



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: “Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΒΕΛΟΥΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΣΤΗΝ ΑΠΟΡΡΟΗ ΚΑΙ ΣΤΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ”

ΒΑΒΟΥΛΟΓΙΑΝΝΗΣ ΣΤΕΛΙΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο:

- η μελέτη της επίδρασης του βέλους του χρόνου στην απορροή και στη στοχαστική της μοντελοποίηση.

Στόχοι:

- Παρουσίαση μέρους του επιστημονικού πλαισίου που αποτελεί τη βάση της πρόσφατης μελέτης αλλά και της παρούσας διπλωματικής
- Χρησιμοποίηση πραγματικών χρονοσειρών απορροής απο μεγάλη βάση δεδομένων για τη διερεύνηση της αντιστρεψιμότητας
- Τροποποίηση της υπάρχουσας μεθόδου
- Επαλήθευση της τροποποίησης της μεθόδου με φυσικά δεδομένα.

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

Το **κλιμακόγραμμα** ορίζεται ως η διασπορά του συναθροισμένου μέσου της διεργασίας $\underline{x}(t)$ σε κλιμακα συνάθροισης k και συμβολίζεται $\gamma(k)$. Η συναθροισμένη διεργασία:

$$\underline{x}_i^{(k)} := \frac{1}{k} \sum_{l=(i-1)k+1}^{ik} \underline{x}_l$$

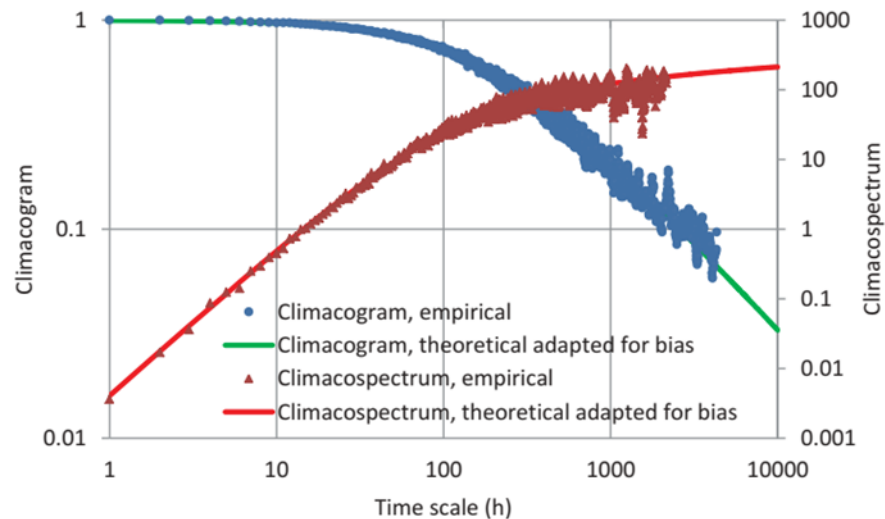
Το **φάσμα ισχύος** της στοχαστικής ανέλιξης σε διακριτο χρόνο $t = 0, 1, \dots$, με συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς γ_m δίνεται από:

$$s(\omega) = 2\gamma_0 + 4 \sum_{m=1}^{\infty} \gamma_m \cos(2\pi m\omega)$$

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

Το **κλιμακοφάσμα** ορίζεται ως:

$$\zeta(k) := \frac{k(\gamma(k) - \gamma(2k))}{\ln 2}$$

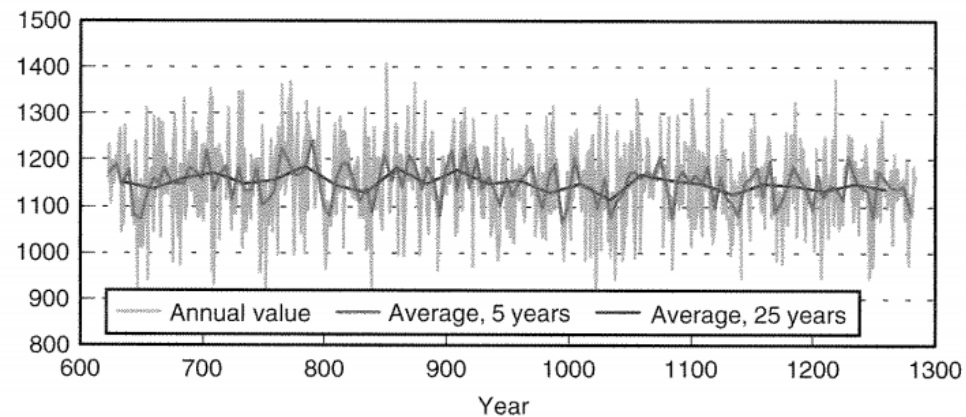
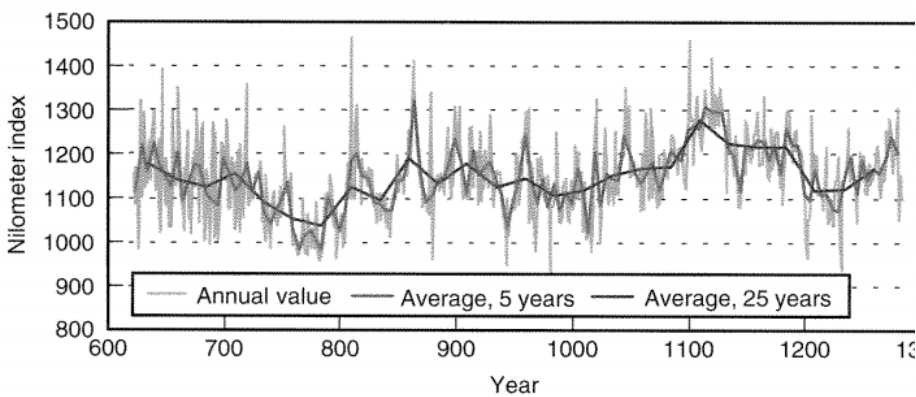


Κουτσογιάννης (2019)

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HURST ΣΤΙΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Μακροπρόθεσμη χρονική εξάρτηση:

“Μικρές αλλά αργά φθίνουσες συσχετίσεις σε μια στοχαστική ανελιξη. Τέτοιες συσχετίσεις συχνά δεν ανιχνεύονται με τυποποιημένα στατιστικά τεστ, αλλά το αποτέλεσμα τους μπορεί να είναι αρκετά σημαντικό. (Everitt και Skrondal, 2010)”



Κουτσογιάννης, 2002

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HURST ΣΤΙΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Στοχαστική απεικόνιση:

- Ανέλιξεις **Markov** π.χ. AR(1)

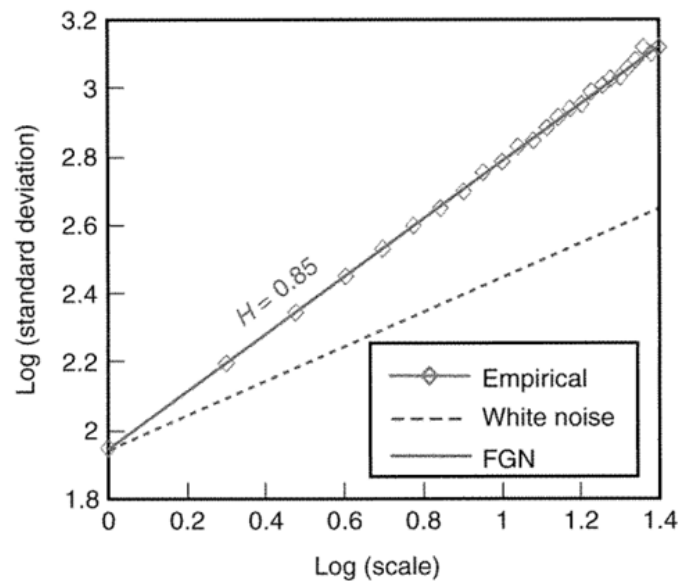
Η ουδετερότητα της όσον αφορά την ομαλότητα και την εμμονή ή πιο συγκεκριμένα η μικρή παραγωγή εντροπίας στις μεγάλες χρονικές κλίμακες τη χρήζουν πολλές φορές ακατάλληλη για να προσομοιώσει φυσικές διεργασίες.

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HURST ΣΤΙΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Στοχαστική απεικόνιση:

- Μοντέλο **Hurst-Kolmogorov**

$$\left(Z_i^{(k)} - k\mu \right) = \left(\frac{k}{l} \right)^H \left(Z_j^{(l)} - l\mu \right)$$



(Κουτσογιάννης, 2004)

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HURST ΣΤΙΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Στοχαστική απεικόνιση:

- Μοντελο **Filtered Hurst Kolmogorov**

$$\gamma(\Delta) = \lambda \left(1 + \left(\frac{\Delta}{\alpha} \right)^{2M} \right)^{\frac{H-1}{M}}$$

Η παράμετρος H καθορίζει τις καθολικές ιδιότητες ενώ η παράμετρος M τις τοπικές.

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HURST ΣΤΙΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

Αλγόριθμος αναπαραγωγής: **Symmetric Moving Average (SMA)**

$$X_t = \sum_{j=-q}^q a_{|j|} V_{i+j} = a_q V_{i-q} + \dots + a_1 V_{i-1} + a_0 V_i + a_1 V_{i+1} + \dots + a_q V_{i+q}$$

$$a_0 = \frac{\sqrt{(2 - 2H)\gamma_0}}{1.5 - H}$$

$$a_j \approx \frac{a_0}{2} [(j + 1)^{H+0.5} + (j - 1)^{H+0.5} - 2j^{H+0.5}]$$

ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Ο όρος «**βέλος του χρόνου**» αναπτύχθηκε αρχικά από τον Eddington (1928) για να περιγράψει την κατεύθυνση χρόνου, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί με τη μελέτη της οργάνωσης ατόμων, μορίων και σωμάτων.

Τα δύο ήδη διεργασιών που είναι μη αναστρέψιμες:

- Αυτές που καταστρέφουν πληροφορία και παράγουν χάος
- Αυτές που παράγουν πληροφορία



ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Ο Weiss (1975) ορίζει μία στοχαστική ανέλιξη $\underline{x}(t)$, σε συνεχή χρόνο t , με πιστής τάξης συνάρτηση κατανομής.

$$F(x_1, x_1, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) := P\{\underline{x}(t_1) \leq x_1, \underline{x}(t_2) \leq x_2, \dots, \underline{x}(t_n) \leq x_n\}$$

ως συμμετρική στο χρόνο αν η κοινή κατανομή δεν αλλάζει μετά απο αντιστροφή του χρόνου γύρω απο την αρχή των αξόνων, δηλαδή αν για κάθε $n, t_1; t_2; \dots; t_{n-1}; t_n$,

$$F(x_1, x_1, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = F(x_1, x_1, \dots, x_n; -t_1, -t_2, \dots, -t_n)$$

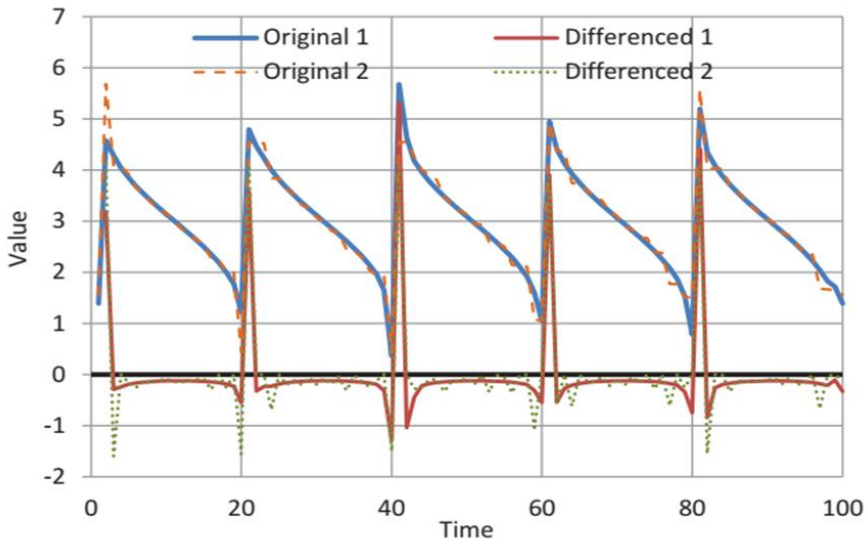
ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

$$\text{Χρονική ασυμμετρία} \rightarrow \frac{\tilde{C}_S}{C_S}$$

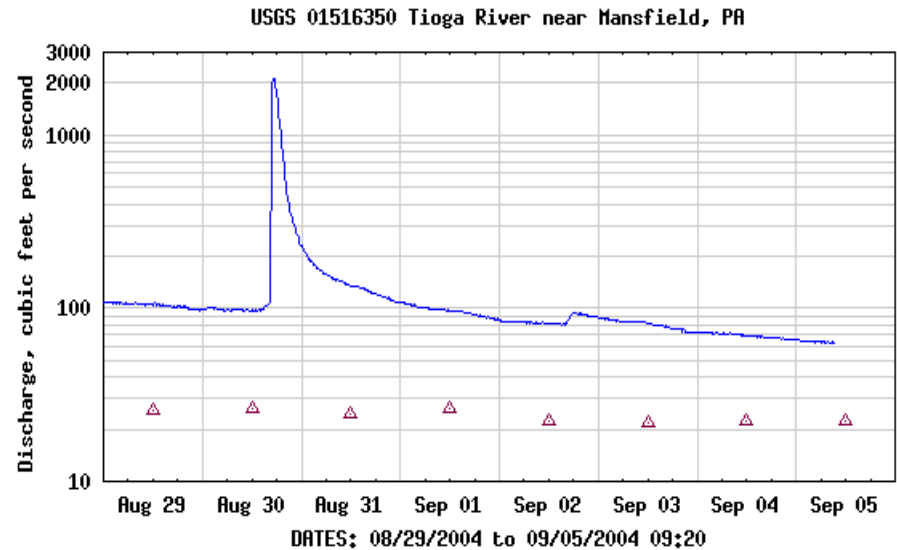
όπου \tilde{C}_S , ο συντελεστής ασυμμετρίας της διαφοροποιημένης χρονοσειράς.

και C_S , ο συντελεστής ασυμμετρίας της αρχικής χρονοσειράς.

ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ



Πηγή: Κουτσογιάννης, 2019



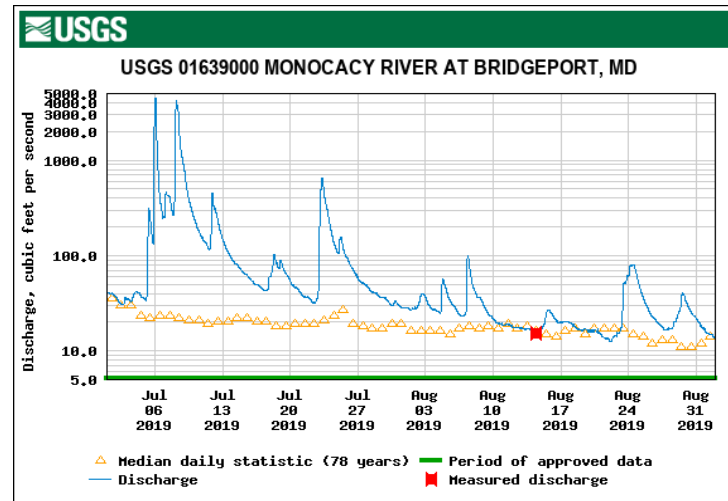
EXPLANATION

— DISCHARGE

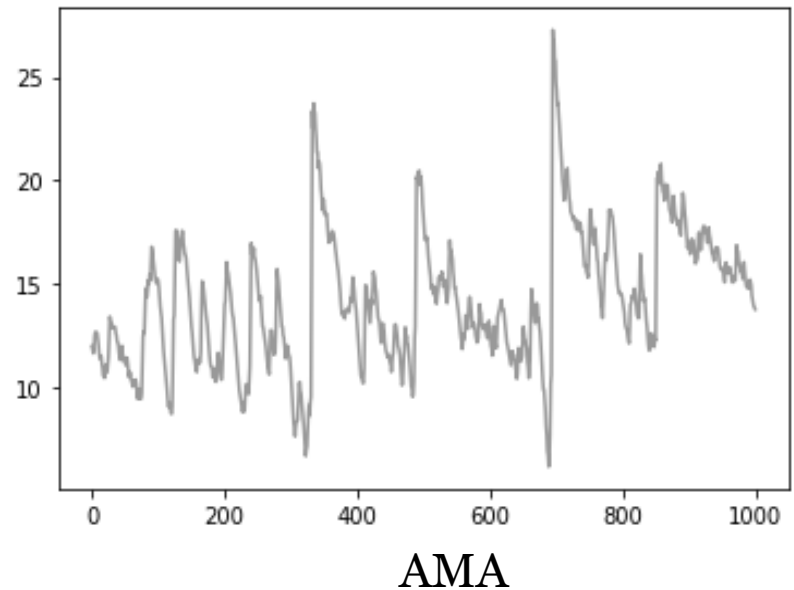
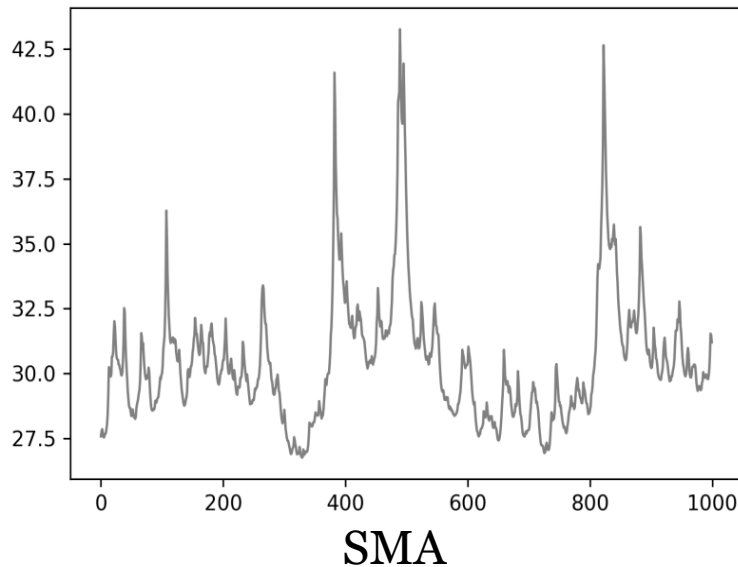
△ MEDIAN DAILY STREAMFLOW BASED ON 28 YEARS OF RECORD

Πηγή: (www.usgs.gov).

ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

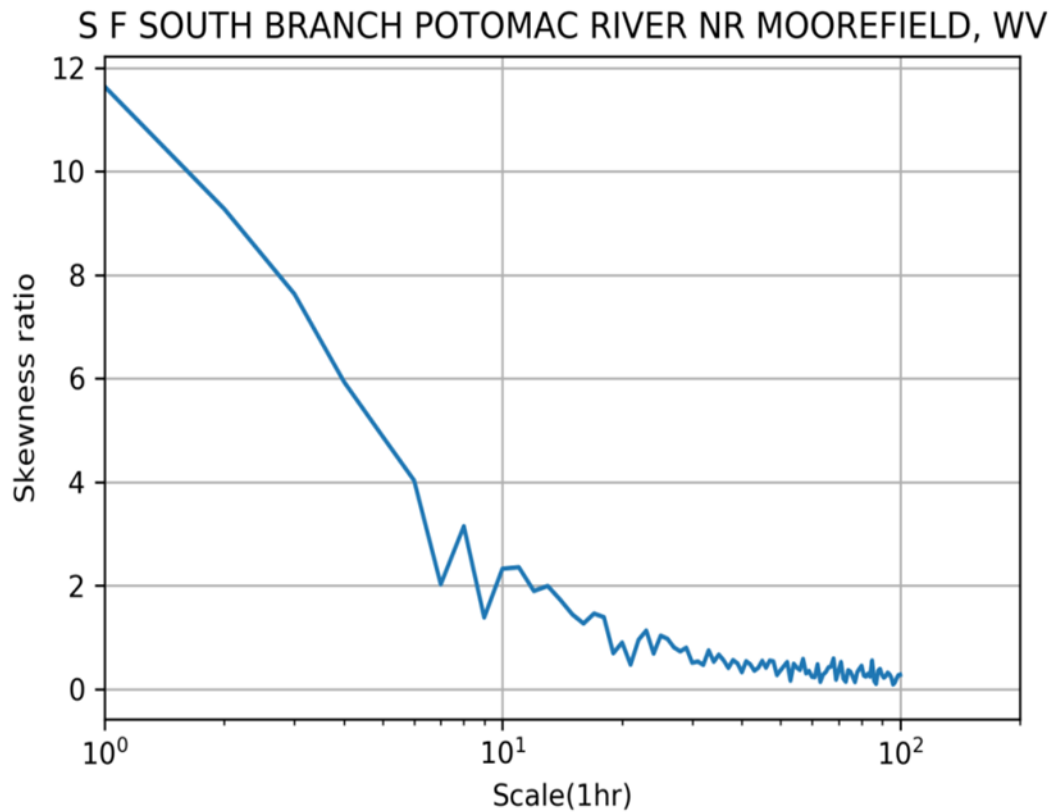


Πηγή: (www.usgs.gov).



ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Τεστ ασυμμετρίας: Διερεύνηση αντιστρεψιμότητας μέχρι την κλίμακα των 100 ωρών



ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Το μοντέλο ΑΜΑ μπορεί να γραφτεί:

$$\underline{x}_\tau = \sum_{i=-J}^J a_i \underline{v}_{\tau-i}$$

$$a_\eta = \int_{-1/2}^{1/2} e^{2\pi i(\theta(\omega) - \eta\omega)} A^R(\omega) d\omega$$

$$A^R(\omega) := \sqrt{2s_d(\omega)}$$

ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ (επέκταση του αλγορίθμου)

Υπολογισμός
ροπών στην
δεύτερη
κλίμακα

Υπολογισμός
εμπειρικών
ροπών

Βελτιστοποίηση
(άθροισμα
τετραγωνικού
σφάλματος)

Ορισμός
συνάρτησης
 $\theta(\omega)$

ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ(επέκταση του αλγορίθμου)

Οι ρολές δίνονται απο τους παρακάτω τύπους:

$$M_{orig.}^{(2) \quad (\kappa=2)} = \sum_{j=1}^{2q+1} \frac{(a_{2q+1-j} + a_{2q+2-j})^2}{4} + \frac{a_{2q+1}^2}{4}$$

$$M_{differ.}^{(2) \quad (\kappa=2)} = \sum_{j=1}^{2q+1} \left[+ \frac{(a_{2q-1-j} + a_{2q-j} - a_{2q+1-j} - a_{2q+2-j})^2}{4} \right] + \frac{(a_{2q} + a_{2q-1} - a_{2q+1})^2}{4} + \frac{(a_{2q} + a_{2q+1})^2}{4} + \frac{a_{2q+1}^2}{4}$$

$$M_{orig.}^{(3) \quad (\kappa=2)} = \sum_{j=1}^{2q+1} \frac{(a_{2q+1-j} + a_{2q+2-j})^3}{8} + \frac{a_{2q+1}^3}{8}$$

$$M_{differ.}^{(3) \quad (\kappa=2)} = \sum_{j=1}^{2q+1} \left[- \frac{(a_{2q-1-j} + a_{2q-j} - a_{2q+1-j} - a_{2q+2-j})^3}{8} \right] - \frac{(a_{2q} + a_{2q-1} - a_{2q+1})^3}{8} - \frac{(a_{2q} + a_{2q+1})^3}{8} - \frac{a_{2q+1}^3}{8}$$

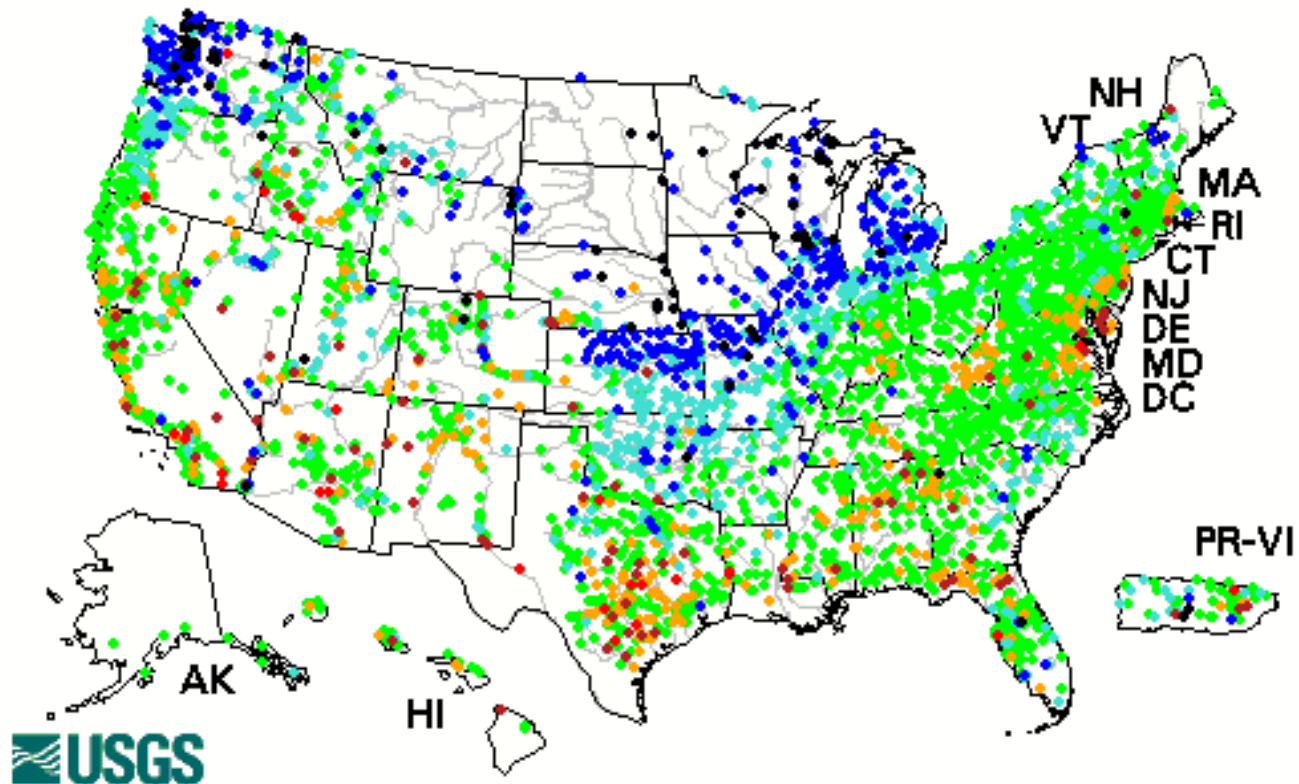
ΤΟ ΒΕΛΟΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ (επέκταση του αλγορίθμου)

Μετά τον υπολογισμό των ροπών δειγματος, τα υπολογιστικά εργαλεία πρέπει να εξισώσουν τις ροπες του δείγματος (πραγματική) και τις ακολουθίας (θεωρητική) έτσι ώστε να πληρούνται οι παράμετροι.

$$\theta(\omega) = \frac{1}{\zeta} \ln \left(e^{\zeta\theta_1(\omega)} + e^{\zeta\theta_2(1/2-\omega)} \right), \quad \theta_i(\omega) := \frac{C_{1,i}\omega}{C_{2,i} + \omega} + C_{0,i}$$

ΔΙΕΡΕΥΝΥΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗ ΒΑΣΗ USGS

Monday, February 03, 2020 07:30ET



Πηγή: USGS

ΔΙΕΡΕΥΝΥΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗ ΒΑΣΗ USGS

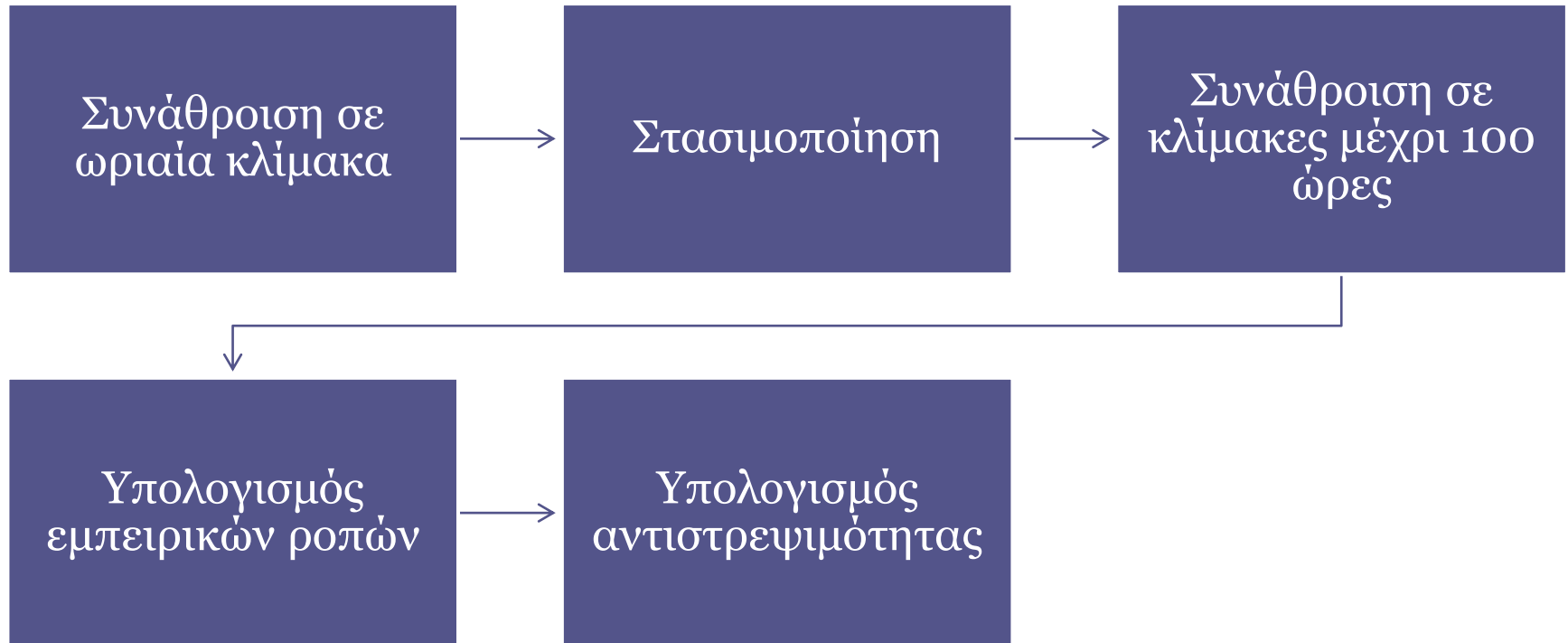
Στασιμοποίηση

12 παράμετροι για κάθε μήνα με
άθροισμα 1.

Βελτιστοποίηση ώστε να γίνει
ελάχιστη η διασπορά.

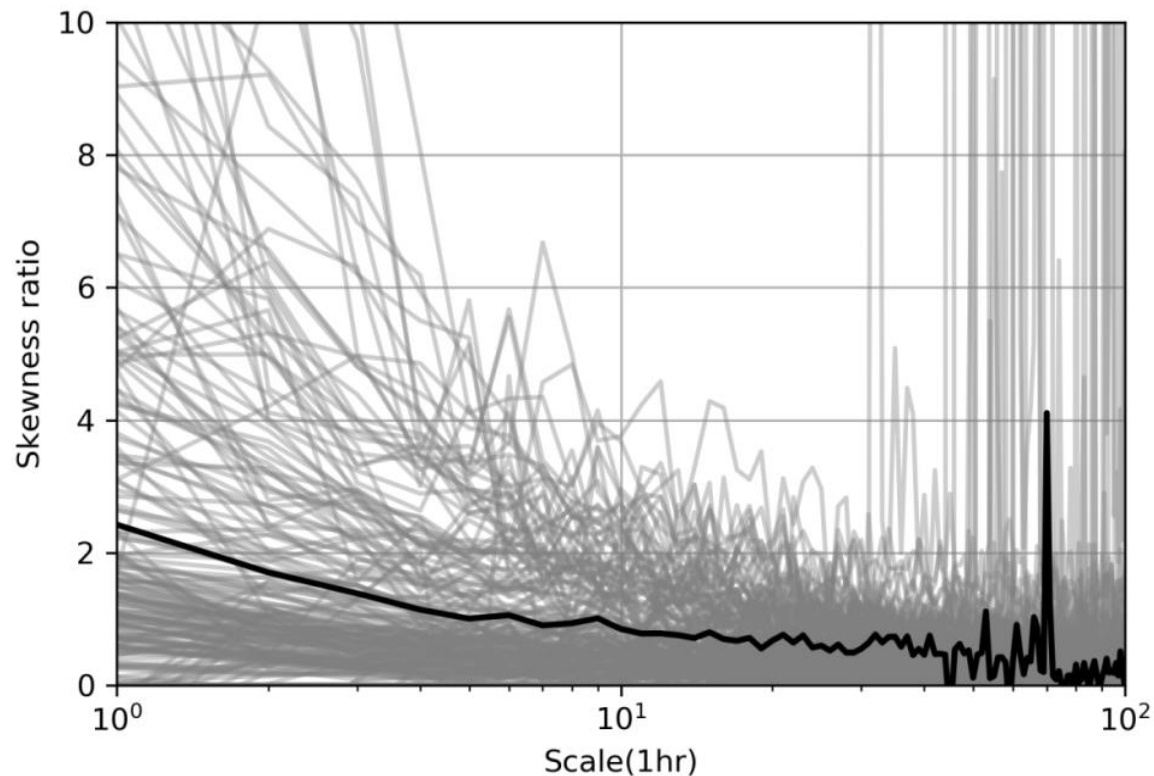
Εύρεση παραμέτρων.
Πολλαπλασιασμός ανά
μήνα.

ΔΙΕΡΕΥΝΥΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗ ΒΑΣΗ USGS



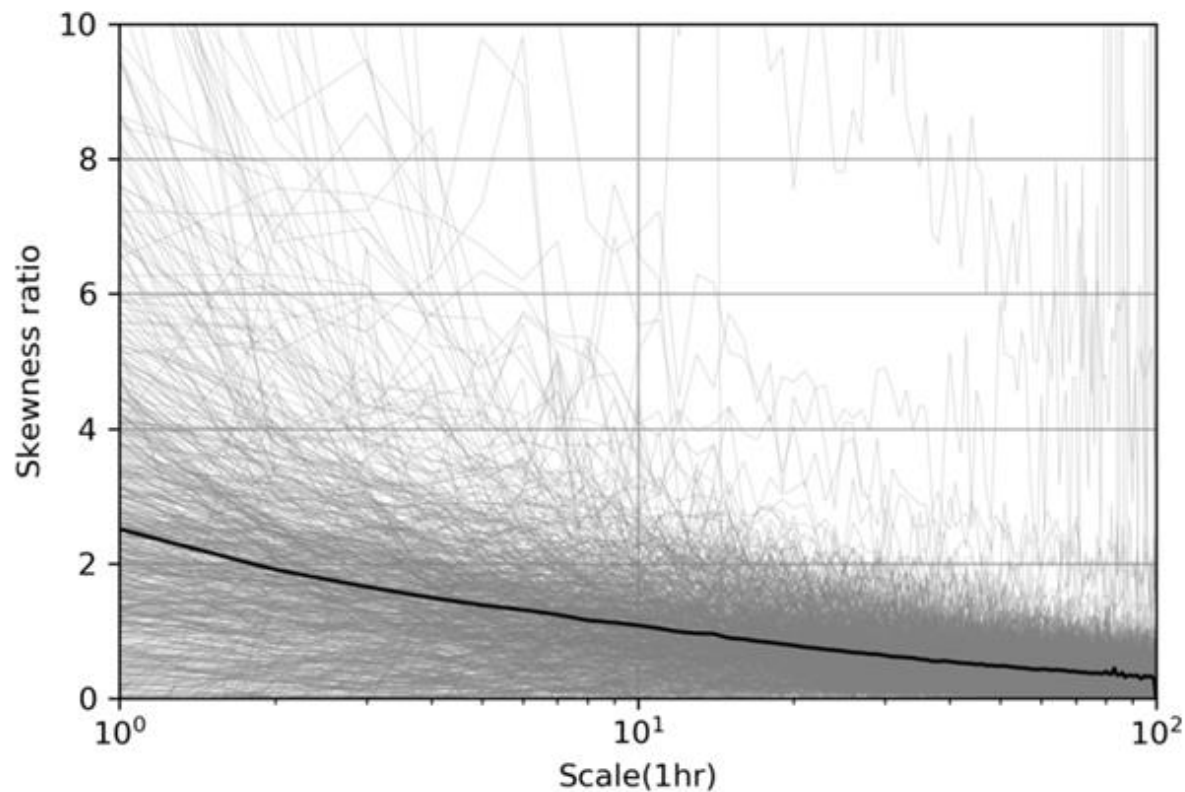
ΔΙΕΡΕΥΝΥΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗ ΒΑΣΗ USGS

Διερεύνηση αντιστρεψιμότητας στη πολιτεία του Maryland



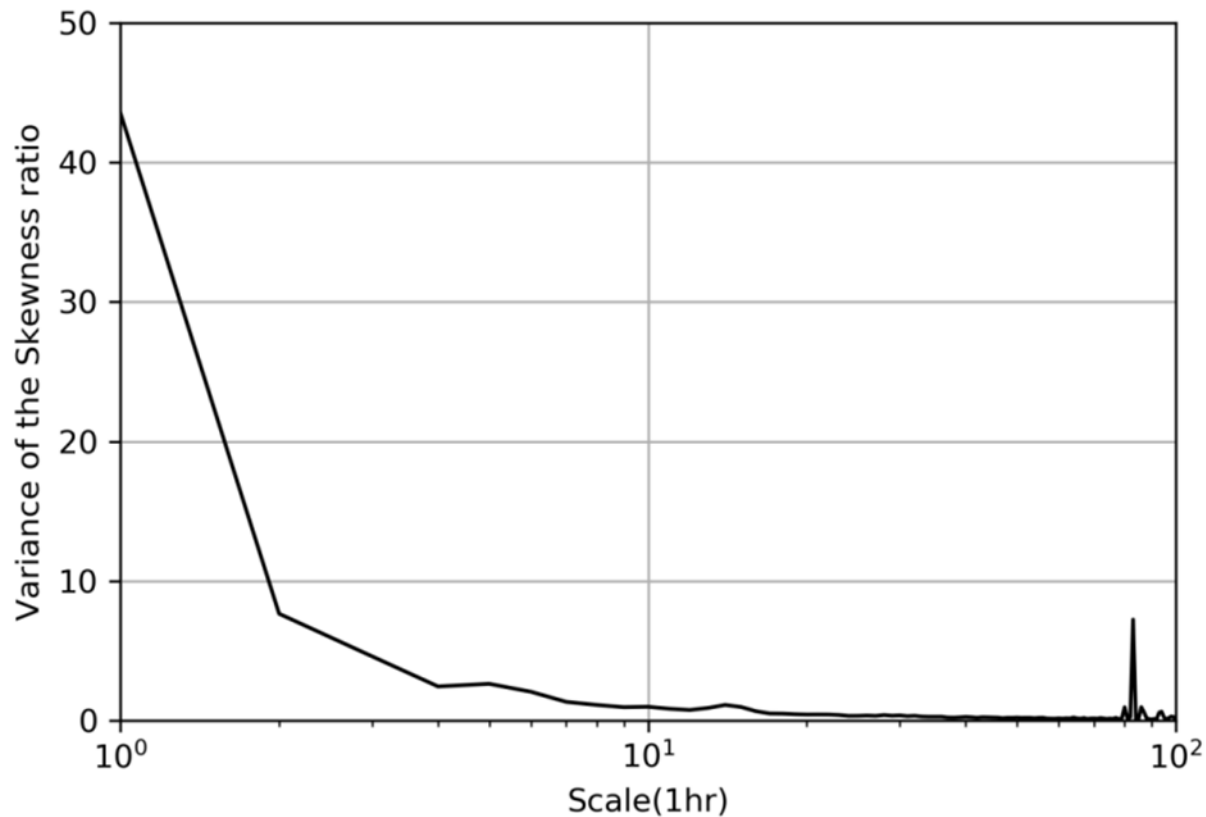
ΔΙΕΡΕΥΝΥΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗ ΒΑΣΗ USGS

Διερεύνηση αντιστρεψιμότητας σε 762 σταθμούς στις Η.Π.Α.



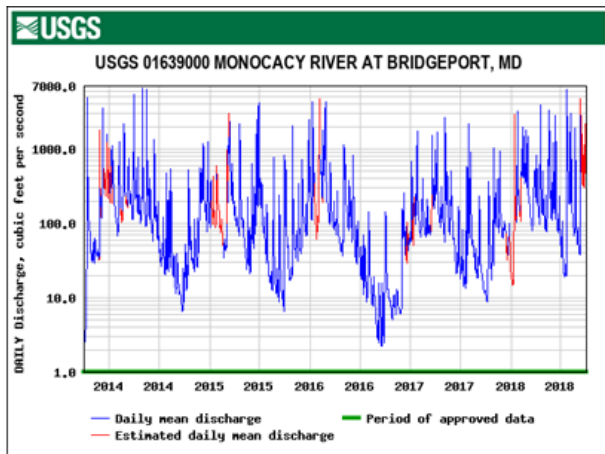
ΔΙΕΡΕΥΝΥΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗ ΒΑΣΗ USGS

Διερεύνηση αντιστρεψιμότητας σε 762 σταθμούς στις Η.Π.Α.

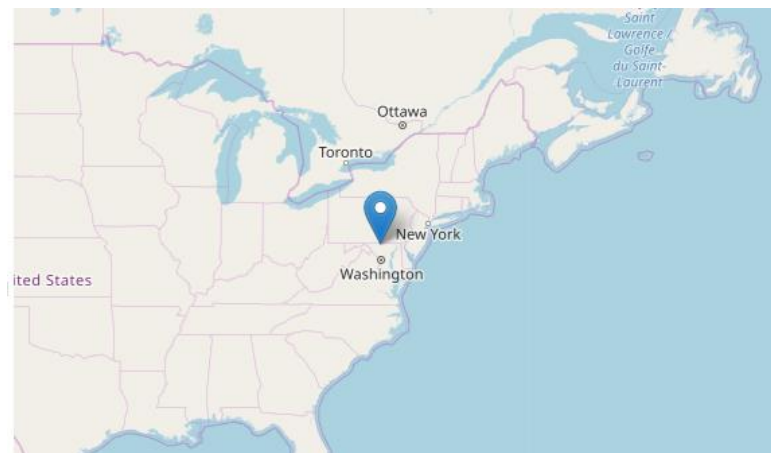


ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΟΤΑΜΟΣ ΜΟΝΟCΑCΥ

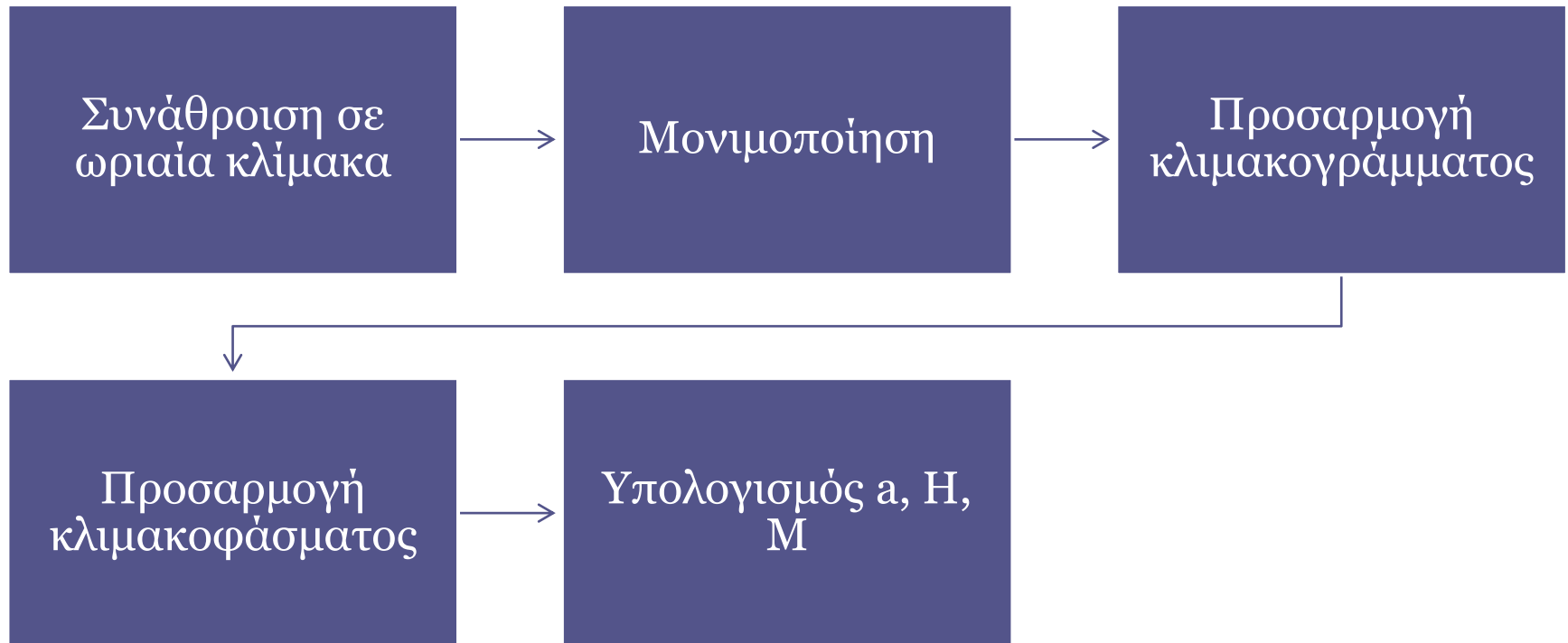
Σταθμός: ΜΟΝΟCΑCΥ RIVER AT BRIDGEPORT (39°40'44.6, 77°14'04.3).



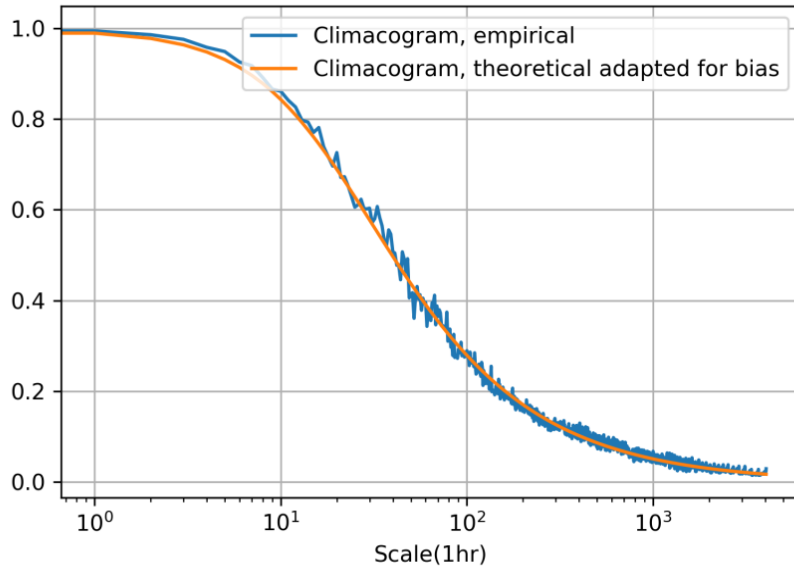
Πηγή: (www.usgs.gov).



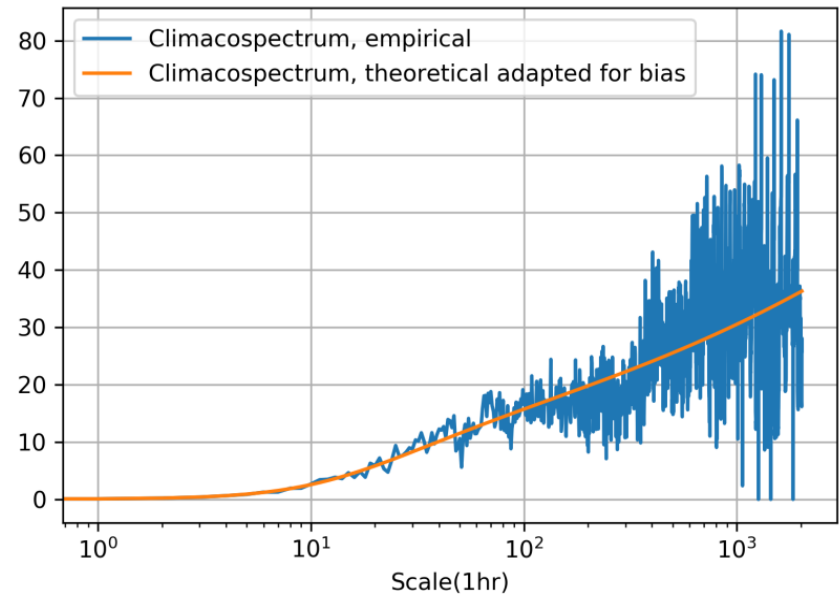
ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΟΤΑΜΟΣ ΜΟΝΟCASY



ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΟΤΑΜΟΣ ΜΟΝΟCASY



$$a = 19.399, H = 0.628, M = 0.724$$

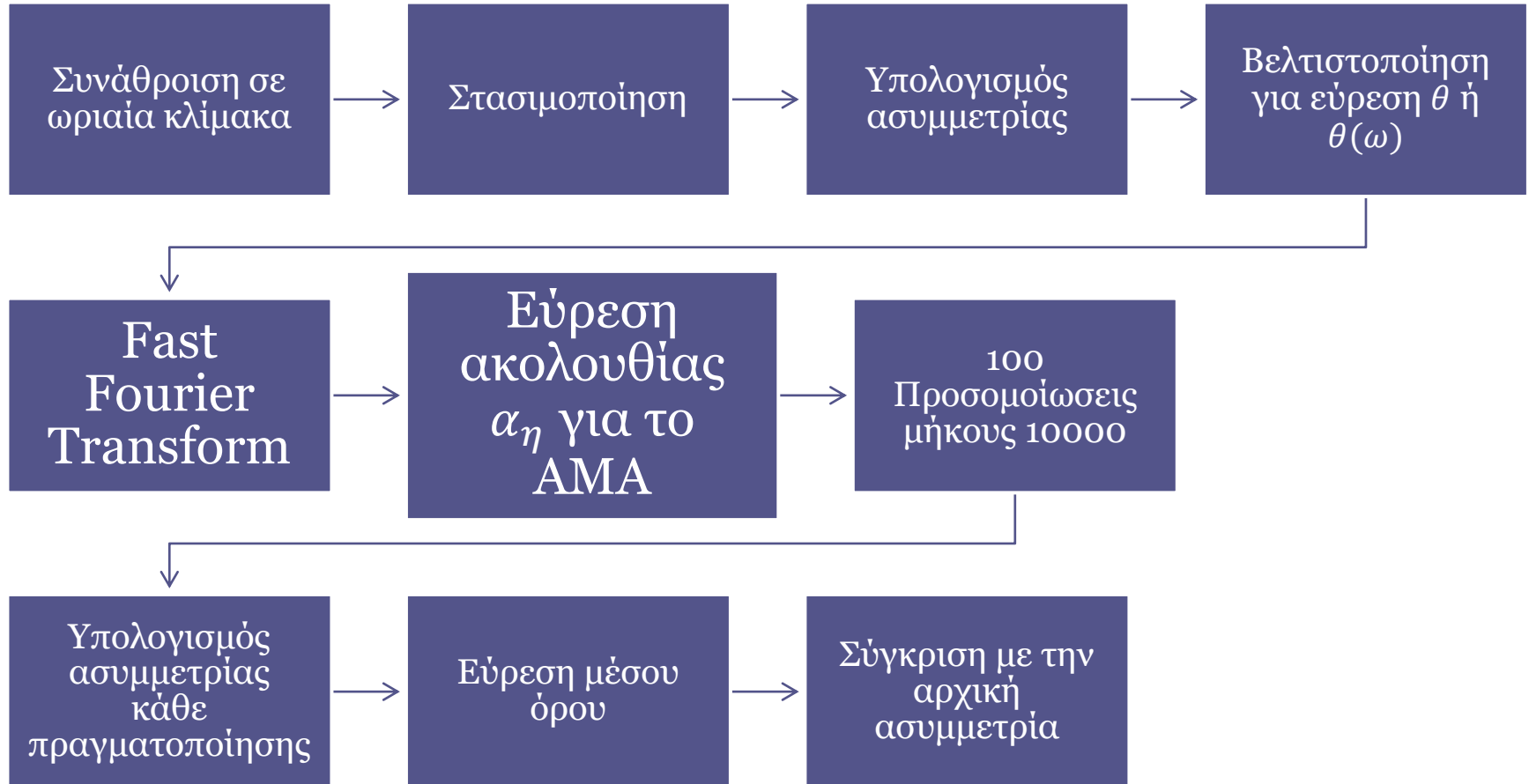


ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΟΤΑΜΟΣ ΜΟΝΟCASY

Αρχική μεθοδολογία:
διατήρηση ασυμμετρίας
σε μία κλίμακα $\rightarrow \theta$

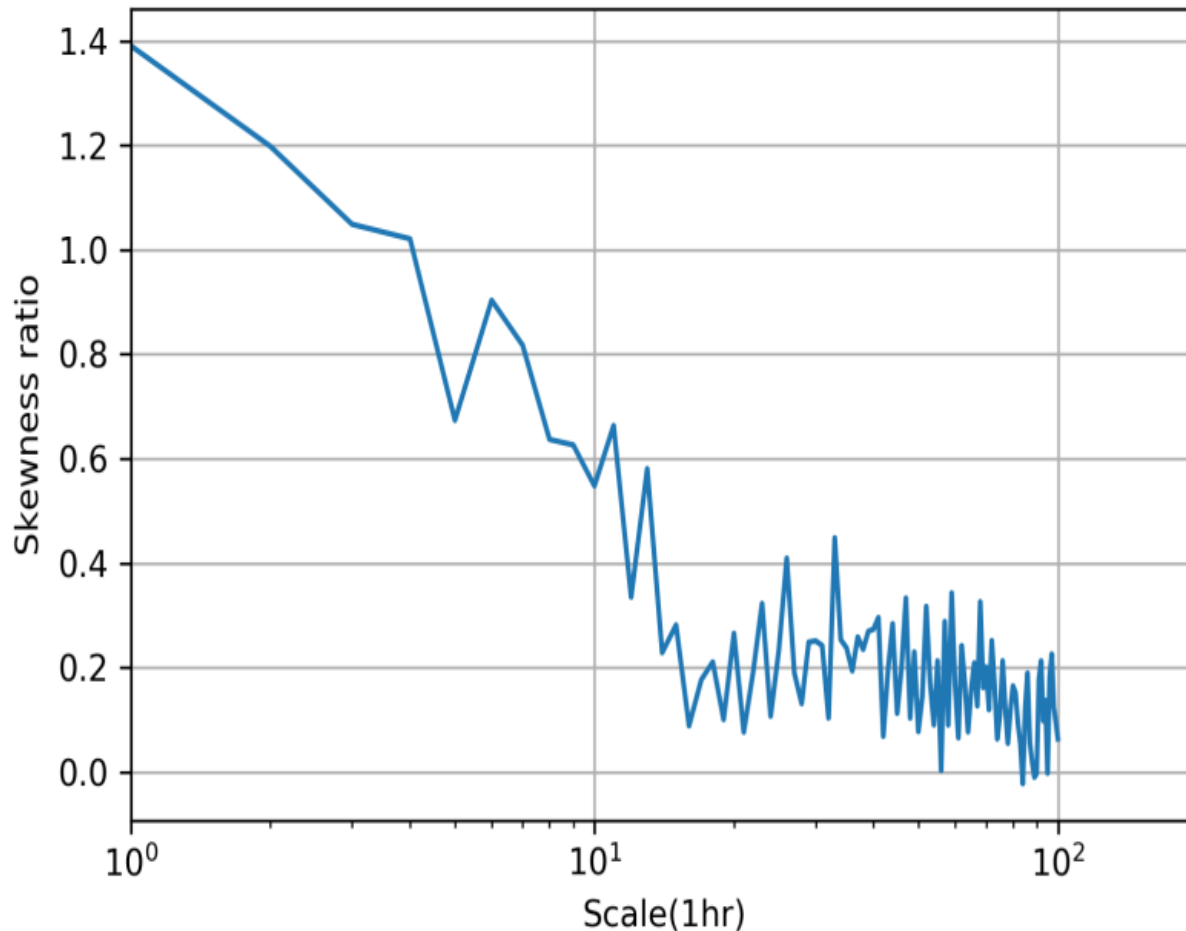
**Τροποποιημένη
μεθοδολογία:**
διατήρηση ασυμμετρίας
σε δύο κλίμακες $\rightarrow \theta(\omega)$

ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΟΤΑΜΟΣ ΜΟΝΟCΑCΥ



ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΟΤΑΜΟΣ ΜΟΝΟCΑCΥ

ΜΟΝΟCΑCΥ RIVER AT BRIDGEPORT, MD

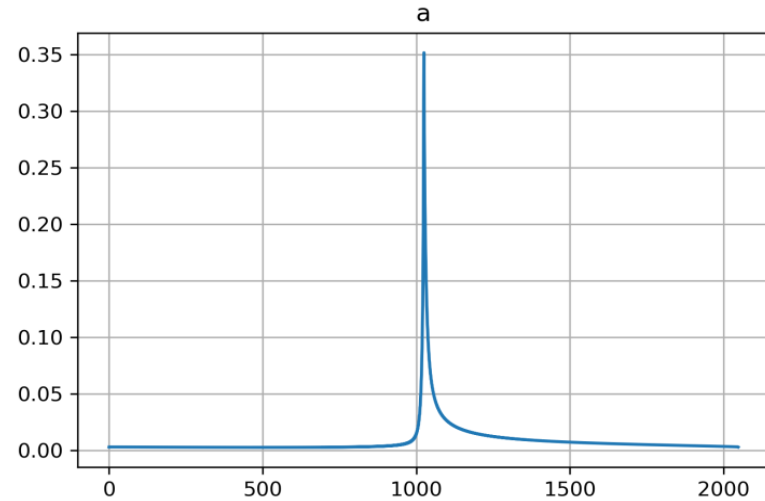
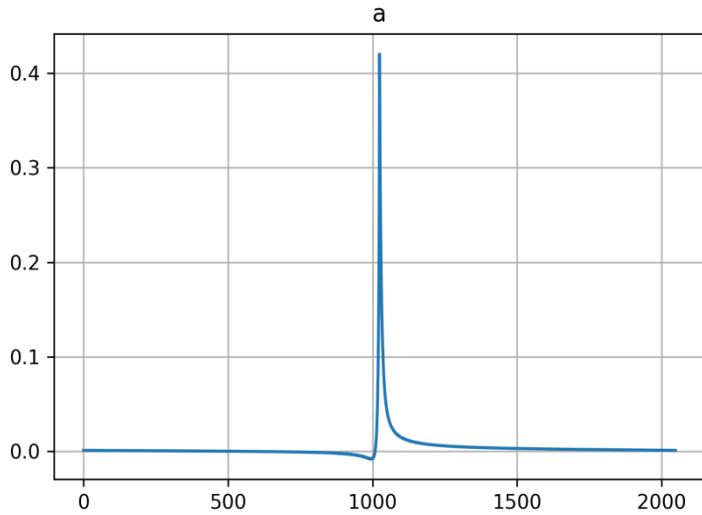


Κριτήριο ασυμμετρίας

Κλίμακα 1, $r_1 = 1.390$

Κλίμακα 2, : $r_2 = 1.197$.

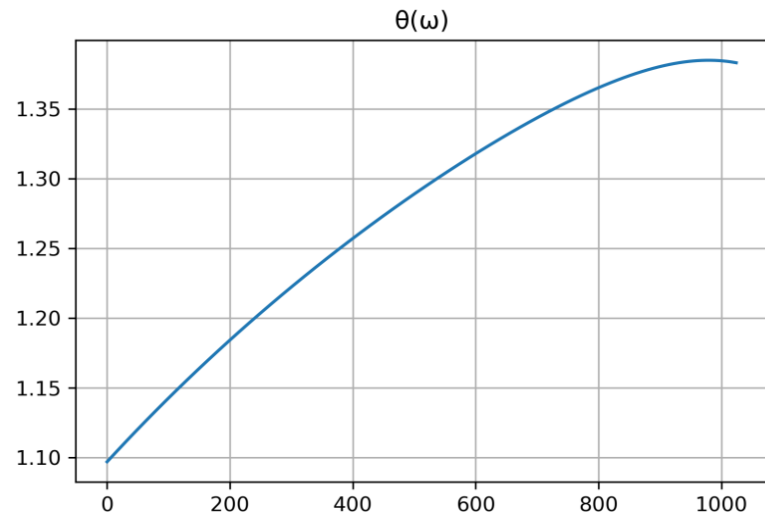
ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΟΤΑΜΟΣ ΜΟΝΟCΑCΥ



Διατήρηση ασυμμετρίας σε μία κλίμακα

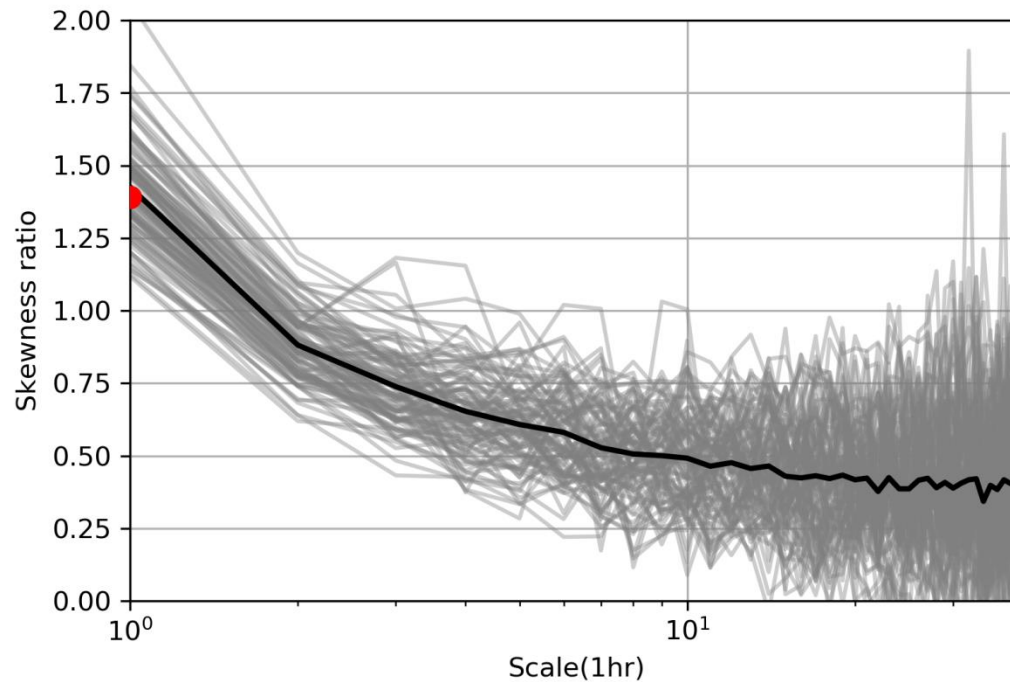
Διατήρηση ασυμμετρίας σε δύο κλίμακες

Παράμετροι
μοντέλου ΑΜΑ



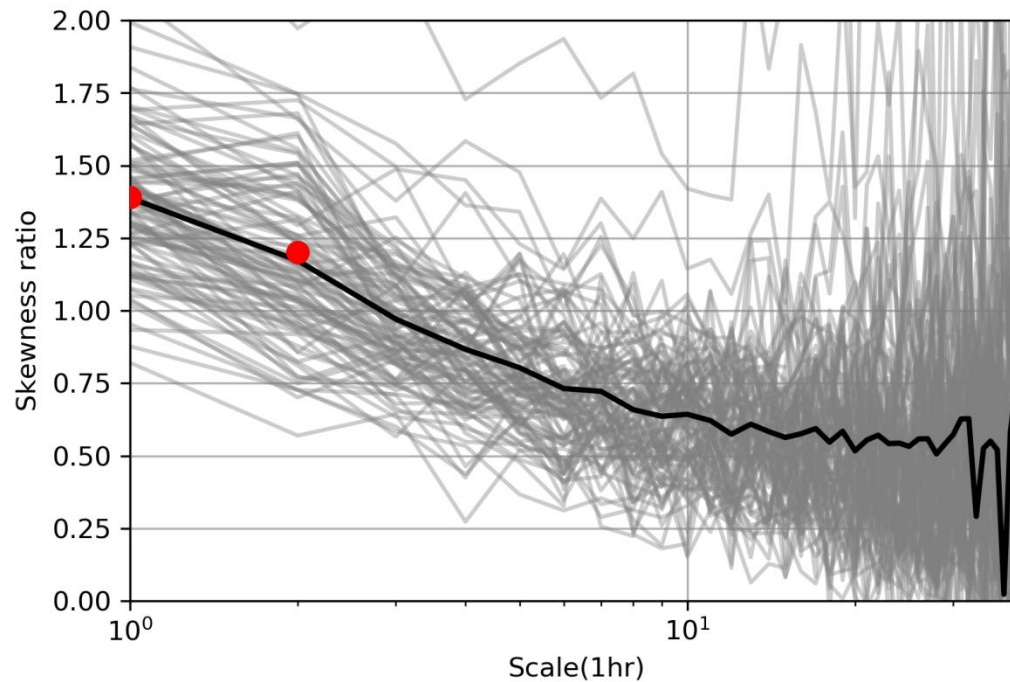
ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΟΤΑΜΟΣ ΜΟΝΟCΑCΥ

Τεστ αντιστρεψιμότητας 100 προσομοιώσεων 10000 μήκους
Διατήρηση ασυμμετρίας μόνο στην πρώτη κλίμακα



ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΟΤΑΜΟΣ ΜΟΝΟCΑCΥ

Τεστ αντιστρεψιμότητας 100 προσομοιώσεων 10000 μήκους
Διατήρηση ασυμμετρίας στην πρώτη κλίμακα και τη δεύτερη κλίμακα



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η χρονική ασυμμετρία της απορροής σημειώνεται για κλίμακες αρκετών ημερών και αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη αναπαραγωγής σε προσομοιώσεις πλημμύρας.
- Στα υδρογραφήματα συναντούμε απότομους ανοδικούς κλάδους και ομαλότερους καθοδικούς κλάδους. Αυτή η συμπεριφορά γίνεται προσπάθεια να αναπαραχθεί με την έννοια της χρονικής ασυμμετρίας.
- Η χρονική ασυμμετρία της απορροής στις ΗΠΑ, έχει αναμενόμενη τιμή για το κριτήριο αντιστρεψιμότητας στην πρώτη κλίμακα γύρω στο 2,5 και στη δεύτερη κλίμακα γύρω στο 1,9.
- Η μελέτη αυτή προτείνει μια τροποποίηση της υπάρχουσας μεθόδου από τον Κουτσογιάννη (2019) που διατηρεί την μη αντιστρεψιμότητα μόνο στην πρώτη κλίμακα και την καθιστά ικανή να διατηρεί την μη αντιστρεψιμότητα ταυτόχρονα στην πρώτη και στη δεύτερη κλίμακα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Dimitriadis, P. and Koutsoyiannis, D., 2015. Climacogram versus autocovariance and power spectrum in stochastic modelling for Markovian and Hurst–Kolmogorov processes. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29 (6), 1649–1669. doi:10.1007/s00477-015-1023-7.
- Eddington, A., 1928. *The nature of the physical world*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Koutsoyiannis, D., 2005, Hydrologic persistence and the Hurst phenomenon, *Water Encyclopedia*, Vol. 4, Surface and Agricultural Water, edited by J. H. Lehr and J. Keeley, 210–221, doi:10.1002/047147844X.sw434, Wiley, New York.
- Koutsoyiannis, D., 2017 Entropy production in stochastics. *Entropy* 19(11):581
- Koutsoyiannis, D., 2019 Simple stochastic simulation of time irreversible and reversible processes, *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2019.1705302
- Koutsoyiannis, D., 2016, Generic and parsimonious stochastic modelling for hydrology and beyond, *Hydrological Sciences Journal*, 61:2, 225-244, doi: 10.1080/02626667.2015.1016950
- Koutsoyiannis, D., 2000. A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series. *Water Resources Research*, 36 (6), 1519–1533. doi:10.1029/2000WR900044
- Koutsoyiannis, D., 2002. The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy. *Hydrological Sciences Journal*, 47 (4), 573–595. doi:10.1080/02626660209492961
- Koutsoyiannis, D., 2011. Hurst-Kolmogorov dynamics as a result of extremal entropy production. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 390 (8), 1424–1432. doi:10.1016/j.physa.2010.12.035
- Koutsoyiannis, D., 2019, Time’s arrow in stochastic characterization and simulation of atmospheric and hydrological processes, *Hydrolog. Sci. J.*, 64, 1013–1037, <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1600700>.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Layzer, D., 1975, The arrow of Time, Scientific. American., 233(6), 56-69.

Weiss, G., 1975. Time-reversibility of linear stochastic processes. Journal of Applied Probability, 12 (4), 831–836. doi:10.2307/3212735

Κουτσογιάννης, Δ., 2013, Σημειώσεις Στοχαστικών Μεθόδων στους Υδατικούς Πόρους, Έκδοση 4, 100 pages, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

www.usgs.gov

www.pyri.org/project/climata/

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΠΟΛΥ!