Υδροηλεκτρικά Έργα
8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Προσομοίωση και βελτιστοποίηση για τον σχεδιασμό και τη διαχείριση υδροηλεκτρικών έργων

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Νίκος Μαμάσης & Δημήτρης Κουτσογιάννης
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Η παρουσίαση διατίθεται στο Διαδίκτυο στον ιστότοπο www.itia.ntua.gr

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/αντιεπιστημονική 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 μακροπρόθεσμη εμμονή**: Στοχαστική-δυναμική συμπεριφορά που χαρακτηρίζει τις φυσικές (καθώς και τις κοινωνικο-οικονομικές και τεχνολογικές) διεργασιών. 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)** Στατιστική μελέτη του εύρους (range) για το σχεδιασμό των ταμιευτήρων και 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)

Συστημική μεθοδολογία

- **Ζητούμενο**: Προσδιορισμός ελάχιστης ωφέλιμης χωρητικότητας c ταμιευτήρα, ώστε να ικανοποιείται μια σταθερή ζήτηση δ, με δεδομένη χρονοσειρά εισροών x_t για ένα χρονικό ορίζοντα ελέγχου, μήκους n, και δεδομένο αρχικό απόθεμα s_0
- **Μεταβλητές ελέγχου**: Χωρητικότητα c, ωφέλιμο απόθεμα s_t και απώλειες λόγω υπερχείλισης w_t για n χρονικά βήματα ($2n + 1$ μεταβλητές)
- **Μαθηματική διατύπωση ως προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού**:

  minimize $f = c$

  subject to $s_t = s_{t-1} + x_t - d - w_t$ για κάθε $t = 1, \ldots, n$ (υδατικό ισοζύγιο)

  $s_t \leq c$ για κάθε $t = 1, \ldots, n$

  $s_n = s_0$ (πρόβλημα μόνιμων συνθηκών – steady state)

  $c, s_t, w_t \geq 0$
- **Μειονεκτήματα**:
  - Πολύ μεγάλος αριθμός μεταβλητών ελέγχου
  - Αδυναμία χειρισμού μη γραμμικών σχέσεων
  - Πλήρως ντετερμινιστική θεώρηση – απουσιάζει η έννοια της *αξιοπιστίας*

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
- Όμως οι μελετητές είναι ενήμεροι και έχουν εφαρμόσει στοχαστικές μεθόδους της ρωσικής σχολής

Οριστική μελέτη φράγματος Ιάσμου (1971)

Ἀθῆναι Ἰούλιος 1971

Συντάξαντες: Δ.Χριστούλας -Γ.Νουτσό-πουλος - Λ. Λαζαρίδης - Χ. Καπετανάκης

Οἱ ἀνάδοχοι

Δ. ΦΡΑΓΚΙΔΑΚΗΣ

Γ. ΚΑΡΑΒΟΚΥΡΗΣ

Ι. ΔΑΟΥΤΗΣ

Ι. ΕΥΘΥΜΙΑΤΟΣ

Δ. ΧΡΙΣΤΟΥΛΑΣ

Γ. ΝΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ

Λ. ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ

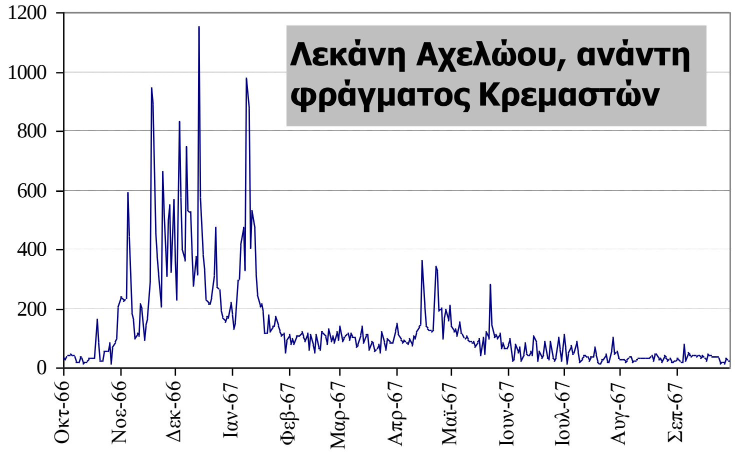
Χ. ΚΑΠΕΤΑΝΑΚΗΣ

Ἐνταῦθα ὡς καί ἐν τῇ ἐγκεκριμένῃ προμελέτῃ ἐρευνᾶται ἡ μεταβολή τῆς χρησίμου χωρητικότητος διά διαφόρους ἀπολήψεις ἀφ'ἑνός μέν βάσει τῶν κλασσικῶν μεθόδων μελέτης τῶν χρησίμων ἀθροιστικῶν καμπύλων τῶν διαφορῶν ἀφ'ἑτέρου δέ διά στατιστικῶν μεθόδων ἵνα ληφθῇ ὑπ'ὄψιν μακροχρόνιος καί τυχαία διαδοχή τῶν συρροῶν. Πρός τοῦτο ἐχρησιμοποιήσαμεν τήν αὐτήν μέθοδον τήν ἐφαρμοσθεῖσαν εἰς τήν ἐγκεκριμένην προμελέτην ἤτοι τῶν KRITZKH καί MENKIEL συμπληρωθεῖσαν ὑπό τοῦ PLESCHKOW.Ἐν συνεχείᾳ προβαίνομεν εἰς τόν ὑπολογισμόν τοῦ ὠφελίμου ὄγκου τοῦ ταμιευτῆρος. Ἡ ἀκολουθηθεῖσα μέθοδος εἶναι ὡς καί ἀνωτέρω ἐλέχθη ἡ αὐτή μέ τήν τῆς προμελέτης, ἥν καί ἐν περιλήψει περιγράφομεν κατωτέρω.

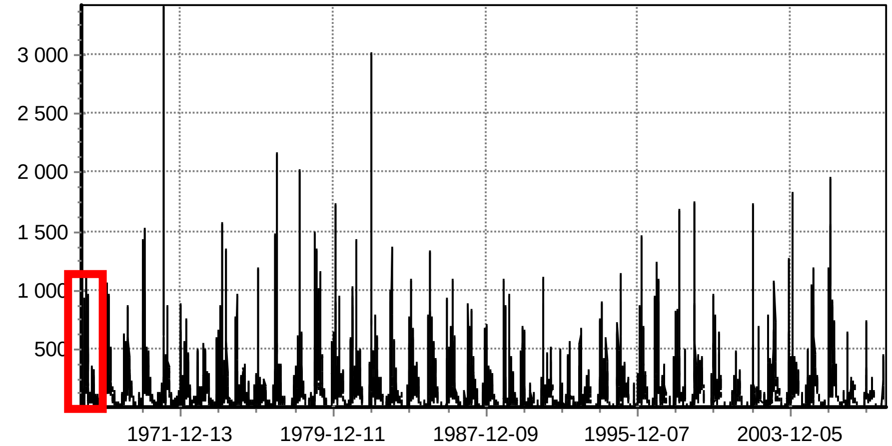
Διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των υδρολογικών μεταβλητών από απλά τυχαία φαινόμενα

Ρουλέτα	**Παροχή ποταμού**
Διακριτό και πεπερασμένο σύνολο δυνατών τιμών (0, 1, ..., 36)	Συνεχές και άπειρο σύνολο δυνατών τιμών, από 0 μέχρι +∞. Ο ρυθμός με τον οποίο τείνει στο άπειρο δεν είναι ο ελάχιστος δυνατός (Φαινόμενο Νώε)
Σταθερή συμπεριφορά στο χρόνο	Μεταβαλλόμενη συμπεριφορά (κανονική μεταβολή με τις εποχές – ακανόνιστη σε άλλες κλίμακες)
Γνωστή *a priori* πιθανότητα εμφάνισης κάθε τιμής (1/37)	Κατανομή πιθανοτήτων εμπειρικά διαπιστωμένη από μετρήσεις
Το αποτέλεσμα κάθε ρίψης δεν εξαρτάται από την ιστορία των προηγούμενων ρίψεων	Κάθε τιμή εξαρτάται από όλη την ιστορία των προηγούμενων τιμών (Εμμονή: Βραχυπρόθεσμη, μακροπρόθεσμη)

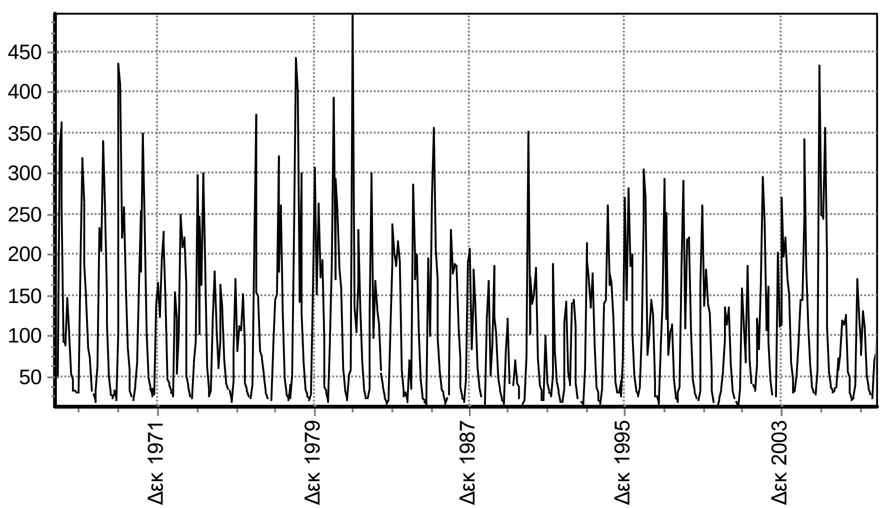
Χρονικές κλίμακες υδρολογικών διεργασιών



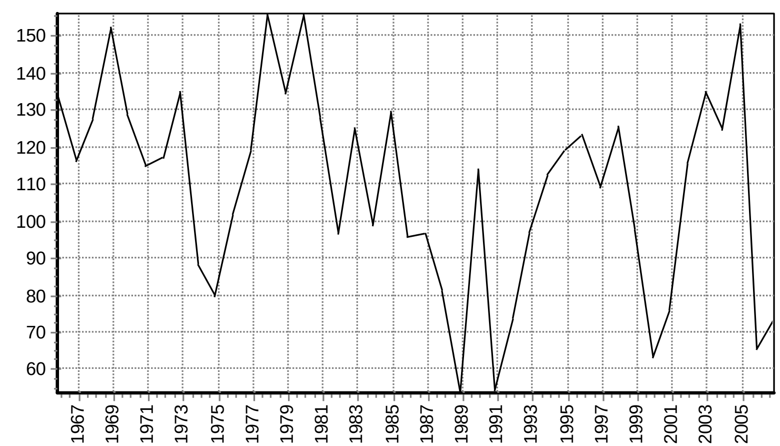
Μέση ημερήσια παροχή υδρ. έτους 1966-67 (m³/s)



Μέση ημερήσια παροχή 1966-2008 (m³/s)



Μέση μηνιαία παροχή 1966-2008 (m³/s)



Μέση ετήσια παροχή 1966-2008 (m³/s)

Δυσκολία στον τρόπο εκτίμησης πιθανοτήτων σύνθετων γεγονότων

- Παράδειγμα: Αν (α) χαρακτηρίσουμε ως ξηρό έτος κάθε έτος στο οποίο ο ετήσιος όγκος απορροής ενός ποταμού είναι μικρότερος ή ίσος των 3 km^3, και (β) γνωρίζουμε ότι η πιθανότητα ενός ξηρού έτους είναι 1/10, ποιά είναι η πιθανότητα δύο διαδοχικά χρόνια να είναι ξηρά;

Απάντηση: Δεν είναι εύκολο να δοθεί με κλασικές μαθηματικές μεθόδους

- Αντίστοιχο παράδειγμα στη ρουλέτα: ποια είναι η πιθανότητα σε δύο διαδοχικές ρίψεις να έχουμε αποτέλεσμα μικρότερο ή ίσο του 3;

Απάντηση: $(4/37)^2$

Επιστημονικοί κλάδοι που επιστρατεύονται για την απάντηση στο προηγούμενο ερώτημα

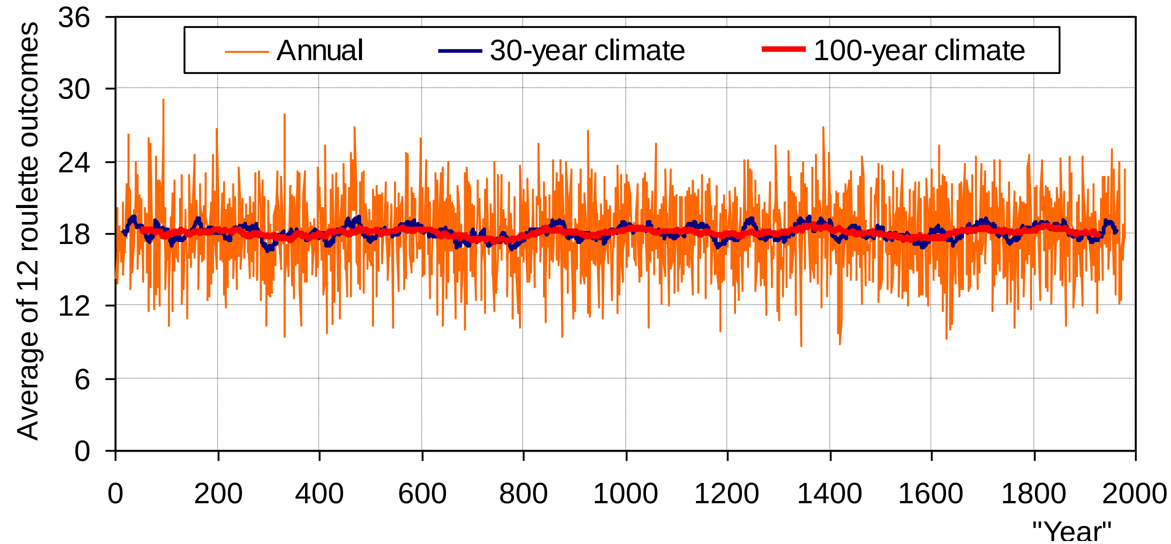
1. **Θεωρία πιθανοτήτων**: Θεμέλιο των υπολογισμών
2. **Στατιστική**: Εκτίμηση της κατανομής πιθανότητας με βάση ένα δείγμα μετρήσεων της παροχής
3. **Θεωρία στοχαστικών ανελίξεων**: Μαθηματική περιγραφή της εξάρτησης των μεγεθών στο χρόνο
4. **Προσομοίωση**: Υπολογιστική μαθηματική τεχνική – Βασίζεται στον πειραματισμό πάνω σε συνθετικές χρονοσειρές

Ιστορία της στοχαστικής προσομοίωσης (ή μεθόδου Monte Carlo)

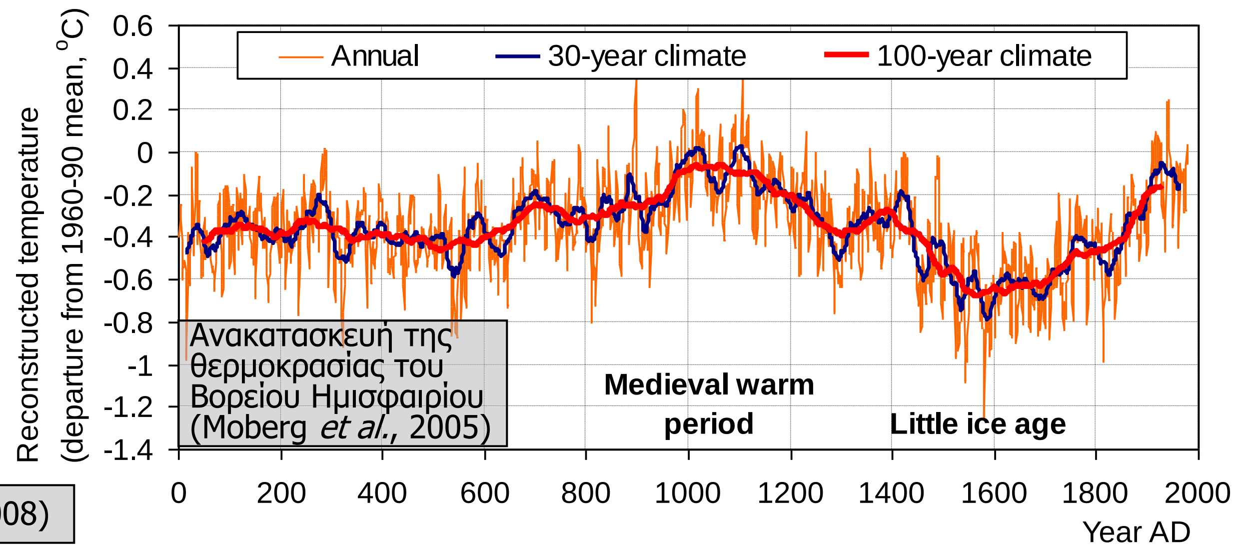
- Συνδυάζεται με την ανάπτυξη των μαθηματικών και της φυσικής στα μέσα του 20ου αιώνα αλλά και των υπολογιστών
- Ανακαλύφθηκε από τον πολωνό μαθηματικό Stanislaw Ulam (εργαζόταν στην ομάδα του Los Alamos) το 1946 (Metropolis, 1989, Eckhardt, 1989)
- Αμέσως μετά, η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση προβλημάτων συγκρούσεων ουδετερονίων από τους φυσικούς και μαθηματικούς του Los Alamos (John von Neumann, Nicholas Metropolis, Enrico Fermi), αφού κωδικοποιήθηκε στον πρώτο υπολογιστή ENIAC
- Η «επίσημη» ιστορία της μεθόδου ξεκινά με τη δημοσίευση των Metropolis and Ulam (1949)
- Από τη δεκαετία του 1970 η προσομοίωση χρησιμοποιείται σε προβλήματα υδατικών πόρων (παρόλο που τα πρώτα βήματα έγιναν τη δεκαετία του 1950 – Barnes, 1954)
- Η έρευνα για τις στοχαστικές μεθόδους στους υδατικούς πόρους εξακολουθεί και εντείνεται

Ακαταλληλότητα των απλών πιθανοτικών μοντέλων για την περιγραφή των φυσικών διεργασιών

Κλίμα τύπου
“ρουλέτας ”



Πραγματικό κλίμα
“Hurst-Kolmogorov”



Πηγή: Koutsoyiannis & Cohn (2008)

Η δυναμική 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 *δυναμική* (ή *συμπεριφορά*, ή *πραγματικότητα*) *Hurst-Kolmogorov* (Koutsoyiannis & Cohn, 2008).

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS

Founded November 5, 1852

TRANSACTIONS

Paper No. 2447

LONG-TERM STORAGE CAPACITY OF RESERVOIRS

BY H. E. HURST[1]

WITH DISCUSSION BY VEN TE CHOW, HENRI MILLERET, LOUIS M. LAUSHEY, AND H. E. HURST.

SYNOPSIS

A solution of the problem of determining the reservoir storage required on a given stream, to guarantee a given draft, is presented in this paper. For example, if a long-time record of annual total discharges from the stream is available, the storage required to yield the average flow, each year, is obtained by

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."

Comptes Rendus (Doklady) de l'Académie des Sciences de l'URSS
1940. Volume XXVI, № 2

MATHEMATIK

WIENERSCHE SPIRALEN UND EINIGE ANDERE INTERESSANTE KURVEN IM HILBERTSCHEN RAUM

Von A. N. KOLMOGOROFF, Mitglied der Akademie

Wir werden hier einige Sonderfälle von Kurven betrachten, denen meine vorhergehende Note «Kurven im Hilbertschen Raum, die gegenüber einer einparametrigen Gruppe von Bewegungen invariant sind» (¹) gewidmet ist.

Unter einer Ähnlichkeitstransformation im Hilbert... Raum H werden wir eine beliebige ...

... $\neq x'$ der Punkte, die auf derselben Kurve liegen, übergeht.

Satz 6. *Die Funktion $B_\xi(\tau_1, \tau_2)$, die der Funktion $\xi(t)$ der Klasse $\mathfrak{A}$ entspricht, kann in der Form*

$$B_\xi(\tau_1, \tau_2) = c\,[\,|\tau_1|^\gamma + |\tau_2|^\gamma - |\tau_1 - \tau_2|^\gamma]$$

115

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: $\underline{x}(t)$

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

$$\underline{x}_i^{(k)} := \frac{1}{k} \int_{(i-1)k}^{ik} \underline{x}(t)\, dt$$

Για αναλυτικά στοιχεία βλ. Koutsoyiannis (2002, 2013)

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)	$\rho_j \equiv \rho_j^{(1)} = \rho_j^{(k)} \approx H(2H-1)\,\lvert j\rvert^{2H-2}$	
Φάσμα ισχύος (για συχνότητα ω)	$s(\omega) \equiv s^{(1)}(\omega) \approx 4(1-H)\,\sigma^2\,(2\omega)^{1-2H}$	$s^{(k)}(\omega) \approx 4(1-H)\,\sigma^2\,k^{2H-2}\,(2\omega)^{1-2H}$

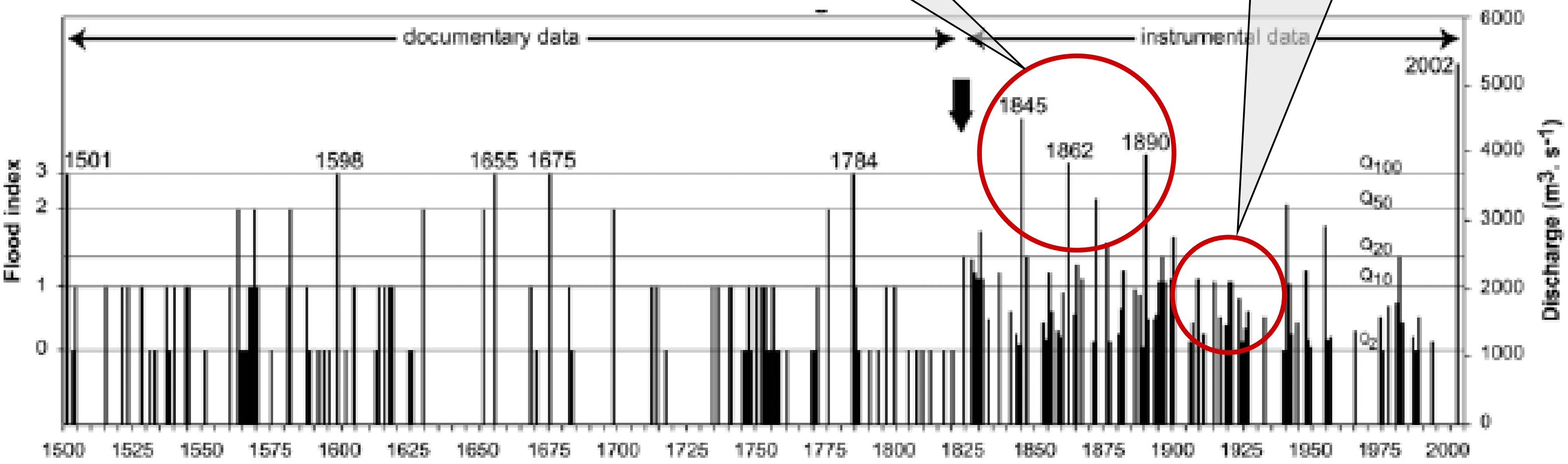
Στην κλασική στατιστική $\sigma^{(k)} = \sigma/\sqrt{k}$

Όλες οι εκφράσεις είναι συναρτήσεις δύναμης της κλίμακας k, της υστέρησης j και της συχνότητας ω

Παράδειγμα 1: Τάση ομαδοποίησης των πλημμυρών

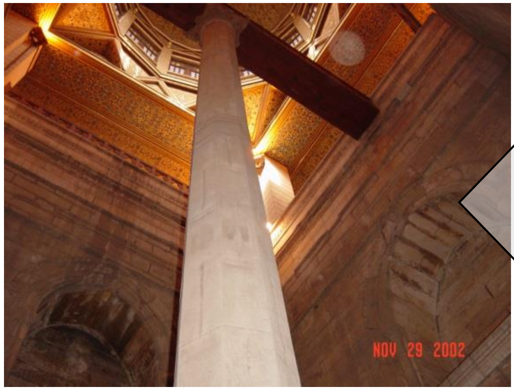
1845-90: Τρεις πλημμύρες μεγαλύτερες της πλημμύρας εκατονταετίας σε 45 χρόνια

1900-45: Καμιά πλημμύρα μεγαλύτερη της πλημμύρας δεκαετίας σε 40 χρόνια

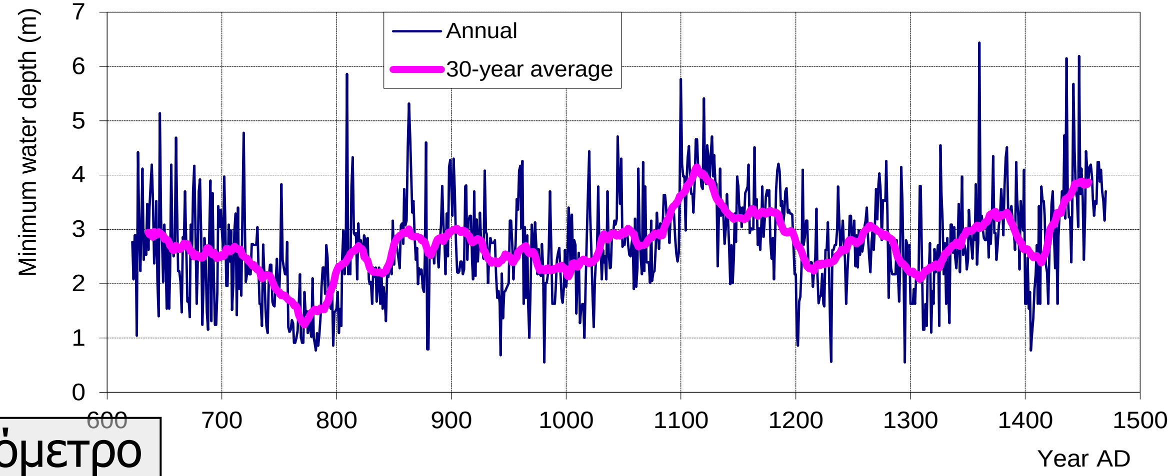


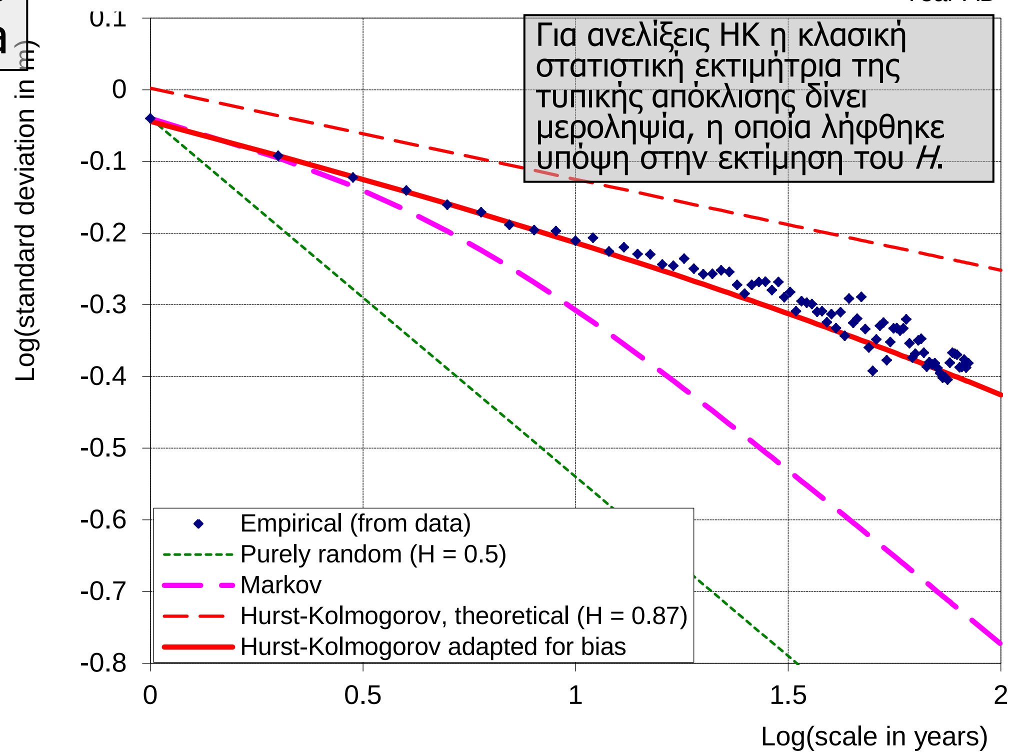
Πλημμυρικές παροχές του ποταμού Vltava στην Πράγα τους τελευταίους 5 αιώνες (πηγή: Brázdil et al., 2006)

Παράδειγμα 2: Ετήσιες ελάχι-στες στάθμες στο Νείλο



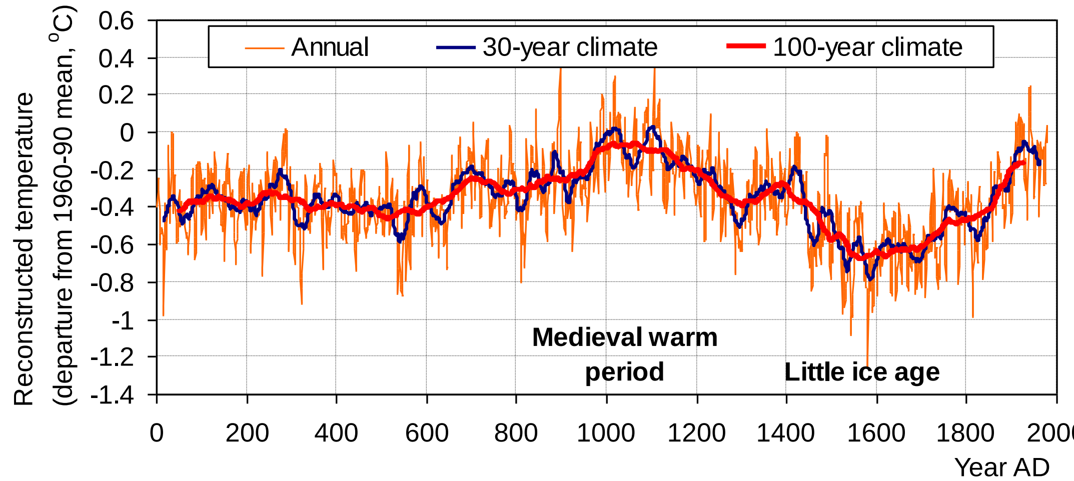
Νειλόμετρο του Roda

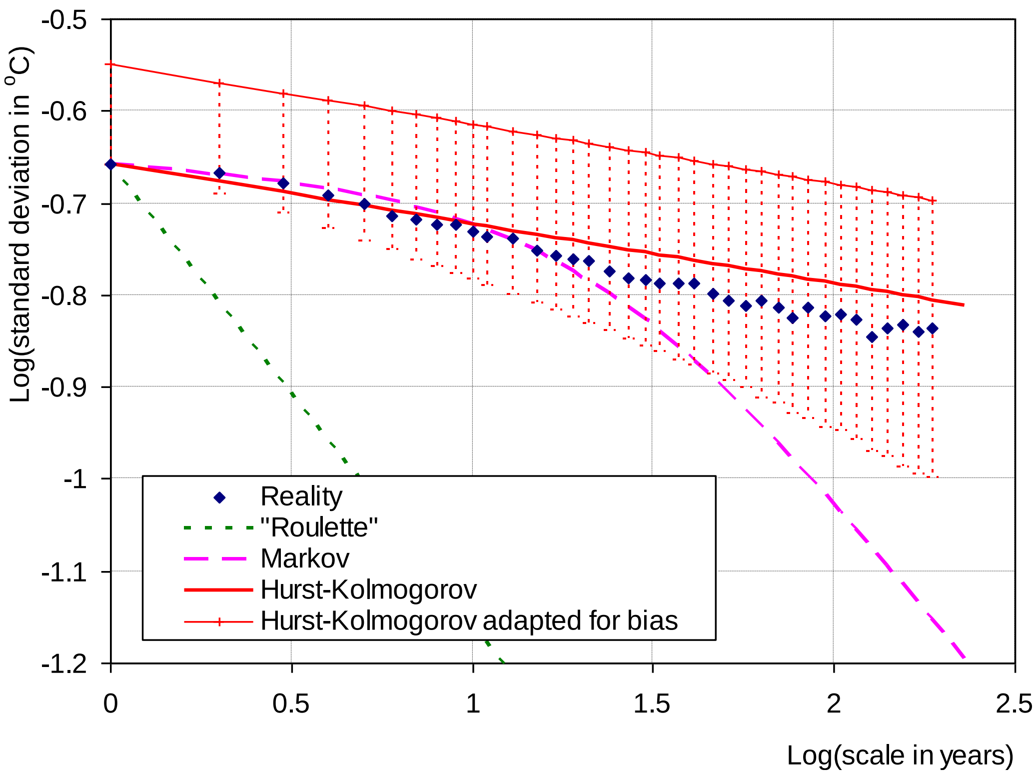




- Η μεγαλύτερη σε μήκος ιστορική χρονοσειρά μετρήσεις (849 χρόνια).
- Συντελεστής Hurst $H = 0.87$.
- Παρόμοια τιμή του H προκύπτει και από την ταυτόχρονη χρονοσειρά ετήσιας μέγιστης στάθμης, καθώς και από τη σύγχρονη χρονοσειρά παροχής του Νείλου στο Aswan (131 χρόνια).

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

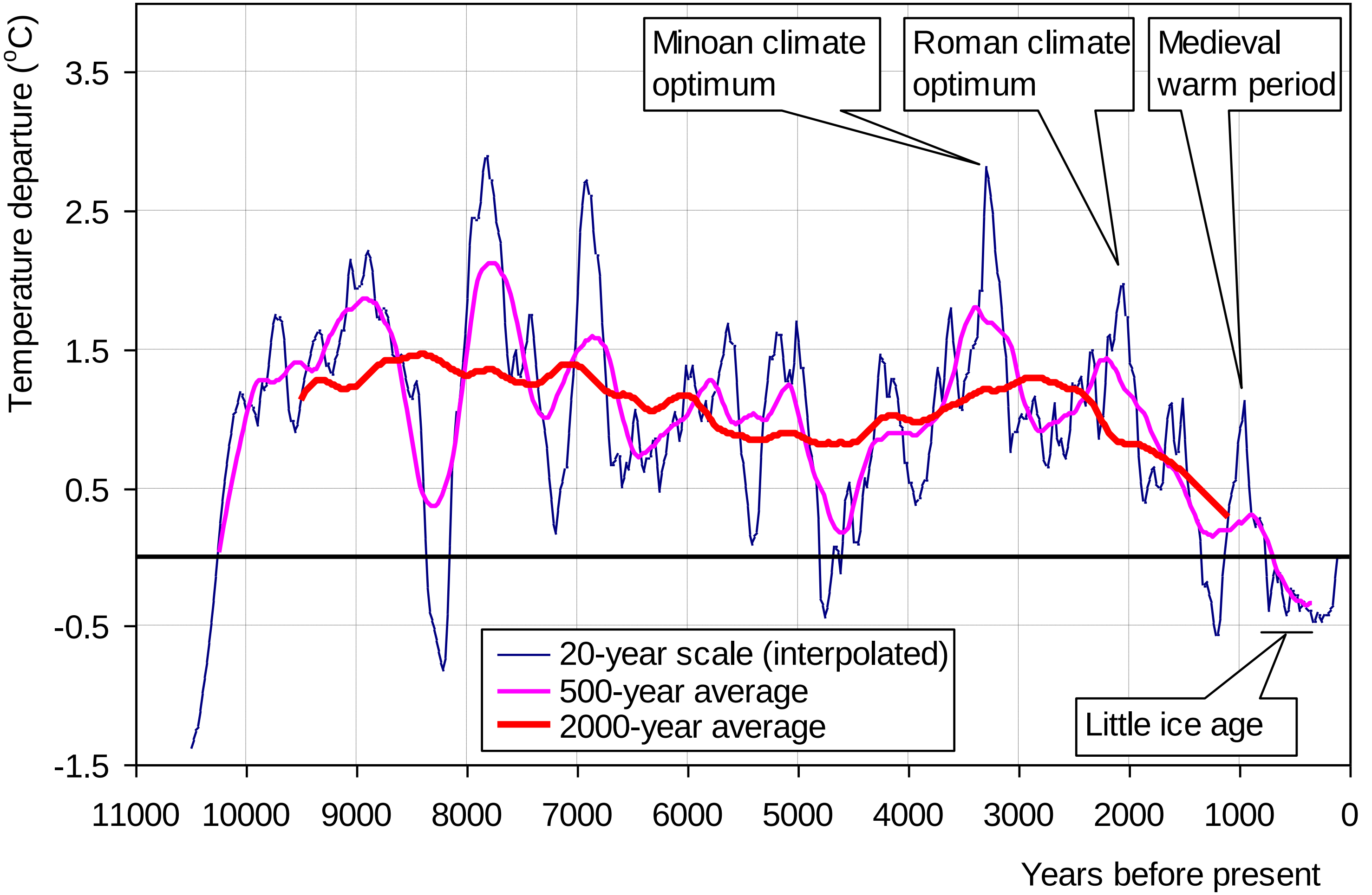




Εντονότατη συμπεριφορά ΗΚ με συντελεστή Hurst H = 0.94

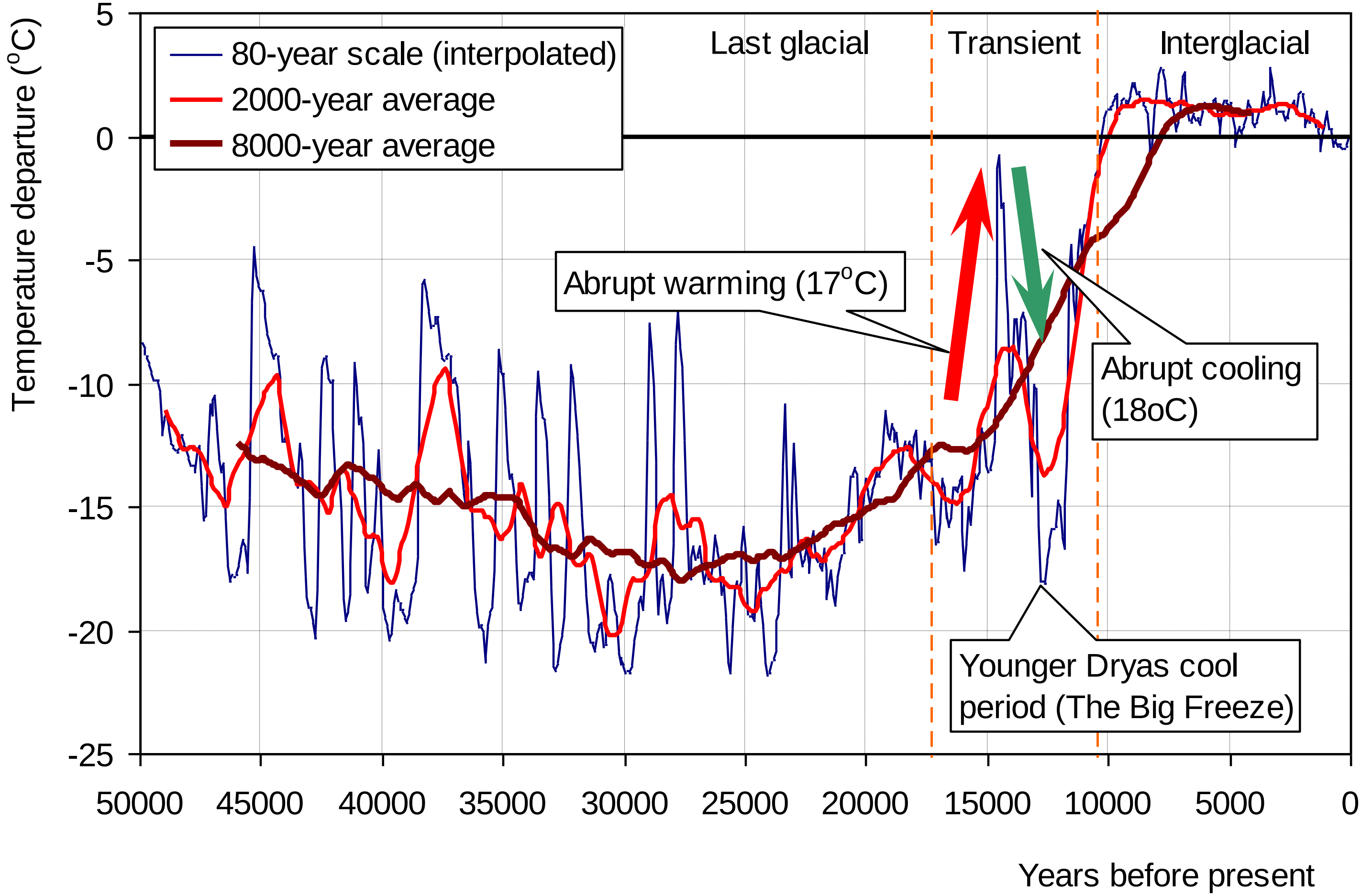
Η μεροληψία εκτιμήθηκε με προσομοίωση Monte Carlo (200 προσομοιώσεις με μήκος ίσο με αυτό της αυθεντικής σειράς).

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

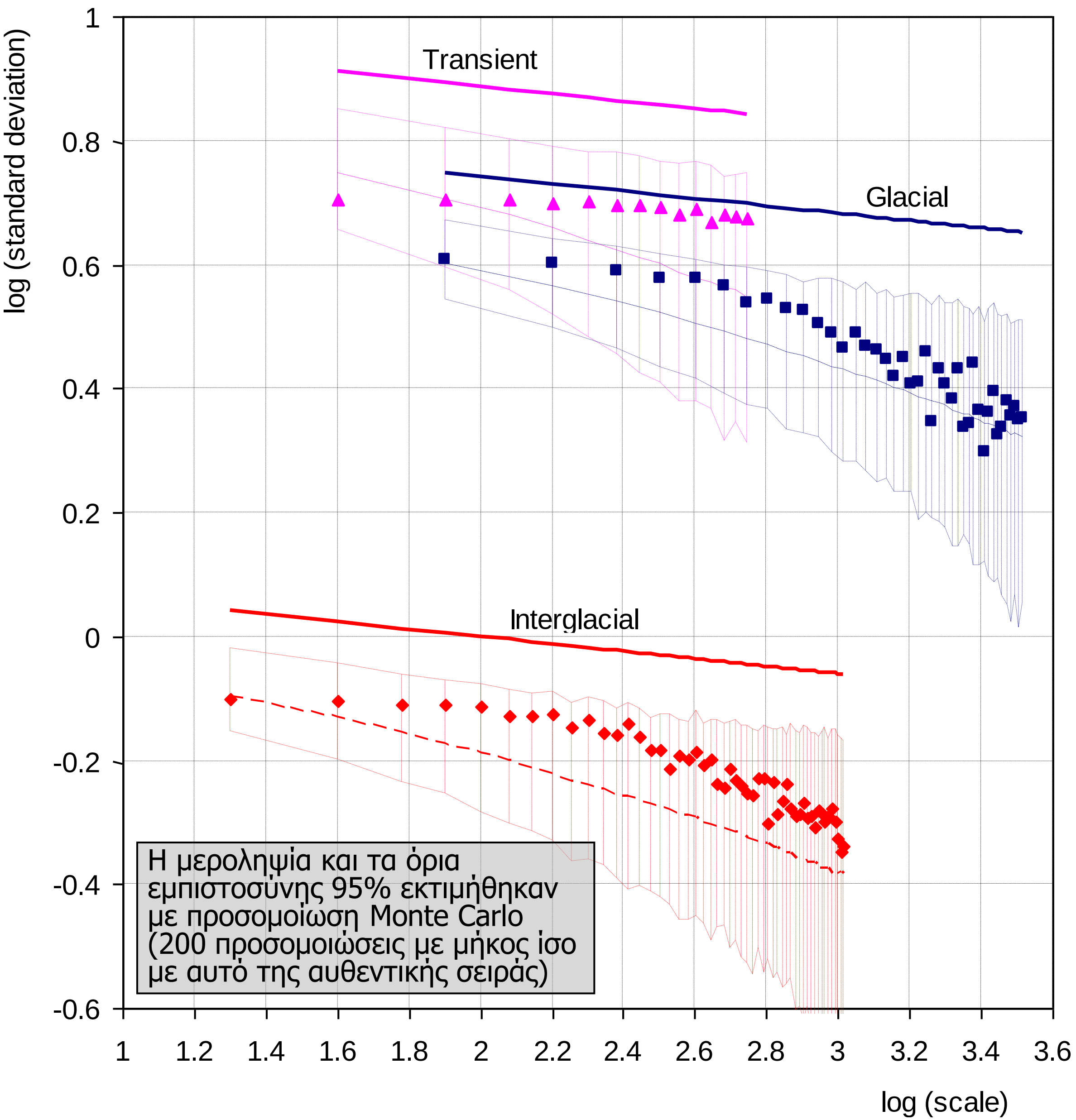
Παράδειγμα 4 (συν.): Ανακατασκευασμένη σειρά θερμοκρασιών της Γροιλανδίας για 50000 χρόνια



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

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

Επιβεβαιώνεται πανηγυρικά η εντονότατη συμπεριφορά HK 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

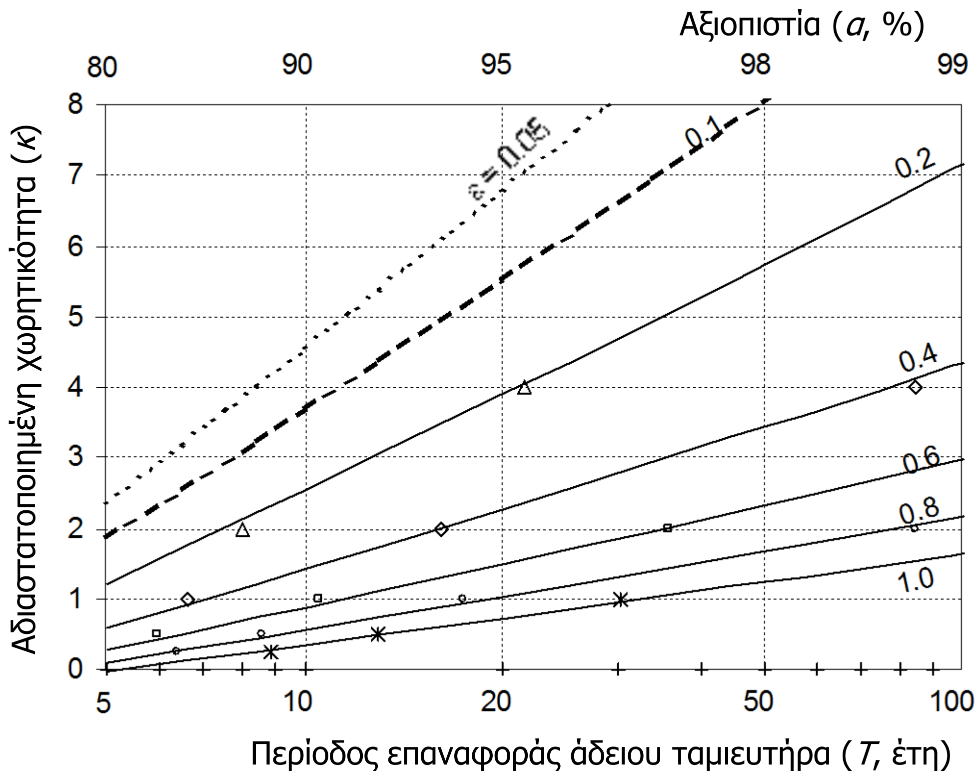
Τι κάνουμε για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ταμιευτήρα

1. Κατασκευή καμπύλης ΧΑΑ με βάση τα ιστορικά δεδομένα – αν το μήκος του δείγματος είναι ικανοποιητικό.
   - Υπολογισμοί απλούστατοι με βάση την εξίσωση:
     $\underline{s}_t = \max[0, \min(\underline{s}_{t-1} + \underline{x}_t - \delta_t, c)]$,
     όπου $\underline{s}_t$ το απόθεμα, $\underline{x}_t$ η ολική καθαρή εισροή και δ_t η ζήτηση στο χρόνο t, ενώ c η χωρητικότητα του ταμιευτήρα. Αστοχία υπάρχει όταν $\underline{s}_t = 0$.
   - 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.

Τυπικά αποτελέσματα της στοχαστικής μεθόδου (σχέσεις ΧΑΑ)

Χαρακτηριστικά μεγέθη

- μ: μέση τιμή (καθαρών) εισροών
- σ: τυπική απόκλιση εισροών
- a: αξιοπιστία
- $T := 1 / (1 - a)$: περίοδος επαναφοράς άδειου ταμιευτήρα
- δ: ζήτηση
- c: χωρητικότητα ταμιευτήρα
- $\kappa := c / \sigma$: αδιαστατοποιημένη χωρητικότητα ταμιευτήρα
- $\varepsilon := (\mu - \delta)/\sigma$: 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.

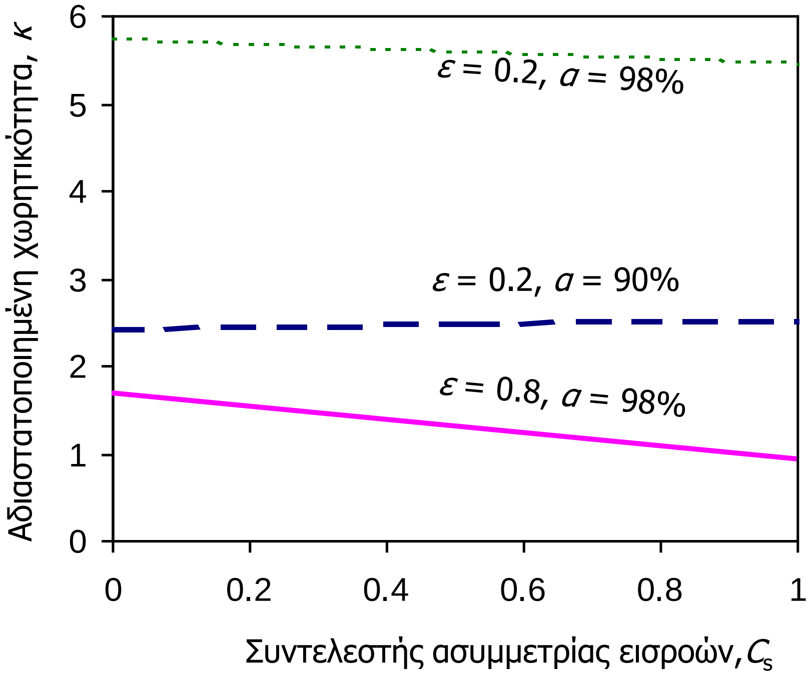
Αποτελέσματα (για $T > 2$ ή $a > 0.5$)

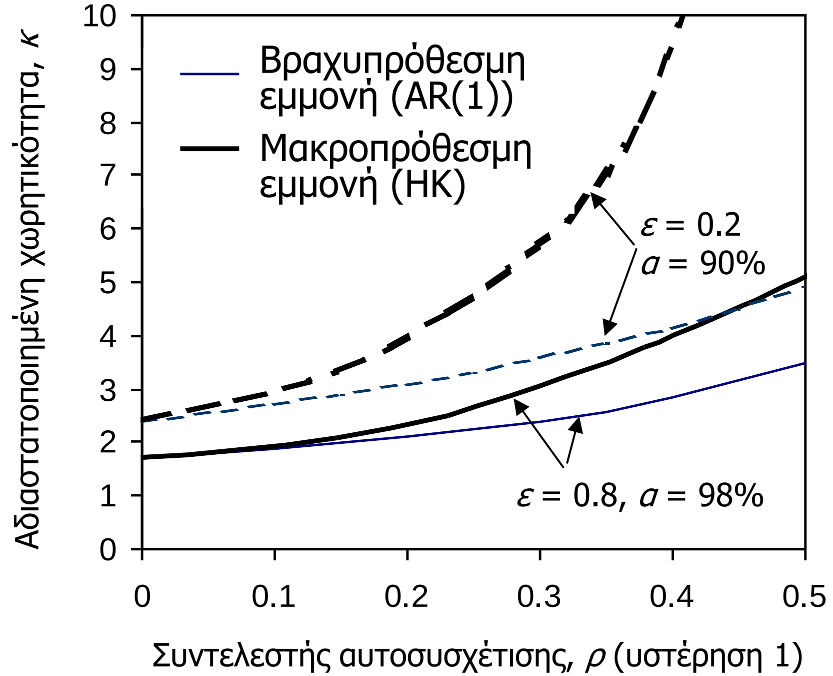
$\ln(T - 1) = 2\,(\varepsilon + 0.25)\,(\kappa + 0.5)^{0.8}$ ή

$\ln(T - 1) = -\ln(1/a - 1) = (2/\sigma^{1.8})\,(\mu + 0.25\sigma - \delta)\,(c + 0.5\sigma)^{0.8}$

Για αναλυτικότερες πληροφορίες βλ. Koutsoyiannis (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)

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.
   - Οι απλούστερες στοχαστικές μέθοδοι με δυναμική ΗΚ είναι αυτές των Koutsoyiannis (2003) και Langousis & Koutsoyiannis (2006), και μπορούν να υλοποιηθούν σε λογιστικά φύλλα (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.

Αλγοριθμική εφαρμογή της προσομοίωσης: Εισαγωγή στους τυχαίους αριθμούς

- Μια ακολουθία αριθμών x_i λέγεται *ακολουθία τυχαίων αριθμών δεδομένης κατανομής* $F(x)$ αν αποτελεί δείγμα της τυχαίας μεταβλητής $\underline{x}$, η οποία έχει συνάρτηση κατανομής $F(x)$ (Papoulis, 1990).
- Η διαδικασία γέννησης τυχαίων αριθμών είναι γνωστή και ως *δειγματοληψία Monte Carlo*.
- Για κάθε συνάρτηση κατανομής μπορεί να κατασκευαστούν *γεννήτριες τυχαίων αριθμών*.
- Η γεννήτρια είναι ένας αλγόριθμος, συνήθως αναδρομικός, ο οποίος μπορεί να παράγει διαδοχικά οσουσδήποτε όρους της τυχαίας ακολουθίας.
- Οι τυχαίοι αριθμοί δεν γεννώνται στην τύχη, αλλά βάσει ενός αυστηρά προσδιοριστικού αλγορίθμου, ο οποίος οδηγεί στην ίδια ακολουθία αριθμών, αν ξεκινήσει με τις ίδιες αρχικές συνθήκες. (Για το λόγο αυτό τους τυχαίους αριθμούς μερικοί τους ονομάζουν *ψευδοτυχαίους*.) Αν αλλάξουμε τις αρχικές συνθήκες παίρνουμε άλλη τυχαία ακολουθία (ακριβέστερα άλλο τμήμα της ίδιας περιοδικής ακολουθίας).

Γέννηση ανεξάρτητων τυχαίων αριθμών με δεδομένη συνάρτηση κατανομής

- Ομοιόμορφη κατανομή
  - Γεννώνται οι ακέραιοι αριθμοί q_i από τον αναδρομικό τύπο $q_i = (k\, q_{i-1} + c) \bmod m$, όπου k, c και m κατάλληλες ακέραιες σταθερές (π.χ. $k = 69069$, $c = 1$, $m = 2^{32} = 4\,294\,967\,296$ ή $k = 7^5 = 16\,807$, $c = 0$, $m = 2^{31} - 1 = 2\,147\,483\,647$· βλ. Ripley, 1987, σ. 39), οι οποίοι αποτελούν τυχαίους αριθμούς ομοιόμορφα κατανεμημένους στο διάστημα [1, $m - 1$].
  - Υπολογίζονται οι αριθμοί $u_i = q_i / m$ που αποτελούν πρακτικά ακολουθία τυχαίων αριθμών συνεχούς τύπου στο διάστημα (0, 1).
- Τυχούσα κατανομή
  - Αν $F^{-1}(\ )$ η αντίστροφη συνάρτηση της συνάρτησης κατανομής $F(x)$, και u_i διαδοχικοί ομοιόμορφοι τυχαίοι αριθμοί στο διάστημα (0, 1), τότε οι αριθμοί

$$w_i = F^{-1}(u_i)$$

    αποτελούν διαδοχικούς όρους ακολουθίας τυχαίων αριθμών με συνάρτηση κατανομή $F(x)$.

Στο Excel η συνάρτηση rand() γεννά τυχαίους αριθμούς με ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα [0, 1] και η συνάρτηση normsinv(rand()) τυχαίους αριθμούς με κανονική κατανομή N(0, 1).

Γέννηση τυχαίων αριθμών με μακροπρόθεσμη εμμονή: Η μέθοδος του συμμετρικού κυλιόμενου μέσου (SMA)

Το σχήμα συμμετρικού κυλιόμενου μέσου (symmetric moving average – SMA) έχει εισαχθεί από τον Koutsoyiannis (2000) και μετασχηματίζει μια ακολουθία λευκού θορύβου $\underline{v}_i$ σε μια αυτοσυσχετισμένη ακολουθία $\underline{x}_i$ σύμφωνα με τη σχέση

$$\underline{x}_i = \sum_{j=-q}^{q} a_{|j|}\, \underline{x}_{i+j} = a_q\, \underline{v}_{i-q} + \ldots + a_1\, \underline{v}_{i-1} + a_0\, \underline{v}_i + a_1\, \underline{v}_{i+1} + \ldots + a_q\, \underline{v}_{i+q}$$

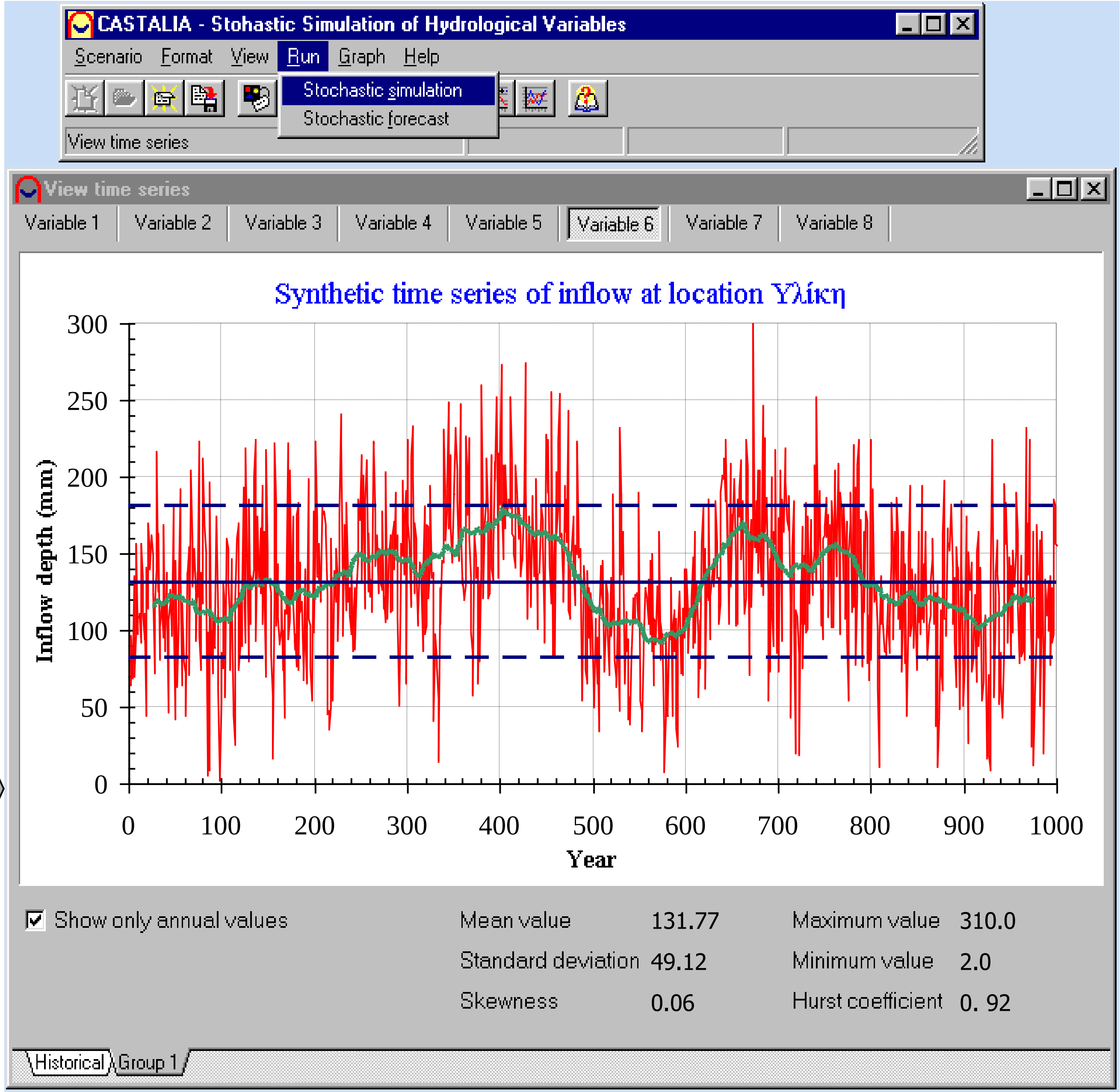
όπου τα a_j είναι συντελεστές βάρους και ο αριθμός τους q θεωρητικά είναι άπειρος αλλά στην πράξη λαμβάνει μια πεπερασμένη τιμή. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για τυχούσα συνάρτηση αυτοσυσχέτισης.

Στην περίπτωση της ανέλιξης HK (γνωστής αλλιώς ως FGN) αποδεικνύεται (Koutsoyiannis, 2002) ότι οι συντελεστές βάρους είναι

$$a_j \approx \frac{\sqrt{(2-2H)\,\gamma_0}}{3-2H}\,\left[|j+1|^{H+0.5} + |j-1|^{H+0.5} - 2\,|j|^{H+0.5}\right]$$

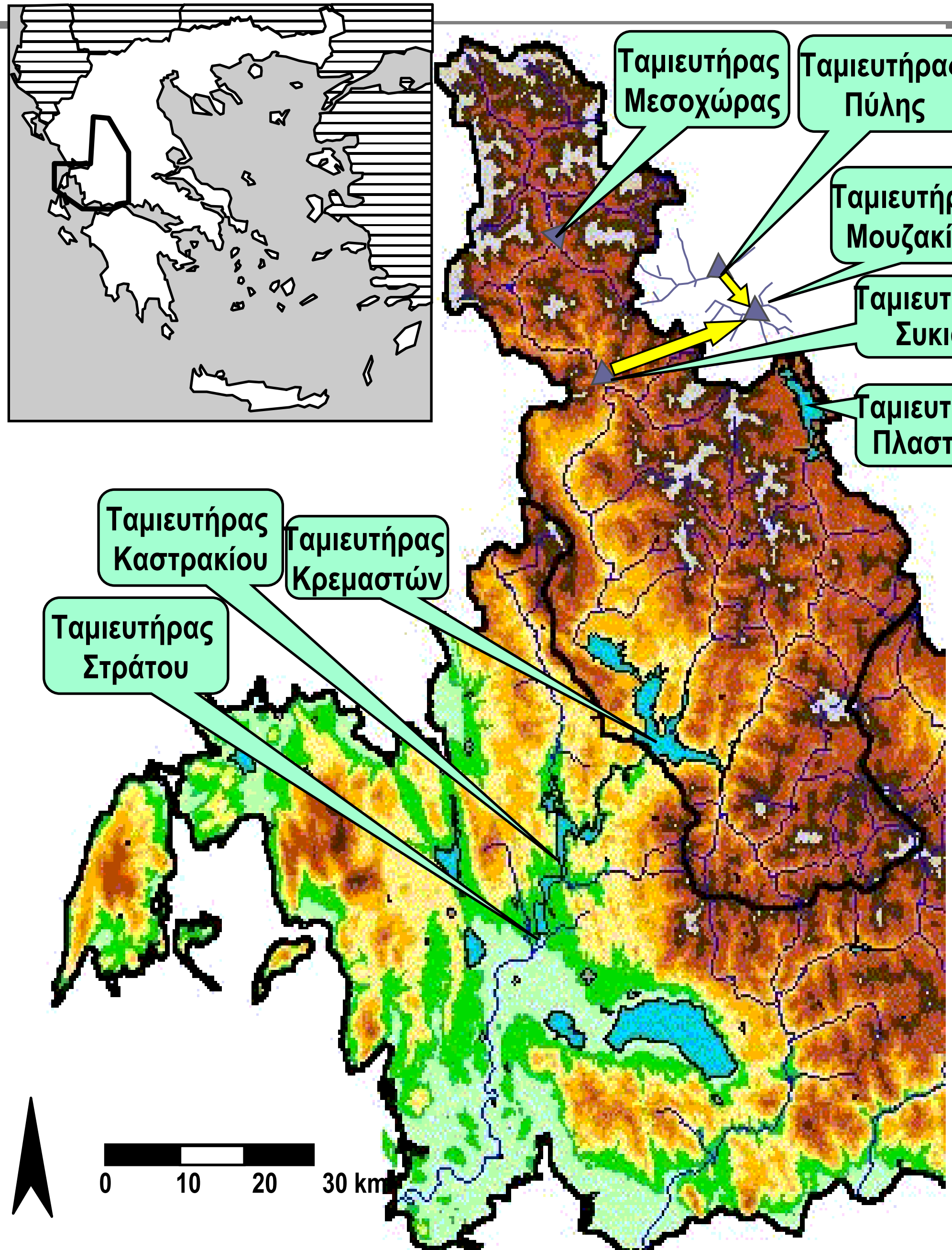
Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών με το λογισμικό Κασταλία

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



Η ανάγκη ανασχεδιασμού και αναπροσαρμογής της διαχείρισης

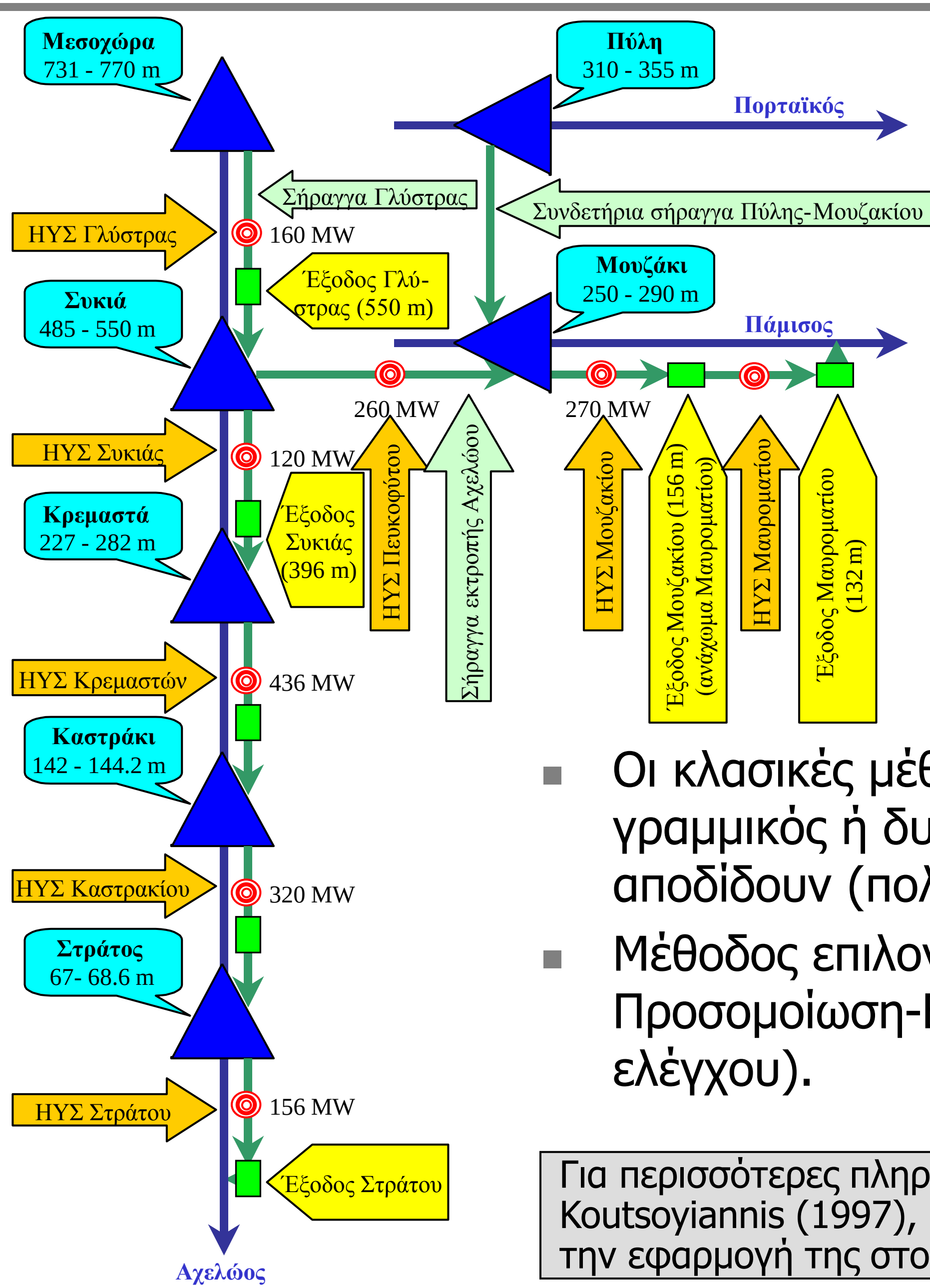
- Σε ένα πρώτο στάδιο, αρκετοί ταμιευτήρες έχουν σχεδιαστεί ως μεμονωμένα υδραυλικά έργα απλού σκοπού.
- Στην πορεία της λειτουργίας τους, οι αυξημένες ανάγκες επιβάλλουν τη συμπλήρωσή τους με νέα έργα.
  - Χαρακτηριστικό παράδειγμα: Τα έργα Ευήνου για την ενίσχυση της υδροδότησης από το Μόρνο.
  - Τα νέα έργα μελετήθηκαν εξαρχής 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.



Το πιο χαρακτηριστικό ελληνικό παράδειγμα: Το υδροσυστήμα Αχελώου-Θεσσαλίας

- 5 ταμιευτήρες στον Αχελώο (+Πλαστήρα)
- Σενάριο εκτροπής στη Θεσσαλία με 2 επιπλέον ταμιευτήρες
- 7 υδροηλεκτρικοί σταθμοί (κατά μέγιστο)
- Σύστημα αγωγών εκτροπής
- Κύρια χρήση: Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Δευτερεύουσες χρήσεις: άρδευση, ύδρευση
- Περιβαλλοντικές δεσμεύσεις

Τρόπος αντιμετώπισης ενός μεγάλου υδροσυστήματος



- Οι κλασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης (π.χ. γραμμικός ή δυναμικός προγραμματισμός) δεν αποδίδουν (πολύπλοκες χωρίς ουσιαστικό όφελος).
- Μέθοδος επιλογής: Παραμετροποίηση-Προσομοίωση-Βελτιστοποίηση (λίγες μεταβλητές ελέγχου).

Για περισσότερες πληροφορίες για τη μέθοδο βλ. Nalbantis & Koutsoyiannis (1997), Koutsoyiannis & Economou (2002) και για την εφαρμογή της στον Αχελώο βλ. Κουτσογιάννης (1996)

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.
- Barnes, F. B., Storage required for a city water supply, *J. Inst. Eng. Australia*, 26(9) 198-203, 1954.
- Brázdil, P., Z.W. Kundzewicz and G. Benito, Historical hydrology for studying flood risk in Europe, *Hydrological Sciences Journal*, 51(5), 739-764, 2006.
- Eckhardt, R., Stan Ulam, John von Neumann and the Monte Carlo method, in *From Cardinals to Chaos*, ed. By N. G. Cooper, Cambridge University, NY., 1989.
- Hazen, A., Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply, *Trans. Amer. Soc. Civil Eng.*, 77, 1539-1640, 1914.
- 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., The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy, *Hydrological Sciences Journal*, 47 (4), 573–595, 2002.
- Koutsoyiannis, D., Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics, *Hydrological Sciences Journal*, 48 (1), 3–24, 2003.
- 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., Hydrology and Change, *Hydrological Sciences Journal*, 58 (6), 1177–1197, 2013.
- 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), *Gidrorekhn. Stroit*, 11, 3-10, 1935.

Αναφορές

- 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", *Gidrotekh. 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., The beginning of the Monte Carlo method, in *From Cardinals to Chaos*, ed. by N. G. Cooper, Cambridge University, NY., 1989.
- 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.
- Pleshkov, Ya. F., Rapid and accurate computations for storage reservoirs (in Russian), *Gidrotekhn. Slroit.*, 6, 1939.
- Papoulis, A., *Probability and Statistics*, Prentice-Hall, London, 1990.
- Ripley, B. D., *Stochastic Simulation*, Wiley, New York, 1987.
- 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, *Gidrotekh. Stroit.*, 2: 24-28, 1940.
- 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.
- Thomas, H. A., Jr. and R. P. Burden, *Operations Research in Water Quality Management*, Harvard University, 1963.
- 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 Δημόσιων Έργων, Συνεργαζόμενοι: Γ. Καλαούζης, ELECTROWATT, Π. Μαρίνος, Δ. Κουτσογιάννης, 420 σελίδες, 1996.