

1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων

Λάρισα, 13-15 Νοεμβρίου 2008

Ενότητα: Φράγματα, Θέματα Υδραυλικής-Υδρολογίας

---

**Παλιότερες και σύγχρονες υδρολογικές  
θεωρήσεις στο σχεδιασμό και τη διαχείριση  
των ταμιευτήρων, των φραγμάτων  
και των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων**

---

Δημήτρης Κουτσογιάννης

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Η παρουσίαση διατίθεται στο Διαδίκτυο στον ιστότοπο [www.itia.ntua.gr](http://www.itia.ntua.gr)

---

## Διάρθρωση

- Μέρος 1: Υδρολογικός σχεδιασμός ταμιευτήρων
- Μέρος 2: Υδρολογικός σχεδιασμός υπερχειλιστών
- Μέρος 3: Σχεδιασμός, ανασχεδιασμός και διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων και υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων
- Τελικές παρατηρήσεις

# Μέρος 1: Υδρολογικός σχεδιασμός ταμιευτήρων

## Θεμελιώδεις έννοιες

- **Αποθήκευση/απόθεμα (storage):** Κύρια λειτουργία των ταμιευτήρων. Εξ αιτίας της, οι ταμιευτήρες δεν μπορούν να σχεδιάζονται απλώς με βάση την περιθώρια συνάρτηση κατανομής των εισροών (όπως π.χ. τα αντιπλημμυρικά έργα). Έχει σημασία η χρονική διαδοχή των εισροών, που περιπλέκει κατά πολύ την πιθανοτική/στοχαστική μεθοδολογία σχεδιασμού.
- **Εγγυημένη απόληψη (firm yield):** Εσφαλμένη/αντιεπισημονική έννοια (επειδή υπονοεί εξάλειψη της διακινδύνευσης) που όμως έχει αποτελέσει τη βάση του σχεδιασμού των περισσότερων ταμιευτήρων παγκοσμίως.
- **Αξιοπιστία (reliability):** Η πιθανότητα επίτευξης του στόχου, εν προκειμένω της κάλυψης της ζήτησης. (Αξιοπιστία = 1 – πιθανότητα αστοχίας).
- **Αξιόπιστη απόληψη (reliable yield):** Η σταθερή απόληψη που μπορεί να εξασφαλιστεί για δεδομένη αξιοπιστία. Αντικαθιστά την έννοια της εγγυημένης απόληψης.
- **Σχέση χωρητικότητας-απόληψης-αξιοπιστίας – ΧΑΑ (storage capacity-yield-reliability relationship):** Η ορθολογική βάση σχεδιασμού ταμιευτήρων.
- **Προσομοίωση Monte Carlo ή στοχαστική προσομοίωση (Monte Carlo or stochastic simulation):** Μαθηματική μέθοδος αριθμητικής επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων που θεμελιώθηκε στο Los Alamos (Metropolis and Ulam, 1949).
- **Βελτιστοποίηση (optimization):** Μαθηματική μέθοδος εύρεσης των τιμών των μεταβλητών που μεγιστοποιούν μια συνάρτηση. Συνδυαζόμενη με την προσομοίωση, αποτελεί την υπολογιστική βάση σχεδιασμού και διαχείρισης ταμιευτήρων.
- **Δυναμική Hurst-Kolmogorov (Hurst-Kolmogorov behaviour) ή μακρο-πρόθεσμη εμμονή:** Στοχαστική-δυναμική συμπεριφορά που χαρακτηρίζει τις φυσικές (καθώς και τις κοινωνικο-οικονομικές και τεχνολογικές) διεργασίες. Απαιτείται να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό και τη διαχείριση των ταμιευτήρων.

## “Κλασική” μεθοδολογία (αγγλοσαξονική σχολή)

- **Ripple (1883)** Μέθοδος αθροιστικής καμπύλης εισροών-εκροών: γραφική μέθοδος σχεδιασμού βασισμένη στο ιστορικό δείγμα εισροών
- **Hurst (1951)** Εισαγωγή της έννοιας του εύρους (range) για το σχεδιασμό των ταμιευτήρων και διαπίστωση της εξάρτησής του από το μήκος του δείγματος. Σημαντική ανακάλυψη της φερώνυμης συμπεριφοράς των γεωφυσικών διεργασιών.
- **Thomas and Burden (1963)** Μέθοδος διαδοχικών αιχμών (sequent-peak): Πινακοποιημένη έκδοση της μεθόδου Ripple.
- **Schultz (1976)** (ίσως και άλλοι προηγουμένως) Παραλλαγή της μεθόδου Ripple με χρήση συνθετικών – αντί ιστορικών – χρονοσειρών.
- Οι μέθοδοι της αγγλοσαξονικής σχολής, παρόλο που είναι οι πιο διαδεδομένες στην εκπαίδευση, στα εγχειρίδια για μηχανικούς και στην πράξη, δεν έχουν επιστημονική συνέπεια.

Για περισσότερες πληροφορίες για το ιστορικό των ερευνών  
βλ. πληρέστατη και γλαφυρή επισκόπηση του Klemes (1987)

## Στοχαστική μεθοδολογία (ρωσική σχολή)

- **Hazen (1914)** (Αμερικανός!) Εισαγωγή της έννοιας της αξιοπιστίας και της σχέσης ΧΑΑ.
- **Kritskiy & Menkel (1935, 1940) και Savarenskiy (1940)** Θεωρητική μελέτη και υλοποίηση της στην πράξη του σχεδιασμού των ταμιευτήρων στη βάση της αξιοπιστίας και της σχέσης ΧΑΑ.
- **Pleshkov (1939)** Κατασκευή νομογραφημάτων για διευκόλυνση της πρακτικής εφαρμογής της μεθόδου.
- **Kolmogorov (1940)** Διατύπωση του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει τη στοχαστική συμπεριφορά που ανακάλυψε 10 χρόνια αργότερα ο Hurst. Ο Kolmogorov δεν ασχολήθηκε με ταμιευτήρες, ούτε καν με γεωφυσικές χρονοσειρές, αλλά με την τύρβη.
- **Moran (1954)** (Αυστραλός) Εκ νέου (και μάλλον ανεξάρτητη) διατύπωση της στοχαστικής θεωρίας των ταμιευτήρων.
- Οι περισσότερες από τις παραπάνω συμβολές, αν και θεωρητικά συνεπείς, συχνά εμπεριέχουν μη ρεαλιστικές υποθέσεις, όπως την ανεξαρτησία των εισροών στο χρόνο, που τις καθιστούν μη ικανοποιητικές στην πράξη.

Για περισσότερες πληροφορίες βλ. Klemes (1987)

# Το ιστορικό του σχεδιασμού στην Ελλάδα

- Στα Πολυτεχνεία διδάσκονται οι αγγλοσαξονικές μέθοδοι
- Οι μελετητές είναι ενήμεροι και έχουν εφαρμόσει στοχαστικές μεθόδους της ρωσικής σχολής

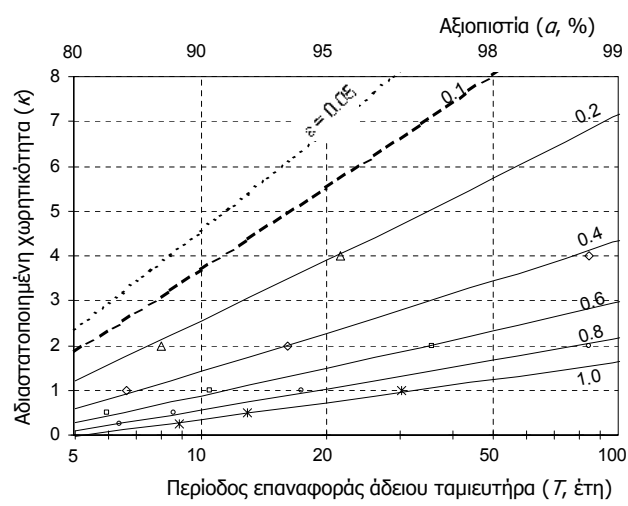
Οριστική μελέτη φράγματος Ιάσμου (1971)

Ένταυθα ως κατ'έναντι έγκριμένη προμελέτη έρευνάται ή μεταβολή τής χρησίμου χωρητικότητας δια διαφόρους άπολήψεις άφ'ένδς μόν βάσει τών κλασικών μεθόδων μελέτης τών χρησίμων έθροιστικών καμπών τών διαφορών άφ'έτερου δε δια στατιστικών μεθόδων Ένα λη- φθη ύπ'έφιν μακροχρόνιος κατ'τυχαία διαδοχή τών συρροών. Προς το- το έχρησιμοποίησαν τήν αύτην μέθοδον τήν έφαρμοσθεύσαν εις τήν έγκρι- κριμένη προμελέτην ήτοι τών ΚΑΥΤΣΚΗ κατ' ΜΕΝΚΙΕΛ συμπληρωθεύσαν ύπδ τοϋ ΡΙΕΣΧΚΟΝ. Έν συνεχείη προβαίνουμιν εις τόν υπολογισμόν τοϋ άφελγμου όγκου τοϋ ταμειυτήρος. Η άκολουθηθεύσα μέθοδος είναι ως κατ'έναν- τέρω έλθουη ή αύτη με τήν τής προμελέτης, ήν κατ'έναντι περιλήψει περι- γράφουμιν κατωτέρω.

Αθήνα, Ιούλιος 1971  
 Συντάξαντες: Δ. Χριστοφίλας - Γ. Νουτσό- πούλας - Α. Λαζαρίδης - Χ. Καπετανάκης  
 Οι άνδραχοι  
 Δ. ΦΡΑΓΚΙΔΑΚΗΣ  
 Γ. ΚΑΡΑΒΟΚΥΡΗΣ  
 Ι. ΔΑΟΥΤΗΣ  
 Ι. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ  
 Δ. ΧΡΗΣΤΟΥΛΑΣ  
 Γ. ΝΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ  
 Α. ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ  
 Χ. ΚΑΠΕΤΑΝΑΚΗΣ

# Τυπικά αποτελέσματα της στοχαστικής μεθόδου (σχέσεις ΧΑΑ)

- Χαρακτηριστικά μεγέθη**
- $\mu$ : μέση τιμή (καθάρων) εισροών
  - $\sigma$ : τυπική απόκλιση εισροών
  - $a$ : αξιοπιστία
  - $T := 1 / (1 - a)$ : περίοδος επαναφοράς άδειου ταμειυτήρα
  - $\delta$ : ζήτηση
  - $c$ : χωρητικότητα ταμειυτήρα
  - $\kappa := c / \sigma$ : αδιαστατοποιημένη χωρητικότητα ταμειυτήρα
  - $\varepsilon := (\mu - \delta) / \sigma$ : αδιαστατοποιημένη μέση απώλεια

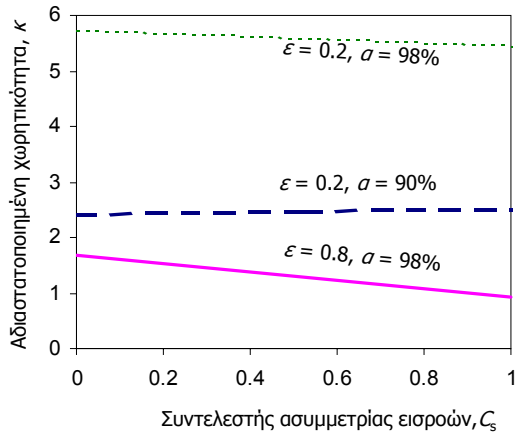


**Απλουστευτικές παραδοχές**  
 Ετήσια κλίμακα μελέτης (αγνόηση των εποχιακών διακυμάνσεων - ομοιόμορφη εισροή και εκροή στη διάρκεια του έτους).  
 Εισροές σε διαδοχικά χρόνια στοχαστικά ανεξάρτητες.  
 Κανονική πιθανοτική κατανομή εισροών.

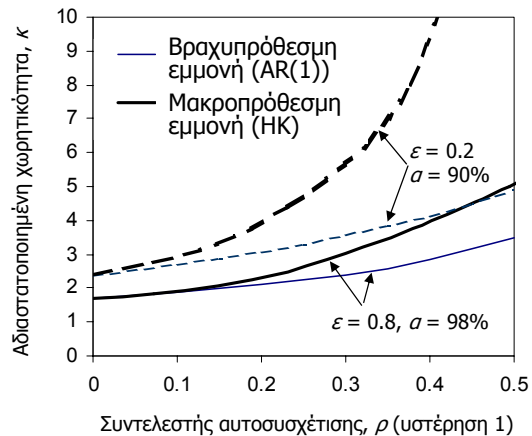
**Αποτελέσματα** (για  $T > 2$  ή  $a > 0.5$ )  
 $\ln(T - 1) = 2 (\varepsilon + 0.25) (\kappa + 0.5)^{0.8}$  ή  
 $\ln(T - 1) = -\ln(1/a - 1) = (2/\sigma^{1.8}) (\mu + 0.25\sigma - \delta) (c + 0.5\sigma)^{0.8}$

Για αναλυτικότερες πληροφορίες βλ. Κουτσογιάννης (2005)

# Επίδραση της ασυμμετρίας και της εμμονής των εισροών



**Επίδραση της ασυμμετρίας**  
Αποτελέσματα για ανεξάρτητες εισροές με κατανομή γάμα δύο παραμέτρων



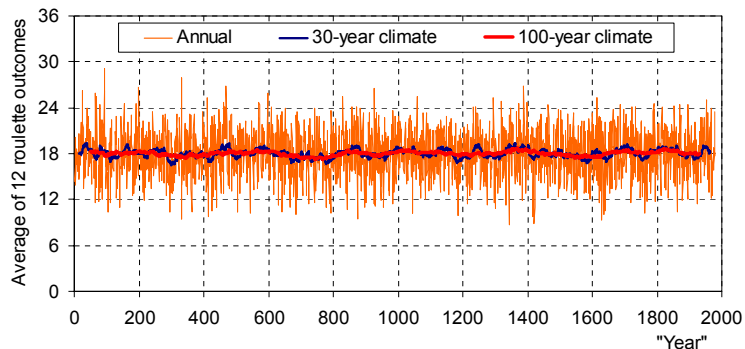
**Επίδραση της εμμονής**  
Αποτελέσματα για εισροές με κανονική κατανομή

Για αναλυτικότερες πληροφορίες βλ. Koutsoyiannis (2005)

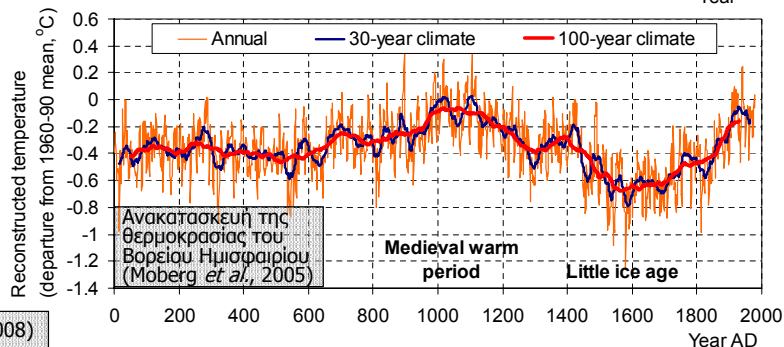
# Ακαταλληλότητα των απλών πιθανοτικών μοντέλων για την περιγραφή των φυσικών διεργασιών



Κλίμα τύπου "ρουλέτας"



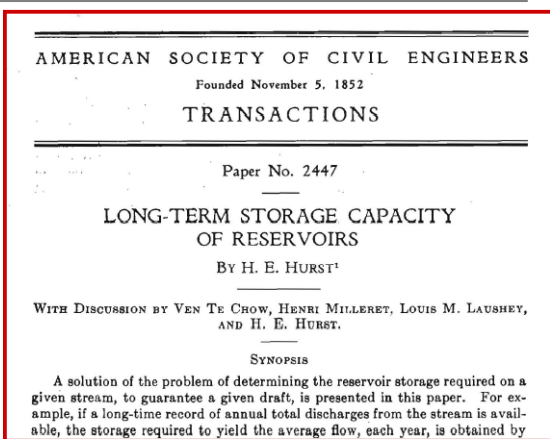
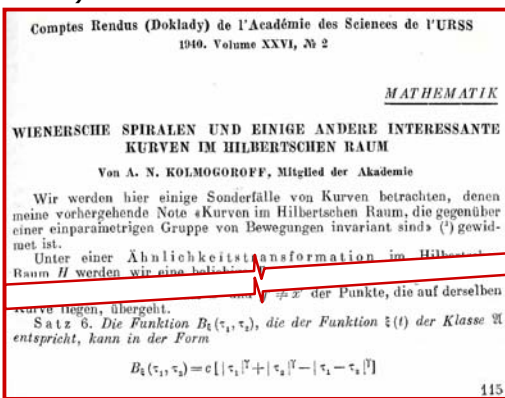
Πραγματικό κλίμα "Hurst-Kolmogorov"



Πηγή: Koutsoyiannis & Cohn (2008)

# Η «πραγματικότητα Hurst-Kolmogorov» (HK)

Το γεγονός ότι οι πραγματικές φυσικές διεργασίες συμπεριφέρονται διαφορετικά από μια ιδεατή ρουλέτα – όπου οι διαφορές αναφέρονται σε μεγάλες «αποδράσεις» του τοπικού μέσου από τον καθολικό μέσο – έχει αποκληθεί «πραγματικότητα Hurst-Kolmogorov» (Koutsoyiannis & Cohn, 2008).



Ο Hurst (1950) μελέτησε μεγάλο αριθμό φυσικών χρονοσειρών και παρατήρησε: "Αν και εμφανίζεται ομαδοποίηση ομοειδών καταστάσεων και σε τυχαία γεγονότα, η τάση ομαδοποίησης είναι μεγαλύτερη σε φυσικά γεγονότα. Αυτή είναι η μεγαλύτερη διαφορά τυχαίων και φυσικών γεγονότων."

Ο Kolmogorov (1940) εισήγαγε τη στοχαστική ανέλιξη που περιγράφει αυτή τη συμπεριφορά 10 χρόνια πριν τον Hurst.

## Στοχαστικές ιδιότητες μιας ανέλιξης HK σε πολλές κλίμακες

Μια φυσική διεργασία εξελίσσεται σε συνεχή χρόνο  $t$ :  $x(t)$

Αρχικά την μοντελοποιούμε σαν μια στοχαστική ανέλιξη σε συνεχή χρόνο  $t$ :  $X(t)$

Για αναλυτικά στοιχεία βλ. Koutsoyiannis (2002)

... αλλά την παρατηρούμε και τη μελετούμε σε διακριτό χρόνο, παίρνοντας μέσες τιμές σε μια δεδομένη χρονική κλίμακα  $k$  και χρησιμοποιώντας διακριτά χρονικά βήματα  $i = 1, 2, \dots$

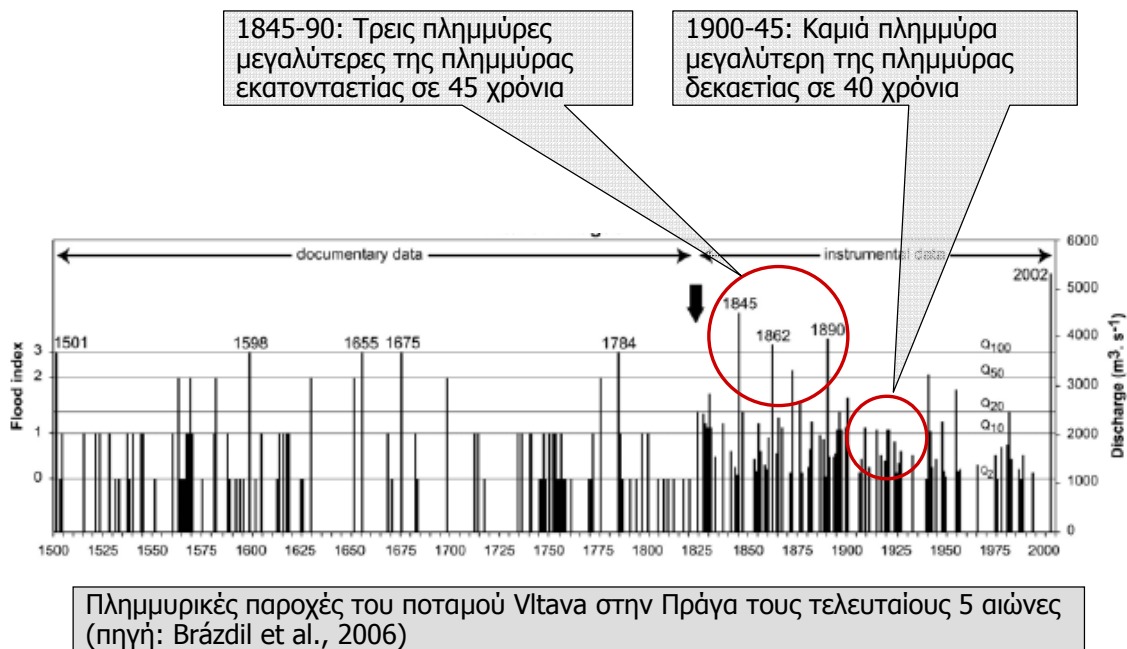
$$X_i^{(k)} := \frac{1}{k} \int_{(i-1)k}^{ik} X(t) dt$$

Ιδιότητες της ανέλιξης HK	Στη μοναδιαία χρονική κλίμακα $k = 1$ (π.χ. ετήσια)	Σε οποιαδήποτε χρονική κλίμακα $k$
Τυπική απόκλιση	$\sigma \equiv \sigma^{(1)}$	$\sigma^{(k)} = k^{H-1} \sigma$ (μπορεί να αποτελέσει και τον ορισμό της ανέλιξης HK. $H$ είναι ο συντελεστής Hurst: $0.5 < H < 1$ )
Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (για υστέρηση $j$ )	$\rho_j \equiv \rho_j^{(1)} = \rho_j^{(k)} \approx H(2H-1)  j ^{2H-2}$	
Φάσμα ισχύος (για συχνότητα $\omega$ )	$S(\omega) \equiv S^{(1)}(\omega) \approx \frac{1}{4(1-H)\sigma^2} (2\omega)^{1-2H}$	$S^{(k)}(\omega) \approx \frac{1}{4(1-H)\sigma^2} k^{2H-2} (2\omega)^{1-2H}$

Στην κλασική στατιστική  $\sigma^{(k)} = \sigma/\sqrt{k}$

Όλες οι εκφράσεις είναι συναρτήσεις δύναμης της κλίμακας  $k$ , της υστέρησης  $j$  και της συχνότητας  $\omega$

# Παράδειγμα 1: Τάση ομαδοποίησης των πλημμυρών

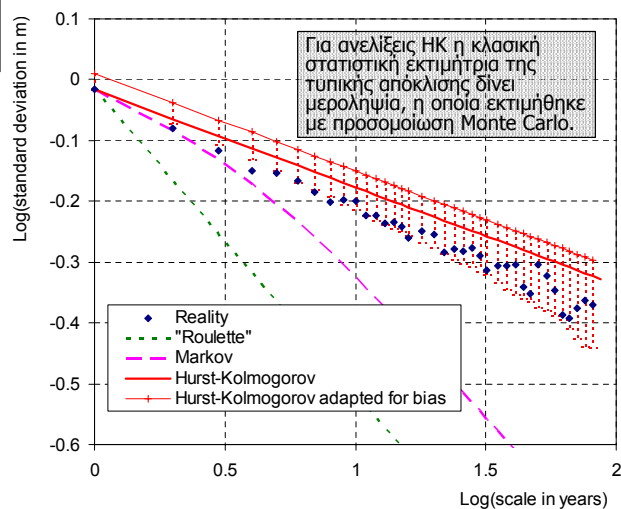
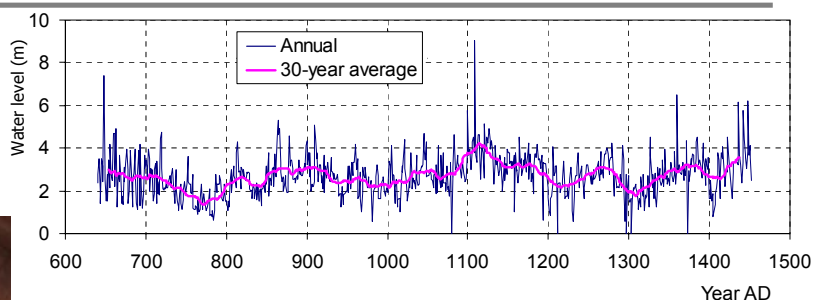


# Παράδειγμα 2: Ετήσιες ελάχιστες στάθμες στο Νείλο

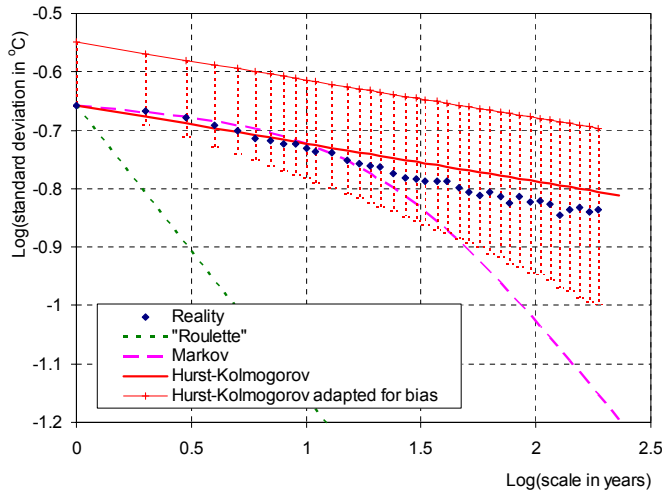
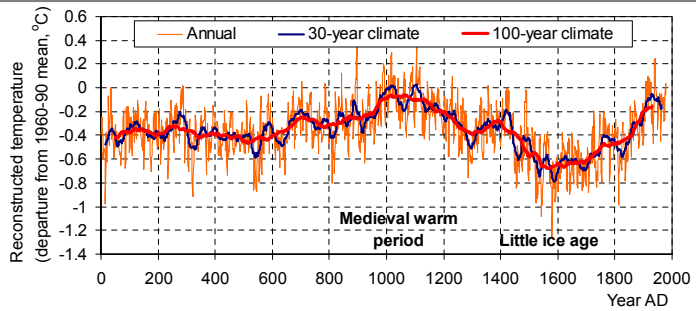


Νειλόμετρο του Roda

- Η μεγαλύτερη σε μήκος ιστορική χρονοσειρά μετρήσεις (813 χρόνια).
- Συντελεστής Hurst  $H = 0.84$ .
- Η ίδια τιμή του  $H$  προκύπτει και από την ταυτόχρονη χρονοσειρά ετήσιας μέγιστης στάθμης, καθώς και από τη σύγχρονη χρονοσειρά παροχής του Νείλου στο Aswan (131 χρόνια).



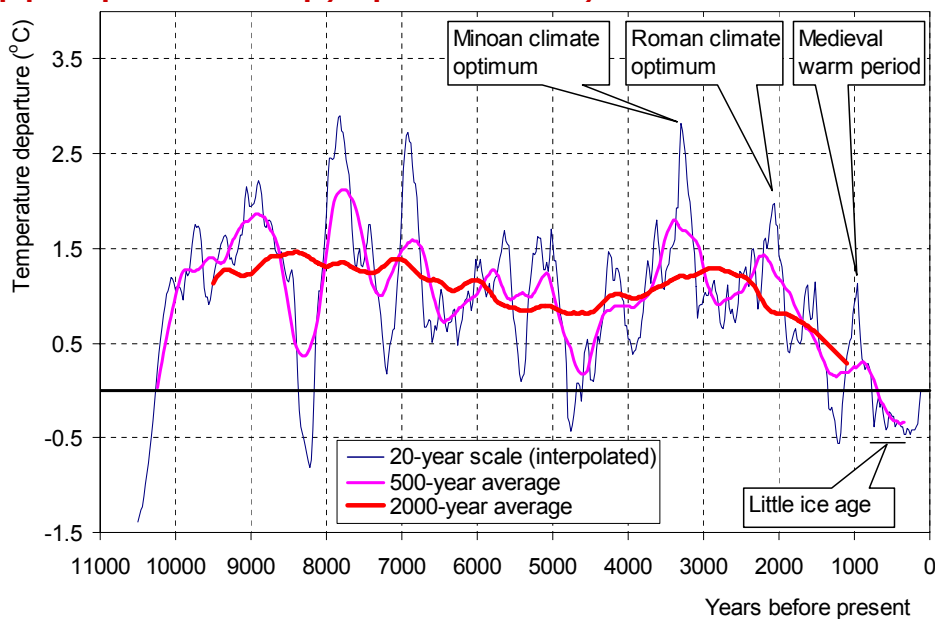
### Παράδειγμα 3: Ανακατασκευασμένη σειρά θερμοκρασιών του Β. Ημισφαιρίου των Moberg *et al.*



Εντονότατη συμπεριφορά ΗΚ με συντελεστή Hurst  $H = 0.94$

Η μεροληψία εκτιμήθηκε με προσομοίωση Monte Carlo (200 προσομοιώσεις με μήκος ίσο με αυτό της αυθεντικής σειράς).

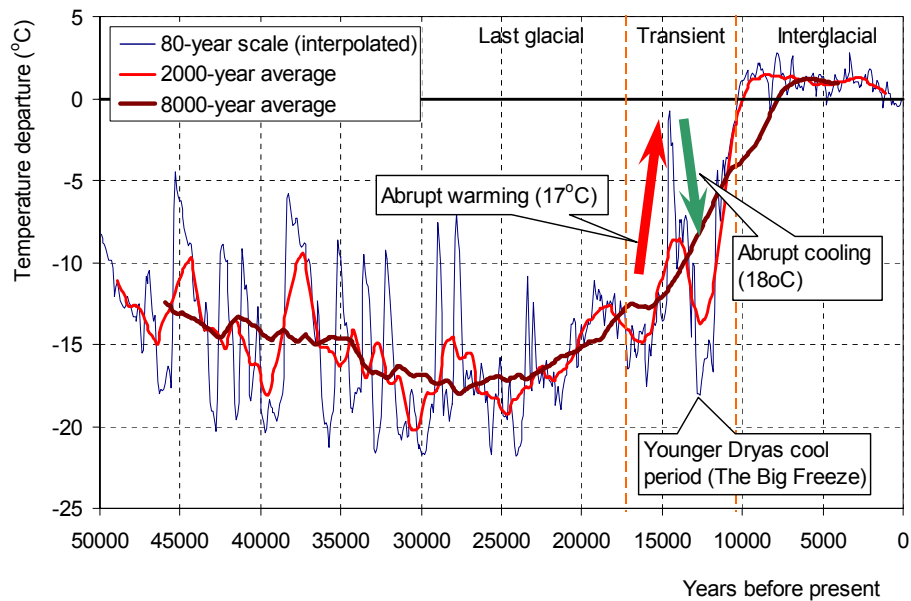
### Παράδειγμα 4: Ανακατασκευασμένη σειρά θερμοκρασιών της Γροιλανδίας στο Ολόκαινο



Χρονοσειρά ανακατασκευασμένη από τον πυρήνα πάγου GISP2 (Alley, 2000, 2004). Δεδομένα από: [ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/greenland/summit/gisp2/isotopes/gisp2\\_temp\\_accum\\_alley2000.txt](ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/greenland/summit/gisp2/isotopes/gisp2_temp_accum_alley2000.txt)



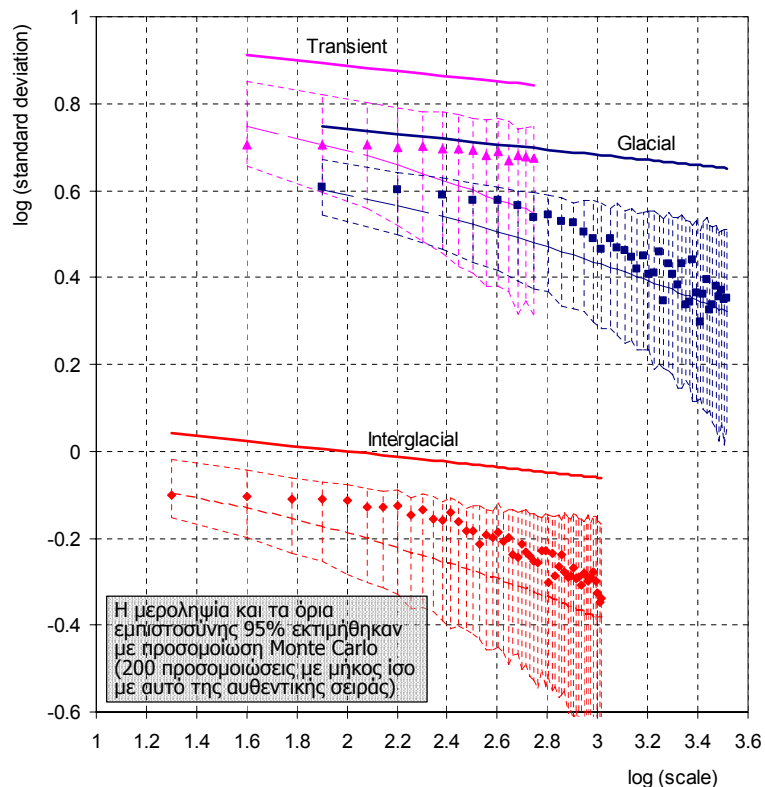
## Παράδειγμα 4 (συν.): Ανακατασκευασμένη σειρά θερμοκρασιών της Γροιλανδίας για 50000 χρόνια



Χρονοσειρά ανακατασκευασμένη από τον πυρήνα πάγου GISP2 (Alley, 2000, 2004). Δεδομένα από: [ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/greenland/summit/gisp2/isotopes/gisp2\\_temp\\_accum\\_alley2000.txt](ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/greenland/summit/gisp2/isotopes/gisp2_temp_accum_alley2000.txt)

## Παράδειγμα 4 (συν.): Θερμοκρασίες της Γροιλανδίας σε όλες τις χρονικές κλίμακες

Επιβεβαιώνεται πανηγυρικά η εντονότατη συμπεριφορά ΗΚ με συντελεστή Hurst  $H \approx 0.94$



## Τι αποφεύγουμε στο σχεδιασμό ταμιευτήρων

- Ντετερμινιστικές μεθόδους αγγλοσαξονικού τύπου
- Μεθόδους στοχαστικής προσομοίωσης που δεν αναπαράγουν τη δυναμική Hurst-Kolmogorov
- Λογισμικά που υλοποιούν μεθόδους αγγλοσαξονικού τύπου ή που στηρίζονται σε στοχαστικές προσομοιώσεις χωρίς δυναμική Hurst-Kolmogorov

## Τι κάνουμε για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ταμιευτήρα

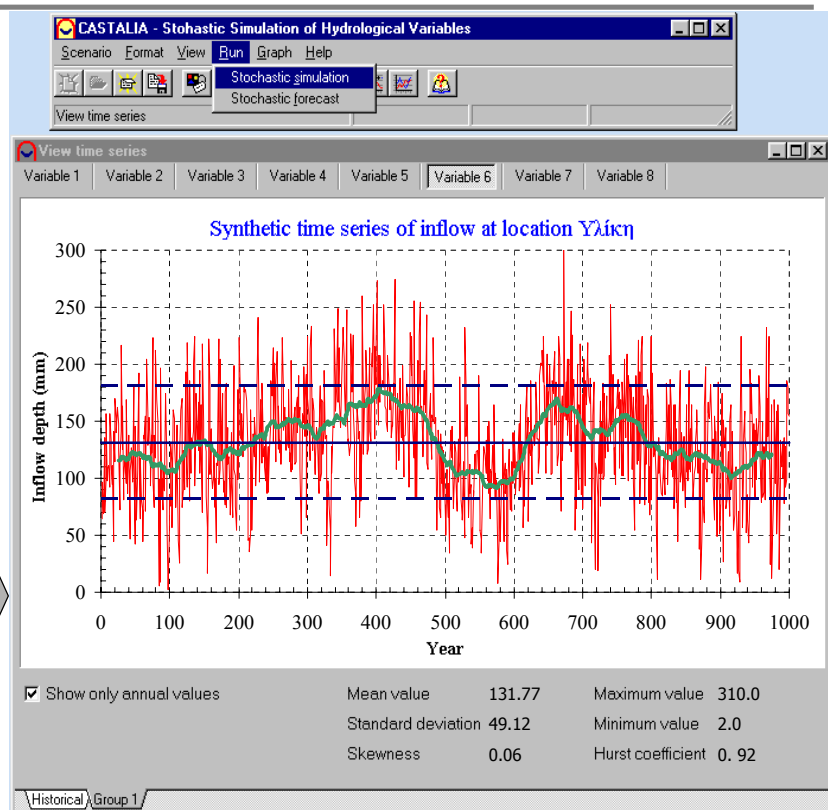
1. Κατασκευή καμπύλης ΧΑΑ με βάση τα ιστορικά δεδομένα – αν το μήκος του δείγματος είναι ικανοποιητικό.
  - Υπολογισμοί απλούστατοι με βάση την εξίσωση:  
$$S_t = \max[0, \min(S_{t-1} + X_t - \delta_t, c)],$$
  
όπου  $S_t$  το απόθεμα,  $X_t$  η εισροή και  $\delta_t$  η ζήτηση στο χρόνο  $t$ , ενώ  $c$  η χωρητικότητα του ταμιευτήρα. Αστοχία υπάρχει όταν  $S_t = 0$ .
  - Επαρκεί το υπολογιστικό πλαίσιο ενός λογιστικού φύλλου (OpenOffice, Excel).
2. Κατασκευή μιας «κάτω περιβάλλουσας» ΧΑΑ με βάση τυποποιημένα (εκφρασμένα στη μορφή νομογραφημάτων ή εξισώσεων) αποτελέσματα (καμπύλες ΧΑΑ) της στοχαστικής προσέγγισης.
  - Τα αποτελέσματα αφορούν τον υπερετήσιο ρυθμιστικό όγκο. Θα πρέπει να προστεθεί και ο όγκος εποχιακής ρύθμισης (~50%-80% της ετήσιας ζήτησης, με τις μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν στους αρδευτικούς ταμιευτήρες).
3. Εκτίμηση της χωρητικότητας με βελτιστοποίηση, παίρνοντας υπόψη οικονομικά, τεχνικά και περιβαλλοντικά στοιχεία.

## Τι κάνουμε για τον οριστικό σχεδιασμό ταμιευτήρα

1. Κατασκευή καμπύλης ΧΑΑ, όπως και στο βήμα 1 του προκαταρκτικού σχεδιασμού, αλλά με συνθετική χρονοσειρά (μήκους χιλιάδων ετών) σε μηνιαία κλίμακα (για συνήθη και μεγάλα μεγέθη ταμιευτήρων).
  - Η συνθετική χρονοσειρά πρέπει να γεννηθεί με στοχαστική μέθοδο που αναπαράγει τη δυναμική ΗΚ.
  - Η απλούστερη στοχαστική μέθοδος με δυναμική ΗΚ είναι αυτή των Langousis & Koutsoyiannis (2006) και μπορεί να υλοποιηθεί σε ένα λογιστικό φύλλο (OpenOffice, Excel).
  - Πιο σύνθετες μέθοδοι απαιτούν τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού (Πρόγραμμα Κασταλία).
2. Εκτίμηση της χωρητικότητας με βελτιστοποίηση, παίρνοντας υπόψη οικονομικά, τεχνικά και περιβαλλοντικά στοιχεία.

## Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών με το λογισμικό Κασταλία

Κατασκευή συνθετικών εισροών 1000 ετών στην Υλίκη με τον υδρολογικό προσομοιωτή «Κασταλία»



## Μέρος 2: Υδρολογικός σχεδιασμός υπερχειλιστών

### Βασικές έννοιες

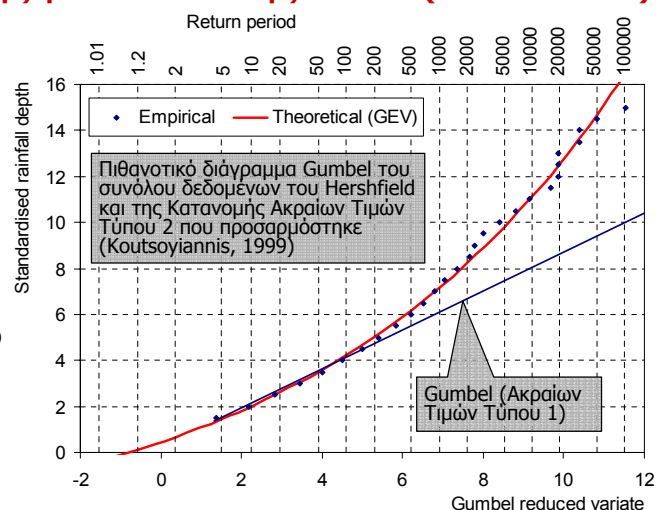
- **Πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση – ΠΜΚ (probable maximum precipitation) & πιθανή μέγιστη πλημμύρα (probable maximum flood)** Παραπειστικές και εν τέλει αντιεπιστημονικές έννοιες που όμως έχουν αποτελέσει τη βάση σχεδιασμού πολλών φραγμάτων παγκοσμίως (όχι τόσο στην Ελλάδα).
- **Πιθανότητα αστοχίας (failure probability) – διακινδύνευση (risk) – περίοδος επαναφοράς (return period)** Αλληλοσυναρτώμενες έννοιες που προσφέρουν την πιθανοτική βάση για τον ορθολογικό σχεδιασμό των υπερχειλιστών. Αν και πρόκειται για τις ίδιες έννοιες που υποστηρίζουν και το σχεδιασμό των ταμιευτήρων, υπάρχουν δύο βασικές διαφοροποιήσεις:
  1. Η αστοχία στους ταμιευτήρες είναι λειτουργική (αδυναμία κάλυψης υδατικών αναγκών) ενώ στους υπερχειλιστές είναι δομική (ενδεχόμενο κατάρρευσης φράγματος). Άρα, οι αποδεκτές πιθανότητες αστοχίας, ενώ στους ταμιευτήρες είναι  $10^{-1}$  -  $10^{-2}$ , στους υπερχειλιστές γίνονται πολύ μικρότερες  $10^{-3}$  -  $10^{-6}$ .
  2. Η πιθανοτική αντιμετώπιση στους υπερχειλιστές είναι απλούστερη, επειδή δεν απαιτείται η πλήρης περιγραφή της χρονικής αλληλουχίας της παροχής (παρά μόνο μέσα στο επεισόδιο της πλημμύρας σχεδιασμού).
- **Κατανομές ακραίων τιμών** Ειδικές πιθανοτικές κατανομές που προκύπτουν με θεωρητική συλλογιστική (ως ασυμπτωτικές συμπεριφορές) και χρησιμοποιούνται ως βάση για την εκτίμηση της καταίγιδας ή και πλημμύρας σχεδιασμού.

# Η βάση της ιδέας της Πιθανής Μέγιστης Κατακρήμνισης

- Η έννοια ενός ανώτατου ορίου στη βροχόπτωση, της λεγόμενης Πιθανής Μέγιστης Κατακρήμνισης (ΠΜΚ), αντικειμενικά έχει πολιτική στόχευση: δίνει στους πολιτικούς (και γενικότερα όσους λαμβάνουν αποφάσεις) την ψευδαίσθηση της δυνατότητας κατασκευής έργων (π.χ. φραγμάτων) απαλλαγμένων από κινδύνους (με την προϋπόθεση ότι σχεδιάζονται με βάση την ΠΜΚ).
- Όμως, οποιαδήποτε τιμή του ύψους βροχής ή της πλημμυρικής παροχής μπορεί να ξεπεραστεί – με πιθανότητα μειούμενη όσο η τιμή αυξάνεται (η φύση δεν έχει όρια).
- Η πιθανοτική αυτή λογική αντιστοιχεί στο Αριστοτελικό άπειρο, το οποίο υπάρχει «δυνάμει» και όχι ως αυθύπαρκτη οντότητα (φυσικό άπειρο, διαφορετικό από το μαθηματικό άπειρο του Cantor).

## Κριτική της στατιστικής μεθόδου της ΠΜΚ (Hershfield)

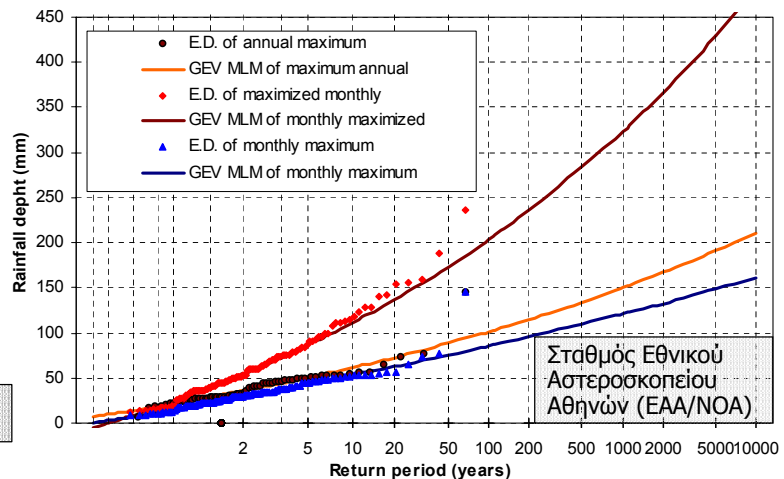
- Ο Hershfield (1961) συγκέντρωσε δεδομένα από 2645 σταθμούς ανά τον κόσμο (κατά το πλείστον από τις ΗΠΑ) που αντιστοιχούν σε 95 000 σταθμο-έτη.
- Αφού τυποποίησε τα δεδομένα (χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση ανά σταθμό) κατέληξε ότι η μέγιστη τυποποιημένη τιμή που βρήκε (~15) αντιστοιχεί στην ΠΜΚ. Αυτό οδήγησε στη φερώνυμη στατιστική μέθοδο εκτίμησης της ΠΜΚ.
- Τα δεδομένα του Hershfield επανεξετάστηκαν (Koutsoyiannis, 1999) και βρέθηκε ότι:
  - Όχι μόνο δεν συνηγορούν στην ύπαρξη μέγιστου ορίου (με ασυμπτωτική προσέγγιση σε άνω όριο) αλλά δείχνουν απόκλιση προς το άπειρο με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτό της «κλασικής» κατανομής Gumbel (Κατανομή Ακραίων Τιμών Τύπου 1).
  - Η μέγιστη τιμή της τυποποιημένης μεταβλητής (15) που βρήκε ο Hershfield αντιστοιχεί σε εμπειρική περίοδο επαναφοράς 95 000 χρόνια.
  - Η περίοδος αυτή μειώνεται σε 60 000 χρόνια με την Κατανομή Ακραίων Τιμών (που είναι Τύπου 2 και όχι Τύπου 1). Αυτό είναι εύλογο, λόγω της αναμενόμενης στοχαστικής εξάρτησης (στις βροχές διαφορετικών σταθμών) για πολύ έντονες βροχοπτώσεις.



## Η «υδρομετεωρολογική» μέθοδος μεγιστοποίησης των καταιγίδων: κακή στατιστική μέθοδος

- Οι «μεγιστοποιημένες» βροχές αποτελούν ένα άλλο στατιστικό δείγμα το οποίο έχει πιθανοτική συμπεριφορά με πιο έντονα στοιχεία διασποράς (διεύρυνση της αβεβαιότητας)
- Η εξαγωγή της ΠΜΚ από ένα μόνο σημείο (το μέγιστο) είναι στατιστικά ό,τι πιο επισφαλές θα μπορούσε να επινοηθεί.

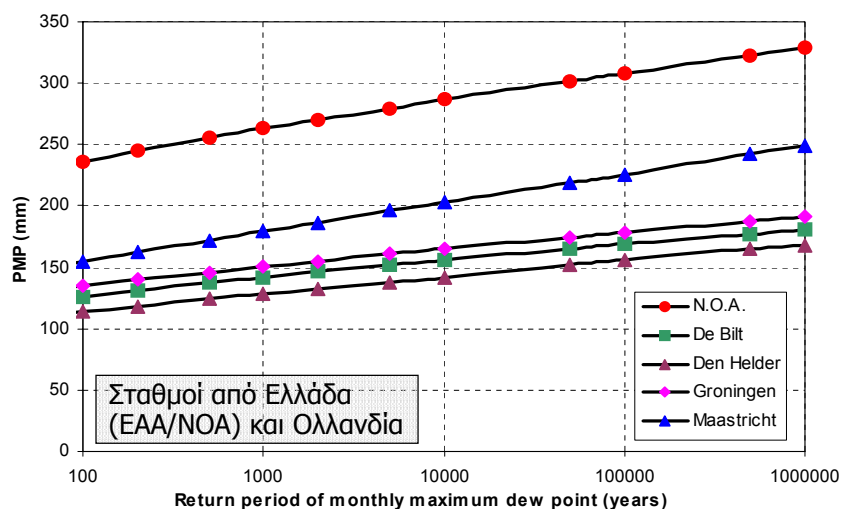
Πηγή: Papalexiou & Koutsoyiannis (2006)



Δ. Κουτσογιάννης, Παλιότερες και σύγχρονες υδρολογικές θεωρήσεις 27

## Εξάρτηση της ΠΜΚ της «υδρομετεωρολογικής» μεθόδου από πιθανοτικές παραδοχές

Η εκτίμηση της πιθανής μέγιστης κατακρήμνισης εξαρτάται από την πιθανοτική συμπεριφορά του σημείου δρόσου και από την υιοθετούμενη περίοδο επαναφοράς για το σημείο δρόσου.

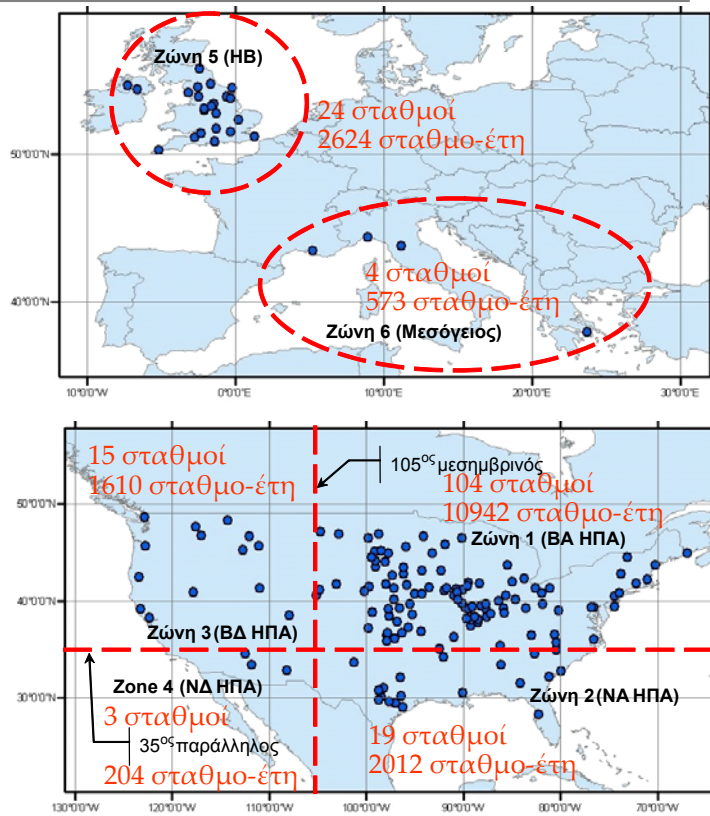


Πηγή: Papalexiou & Koutsoyiannis (2006)

Δ. Κουτσογιάννης, Παλιότερες και σύγχρονες υδρολογικές θεωρήσεις 28

## Νεότερα αποτελέσματα

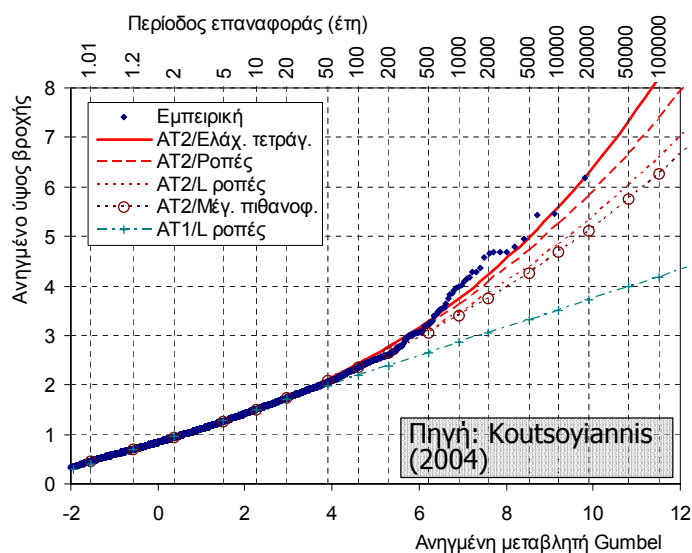
- Πρόσφατα μελετήθηκαν αρκετές μεγάλοι μήκους χρονοσειρές ετήσιων μέγιστων βροχοπτώσεων (Koutsoyiannis, 2004):
  - 169 σταθμοί από την Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική.
  - Μήκη δειγμάτων 100-154 χρόνια.
  - Συνολικά 18065 σταθμο-έτη.
  - 6 κύριες κλιματικές ζώνες.



Δ. Κουτσογιάννης, Παλιότερες και σύγχρονες υδρολογικές θεωρήσεις 29

## Νεότερα αποτελέσματα (συν.)

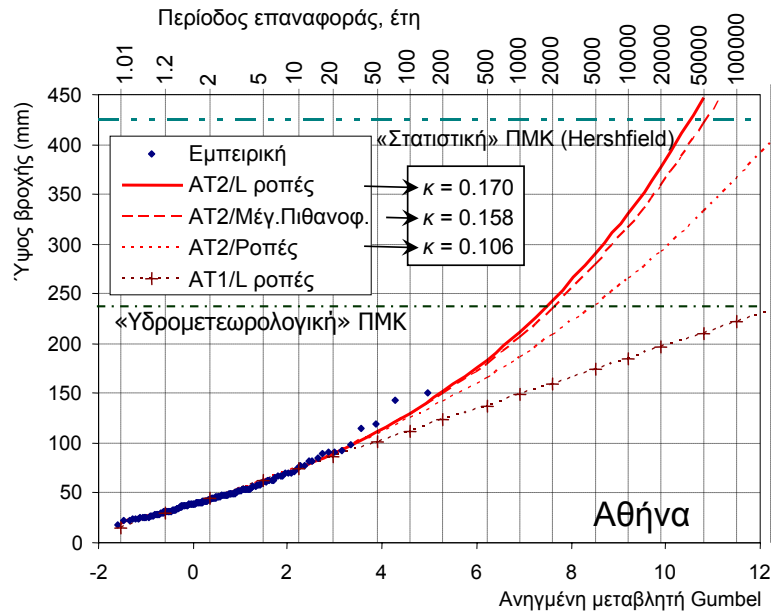
- Αναγωγή κάθε δείγματος με τη μέση τιμή του.
- Ενοποίηση όλων των δειγμάτων (18065 δεδομένα) μετά από εκτεταμένη διερεύνηση των σχετικών προϋποθέσεων.
- Επαλήθευση προηγούμενων συμπερασμάτων:



1. Δεν στοιχειοθετείται η ύπαρξη άνω ορίου (ΠΜΚ).
2. Η κατανομή Gumbel αποδεικνύεται ακατάλληλη.
3. Η κατανομή Ακραίων Τιμών Τύπου 2 φαίνεται κατάλληλη.
4. Οι διαφορές των δύο κατανομών είναι αισθητές για  $T > 50$  χρόνια και εξαιρετικά σημαντικές για  $T > 200-500$  χρόνια.
5. Η κατανομή Gumbel θα πρέπει να θεωρείται επικίνδυνη για το σχεδιασμό φραγμάτων.

## Τι δείχνουν τα δεδομένα της Αθήνας;

- Η Αθήνα διαθέτει τη μεγαλύτερη σε μήκος ιστορική χρονοσειρά βροχοπτώσης (από το 1860).
- Η ανάλυση της χρονοσειράς μέγιστων βροχοπτώσεων επιβεβαιώνει τα προηγούμενα γενικά συμπεράσματα.
- Είναι χαρακτηριστική η διαφορά «στατιστικής» και «υδρομετεωρολογικής» ΠΜΚ. Η τελευταία έχει περίοδο επαναφοράς μόνο 2000 χρόνια.



## Τι αποφεύγουμε και τι κάνουμε για τον υδρολογικό σχεδιασμό υπερχειλιστή

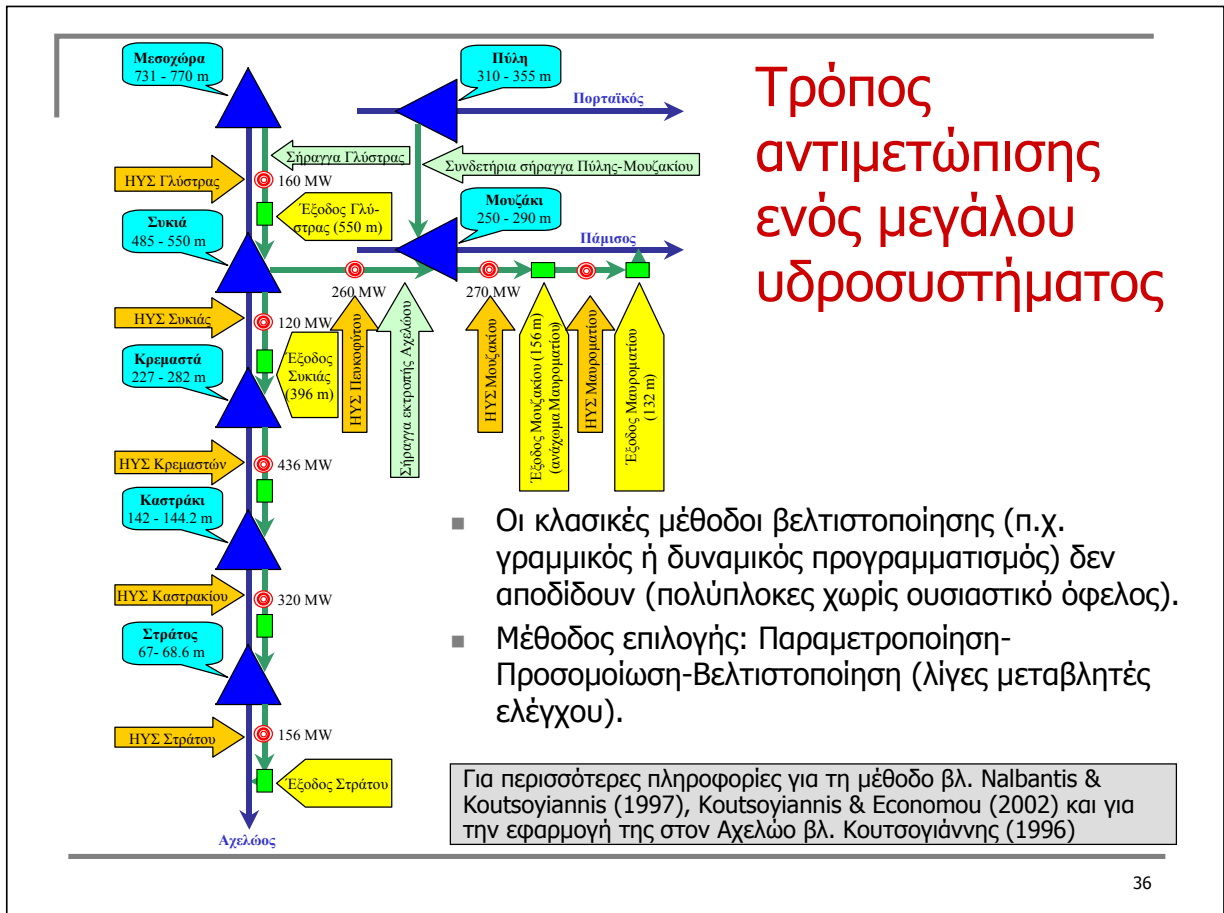
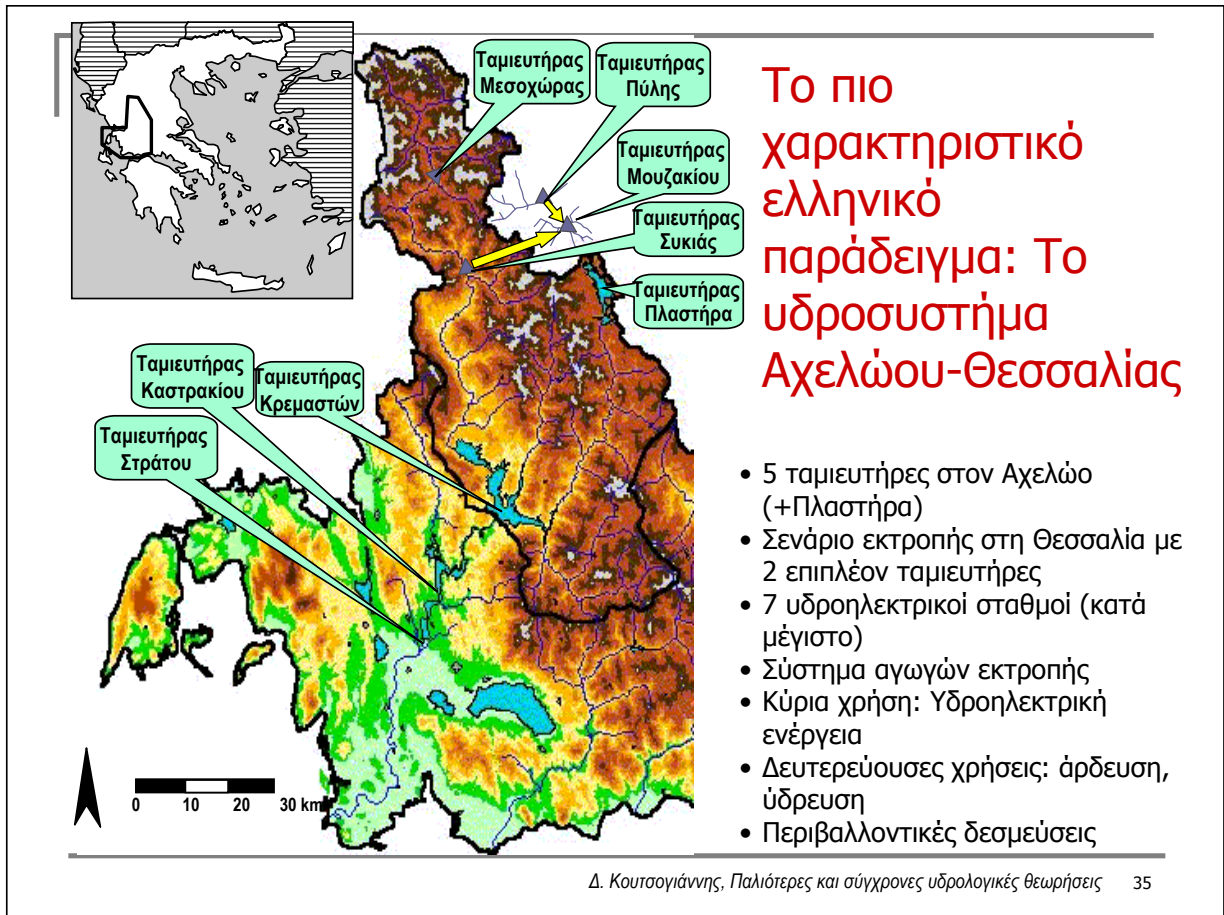
- Αποφεύγουμε τις έννοιες της ΠΜΚ και ΠΜΠ (εκτός αν χρησιμοποιηθούν μόνο επικουρικά, ως παλιότερες μέθοδοι, για λόγους σύγκρισης).
- Αποφεύγουμε την κατανομή Gumbel για βροχόπτωση ή παροχή.
- Χρησιμοποιούμε πιθανοτική κατανομή Ακραιών Τιμών Τύπου 2 ή συναφή (π.χ. Log Pearson 3).
- Ακόμη και όταν υπάρχει αξιόπιστο δείγμα παροχής, και πάλι είναι απαραίτητη η πιθανοτική ανάλυση των βροχοπτώσεων και η κατάρτιση καταιγίδας σχεδιασμού.
- Ο μετασχηματισμός της βροχής σε παροχή αποτελεί ένα μεγάλο και δύσκολο αντικείμενο (εκτός του θέματος της παρουσίασης).



## Μέρος 3: Σχεδιασμός, ανασχεδιασμός και διαχείριση συστημάτων ταμιευτήρων και υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων

### Η ανάγκη ανασχεδιασμού και αναπροσαρμογής της διαχείρισης

- Σε ένα πρώτο στάδιο, αρκετοί ταμιευτήρες έχουν σχεδιαστεί ως μεμονωμένα υδραυλικά έργα απλού σκοπού.
- Στην πορεία της λειτουργίας τους, οι αυξημένες ανάγκες επιβάλλουν τη συμπλήρωσή τους με νέα έργα.
  - Χαρακτηριστικό παράδειγμα: Τα έργα Ευήνου για την ενίσχυση της υδροδότησης από το Μόρνο.
  - Τα νέα έργα μελετήθηκαν εξ αρχής ως συνιστώσες ενός συστήματος και όχι ως μεμονωμένα (ανασχεδιασμός του συστήματος).
- Σε άλλες περιπτώσεις οι αλλαγές στις κοινωνικές και οικονομικές προτεραιότητες επιβάλλουν την αναπροσαρμογή της διαχείρισής τους με νέους (πολλαπλούς) σκοπούς.
  - Χαρακτηριστικό παράδειγμα: Ταμιευτήρας Πλαστήρα (Φάση 1: ενεργειακό, Φάση 2: αρδευτικό + υδρευτικό + ενεργειακό, Φάση 3: οικοτουριστικό + υδρευτικό + αρδευτικό + ενεργειακό)
  - Η νέα διαχειριστική πολιτική αναγνωρίζει την ανάγκη κατώτατου οικολογικού ορίου στη στάθμη του ταμιευτήρα χωρίς να παραγνωρίζει τη σπουδαιότητα της ύδρευσης και το οικονομικό και κοινωνικό όφελος από την άρδευση και την ενέργεια.



## Επίλογος: Προς πιο πολύπλοκα, πιο αβέβαια αλλά και πιο αειφορικά συστήματα

- Η σημερινή τεχνολογία και οικονομία καθορίζεται από την ντετερμινιστική (ως προς τη διαθεσιμότητα), όσο μη αειφορική, ενεργειακή εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων.
- Το μέλλον ανήκει στις αειφορικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με προεξάρχουσα την ηλιακή.
- Οι ανανεώσιμες πηγές έχουν έντονα τα στοιχεία της μεταβλητότητας (ηλιοφάνεια, άνεμος) και της αβεβαιότητας που κυριαρχούν στη φύση, και δεν επιδέχονται χρονική ρύθμιση.
- Από όλες τις ανανεώσιμες πηγές, μόνο οι μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις (με φράγματα και ταμιευτήρες) επιτρέπουν ρύθμιση και εναρμόνιση προσφοράς και ζήτησης.
- Με τη διάδοση των ανανεώσιμων πηγών θα αποκτήσει μέγιστη σημασία η αποθήκευση ενέργειας.
- Οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις με αντιστρεπτές μηχανές (αντλιοστροβίλους) επιτρέπουν αποθήκευση ενέργειας με μεγάλο συντελεστή απόδοσης.
- Ένα μελλοντικό τοπίο με πολύπλοκα ενεργειακά συστήματα, στα οποία τα αντιστρεπτά μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα θα αποτελούν το κεντρικό ρυθμιστικό στοιχείο (παραγωγή και αποθήκευση), είναι αρκετά πιθανό.
- Η υδρολογική τεχνολογία, μοναδική στην κατανόηση και διαχείριση της αβεβαιότητας, θα έχει να προσφέρει στη διαχείριση τέτοιων συστημάτων.

## Αναφορές

- Alley, R.B. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland, *Quaternary Science Reviews*, 19, 213-226, 2000.
- Alley, R.B., GISP2 Ice Core Temperature and Accumulation Data, IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2004-013, NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA, 2004.
- Brázdil, P., Z.W. Kundzewicz and G. Benito, Historical hydrology for studying flood risk in Europe, *Hydrological Sciences Journal*, 51(5), 739-764, 2006.
- Hazen, A., Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply, *Trans. Amer. Soc. Civil Eng.*, 77, 1539-1640, 1914.
- Hershfield, D. M., Estimating the probable maximum precipitation, *Proc. ASCE, J. Hydraul. Div.*, 87(HYS), 99-106, 1961.
- Hurst, H. E., Long-term storage capacity for reservoirs, *Trans. Amer. Soc. Civil Eng.*, 116, 770-799, 1951.
- Klemes, V., One hundred years of applied storage reservoir theory, *Water Resources Management*, 1(3), 159-175, 1987.
- Kolmogorov, A.N., Wienersche Spiralen und einige andere interessante Kurven in Hilbertschen Raum, *Dokl. Akad. Nauk URSS*, 26, 115-118, 1940.
- Koutsoyiannis, D., A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation, *Water Resources Research*, 35(4), 1313-1322, 1999.
- Koutsoyiannis, D., The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy, *Hydrological Sciences Journal*, 47 (4), 573-595, 2002.
- Koutsoyiannis, D., Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall, 2, Empirical investigation of long rainfall records, *Hydrological Sciences Journal*, 49 (4), 591-610, 2004.
- Koutsoyiannis, D., Reliability concepts in reservoir design, *Water Encyclopedia, Vol. 4, Surface and Agricultural Water*, edited by J. H. Lehr and J. Keeley, 259-265, Wiley, New York, 2005.
- Koutsoyiannis, D., and G. Baloutsos, Analysis of a long record of annual maximum rainfall in Athens, Greece, and design rainfall inferences, *Natural Hazards*, 22 (1), 31-51, 2000.
- Koutsoyiannis, D., and T.A. Cohn, The Hurst phenomenon and climate, *European Geosciences Union General Assembly 2008, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10*, Vienna, 11804, European Geosciences Union, 2008 (<http://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/849>).
- 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.
- Kritskiy, S.N., and M.F. Menkel, Long-term streamflow regulation (in Russian), *Gidrotekhn. Stroit.*, 11, 3-10, 1935.
- Kritskiy, S.N., and M.F. Menkel, Generalized methods for runoff control computations based on mathematical statistics, *Journal of Hydrology*, 172, 365-377, 1995. Translated by V. Klemes from the Russian original "Obobshchennye priemy rascheta regulirovaniya stoka na osnove matematicheskoy statistiki", *Gidrotekhn. Stroit.*, 2, 19-24, 1940.
- Langousis, A., and D. Koutsoyiannis, A stochastic methodology for generation of seasonal time series reproducing overyear scaling behaviour, *Journal of Hydrology*, 322, 138-154, 2006.
- Metropolis, N. and S. M. Ulam, The Monte Carlo method, *J. Amer. Statist. Assoc.*, 44, 335-341, 1949.
- Moberg, A., D.M. Sonechkin, K. Holmgren, N.M. Datsenko, and W. Karlen, Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data, *Nature*, 433(7026), 613-617, 2005.
- Moran, P. A. P., A probability theory of dams and storage systems, *Aust. J. Appl. Sci.* 5, 116-124, 1954.
- Nalbantis, I., and D. Koutsoyiannis, A parametric rule for planning and management of multiple reservoir systems, *Water Resources Research*, 33 (9), 2165-2177, 1997.
- Papalexioiu, S.M., and D. Koutsoyiannis, A probabilistic approach to the concept of probable maximum precipitation, *Advances in Geosciences*, 7, 51-54, 2006.
- Pleshkov, Ya. F., Rapid and accurate computations for storage reservoirs (in Russian), *Gidrotekhn. Stroit.*, 6, 1939.
- Rippl, W., The capacity of storage reservoirs for water supply, *Proc. Inst. Civil Eng.*, 71, 270-278, 1883.
- Savarenskiy, A.D., A method for runoff control computation, *Journal of Hydrology*, 172, 355-363, 1995. Translated by V. Klemes from the Russian original "Metod rascheta regulirovaniya stoka, *Gidrotekhn. Stroit.*, 2: 24-28, 1940.
- Thomas, H. A., Jr. and R. P. Burden, *Operations Research in Water Quality Management*, Harvard University, 1963.
- Schultz, G. A., Determination of deficiencies of the Rippl-diagram method for reservoir sizing by use of synthetically generated runoff data, *Proceedings XIIth Congress of ICOLD* (International Commission on Large Dams), March/April 1976, Mexico City, 1976.
- Κουτσογιάννης, Δ., Μελέτη λειτουργίας ταμιευτήρων, Γενική Διάταξη έργων εκτροπής Αχελώου προς Θεσσαλία, Ανάδοχος: Ειδική Υπηρεσία Δημοσίων Έργων Αχελώου - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Συνεργάζομενοι: Γ. Καλαούζης, ELECTROWATT, Π. Μαρinos, Δ. Κουτσογιάννης, 420 σελίδες, 1996.