


*Μουσείο Γουλιανδρή Φυσικής Ιστορίας – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Άνθρωπος & Περιβάλλον στον 21ο αιώνα – Τα κρίσιμα προβλήματα*

Ατμόσφαιρα και κλίμα

Αθήνα 27 Ιουνίου 2005

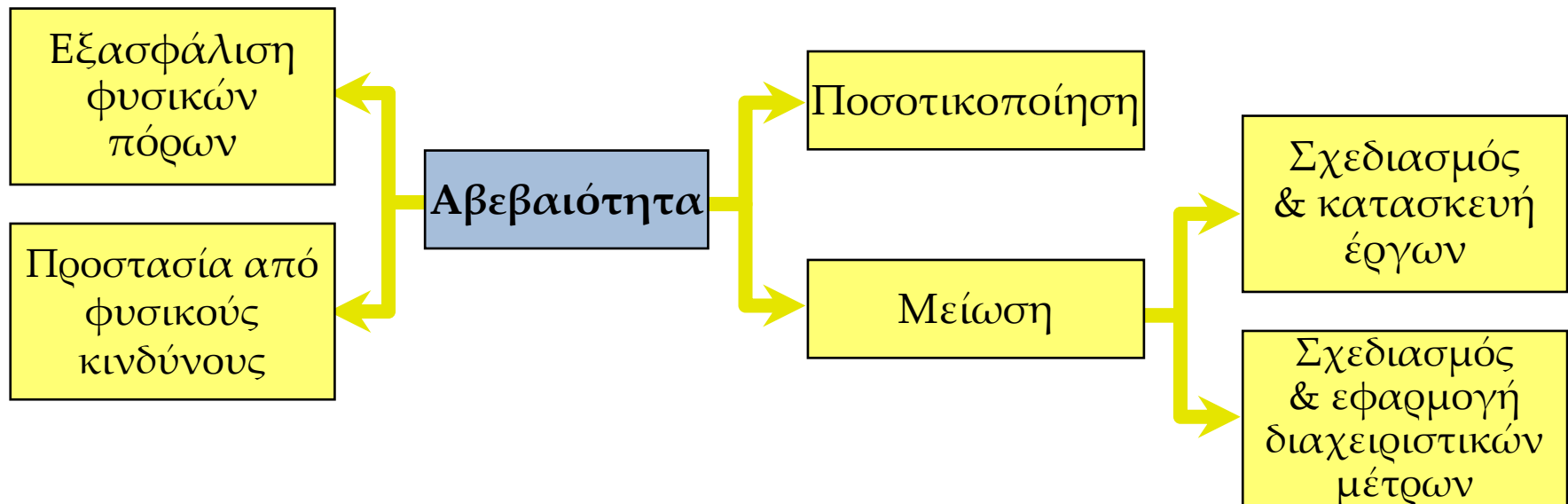


*Η κλιματική αβεβαιότητα,
το φαινόμενο Ιωσήφ
και η διαχείριση των υδατικών πόρων*

*Δημήτρης Κουτσογιάννης
Τομέας Υδατικών Πόρων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*

Η αβεβαιότητα και η διαχείρισή της

- Η ακριβής πρόγνωση των μελλοντικών συνθηκών είναι ανέφικτη
- Η αβεβαιότητα αποτελεί δομικό και αναπόφευκτο χαρακτηριστικό των φυσικών διεργασιών, οφειλόμενη πρωτίστως στην εγγενή πολυπλοκότητα των φυσικών συστημάτων
- Η διαχείριση της αβεβαιότητας αποτελεί πρώτιστη δραστηριότητα των μηχανικών



Προσεγγίσεις για την ποσοτικοποίηση της υδροκλιματικής αβεβαιότητας

- **Βασισμένες σε σενάρια:** Ευλογοφανείς υποθέσεις για τις μελλοντικές συνθήκες
 - χονδροειδείς (π.χ. αύξηση/μείωση των βροχών κατά 20%)
 - δεν απαιτούνται κλιματικά μοντέλα
 - εκλεπτυσμένες (π.χ. αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂)
 - σύζευξη με κλιματικά μοντέλα
- **Πιθανοτικές:** Χρήση θεωρίας πιθανοτήτων, στατιστικής και στοχαστικών ανελίξεων
 - με ιστορικά δείγματα (συνθήκες παρελθόντος)
 - με ευλογοφανείς υποθέσεις για τις μελλοντικές συνθήκες

Κλιματικά σενάρια για την Ευρώπη ...

... που όμως είναι ιστορική πραγματικότητα

Λιώνουν οι πάγοι σε μεγάλο τμήμα της Γροιλανδίας	985 (μ.Χ.)
Το καλοκαίρι στην Ευρώπη ξεκινά τον Απρίλιο ή το Μάρτιο, είναι θερμότερο, μεγάλης διάρκειας και με ελάχιστες βροχές	1420, 1473, 1540, 1893
Στο Παρίσι και πιο νότια τα δένδρα ανθίζουν τα Χριστούγεννα	1357, 1361
Ο Τάμεσης σχεδόν ξεραίνεται (μετατρέπεται σε ρυάκι και διασχίζεται με τα πόδια), ενώ η θάλασσα προωθείται μέχρι τη Γέφυρα του Λονδίνου	1114, 1325-1326, 1538-1541, 1665-1666, 1716
Μέσα σε δεκαετίες γίνονται εναλλαγές ψυχρών και θερμών περιόδων	1330-1340 <small>(μετάβαση από τη θερμή μεσαιωνική περίοδο στο «μικροπαγετωνικό αιώνα»)</small>
Διαδοχικά ψυχρά καλοκαίρια δεν επιτρέπουν ωρίμανση των φρούτων (π.χ. σταφυλιών)	1435-1347, 1812-1817

Κλιματικά σενάρια για την Ελλάδα ...

... που όμως είναι ιστορική πραγματικότητα

Φθινόπωρο και χειμώνας χωρίς καθόλου βροχή (σαν να είναι καλοκαίρι)	1680/1681, 1695/1696, 1712-1714
Συνεχείς βροχές γεννούν πλημμύρες και δεν επιτρέπουν την καλλιέργεια αγροτικών προϊόντων	1684/1685
Πυκνές χιονοπτώσεις, μόνιμα χιόνια σε όλη τη διάρκεια του έτους ακόμη και στην Κρήτη	1699/1700
Κρύοι χειμώνες, λίμνες (π.χ. Ιωαννίνων) παγωμένες για τρεις μήνες	1686/1687

Συνέπειες: Λιμοί, επιδημίες, καταστροφές, εκτόξευση τιμών, πυρκαγιές
Αντιμετώπιση: Προσευχή, λιτανείες

Πηγές: J.H. Brazell (1968), *London Weather*, HMSO (Meteorological Office)

H.H. Lamb (1982), *Climate, History and the Modern World*, Methuen

C. Pfister (1988), Variations in the spring-summer climate of central Europe from the high middle ages to 1850, Lecture notes in earth sciences, Vol. 16, Long and short term variability of climate, edited by H. Wanner, U. Siegenthaler, pp. 57-82, Berlin

E. Xoplaki, P. Maheras and J. Luterbacher (2001), Variability of climate in Meridional Balkans during the periods 1675–1715 and 1780–1830 and its impact on human life, *Climatic Change*, 48: 581–615

Παρατηρήσεις πάνω στα ιστορικά γεγονότα

- Καιρικά και κλιματικά φαινόμενα εξαιρετικά ασυνήθιστα και ακραία – με βάση τη σημερινή ανθρώπινη εμπειρία
- Αβάσιμη η εικόνα ενός σταθερού κλίματος – «Καθεστώς» η αλλαγή του κλίματος:
«Το κλίμα αλλάζει ακανόνιστα, για άγνωστους λόγους, σε όλες τις κλίμακες»*
- Τάση συσσώρευσης όμοιων φαινομένων σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους

* National Research Council (1991), *Opportunities in the Hydrologic Sciences*, National Academy Press, Washington DC, USA

Εμπειρική βάση της μελέτης: Το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας & η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού



Φυσικές συνθήκες λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού:
2000 km², καρστικό υπόβαθρο, χωρίς έξοδο στη θάλασσα

Ιστορία: Υποδομές και διαχείριση από το 1500 π.Χ.

Σπουδαιότητα: Μέρος του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, άρδευση

Διαθεσιμότητα δεδομένων: Σχεδόν 100 χρόνια

Διαθεσιμότητα μοντέλων: Υδρολογικό μοντέλο με καλές επιδόσεις

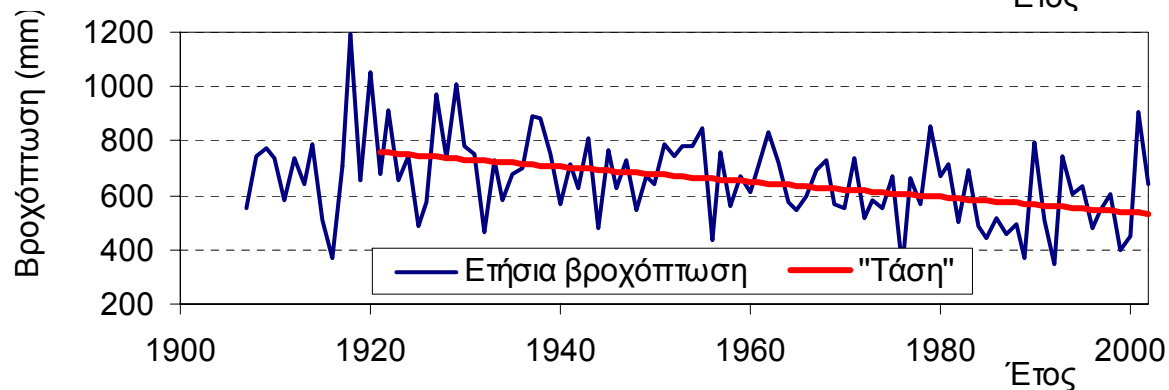
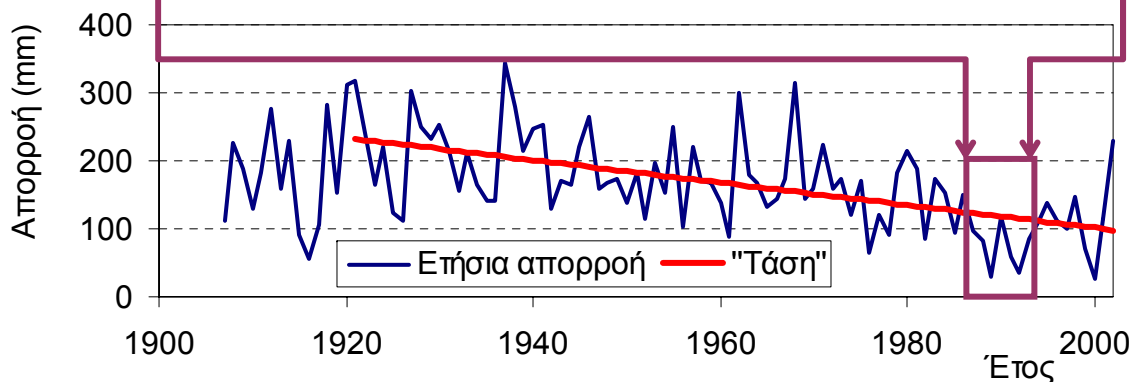
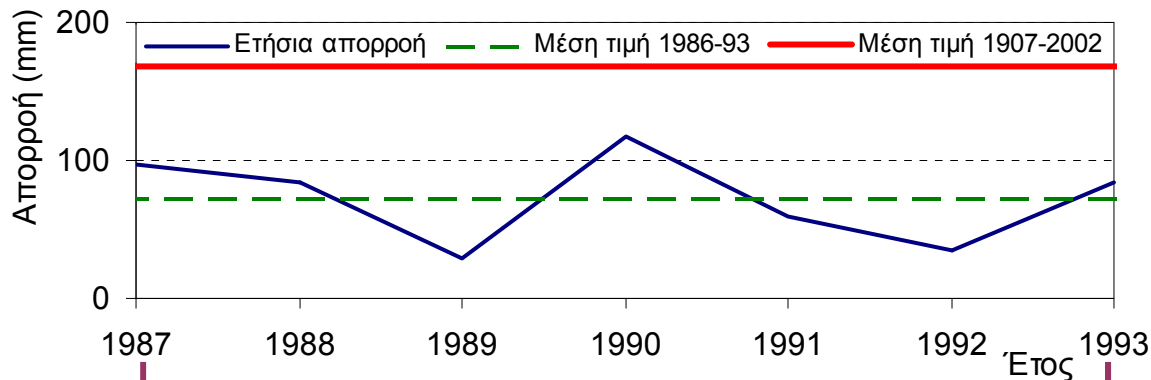
Εμπειρικές παρατηρήσεις κλιματικών φαινομένων

Η ποσοτικοποίηση της πρόσφατης ξηρασίας με βάση τις μετρήσεις της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού

Έντονη & έμμονη ξηρασία: παροχή περίπου υποδιπλάσια της μέσης, διάρκεια περίπου 7 χρόνια

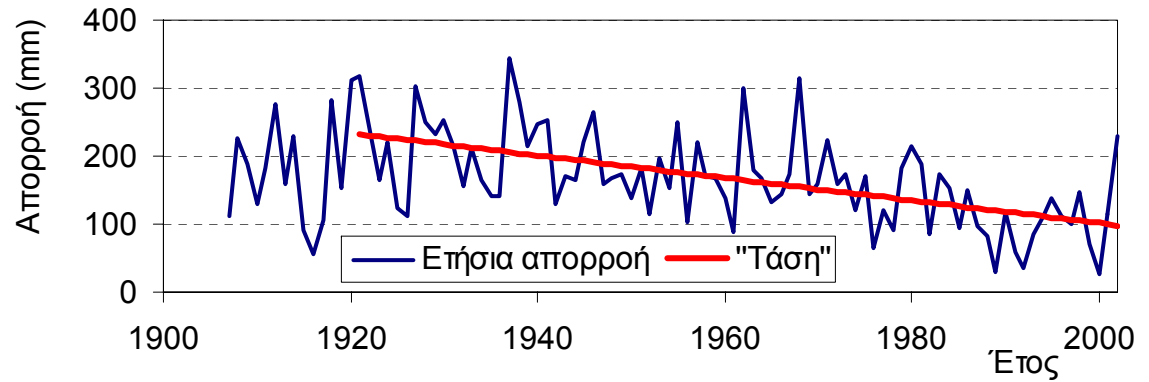
Η ιστορική χρονοσειρά της απορροής του Β. Κηφισού
Εμφάνιση υπερετήσιων «τάσεων»

Παρόμοια «τάση» στη χρονοσειρά της βροχόπτωσης
Εξηγεί την «τάση» στην απορροή



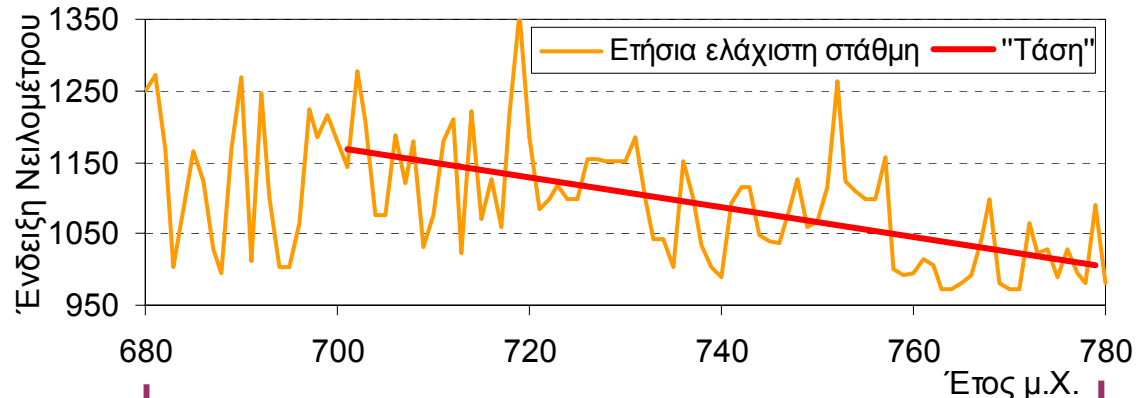
Συμπεριφορά χρονοσειρών μεγάλου μήκους

Η πλήρης χρονοσειρά απορροής του Β. Κηφισού



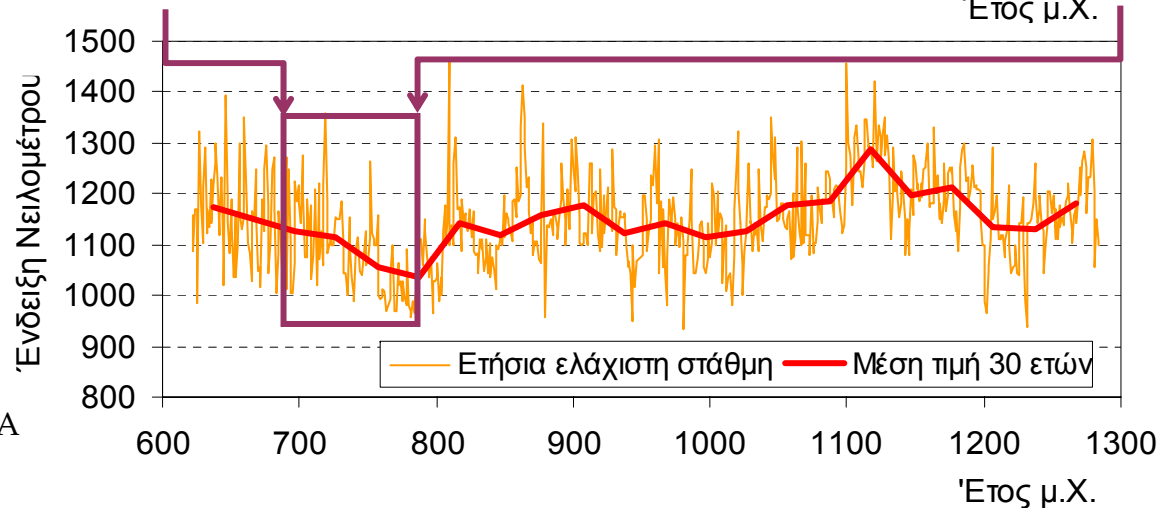
Τμήμα της χρονοσειράς του Νειλομέτρου (ελάχιστη στάθμη του Νείλου)*

Παρόμοια «τάση»



Η πλήρης χρονοσειρά του Νειλομέτρου (622-1284 μ.Χ., 663 έτη)

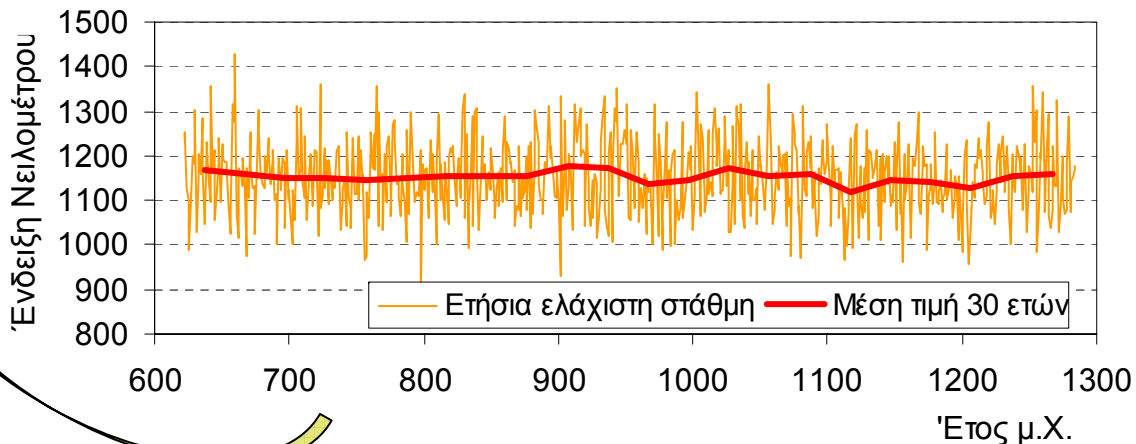
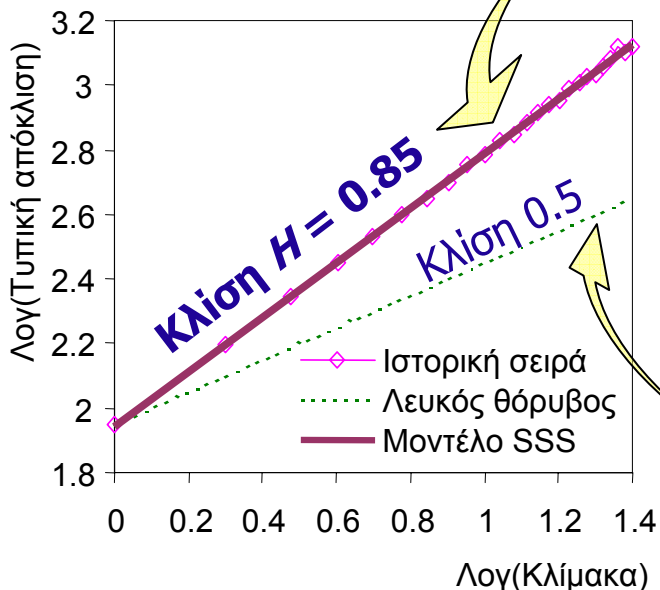
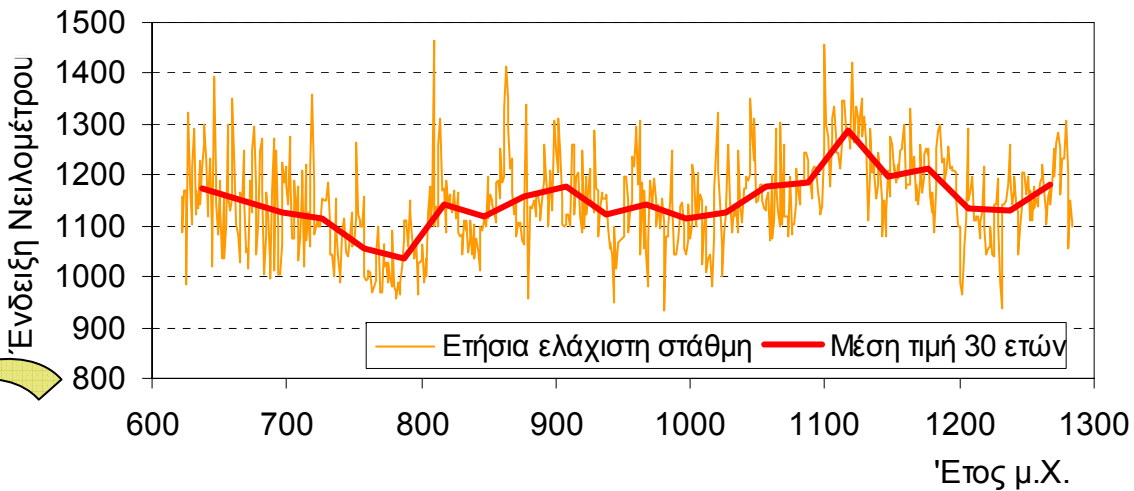
Ανοδικές και καθοδικές διακυμάνσεις σε όλες τις κλίμακες



* J. Beran (1994), *Statistics for Long-Memory Processes*, Chapman & Hall, New York, USA

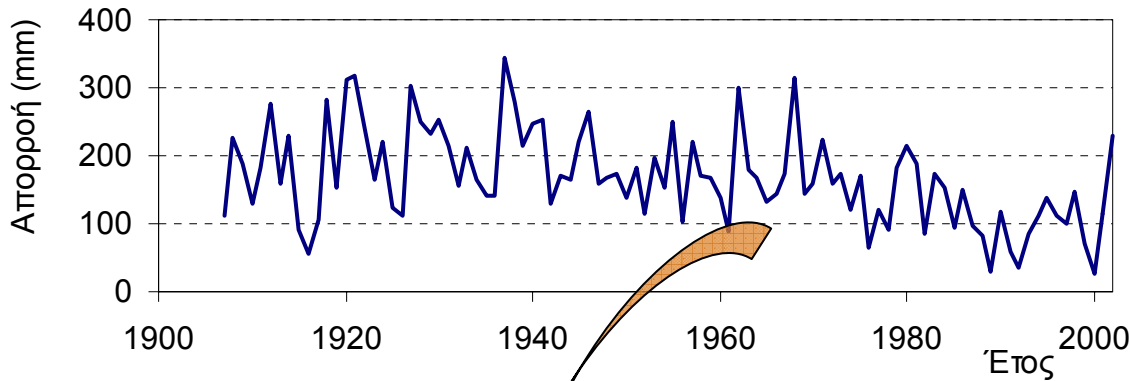
Διαφοροποίηση σε σχέση τις κλασικές τυχαίες διεργασίες: (α) Η χρονοσειρά του Νειλομέτρου

Η σειρά του Νειλομέτρου

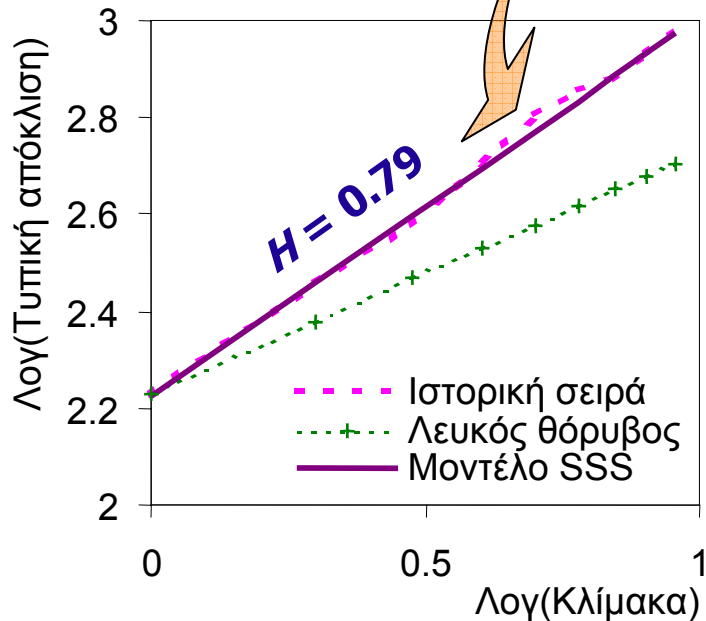


Μια σειρά λευκού θορύβου (για σύγκριση)

Διαφοροποίηση σε σχέση τις κλασικές τυχαίες διεργασίες: (β) Η χρονοσειρά του Βοιωτικού Κηφισού



Η χρονοσειρά απορροής του Βοιωτικού Κηφισού



Στατιστικά χαρακτηριστικά όλων των διεργασιών

Στατιστική παράμετρος	Απορροή	Βροχή	Θερμοκρασία
n	96	96	102
m (mm)	167.7	658.4	16.9
s (mm)	74.5	158.9	0.70
C_s	0.36	0.44	0.34
r_1	0.34	0.10	0.31
H	0.79	0.64	0.63

Οι διακυμάνσεις σε πολλές κλίμακες και το «φαινόμενο Ιωσήφ»

- Η «περίεργη» (σε σχέση με τις τυχαίες διεργασίες) συμπεριφορά των υδρολογικών και άλλων γεωφυσικών διεργασιών ανακαλύφθηκε από τον άγγλο μηχανικό E. H. Hurst* (1950) στα πλαίσια της μελέτης του Υψηλού Φράγματος Aswan στο Νείλο ⇒ **Φαινόμενο Hurst**
- Ο πολωνο-γάλλος μαθηματικός και μηχανικός B. Mandelbrot (1965-1971) το συσχέτισε με τη βιβλική ιστορία για τις επτά παχιές και τις επτά ισχνές αγελάδες ⇒ **Φαινόμενο Ιωσήφ**
- Το φαινόμενο διαπιστώθηκε ότι είναι «πανταχού παρόν», όχι μόνο σε γεωφυσικές διεργασίες (π.χ. κλιματικές, υδρολογικές) αλλά και σε τεχνολογικές (π.χ. δίκτυα υπολογιστών) και οικονομικές (π.χ. χρηματιστηριακές)
- Το φαινόμενο έχει δυσμενείς συνέπειες στην αξιοποίηση υδατικών πόρων (αύξηση αβεβαιότητας)

* H. E. Hurst (1950), Long-Term Storage Capacity of Reservoirs, *Proc. American Society of Civil Engineers*, 76(11)

Μαθηματική περιγραφή του φαινομένου

- ❑ Μαθηματικά, το φαινόμενο Ιωσήφ μπορεί να περιγραφεί ως η σύνθεση τυχαίων διακυμάνσεων σε πολλές χρονικές κλίμακες (ταυτόχρονα)
- ❑ Κατά συνέπεια, η μαθηματική περιγραφή του φαινομένου ανήκει στη θεωρία πιθανοτήτων και ειδικότερα στον κλάδο των στοχαστικών ανελίξεων
- ❑ Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του φαινομένου είναι σήμερα γνωστό ως στοχαστική ανέλιξη αυτο-όμοια (Self-Similar) ή απλής ομοιοθεσίας (Simple Scaling· συντομογραφία SSS Process = Simple Scaling Stochastic Process)
- ❑ Την ανέλιξη SSS εισήγαγε για τη μοντελοποίηση της τύρβης ο ρώσος Μαθηματικός **A. Kolmogorov*** (1940) που την αποκάλεσε «σπείρα του Wiener» (Wiener Spiral)
- ❑ Σημαντική στη μελέτη της ανέλιξης SSS είναι η συμβολή του αμερικανού μαθηματικού **J. Lamperti** (1962) που την αποκάλεσε «ημι-ευσταθή ανέλιξη» (Semi-Stable process)
- ❑ Η σύνδεση της ανέλιξης SSS με το φαινόμενο Hurst έγινε από τον **B. Mandelbrot** (1965), που την αποκάλεσε «κλασματικό θόρυβο Brown» (fractional Brownian noise)

* A. N. Kolmogorov (1940), Wienersche Spiralen und einige andere interessante Kurven in Hilbertschen Raum, Comptes Rendus (Doklady) Acad. Sci. USSR (N.S.) 26, 115–118

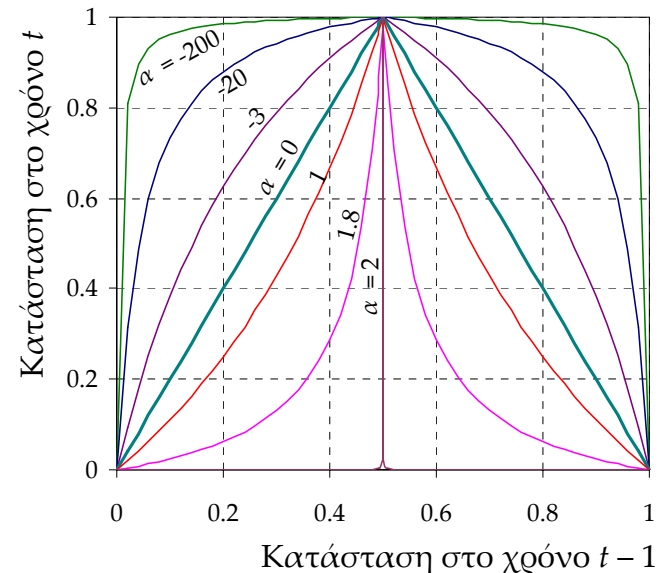
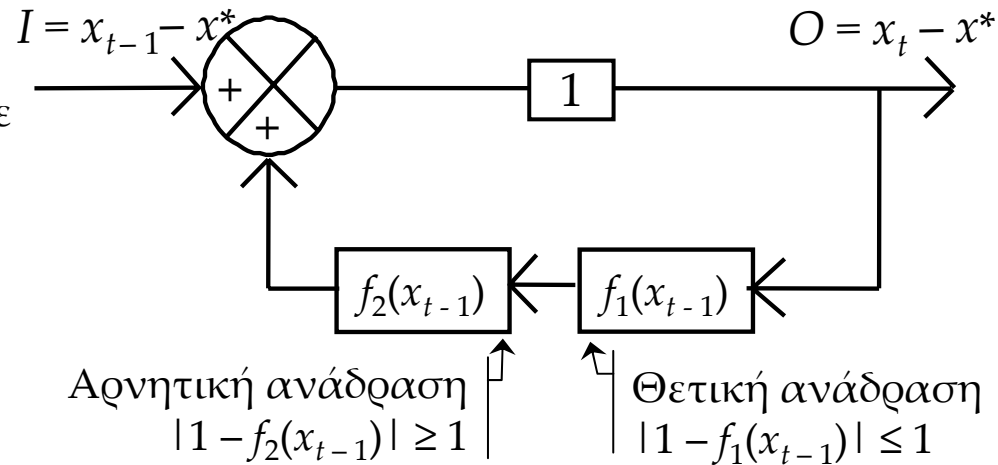
Εξήγηση του φαινομένου Ιωσήφ: 1. Μη γραμμική κλιματική δυναμική με θετική και αρνητική ανάδραση*

- Υποτίθεται απλουστευτικά ότι το κλιματικό σύστημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα «κύκλωμα» με δύο μηχανισμούς ανάδρασης, ένα θετικό (που ενισχύει τις αποκλίσεις από μια στάσιμη κατάσταση x^*) και ένα αρνητικό (που απομειώνει τις αποκλίσεις)
- Η συνδυασμένη δράση των δύο μηχανισμών θα μπορούσε να περιγραφεί με βάση το γενικευμένο μετασχηματισμό «τέντας»:

$$x_t = \frac{(2 - \alpha) \min(x_{t-1}, 1 - x_{t-1})}{1 - \alpha \min(x_{t-1}, 1 - x_{t-1})}$$

όπου $0 \leq x_t \leq 1$, $\alpha < 2$

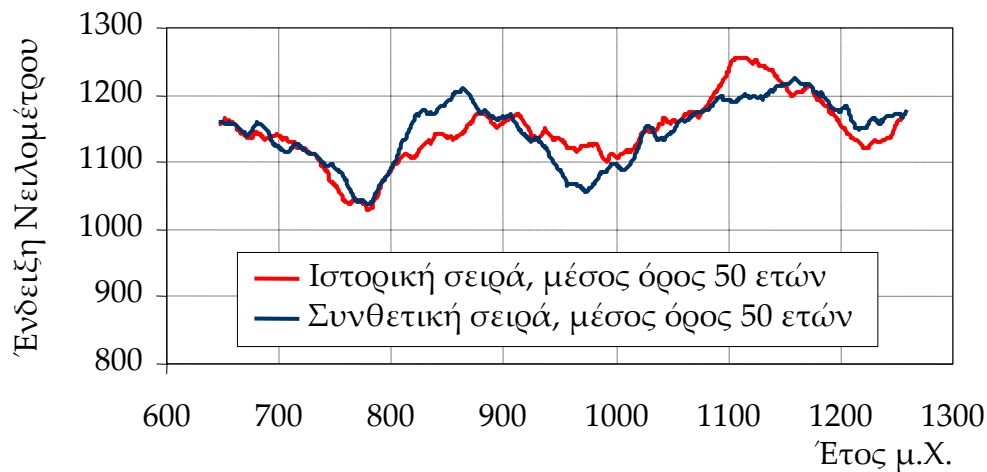
- Η παράμετρος α μεταβάλλεται στο χρόνο ακολουθώντας τον ίδιο μετασχηματισμό με μια σταθερή παράμετρο β



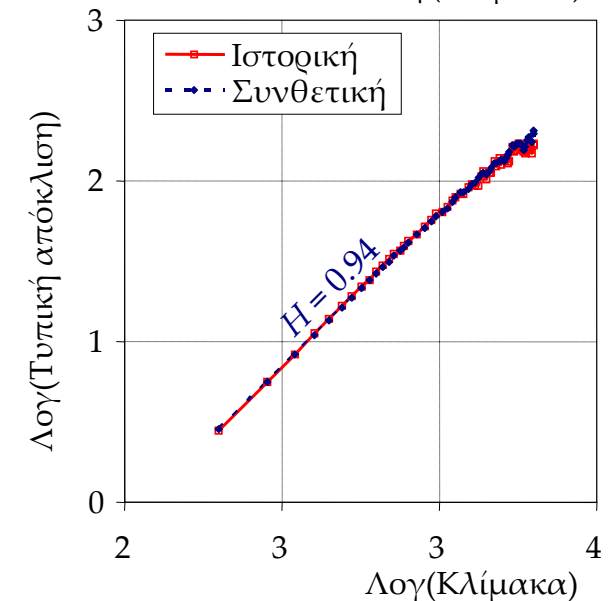
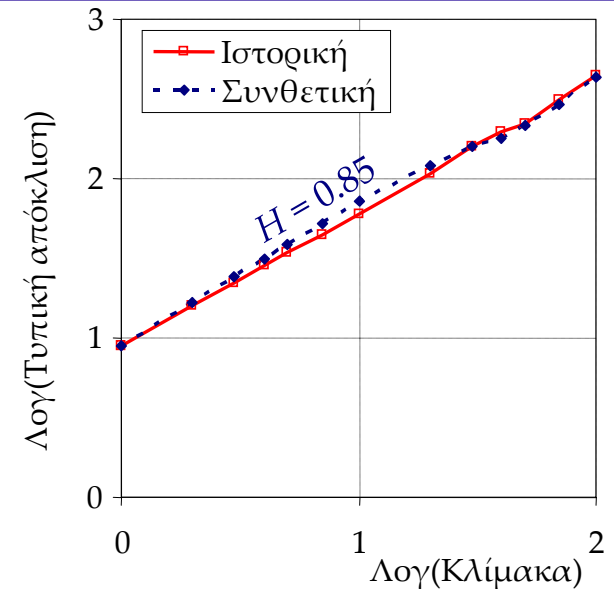
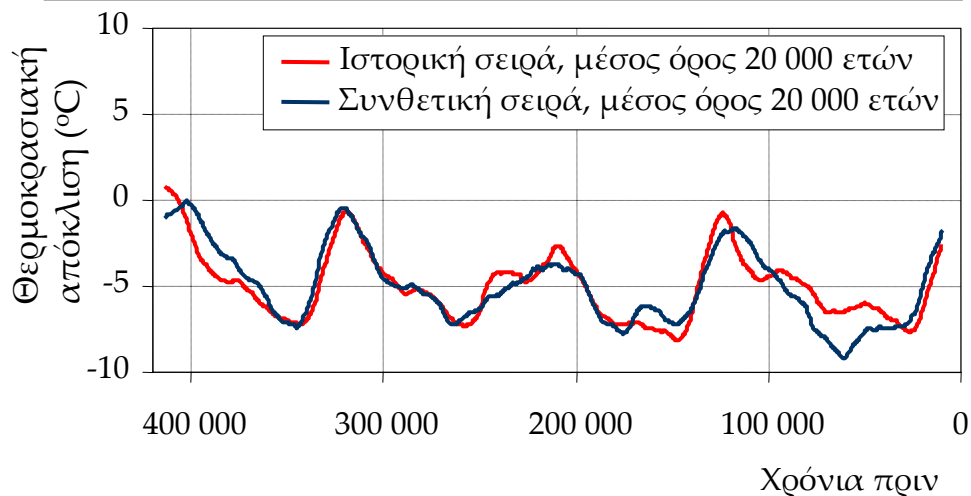
* D. Koutsoyiannis (2005), A toy model of climatic variability with scaling behaviour, *Journal of Hydrology*.

Εφαρμογή του μοντέλου διπλού μηχανισμού ανάδρασης

Το δείγμα του Νειλομέτρου



Ανακατασκευασμένο κλιματικό δείγμα από πυρήνες πάγου της Ανταρκτικής (Vostok)



Εξήγηση του φαινομένου Ιωσήφ: 2. Εφαρμογή της αρχής της μέγιστης εντροπίας σε πολλαπλές κλίμακες*

- ❑ Αν και αρχικώς η έννοια της εντροπίας ορίστηκε με βάση θερμοδυναμικές μεταβλητές (Clausius, 1850), στη συνέχεια αναπτύχθηκε σε στατιστική μηχανική βάση (Boltzmann, 1877· Gibbs, 1948) και γενικεύτηκε σε μαθηματική πιθανοτική βάση (Shannon, 1948· Kolmogorov, 1957)
- ❑ Ανάλογα με την επιστημονική περιοχή, η εντροπία θεωρείται ως μέτρο αταξίας (αντιθ. τάξης), αβεβαιότητας (αντιθ. πληροφορίας) και πολυπλοκότητας
- ❑ Η αρχή της μέγιστης εντροπίας χρησιμοποιήθηκε αρχικώς για τον προσδιορισμό καταστάσεων θερμοδυναμικής ισορροπίας· η αναδιατύπωσή της σε πιθανοτική βάση (Jaynes, 1957) ως γενίκευση της αρχής του ανεπαρκούς λόγου (Bernoulli, Laplace) επιτρέπει τον προσδιορισμό πιθανοτήτων και παραμέτρων πιθανοτικών κατανομών
- ❑ Η ίδια αρχή, αν εφαρμοστεί σε πολλές χρονικές κλίμακες ταυτοχρόνως, μπορεί να παραγάγει το φαινόμενο Ιωσήφ
- ❑ Κατά συνέπεια, η «πανταχού παρουσία» του φαινομένου Ιωσήφ αποτελεί έκφραση της κυριαρχίας της αβεβαιότητας στη φύση

* D. Koutsoyiannis (2005), Uncertainty, entropy, scaling and hydrological stochasticity, 2, Time dependence of hydrological processes and time scaling, *Hydrological Sciences Journal*, 50(3), 405-426.

Επίπτωση του φαινομένου Ιωσήφ

- Θεμελιώδης νόμος της κλασικής στατιστικής

$$\text{StD}[\bar{X}_n] = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

\bar{X}_n = δειγματική μέση τιμή

σ = τυπική απόκλιση

n = κλίμακα συνάθροισης
ή μέγεθος δείγματος

- Τροποποιημένος νόμος για ανελίξεις SSS

$$\text{StD}[\bar{X}_n] = \frac{\sigma}{n^{1-H}}, H > 0.5$$

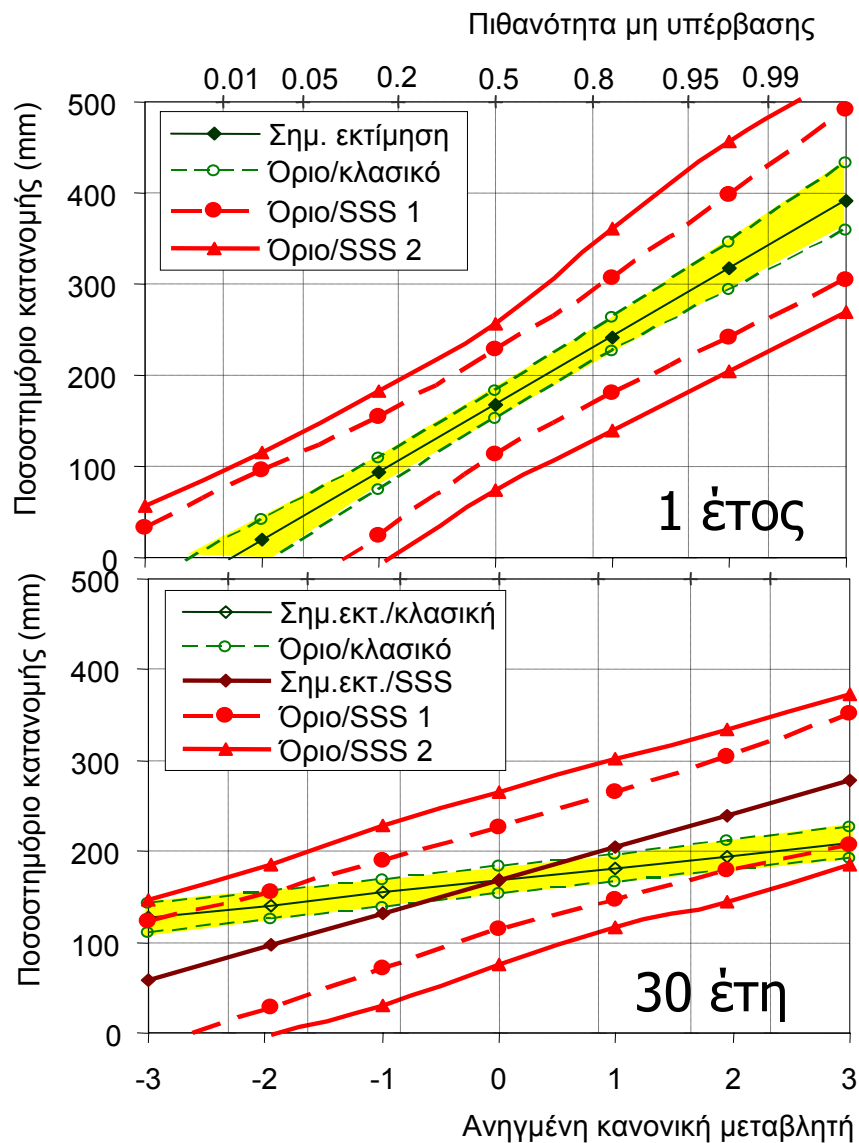
- Παράδειγμα

Για να έχουμε $\text{StD}[\bar{X}_n] / \sigma = 10\%$

- $n = 30$ στην κλασική στατιστική
- $n = 5\,000$ για SSS με $H = 0.8$



Επίπτωση του φαινομένου Ιωσήφ: η αβεβαιότητα της απορροής στο Βοιωτικό Κηφισό



Στατιστικό μοντέλο	Συνολική αβεβαιότητα, % του μέσου	
	Κλίμακα έτους	Κλίμακα 30 ετών
Κλασικό	206	50
SSS	268	199

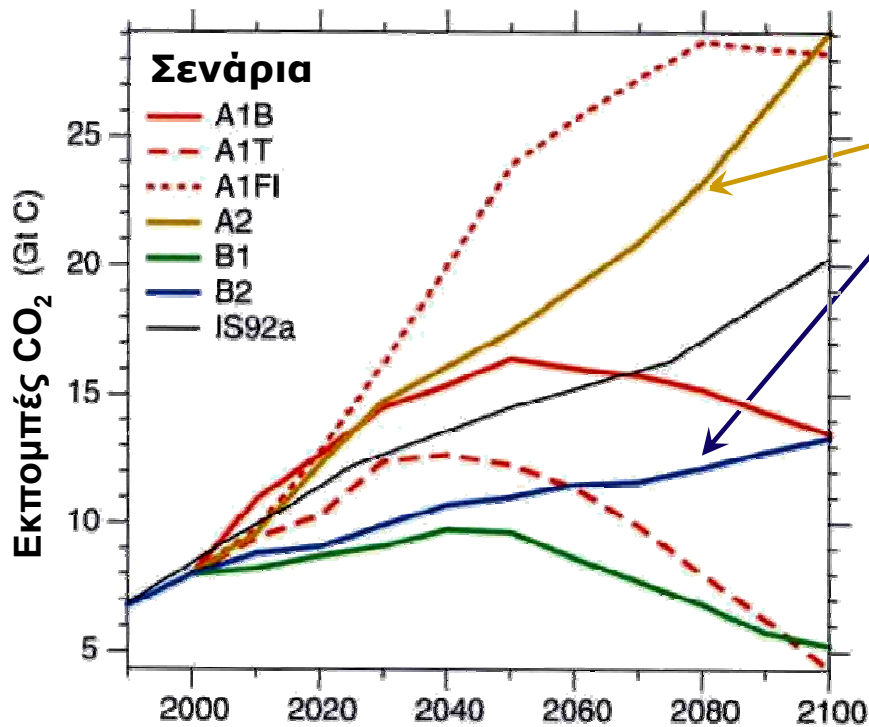
Κλασικό μοντέλο

Το κλίμα είναι αυτό που περιμένεις
Ο καιρός είναι αυτό που σου 'ρχεται

Μοντέλο SSS

Ο καιρός είναι αυτό που σου 'ρχεται
Το κλίμα είναι αυτό που σου 'ρχεται
... αν περιμένεις πολύ

Προσέγγιση βασισμένη σε σενάρια: Σενάρια και κλιματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν



Πηγή:
http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/asres/emissions_scenarios.jpg

* Αποτελέσματα μοντέλων (κλιματικές προγνώσεις)
Διαθέσιμες στο Διαδίκτυο από το IPCC Data Distribution
Centre
(http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/dkrz/dkrz_index.html)

Σενάρια (IPCC)*

A2: υψηλές εκπομπές CO₂

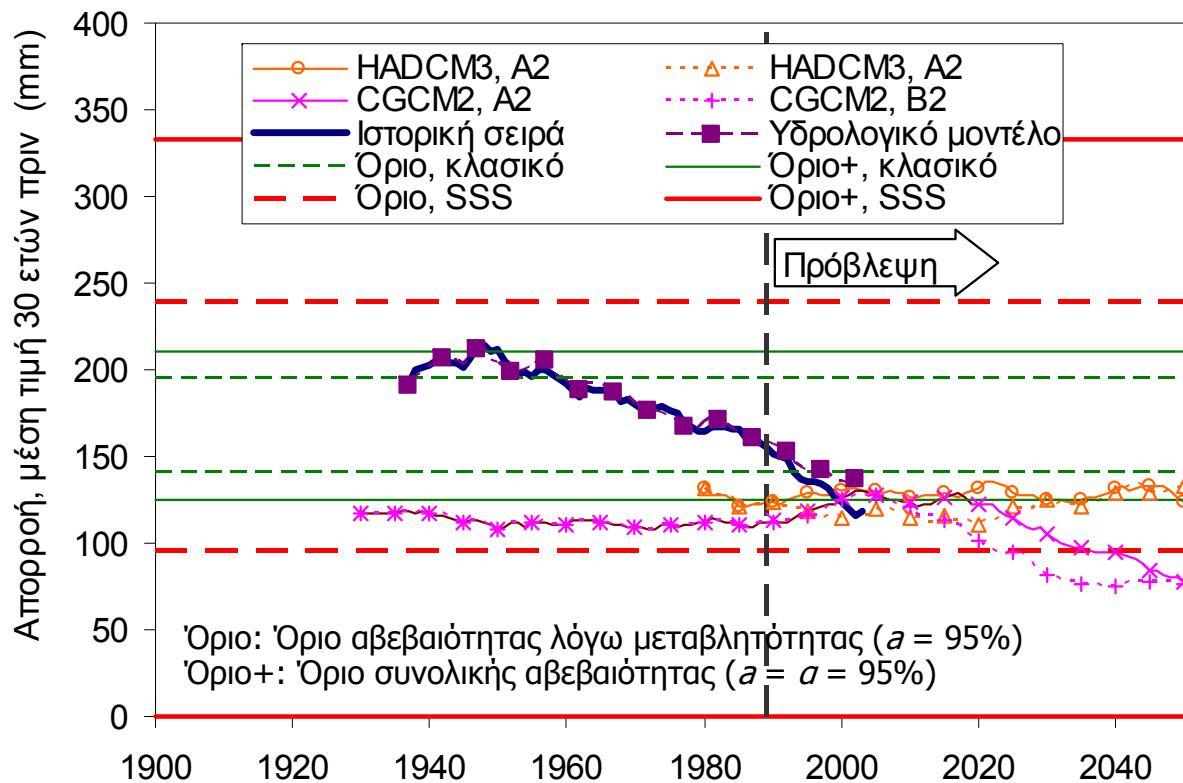
B2: σχετική μείωση της χρήσης άνθρακα

Μοντέλα

HADCM3: Μοντέλο γενικής κυκλοφορίας (general circulation model – GCM) με σύζευξη ατμόσφαιρας-ωκεανών – αναπτύχθηκε στο Hadley Centre for Climate Prediction and Research
Διακριτικότητα: 2.5°γ.π. x 3.75°γ.μ. (73 γ.π. x 96 γ.μ.)

CGCM2: παγκόσμιο συζευγμένο μοντέλο του Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
Διακριτικότητα : 3.75°γ.π. x 3.75°γ.μ. (48 γ.π. x 96 γ.μ.)

Συναγόμενα σενάρια μελλοντικής απορροής του Βοιωτικού Κηφισού

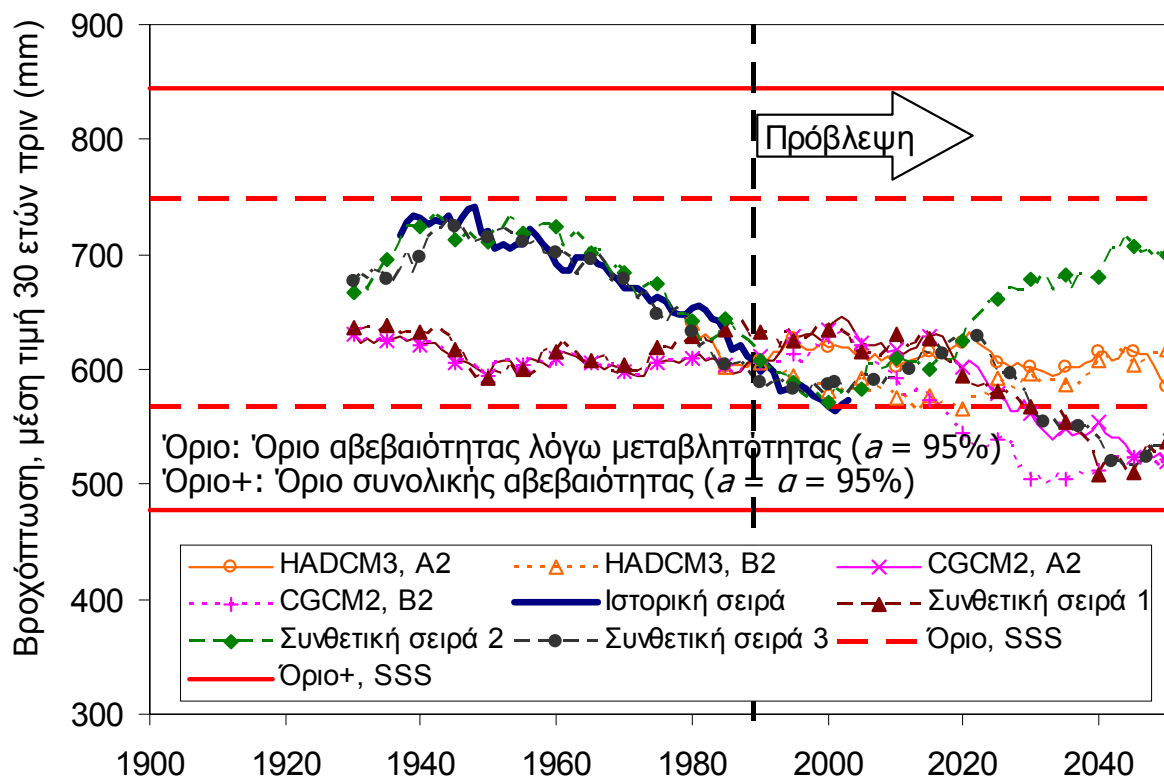


Υδρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε

E. Rozos, A. Efstratiadis, I. Nalbantis, and D. Koutsoyiannis (2004), Calibration of a semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), 819-842

- Η απορροή που προκύπτει από την ιστορική βροχή πρακτικώς συμπίπτει με την ιστορική απορροή
- Οι χρονοσειρές των σεναρίων GCM δείχνουν χαμηλή κλιματική μεταβλητότητα στο παρελθόν
- Οι αποκλίσεις των χρονοσειρών GCM από τις ιστορικές είναι πολύ μεγάλες στο αρχικό τμήμα της περιόδου παρατηρήσεων
- Τα μελλοντικά σενάρια απορροής GCM είναι μέσα στα όρια εμπιστοσύνης SSS

Σενάρια κλιματικών μοντέλων για τη μελλοντική βροχόπτωση σε αντιδιαστολή με τη στοχαστική προσέγγιση



- Συνθετική σειρά 1: Σε καλή συμφωνία με το σενάριο CGCM2/A2
- Συνθετική σειρά 2: Σε καλή συμφωνία με το ιστορικό κλίμα, με μια μελλοντική ανοδική τάση
- Συνθετική σειρά 3: Σε καλή συμφωνία με το ιστορικό κλίμα και με το μελλοντικό σενάριο CGCM2/A2

Οι συνθετικές χρονοσειρές έχουν διαλεχτεί από 100 000 δείγματα που γεννηθήκαν από την ανέλιξη SSS με στατιστικά χαρακτηριστικά ίσα με αυτά της ιστορικής βροχόπτωσης

Πως γίνεται η διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας;

- ❑ Εκπονούνται διαχειριστικά σχέδια ανά πενταετία (το πρώτο εκπονήθηκε το 2000)
- ❑ Τα σχέδια αναθεωρούνται ανά έτος επικαιροποιούνται ανά τρίμηνο
- ❑ Υιοθετείται δεκαετής ορίζοντας μελέτης, για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας της διαχείρισης των υδατικών πόρων
- ❑ Οι γενικοί στόχοι της διαχείρισης είναι:
 - Επάρκεια των υδατικών πόρων
 - Επάρκεια συστήματος μεταφοράς
- ❑ Οι γενικοί στόχοι ποσοτικοποιούνται ως εξής:
 - Επίτευξη συνολικής αξιοπιστίας 99% σε ετήσια βάση
 - Περαιτέρω αύξηση της αξιοπιστίας με λήψη έκτακτων μέτρων ελέγχου της ζήτησης σε περίπτωση επικείμενης αστοχίας
- ❑ Η όλη διαχείριση στηρίζεται σε μεθοδολογίες, μοντέλα και λογισμικά εργαλεία που αναπτύχθηκαν από το ΕΜΠ για την ΕΥΔΑΠ στα πλαίσια ερευνητικού έργου
- ❑ Οι προγνώσεις για τον ορίζοντα της δεκαετίας είναι πιθανοτικού χαρακτήρα και βασίζονται σε στοχαστικές προσομοιώσεις που αναπαράγουν το φαινόμενο Ιωσήφ

Συμπεράσματα

- Οι κλασικές μέθοδοι υποτιμούν και υπεκτιμούν σοβαρά την κλιματική μεταβλητότητα και αβεβαιότητα:
 - Οι προγνώσεις βάσει σεναρίων, έστω και αν στηρίζονται στα πιο σύγχρονα κλιματικά μοντέλα που φέρονται να προβλέπουν το μελλοντικό κλίμα, περιγράφουν ένα μέρος της φυσικής μεταβλητότητας του παρελθόντος
 - Ακόμη και οι πιθανοτικές προσεγγίσεις που είναι βασισμένες στις κλασικές στατιστικές αναλύσεις αποκρύπτουν σημαντικές πηγές μεταβλητότητας και αβεβαιότητας
- Οι πιθανοτικές προσεγγίσεις μπορούν να «διασκευαστούν», παίρνοντας υπόψη το φαινόμενο Ιωσήφ, και να δώσουν εκτιμήσεις της αβεβαιότητας:
 - ακριβέστερες των κλασικών
 - εντυπωσιακά μεγαλύτερες των κλασικών
- Το νέο πιθανοτικό πλαίσιο μπορεί να αποτελέσει ικανοποιητική βάση για τον υδρολογικό σχεδιασμό και τη διαχείριση υδατικών πόρων
- Οι ανθρωπογενείς κλιματικές αλλαγές αυξάνουν τη μελλοντική αβεβαιότητα, αλλά η ποσοτικοποίηση της αύξησης είναι δύσκολη

Όλα τριγύρω αλλάζουνε κι όλα τα ίδια μένουν ...
Μανόλης Ρασούλης

Η παρουσίαση διατίθεται στο Διαδίκτυο
<http://www.itia.ntua.gr/>