

Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα από την οπτική της υδρολογίας και της διαχείρισης των υδατικών πόρων

Δημήτρης Κουτσογιάννης και Ανδρέας Ευστρατιάδης
Τομέας Υδατικών Πόρων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Επεξήγηση του τίτλου

- ◆ **Βεβαιότητα κλιματικής αλλαγής:** Το κλίμα αλλάζει πάντα
 - εξαιτίας φυσικών λόγων
 - πρόσφατα και λόγω ανθρωπογενών επιδράσεων
- ◆ **Κλιματική αβεβαιότητα:** Η ακριβής πρόγνωση των μελλοντικών υδροκλιματικών συνθηκών μπορεί να είναι ανέφικτη
 - εξαιτίας αδυναμιών των κλιματικών μοντέλων
 - εξαιτίας της εγγενούς πολυπλοκότητας του κλιματικού συστήματος (η αβεβαιότητα ίσως είναι δομικό και αναπόφευκτο χαρακτηριστικό των υδροκλιματικών διεργασιών)
- ◆ **Υδρολογία και διαχείριση υδατικών πόρων:** χρειάζονται προγνώσεις των μελλοντικών συνθηκών
 - θα ήταν πολύ ικανοποιημένες με την εξάλειψη της αβεβαιότητας (μάλλον αδύνατο)
 - θα μπορούσαν να συμβιβαστούν με την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας και της διακινδύνευσης στις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες (δύσκολα επιτεύξιμο)
 - ως πρώτο βήμα, αναζητούν εκτιμήσεις της αβεβαιότητας και της διακινδύνευσης στις παρούσες συνθήκες (δεν έχει επιτευχθεί ακόμη)

Προσεγγίσεις για την ποσοτικοποίηση της 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, αξιοποιώντας στοχαστικές σχέσεις μεταξύ των υδροκλιματικών διεργασιών και των παραγόντων που τις επηρεάζουν

Στόχοι της παρουσίασης

- ◆ Να δείξει ότι οι παρούσες μέθοδοι υποτιμούν και υπεκτιμούν σοβαρά την κλιματική αβεβαιότητα
 - Οι προσεγγίσεις που βασίζονται σε σενάρια περιγράφουν ένα μέρος της φυσικής μεταβλητότητας
 - Ακόμη και οι πιθανοτικές προσεγγίσεις που είναι βασισμένες στις κλασικές στατιστικές αναλύσεις αποκρύπτουν σημαντικές πηγές μεταβλητότητας και αβεβαιότητας
- ◆ Να δείξει ότι οι πιθανοτικές προσεγγίσεις μπορούν να «διασκευαστούν» και να δώσουν εκτιμήσεις της αβεβαιότητας
 - ακριβέστερες των κλασικών
 - εντυπωσιακά μεγαλύτερες των κλασικών

Εμπειρική βάση της μελέτης: Η υδρολογική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού

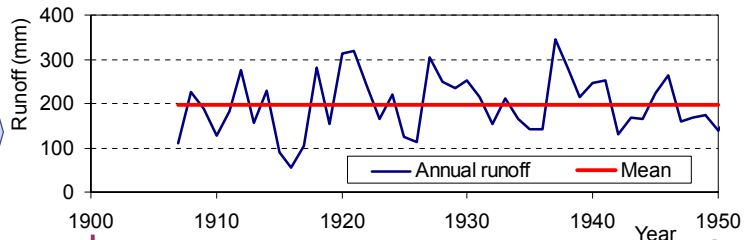


Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 5

Πρώτες εμπειρικές ενδείξεις

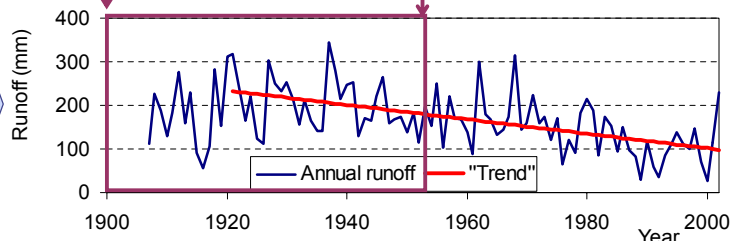
Μια τυπική χρονοσειρά μικρού μήκους: Ετήσια απορροή του Βοιωτικού Κηφισού

Σταθερή συμπεριφορά, τυχαίες ετήσιες διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή



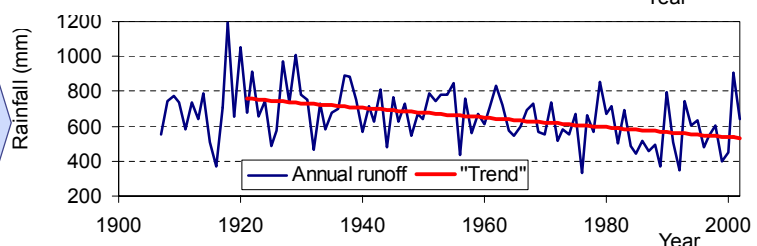
Η ίδια χρονοσειρά για πιο μεγάλη περίοδο

Εμφάνιση υπερετήσιων «τάσεων»



Παρόμοια «τάση» στη χρονοσειρά της βροχόπτωσης

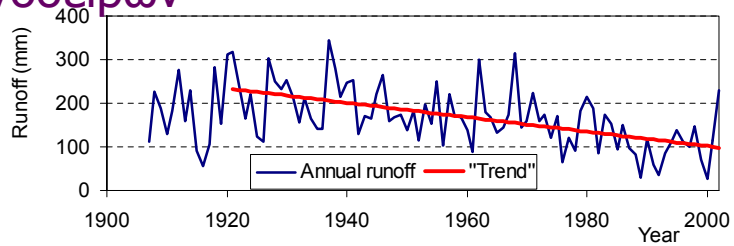
Εξηγεί την «τάση» στην απορροή



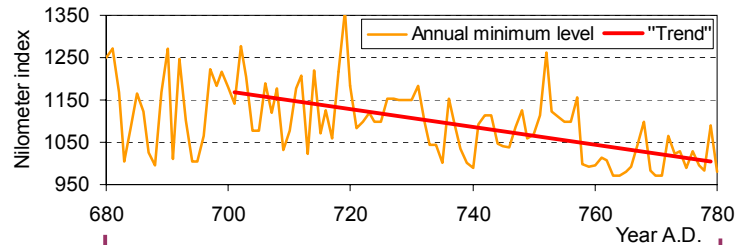
Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 6

Συμπεριφορά χρονοσειρών μεγάλου μήκους

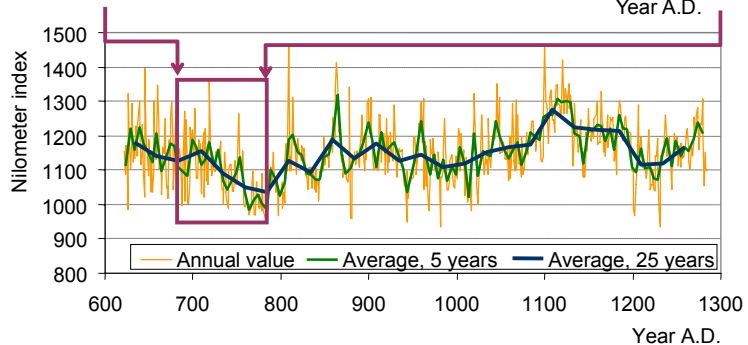
Η πλήρης χρονοσειρά
απορροής του Β. Κηφισού



Τμήμα της χρονοσειράς
του Νειλομέτρου (ελάχιστη
στάθμη του Νείλου)
Παρόμοια «τάση»



Η πλήρης χρονοσειρά του
Νειλομέτρου (622-1284
μ.Χ., 663 έτη, Beran, 1994)
**Ανοδικές και καθοδικές
διακυμάνσεις σε όλες τις
κλίμακες**



Δ. Κουτσογιάννης, και Α. Ευστρατιάδης, η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 7

Οι κλιματικές διακυμάνσεις και το φαινόμενο Hurst

- ◆ «Το κλίμα αλλάζει ακανόνιστα, για άγνωστους λόγους, σε όλες τις κλίμακες» (National Research Council, 1991, p. 21)
- ◆ Πολλές χρονοσειρές μεγάλου μήκους έχουν επιβεβαιώσει αυτό το «απόφθεγμα»
- ◆ Οι ακανόνιστες αλλαγές στις χρονοσειρές μοντελοποιούνται καλύτερα ως στοχαστικές διακυμάνσεις μεγάλης κλίμακας παρά ως ντετερμινιστικές συνιστώσες
- ◆ Ισοδύναμα, αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμες με το *φαινόμενο Hurst*, η ποσοτικοποίηση του οποίου γίνεται μέσω του *συντελεστή Hurst, H* (Hurst, 1951)

Αυθεντική διατύπωση του φαινομένου Hurst

- ◆ Το φαινόμενο Hurst ιστορικά έχει διατυπωθεί με βάση τη στατιστική συμπεριφορά μιας ποσότητας που λέγεται «εύρος» (range, Hurst, 1951) και εκφράζει τη μέγιστη διαφορά αθροιστικών εισροών και εκροών σε ένα υποθετικό ταμιευτήρα άπειρης χωρητικότητας
- ◆ Υπό αυτή την έννοια, θεωρήθηκε ότι επηρεάζει το σχεδιασμό και τη λειτουργία των ταμιευτήρων μεγάλης χωρητικότητας που εκτελούν υπερετήσια ρύθμιση (π.χ. Klemeš et al., 1981)

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 9

Απλούστερη διατύπωση του φαινομένου Hurst

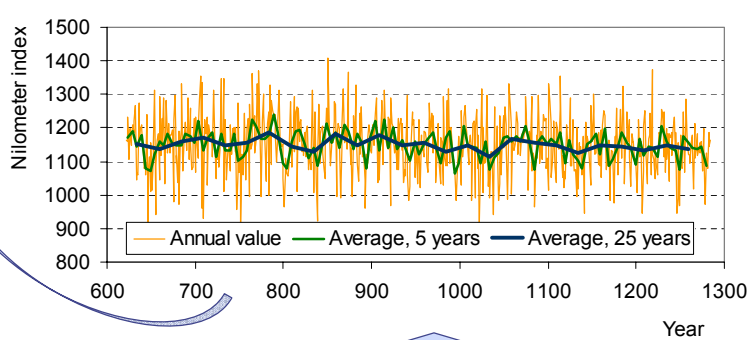
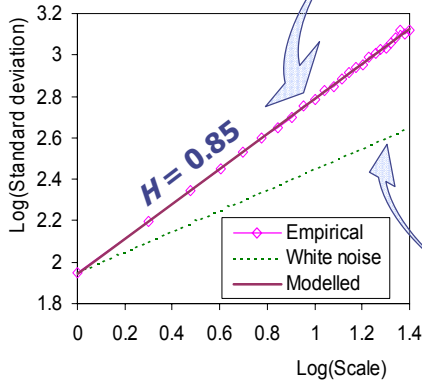
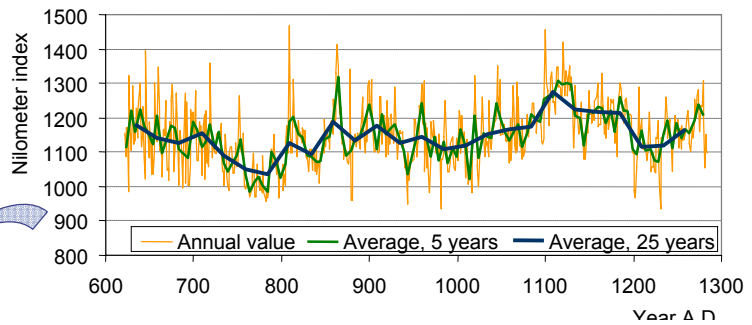
Στάσιμη ανέλιξη σε ετήσια κλίμακα	X_i
Μέση τιμή της X_i	$\mu := E[X_i]$
Τυπική απόκλιση της X_i	$\sigma := \sqrt{\text{Var}[X_i]}$
Συναθροισμένη ανέλιξη σε υπερετήσια κλίμακα (αριθμός ετών $k \geq 1$)	$Z_1^{(k)} := X_1 + \dots + X_k$ $Z_2^{(k)} := X_{k+1} + \dots + X_{2k}$ \vdots $Z_i^{(k)} := X_{(i-1)k+1} + \dots + X_{ik}$
Μέση τιμή της $Z_i^{(k)}$	$E[Z_i^{(k)}] = k\mu$
Τυπική απόκλιση της $Z_i^{(k)}$	$\sigma^{(k)} := \sqrt{\text{Var}[Z_i^{(k)}]}$
αν διαδοχικές X_i είναι ανεξάρτητες	$\sigma^{(k)} = \sqrt{k}\sigma$
αν διαδοχικές X_i είναι θετικά συσχετισμένες	$\sigma^{(k)} > \sqrt{k}\sigma$
αν οι X_i ακολουθούν το φαινόμενο Hurst	$\sigma^{(k)} = k^H \sigma$ ($0.5 < H < 1$)
Επέκταση της «ομοιοθεσίας» ως προς την τυπική απόκλιση και ορισμός της ανέλιξης απλής ομοιοθεσίας (simple scaling stochastic process – SSS)	$(Z_i^{(k)} - k\mu) \stackrel{d}{=} \left(\frac{k}{l}\right)^H (Z_j^{(l)} - l\mu)$ για τυχούσες κλίμακες k και l

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 10

Ανίχνευση και ποσοτικοποίηση του φαινομένου Hurst :

(α) Η χρονοσειρά του Νειλομέτρου

Η σειρά του Νειλομέτρου

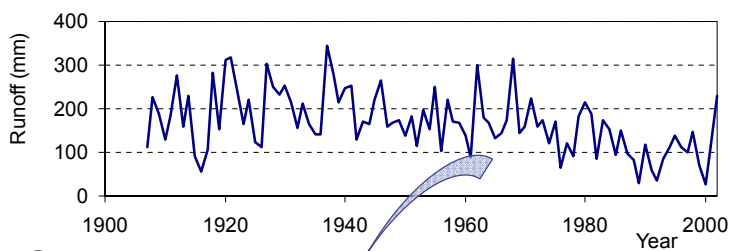


Μια σειρά λευκού θορύβου (για σύγκριση)

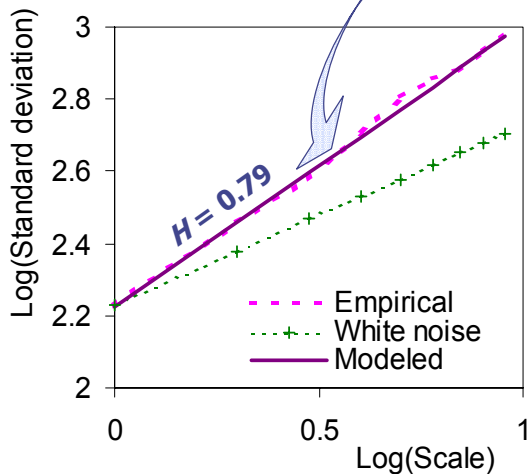
Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 11

Ανίχνευση και ποσοτικοποίηση του φαινομένου Hurst :

(α) 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
$C_v = s/m$	0.44	0.24	0.04
C_s	0.36	0.44	0.34
r_1	0.34	0.10	0.31
H	0.79	0.64	0.63

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 12

Επίπτωση του φαινομένου Hurst στη στατιστική

- ◆ Θεμελιώδης νόμος της κλασικής στατιστικής

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

\bar{X} = δειγματική μέση τιμή

σ = τυπική απόκλιση

n = μέγεθος δείγματος

- ◆ Τροποποιημένος νόμος για SSS $\text{StD}[\bar{X}] = \frac{\sigma}{n^{1-H}}, H > 0.5$

- ◆ Παράδειγμα

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

- $n = 100$ στην κλασική στατιστική
- $n = 100\,000$ για SSS με $H = 0.8$

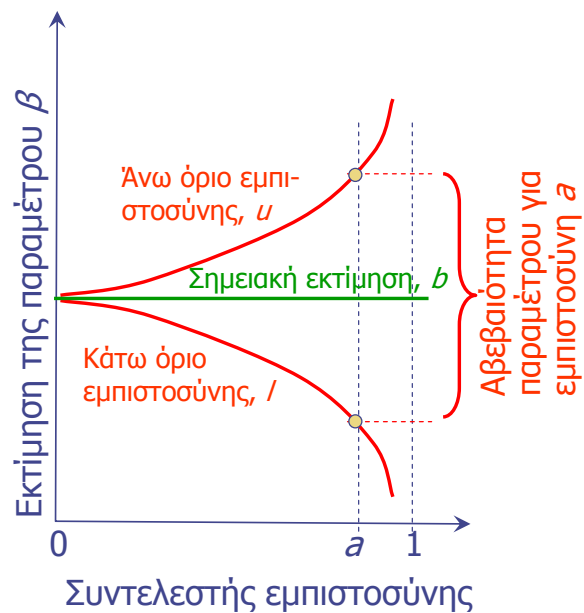


Η κλιματολογία και το φαινόμενο Hurst

- ◆ **Κλιματολογία:** η ατμοσφαιρική επιστήμη που ασχολείται με τις μεγάλης χρονικής κλίμακας **στατιστικές ιδιότητες** της ατμόσφαιρας (π.χ. **μέσες τιμές** και **μεταβλητότητες** μετρήσιμων ποσοτήτων και συχνοτήτων διάφορων γεγονότων) (Wallace and Hobbs, 1977)
- ◆ **Κλίμα:** Στατιστική σύνθεση των στοιχείων του καιρού για μια μεγάλη χρονική περίοδο (τυπικά, 30 χρόνια)
- ◆ **Επίπτωση του φαινομένου Hurst:** Αυξάνει δραματικά την κλιματική μεταβλητότητα (Koutsoyiannis, 2003)

Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας: Όρια εμπιστοσύνης για μια κλιματική παράμετρο

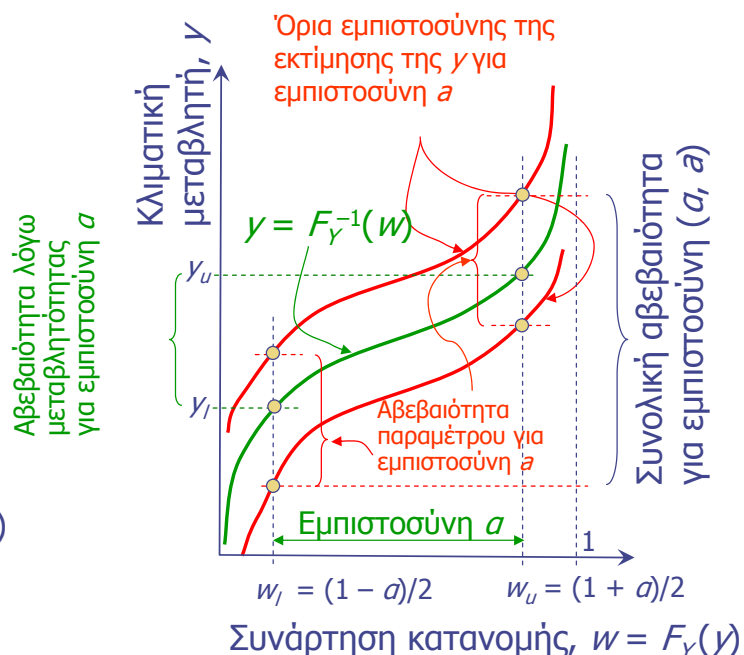
- ◆ Κλιματική παράμετρος: β (π.χ. μέση ετήσια βροχόπτωση)
- ◆ Τυχαίο δείγμα $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n)$, Παρατήρηση $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$
- ◆ Σημειακή εκτιμήτρια: $B = g_B(\mathbf{X})$
Σημειακή εκτίμηση: $b = g_B(\mathbf{x})$
- ◆ Εκτιμήτριες διαστήματος του β για συντελεστή εμπιστοσύνης a :
 $U = g_U(\mathbf{X})$ (άνω),
 $L = g_L(\mathbf{X})$ (κάτω) έτσι ώστε
 $P(L \leq \beta \leq U) = a$
Εκτίμηση διαστήματος του β :
 $(l, u) = (g_L(\mathbf{x}), g_U(\mathbf{x}))$



Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 15

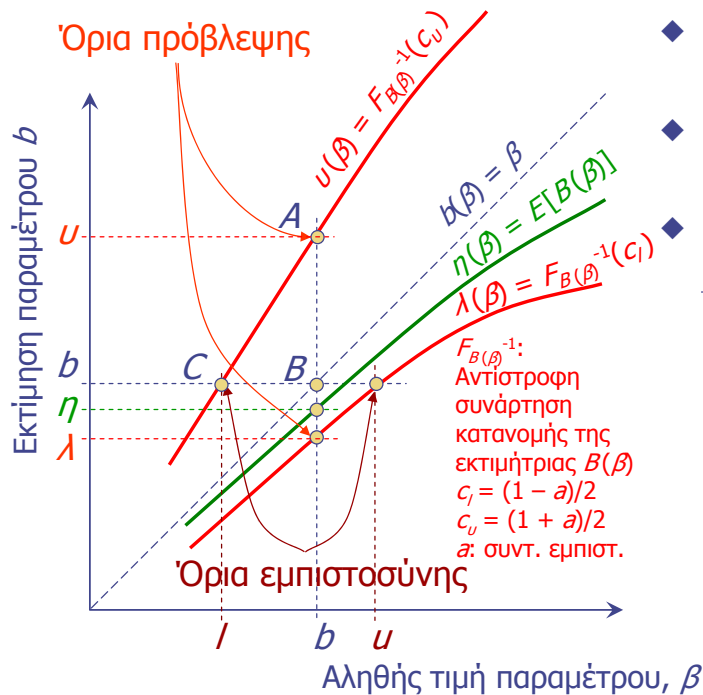
Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας: Όρια εμπιστοσύνης για μια κλιματική μεταβλητή

- ◆ Κλιματική μεταβλητή: Y (π.χ. μέση ετήσια βροχόπτωση 30ετών)
- ◆ Συνάρτηση κατανομής $F_Y(y) = P(Y \leq y)$
- ◆ Για συγκεκριμένη πιθανότητα μη υπέρβασης w , η αντίστοιχη τιμή της Y , δηλ. η $y = F_Y^{-1}(w)$ είναι παράμετρος



Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 16

Εκτίμηση των ορίων εμπιστοσύνης με προσομοίωση Monte Carlo simulation – Μία παράμετρος μοντέλου



◆ Μέθοδος 1 (Ripley, 1987)

$$l = 2b - u, \quad u = 2b - \lambda$$

◆ Μέθοδος 2 (Ripley, 1987)

$$l = b^2 / u, \quad u = b^2 / \lambda$$

◆ Μέθοδος 3

$$\frac{u - b}{b - l} = \frac{AB}{BC} \approx \frac{du}{d\beta}$$

$$l = b + \frac{b - u}{du/d\beta}, \quad u = b + \frac{b - \lambda}{d\lambda/d\beta}$$

για $du/d\beta = d\lambda/d\beta = 1$

→ μέθοδος 1

για $du/d\beta = u/\beta$,
 $d\lambda/d\beta = \lambda/\beta$

→ μέθοδος 2

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 17

Εκτίμηση των ορίων εμπιστοσύνης με προσομοίωση Monte Carlo simulation – Πολλές παράμετροι μοντέλου

Οι ίδιες εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση πολλών παραμέτρων. Για την εφαρμογή της μεθόδου 3, ήτοι,

$$l = b + \frac{b - u}{du/d\beta}, \quad u = b + \frac{b - \lambda}{d\lambda/d\beta}$$

οι παράγωγοι $d\lambda/d\beta$ και $du/d\beta$ πρέπει να υπολογιστούν σε κατάλληλες διευθύνσεις \mathbf{d}_λ και \mathbf{d}_u

Έστω το διάνυσμα των άγνωστων παραμέτρων του μοντέλου (κατανομής, εξάρτησης) $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \dots, \theta_k]^T$

Έστω το διάνυσμα των εκτιμητριών των $\boldsymbol{\theta}$, $\mathbf{T} = [T_1, \dots, T_k]^T$

Έστω $\text{Var}[\mathbf{T}] = \text{diag}(\text{Var}[T_1], \dots, \text{Var}[T_k])$

Έστω $\beta = h(\boldsymbol{\theta})$ η παράμετρος της οποίας πρέπει να υπολογιστούν τα όρια εμπιστοσύνης

Έστω $\mathbf{y} = [\lambda, \beta, u]^T$ το διάνυσμα που περιέχει την παράμετρο β και τα όρια πρόγνωσης της (λ, u) για συντελεστή εμπιστοσύνης a

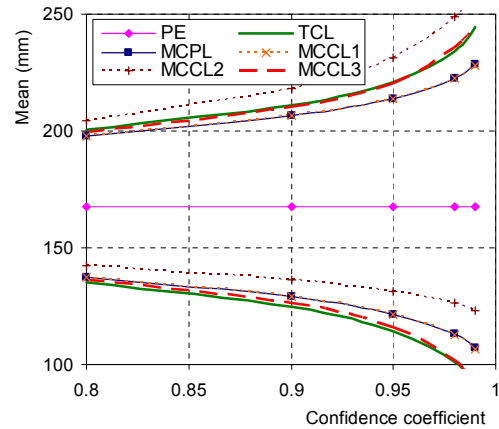
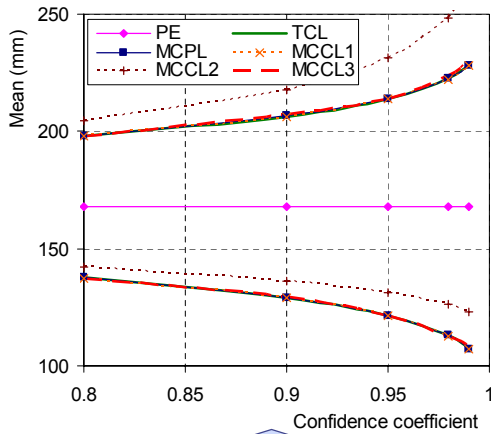
Έστω \mathbf{q} το μητρώο 3×3 που ορίζεται ως

$$\mathbf{q} := \frac{d\mathbf{y}}{d\boldsymbol{\theta}} \text{Var}[\mathbf{T}] \left(\frac{d\mathbf{y}}{d\boldsymbol{\theta}} \right)^T, \quad \text{όπου } \frac{d\mathbf{y}}{d\boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \frac{d\lambda}{d\boldsymbol{\theta}} \\ \frac{d\beta}{d\boldsymbol{\theta}} \\ \frac{du}{d\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \lambda}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \lambda}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial \beta}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \beta}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial \beta}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial u}{\partial \theta_1} & \frac{\partial u}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial u}{\partial \theta_k} \end{bmatrix}$$

Τότε $\mathbf{d}_\lambda = \mathbf{q} [0, 1, 1]^T$, και $\mathbf{d}_u = \mathbf{q} [1, 1, 0]^T$, οπότε $\frac{d\lambda}{d\beta} = \frac{q_{12} + q_{13}}{q_{22} + q_{23}}$, $\frac{du}{d\beta} = \frac{q_{31} + q_{32}}{q_{21} + q_{22}}$

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 18

Επαλήθευση της μεθόδου – μέση τιμή κανονικής κατανομής



Υποθέσεις

$n = 10$
 $m = 167.7$ mm, άγνωστη
 $s = 74.5$ mm, άγνωστη
 Κανονική κατανομή, ανεξαρτησία

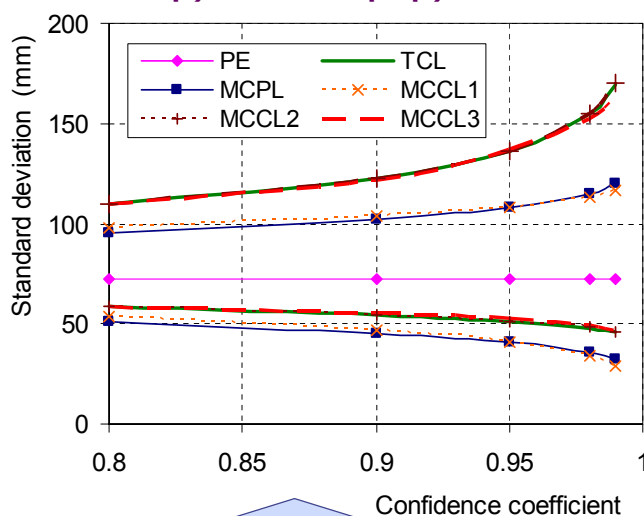
PE: Point estimate
 MCPL: Monte Carlo prediction limits

Υποθέσεις

$n = 10$
 $m = 167.7$ mm, άγνωστη
 $s = 74.5$ mm, άγνωστη
 Κανονική κατανομή, ανεξαρτησία

TCL: Theoretical confidence limits
 MCCL 1, 2, 3: Monte Carlo confidence limits by methods 1, 2, 3

Επαλήθευση της μεθόδου – τυπική απόκλιση κανονικής κατανομής

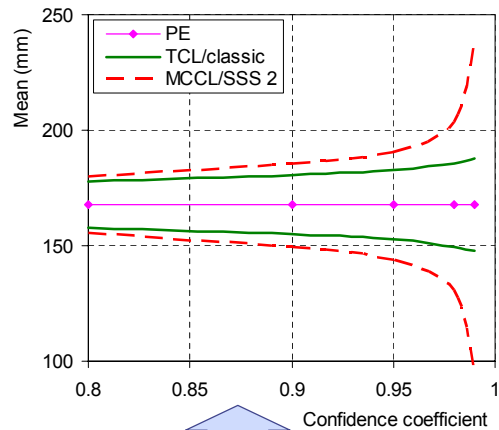
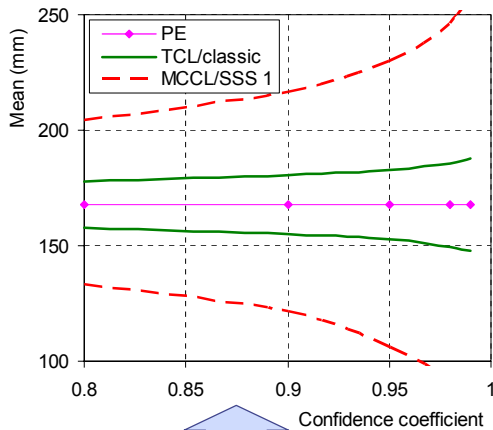


PE: Point estimate
 TCL: Theoretical confidence limits
 MCPL: Monte Carlo prediction limits
 MCCL 1, 2, 3: Monte Carlo confidence limits by methods 1, 2, 3

Υποθέσεις

$n = 10$
 $m = 167.7$ mm, άγνωστη
 $s = 74.5$ mm, άγνωστη
 Κανονική κατανομή, ανεξαρτησία

Αύξηση της αβεβαιότητας σε ανέλιξη SSS



Υποθέσεις

$n = 96$
 $m = 167.7$ mm, άγνωστη
 $s = 74.5$ mm, άγνωστη
 $H = 0.79$, γνωστός
 Κανονική κατανομή

Υποθέσεις

$n = 96$
 $m = 167.7$ mm, άγνωστη
 $s = 74.5$ mm, άγνωστη
 $H = 0.5$, άγνωστος
 Κανονική κατανομή

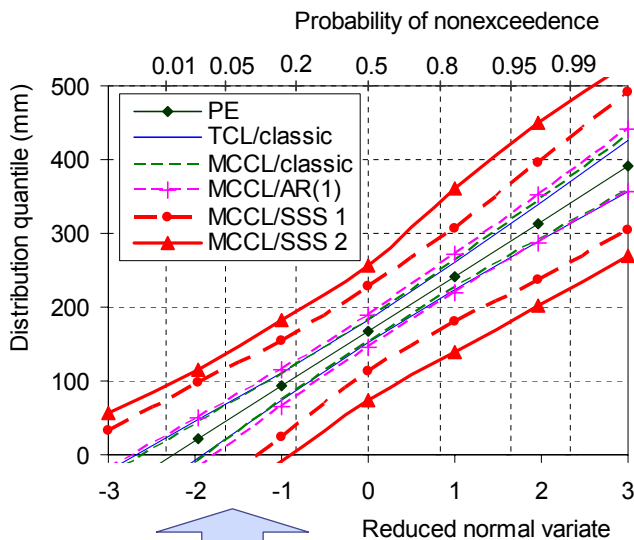
PE: Point estimate

TCL/classic: Theoretical confidence limits, assuming independence

MCPL/SSS: Monte Carlo confidence limits by method 3 assuming an SSS process with known H (case 1) or unknown H (case 2)

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 21

Αβεβαιότητα της απορροής: Ετήσια κλίμακα



Δομή αυτο-συσχετίσης	Παράμετροι	Συνολική αβεβαιότητα, % του μέσου
Τυχούσα	m^*, s^*	174
IID	m, s^*	204
IID	m, s	206
AR(1)	m, s, r^*	210
AR(1)	m, s, r	211
SSS	m, s, H^*	236
SSS	m, s, H	268

Οι παράμετροι με * θεωρούνται σταθερές

Υποθέσεις

$n = 96$, $a = a = 95\%$
 $m = 167.7$ mm
 $s = 74.5$ mm
 $r = 0.34/H = 0.79$
 Κανονική κατανομή

PE: Point estimate

TCL/classic: Theoretical CL, IID

MCCL/classic: Monte Carlo CL (method 3), IID

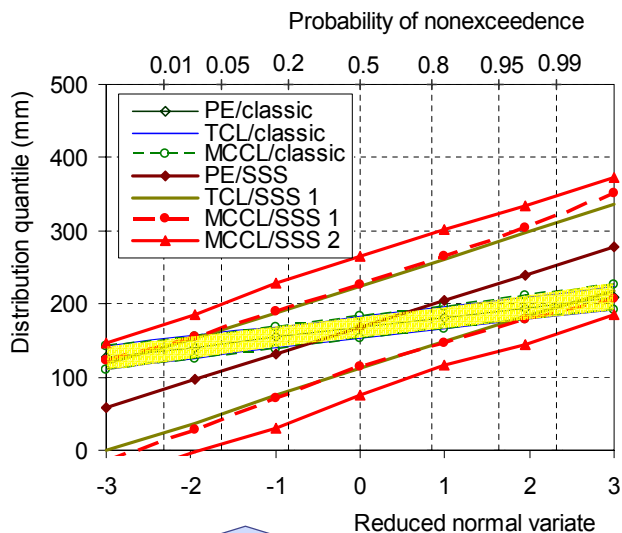
MCCL/AR(1): Monte Carlo CL (method 3), AR(1)

MCPL/SSS: Monte Carlo CL (method 3), SSS

(1: fixed H ; 2: unknown H)

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 22

Αβεβαιότητα της απορροής: κλίμακα 30 ετών (κλιματική)



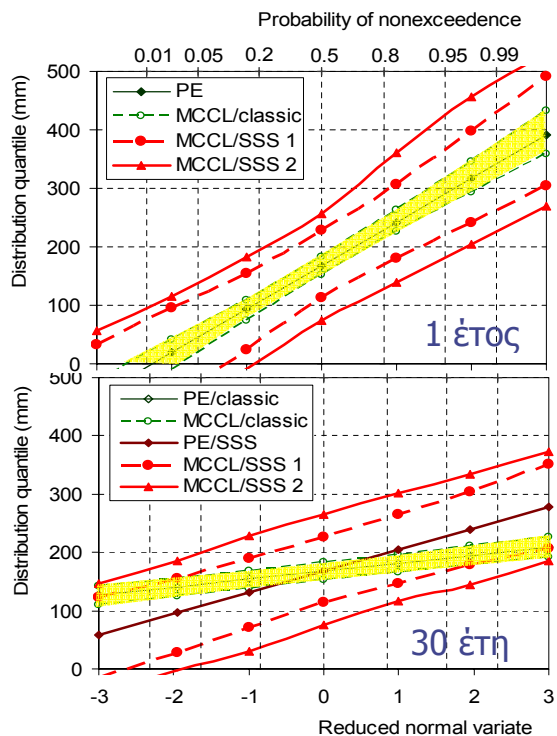
Υποθέσεις
 $n = 96$, $a = \alpha = 95\%$
 $m = 167.7$ mm
 $s = 74.5$ mm
 $H = 0.79$
 Κανονική κατανομή

Δομή αυτο-συσχέτισης	Παράμετροι	Συνολική αβεβαιότητα % του μέσου
IID	m^*, s^*	32
IID	m, s	50
SSS	m^*, s^*, H^*	87
SSS	m, s, H^*	165
SSS	m, s, H	199

Οι παράμετροι με * θεωρούνται σταθερές

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 23

Σύγκριση της αβεβαιότητας της απορροής: κλίμακες 1 και 30 ετών



Δομή αυτο-συσχέτισης	Παράμετροι	Συνολική αβεβαιότητα, % του μέσου	
		Ετήσια κλίμακα	Κλίμακα 30 ετών
IID	m^*, s^*	174	32
IID	m, s	206	50
SSS	m^*, s^*, H^*	174	87
SSS	m, s, H^*	236	165
SSS	m, s, H	268	199

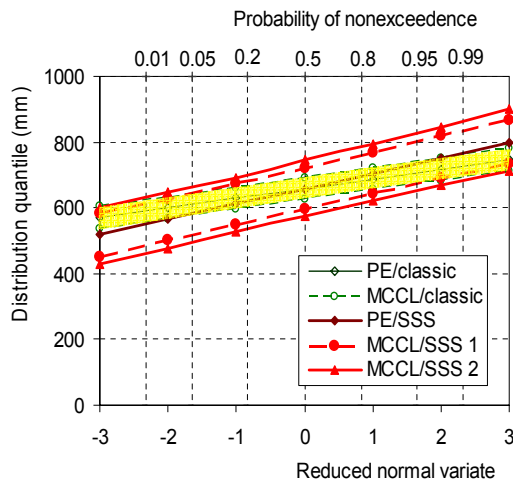
Οι παράμετροι με * θεωρούνται σταθερές

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

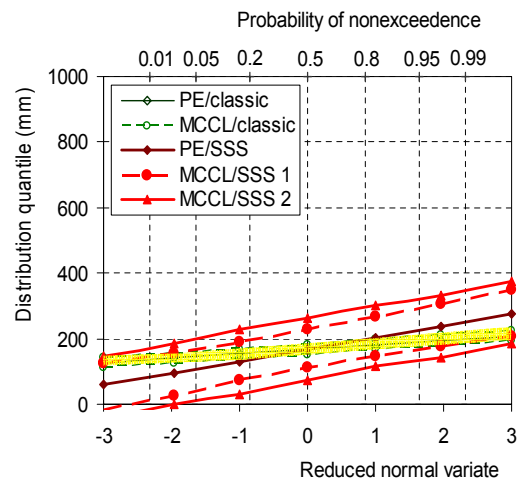
Ο καιρός είναι αυτό που σου 'ρχεται
 Το κλίμα είναι αυτό που σου 'ρχεται
 ... αν περιμένεις πολύ

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 24

Σύγκριση της κλιματικής μεταβλητότητας βροχής και απορροής (κλιματικές τιμές 30 ετών)



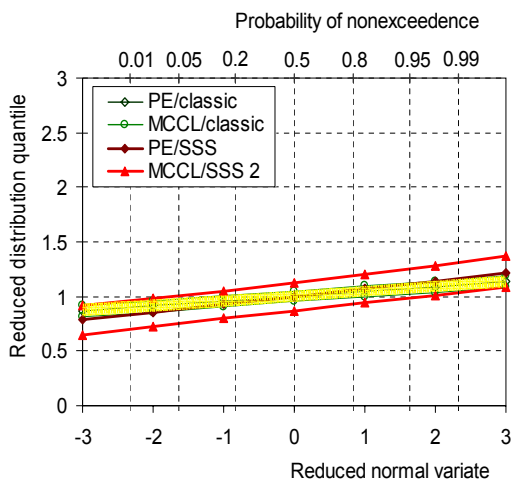
Βροχή ($m = 658.4$ mm,
 $C_v = 0.24$, $H = 0.64$)



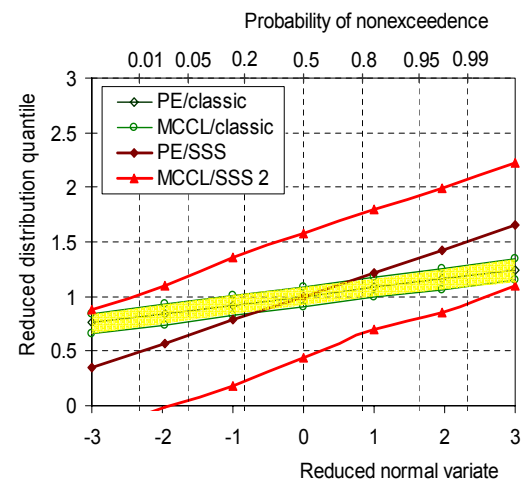
Απορροή ($m = 167.7$ mm,
 $C_v = 0.44$, $H = 0.79$)

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 25

Σύγκριση της κλιματικής μεταβλητότητας βροχής & απορροής (κλιματικές τιμές 30 ετών με αναγωγή με τη μέση τιμή)



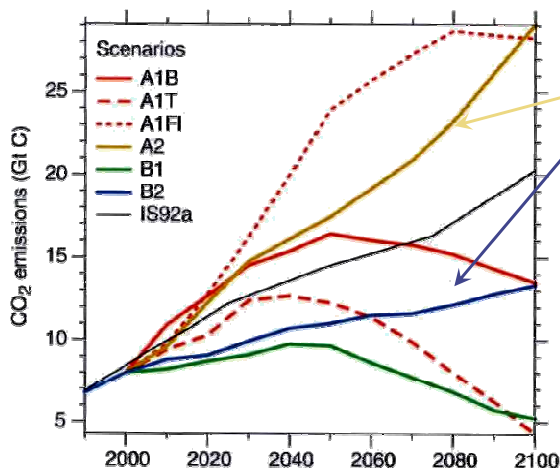
Βροχή ($m = 658.4$ mm,
 $C_v = 0.24$, $H = 0.64$)



Απορροή ($m = 167.7$ mm,
 $C_v = 0.44$, $H = 0.79$)

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 26

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

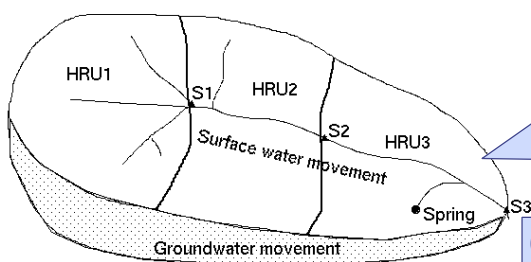
Μοντέλα

HADCM3: Μοντέλο γενικής κυκλοφορίας (general circulation model – **GCM**) με σύζευξη ατμόσφαιρας-ωκεανών – αναπτύχθηκε στο Hadley Centre for Climate Prediction and Research (Gordon et al., 2000)
 Διακριτότητα: 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 (Flato and Boer, 2000)
 Διακριτότητα : 3.75°γ.π. x 3.75°γ.μ. (48 γ.π. x 96 γ.μ.)

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 27

Προσέγγιση βασισμένη σε σενάρια: Υδρολογικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε

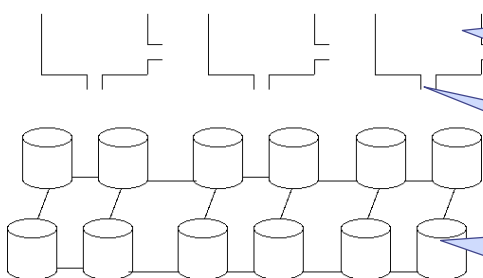


Η λεκάνη χωρίζεται σε ενότητες με ομοιόμορφα μορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά (hydrologic response units – HRU)

Οι επιφανειακές υδρολογικές διεργασίες προσομοιώνονται με ένα τροποποιημένο μοντέλο Thornthwaite που αναφέρεται σε ταμιευτήρες εδαφικής υγρασίας

Η διήθηση από τους ταμιευτήρες εδαφικής υγρασίας τροφοδοτεί τον υδροφόρα

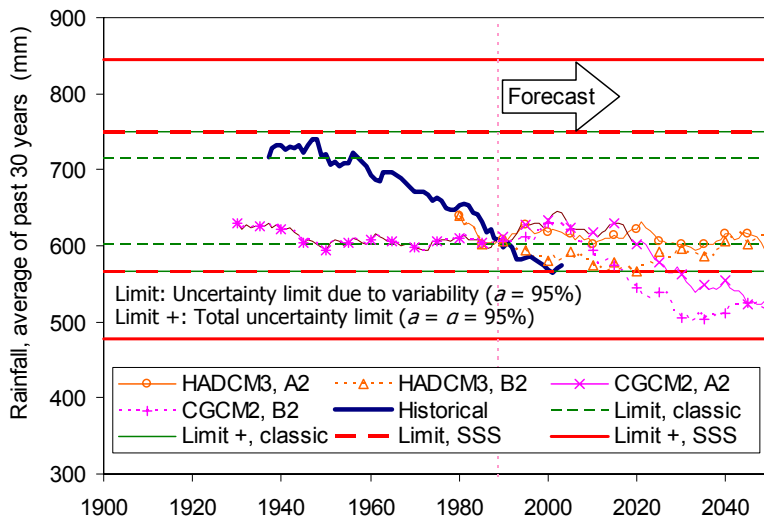
Ο υδροφόρας μοντελοποιείται σαν ένα δίκτυο από στοιχεία αποθήκευσης (δεξαμενές) και στοιχεία μεταφοράς (σωλήνες με ροή που υπακούει στο νόμο του Darcy)



Οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμήθηκαν από τους Efstratiadis et al. (2003) και Rozos et al. (2004). Περίοδος βαθμονόμησης: 1984-1990;. Περίοδος επαλήθευσης 1990-1994

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 28

Σενάρια GCM για τη μελλοντική βροχόπτωση

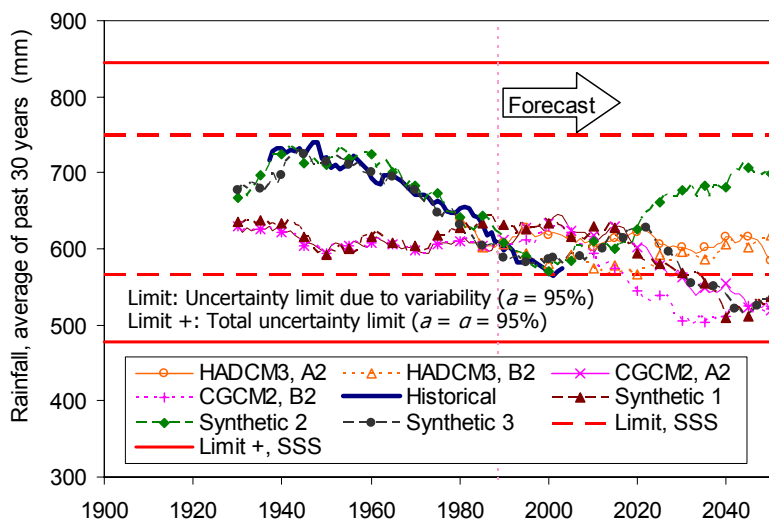


Οι χρονοσειρές HADCM3 (A2 και B2) είναι μέσες τιμές των σημείων κανάβου (37ο30' N, 22ο30' E) και (40ο00' N, 22ο30' E), έτσι ώστε να αντιστοιχούν χονδρικά στο σημείο (38ο75' N, 22ο30' E), που βρίσκεται μέσα στη λεκάνη. Οι χρονοσειρές CGCM2 (A2 and B2) αναφέρονται στο σημείο (38ο96' N, 22ο30' E) που βρίσκεται μέσα στη λεκάνη. Όλες οι σειρές έχουν αναχθεί σε τρόπο ώστε να συμφωνούν με τον ιστορικό μέσο της 30-ετούς περιόδου 1960-61 έως 1989-90.

- ◆ Οι χρονοσειρές GCM δείχνουν μικρή κλιματική μεταβλητότητα στο παρελθόν (συντελεστές Hurst κοντά στο 0.50)
- ◆ Οι αποκλίσεις των χρονοσειρών GCM από τις ιστορικές είναι πολύ μεγάλες στο αρχικό τμήμα της περιόδου παρατηρήσεων
- ◆ Οι προβλέψεις GCM είναι μέσα στα όρια εμπιστοσύνης SSS

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 29

Σενάρια μελλοντικής βροχόπτωσης: Σενάρια GCM σε αντιδιαστολή με στοχαστικά σενάρια

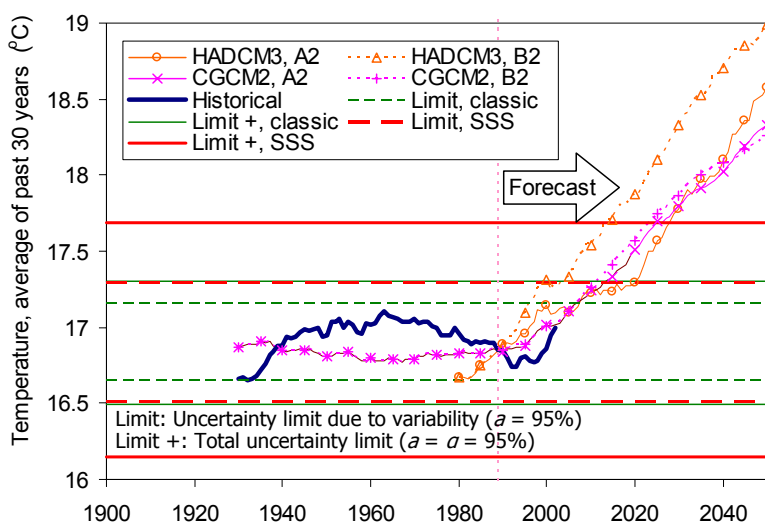


Οι συνθετικές χρονοσειρές έχουν διαλεχθεί από 100 000 δείγματα που γεννηθήκαν από την ανέλιξη SSS με στατιστικά χαρακτηριστικά ίσα με αυτά της ιστορικής βροχόπτωσης

- ◆ 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

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 30

GCM σενάρια μελλοντικής θερμοκρασίας

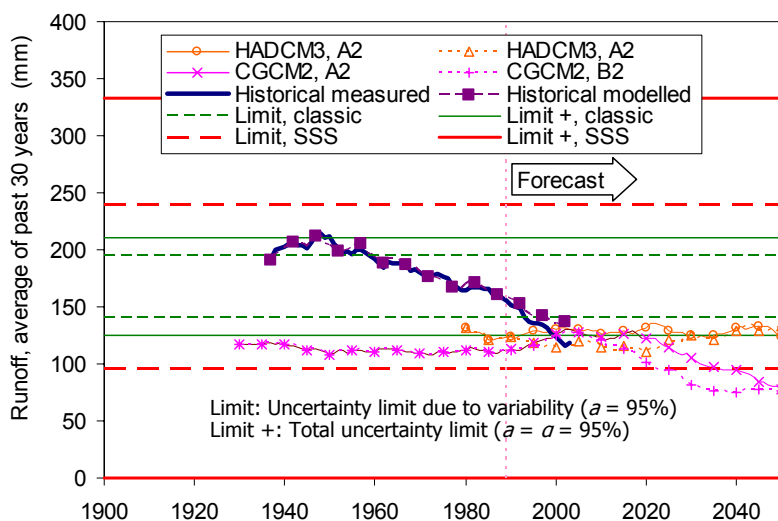


Οι χρονοσειρές HADCM3 (A2 και B2) είναι μέσες τιμές των σημείων κανάβου (37°30' N, 22°30' E) και (40°00' N, 22°30' E), έτσι ώστε να αντιστοιχούν χονδρικά στο σημείο (38°75' N, 22°30' E), που βρίσκεται μέσα στη λεκάνη. Οι χρονοσειρές CGCM2 (A2 and B2) αναφέρονται στο σημείο (38°96' N, 22°30' E) που βρίσκεται μέσα στη λεκάνη. Όλες οι σειρές μετακινήθηκαν σε τρόπο ώστε να συμφωνούν με τον ιστορικό μέσο της 30-ετούς περιόδου 1960-61 έως 1989-90.

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 31

- ◆ Οι χρονοσειρές CGCM2 δείχνουν χαμηλή κλιματική μεταβλητότητα στο παρελθόν
- ◆ Οι χρονοσειρές HADCM3 δείχνουν μη ρεαλιστικές ανοδικές τάσεις στο παρελθόν
- ◆ Οι προβλέψεις των GCM βγαίνουν έξω από τα όρια εμπιστοσύνης SSS γύρω στα 2015-2030

Συναγόμενα σενάρια μελλοντικής απορροής



Είσοδοι υδρολογικών μοντέλων

Η επιφανειακή βροχόπτωση στις HRU εκτιμήθηκε με παλινδρόμηση από τη βροχή της Αλιάρτου

Η δυνητική εξατμοδιαπονή εκτιμήθηκε με παλινδρόμηση από τη θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία της Αλιάρτου

- ◆ 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

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 32

Συμπεράσματα

- ◆ Στην εφαρμογή της στην υδρολογία και την κλιματολογία, η κλασική στατιστική περιγράφει μόνο ένα μέρος της συνολικής αβεβαιότητας και έτσι υπεκτιμά τη διακινδύνευση
- ◆ Τα κλιματικά μοντέλα που φέρονται να προβλέπουν το μελλοντικό κλίμα, δεν περιγράφουν την κλιματική μεταβλητότητα στο παρελθόν και συγκεκριμένα δείχνουν κλιματική μεταβλητότητα πολύ ασθενέστερη της πραγματικής
- ◆ Το φαινόμενο Hurst και οι ανελίξεις απλής ομοιοθεσίας (ανελίξεις SSS) προσφέρουν μια ισχυρή βάση για μια «διασκευασμένη» υδρο-κλιματική στατιστική, συμβατή με την κλιματική μεταβλητότητα
- ◆ Το στατιστικό πλαίσιο SSS, εφαρμοζόμενο στα υδροκλιματικά δεδομένα του παρελθόντος, είναι ένα εφικτό βήμα στην κατεύθυνση της συναγωγής ακριβέστερων εκτιμήσεων της αβεβαιότητας και της διακινδύνευσης, ιδιαίτερα χρήσιμο για τις υδρολογικές μελέτες και τη διαχείριση των υδατικών πόρων
- ◆ Οι ανθρωπογενείς κλιματικές αλλαγές αυξάνουν τη μελλοντική αβεβαιότητα, αλλά η ποσοτικοποίηση της αύξησης είναι πολύ δύσκολη

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 33

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

Αναφορές

- Beran, J. (1994), *Statistics for Long-Memory Processes*, vol. 61 of Monographs on Statistics and Applied Probability. Chapman & Hall, New York, USA
- Efstratiadis, A., Koutsoyiannis, D., Rozos, E., and Nalbantis, I. (2003), Calibration of a conjunctive surface-groundwater simulation model using multiple responses, *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, Nice, April 2003, European Geophysical Society, American Geophysical Union
- Hurst, H. E. (1951), Long term storage capacities of reservoirs. *Trans. ASCE* **116**, 776–808.
- Klemeš, V., Sricanhan, R. and McMahon T. A. (1981), Long-memory flow models in reservoir analysis: What is their practical value? *Water Resources Research*, **17**(3), 737-751
- Koutsoyiannis, D. (2002), The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy, *Hydrological Sciences Journal*, **47**(4), 573-595
- Koutsoyiannis, D. (2003), Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics, *Hydrological Sciences Journal*, **48**(1), 3-24
- National Research Council (1991), *Opportunities in the Hydrologic Sciences*, National Academy Press, Washington DC, USA
- Ripley, B. D (1987), *Stochastic Simulation*, Wiley, New York
- Rozos, E., Efstratiadis, A., Nalbantis, I. and Koutsoyiannis, D. (2004), Calibration of a semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, *Hydrological Sciences Journal* (under review)
- Wallace, J. W., and Hobbs, P. V. (1977), *Atmospheric Science, An Introductory Survey*, Academic Press, San Diego, Ca
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C. A., Banks, H., Gregory, J. M., Johns, T. C., Mitchell, J. F. B., and Wood, R. A. (2000), The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in aversion of the Hadley Centre Coupled Model without flux adjustments, *Climate Dynamics* **16** 147-168
- Flato, G.M. and Boer, G. J. (2001), Warming asymmetry in climate change simulations, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 195-198

Δ. Κουτσογιάννης και Α. Ευστρατιάδης, Η βεβαιότητα της κλιματικής αλλαγής και η κλιματική αβεβαιότητα 34