

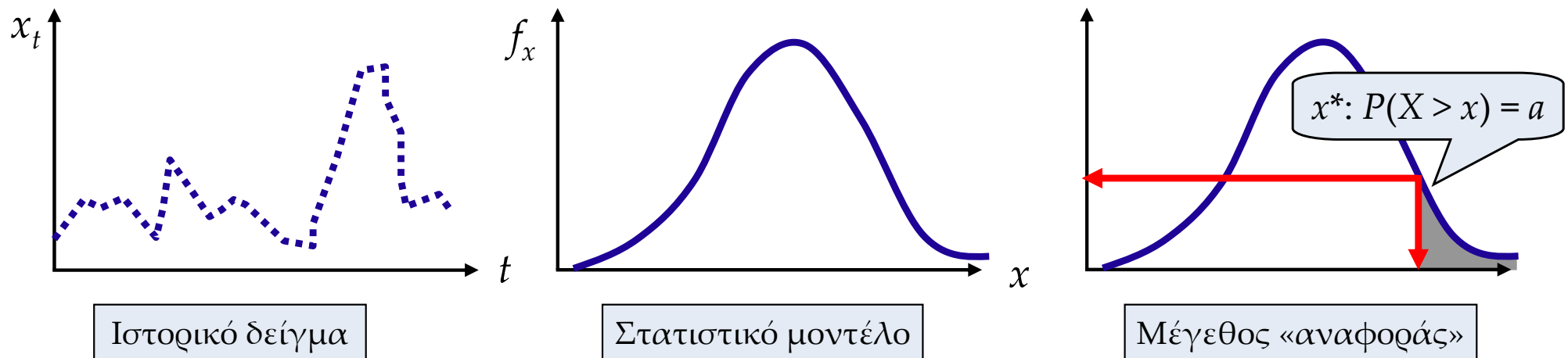
Διάλεξη στα πλαίσια του μαθήματος:
«ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΤΟΥΣ ΥΔΑΤΙΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ»
9^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Εφαρμογές στοχαστικής προσομοίωσης στα συστήματα υδατικών πόρων – Το λογισμικό Κασταλία

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2014

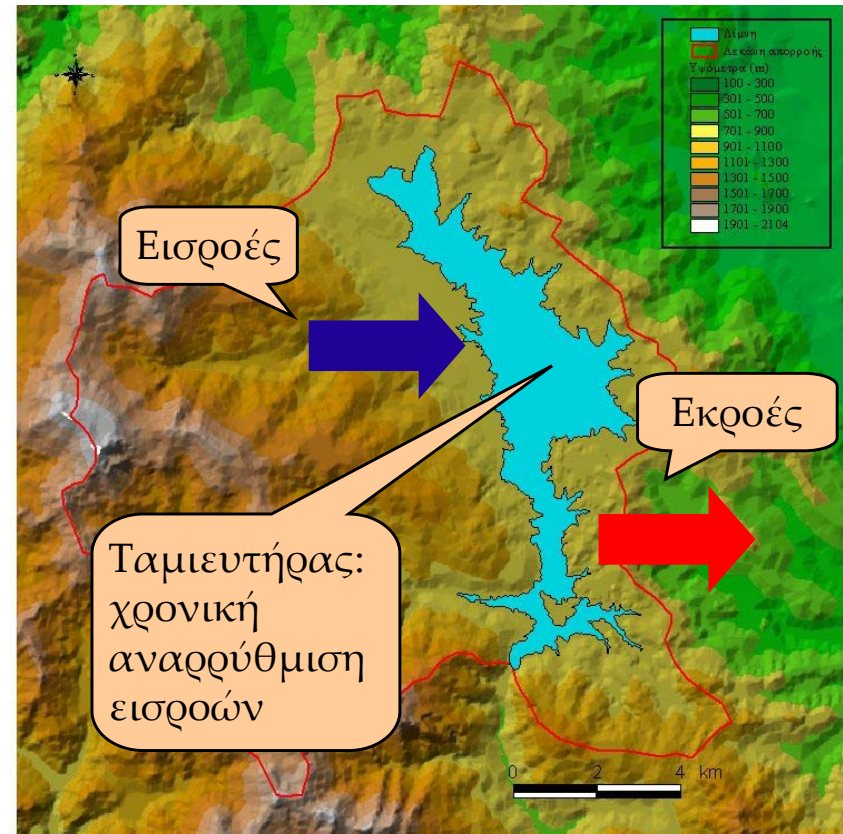
Στατιστικές έναντι στοχαστικών προσεγγίσεων σε συστήματα υδατικών πόρων

- Η (αναλυτική) στατιστική προσέγγιση αφορά στην προσαρμογή κατάλληλης κατανομής στο ιστορικό δείγμα τιμών της υπόψη τυχαίας μεταβλητής και εκτίμηση του μεγέθους αναφοράς, για δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (ή μη υπέρβασης).
- Η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί όταν:
 - Η τυχαία μεταβλητή παρουσιάζει στατιστική εξάρτηση, χωρική (ετεροσυσχέτιση) και χρονική (αυτοσυσχέτιση), οπότε δεν ισχύει η θεμελιώδης αρχή της **ανεξαρτησίας**.
 - Η στατιστική διάταξη της διεργασίας που περιγράφεται από την τυχαία μεταβλητή «διαταράσσεται» από εξωτερικούς παράγοντες και αλληλεπιδράσεις άλλων διεργασιών, οπότε δεν ισχύει η θεμελιώδης αρχή της **στασιμότητας** (το παρελθόν δεν έχει στατιστική συνέπεια με το μέλλον).
- Μη ανεξαρτησία → στοχαστική προσέγγιση, μη στασιμότητα → προσομοίωση



Πρόβλημα 1: Εκτίμηση χαρακτηριστικών υδρολογικών μεγεθών ταμιευτήρα

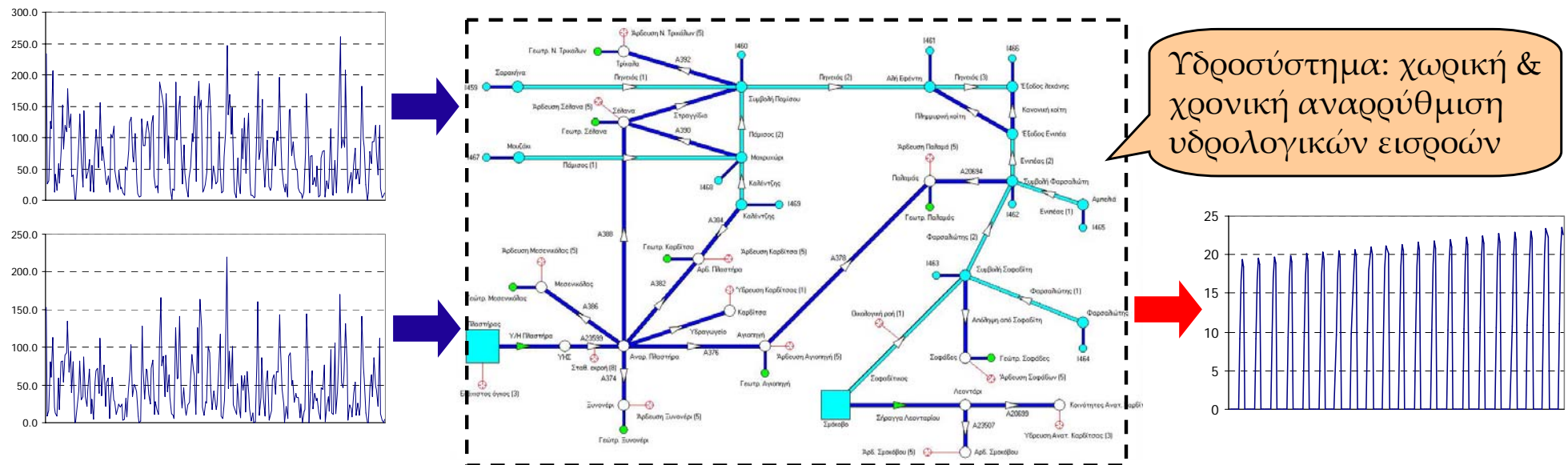
- **Συνιστώσες συστήματος:** ταμιευτήρας, ωφέλιμης χωρητικότητας k
- **Υδρολογικά δεδομένα:** χρονοσειρές εισροών (απορροή λεκάνης, βροχόπτωση ταμιευτήρα) και απωλειών (εξάτμιση, διαφυγές)
- **Ισοδύναμα προβλήματα:**
 - Εκτίμηση χωρητικότητας k ώστε να εξασφαλίζεται ασφαλής απόληψη r , για δεδομένο επίπεδο αξιοπιστίας a .
 - Εκτίμηση ετήσιας εκροής (ασφαλής απόληψη) r που μπορεί να διοχετευτεί από τον ταμιευτήρα, για αξιοπιστία a
 - Εκτίμηση αξιοπιστίας a για δεδομένη απόληψη r και χωρητικότητα k .



- Ποια μεγέθη του συστήματος είναι **τυχαίες μεταβλητές**;
- Γιατί επιβάλλεται η εφαρμογή **μοντέλου προσομοίωσης** και πώς αυτό διατυπώνεται;
- Γιατί (και πότε) επιβάλλεται η εφαρμογή μοντέλου **στοχαστικής προσομοίωσης** για την παραγωγή **συνθετικών εισροών** και ποια χαρακτηριστικά πρέπει να αναπαράγει;

Πρόβλημα 2: Βελτιστοποίηση υδροσυστήματος

- ❑ **Συνιστώσες συστήματος:** έργα συλλογής, αποθήκευσης και μεταφοράς νερού
- ❑ **Δεδομένα:** τεχνικά μεγέθη έργων, χρονοσειρές εισροών, χρήσεις νερού, περιορισμοί
- ❑ **Διατύπωση προβλημάτων βελτιστοποίησης:**
 - Μεγιστοποίηση ασφαλούς απόληψης, για δεδομένη αξιοπιστία
 - Μεγιστοποίηση αξιοπιστίας, για δεδομένη ζήτηση
 - Μεγιστοποίηση οικονομικής / ενεργειακής απόδοσης συστήματος

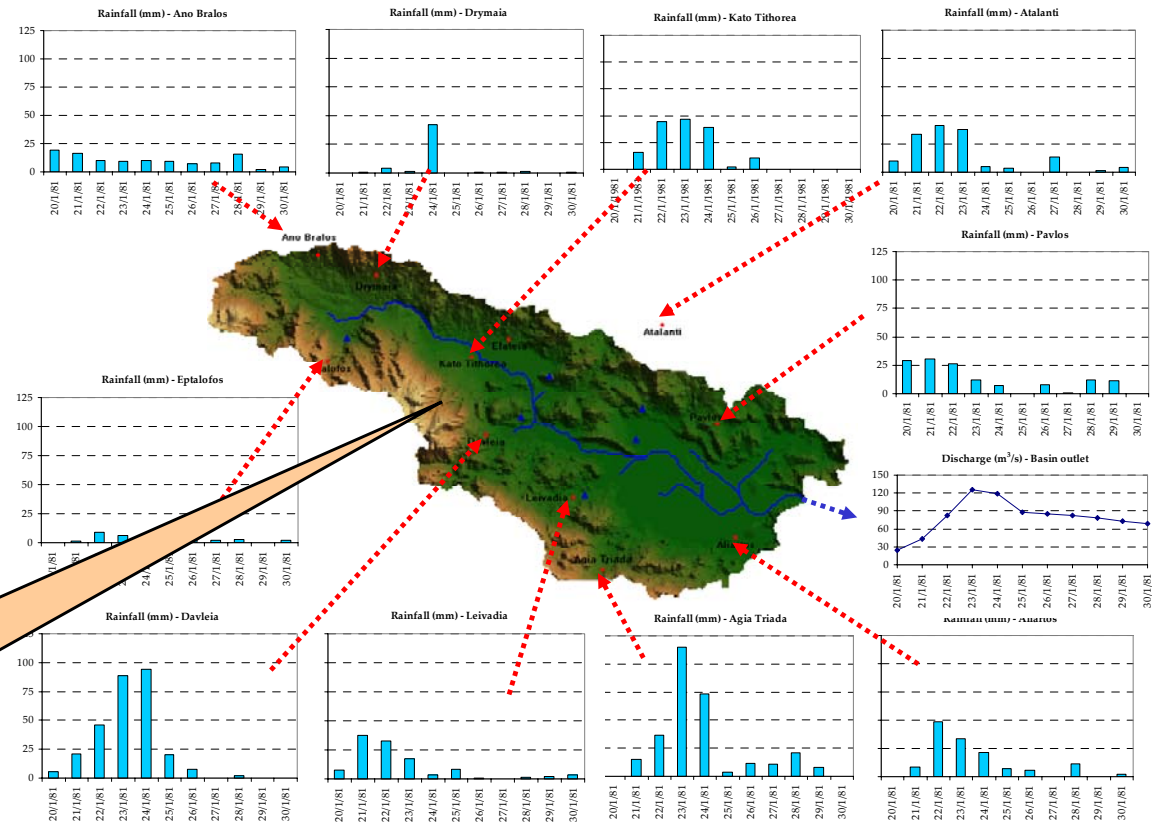


- Ποιες είναι οι μεταβλητές ελέγχου του συστήματος;
- Γιατί επιβάλλεται η εφαρμογή μοντέλου πολυμεταβλητής στοχαστικής προσομοίωσης;
- Πώς συνδυάζονται τα προβλήματα στοχαστικής προσομοίωσης και βελτιστοποίησης;

Πρόβλημα 3: Εκτίμηση υδρολογικής απόκρισης Λεκάνης απορροής

- **Συνιστώσες συστήματος:**
Λεκάνη απορροής, υδροφορέας
- **Υδρομετεωρολογικά δεδομένα εισόδου:** βροχόπτωση, δυνητική εξατμοδιαπνοή (φορτίσεις)
- **Αποκρίσεις λεκάνης:** εξατμοδιαπνοή, επιφανειακή και υπόγεια απορροή, διαφυγές

Λεκάνη απορροής:
χωρική & χρονική
αναρρύθμιση
βροχόπτωσης



- Πώς υλοποιείται το (ντετερμινιστικό) μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης;
- Πώς αξιοποιούνται οι υδρολογικές παρατηρήσεις στην εκτίμηση των παραμέτρων (βαθμονόμηση) του μοντέλου;
- Πώς υλοποιείται το στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης των φορτίσεων της λεκάνης;
- Γιατί η στοχαστική προσέγγιση είναι αναγκαία στην περίπτωση διαταραγμένων λεκανών;

Πρόβλημα 4: Εκτίμηση πλημμυρικών παροχών

Κλασική στατιστική προσέγγιση

Εκτίμηση ολικού ύψους βροχής $h(d, T)$ για διάρκεια d και περίοδο επαναφοράς T , μέσω της όμβριας καμπύλης

Παραγωγή συνθετικού υετογραφήματος, στο οποίο το άθροισμα όλων των επιμέρους υψών βροχής ισούται με $h(d, T)$

Εφαρμογή ντετερμινιστικού υδρολογικού μοντέλου γεγονότος για δεδομένες αρχικές συνθήκες και τιμές παραμέτρων

Εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών ενδιαφέροντος (υδρογράφημα, παροχή αιχμής), περιόδου επαναφοράς T

Στοχαστική προσέγγιση γεγονότος

Παραγωγή συνθετικών επεισοδίων καταιγίδων, όπου κάθε επεισόδιο έχει περίοδο επαναφοράς T

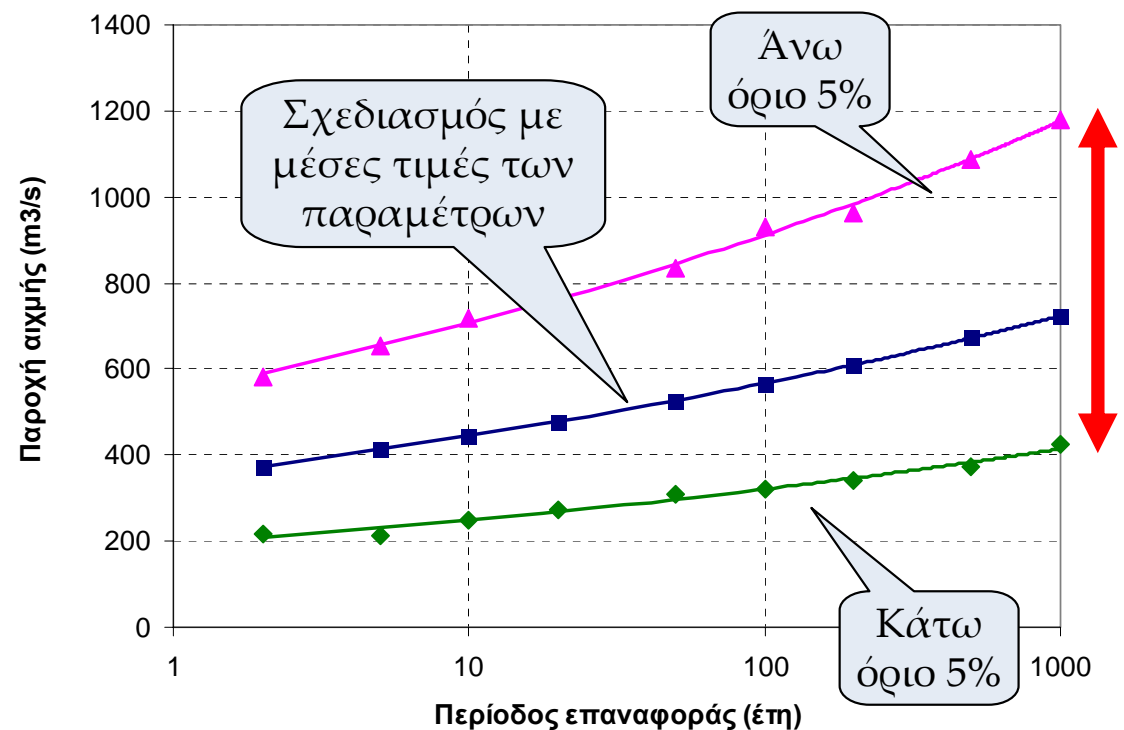
Εφαρμογή ντετερμινιστικού υδρολογικού μοντέλου γεγονότος για τυχαίες αρχικές συνθήκες και τυχαίες τιμές παραμέτρων

Εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών, μέσω στατιστικής ανάλυσης των προσομοιωμένων υδρογραφημάτων

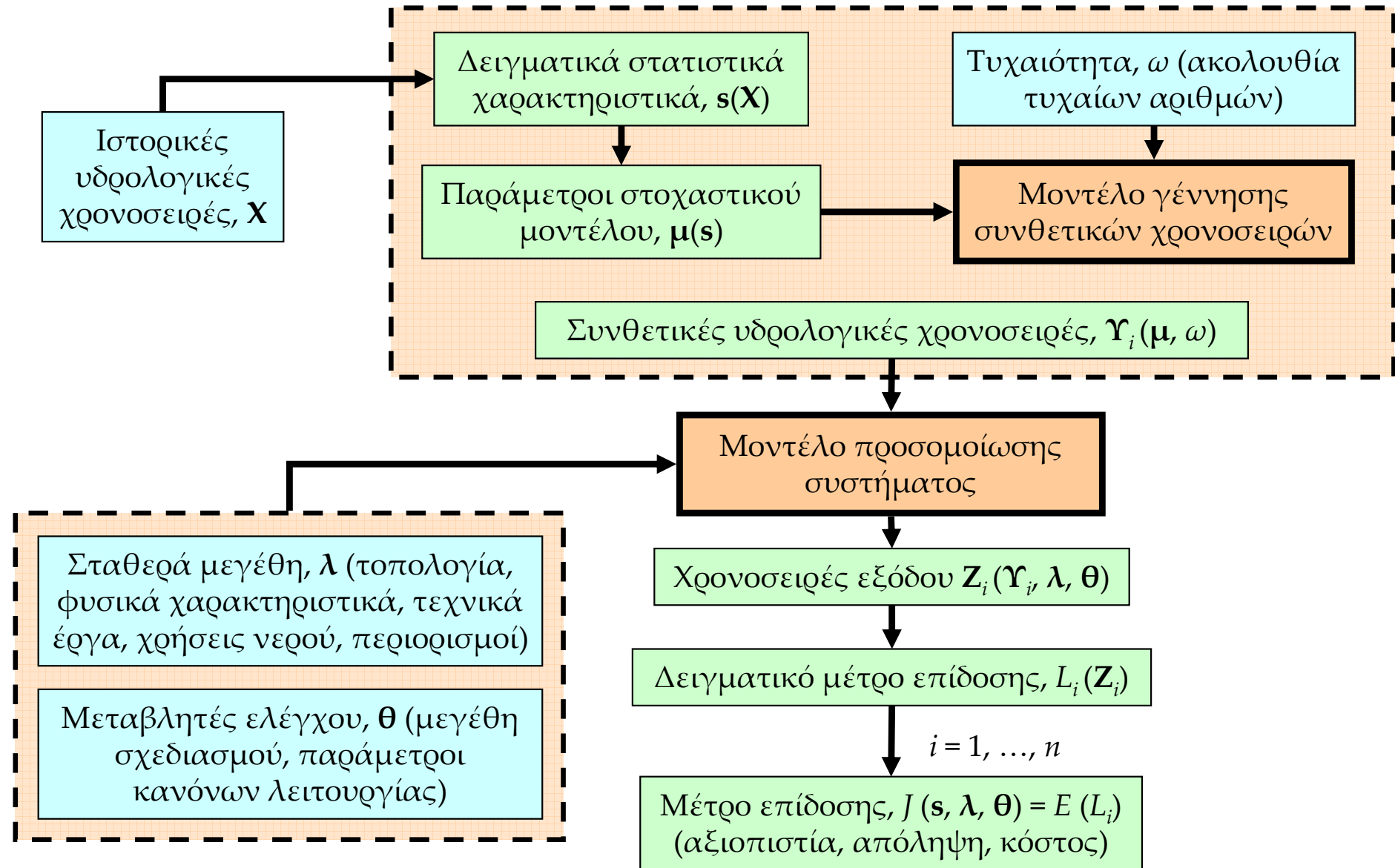
Η πλημμυρική διακινδύνευση αντιμετωπίζεται ως **συνδυασμένη πιθανότητα** πραγματοποίησης των μηχανισμών που συμμετέχουν στην παραγωγή της απορροής

Πρόβλημα 5: Εκτίμηση αβεβαιότητας μοντέλων

- ❑ **Παράδειγμα:** Υπολογισμός παροχής αιχμής με την ορθολογική μέθοδο, για διάφορες περιόδους επαναφοράς, για δεδομένη όμβρια καμπύλη, έκταση λεκάνης $A = 100 \text{ km}^2$, χρόνο συγκέντρωσης $t_c = 1 \text{ h}$ και συντελεστή απορροής $c = 40\%$.
- ❑ **Υπόθεση σταθερών παραμέτρων:** Παράγεται μία τιμή της παροχής αιχμής q_p για κάθε περίοδο επαναφοράς T (π.χ. $375 \text{ m}^3/\text{s}$ για $T = 2$ έτη, $725 \text{ m}^3/\text{s}$ για $T = 1000$ έτη)
- ❑ **Υπόθεση τυχαίων τιμών παραμέτρων:** Θεωρείται ότι οι τιμές $t_c = 1 \text{ h}$ και $c = 40\%$ αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή των παραμέτρων, οι οποίες θεωρείται ότι ακολουθούν κανονική κατανομή με συντελεστή διασποράς 25%.
- ❑ **Μεθοδολογία:** Παράγονται 1000 τυχαίες τιμές των t_c και c , για κάθε περίοδο επαναφοράς T , και υπολογίζονται 1000 τιμές της παροχή αιχμής q_p , από τις οποίες εκτιμάται το εμπειρικό διάστημα εμπιστοσύνης 90%.
- ❑ **Συμπέρασμα:** Για κάθε T προκύπτει ένα εύρος του διαστήματος εμπιστοσύνης της παροχής αιχμής, που κυμαίνεται από $215 - 580 \text{ m}^3/\text{s}$ για $T = 2$ έτη έως $425 - 1180 \text{ m}^3/\text{s}$ για $T = 1000$ έτη.

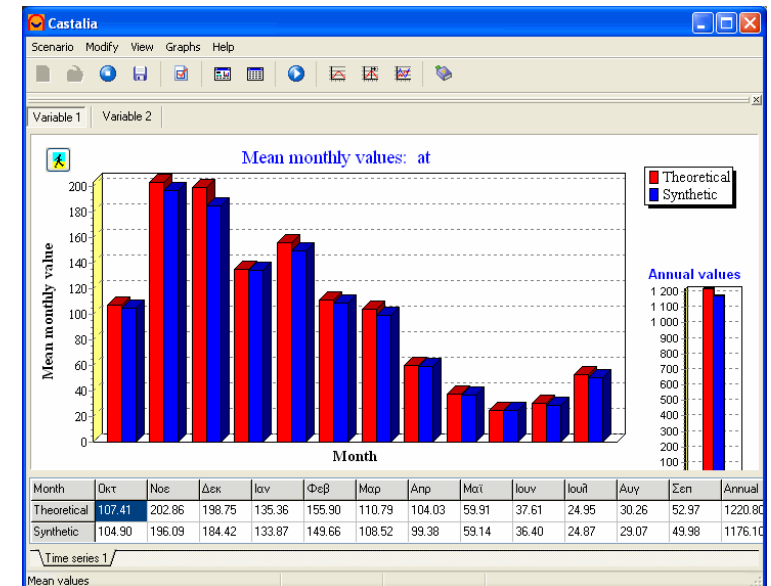
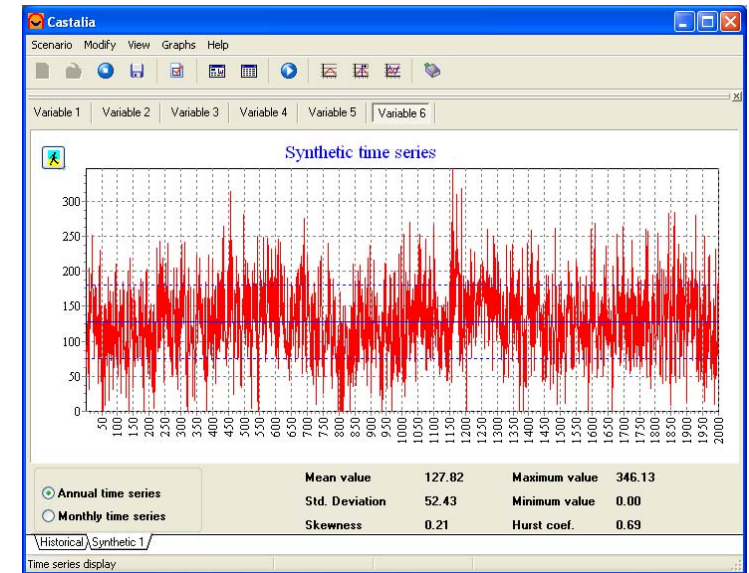


Μεθοδολογικό πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης συστημάτων υδατικών πόρων



Το λογισμικό Κασταλία

- Αποτελεί καταστάλαγμα 20ετούς ερευνητικής εμπειρίας στο αντικείμενο της πολυμεταβλητής στοχαστικής προσομοίωσης.
- Οι μεθοδολογίες αναπτύχθηκαν, κατά κύριο λόγο, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας» (1999-2003).
- Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Object Pascal – Delphi, και λειτουργεί σε αυτόνομο περιβάλλον, αλλά και ως πρόσθετο του λογισμικού Υδρογνώμων.
- Χρησιμοποιείται επιχειρησιακά από την ΕΥΔΑΠ, για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, ενώ έχει ακόμη χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια ερευνητικών έργων και τεχνολογικών μελετών, στις οποίες πραγματοποιήθηκαν διαχειριστικές αναλύσεις σύνθετων συστημάτων υδατικών πόρων.
- Πρόσφατα επεκτάθηκε ώστε να υποστηρίζει τρεις χρονικές κλίμακες (ημερήσια, μηνιαία, ετήσια).

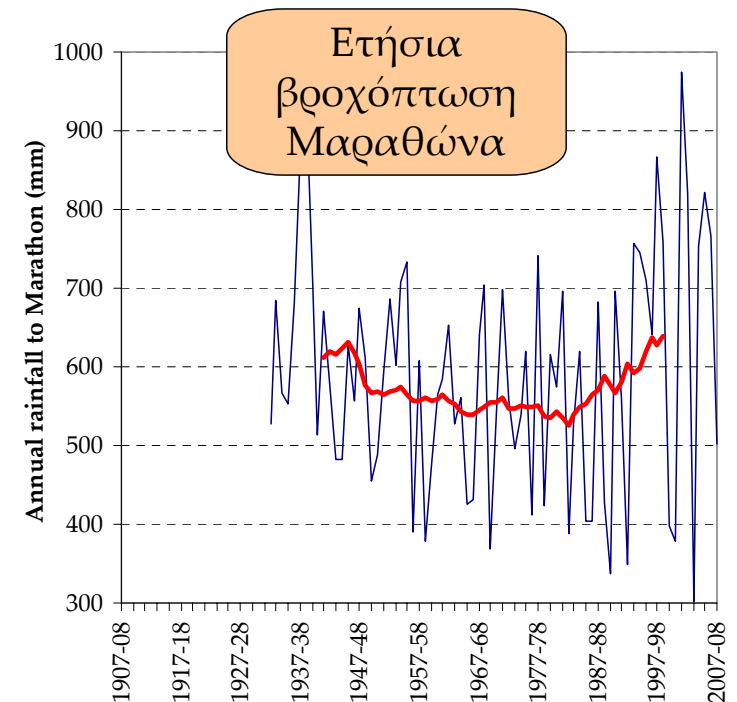
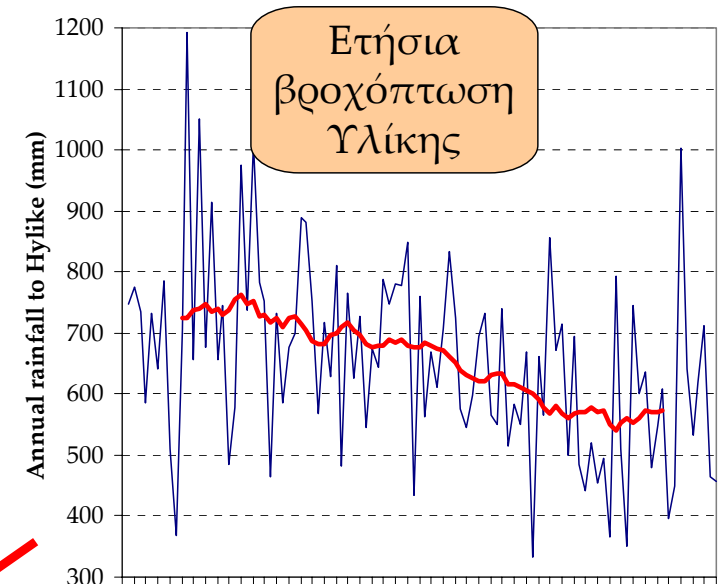
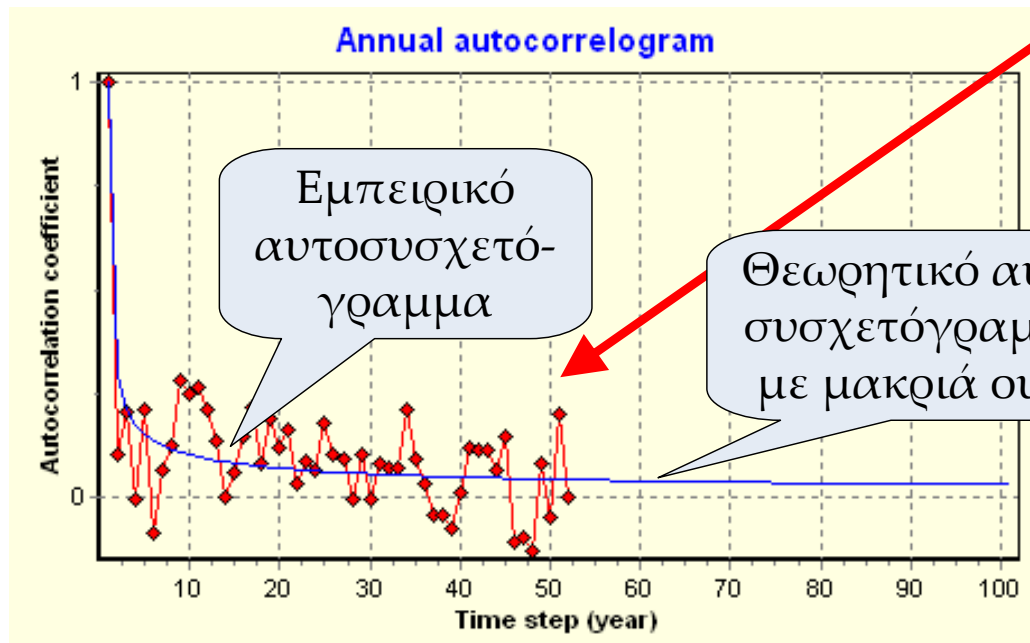


Χαρακτηριστικά στοχαστικού μοντέλου

- ❑ **Πολυμεταβλητή προσομοίωση:** Ταυτόχρονη περιγραφή διεργασιών που παρουσιάζουν στατιστική εξάρτηση, είτε λόγω παρόμοιας υδρολογικής διαίτας ή λόγω σχέσης αιτίου-αποτελέσματος (π.χ., βροχή-απορροή).
- ❑ **Ανάλυση σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες:** Αναπαραγωγή των στατιστικών χαρακτηριστικών των υδρολογικών μεταβλητών και των ιδιοτεροτήτων τους, σε τρεις χρονικές κλίμακες (ημερήσια, μηνιαία, ετήσια).
- ❑ **Διατήρηση περιθώριων συναρτήσεων κατανομής:** Αναπαραγωγή μέσω τιμών, διασπορών και ασυμμετριών (σε όλες τις κλίμακες).
- ❑ **Διατήρηση από κοινού συναρτήσεων κατανομής:** Αναπαραγωγή αυτοσυσχετίσεων 1^{ης} τάξης και ετεροσυσχετίσεων μηδενικής τάξης (σε όλες τις κλίμακες).
- ❑ **Αναπαραγωγή δυναμικής Hurst-Kolmogorov:** Αναπαραγωγή φαινομένων εμμονής ή ομοιοθετικής συμπεριφοράς, που σχετίζονται με την υδροκλιματική μεταβλητότητα και την εμφάνιση ξηρασιών στην ετήσια και υπερετήσια κλίμακα – εξαιρετικά κρίσιμη για τη ορθή αποτίμηση της υδρολογικής αβεβαιότητας.
- ❑ **Αναπαραγωγή περιοδικότητας:** Αναπαραγωγή διαφορετικών στατιστικών χαρακτηριστικών ανά μήνα (αφορά στη μηνιαία και ημερήσια κλίμακα)
- ❑ **Αναπαραγωγή διαλείπουσας συμπεριφοράς:** Αφορά στις ημερήσιες διεργασίες, που χαρακτηρίζονται από μεγάλο ποσοστό μηδενικών τιμών
- ❑ **Λειτουργία υπό μορφή πρόγνωσης:** Γέννηση χρονοσειρών στατιστικά εξαρτημένων από τις παρελθούσες τιμές (για καταληκτική προσομοίωση).

Η έννοια της δυναμικής Hurst-Kolmogorov

- Τα ιστορικά δείγματα εμφανίζουν μη ομαλές συμπεριφορές, όπως διακυμάνσεις σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες και τάσεις, που δεν μπορούν να αναπαραχθούν από βραχείας μνήμης σχήματα, π.χ. μοντέλα τύπου ARMA.
- Τυπικές εκφορές αυτής της συμπεριφοράς είναι οι έμμονες ξηρασίες και η κλιματική μεταβλητότητα.
- Η δυναμική Hurst-Kolmogorov μπορεί εύκολα να ερμηνευτεί μέσω της διασποράς και της αυτοσυσχέτισης της στοχαστικής ανέλιξης.



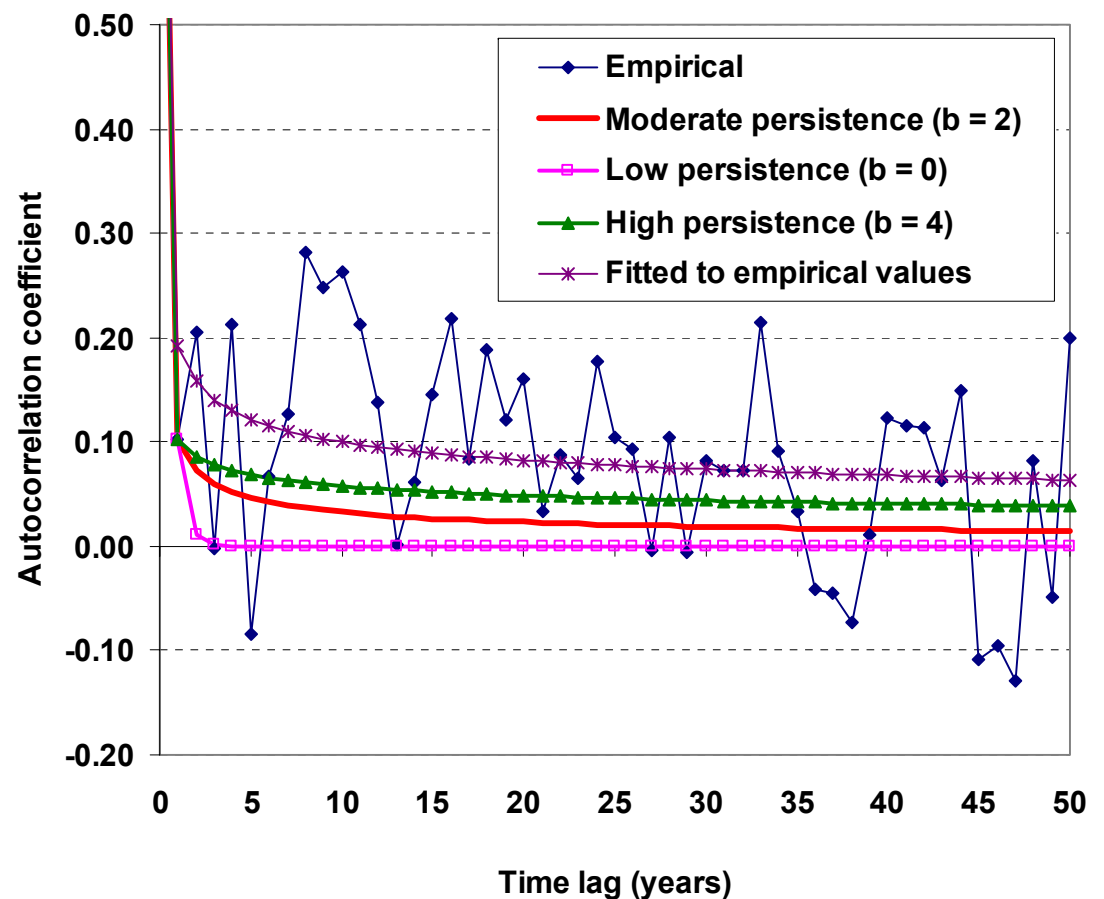
Μεθοδολογία 1: Αναπαραγωγή δυναμικής Hurst-Kolmogorov (υδρολογική εμμονή)

- Εισάγεται η θεωρητική συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς:

$$\gamma_j = \gamma_0 (1 + \kappa \beta j)^{-1/\beta}$$

όπου γ_0 η διασπορά, κ παράμετρος κλίμακας και β παράμετρος σχήματος, η οποία σχετίζεται με τον συντελεστή Hurst, ήτοι την εμμονή της ανέλιξης.

- Για $\beta = 0$, η στοχαστική ανέλιξη είναι τύπου ARMA, για $\beta > 0$ η «μνήμη» της ανέλιξης αυξάνει (προκύπτει αυτοσυσχετόγραμμα μακράς ουράς).
- Οι παράμετροι κ, β μπορούν να εκτιμηθούν με προσαρμογή των θεωρητικών γ_j στο εμπειρικό (δειγματικό) αυτοσυσχετόγραμμα.
- Συστήνεται η εφαρμογή παραμέτρου $\beta \geq 2$, καθώς οι δειγματικές εκτιμήσεις των συντελεστών αυτοσυσχέτισης είναι ιδιαίτερα επισφαλείς (μη επαρκή δείγματα).



Μεθοδολογία 2: Γέννηση ετήσιων συνθετικών χρονοσειρών για δεδομένη δομή αυτοσυσχέτισης

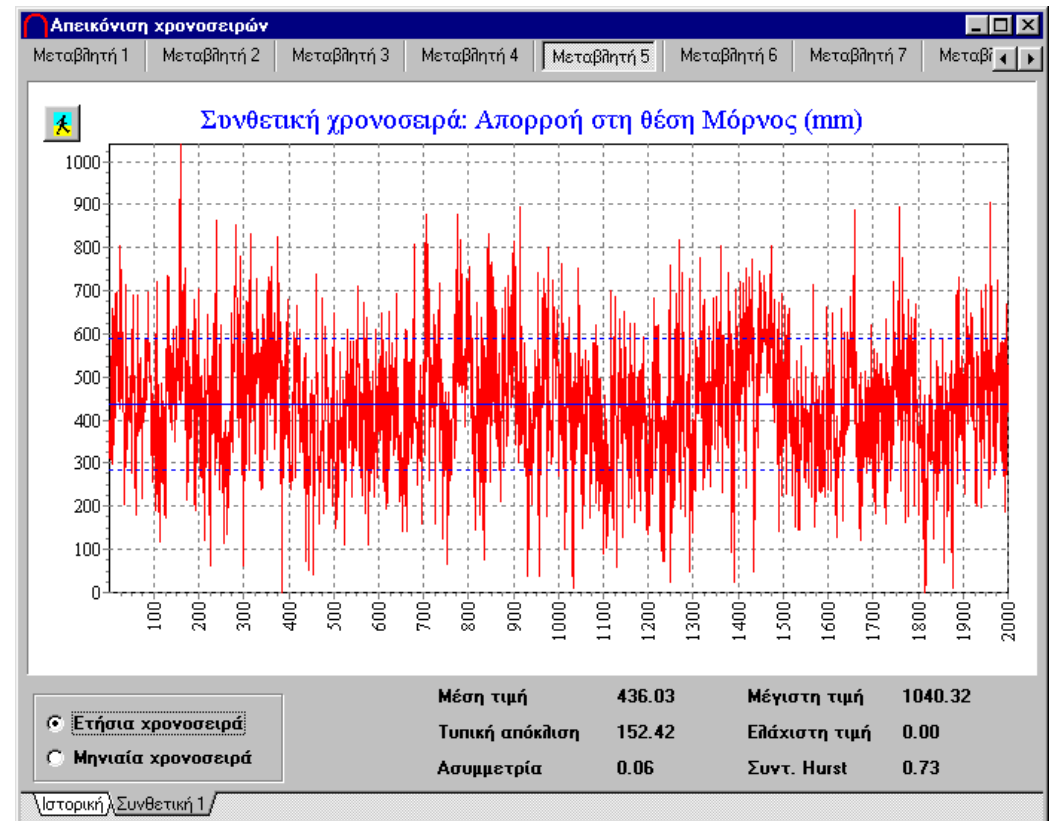
- Εφαρμόζεται ένα σχήμα γέννησης κινούμενων μέσων όρων (SMA):

$$Z_i = \dots + a_1 V_{i-1} + a_0 V_i + a_1 V_{i+1} + \dots$$

- όπου a_i παράμετροι και V_i μεταβλητές ανανέωσης.
- Οι συντελεστές στάθμισης a_i εκτιμώνται αναλυτικά, συναρτήσει των θεωρητικών αυτόσυνδιασπορών γ_j (μέσω φάσματος Fourier).

Γενίκευση σχήματος γέννησης για πολυμεταβλητή προσομοίωση

- Παράγονται διανύσματα των V_i με τη μορφή συσχετισμένου λευκού θορύβου, $V = \mathbf{b} W$, όπου \mathbf{b} μητρώο παραμέτρων που αναπαράγει τις συνδιασπορές (διασπορές και ετεροσυσχετίσεις) των ετήσιων δειγμάτων και W διάνυσμα τυχαίων μεταβλητών που αναπαράγει τις μέσες τιμές και ασυμμετρίες.
- Η εκτίμηση του μητρώου \mathbf{b} γίνεται μόνο αριθμητικά.



Μεθοδολογία 3: Γέννηση «βοηθητικών» μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών

- Εισάγεται ένα πολυμεταβλητό περιοδικό σχήμα PAR(1) της μορφής:

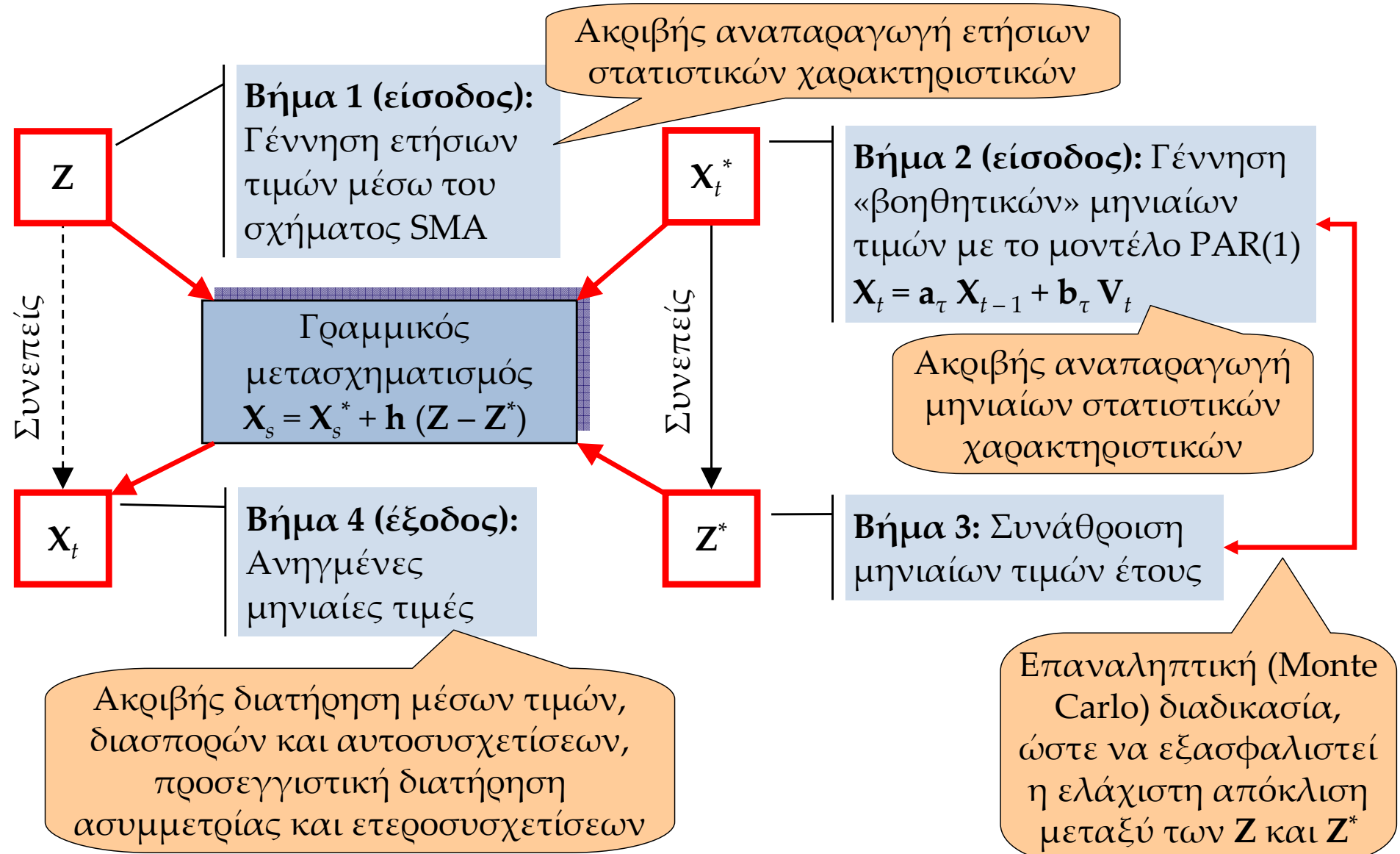
$$\mathbf{X}_t = \mathbf{a}_\tau \mathbf{X}_{t-1} + \mathbf{b}_\tau \mathbf{V}_t$$

όπου \mathbf{a}_τ , \mathbf{b}_τ μητρώα παραμέτρων (διαφορετικά για κάθε μήνα τ) που αναπαράγουν τις αυτοσυνδιασπορές πρώτης τάξης και τις συνδιασπορές, μηδενικής τάξης, αντίστοιχα, και \mathbf{V} διάνυσμα τυχαίων μεταβλητών που αναπαράγει τις δειγματικές μέσες τιμές και ασυμμετρίες κάθε μήνα.

- Για απλούστευση των υπολογισμών, το μητρώο \mathbf{a}_τ είναι διαγώνιο, οπότε αναπαράγει μόνο τις αυτοσυσχετίσεις πρώτης τάξης – η αναπαραγωγή των ετεροσυσχετίσεων αφορά μόνο στο ίδιο χρονικό βήμα (μηδενική υστέρηση).
- Το μοντέλο PAR(1) εφαρμόζεται έτος προς έτος για τη γέννηση των 12 μηνιαίων τιμών του αντίστοιχου έτους, $\mathbf{X}^* = (X_1^*, \dots, X_{12}^*)$.
- Επειδή η γέννηση των μηνιαίων τιμών γίνεται χωρίς αναφορά στις ετήσιες (οι οποίες παράγονται με το μοντέλο SMA), δεν υπάρχει συνέπεια μεταξύ της δεδομένης ετήσιας τιμής Z_i και του ετήσιου αθροίσματος των \mathbf{X}_t^* , ήτοι:

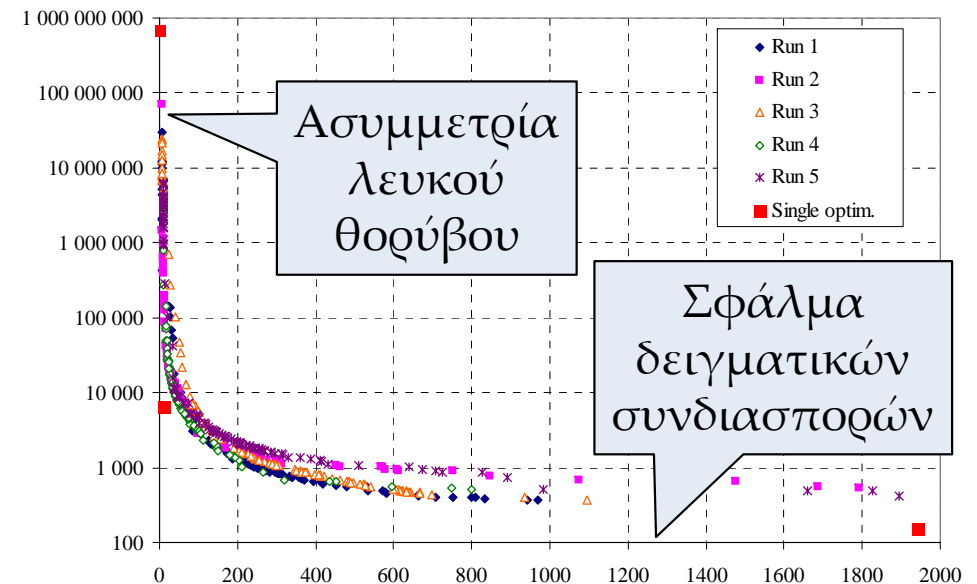
$$Z_i \neq Z^* = X_1^* + X_1^* + \dots + X_{12}^*$$

Μεθοδολογία 4: Αποκατάσταση συνέπειας συνθετικών μηνιαίων τιμών μέσω επιμερισμού



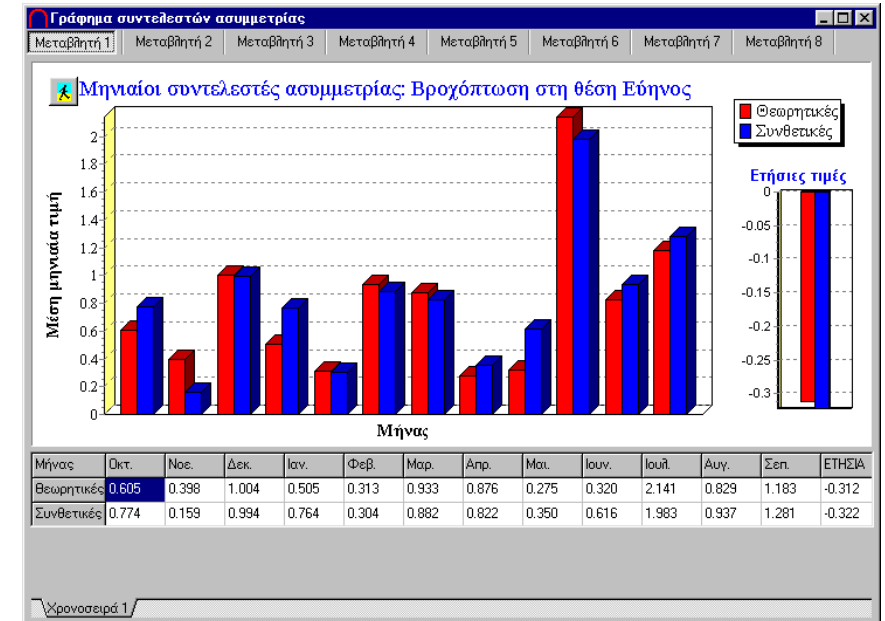
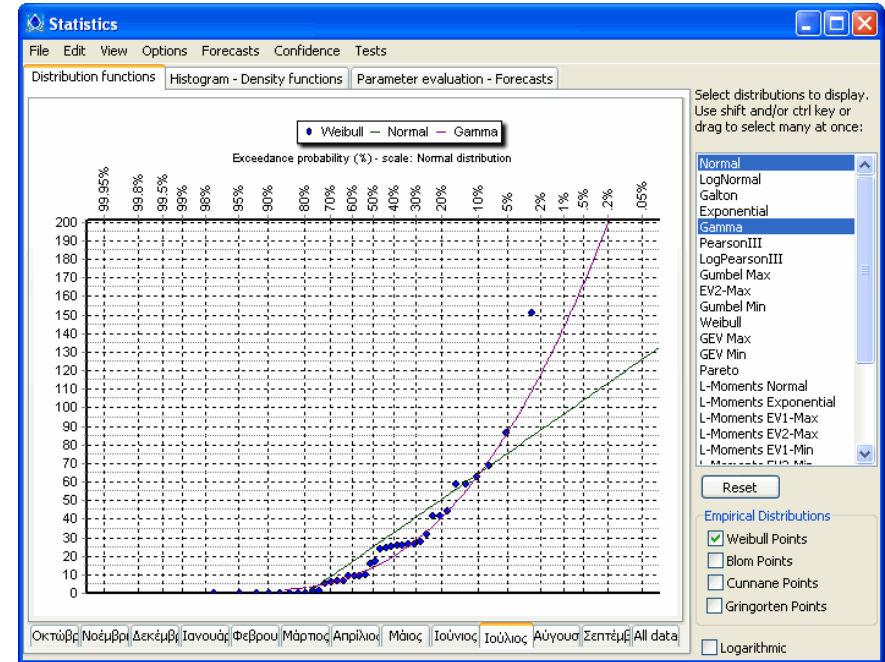
Μεθοδολογία 5: Αποσύνθεση μητρώων συνδιασπορών μέσω βελτιστοποίησης

- Στην ταυτόχρονη προσομοίωση n στοχαστικών ανεξίτηλων, η διατήρηση των χωρικών συσχετίσεων επιτυγχάνεται με την παραγωγή συσχετισμένου λευκού θορύβου της μορφής $\xi(t) = \mathbf{b} \mathbf{V}(t)$, όπου \mathbf{b} $n \times n$ μητρώο παραμέτρων και \mathbf{V} n -διάστατο διάνυσμα που αναπαράγει τις ροπές των ανεξίτηλων.
- Το \mathbf{b} υπολογίζεται από μια μητρωική εξίσωση της μορφής $\mathbf{c} = \mathbf{b} \mathbf{b}^T$, όπου \mathbf{c} μητρώο συνδιασπορών (περιέχει τις διασπορές και ετεροσυσχετίσεις).
- Αν το \mathbf{c} είναι θετικά ορισμένο, η εξίσωση έχει άπειρες λύσεις, αλλιώς δεν έχει λύση (μη θετικά ορισμένο \mathbf{b} προκύπτει από δείγματα διαφορετικού μήκους).
- Η ασυμμετρία των \mathbf{V} είναι συνάρτηση του \mathbf{b} , δηλαδή $\mu_3[\mathbf{V}] = \xi(\mathbf{b})$ – αν η τιμή κάποιου στοιχείου του ξ είναι πολύ υψηλή, δεν είναι δυνατή η παραγωγή τυχαίων αριθμών από κατανομή με τόσο υψηλή ασυμμετρία.
- Η εκτίμηση του \mathbf{b} διατυπώνεται ως πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης τριών κριτηρίων, ήτοι: (α) διατήρηση διασπορών, (β) διατήρηση ετεροσυσχετίσεων, και (γ) ελαχιστοποίηση ασυμμετρίας λευκού θορύβου



Μεθοδολογία 6: Αναπαραγωγή ασυμμετρίας

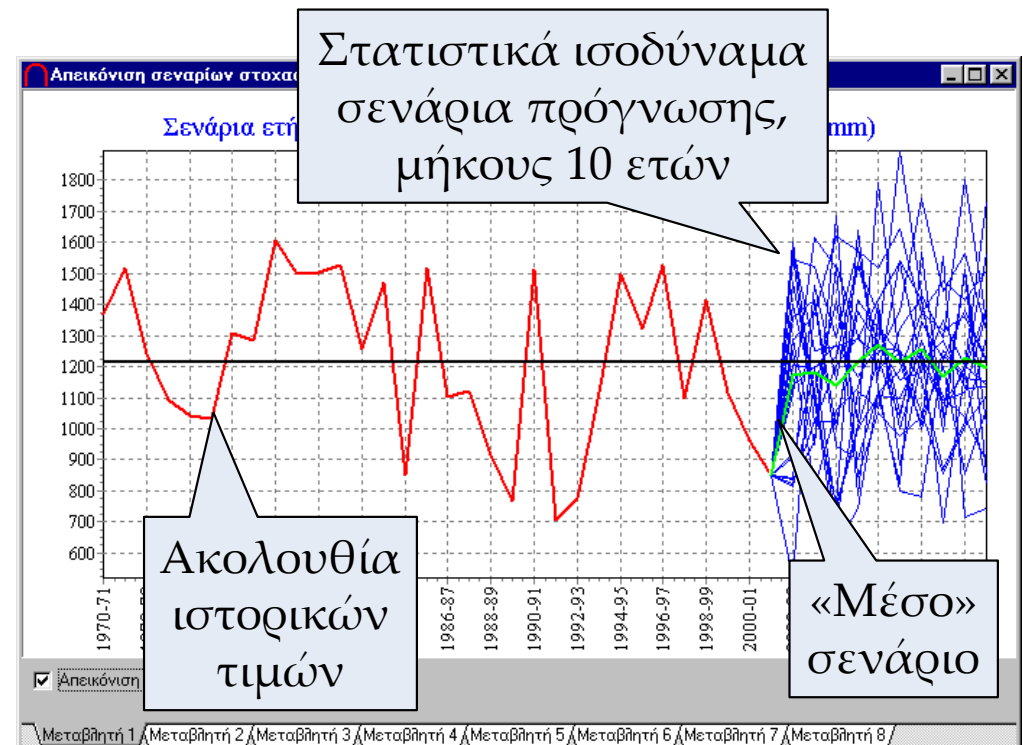
- Τα υδρολογικά δείγματα εμφανίζουν υψηλές τιμές ασυμμετρίας, ειδικά τους θερινούς μήνες.
- Η αναπαραγωγή της ασυμμετρίας γίνεται μέσω του λευκού θορύβου, που υλοποιείται με τη γέννηση τυχαίων αριθμών που ακολουθούν κατανομή γάμα τριών παραμέτρων (Pearson III)
- Η κατανομή χρησιμοποιεί τρεις παραμέτρους (θέσης, σχήματος, κλίμακας), ενώ για μεγάλες τιμές της παραμέτρου σχήματος ταυτίζεται με την κανονική.
- Η αναπαραγωγή των ασυμμετριών εξασφαλίζεται αρχικά μέσω της διαδικασίας εκτίμησης του μητρώου \mathbf{b} (σε μηνιαία και ετήσια κλίμακα), και εν συνεχεία μέσω της διαδικασίας επιμερισμού, στη μηνιαία κλίμακα.



Μεθοδολογία 7: Γέννηση χρονοσειρών υπό μορφή στοχαστικής πρόγνωσης

- Παράγονται οι μελλοντικές ετήσιες χρονοσειρές, χωρίς αναφορά στις γνωστές τρέχουσες και παρελθούσες τιμές των μεταβλητών.
- Εφαρμόζεται ένας γραμμικός μετασχηματισμός στις ετήσιες τιμές, που αποκαθιστά τη συνέπεια με την ακολουθία των ιστορικών δειγμάτων (ο μετασχηματισμός διατηρεί εξ ορισμού τις μέσες τιμές και συνδιασπορές).
- Η διαδικασία εφαρμόζεται επαναληπτικά (Monte Carlo), ώστε να διατηρηθούν και τα υπόλοιπα στατιστικά χαρακτηριστικά στην ετήσια κλίμακα.
- Οι ανηγμένες ετήσιες χρονοσειρές εισάγονται στη διαδικασία επιμερισμού, για τη γέννηση των μηνιαίων χρονοσειρών.

Το σχήμα αυτό βρίσκει εφαρμογή σε προβλήματα **καταληκτικής προσομοίωσης**, στις οποίες, λόγω του μικρού χρονικού ορίζοντα της προσομοίωσης, υπάρχει σημαντική εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες



Περισσότερες πληροφορίες – Βιβλιογραφία

- Ευστρατιάδης, Α., και Δ. Κουτσογιάννης, Κασταλία (έκδοση 2.0) - Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 23, 103 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – ΕΜΠ, Αθήνα, Ιανουάριος 2004.
- Dialynas, Y., S. Kozanis, and D. Koutsoyiannis, A computer system for the stochastic disaggregation of monthly into daily hydrological time series as part of a three-level multivariate scheme, *European Geosciences Union General Assembly 2011, Geophysical Research Abstracts, Vol. 13*, Vienna, EGU2011-290, European Geosciences Union, 2011.
- Efstratiadis, A., Y. G. Dialynas, S. Kozanis, and D. Koutsoyiannis, Castalia: A multivariate stochastic model for the generation of synthetic time series at multiple time scales, *Environmental Modelling and Software*, 2014 (submitted).
- Koutsoyiannis, D., and A. Manetas, Simple disaggregation by accurate adjusting procedures, *Water Resources Research*, 32(7), 2105-2117, 1996.
- Koutsoyiannis, D., Optimal decomposition of covariance matrices for multivariate stochastic models in hydrology, *Water Resources Research*, 35(4), 1219-1229, 1999.
- Koutsoyiannis, D., A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series, *Water Resources Research*, 36(6), 1519-1533, 2000.
- Koutsoyiannis, D., Coupling stochastic models of different time scales, *Water Resources Research*, 37(2), 379-392, 2001.
- Koutsoyiannis, D., Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics, *Hydrological Sciences Journal*, 48 (1), 3–24, 2003.
- Koutsoyiannis, D., Hurst-Kolmogorov dynamics and uncertainty, *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3), 481–495, 2011.
- Koutsoyiannis, D., C. Onof, and H. S. Wheater, Multivariate rainfall disaggregation at a fine timescale, *Water Resources Research*, 39 (7), 1173, doi:10.1029/2002WR001600, 2003.
- Koutsoyiannis, D., G. Karavokiros, A. Efstratiadis, N. Mamassis, A. Koukouvinos, and A. Christofides, A decision support system for the management of the water resource system of Athens, *Physics & Chemistry of the Earth*, 28(14-15), 599-609, 2003.
- Tsekouras, G., and D. Koutsoyiannis, Stochastic analysis and simulation of hydrometeorological processes associated with wind and solar energy, *Renewable Energy*, 63, 624–633, 2014.
- Venediki, A., S. Giannoulis, C. Ioannou, L. Malatesta, G. Theodoropoulos, G. Tsekouras, Y. Dialynas, S.M. Papalexiou, A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, The Castalia stochastic generator and its applications to multivariate disaggregation of hydro-meteorological processes, *European Geosciences Union General Assembly 2013, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15*, Vienna, EGU2013-11542, European Geosciences Union, 2013.