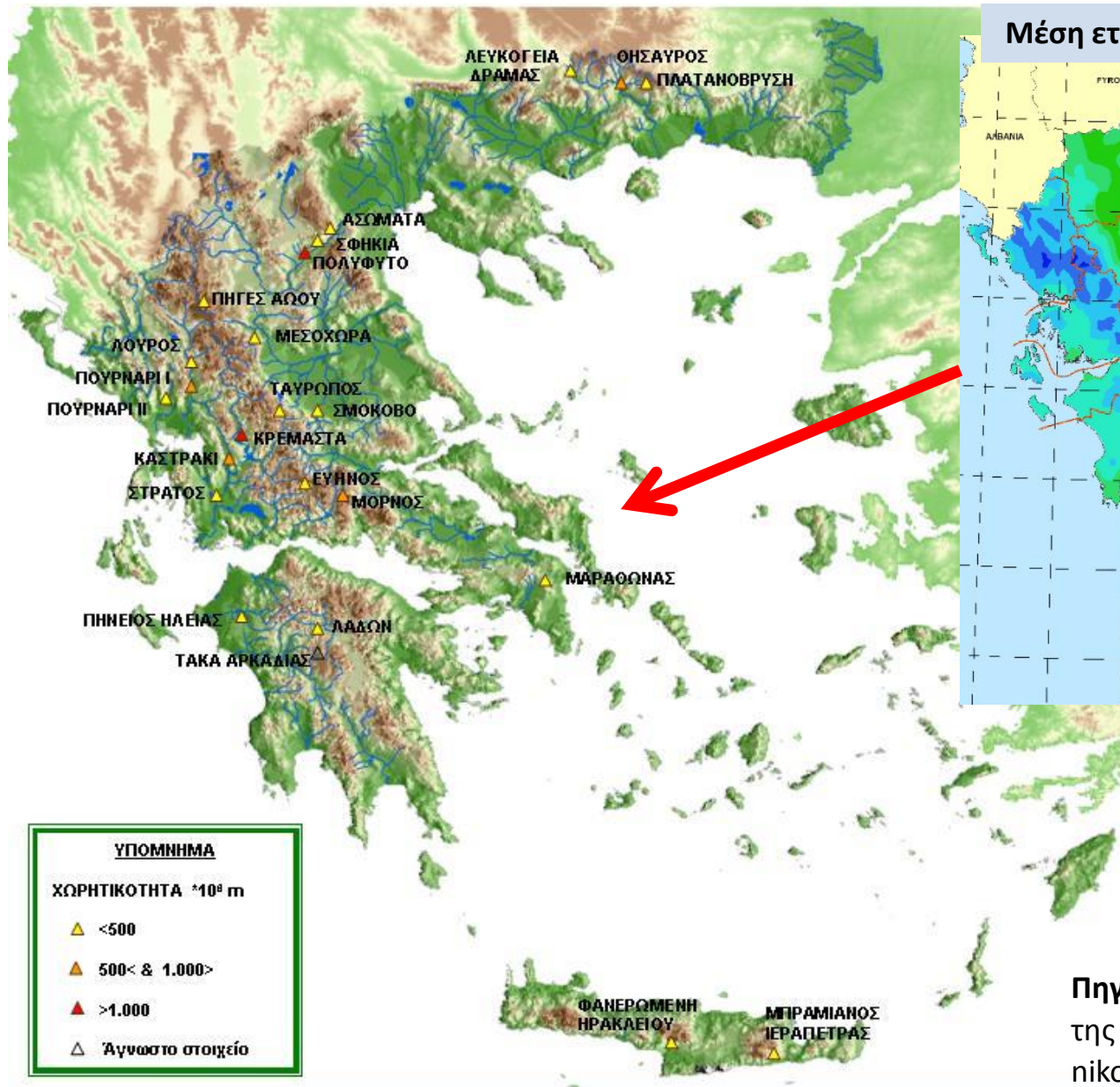
**Υπερετήσιος συντελεστής απορροής = 64%**

## Βοιωτικός Κηφισός (ανάντη Υλίκης)

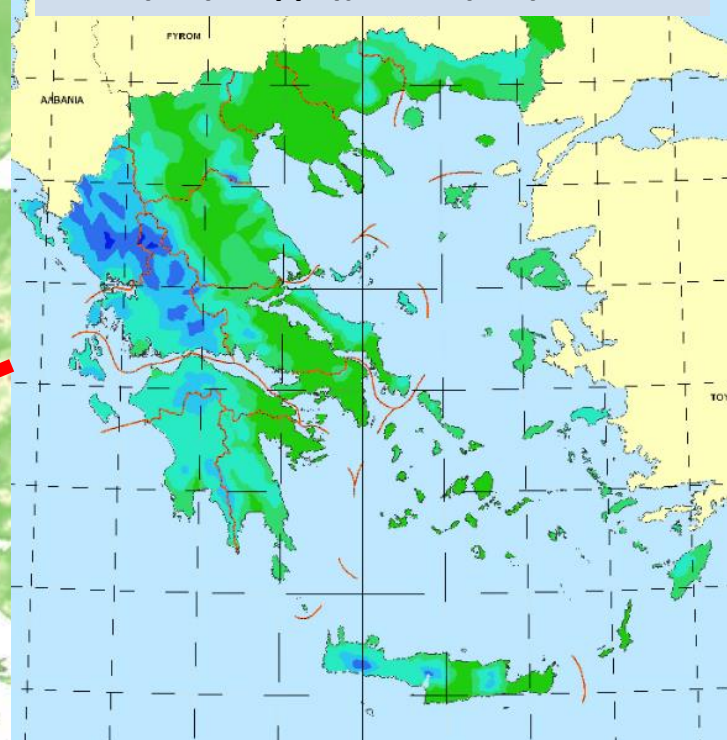
Ανατολική Ελλάδα, λιγότερες βροχοπτώσεις, σημαντική ανάπτυξη σχηματισμών υψηλής περατότητας (καρστικοί ασβεστόλιθοι)

**Υπερετήσιος συντελεστής απορροής = 17%**

# Μεγάλοι ταμιευτήρες της Ελλάδας



Μέση ετήσια βροχόπτωση στην Ελλάδα



Πηγή: Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων (<http://www.itia.ntua.gr/782/>)

Πηγή: Βάση δεδομένων ταμιευτήρων της Ελλάδας ([http://users.itia.ntua.gr/nikos/arch\\_int/CDfrag/index.htm](http://users.itia.ntua.gr/nikos/arch_int/CDfrag/index.htm))

# Εκτίμηση υδατικού δυναμικού λεκάνης απορροής

- Ανάλυση δείγματος παρατηρημένων παροχών στη θέση του φράγματος
  - Προϋποθέτει τη λειτουργία υδρομετρικού σταθμού για ικανό χρονικό διάστημα, εξοπλισμένου με όργανο συνεχούς καταγραφής της στάθμης του ποταμού, και τη διεξαγωγή συστηματικών υδρομετρήσεων για την κατάρτιση αξιόπιστων σχέσεων στάθμης-παροχής
  - Μικρού μήκους και περιορισμένης ακρίβειας δείγματα μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένα στατιστικά συμπεράσματα σχετικά με το υδατικό δυναμικό της λεκάνης και την απαιτούμενη χωρητικότητα του ταμιευτήρα (παραδείγματα: Μόρνος, Σμόκοβο)
  - Μείζον μειονέκτημα η ένδεια υδρομετρικής πληροφορίας στην Ελλάδα (ανεπαρκές και κακά συντηρημένο δίκτυο – πλην ΔΕΗ, δύσκολη πρόσβαση σε πρωτογενή δεδομένα, υψηλό κόστος)
- Έμμεση εκτίμηση μέσω υδρολογικών μοντέλων
  - Μοντέλα μετασχηματισμού της βροχόπτωσης (και δυνητικής εξατμοδιαπνοής) σε απορροή, τα οποία περιγράφουν τις βασικές διεργασίες του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη
  - Διατίθεται πληθώρα μοντέλων, με διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας και απαιτήσεις σε δεδομένα (υδρολογικά, γεωγραφικά)
  - Μείζον ζήτημα η εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων, που πρέπει να βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα παροχών (βαθμονόμηση)
- «Μεταφορά» υδρολογικής πληροφορίας από άλλες θέσεις
  - Εφαρμογή στοιχειωδών σχέσεων αναγωγής, με βάση τον λόγο των εκτάσεων των ανάντη λεκανών (στην απλούστερη περίπτωση:  $q_1/q_2 = A_1/A_2$ )
  - Υποθέτει ότι η λεκάνη ενδιαφέροντος και η λεκάνη στην οποία υπάρχουν μετρήσεις έχουν παρόμοια υδρολογική απόκριση, λόγω κοινών φυσιογραφικών χαρακτηριστικών

# Υδατικό δυναμικό ταμιευτήρων: Εκτίμηση εισροών από μετρήσεις σε άλλες θέσεις της λεκάνης

- Σε αρκετές περιπτώσεις διατίθενται μετρήσεις παροχής σε διαφορετικές θέσεις της λεκάνης σε σχέση με τη θέση κατασκευής του έργου.
- Η συνήθης «μεταφορά» της απορροής με απλές εμπειρικές σχέσεις (π.χ. λόγος εμβαδών υπολεκανών) έχει αποδειχθεί εξαιρετικά επισφαλής, λόγω της έντονης ετερογένειας των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης και, συνεπώς, των υδρολογικών διεργασιών.
- Η εκτίμηση της απορροής στη θέση ενδιαφέροντος γίνεται μέσω **υδρολογικού μοντέλου**, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρημένες απορροές στην εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου.



Λεκάνη φρ. Γαδουρά (Ευστρατιάδης και Ρόζος, 2010)



Λεκάνη φρ. Σμοκόβου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2008)



# Υδατικό δυναμικό ταμιευτήρων: Εκτίμηση εισροών σε πολύπλοκα υδρογεωλογικά συστήματα

- Η πολύπλοκη γεωλογική και τεκτονική δομή της Ελλάδας διαμορφώνει σύνθετες υδρογεωλογικές συνθήκες (π.χ. καρστικά συστήματα), δημιουργώντας σημαντικές δυσκολίες στην οριοθέτηση των υδροφορέων, που μπορεί να τροφοδοτούνται από διαφορετικές επιφανειακές λεκάνες ή να εκφορτίζονται σε διαφορετικές λεκάνες.
- Στις υδρολογικές μελέτες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι **αλληλεπιδράσεις των επιφανειακών και υπόγειων νερών** (κατεισδύσεις, διηθήσεις, υπόγεια υδραυλική επικοινωνία γειτονικών λεκανών, διαφυγές).

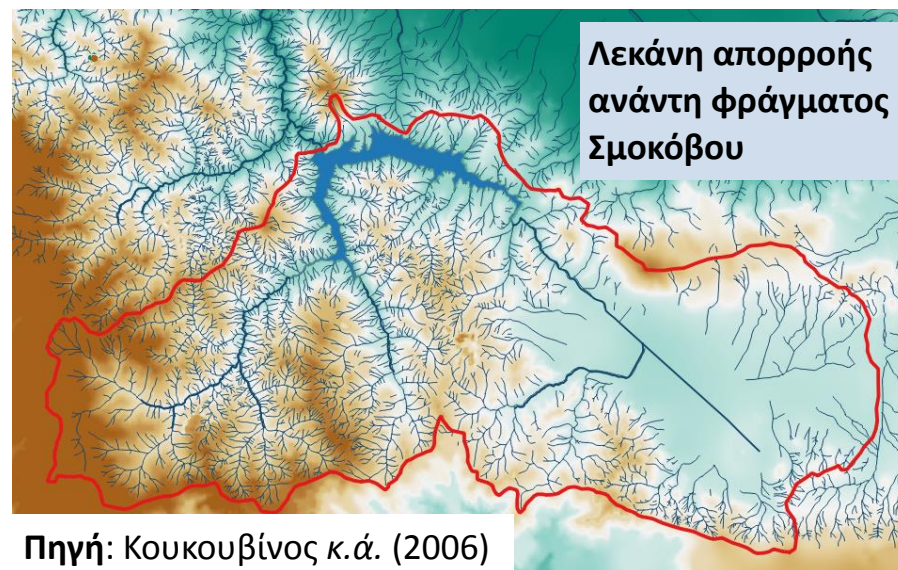
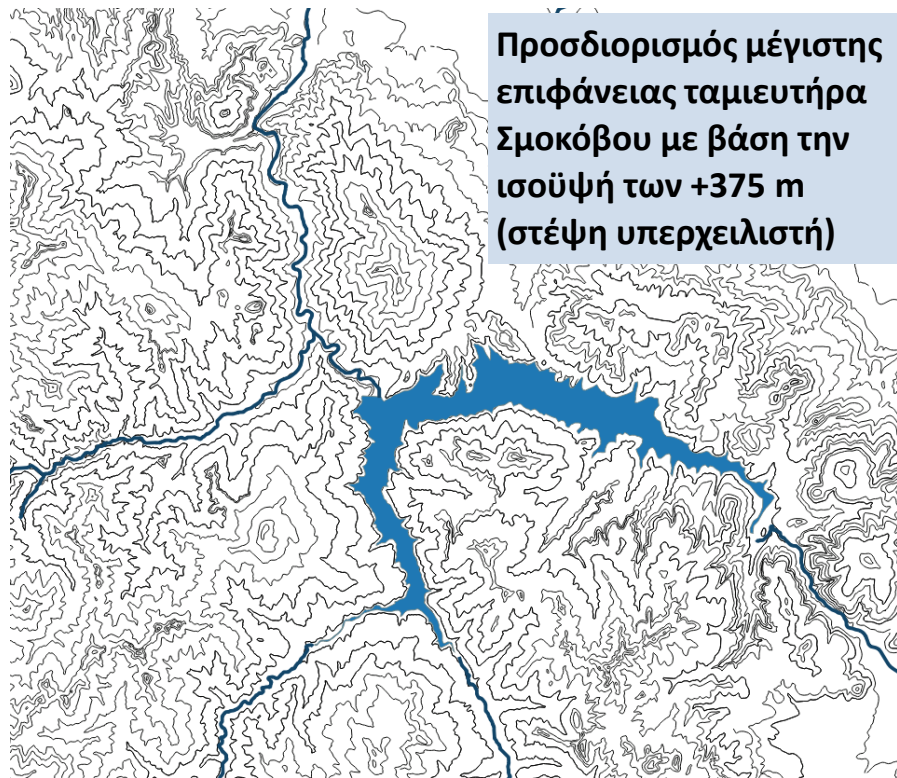


**Καταβόθρες Χώνου** (φυσική αποστράγγιση οροπέδιου Λασιθίου): Εκτιμάται ότι το 30 ως 50% της απορροής εκφορτίζεται στη λεκάνη Αποσελέμη, μέσω των καρστικών πηγών Κασταμονίτσας



# Κριτήρια επιλογής περιοχής ταμίευσης: Ανάγλυφο

- Βέλτιστο ανάγλυφο εφόσον εξασφαλίζει σημαντικά υψηλότερο ρυθμό αύξησης της **χωρητικότητας** του ταμιευτήρα σε σχέση με το ρυθμό αύξησης του **ύψους φράγματος** (κόστος έργου) και σχετικά μικρό ρυθμό αύξησης της **επιφάνειας κατάκλυσης** (κόστος απαλλοτριώσεων, περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις).



# Καμπύλες στάθμης-αποθέματος-επιφάνειας

- Εκφράζουν τη μεταβολή του (μικτού) αποθέματος,  $s$ , και της επιφάνειας της λεκάνης κατάκλυσης,  $a$ , συναρτήσει της στάθμης νερού στον ταμιευτήρα,  $z$ .
- Οι συναρτήσεις  $s = f_1(z)$ , και  $a = f_2(z)$  κατασκευάζονται με βάση ζεύγη τιμών  $(z_i, a_i)$ , που προκύπτουν με εμβαδομέτρηση των επιφανειών πάνω σε τοπογραφικό χάρτη.
- Στη γενική περίπτωση θεωρείται μια σχέση δύναμης μεταξύ επιφάνειας και στάθμης:

$$a(z) = a_1 \left( \frac{z - z_0}{z_1 - z_0} \right)^\lambda$$

όπου  $a_1$  η επιφάνεια του ταμιευτήρα σε μια δεδομένη στάθμη  $z_1$ ,  $z_0$  η κατώτερη στάθμη του ταμιευτήρα, για την οποία μηδενίζεται η επιφάνεια, και  $\lambda$  συντελεστής.

- Για κάθε διαδοχικό ζεύγος  $(z_1, a_1)$  και  $(z_2, a_2)$  η τιμή του  $\lambda$  εκτιμάται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{\ln(a_2/a_1)}{\ln[(z_2 - z_0)/(z_1 - z_0)]}$$

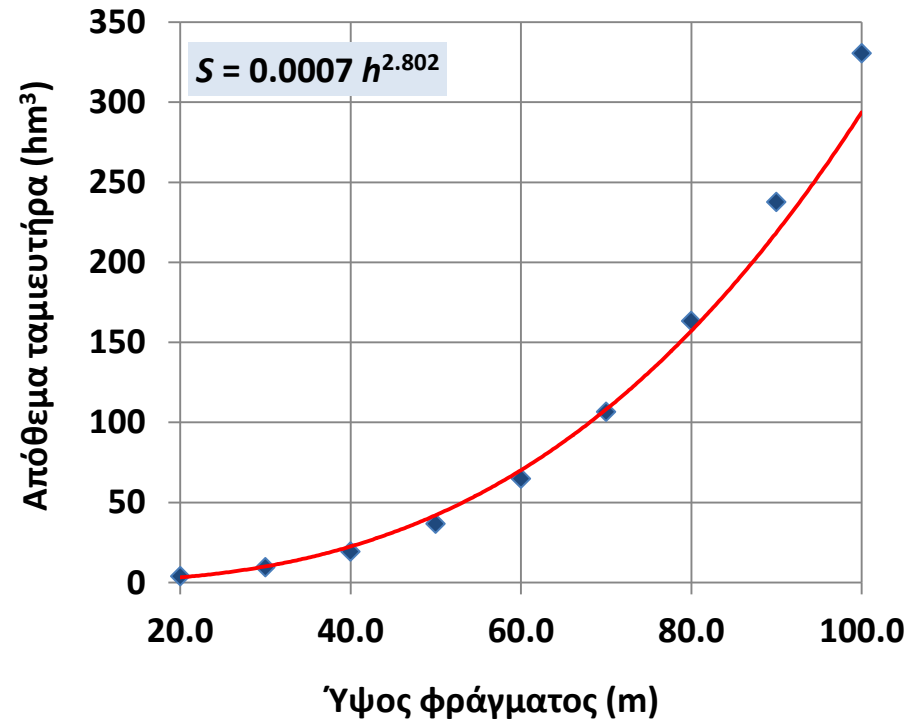
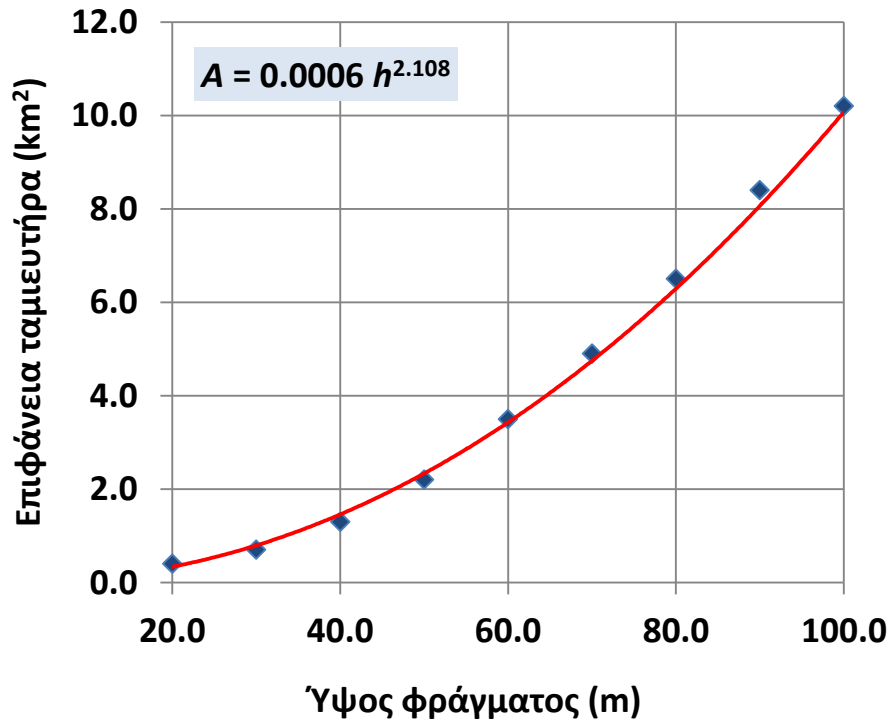
- Ο όγκος  $\Delta s$  που περικλείεται ανάμεσα στις στάθμες  $z_1$  και  $z_2$  είναι:

$$\Delta s = \int_{z_1}^{z_2} a(z) dz = \frac{(z_2 - z_0) a_2 - (z_1 - z_0) a_1}{\lambda + 1}$$

- Η σχέση  $s = f_1(z)$  κατασκευάζεται με βάση τον γνωστό όγκο  $\Delta s$  που περικλείεται μεταξύ κάθε ζεύγους διαδοχικών σταθμών  $(z_1, z_2)$  και αντίστοιχων επιφανειών  $(a_1, a_2)$
- Εναλλακτικά, η σχέση  $s = f_1(z)$  παράγεται με διαδοχικές γραμμικές παρεμβολές:

$$\Delta s = (a_2 + a_1) (z_2 - z_1) / 2$$

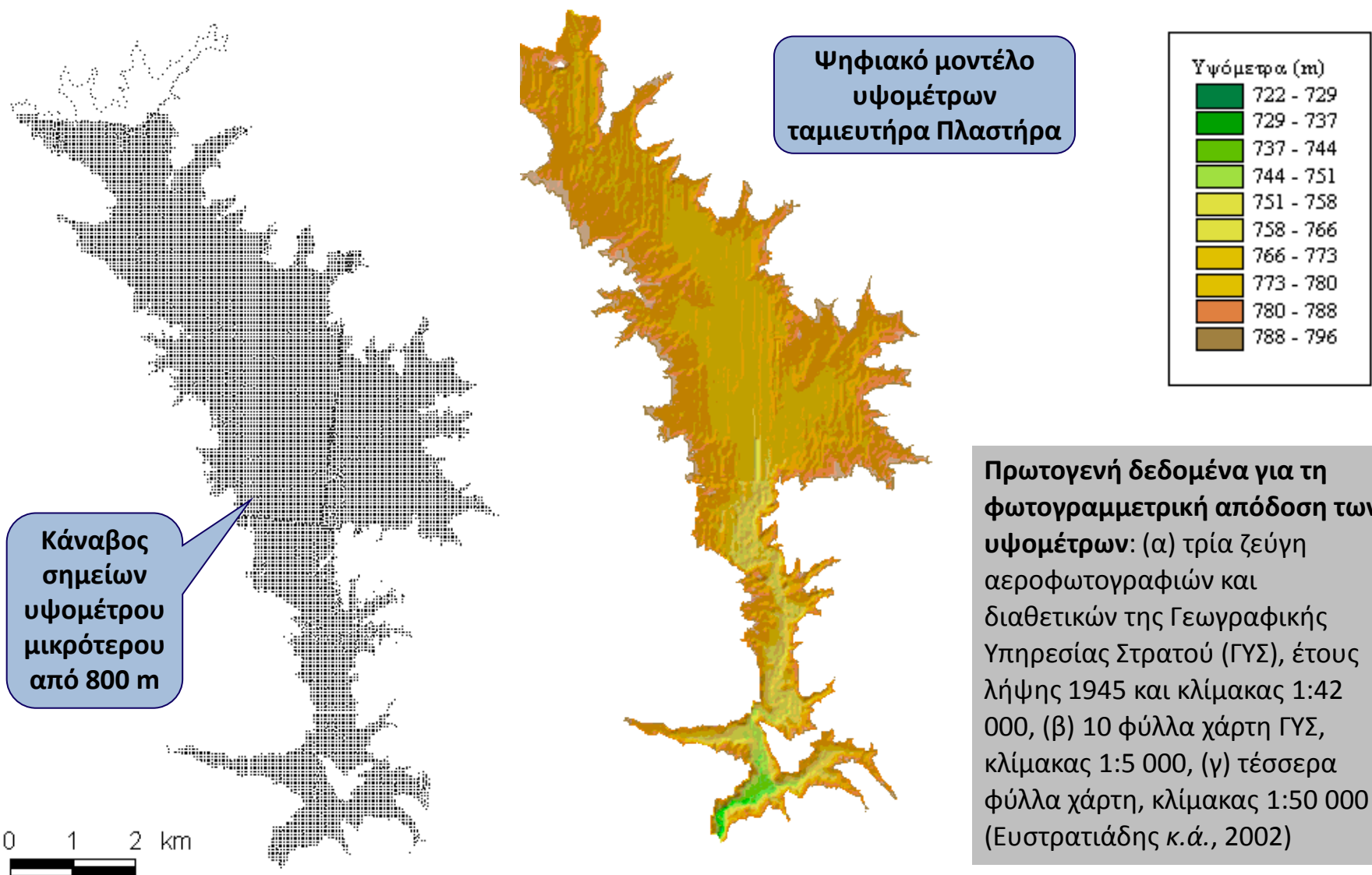
# Σχέση ύψους φράγματος – επιφάνειας κατάκλυσης – όγκου ταμίευσης (παράδειγμα ταμιευτήρα Σμοκόβου)



## Παρατηρήσεις

- Θεωρείται ύψος φράγματος από τον πυθμένα (+285 m) και όχι από τη θεμελίωση.
- Η σημειοσειρά των επιφανειών έχει προκύψει από εμβαδομετρήσεις, για απόλυτα υψόμετρα από +285 m (υψόμετρο πυθμένα) έως +385 m.
- Η σημειοσειρά των αποθεμάτων έχει εκτιμηθεί υποθέτοντας παρεμβολή τύπου δύναμης μεταξύ των διαδοχικών τιμών στάθμης και επιφάνειας.

# Κατάρτιση σχέσης στάθμης-αποθέματος-επιφάνειας με χρήση ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων



# Κριτήρια επιλογής περιοχής ταμίευσης: Γεωλογία

- **Στεγανότητα** λεκάνης κατάκλυσης
  - Πλευρικές ή υπόγειες διαφυγές νερού:
    - μέσω του εδαφικού καλύμματος (αλλούβια, κορήματα, παλαιοκοίτες)
    - μέσω του βραχώδους υποβάθρου
    - μέσω ζωνών ρηγμάτων
  - Αναγνώριση από το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα (μη αιτιολογημένη πτώση στάθμης τις περιόδους χαμηλών εκροών) και, κατά περίπτωση, την εμφάνιση πηγών κατάντη
  - Επιπτώσεις:
    - Μείωση αξιοποιήσιμου υδατικού δυναμικού (εξαίρεση: αντιπλημμυρικά φράγματα)
    - Ανύψωση υδροφόρου ορίζοντα → αύξηση τάσης πόρων → αστάθεια στα πρανή
  - Οικονομικά ασύμφορα τα έργα στεγανοποίησης μεγάλης κλίμακας
- **Ευστάθεια πρανών** λεκάνης κατάκλυσης και αντερεισμάτων, για αποφυγή κατολισθήσεων
  - Μείωση χωρητικότητας ταμιευτήρα, λόγω πλήρωσης της λεκάνης κατάκλυσης
  - Κίνδυνος τσουνάμι (σε ακραία φαινόμενα κατολίσθησης)
- Παρουσία εδαφικών σχηματισμών **χαμηλής διαβρωσιμότητας** στην ανάντη λεκάνη
  - Παγκόσμιος μέσος ετήσιος ρυθμός απώλειας χωρητικότητας ταμιευτήρων = 1%
  - Περιορισμένη στερεοαπορροή → αύξηση χρόνου ζωής ταμιευτήρα, τοποθέτηση υδροληψίας σε χαμηλότερο υψόμετρο (μικρότερος νεκρός όγκος)
  - Έλεγχος διαβρωσιμότητας μέσω έργων ορεινής υδρονομίας

# Παράδειγμα στεγανοποίησης: ταμιευτήρας Μόρνου

- Στην περιοχή Πύρνος, 6 km ανατολικά του φράγματος, λόγω της ύπαρξης σχηματισμών υψηλής διαπερατότητας (καρστικοί ασβεστόλιθοι, έντονα διαρρηγμένοι), παρατηρούνταν διαφυγές νερού της τάξης των 500 L/s (~7% της μέσης ετήσιας απορροής).
- Τα έργα στεγάνωσης περιλαμβάνουν:
  - επένδυση από ασφαλτοσκυρόδεμα, σε πολλαπλές στρώσεις, πάνω σε συμπυκνωμένο διαπερατό επίχωμα, μέσου πλάτους 100 m, σε μήκος περίπου 2.5 km (ολική επιφάνεια στεγάνωσης 236 000 m<sup>2</sup>)
  - σήραγγα τιμεντενέσεων μήκους 3.2 km, εφοδιασμένη με στοές αποστράγγισης στον πόδα της επένδυσης.
- Μετά κάποιες βελτιωτικές παρεμβάσεις στα μέσα της δεκαετίας του 1980, οι διαφυγές μειώθηκαν στα 200-225 L/s.







# Έλεγχοι στεγανότητας παρουσία ασβεστολίθων



Πηγή: Μαρίνος, μετά από προσαρμογή

# Εισροή φερτών σε ταμιευτήρες

- **Μηχανισμοί διάβρωσης/αποσάρθρωσης → ανάντη λεκάνη απορροής**
  - Διαβρωτικότητα βροχόπτωσης (ραγδαιότητα, διάρκεια και συχνότητα καταιγίδων)
  - Διαβρωτικότητα ανέμου (αμελητέα στην Ελλάδα)
  - Διαβρωσιμότητα εδάφους (συνεκτικότητα εδαφικού υλικού, αντίσταση στην αποσάθρωση, διηθητικότητα) → ποσοστό άμμου, ιλύος, αργίλου
  - Αποστραγγιστική ικανότητα λεκάνης (κλίσεις)
  - Χρήσεις γης – φυτοκάλυψη
  - Μέτρα και έργα προστασίας έναντι της διάβρωσης (βαθμίδες, αρδευτικά κανάλια)
- **Μηχανισμοί στερεομεταφοράς → ανάντη υδρογραφικό δίκτυο**
  - Γεωμετρικά χαρακτηριστικά (πυκνότητα δικτύου, περιοχές διάβρωσης και απόθεσης, μαιανδρισμοί)
  - Υδραυλικά χαρακτηριστικά της ροής
- **Μηχανισμοί απόθεσης → ταμιευτήρας**
  - Μείωση (μέχρι μηδενισμού) ταχύτητας ροής στην είσοδο του ταμιευτήρα
  - Απόθεση στα ανάντη (εκβολές ποταμών)

## Υψηλή αντοχή σε διάβρωση:

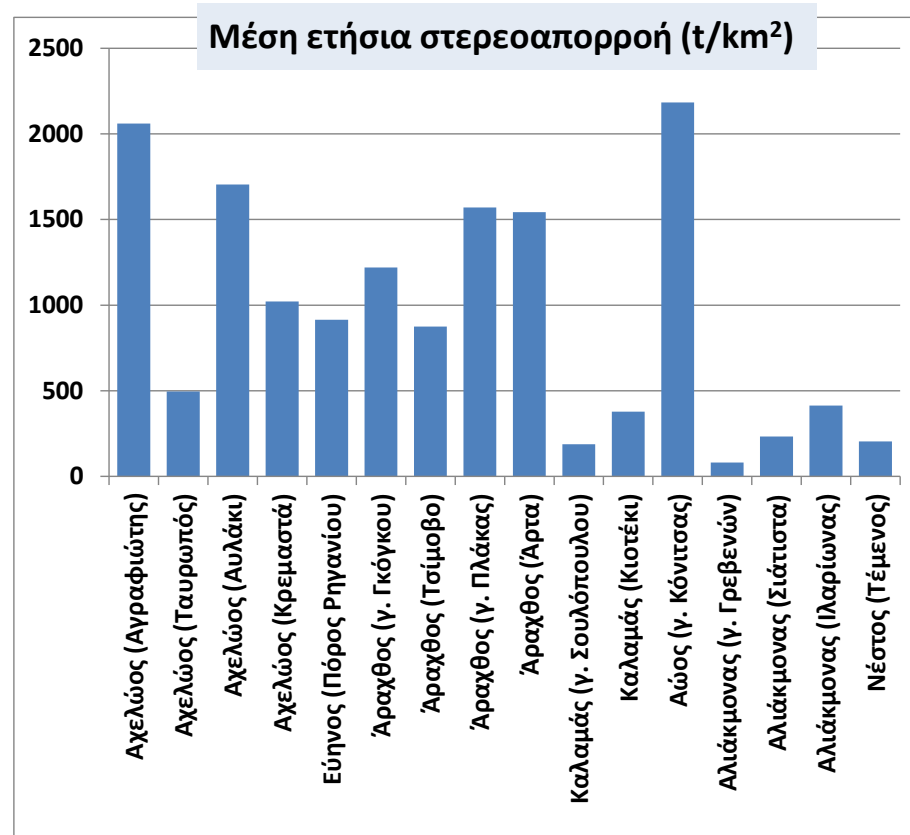
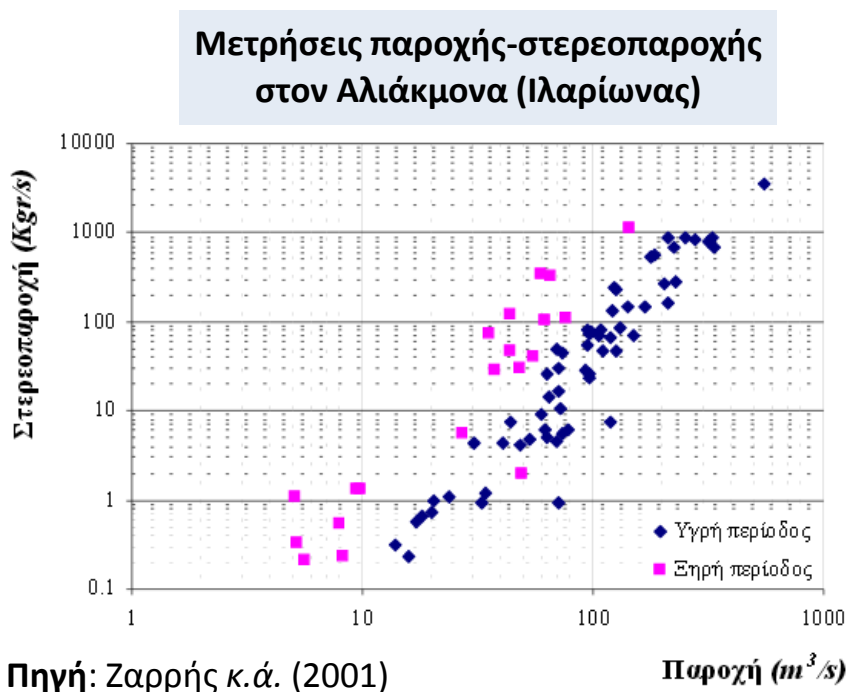
λεπτοκρυσταλλικοί γρανίτες, ισχυρά συμπαγοποιημένοι ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι (γενικά), διαβάσες, γάββροι, χαλαζίτες, φυλλίτες

## Χαμηλή αντοχή σε διάβρωση:

αδροκρυσταλλικοί γρανίτες, ελαφρά συμπαγοποιημένοι ψαμμίτες, βασάλτες (γενικά), δολομίτες, μάρμαρα, μαλακά ιζηματογενή, σχιστόλιθοι, φλύσχης

# Διαστασιολόγηση νεκρού όγκου ταμιευτήρα

- Μέθοδοι εκτίμησης στερεοαπορροής
  - Με βάση καμπύλες παροχής-στερεοπαροχής (στερεοϋδρομετρήσεις)
  - Εμπειρικές σχέσεις, π.χ. με βάση την ετήσια βροχόπτωση και την κατανομή των γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης (Κουτσογιάννης και Ταρλά, 1987)
  - Μοντέλα φυσικής βάσης, π.χ. αναθεωρημένη παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)
- Εκτίμηση όγκου φερτών με βάση την πυκνότητα (τυπικό εύρος 1.0 ως 1.6 t/m<sup>3</sup>)



# Εμπειρική εκτίμηση στερεοαπορροής στην Ελλάδα

Εφαρμόζεται η εμπειρική σχέση εκτίμησης της μέσης ετήσιας στερεοαπορροής, η οποία προέκυψε από δεδομένα στερεοϋδρομετρήσεων σε επτά θέσεις ποταμών στη ΒΔ Ελλάδα:

$$G = 15 \gamma e^{3P}$$

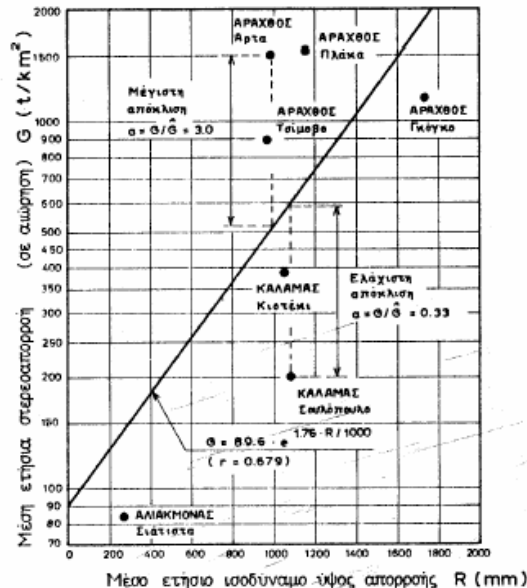
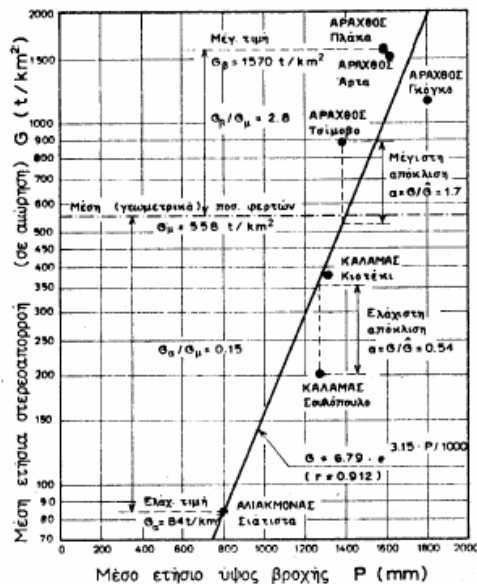
$G$ : μέση ετήσια στερεοαπορροή σε αιώρηση ( $t/km^2$ )

$P$ : μέσο ετήσιο ύψος βροχής (m)

$\gamma$ : σταθμισμένος γεωλογικός συντελεστής ( $\gamma = \kappa_1 \rho_1 + \kappa_2 \rho_2 + \kappa_3 \rho_3$ )

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ : κατηγορίες πετρωμάτων ως προς τη διαβρωσιμότητά τους

$\rho_1, \rho_2, \rho_3$ : ποσοστό εμφάνισης κάθε κατηγορίας στη λεκάνη απορροής



## Κατηγορίες πετρωμάτων

- ▣ Υψηλής διαβρωσιμότητας (αλλούβια, φλύσχη):  $\kappa_1 = 1.0$
- ▣ Μέτριας διαβρωσιμότητας (μάργες, σχιστόλιθοι, ψαμμίτες):  $\kappa_2 = 0.5$
- ▣ Χαμηλής διαβρωσιμότητας (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μεταμορφωμένα, εκρηξιγενή):  $\kappa_3 = 0.1$

Πηγή: Κουτσογιάννης και Ταρλά (1987)

# Αναθεωρημένη παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)

- Μέση ετήσια εδαφική απώλεια λόγω διάβρωσης (σε t/ha):

$$L = R K L_s C P$$

- Παράμετροι μοντέλου (κατανεμημένες στη λεκάνη απορροής):

- $R$  συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχής (MJ mm/ha h year), η οποία εξαρτάται από την κινητική ενέργεια της βροχής, που είναι συνάρτηση της έντασης της ημίωρης βροχόπτωσης
- $K$  συντελεστής διαβρωσιμότητας του εδάφους (t ha h/ha MJ mm), που εξαρτάται από τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής
- $L_s$  αδιάστατος τοπογραφικός συντελεστής, που εξαρτάται από τις γωνίες κλίσης του εδάφους
- $C$  αδιάστατος συντελεστής διαχείρισης της κάλυψης γης
- $P$  αδιάστατος συντελεστής ελέγχου της διάβρωσης, που εξαρτάται από την ύπαρξη τεχνικών έργων για τον έλεγχο της διάβρωσης και αποστράγγισης του εδάφους

- Εμπειρική εκτίμηση όγκου φερτών, πυκνότητας  $\rho$ , σε λεκάνη απορροής έκτασης  $A$ :

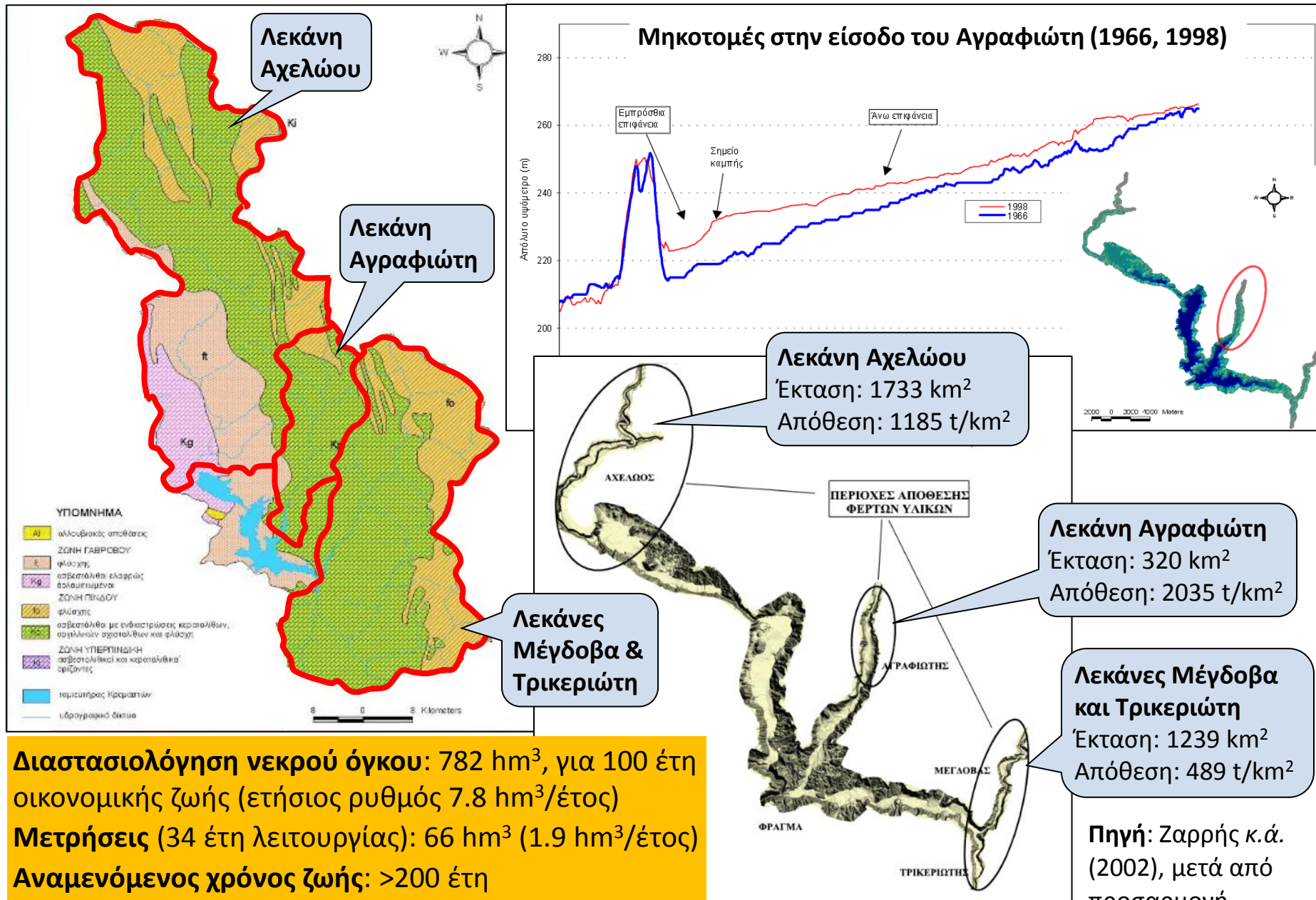
$$V = \rho \text{ SDR } L A$$

όπου SDR αδιάστατος συντελεστής, που εκφράζει το ποσοστό της εδαφικής απώλειας που συσσωρεύεται στην έξοδο της λεκάνης, και δίνεται από τη σχέση (Vanoni, 1975):

$$\text{SDR} = 0.42 A^{-0.125}$$

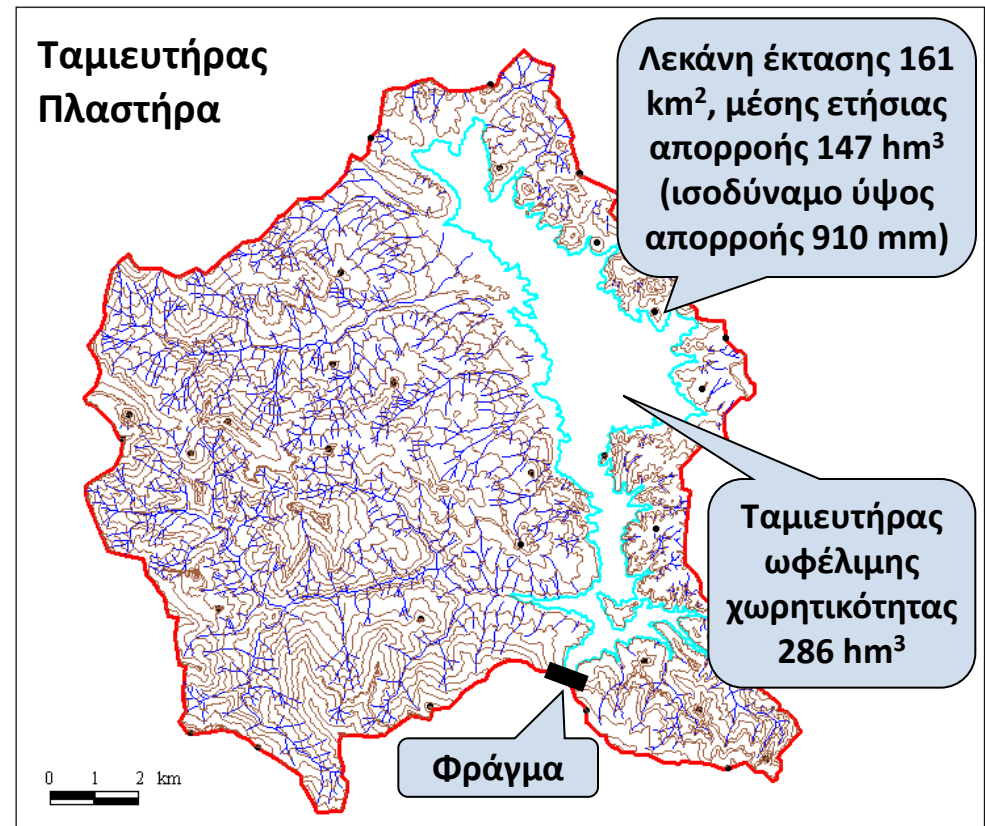
όπου  $A$  η έκταση της λεκάνης απορροής, σε  $\text{mi}^2$  ( $1 \text{ km}^2 = 0.386 \text{ mi}^2$ ).

# Παράδειγμα: Αποθέσεις φερτών στα Κρεμαστά

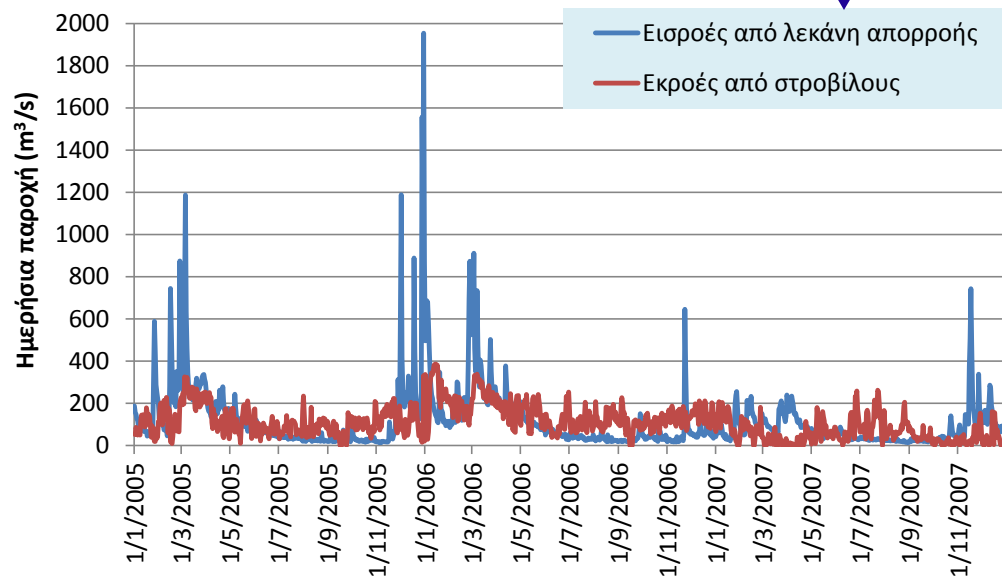
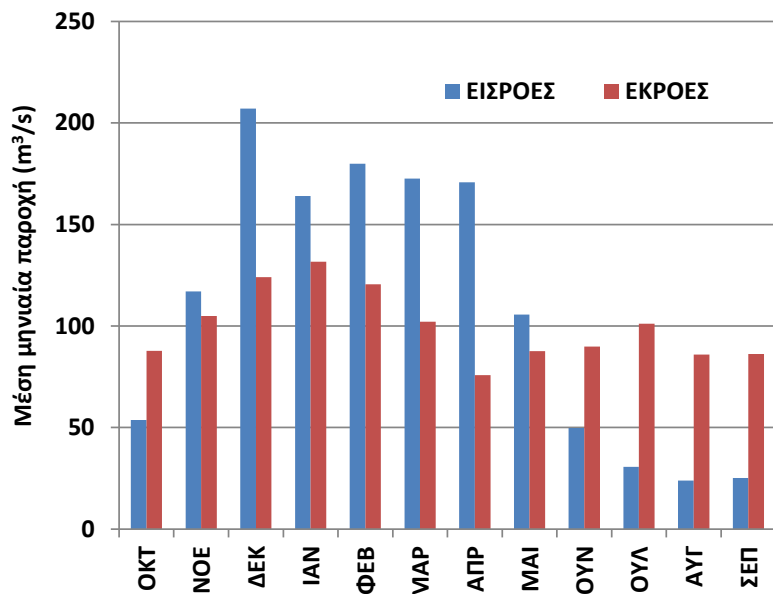
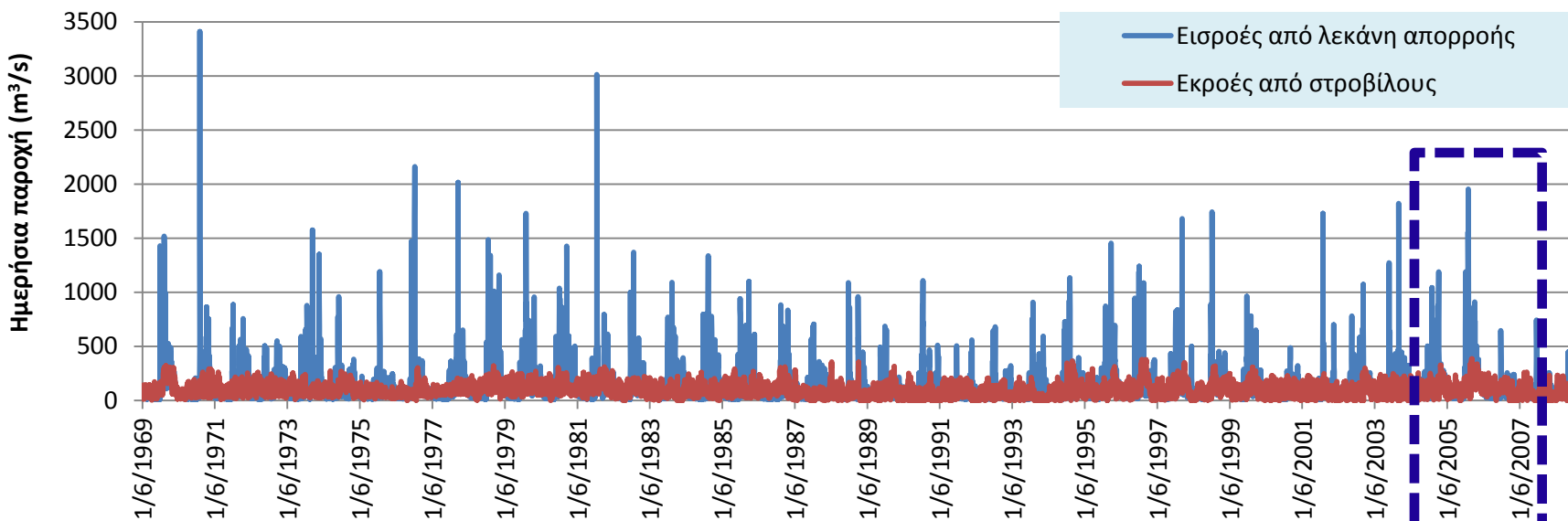


# Ο αναρρυθμιστικός ρόλος των ταμιευτήρων

- Απλά έργα υδροληψίας (π.χ., ΜΥΗΕ) αξιοποιούν μικρό μόνο ποσοστό της ετήσιας απορροής, καθώς δεν έχουν δυνατότητα αποθήκευσης των πλημμυρικών ροών (πρακτικά, αξιοποιούν μέρος μόνο της βασικής απορροής του ποταμού).
- Για την ουσιαστική αξιοποίηση των επιφανειακών υδατικών πόρων, απαιτείται η κατασκευή φραγμάτων, που επιτρέπουν την **αποθήκευση** (ταμίευση) νερού, με την οποία επιτυγχάνεται **χρονική αναρρύθμιση** της απορροής.
- Ακόμα και σε μεγάλους ταμιευτήρες, δεν είναι δυνατή η αξιοποίηση του συνόλου της απορροής, λόγω των φυσικών **απωλειών** νερού (εξάτμιση, υπερχειλίση, διαφυγές) και των **περιορισμών** του υδροσυστήματος (τεχνικών, διαχειριστικών).
- Ανάλογα με την **χωρητικότητα**,  $k$ , του έργου ταμιεύσης, σε σχέση με το **υδατικό δυναμικό** της λεκάνης (μέση ετήσια απορροή,  $i_M$ ), οι ταμιευτήρες διακρίνονται σε:
  - ημερήσιας ρύθμισης ( $k \ll i_M$ )
  - εποχιακής ρύθμισης ( $k < i_M$ )
  - υπερετήσιας ρύθμισης ( $k > i_M$ )

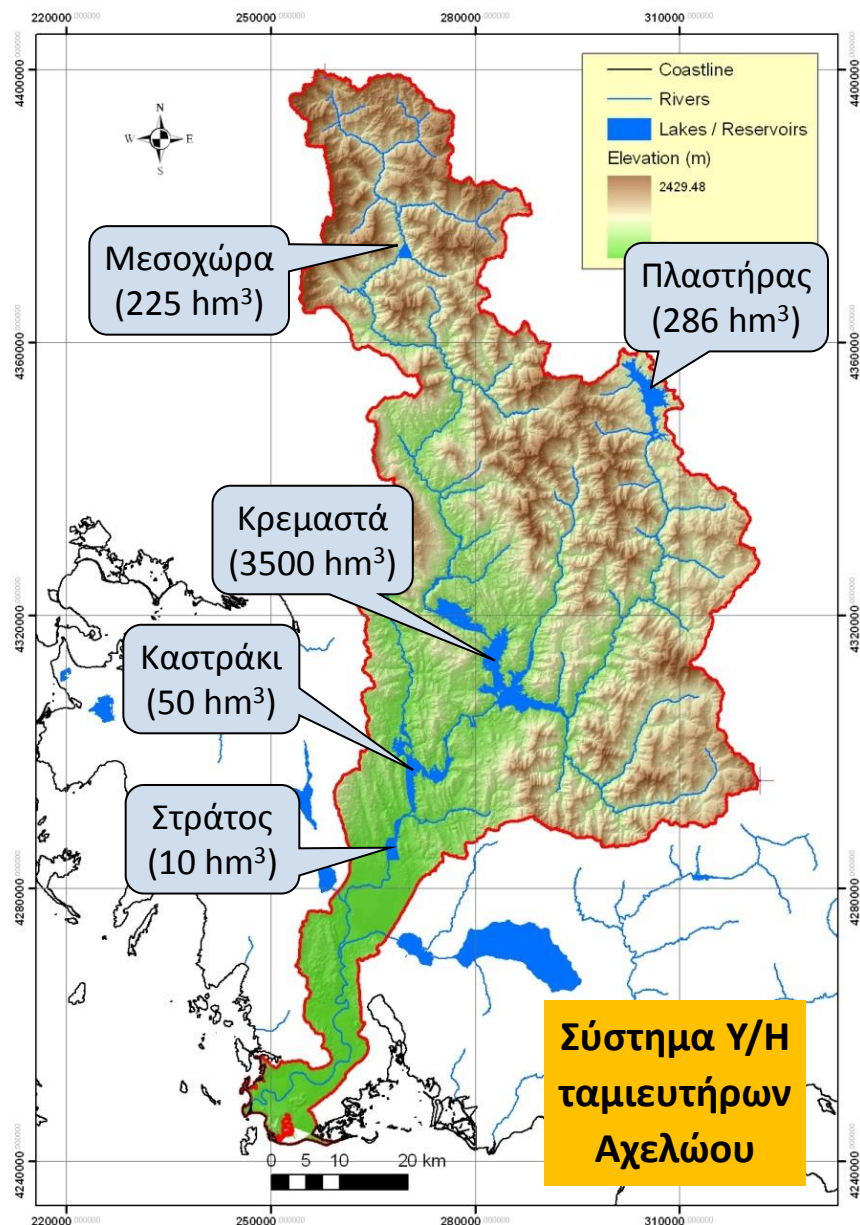


# Παράδειγμα αναρρυθμισμού ροής: Κρεμαστά





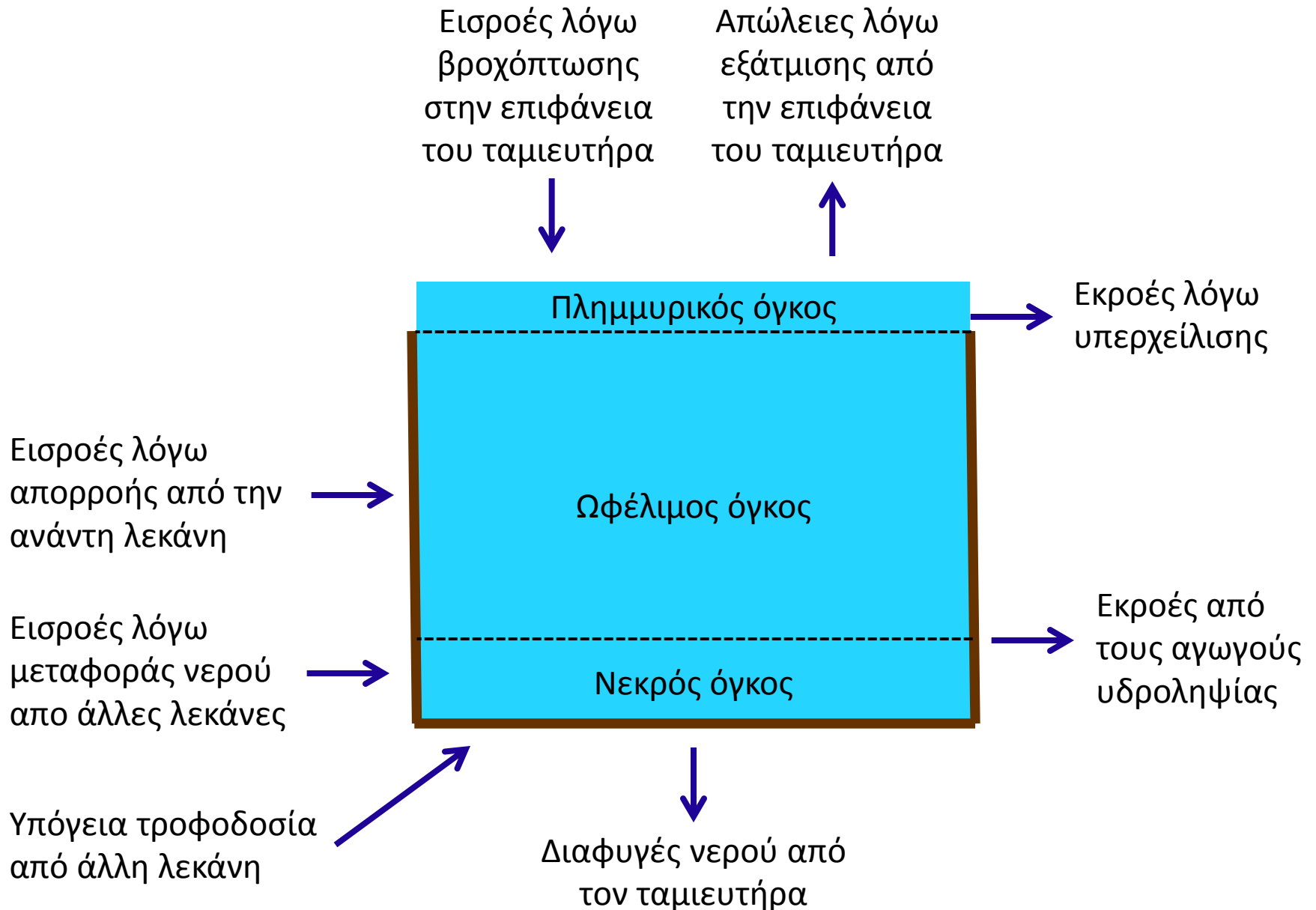
# Συνδυασμένη λειτουργία ταμιευτήρων



## Σύστημα Μόρνου-Ευήνου

- Ταμιευτήρας Μόρνου (υπερετήσια ρύθμιση)
  - Έκταση λεκάνης 588 km<sup>2</sup>
  - Μέση ετήσια απορροή 235 hm<sup>3</sup>
  - Ωφέλιμη χωρητικότητα 630 hm<sup>3</sup>
- Ταμιευτήρας Ευήνου (εποχιακή ρύθμιση)
  - Έκταση λεκάνης 352 km<sup>2</sup>
  - Μέση ετήσια απορροή 275 hm<sup>3</sup>
  - Ωφέλιμη χωρητικότητα 112 hm<sup>3</sup>

# Υδατικό ισοζύγιο ταμιευτήρα



# Μαθηματική διατύπωση υδατικού ισοζυγίου

- Γενική εξίσωση υδατικού ισοζυγίου, στο διακριτό χρονικό διάστημα  $(t, t + \Delta t)$ :

$$s_{t+\Delta t} = s_t + i_t + q_t + g_t + p_t - e_t - l_t - r_t - w_t$$

όπου:

- $s_t$  αποθηκευμένος όγκος νερού στην αρχή του χρονικού διαστήματος
  - $i_t$  εισροές από την ανάντη λεκάνη (φυσική απορροή που παράγεται στη λεκάνη ή/και ρυθμιζόμενες εκροές ανάντη ταμιευτήρα, εφόσον υπάρχει)
  - $q_t$  μεταφορά (εκτροπή) νερού από άλλες λεκάνες
  - $g_t$  υπόγεια τροφοδοσία από κοινά υδρογεωλογικά συστήματα
  - $p_t$  όγκος βροχής που προσπίπτει στην επιφάνεια του ταμιευτήρα
  - $e_t$  απώλειες λόγω εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα
  - $l_t$  απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών νερού (απώλειες από τη λεκάνη κατάκλυσης, απώλειες διαμέσου του πυθμένα ή/και του σώματος του φράγματος)
  - $r_t$  ρυθμιζόμενες εκροές (απολήψεις) από τον ταμιευτήρα
  - $w_t$  απώλειες λόγω υπερχειλίσης (εκροές νερού μέσω του υπερχειλιστή)
- Μοναδικά μετρήσιμα μεγέθη είναι η στάθμη του ταμιευτήρα και, υπό προϋποθέσεις, οι ρυθμιζόμενες εκροές.
  - Η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου είναι πιο ακριβής όσο αυξάνουν η χρονική κλίμακα και το μέγεθος του ταμιευτήρα.

# Οι έννοιες της ασφαλούς απόδοσης και αξιοπιστίας

- Η **αξιοπιστία** (reliability) αποτελεί θεμελιώδες μέγεθος ενός συστήματος υδατικών πόρων, και ορίζεται ως η **πιθανότητα** επίτευξης ενός συγκεκριμένου στόχου ή επίδοσης, για καθορισμένο χρονικό διάστημα και για καθορισμένες συνηθήκες του συστήματος,
- Συμπληρωματική της έννοιας της αξιοπιστίας,  $r$ , είναι η **πιθανότητα αστοχίας**:

$$\alpha = 1 - r = P(X < x^*)$$

όπου  $X$  τυχαία μεταβλητή που εκφράζει την πραγματική επίδοση που επιτυγχάνεται κατά το χρονικό διάστημα ελέγχου (π.χ., εκροή για ύδρευση, άρδευση, παραγωγή ενέργειας, κτλ.) και η  $x^*$  αντίστοιχη τιμή-στόχος που καλείται **ασφαλής απόδοση** (safe yield) ή, ειδικότερα:

- αν πρόκειται για ζήτηση νερού, καλείται **ασφαλής απόληψη** (safe release)
- αν πρόκειται για ζήτηση ενέργειας, καλείται **πρωτεύουσα ενέργεια** (firm energy)
- Σε ένα σύστημα υδατικών πόρων, η πραγματική επίδοση  $X$  είναι **τυχαία μεταβλητή**, επειδή διάφορες συνιστώσες ή διεργασίες του διέπονται από **αβεβαιότητα**.
- Βασικές παραδοχές:
  - Λαμβάνεται υπόψη μόνο η **υδρολογική αβεβαιότητα**, ενώ οι άλλες πηγές αβεβαιότητας του συστήματος αγνοούνται.
  - Οι υδρολογικές εισροές αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές, τα στατιστικά χαρακτηριστικά των οποίων θεωρείται ότι δεν μεταβάλλονται διαχρονικά (υπόθεση **στασιμότητας**, stationarity).
  - Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος είναι σταθερά (υπόθεση **μόνιμων συνθηκών**, steady state).

# Η σχέση ασφαλούς απόληψης – αξιοπιστίας σε απλά έργα υδροληψίας

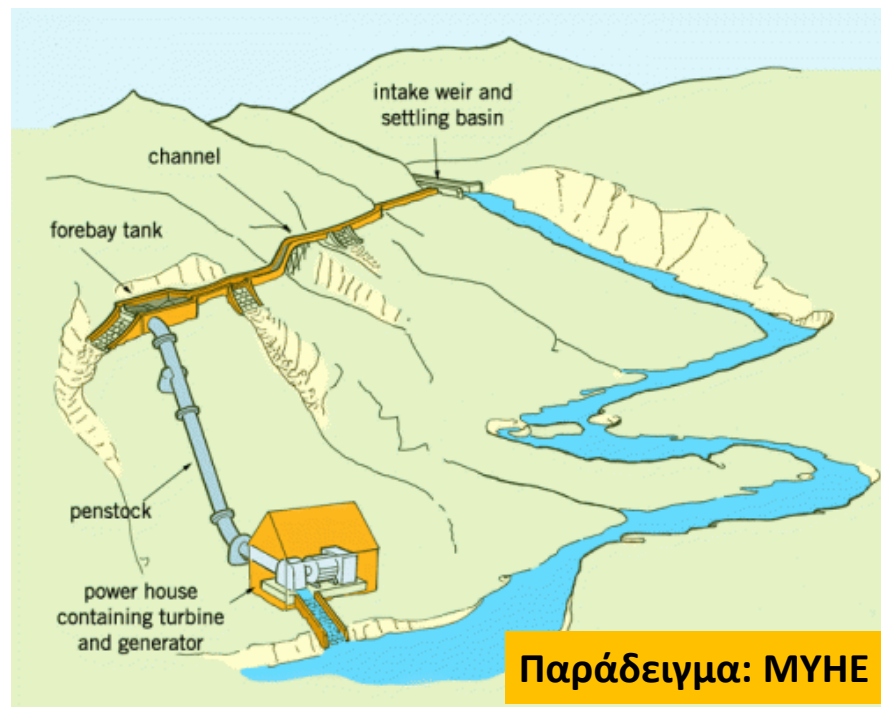
- Έστω έργο υδροληψίας σε θέση ποταμού, αμελητέας αποθηκευτικής ικανότητας, για το οποίο τίθεται ένας στόχος σταθερής ζήτησης  $d$  (θεωρείται ότι η ζήτηση μπορεί να παραληφθεί από το έργο μεταφοράς).
- Έστω ότι στη θέση του έργου διατίθεται ένα δείγμα (χρονοσειρά) εισροών  $i_t$  για ένα χρονικό ορίζοντα ελέγχου, μήκους  $n$ .
- Σε κάθε χρονικό βήμα  $t = 1, \dots, n$ , η απόληψη νερού από το έργο υδροληψίας δίνεται από το στοιχειώδες μοντέλο προσομοίωσης:

$$x_t = \min(i_t, d)$$

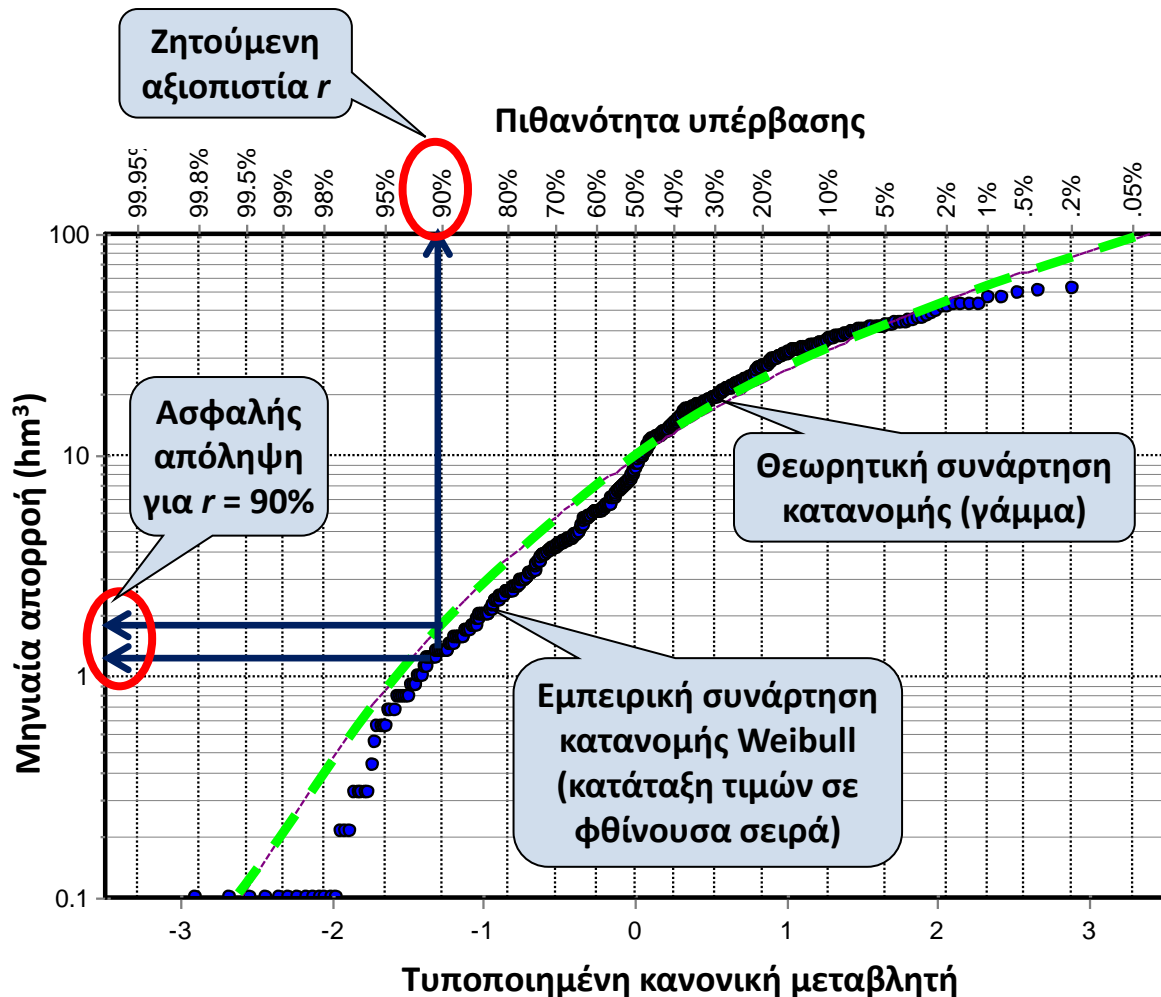
- Λόγω της απλής δομής του μοντέλου, η αξιοπιστία του συστήματος μπορεί να εκτιμηθεί **θεωρητικά**, προσαρμόζοντας μια **κατανομή πιθανοτήτων** στο δείγμα των εισροών.
- Εναλλακτικά, η αξιοπιστία μπορεί να εκτιμηθεί και **εμπειρικά**, ως η συχνότητα επίτευξης της ζήτησης  $d$  κατά το χρονικό διάστημα του δείγματος, δηλαδή:

$$r = n_d / n$$

όπου  $n_d$  το πλήθος των χρονικών βημάτων κατά τα οποία  $x_t = d$ .



# Αναλυτικές και εμπειρικές προσεγγίσεις εκτίμησης της ασφαλούς απόληψης (έργα χωρίς αναρρύθμιση)



Παράδειγμα εκτίμησης ασφαλούς απόληψης για επίπεδο αξιοπιστίας 90% (σε μηνιαία κλίμακα)

- Θεωρητική εκτίμηση, με προσαρμογή της κατανομής γάμμα τριών παραμέτρων (Pearson III) =  $1.8 hm^3$
- Εκτίμηση με βάση την εμπειρική συνάρτηση Weibull =  $1.2 hm^3$
- Εναλλακτικές εμπειρικές προσεγγίσεις (ισοδύναμες της Weibull):
  - Καμπύλη διάρκειας-μηνιαίας απορροής
  - Προσομοίωση λειτουργίας έργου και καταγραφή ποσοστού ελλειμμάτων (έμμεση εκτίμηση)

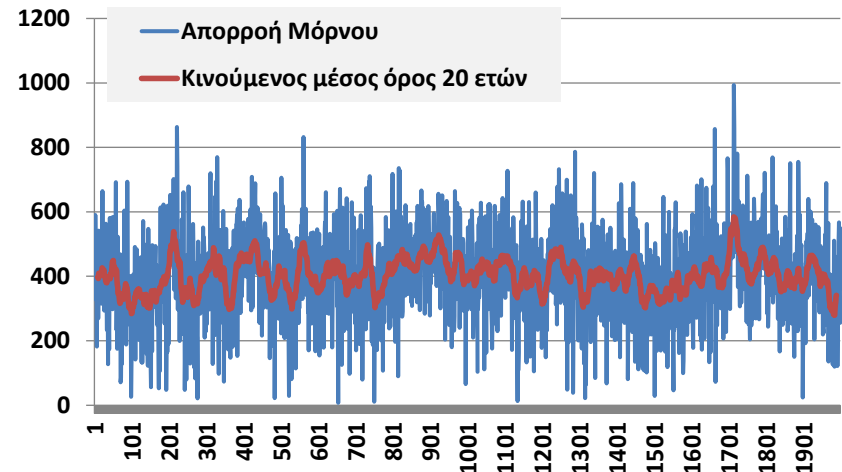
**Χρονοσειρά απορροών:** μηνιαίες εισροές στον ταμιευτήρα Πλαστήρα, εκτιμημένες από το υδατικό ισοζύγιο (υδρολογικά έτη 1966-67 ως 2009-10)

# Η σχέση ωφέλιμης χωρητικότητας ταμιευτήρα – ασφαλούς απόληψης – αξιοπιστίας

- Έστω ταμιευτήρας ωφέλιμης χωρητικότητας  $k$ , για τον οποίο τίθεται ένας στόχος σταθερής ζήτησης  $d$ , με δεδομένη χρονοσειρά εισροών  $i_t$  για ένα χρονικό ορίζοντα ελέγχου, μήκους  $n$ , και δεδομένο αρχικό απόθεμα  $s_0$ .
- Μαθηματική διατύπωση **μοντέλου προσομοίωσης** ταμιευτήρα, για κάθε  $t = 1, \dots, n$  :
  - $x_t = \min(s_{t-1} + i_t, d)$  για κάθε  $t = 1, \dots, n$  (απολήψεις)
  - $w_t = \max(0, s_{t-1} + i_t - x_t - k)$  για κάθε  $t = 1, \dots, n$  (υπερχειλίσσεις)
  - $s_t = s_{t-1} + i_t - x_t - w_t$  (τελικό απόθεμα)
- Λόγω της **αναρρυθμιστικής λειτουργίας** του ταμιευτήρα, η στατιστική δίαιτα των απολήψεων διαφοροποιείται από την δίαιτα των εισροών, και συνεπώς η αξιοπιστία του ταμιευτήρα μπορεί να εκτιμηθεί μόνο εμπειρικά, με βάση τη συχνότητα των ελλειμμάτων.
- Επειδή οι υδατικές ανάγκες μεταβάλλονται εποχιακά, η ποσότητα  $d = f(r, k)$ , δηλαδή η **ασφαλής απόληψη**, ορίζεται (όπως και η αξιοπιστία  $r$ ) σε ετήσια βάση, δηλαδή τα ελλείμματα αθροίζονται στο υδρολογικό έτος (η ετήσια κλίμακα πιο δυσμενής σε σχέση με τη μηνιαία).
- Εναλλακτικές διατυπώσεις:
  - Δίνονται  $d, r \rightarrow$  προσδιορισμός ωφέλιμης χωρητικότητας,  $k$  (πρόβλημα διαστασιολόγησης ταμιευτήρα, αναφέρεται στον σχεδιασμό του έργου)
  - Δίνονται  $k, d \rightarrow$  εκτίμηση ετήσιας αξιοπιστίας,  $r$  (πρόβλημα αποτίμησης της επίδοσης υφιστάμενου ταμιευτήρα)

# Προσομοίωση με χρήση συνθετικών χρονοσειρών

- Ενώ για τον ασφαλή σχεδιασμό ή διαχείριση των ταμιευτήρων θα ήταν επιθυμητή η γνώση της μακροχρόνιας χρονικής εξέλιξης των εισροών, εξαιτίας της έντονα μη γραμμικής (χαοτικής) φύσης των υδροκλιματικών διεργασιών, είναι ανέφικτη η πραγματοποίηση προσδιοριστικών προγνώσεων για χρονικό ορίζοντα πέραν των λίγων ημερών.
- Οι υδρολογικές αναλύσεις με χρήση ιστορικών δειγμάτων εισροών αντενδείκνυται γιατί:
  - το μήκος τους είναι υπερβολικά μικρό για την εμπειρική εκτίμηση των ζητούμενων πιθανοτήτων αστοχίας με ικανοποιητική ακρίβεια
  - η πιθανότητα επανάληψης των ίδιων χρονοσειρών στο μέλλον είναι μηδενική
  - στα ιστορικά δείγματα δεν έχουν αποτυπωθεί όλες οι πιθανές αλληλουχίες εισροών
- Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας γίνεται με τη χρήση συνθετικών εισροών μεγάλου μήκους, που είναι στατιστικά συνεπείς με τις παρατηρημένες χρονοσειρές του παρελθόντος.
- Η παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών απορροής γίνεται μέσω **στοχαστικών μοντέλων**, που αναπαράγουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δειγμάτων, τις χρονικές και χωρικές τους συσχετίσεις καθώς και τις μακροχρόνιες υδροκλιματικές μεταβολές (υδρολογική εμμονή ή δυναμική Hurst-Kolmogorov).

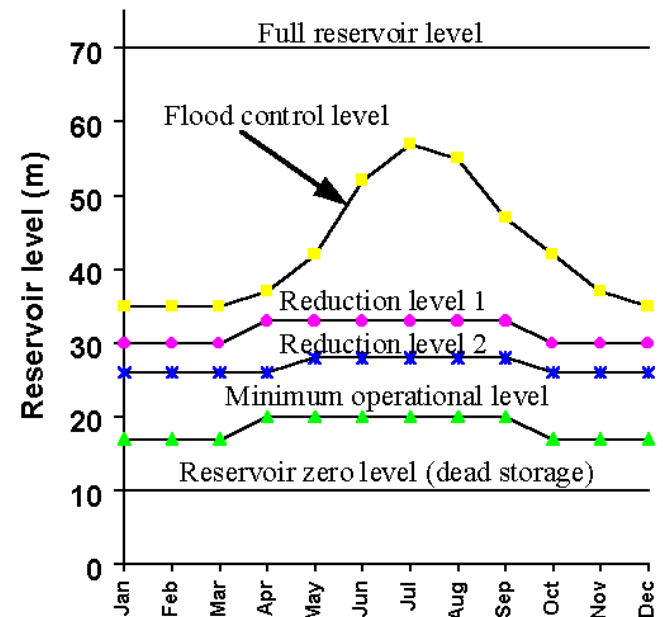


Συνθετική χρονοσειρά ετήσιας απορροής Μόρνου (2000 έτη)



# Διαχείριση ταμιευτήρων

- Επίπεδα διαχείρισης:
  - Στρατηγικό (μακροχρόνιο, γενική διαχειριστική πολιτική)
  - Βραχυπρόθεσμο (χρονικός ορίζοντας μηνών ή υδρολογικού έτους)
  - Επιχειρησιακό (σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο)
- Σε ταμιευτήρες πολλαπλού σκοπού, οι διάφορες χρήσεις νερού εξυπηρετούνται με προκαθορισμένη **ιεραρχία** (η υδρευτική χρήση σε πρώτη προτεραιότητα).
- Η διαχείριση των ταμιευτήρων γίνεται με βάση **κανόνες λειτουργίας** (συνήθως δίνονται σε μορφή νομογραφήματος), που ορίζουν τις επιθυμητές εκροές συναρτήσει της τρέχουσας στάθμης (ή αποθέματος), λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη των εισροών και της ζήτησης.
- Τυπικοί **περιορισμοί** στη λειτουργία ταμιευτήρων:
  - Κατώτατα όρια στάθμης για πραγματοποίηση απολήψεων (για περιβαλλοντικούς λόγους, για προστασία της ποιότητας του νερού, την διατήρηση αποθέματος ασφαλείας, κτλ.)
  - Ανώτατα όρια στάθμης για τον περιορισμό του κινδύνου υπερχειλίσης
  - Διατήρηση ελάχιστης ροής περιβαλλοντικής διατήρησης κατάντη του φράγματος
  - Τεχνητές πλημμύρες



# Σύγκριση έργων αξιοποίησης επιφανειακών νερών

	Απλά έργα υδροληψίας	Μικροί ταμιευτήρες, λιμνοδεξαμενές	Μεγάλοι ταμιευτήρες
Αποθηκευτική ικανότητα	Μηδενική	Μικρή	Μεγάλη
Διαχείριση ξηρασιών	Όχι	Για λίγους μήνες	Υπερετήσια
Διαχείριση πλημμυρών	Όχι	Όχι	Ναι
Απαιτούμενες υποδομές	Στοιχειώδεις	Περιορισμένες	Σημαντικές
Χρήσεις νερού	Άρδευση, ύδρευση, ΜΥΗΕ	Άρδευση, ύδρευση	Όλες οι χρήσεις
Χωρική κλίμακα εξυπηρέτησης χρήσεων	Τοπική	Τοπική	Κλίμακα υδροσυστήματος
Έλεγχος λειτουργίας	Συχνά κανένας	Απλός	Σύνθετος
Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	Μικρές	Μικρές	Σημαντικές αλλά ελεγχόμενες
Χαρακτηριστικό υδρολογικό μέγεθος για διαστασιολόγηση	Ελάχιστη θερινή παροχή	Βασική απορροή	Μηνιαία απορροή
Λόγος ασφαλούς απόληψης προς μέση ετήσια απορροή	Εξαιρετικά μικρός	Μικρός	Σημαντικός

# Αναφορές

- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Δ. Κουτσογιάννης, και Ν. Μαμάσης, Υδρολογική μελέτη, *Διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης και προστασίας της ποιότητας της Λίμνης Πλαστήρα*, Τεύχος 2, 70 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών & Θαλάσσιων Έργων ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2002.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, και Δ. Κουτσογιάννης, Εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης και βέλτιστης λειτουργίας ταμιευτήρα Σμοκόβου και συναφών έργων, *Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου*, Τεύχος 3, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος ΕΜΠ, 2008.
- Ευστρατιάδης, Α., και Ε. Ρόζος, Υδρολογική διερεύνηση, Έργα Ύδρευσης Ρόδου από το φράγμα Γαδουρά - Β φάση: Προμελέτες, οριστικές μελέτες κλπ. μελέτες έργων Υδραγωγείων και ΕΕΝ – Τεύχη Δημοπράτησης, Εργοδότης: ΥΠΕΧΩΔΕ, Ανάδοχος: Υδροεξυγιαντική, 57 σ., 2010.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, και Λ. Λαζαρίδης, Υδρολογική μελέτη λειτουργίας του ταμιευτήρα, *Τεχνικός Σύμβουλος για το έργο "Ύδρευση Ηρακλείου και Αγίου Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη"*, Εργοδότης: ΥΠΕΧΩΔΕ, Ανάδοχος: Κ/Ξ Αποσελέμη, Αθήνα, 2001.
- Ζαρρής, Δ., Ε. Λυκούδη, και Δ. Κουτσογιάννης, Τελική Έκθεση, *Διερεύνηση των αποθέσεων φερτών υλικών σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες*, Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών & Θαλάσσιων Έργων ΕΜΠ, 243 σ., Αθήνα, Οκτώβριος 2001.
- Ζαρρής, Δ., Ε. Λυκούδη, και Δ. Κουτσογιάννης, Η εξέλιξη των αποθέσεων φερτών υλικών σε ταμιευτήρες ως δυναμικό φαινόμενο - Εφαρμογή στον ταμιευτήρα Κρεμαστών, *Πρακτικά 6ου Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρίας*, Θεσσαλονίκη, 2, 363–370, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Ελληνική Γεωγραφική Εταιρία, 2002.
- Κουκουβίνος, Α., Α. Ευστρατιάδης, Λ. Λαζαρίδης, και Ν. Μαμάσης, Έκθεση δεδομένων, *Διερεύνηση σεναρίων διαχείρισης του ταμιευτήρα Σμοκόβου*, Τεύχος 1, 66 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών & Θαλάσσιων Έργων ΕΜΠ, Αθήνα, Ιανουάριος 2006.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ανδρεαδάκης, Ρ. Μαυροδήμου, Α. Χριστοφίδης, Ν. Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης, Α. Κουκουβίνος, Γ. Καραβοκυρός, Σ. Κοζάνης, Δ. Μαμάης, και Κ. Νουτσόπουλος, Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, *Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων*, 748 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών & Θαλάσσιων Έργων ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2008.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Κ. Ταρλά, Εκτιμήσεις στερεοαπορροής στην Ελλάδα, *Τεχνικά Χρονικά*, Α-7 (3), 127–154, 1987.
- Μαρίνος, Β., Γεωλογικές μελέτες τεχνικών έργων, Σημειώσεις μαθήματος, ΑΠΘ, 2014.
- Τζεράνης, Ι., Επισκόπηση δεδομένων διαφυγών και ισοζυγίου ταμιευτήρα Μόρνου, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 1*, Τεύχος 3, 102 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών & Θαλάσσιων Έργων ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 1989.
- Vanoni, V. A., *Sedimentation Engineering*, Manuals and Reports on Engineering Practices, ASCE, New York, 1975.