



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση υδρομετεωρολογικών διεργασιών σχετικών με την αιολική και ηλιακή ενέργεια



Γεώργιος Τσεκούρας

Επιβλέπων καθηγητής


Δημήτριος Κουτσογιάννης

Αθήνα 29 Οκτωβρίου 2012

Εισαγωγή

- Ανάγκη για αναζήτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Αιολική-Ηλιακή ενέργεια → Μελέτη υδρομετεωρολογικών δεδομένων (ταχύτητα ανέμου και διάρκεια ηλιοφάνειας-ηλιακής ακτινοβολίας)
- Η κλιματική μεταβλητότητα και η δυναμική Hurst-Kolmogorov πρέπει να ληφθούν υπόψιν.
- Έλλειψη συστηματικής διερεύνησης της δυναμικής Hurst για τις δύο διεργασίες μέχρι σήμερα.

• Ορθολογικός σχεδιασμός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας με χρήση αιολικής και ηλιακής ενέργειας

Προϋπόθεση


Μεγάλο μήκος
καταγραφών

 Έλλειψη

Γέννηση συνθετικών χρονοσειρών μέσω πολυμεταβλητής στοχαστικής προσομοίωσης

Σταθμοί μέτρησης

Κριτήριο επιλογής σταθμών :

- Χρονοσειρές μήκους τουλάχιστον 70 χρόνων
- Διαθεσιμότητα δεδομένων (<http://climexp.knmi.nl>,<http://eca.knmi.nl>,<http://www.dwd.de>,
<http://www.met.ie>)
- Ύπαρξη μεταδεδομένων (χρονοσειρές ανέμου)

Προβλήματα στη συλλογή δεδομένων:

- Παντελής έλλειψη καταγραφής δεδομένων για κάποιες ηπείρους
- Αρκετές καταγραφές με χρονική διάρκεια μικρότερη των 50 χρόνων
- Απαίτηση πληρωμής για την προμήθεια των δεδομένων
- Παντελής έλλειψη καταγραφών μεγάλης διάρκειας για την ηλιακή ακτινοβολία

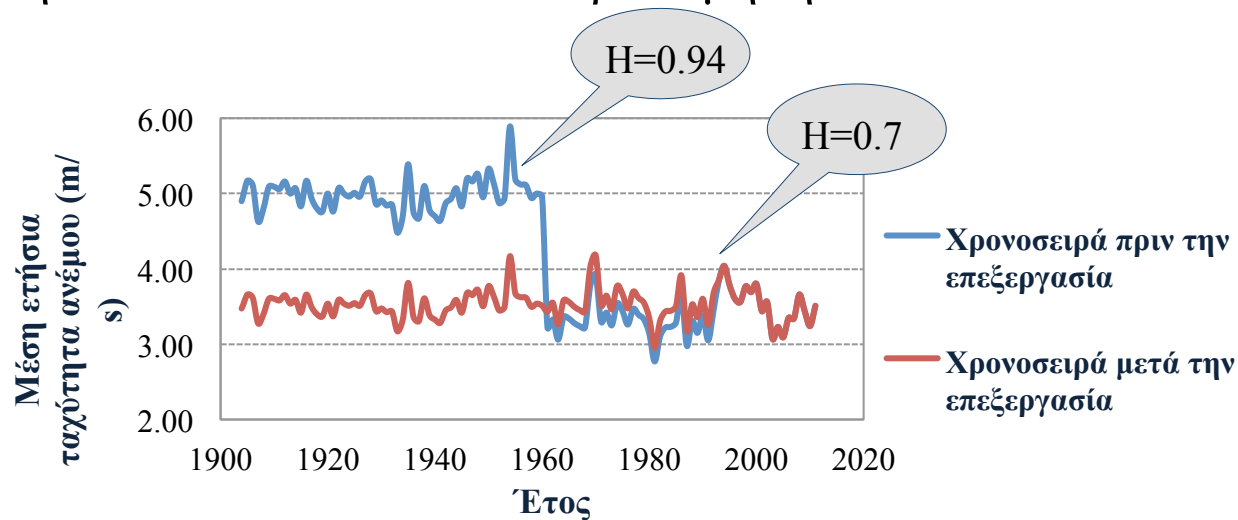
Συνολικά 20 σταθμοί για ταχύτητα ανέμου και 21 για διάρκεια ηλιοφάνειας

Γεωγραφική κατανομή σταθμών



Επεξεργασία χρονοσειρών ανέμου

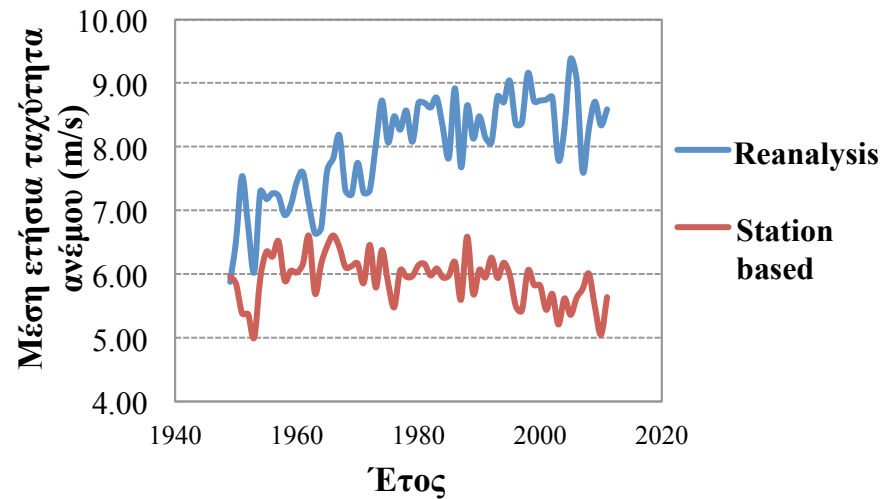
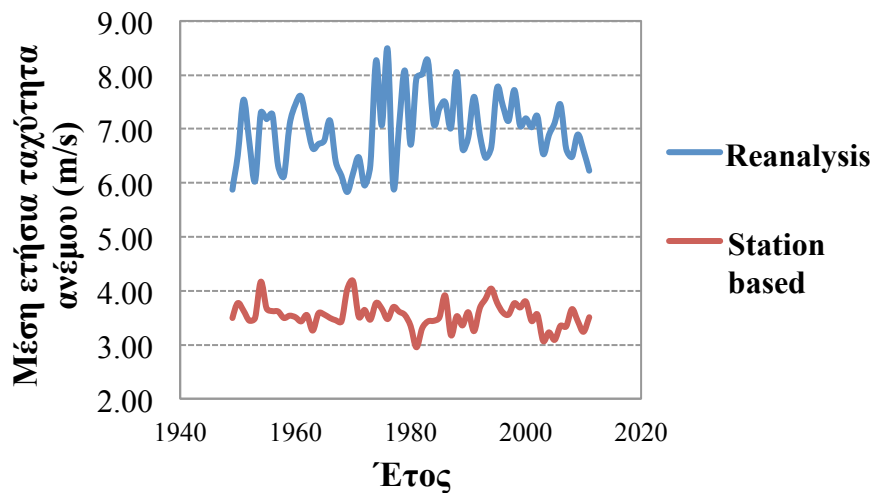
- Οι ημερήσιες καταγραφές ταχύτητας ανέμου δεν αναφέρονται σε κοινό υψόμετρο μέτρησης
- Χωρισμός σε κλάσεις με κοινό υψόμετρο μέτρησης και μετατροπή σε ενιαίο υψόμετρο
- Παράλειψη της μετατροπής θα οδηγούσε σε λανθασμένη εκτίμηση του συντελεστή Hurst- κατά κανόνα υπερεκτίμηση



Μέση ετήσια χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου για το σταθμό De Bilt πριν και μετά την επεξεργασία

Δεδομένα Reanalysis

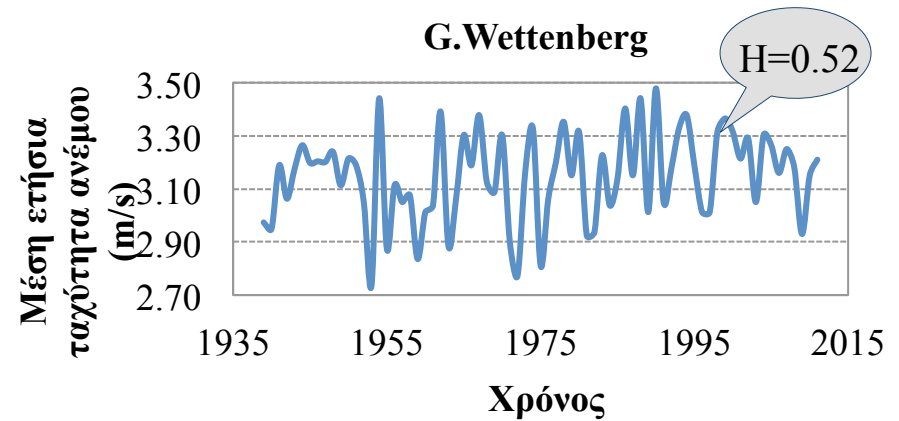
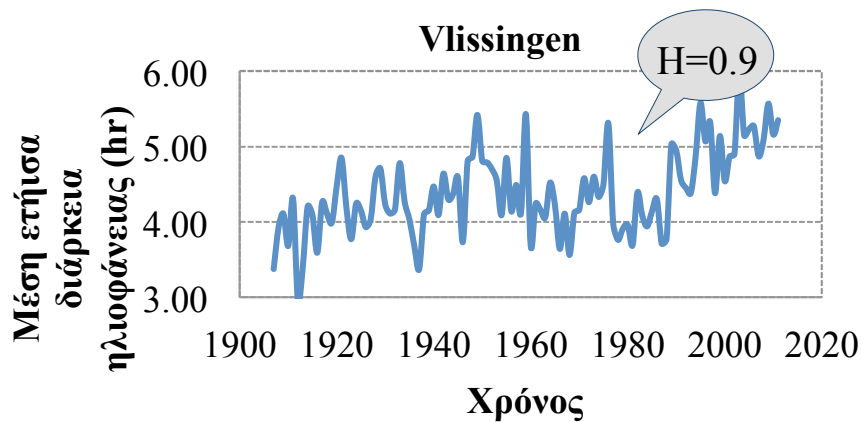
- Έλεγχος αξιοπιστίας δεδομένων Reanalysis ταχύτητας ανέμου για περαιτέρω διερεύνηση της μακροχρόνιας εμμονής μέσω αυτών σε άλλες τοποθεσίες
- Σύγκριση καταγραφών με ήδη υπάρχοντες από τις βάσεις δεδομένων
- Αναξιόπιστα καθώς εμφανίζουν μεγαλύτερες μέσες τιμές αν και αναφέρονται σε ίδιο ή μικρότερο υψόμετρο



Χρονοσειρά μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου για τις πραγματικές καταγραφές και για τα δεδομένα Reanalysis (σταθμοί De Bilt-αριστερά και De Kooy -δεξιά).

Δυναμική Hurst-Kolmogorov

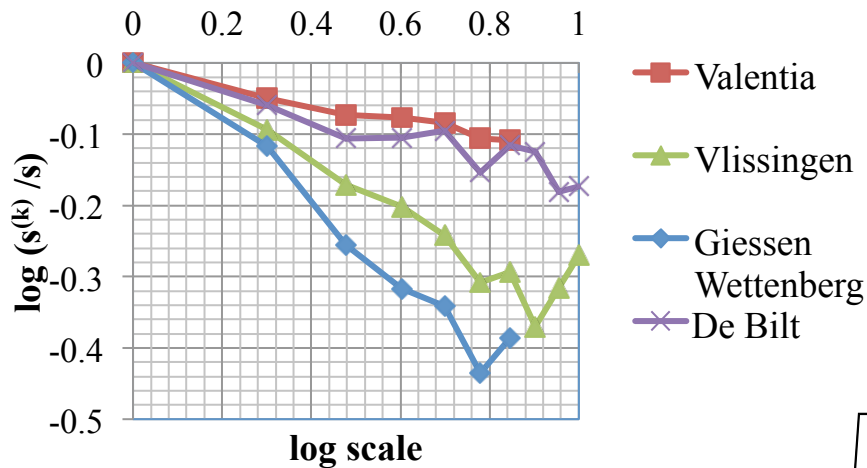
- Τάση ομαδοποίησης ακραίων γεγονότων στη φύση
- Χρονοσειρές παρουσιάζουν διακυμάνσεις σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες
- Ποσοτικοποίηση της μακροπρόθεσμης μνήμης ή εμμονής μέσω του συντελεστή Hurst-Τιμή στο (0.5,1) ύπαρξη εμμονής



Μοντέλο απλής ομοιοθεσίας

- Ανέλιξη στη βασική κλίμακα: $X_i, i=1,2,\dots$
- Μέση συναθροισμένη-συναθροισμένη ανέλιξη: $X_i^{(k)} := \left(\frac{1}{k}\right) \sum_{l=(i-1)k+1}^{ik} X_l, Z_i^{(k)} := \sum_{l=(i-1)k+1}^{ik} X_l$
- Διασπορά: $\text{Var}[X_i^{(k)}] = k^{2H-2} \gamma_0, \text{Var}[Z_i^{(k)}] = k^{2H} \gamma_0$

Κλιμακογράμματα-Μέθοδοι υπολογισμού



Κλιμακογράμματα ταχύτητας ανέμου (Valentia, G. Wettenberg) και διάρκειας ηλιοφάνειας (Vlissingen, De Bilt)

Εκτιμήτρια τυπικής απόκλισης:
(Κουτσογιάννης 2003)

$$S := \sqrt{\frac{n - \frac{1}{2}}{(n-1)(n - n^{(2H-1)})}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - X_n^{(n)})^2}$$

Ταυτόχρονη εκτίμηση σ και συντελεστή H :
(Κουτσογιάννης 2003)

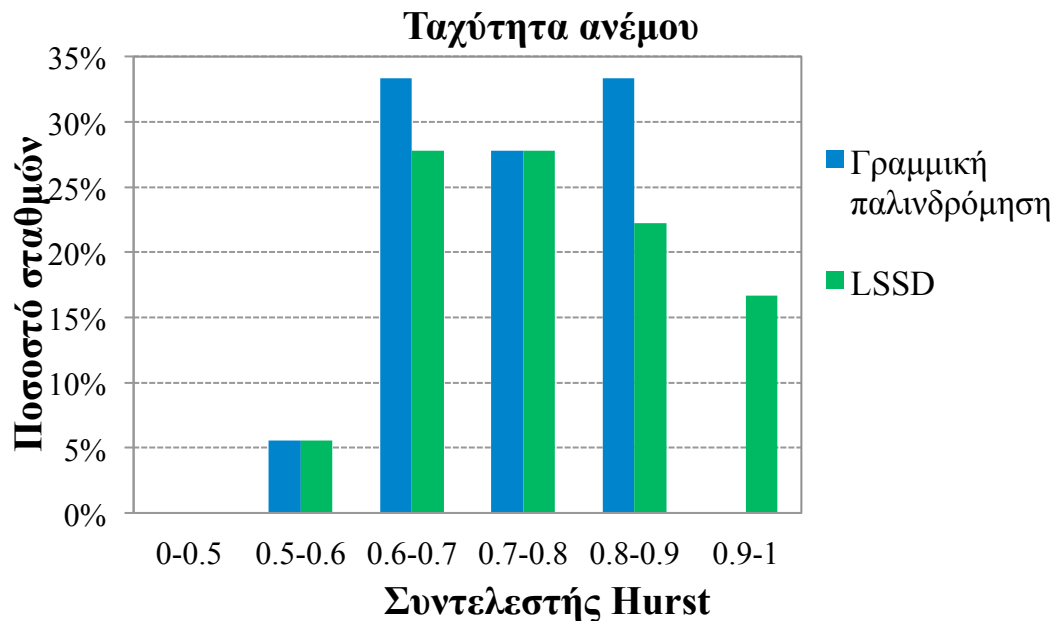
$$E[S^{(k)}] \cong c_k(H) k^H \sigma \quad \text{όπου} \quad c_k(H) := \sqrt{\frac{\frac{n}{k} - \left(\frac{n}{k}\right)^{2H-1}}{\frac{n}{k} - \frac{1}{2}}}$$

- Μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης-Κλίση διπλού λογαριθμικού διαγράμματος της μέσης συναθροισμένης τυπικής απόκλισης $s^{(k)}$ με τη κλίμακα k αγνοώντας τον όρο $c_k(H)$
- Μέθοδος LSSD-Ελαχιστοποίηση σφάλματος $e^2(\sigma, H)$ με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων των τυπικών αποκλίσεων (Tyralis and Koutsoyiannis 2011)

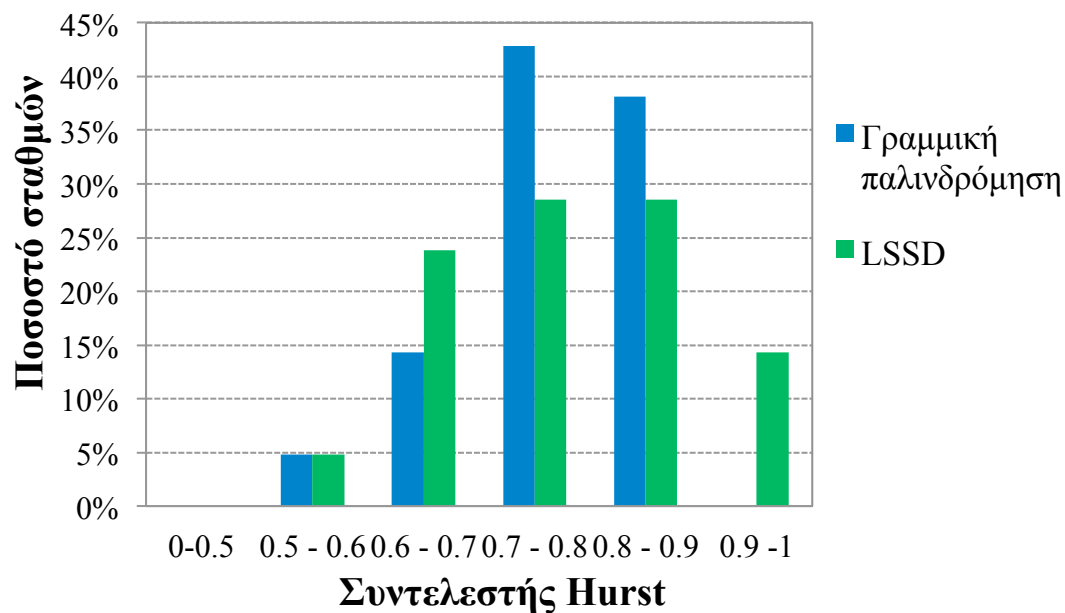
$$e^2(\sigma, H) := \sum_{k=1}^{k'} \frac{[\ln E[S^{(k)}] - \ln s^{(k)}]^2}{k^p} + \frac{H^{q+1}}{q+1} = \sum_{k=1}^{k'} \frac{[\ln \sigma + H \ln k + \ln c_k(H) - \ln s^{(k)}]^2}{k^p} + \frac{H^{q+1}}{q+1}$$

Αποτελέσματα μεθόδων

Ιστογράμματα συχνότητας συντελεστών Hurst για τις χρονοσειρές ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας με την μέθοδο γραμμικής παλινδρόμησης και μέθοδο LSSD.



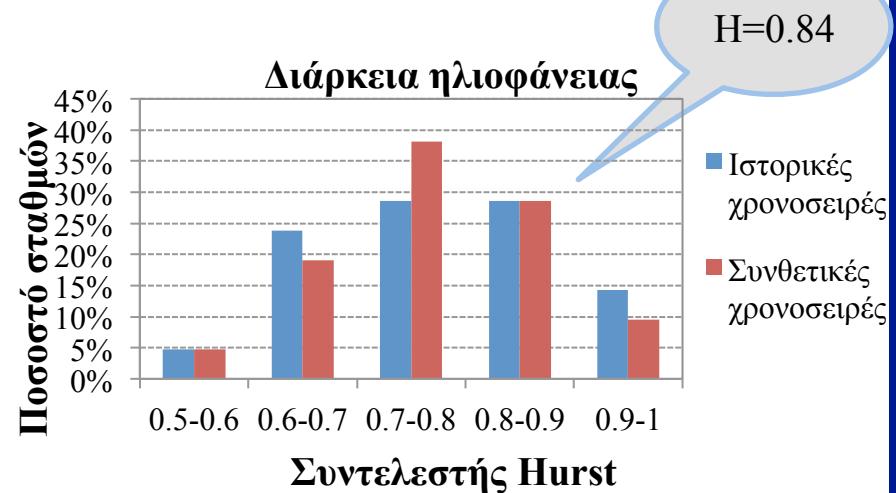
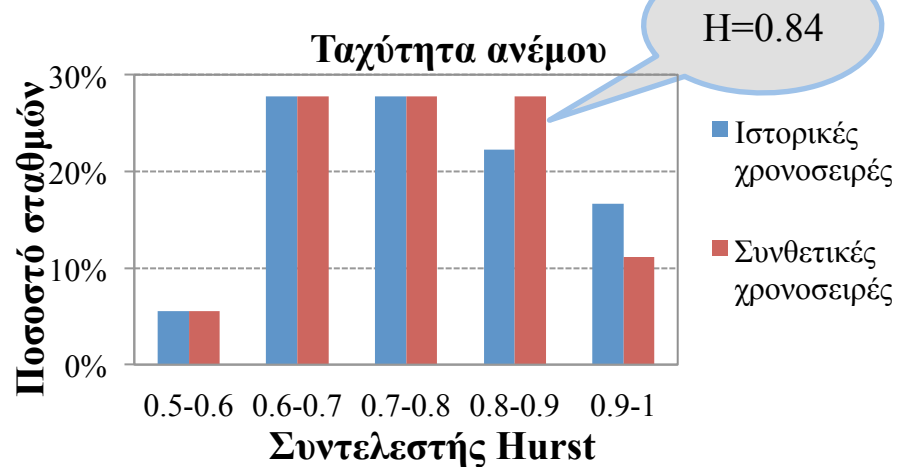
Διάρκεια ηλιοφάνειας



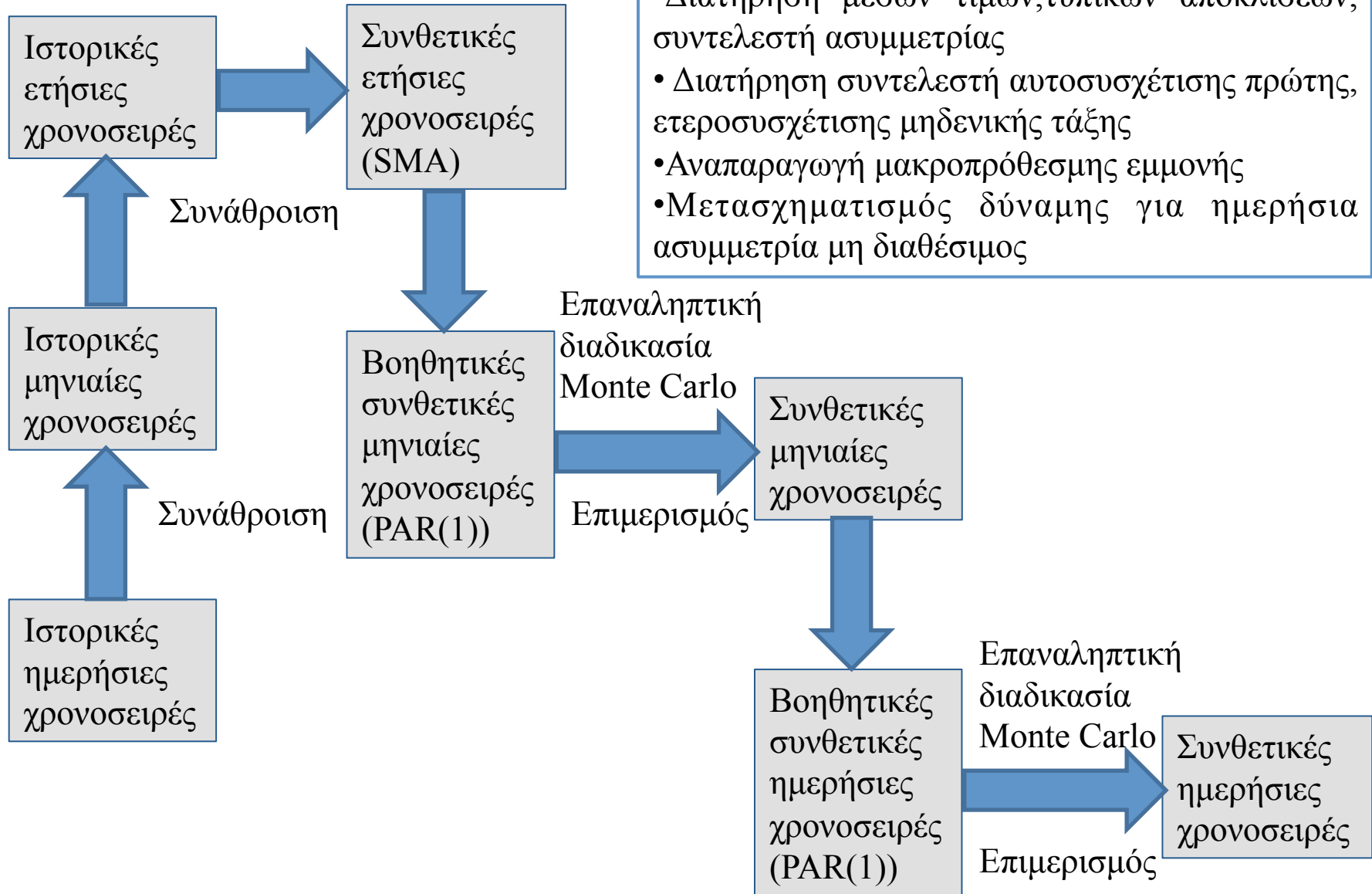
- Υψηλοί συντελεστές Hurst
- Ομοιοθητική συμπεριφορά
- Μέθοδος γραμμικής παλινδρόμησης μεροληπτική
- Επιλογή μεθόδου LSSD

Προσδιορισμός χαρακτηριστικής τιμής Hurst

- Γέννηση συνθετικών χρονοσειρών με την μέθοδο τυχαίων διακυμάνσεων πολλαπλής κλίμακας για τις δύο μεταβλητές (Koutsoyiannis 2002)
- Ίδιος αριθμός συνθετικών και ιστορικών χρονοσειρών με ίδια μέση τιμή, τυπική απόκλιση και μήκος καταγραφών
- Χρήση ενιαίας θεωρητικής τιμής του Hurst στη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης κατά την διαδικασία γέννησης
- Υπολογισμός πραγματικής τιμής του Hurst στο τέλος της διαδικασίας (μέθοδος LSSD) και κατάρτιση ιστογραμμάτων σύγκρισης συνθετικών και ιστορικών χρονοσειρών
- Διαδοχικές δοκιμές θεωρητικών τιμών του συντελεστή Hurst μέχρι την σύγκλιση των ιστογραμμάτων ιστορικών-συνθετικών χρονοσειρών



Το υπολογιστικό σύστημα Κασταλία (1)



Το υπολογιστικό σύστημα Κασταλία (2)

Σημεία όπου πρέπει να δοθεί προσοχή:

- ❑ Γενικευμένη συνάρτηση αυτοσυνδιασποράς: $\gamma_j = \gamma_0[1 + \kappa \beta j]^{-1/\beta}$
 - Προσαρμογή στις δειγματικές αυτοσυνδιασπορές \longrightarrow εκτίμηση των συντελεστών βαρύτητας του μοντέλου SMA
 - Μικρό μήκος καταγραφών \longrightarrow δειγματικές αυτοσυνδιασπορές αναξιόπιστες \longrightarrow χειροκίνητη επιλογή παραμέτρου εμμονής β

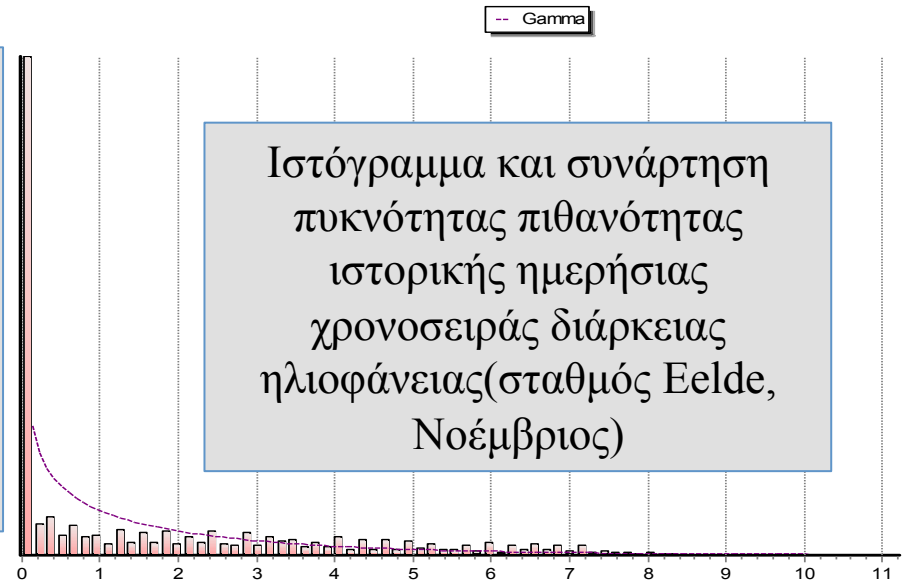
- ❑ Διατήρηση πιθανότητας εμφάνισης μηδενικών τιμών με κατάλληλη επιλογή
 - του ποσοστού π_0 και του ορίου l_0
 - ποσοστών λ_1, λ_2 για το μοντέλου Markov
 - της πιθανότητας k_3 (σχετίζεται με τη διάσταση του χώρου)

1^η Εφαρμογή: Παραγωγή χρονοσειρών 1000 ετών σε οκτώ σταθμούς-δεδομένα εισόδου

Διάρκεια ηλιοφάνειας

- Μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης μηδενικών τιμών
- Ασυμμετρία
- Όχι καλή προσαρμογή στην κατανομή γάμα
- Πεδίο ορισμού κλειστό διάστημα και όχι το $[0, +\infty)$

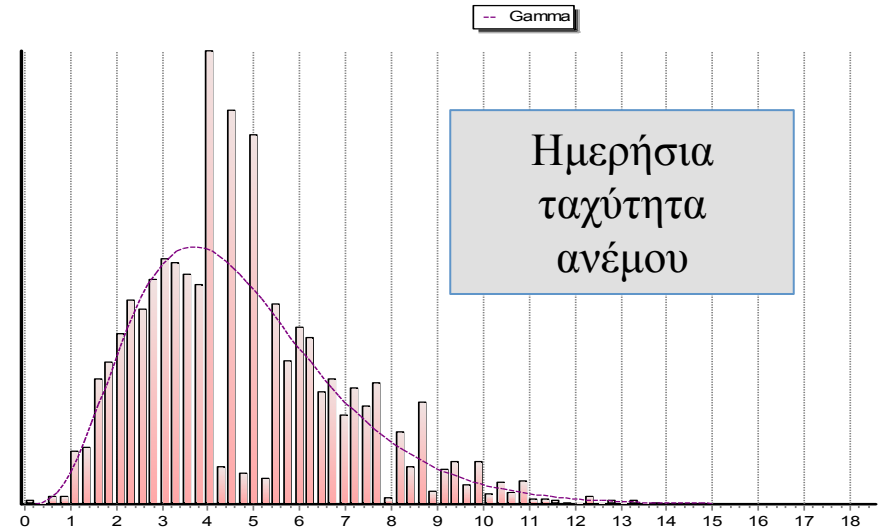
Probability Density Functions (PDF) - Histogram - Sample consisting from values of the month: Νοέμβριος



Ταχύτητα ανέμου

- Μηδενική πιθανότητα εμφάνισης μηδενικών τιμών
- Ασυμμετρία
- Σχετικά καλή προσαρμογή στην κατανομή γάμα

Probability Density Functions (PDF) - Histogram - Sample consisting from values of the month: Νοέμβριος



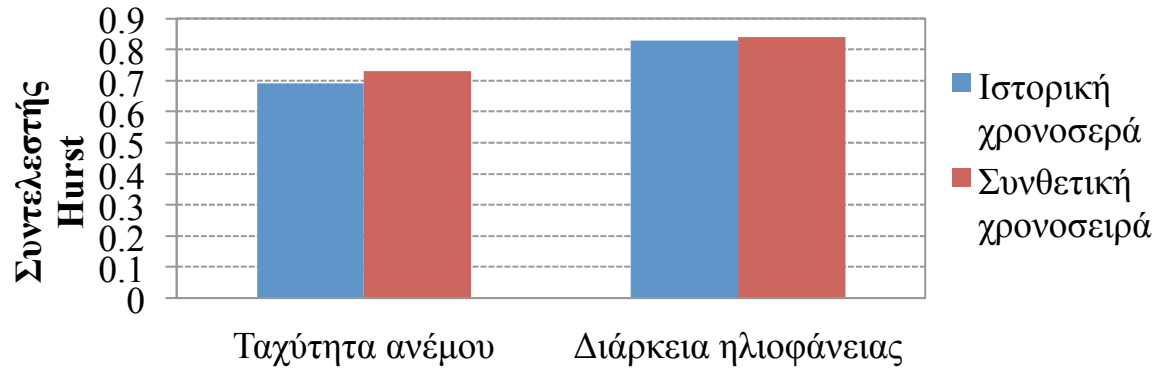
Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για 1^η εφαρμογή

Στα σενάρια χρησιμοποιήθηκαν :

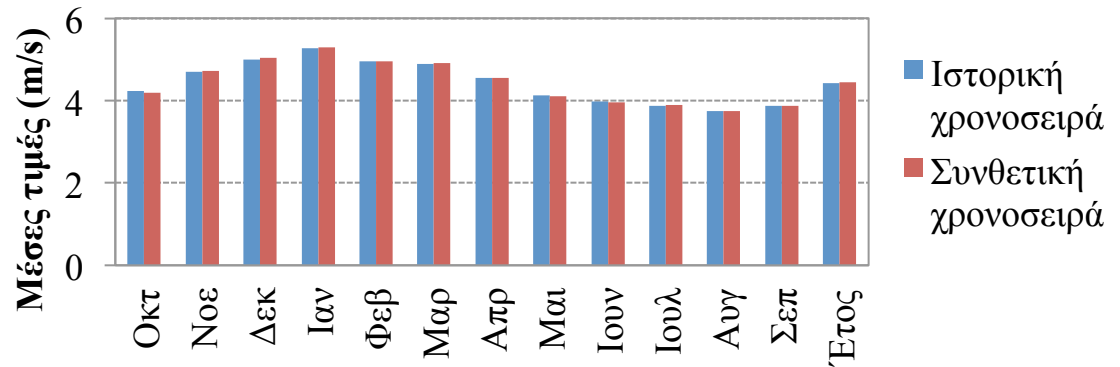
- Ποσοστό $\pi_0=0.9$ και όριο $l_0=0.4$
- Ποσοστά $\lambda_1=0.3$ και $\lambda_2=0.1$ και η πιθανότητα $k_3=0$
- Κριτήρια σύγκλισης και αριθμός επαναλήψεων κατά περίπτωση
- Παράμετρος εμμονής β για την αναπαραγωγή του Hurst κατά περίπτωση

Αποτελέσματα 1^{ης} εφαρμογής μηνιαία-ετήσια κλίμακα

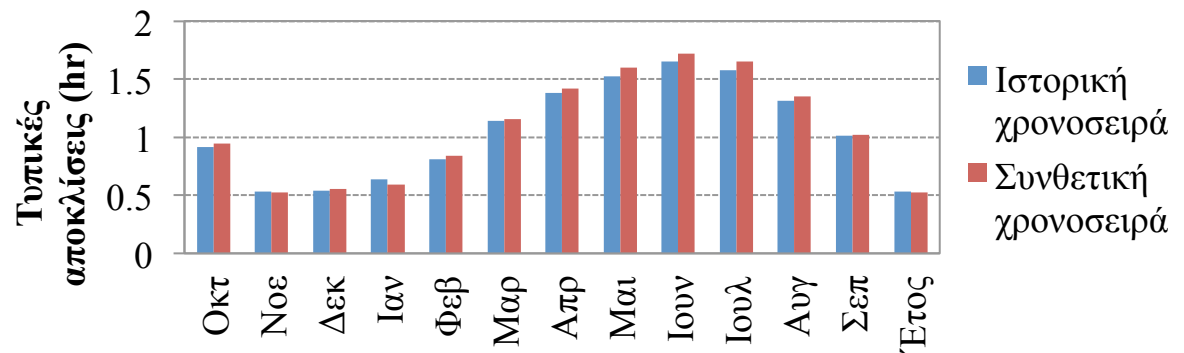
Συντελεστές Hurst
ταχύτητας ανέμου και
διάρκειας ηλιοφάνειας



Μηνιαίες μέσες τιμές
ταχύτητας ανέμου

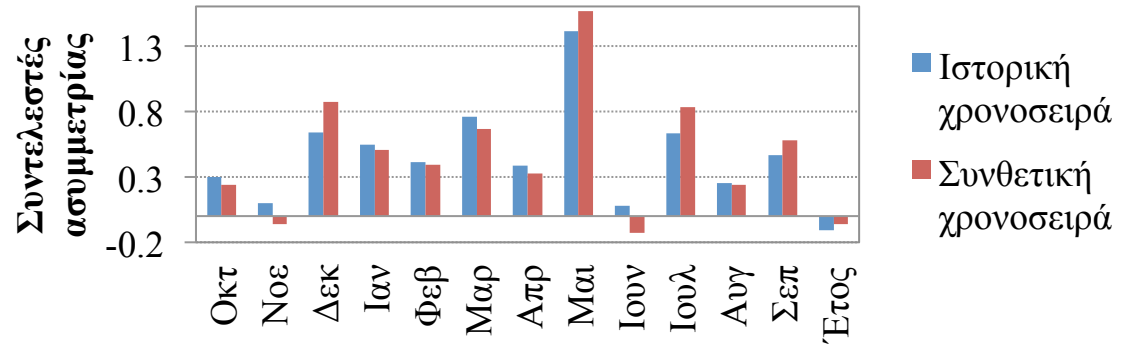


Μηνιαίες τυπικές
αποκλίσεις διάρκειας
ηλιοφάνειας

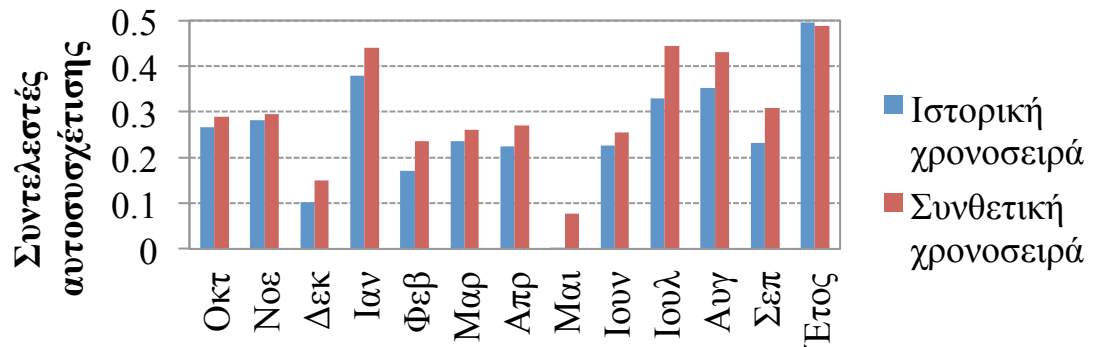


Αποτελέσματα 1^{ης} εφαρμογής μηνιαία-ετήσια κλίμακα

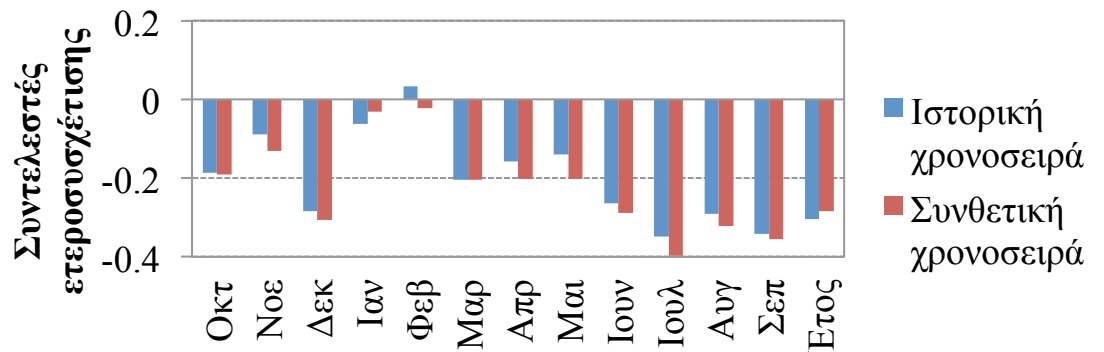
Μηνιαίοι συντελεστές
ασυμμετρίας
ταχύτητας ανέμου



Μηνιαίοι συντελεστές
αυτοσυσχέτισης
διάρκειας ηλιοφάνειας

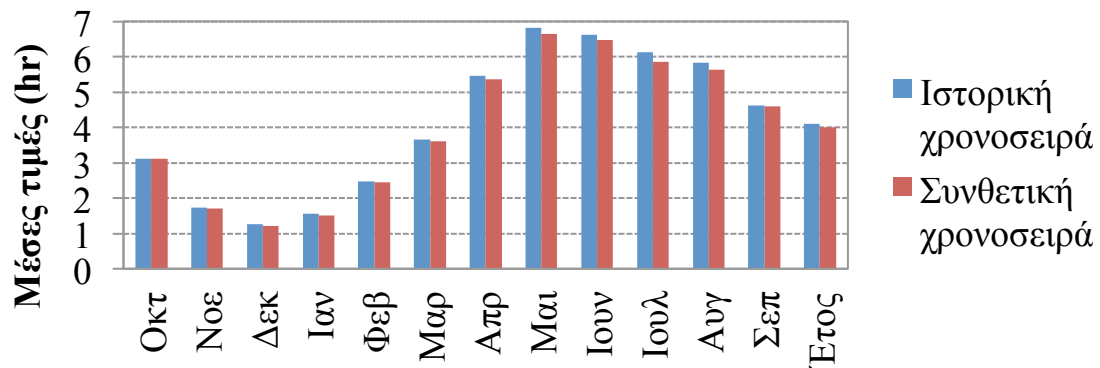


Μηνιαίοι συντελεστές
ετεροσυσχέτισης
ταχύτητας ανέμου-
διάρκειας ηλιοφάνειας

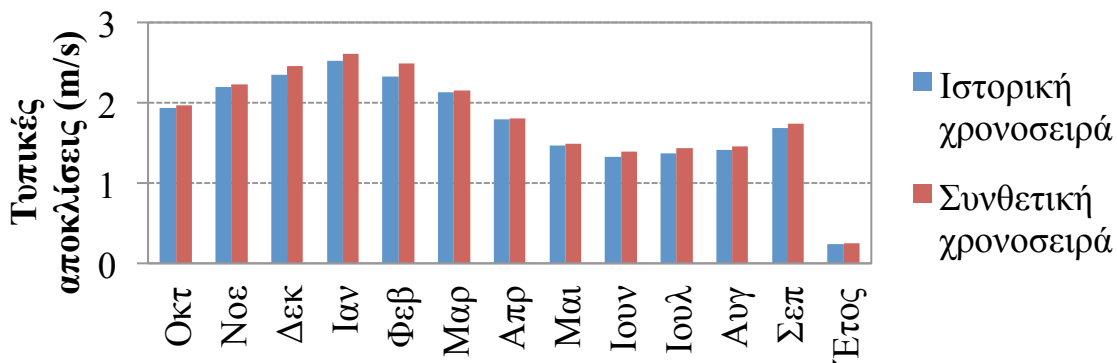


Αποτελέσματα 1^{ης} εφαρμογής ημερήσια κλίμακα

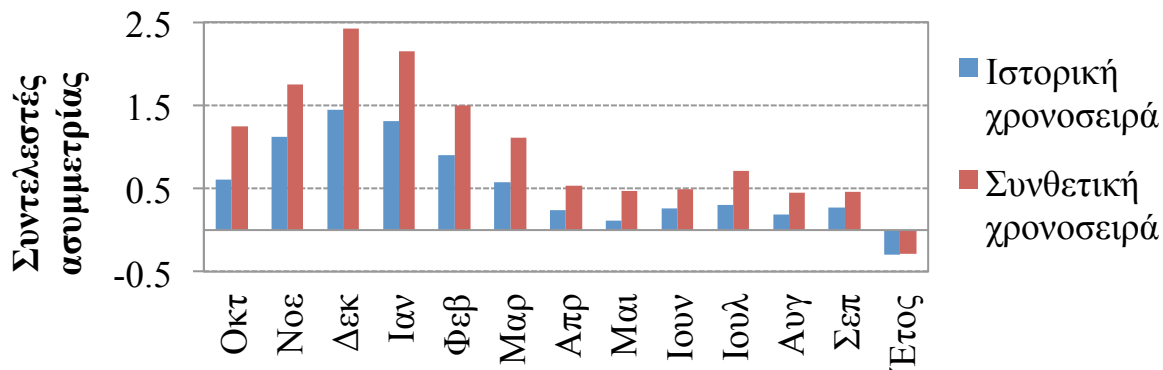
Ημερήσιες μέσες τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας



Ημερήσιες τυπικές αποκλίσεις ταχύτητας ανέμου

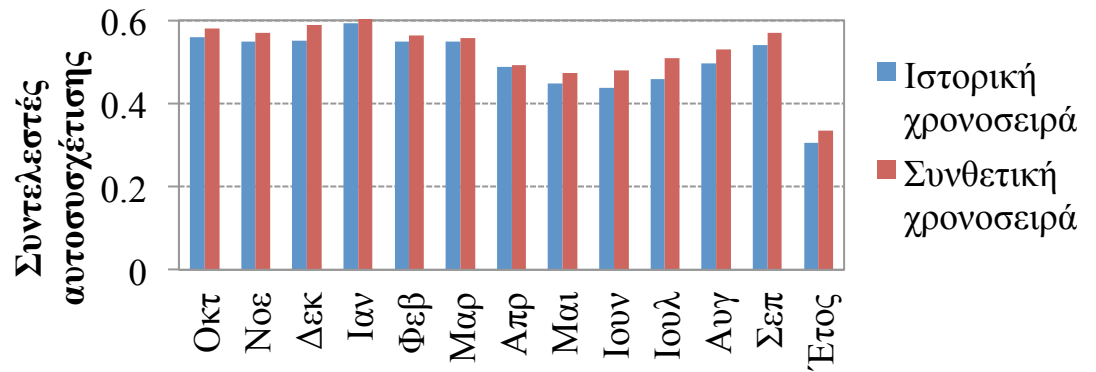


Ημερήσιοι συντελεστές ασυμμετρίας διάρκειας ηλιοφάνειας

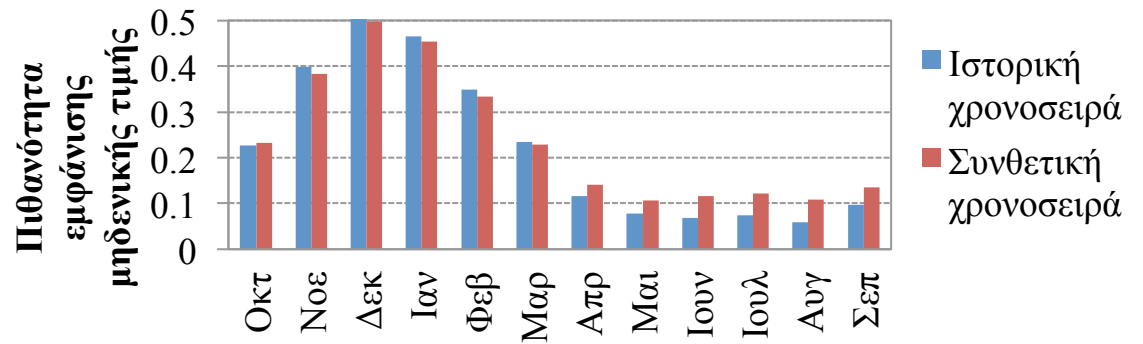


Αποτελέσματα 1^{ης} εφαρμογής ημερήσια κλίμακα

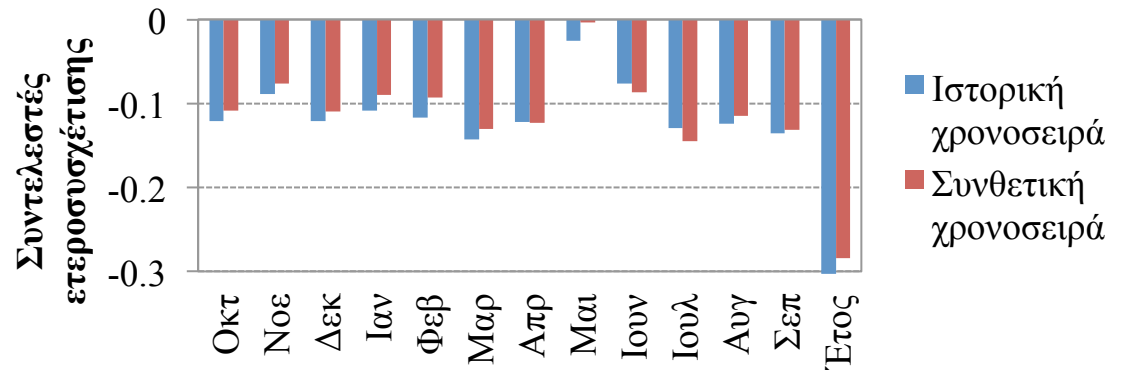
Ημερήσιοι
συντελεστές
αυτοσυσχέτισης
ταχύτητας ανέμου



Πιθανότητα εμφάνισης
μηδενικών τιμών
διάρκειας ηλιοφάνειας



Ημερήσιοι
συντελεστές
ετεροσυσχέτισης
ταχύτητας ανέμου-
διάρκειας ηλιοφάνειας



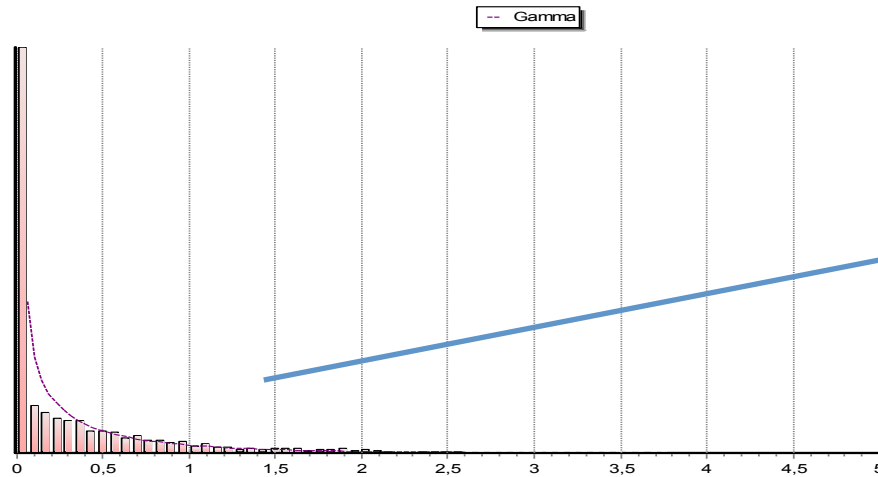
Συμπεράσματα 1^{ης} εφαρμογής

- Γενικά καλή συμπεριφορά στη στοχαστική προσομοίωση σε όλες τις κλίμακες
 - Ικανοποιητική διατήρηση στατιστικών χαρακτηριστικών
 - Ακριβής αναπαραγωγή συντελεστή Hurst
- Προβλήματα:
 - Υπερεκτίμηση ασυμμετρίας-αδυναμία αναπαραγωγής ρεαλιστικών χρονοσειρών μέσω της κατανομής γάμα στην ημερήσια κλίμακα
- Ερμηνεία :
 - Πεδίο ορισμού διάρκειας ηλιοφάνειας κλειστό διάστημα ενώ πεδίο ορισμού γάμα $[0, +\infty)$
- Αντιμετώπιση :
 - Μετατροπή της διάρκειας ηλιοφάνειας πριν την εισαγωγή στο πρόγραμμα έτσι ώστε να έχει πεδίο ορισμού $[0, +\infty)$

Λογαριθμική μετατροπή διάρκειας ηλιοφάνειας

- Ορίζεται η σχετική διάρκεια ηλιοφάνειας $X^k = n^k / N$ (πεδίο ορισμού $[0,1]$ κοινό για κάθε σταθμό)
- Ορίζεται ο μετασχηματισμός $Y^k = -\ln(1 - X^k)$, (πεδίο ορισμού το $[0, +\infty)$)
- Μηδενική τιμή της $X^k \longrightarrow$ μηδενική τιμή της $Y^k \longrightarrow$ Διατήρηση ιστορικής πιθανότητας εμφάνισης μηδενικών τιμών

Probability Density Functions (PDF) - Histogram - Sample consisting from values of the month: Νοέμβριος



Σχετικά καλή
προσαρμογή στην
κατανομή γάμα

Ιστόγραμμα και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ημερήσιων ιστορικών χρονοσειρών Y (σταθμός Eelde, Νοέμβριος).

2^η Εφαρμογή με χρήση λογαριθμικής μετατροπής- Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν

Στο σενάριο χρησιμοποιήθηκαν :

- Ποσοστό $\pi_0=0.9$ και όριο $l_0=0$
- Ποσοστά $\lambda_1=0.3$ και $\lambda_2=0.1$ και η πιθανότητα $k_3=0$
- Κριτήρια σύγκλισης και αριθμός επαναλήψεων κατά περίπτωση
- Παράμετρος εμμονής β για την αναπαραγωγή του Hurst κατά περίπτωση

Συνθετικές χρονοσειρές Y

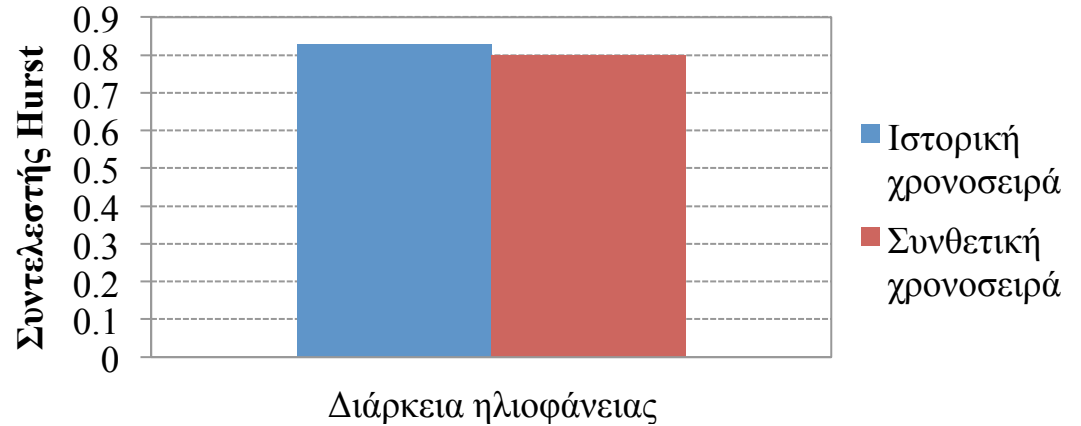
Αντίστροφη
μετατροπή



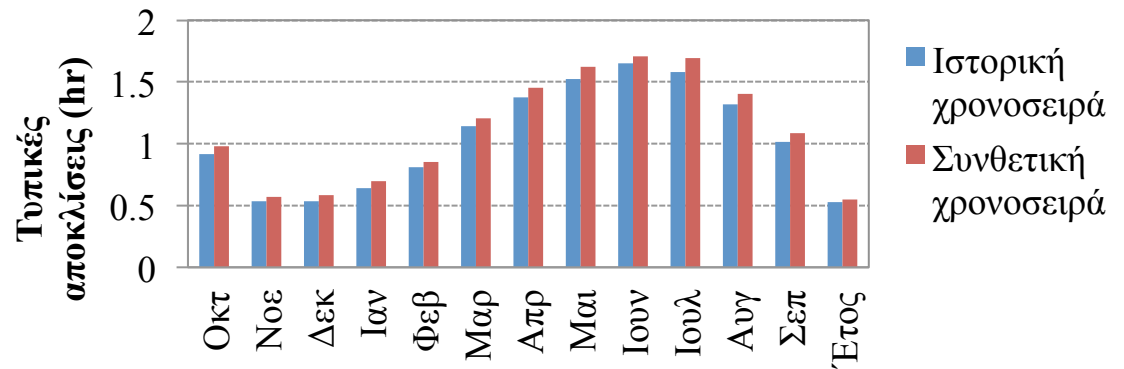
Συνθετικές χρονοσειρές
διάρκειας ηλιοφάνειας

Αποτελέσματα 2^{ης} εφαρμογής μηνιαία-ετήσια κλίμακα

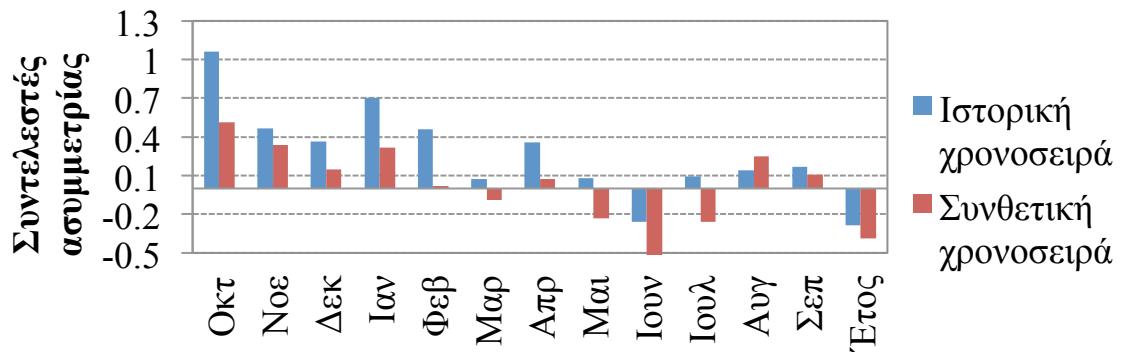
Συντελεστές Hurst
διάρκειας ηλιοφάνειας



Μηνιαίες τυπικές
αποκλίσεις διάρκειας
ηλιοφάνειας

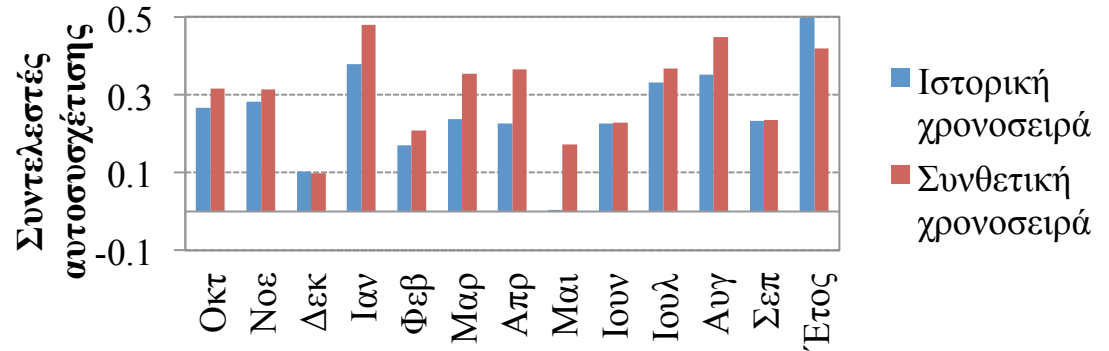


Μηνιαίοι συντελεστές
ασυμμετρίας διάρκειας
ηλιοφάνειας

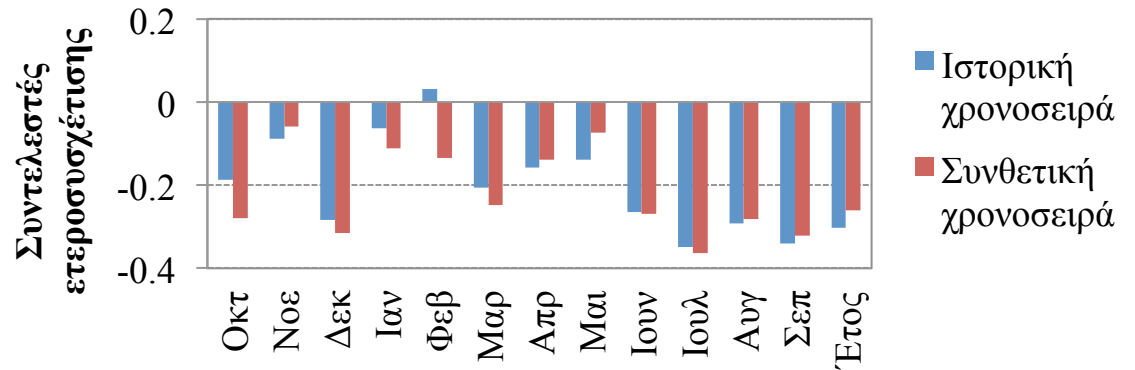


Αποτελέσματα 2^{ης} εφαρμογής μηνιαία-ετήσια κλίμακα

Μηνιαίοι συντελεστές αυτοσυσχέτισης διάρκειας ηλιοφάνειας

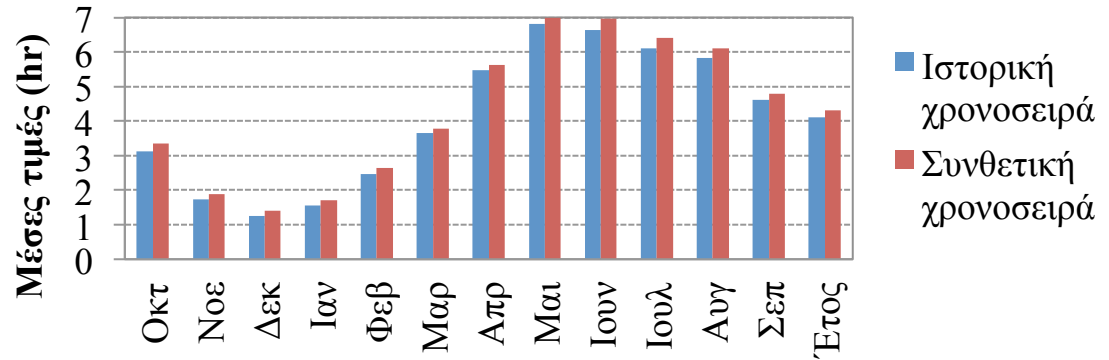


Μηνιαίοι συντελεστές ετεροσυσχέτισης ταχύτητας ανέμου-διάρκειας ηλιοφάνειας

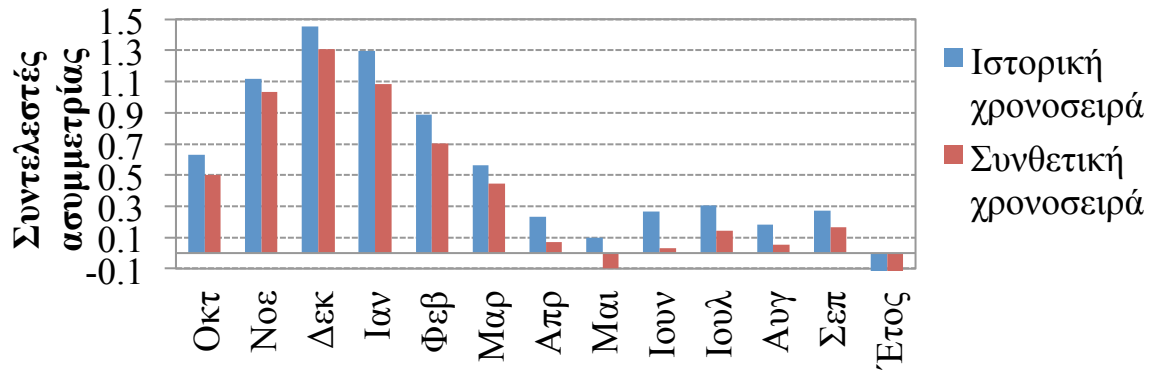


Αποτελέσματα 2^{ης} εφαρμογής ημερήσια κλίμακα

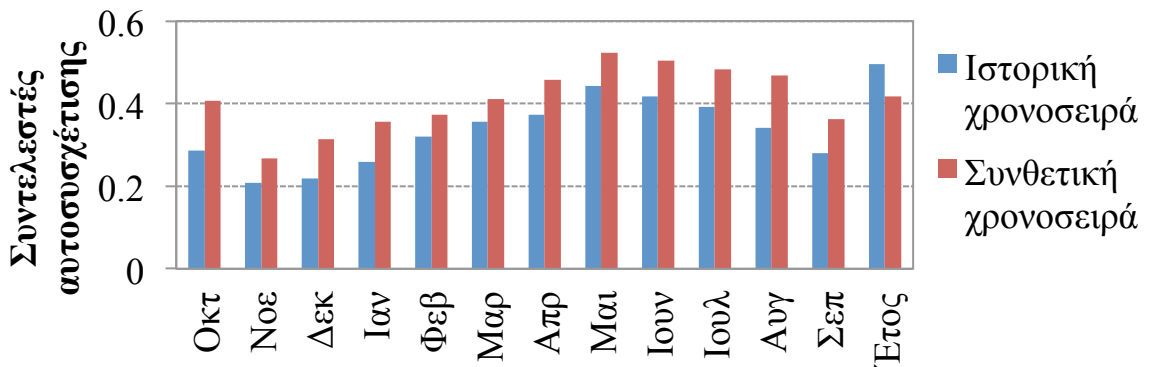
Ημερήσιες μέσες τιμές διάρκειας ηλιοφάνειας



Ημερήσιοι συντελεστές ασυμμετρίας διάρκειας ηλιοφάνειας

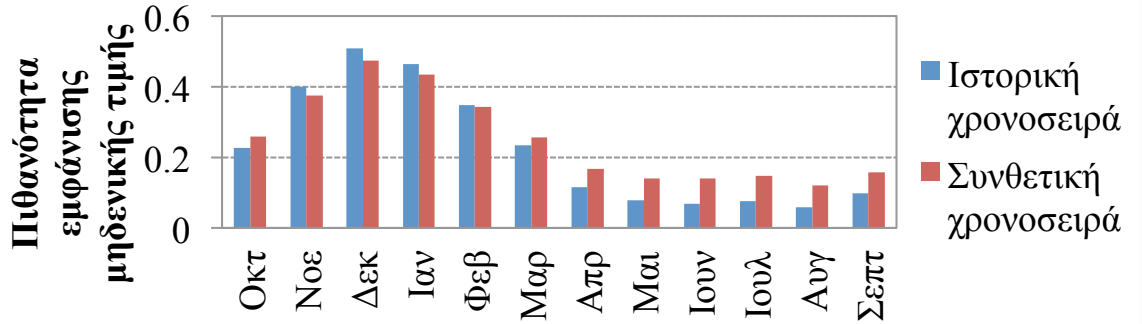


Ημερήσιοι συντελεστές αυτοσυσχέτισης διάρκειας ηλιοφάνειας

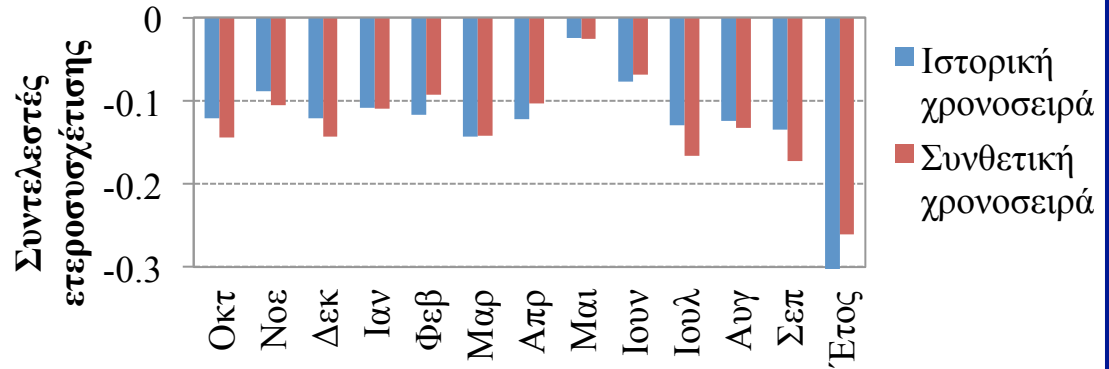


Αποτελέσματα 2^{ης} εφαρμογής ημερήσια κλίμακα

Πιθανότητα εμφάνισης μηδενικών τιμών διάρκειας ηλιοφάνειας



Ημερήσιοι συντελεστές ετεροσυσχέτισης ταχύτητας ανέμου-διάρκειας ηλιοφάνειας



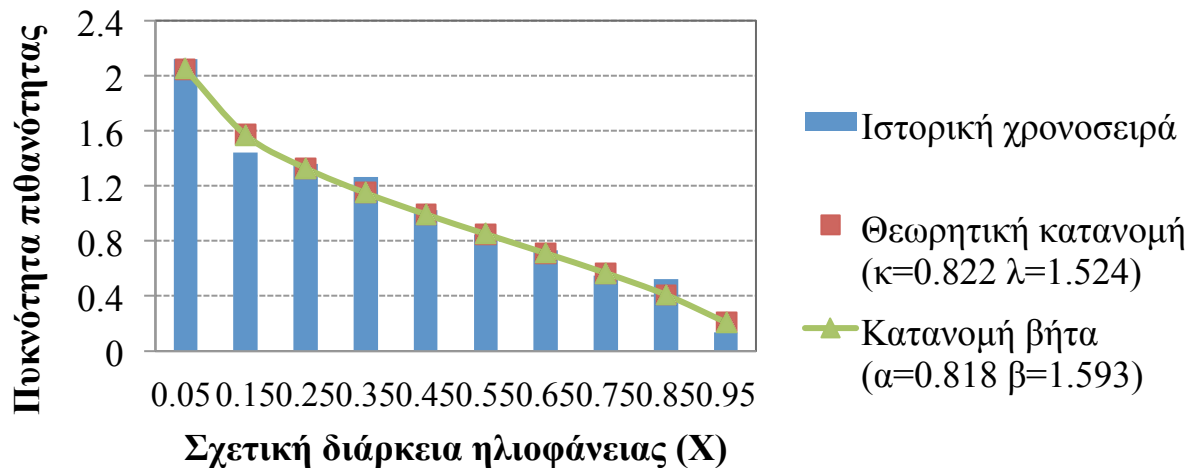
Συμπεράσματα 2^{ης} εφαρμογής

- Γενικά καλή συμπεριφορά στη στοχαστική προσομοίωση σε όλες τις κλίμακες
 - Ικανοποιητική διατήρηση στατιστικών χαρακτηριστικών
 - Ακριβής αναπαραγωγή συντελεστή Hurst
- Διατήρηση ημερήσιας ασυμμετρίας διάρκειας ηλιοφάνειας
- Προβλήματα:
 - Υποεκτίμηση συντελεστή ασυμμετρίας και υπερεκτίμηση συντελεστή αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης διάρκειας ηλιοφάνειας στη μηνιαία κλίμακα
 - Μικρή υπερεκτίμηση συντελεστή αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης διάρκειας ηλιοφάνειας στην ημερήσια κλίμακα
- Ερμηνεία:
 - Η επαναληπτική διαδικασία Monte Carlo και η διαδικασία αναγωγής γίνεται για την λογαριθμική μετατροπή της μεταβλητής

Θεωρητική τεκμηρίωση συνάρτησης κατανομής ηλιοφάνειας

- Ικανοποιητική αναπαραγωγή χαρακτηριστικών διάρκειας ηλιοφάνειας μέσω της λογαριθμικής μετατροπής με την μεταβλητή Y
- Παραδοχή ότι η Y ακολουθεί την κατανομή γάμα
- Αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μεταβλητής X είναι

$$f_x(x) = (1-X)^{\lambda-1} [-\ln(1-X)]^{\kappa-1}$$



- Οι δύο κατανομές σχεδόν πανομοιότυπες
- Πολύ καλή προσαρμογή ιστορικών δεδομένων σε αυτές
- Διάρκειας ηλιοφάνειας προσαρμόζεται καλά στη κατανομή βήτα (Sulaiman *et al.* (1998) και Bashahu and Nsabimana (2005))

Ιστόγραμμα ιστορικών χρονοσειρών-συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας θεωρητικής κατανομής και κατανομής βήτα (σταθμός Eelde, Αύγουστος)

Γενικά συμπεράσματα-προτάσεις

- Μέχρι σήμερα δεν είχε γίνει συστηματική διερεύνηση για την δυναμική Hurst για τις μεταβλητές της ταχύτητας ανέμου και διάρκειας ηλιοφάνειας
- Και οι δύο χαρακτηρίζονται από μακροπρόθεσμη εμμονή με αντιπροσωπευτική τιμή του συντελεστή Hurst 0.84 και για τις δύο
- Απαιτείται επιπλέον διερεύνηση με χρήση σταθμών με μεταγενέστερες χρονικά καταγραφές τα επόμενα χρόνια
- Το πρόγραμμα *Κασταλία* παρουσιάζει καλή συμπεριφορά στη στοχαστική προσομοίωση των δύο μεταβλητών
- Πρόβλημα στην ασυμμετρία της διάρκειας ηλιοφάνειας σε ημερήσια κλίμακα
- Επίλυση προβλήματος με χρήση του προτεινόμενου λογαριθμικού μετασχηματισμού
- Επίλυση μη αποδεκτών αποκλίσεων σε μηνιαία ασυμμετρία, ημερήσιο και μηνιαίο συντελεστή αυτοσυσχέτισης με την ενσωμάτωση του λογαριθμικού μετασχηματισμού στο υπολογιστικό σύστημα
- Με τον τρόπο αυτό, το λογισμικό *Κασταλία* θα υποστηρίζει τη στοχαστική προσομοίωση μεγάλου φάσματος υδρομετεωρολογικών μεταβλητών, στις τρεις χρονικές κλίμακες ενδιαφέροντος

Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας !