Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας
Υδατικών
Πόρων και
Περιβάλλοντος

Στοχαστική Ανάλυση και Προσομοίωση ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας για βιώσιμη παραγωγή ενέργειας

Παρουσίαση Διπλωματική Εργασίας

10 Ιουλίου 2025

Δέσποινα Μπαλαχτάρη

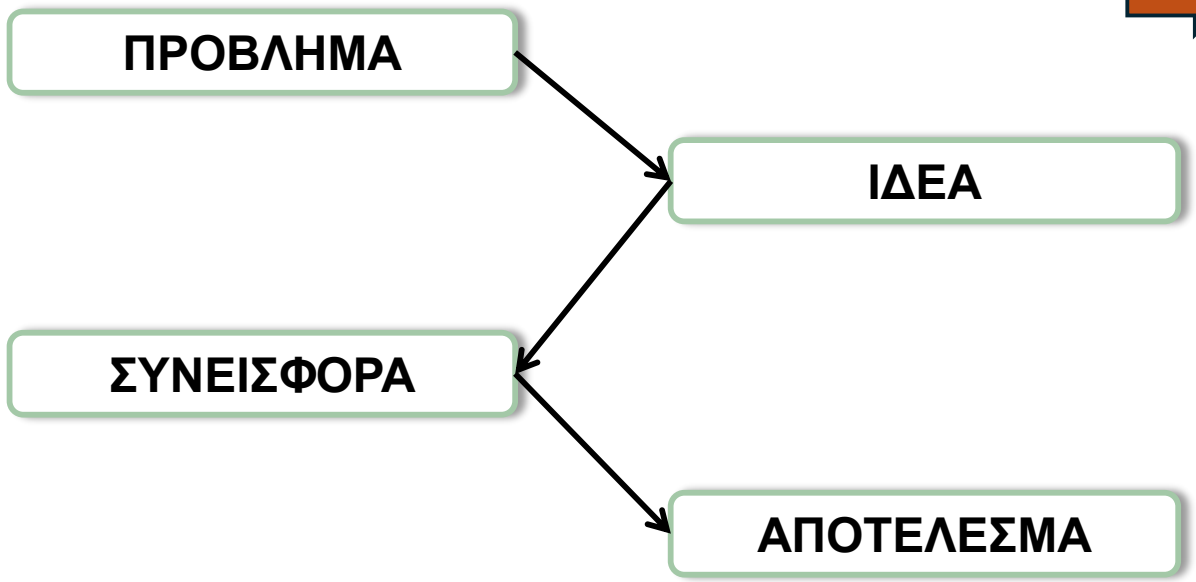
Επιβλέπουσα : Θεανώ Ηλιοπούλου, ΔΡ. ΕΔΙΠ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρόβλεψη και ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων, όπως ο άνεμος και η ηλιακή ακτινοβολία, αποτελούν κρίσιμο εργαλείο στη διαχείριση φυσικών πόρων και την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η **στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση ιστορικών χρονοσειρών** μετεωρολογικών δεδομένων από το αεροδρόμιο Schiphol του Άμστερνταμ, με στόχο την **παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών** που διατηρούν βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά και συμβάλλουν στη βιώσιμη ενεργειακή αξιοποίηση.

Η μελέτη περιλαμβάνει ανάλυση εποχικότητας, διερεύνηση της δομής εξάρτησης και εμμονής, καθώς και εφαρμογή μοντέλων και μεθόδων για την παραγωγή ρεαλιστικών στοχαστικών προσομοιώσεων.



Στοχαστική Ανάλυση Δεδομένων:

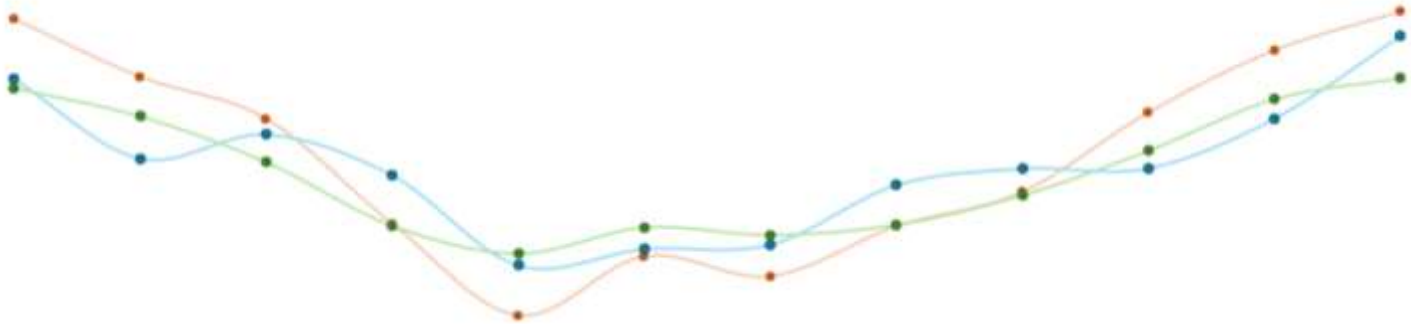
- Επεξεργασία δεδομένων από στοχαστικές (τυχαίες) διαδικασίες
- Στόχος: Εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και πληροφοριών
- Χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα και τυχαιότητα
- Εφαρμογή τεχνικών και εργαλείων ανάλυσης
- Διερεύνηση μοτίβων, τάσεων και σχέσεων βάσει στοχαστικής θεωρίας
- Υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων
- Συμβολή στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων

Στοχαστική Προσομοίωση Δεδομένων:

- Μέθοδοι παραγωγής δεδομένων που μιμούνται πραγματικές διαδικασίες
- Χρήση στοχαστικών μοντέλων
- Επιτρέπει την εξέταση υποθετικών σεναρίων
- Ανάλυση πιθανών αποτελεσμάτων χωρίς ανάγκη πραγματικών δεδομένων
- Δεν απαιτείται αναμονή για την εκδήλωση των γεγονότων

ΠΡΟΒΛΗΜΑ

- ***Κλιματική*** *και* ***μετεωρολογική αβεβαιότητα*** *→ σημαντικός αλλά απρόβλεπτος παράγοντα για τη βιώσιμη ενεργειακή παραγωγή*
- *Μετάβαση σε ένα* ***βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο*** *→ ορθολογική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας*
- ***Αιολική*** *και* ***ηλιακή ενέργεια !*** *λόγω του* ***δυναμικού*** *τους*
- *Η ανάπτυξη κατάλληλων εργαλείων και μεθοδολογιών είναι κρίσιμη για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας*
- ***Στοχαστικές θεωρίες*** *και* ***μοντέλα προσομοίωσης*** *→ αξιόπιστη και αποτελεσματική διαχείριση των προκλήσεων*



ΠΡΟΒΛΗΜΑ → **ΙΔΕΑ**

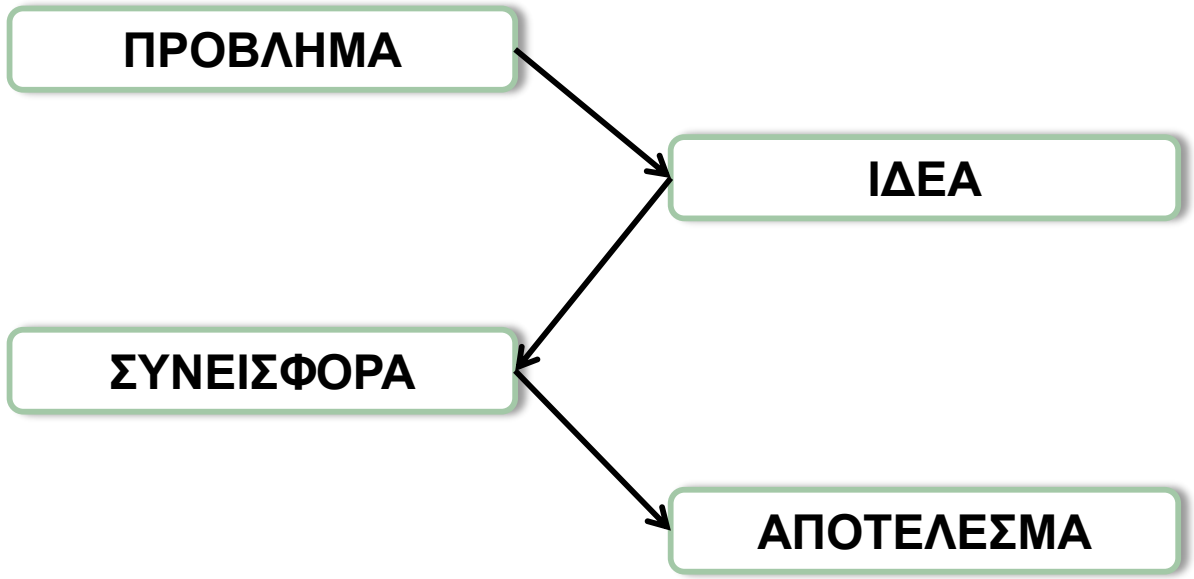
- *Ανάλυση ιστορικών μετεωρολογικών δεδομένων*
  *Αεροδρόμιο **Schiphol (Άμστερνταμ)***
- *Εφαρμογή στοχαστικών μοντέλων →* ***αναπαραγωγή της οριακής κατανομής και της δομής εξάρτησης των δεδομένων***
- ***Δυναμική Hurst-Kolmogorov*** *για την περιγραφή της χρονικής εξάρτησης*
- ***Μοντέλο Συμμετρικού Κυλιόμενου Μέσου (SMA)*** *για την προσομοίωση της στοχαστικής διαδικασίας.*
- ***Δύο μέθοδοι αναδιάταξης*** *→ βελτίωση της προσαρμογής του μοντέλου στα ιστορικά δεδομένα*

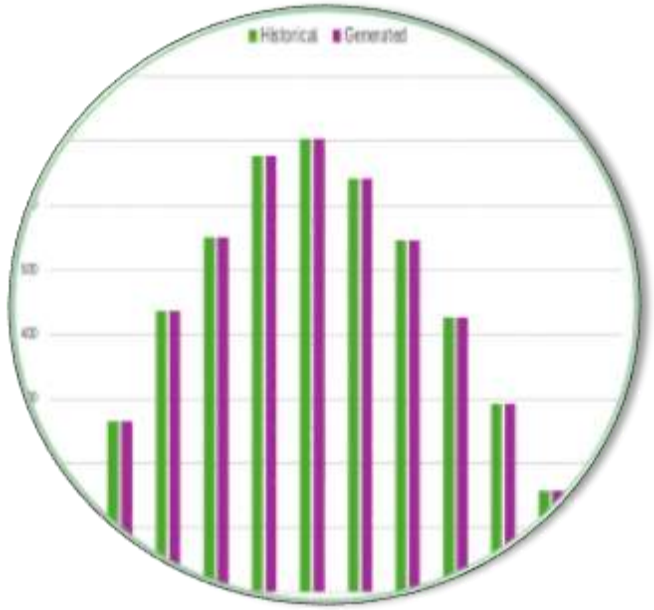
ΠΡΟΒΛΗΜΑ

ΙΔΕΑ

ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ

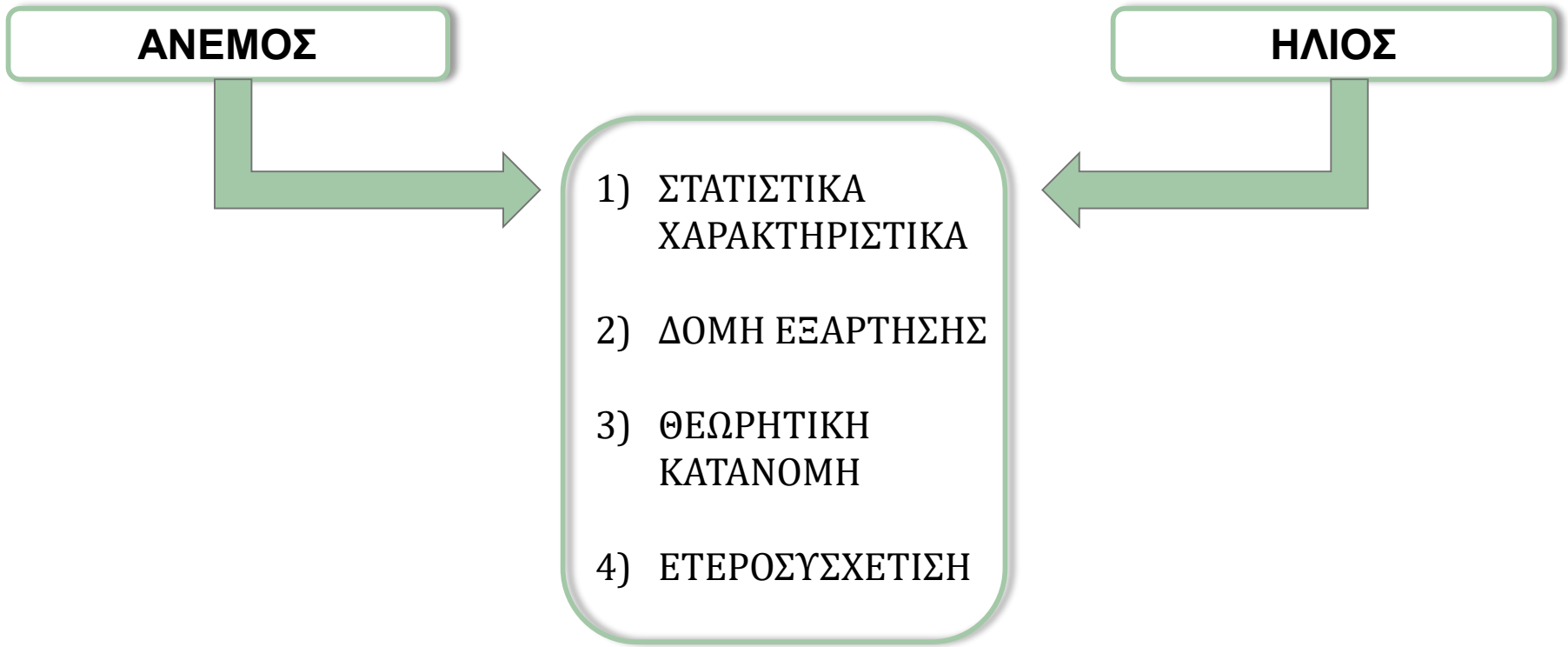
- *Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ✓προσομοίωση πραγματικών δεδομένων*
- *Διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών, της* ***δομής εξάρτησης και της περιθώριας κατανομής των φυσικών διεργασιών***
- *Αντιμετώπιση τεχνικών προκλήσεων, όπως:*
  - *Διατήρηση της* ***ασυμμετρίας*** *(1ο και 2ο βαθμό προσομοίωσης)*
  - *Αντιμετώπιση της ετεροσυσχέτισης μεταξύ μεταβλητών* ***! διαφορετική κατανομή***
  - ***Επέκταση της μεθόδου αναδιάταξης*** *χωρίς αλλοίωση βασικών χαρακτηριστικών των χρονοσειρών*





- *Η εφαρμογή των μεθόδων (μεμονωμένα και συνδυαστικά)* ✓ ***αξιόπιστη μοντελοποίηση της συσχετισμένης συμπεριφοράς των δύο μεταβλητών***
- *Οι τελικές συνθετικές χρονοσειρές είναι κατάλληλες για ταυτόχρονη χρήση σε σενάρια υβριδικών ενεργειακών συστημάτων*
- *Προσφέρουν* ***στατιστικά ρεαλιστικές αναπαραστάσεις*** *των φυσικών φαινομένων*
- *Ενισχύεται η* ***αξιοπιστία*** *στον σχεδιασμό, τη μελέτη και τη διαχείριση* ***ανανεώσιμων πηγών ενέργειας***

Στόχοι ανάλυσης και προσομοίωσης



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

- **Κατανομές Ανέμου:** Οι Shi et al. (2021) παρουσιάζουν τις κύριες θεωρητικές κατανομές (Weibull, Gamma, GEV) για μοντελοποίηση της ταχύτητας ανέμου. Η Weibull κυριαρχεί λόγω ευελιξίας, ενώ η GEV αποδίδει καλύτερα σε περιοχές με σύνθετο ανάγλυφο.
- **Κατανομές Ηλιακής Ακτινοβολίας:** Οι Koudouris et al. (2017) συνέκριναν τις κατανομές Kumaraswamy και Beta, επισημαίνοντας την υπεροχή της πρώτης λόγω καλύτερης προσαρμογής στη στοχαστική φύση του φαινομένου.
- **Μακροπρόθεσμη Εμμονή:** Οι Tsekouras & Koutsoyiannis (2014) και μεταγενέστερες μελέτες επιβεβαιώνουν μακροχρόνιες συσχετίσεις στη συμπεριφορά του ανέμου και της ακτινοβολίας (Hurst > 0.5), ενισχύοντας την ανάγκη για μοντέλα με μακροπρόθεσμη μνήμη.
- **Αλγόριθμος SMA:** Οι Koudouris & Koutsoyiannis (2018) κατέληξαν στην διευρυμένη εκδοχή του μοντέλου SMA, η οποία επιτρέπει τη διατήρηση της 2ης τάξης εξάρτησης και των υψηλότερων στατιστικών ροπών, ενώ οι Tsoukalas et. al. (2018) εισήγαγαν το μοντέλο Symmetric Moving Average (neaRly) To Anything το οποίο προσφέρει επίσης μια γενικευμένη στοχαστική προσέγγιση για τη δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών με αυθαίρετες κατανομές και βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη εξάρτηση, μέσω της σύνδεσης Gaussian και μη-Gaussian διεργασιών με το μοντέλο κατανομής Nataf.
- **Μέθοδοι Αναδιάταξης:** Οι Tsoukalas et. al. (2018) ανέπτυξαν την μέθοδο SPARTA, η οποία προσφέρει μια καινοτόμα προσέγγιση στοχαστικής προσομοίωσης, επιτρέποντας την απευθείας αναπαράσταση χρονοσειρών με οποιαδήποτε κατανομή και δομή εξάρτησης, μέσω του μοντέλου Nataf και υβριδικών Monte Carlo τεχνικών.

Βασικοί Άξονες Ανάλυσης και Προσομοίωσης
Μεταβλητών φυσικών διεργασιών

I. **Εκτιμήσεις βασικών στατιστικών ροπών** των εμπειρικών δεδομένων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία – ανά μήνα.
II. **Τυποποίηση ή κανονικοποίηση** ιστορικών χρονοσειρών.
III. **Εκτίμηση συντελεστή Hurst** μέσω της μεθόδου Κλιμακογράμματος (λογαριθμικό διάγραμμα της διασποράς – χρονικής κλίμακας).
IV. **Προσαρμογή Θεωρητικών κατανομών στις Εμπειρικές** – εκτίμηση παραμέτρων με κριτήρια τρία στατιστικά σφάλματα (MAE, RMSE, LMSE) και την Μέθοδο Μέγιστης Πιθανοφάνειας (βελτιστοποίηση).
V. **Εφαρμογή του Μοντέλου Συμμετρικού Κυλιόμενου Μέσου**, διατηρώντας την παράμετρο Hurst και με στόχο την αναπαραγωγή των μηνιαίων στατιστικών χαρακτηριστικών (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, χρονική ασυμμετρία).
VI. **Παραγωγή** νέων συνθετικών χρονοσειρών και σύγκριση με τα ιστορικά δεδομένα για κάθε μεταβλητή.

Βασικοί Άξονες Ανάλυσης και Προσομοίωσης
Μεταβλητών φυσικών διεργασιών

VII. **Εφαρμογή Μεθόδου Προσομοίωσης (Αναδιάταξης)** με κριτήριο την διατήρηση της περιθώριας κατανομής, μεμονωμένα για κάθε μεταβλητή.

VIII. **Παραγωγή** νέων συνθετικών χρονοσειρών και σύγκριση με τα συνθετικά (από SMA) και ιστορικά δεδομένα για κάθε μεταβλητή.

IX. **Εφαρμογή Μεθόδου Προσομοίωσης (Αναδιάταξης)** με κριτήριο την διατήρηση της ετεροσυσχέτισης των δύο μεταβλητών, όπως αυτή υπολογίστηκε στα ιστορικά δεδομένα.

X. **Παραγωγή** νέων συνθετικών χρονοσειρών και σύγκριση με τα συνθετικά (από αναδιάταξη και από SMA) και ιστορικά δεδομένα για κάθε μεταβλητή.

Τυποποίηση Δεδομένων

Ταχύτητα Ανέμου

Γραμμικός Μετασχηματισμός

$$\underline{y_\tau} = \frac{x_\tau - \mu_\tau}{\sigma_\tau}$$

Όπου:
μ_τ και σ_τ μέση τιμή και τυπική απόκλιση ανά μήνα για κάθε μεταβλητή

Συντελεστής ασυμμετρίας
↳ **έντονες μηνιαίες διακυμάνσεις**

Εξάλειψη **εποχικότητας**

Ηλιακή Ακτινοβολία

Γραμμικός Μετασχηματισμός

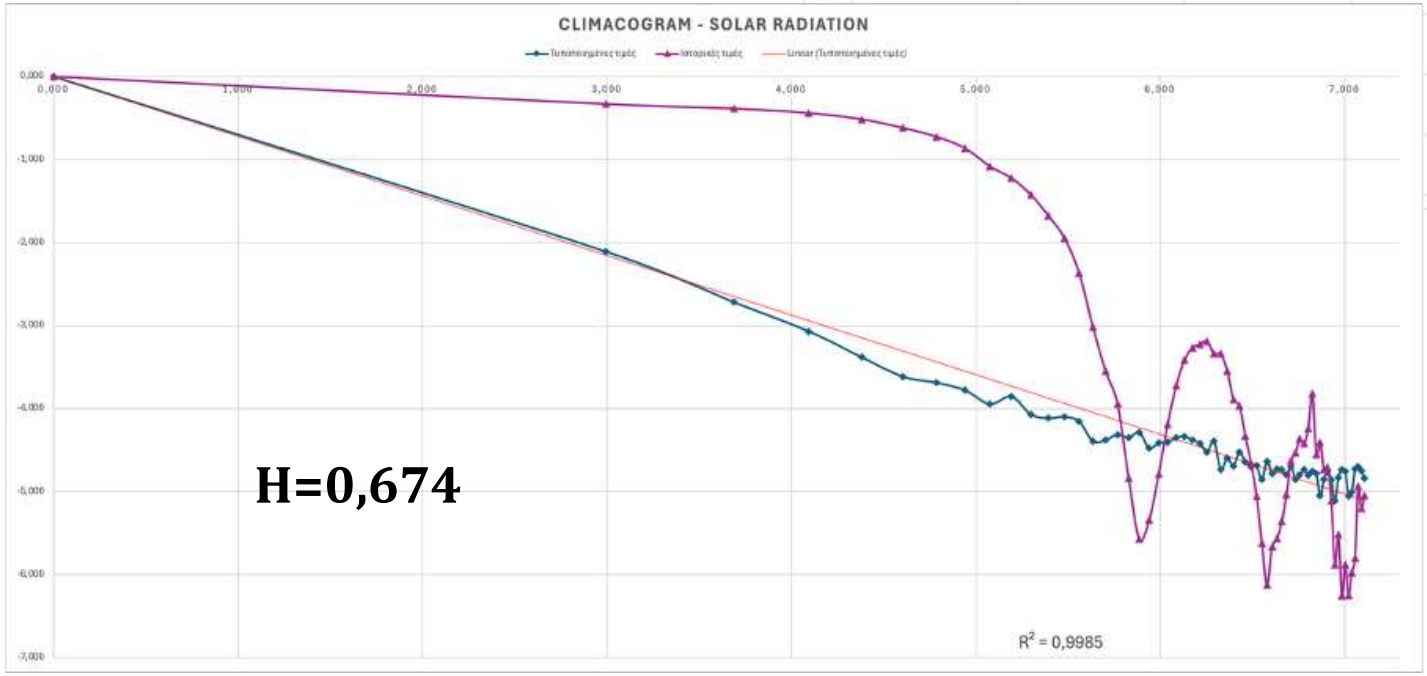
$$\underline{y_\tau} = \frac{x_\tau - \mu_\tau}{\sigma_\tau}$$

Μετασχηματισμός Box Cox

$$y(\lambda) = \begin{cases} \frac{y^\lambda - 1}{\lambda} & , \lambda \neq 0 \\ logy & , \lambda = 0 \end{cases}$$

Μέθοδος Κλιμακογράμματος

H=0,738



H=0,674

$$\gamma(k) = \lambda^2 \left(\frac{a}{k}\right)^{(2-2H)}$$

Μοντέλου Συμμετρικού Κινούμενου Μέσου

Το Μοντέλο - σχήμα **Συμμετρικού Κινούμενου Μέσου (SMA)** περιγράφεται από τον Κουτσογιάννη **(2000)** και μετατρέπει μια ακολουθία «λευκού θορύβου» ν_i σε μια ακολουθία x_i με αυτοσυσχέτιση.

$$x_\tau = \sum_{j=-J}^{J} a_{|j|}\nu_{\tau+j} = a_J\nu_{\tau-J} + \ldots + a_1\nu_{\tau-1} + a_0\nu_\tau + a_1\nu_{\tau+1} + \ldots + a_J\nu_{\tau+J}$$

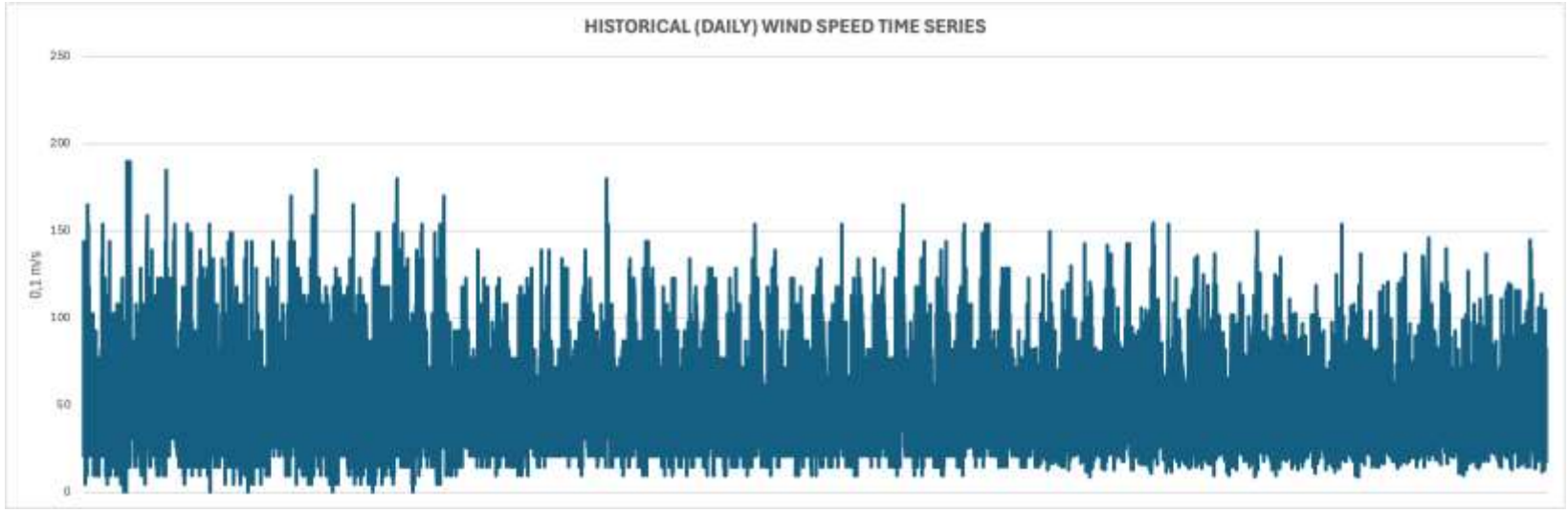
όπου τα $\boldsymbol{a_j}$ είναι συντελεστές στάθμισης (βάρη) και ο αριμός $\boldsymbol{J}$ είναι θεωρητικά άπειρος, αλλά στην πράξη λαμβάνεται ως πεπερασμένη τιμή. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για τυχαίες συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης. Στην περίπτωση απλών μοντέλων κλιμάκωσης, αποδεικνύεται ότι οι συντελεστές στάθμισης είναι:

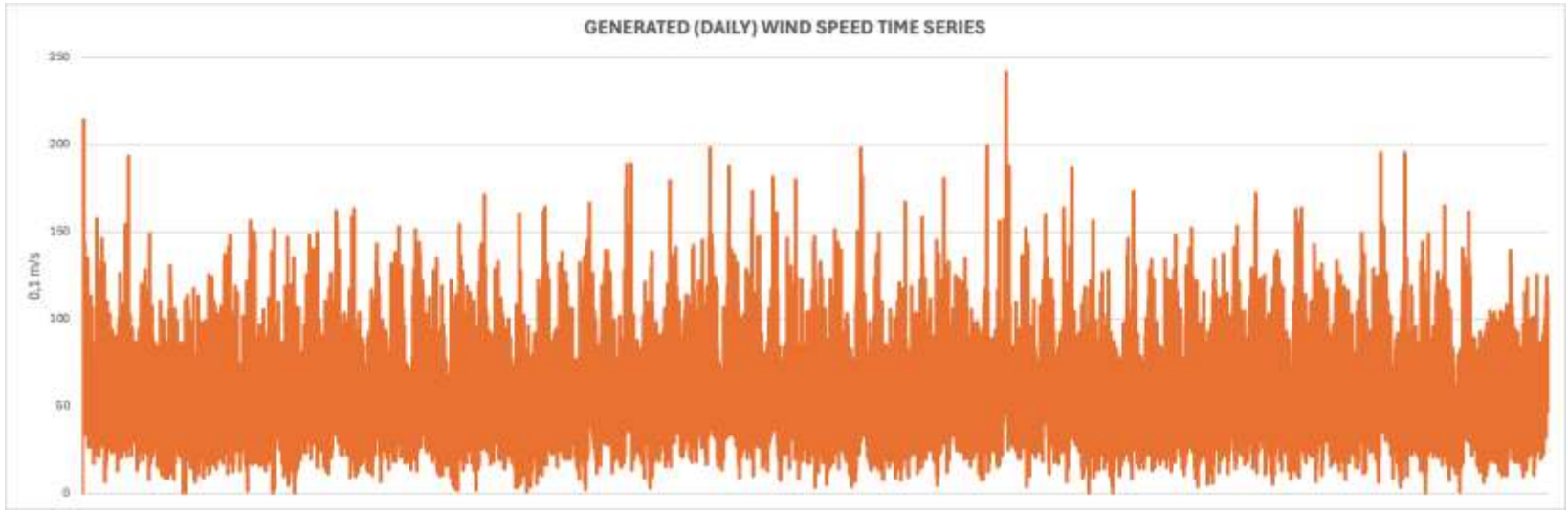
$$a_\eta \approx \frac{\sqrt{(2-2H)\gamma_1}}{3-2H}\left(\left(|\eta+1|^{H+0.5} + |\eta-1|^{H+0.5} - 2|\eta|^{H+0.5}\right)\right)$$

Το μοντέλο μπορεί επίσης να διατηρήσει τον συντελεστή ασυμμετρίας $C_s^{(x)}$ των x_i δεδομένου ότι η ακολουθία «λευκού θορύβου» ν_i έχει αντίστοιχα συντελεστή ασυμμετρίας $C_v^{(x)}$, σύμφωνα με την σχέση:

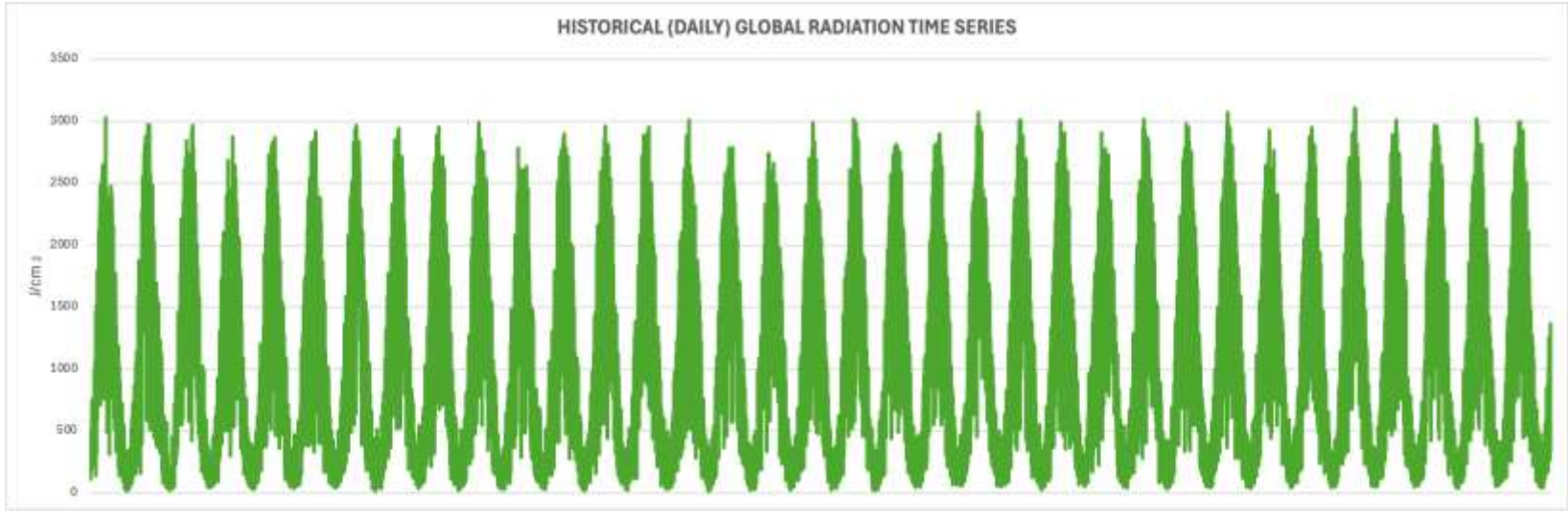
$$\left(a_0^3 + 2\sum_{j=1}^{q} a_j^3\right) C_S^{(v)} = C_S^{(x)}\gamma(1)^{3/2}$$

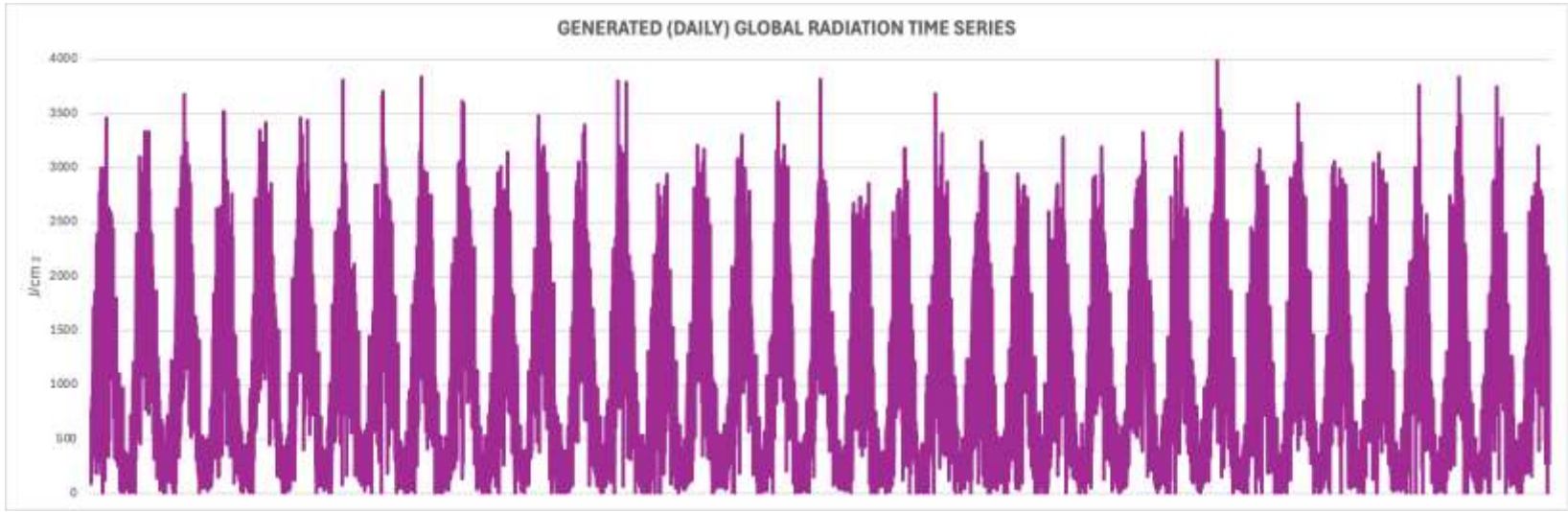
Σύγκριση Ιστορικών – Συνθετικών Χρονοσειρών





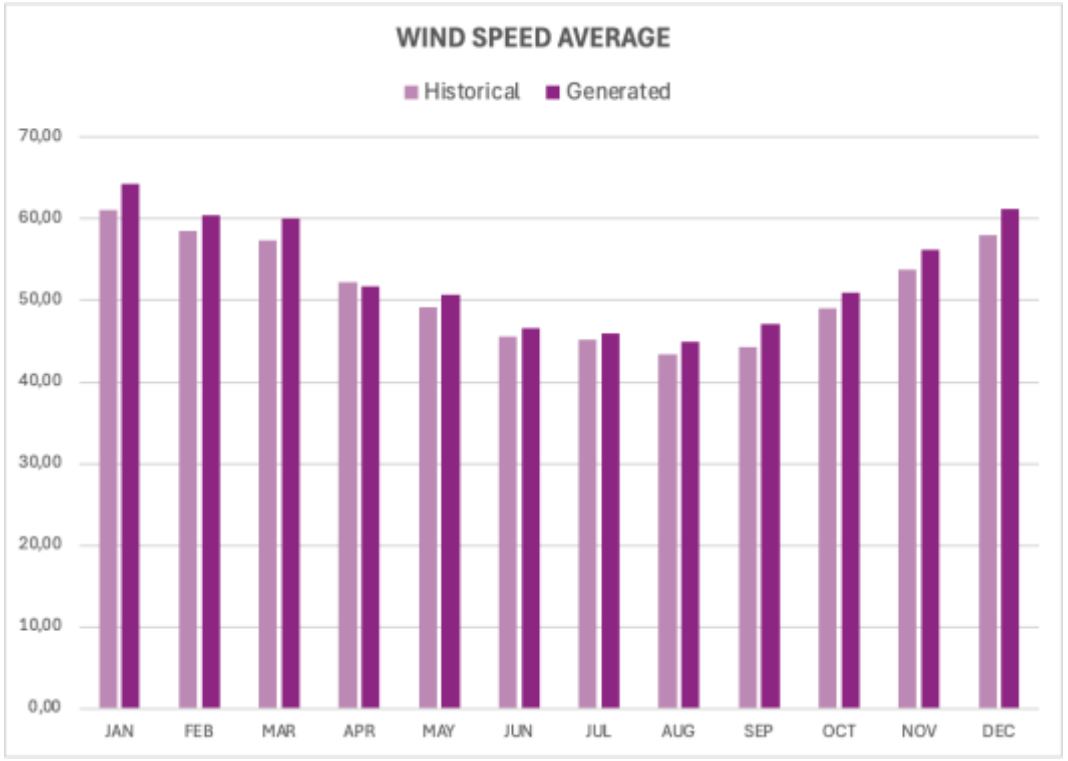
Σύγκριση Ιστορικών – Συνθετικών Χρονοσειρών

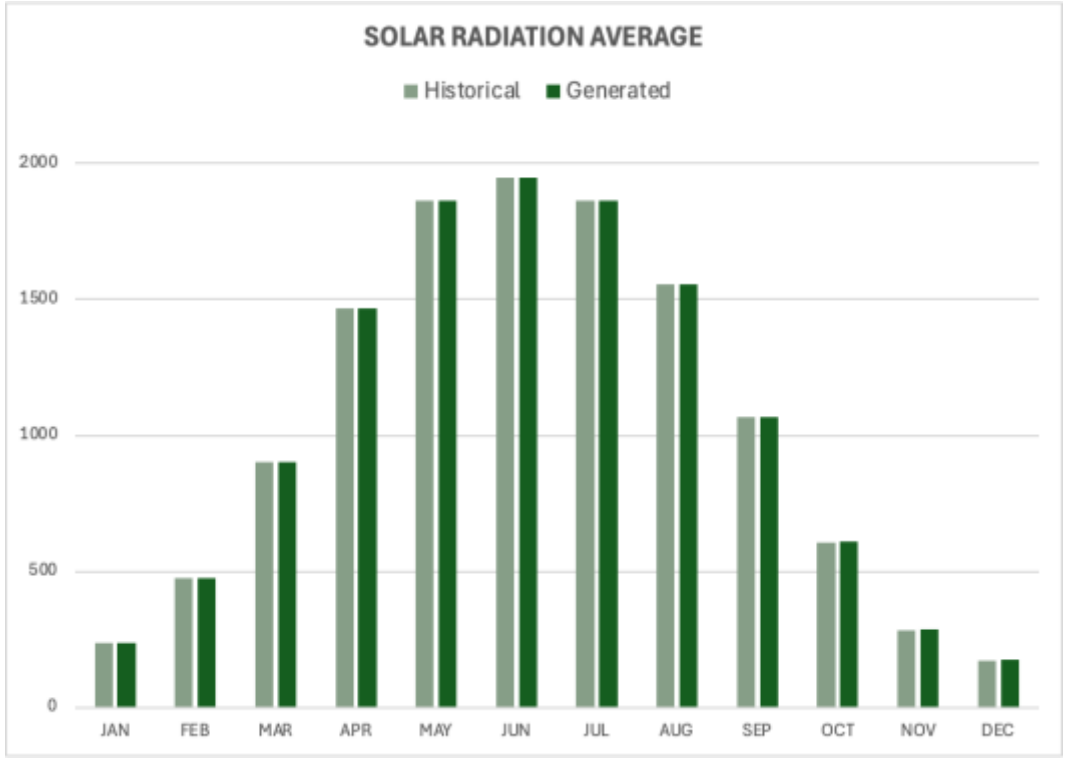




Μέση Τιμή Ανά Μήνα

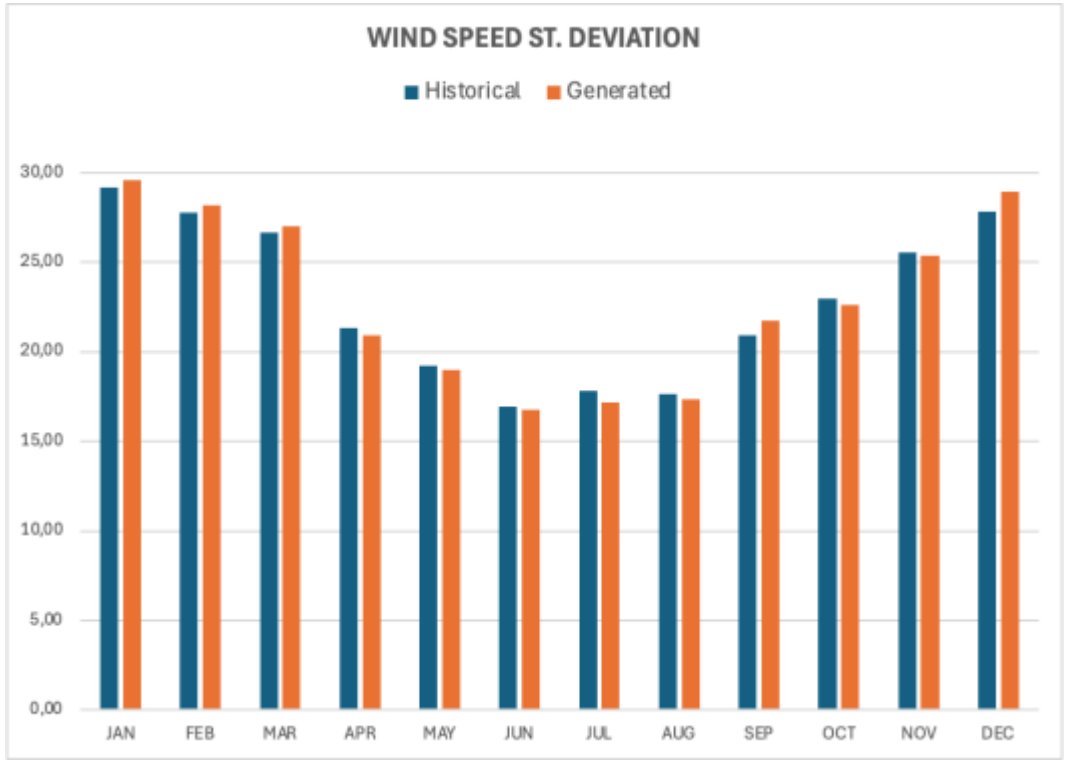
Συγκρίνοντας ιστορικές και συνθετικές τιμές

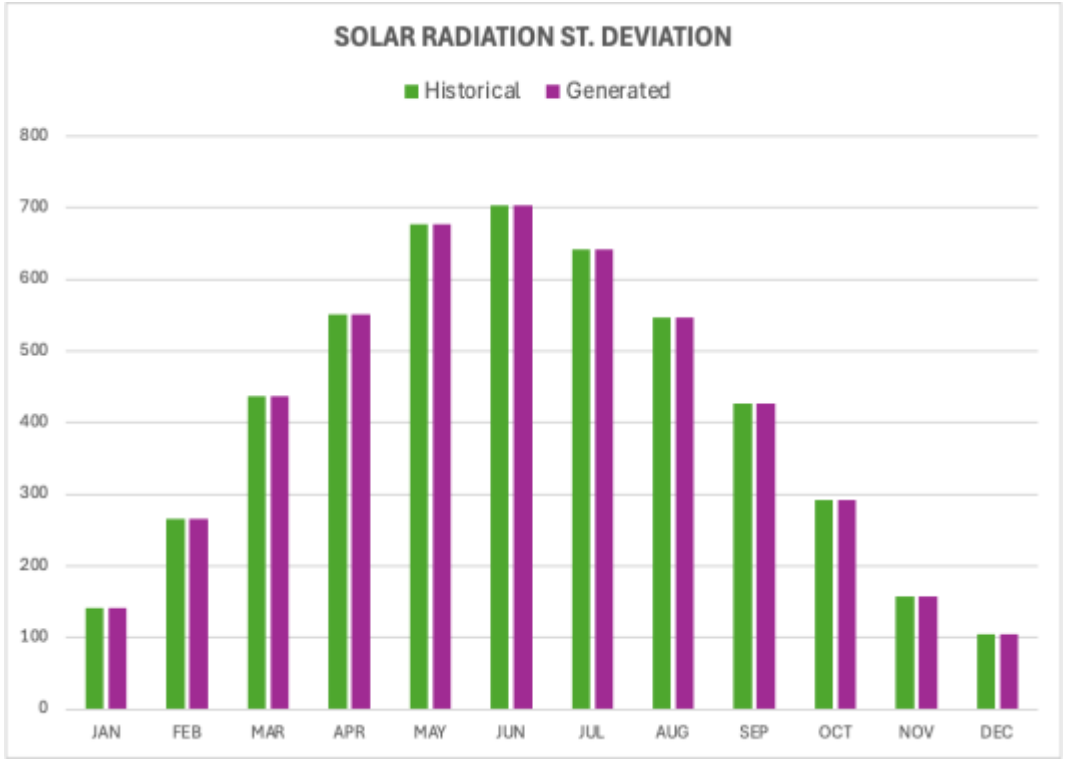




Τυπική Απόκλιση Ανά Μήνα

Συγκρίνοντας ιστορικές και συνθετικές τιμές

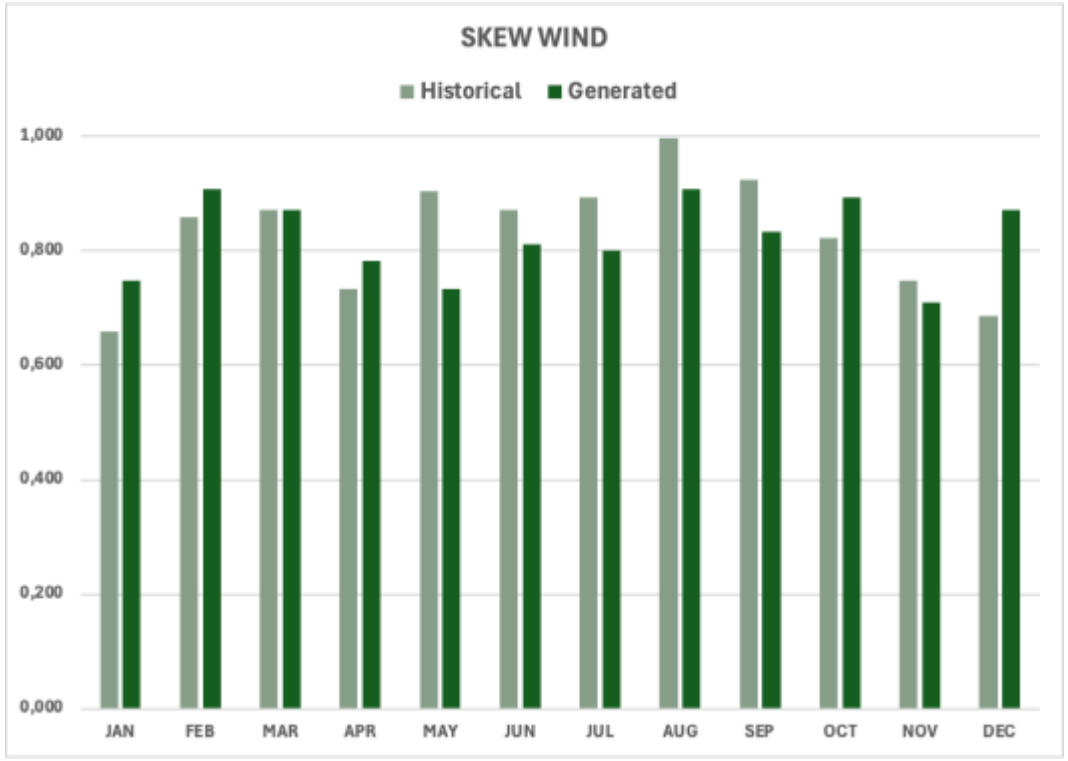


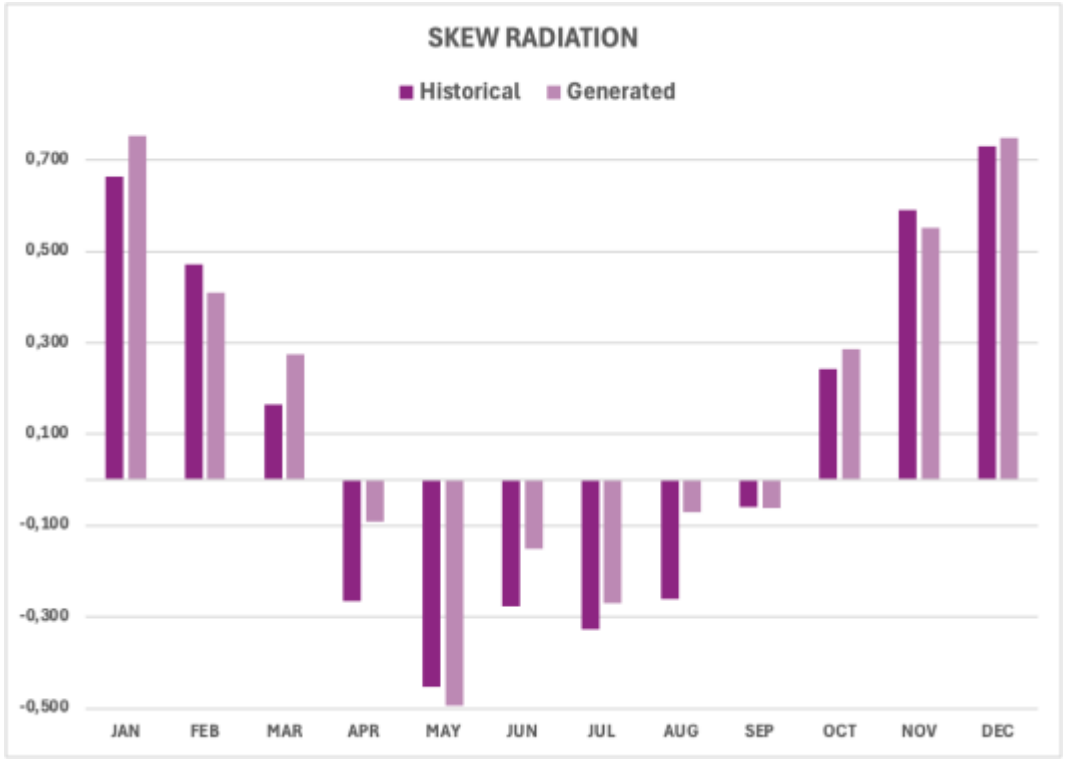


Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Χρονική Ασυμμετρία Ανά Μήνα
Συγκρίνοντας ιστορικές και συνθετικές τιμές





Εξαιρετική ακρίβεια (ελάχιστες έως αμελητέες αποκλίσεις) ικανοποιητική προσέγγιση και προσομοίωση των (ιστορικών) μηνιαίων στατιστικών ροπών

Προσαρμογή Θεωρητικών Κατανομών

Άνεμος

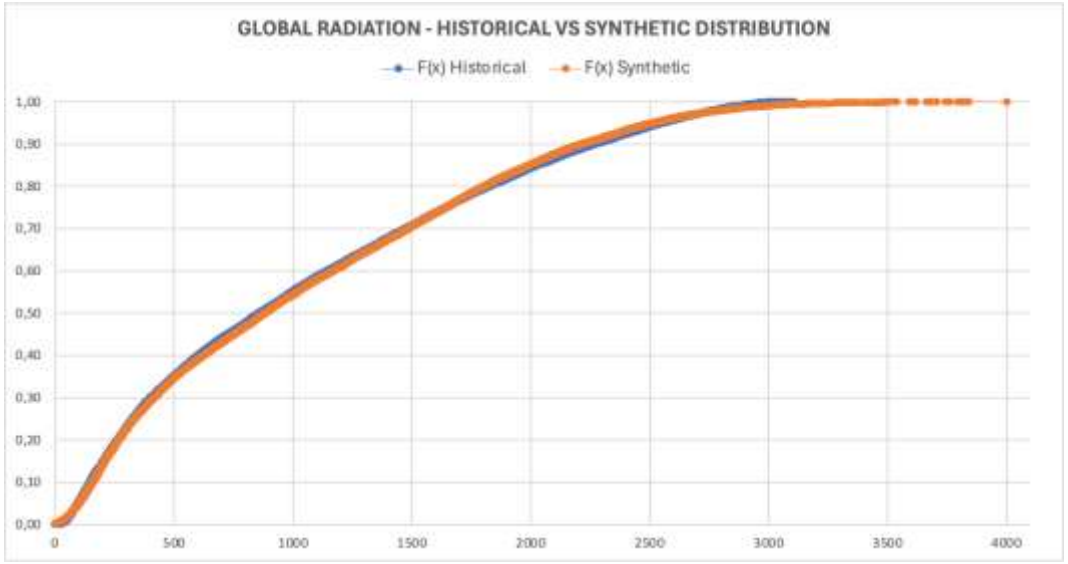
- Weibull Κατανομή
- Gamma Κατανομή

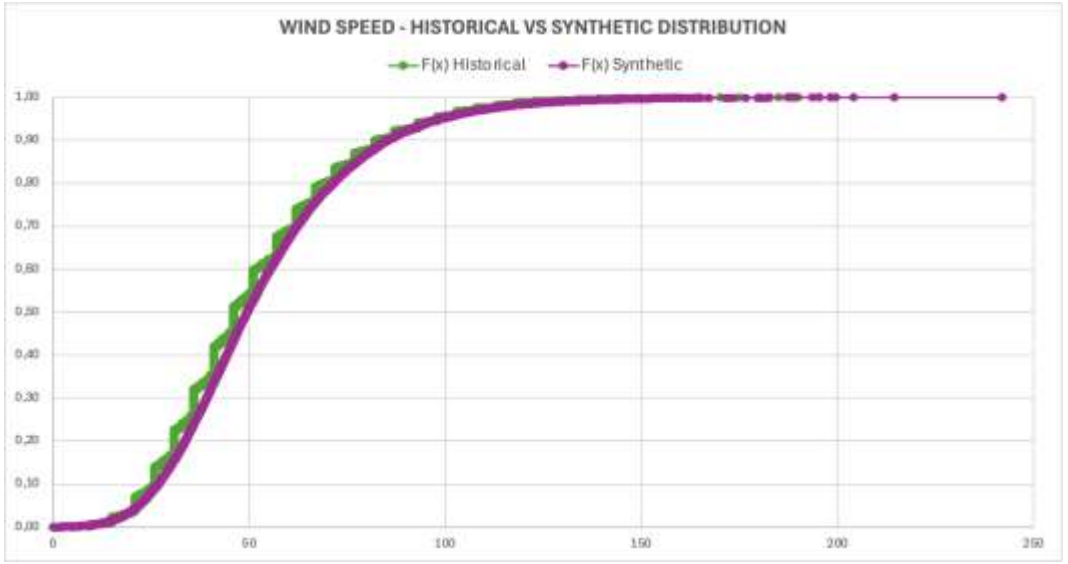
Ήλιος

- Kumaraswamy Κατανομή
- Beta Κατανομή

Κριτήρια

- Mean Average Error
- Mean Logarithmic Square Error
- Root Mean Square Error
- Maximum Likelihood Method





Μέθοδος Αναδιάταξης με διατήρηση της περιθώριας κατανομής με αυθαίρετη δομή εξάρτησης

Η **Μέθοδος Προσομοίωσης που αναδιατάσσει** χρονοσειρές με αυθαίρετη δομή κατανομής και εξάρτησης περιγράφεται αναλυτικά στις τελευταίες εκδόσεις του δυνατότητα παραγωγής συνθετικών ακολουθιών (μήκους n) από μια στοχαστική ανέλιξη *"Stochastics of Hydroclimatic Extremes - A Cool Look at Risk"* - **Κουτσογιάννης (2024).**

Προσεγγίζει με ευκολία την πολύπλοκη συμπεριφορά των φυσικών φαινομένων, **με τα εξής βήματα:**

1. **Σύνθεση** μιας ακολουθίας μεταβλητών z_i' η οποία **επαληθεύει την απαιτούμενη δομή εξάρτησης και τα στατιστικά χαρακτηριστικά** μέχρι την τρίτη κεντρική ροπή (χρονική ασυμμετρία).

2. **Δημιουργία ακολουθίας ανεξάρτητων μεταβλητών** y_i από την καθορισμένη περιθώρια κατανομή.

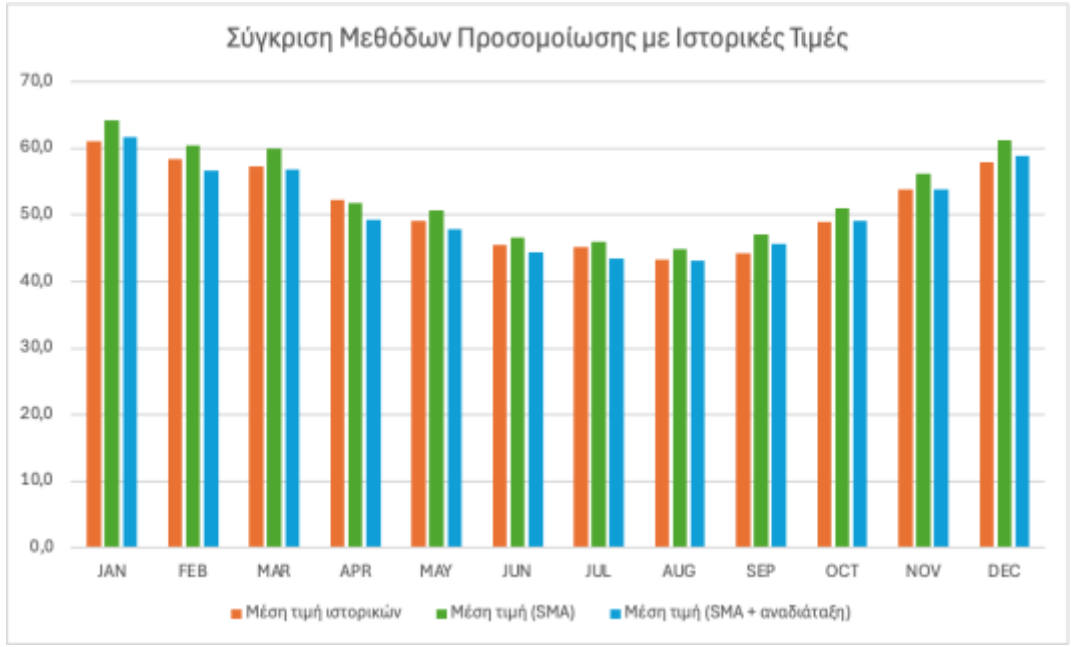
Μέθοδος Αναδιάταξης με διατήρηση της οριακής κατανομής και αυθαίρετη δομή εξάρτησης

3. **Ορίζουμε τις θέσεις – τάξεις (Ranks) R_i'** όλων των z_i', όπου $1 \leq R_i' \leq n$.
4. **Για κάθε z_i' βρίσκουμε την τιμή $z_i = y_{(R_i':n)}$** δηλ. η τιμή στην ακολουθία των y_i με «τάξη» R_i'. **Η ακολουθία z_i είναι η ζητούμενη αναδιαταγμένη κατανομή.**

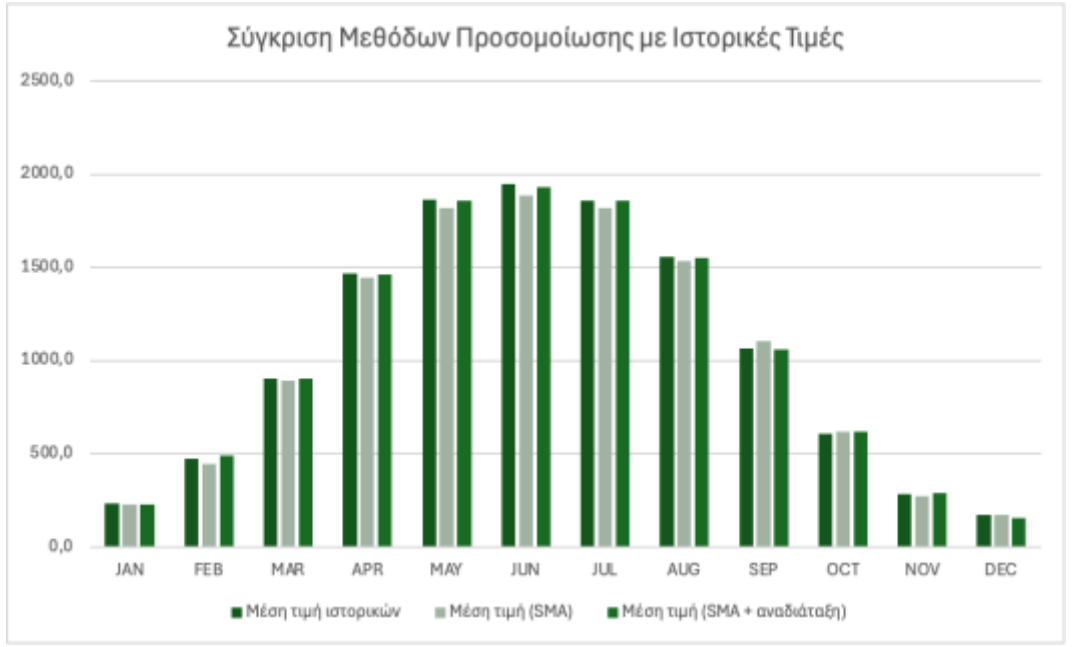
Η ακολουθία z_i αποτελείται από όλα τα y_i, αλλά αναδιαταγμένα έτσι ώστε να παρουσιάζουν εξάρτηση στο χρόνο. Είναι δεδομένο και λογικό ότι, η περιθώρια κατανομή του z_i ταυτίζεται με εκείνη του y_i, δηλαδή με την απαιτούμενη. Η δομή της εξάρτησης αναμένεται να «παραμορφωθεί» ελαφρώς, λόγω της αντικατάστασης του z_i' με το z_i, αλλά δεδομένου ότι το z_i έχει την ίδια δομή «τάξεων» (Ranks) με το z_i', η παραμόρφωση θα είναι αμελητέα.

Μέση Τιμή Ανά Μήνα

Συγκρίνοντας ιστορικές, συνθετικές (SMA) και συνθετικές – αναδιαταγμένες τιμές



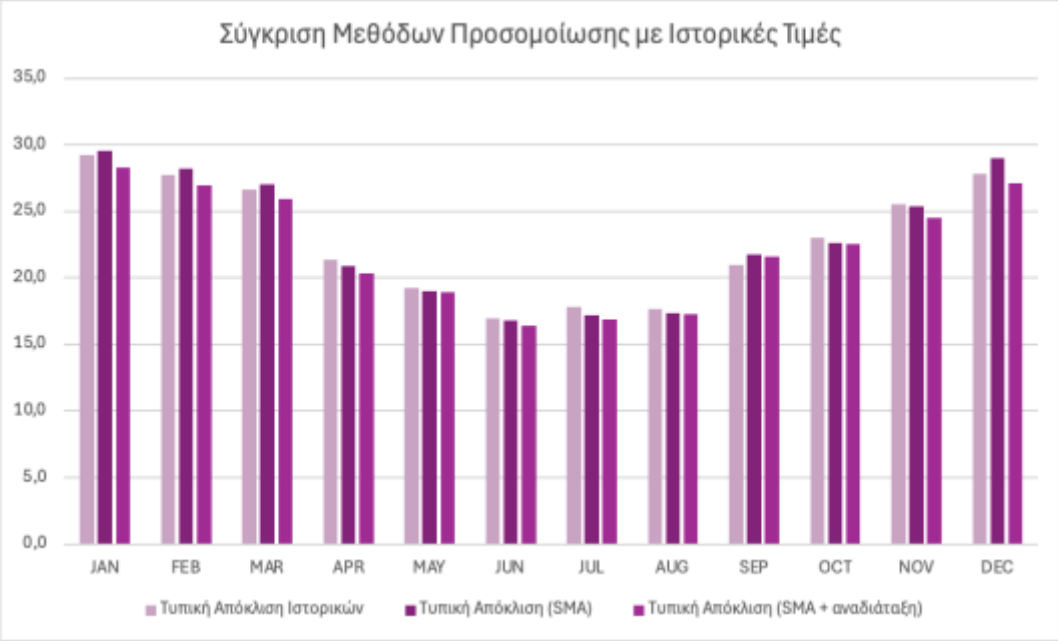
Ταχύτητα Ανέμου



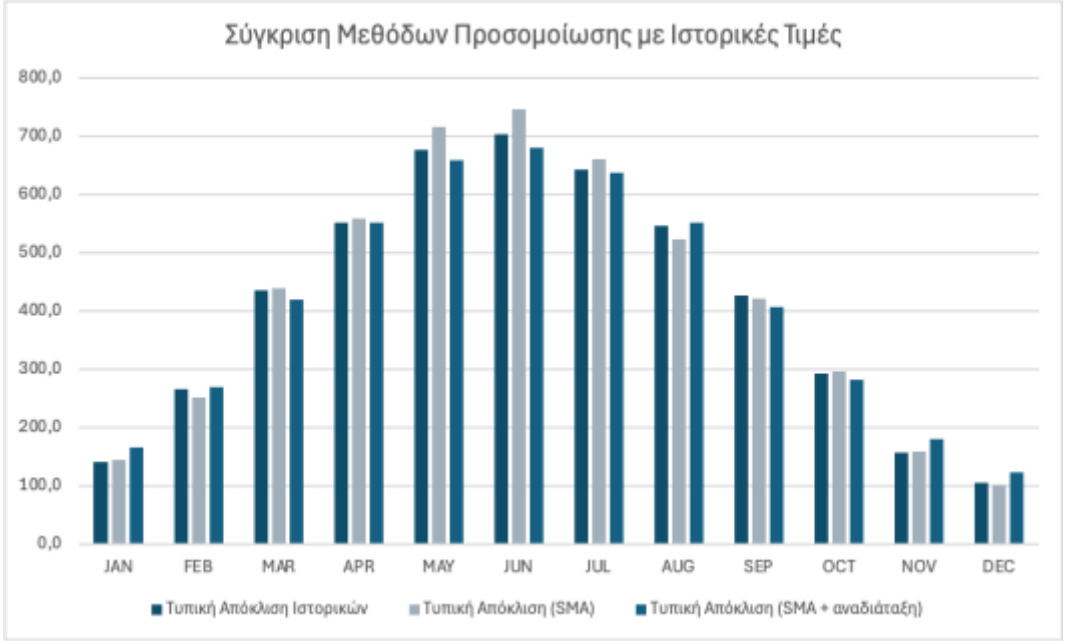
Ηλιακή Ακτινοβολία

Τυπική Απόκλιση Ανά Μήνα

Συγκρίνοντας ιστορικές, συνθετικές (SMA) και συνθετικές – αναδιαταγμένες τιμές



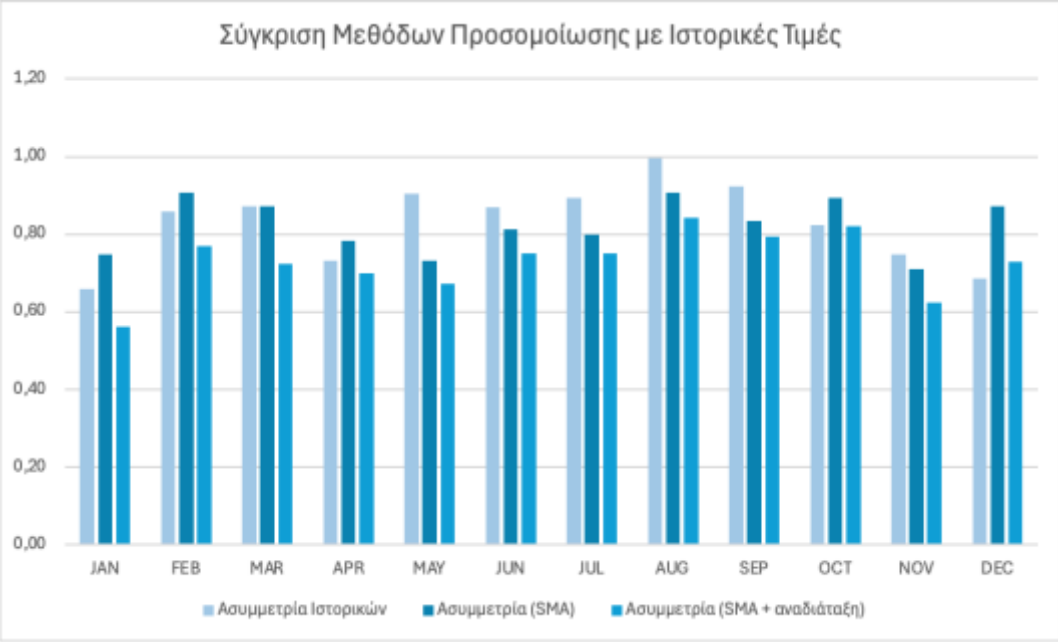
Ταχύτητα Ανέμου



Ηλιακή Ακτινοβολία

Ασυμμετρία Ανά Μήνα

Συγκρίνοντας ιστορικές, συνθετικές (SMA) και συνθετικές – αναδιαταγμένες τιμές



Ταχύτητα Ανέμου

Ηλιακή Ακτινοβολία

Ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσέγγιση των μηνιαίων στατιστικών χαρακτηριστικών – ιδιαίτερα σε σχέση με τα αποτελέσματα του SMA. Η διατήρηση του συντελεστή ασυμμετρίας αποτελεί πρόκληση, ωστόσο δεν καθιστά ανεπιτυχή την προσομοίωση.

Μέθοδος Αναδιάταξης με διατήρηση της ετεροσυσχέτισης δύο μεταβλητών

Η **Μέθοδος Προσομοίωσης που αναδιατάσσει** χρονοσειρές δύο ή περισσότερων μεταβλητών με ορισμένη δομή κατανομής και εξάρτησης περιγράφεται αναλυτικά στις τελευταίες εκδόσεις του *"Stochastics of Hydroclimatic Extremes - A Cool Look at Risk"* - **Κουτσογιάννης (2024)** και εξηγεί με απλότητα την δυνατότητα παραγωγής συνθετικών ακολουθιών με γνώμονα την διατήρηση του συντελεστή ετεροσυσχέτισής τους.

Με τα βήματα εφαρμογής να είναι τα εξής:

1. **Σύνθεση** μιας ακολουθίας μεταβλητών z_i'η οποία **επαληθεύει την απαιτούμενη δομή εξάρτησης και τα στατιστικά χαρακτηριστικά** μέχρι την τρίτη κεντρική ροπή (ασυμμετρία).

Μέθοδος Αναδιάταξης με διατήρηση της ετεροσυσχέτισης δύο μεταβλητών

2. Ορίζουμε μια ακολουθία μεταβλητών z_i' ως γραμμικό συνδυασμό των x_i και y_i, δηλαδή:

$$\underline{z_i}' = r \cdot \underline{x_i} + \sqrt{1 - r^2} \cdot \underline{y_i}$$

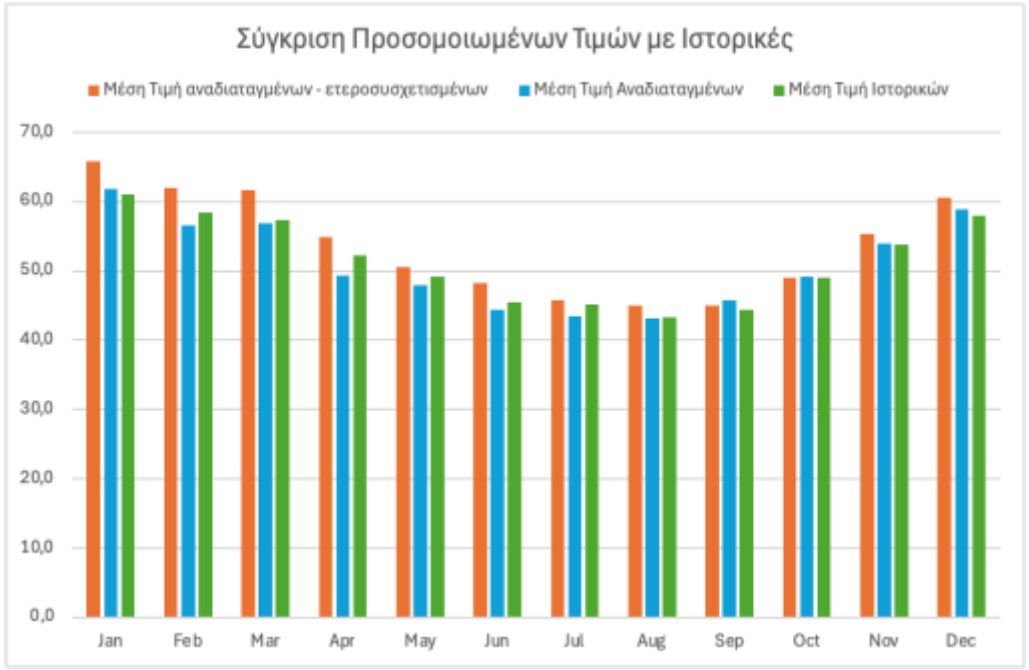
3. Ορίζουμε τις θέσεις – τάξεις (Ranks) R_i' όλων των z_i', όπου $1 \le R_i' \le n$.

4. Για κάθε z_i' βρίσκουμε την τιμή $z_i = y_{(R_i':n)}$ δηλ. η τιμή στην ακολουθία των y_i με «τάξη» R_i'. **Η ακολουθία των ζευγών x_i, z_i είναι η ζητούμενη.**

Αξίζει να σημειωθεί, πως η συγκεκριμένη μέθοδος διερευνήθηκε περαιτέρω για την περίπτωση όπου δύο ή περισσότερες ακολουθίες μεταβλητών, δεν ακολουθούν την ίδια περιθώρια κατανομή.

Μέση Τιμή Ανά Μήνα

Συγκρίνοντας ιστορικές, συνθετικές αναδιαταγμένες και συνθετικές – αναδιαταγμένες αλλά και ετεροσυσχετισμένες τιμές

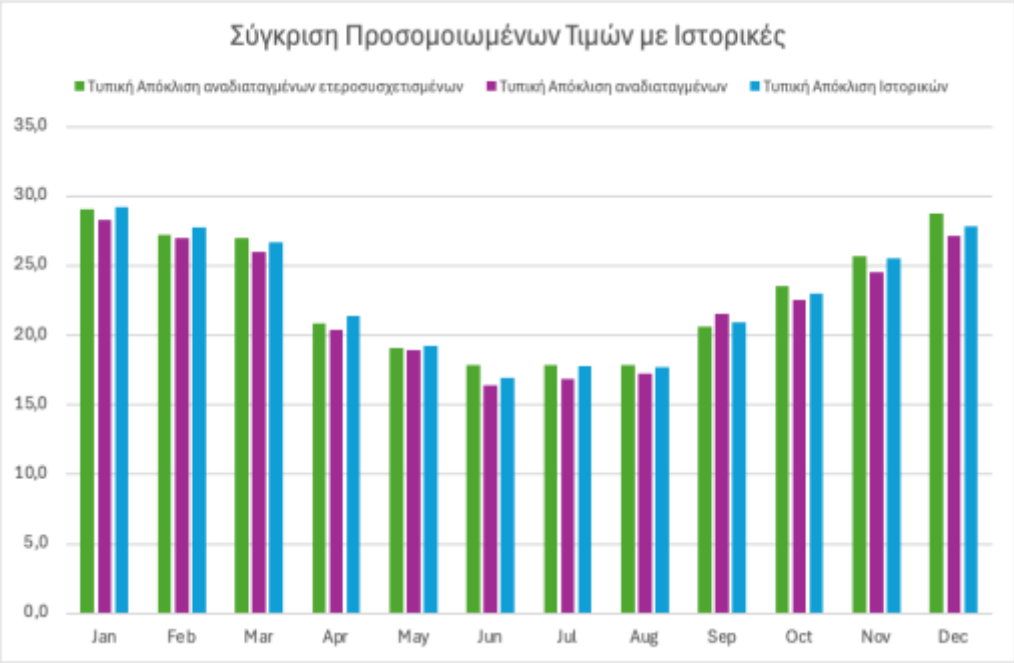


Ταχύτητα Ανέμου

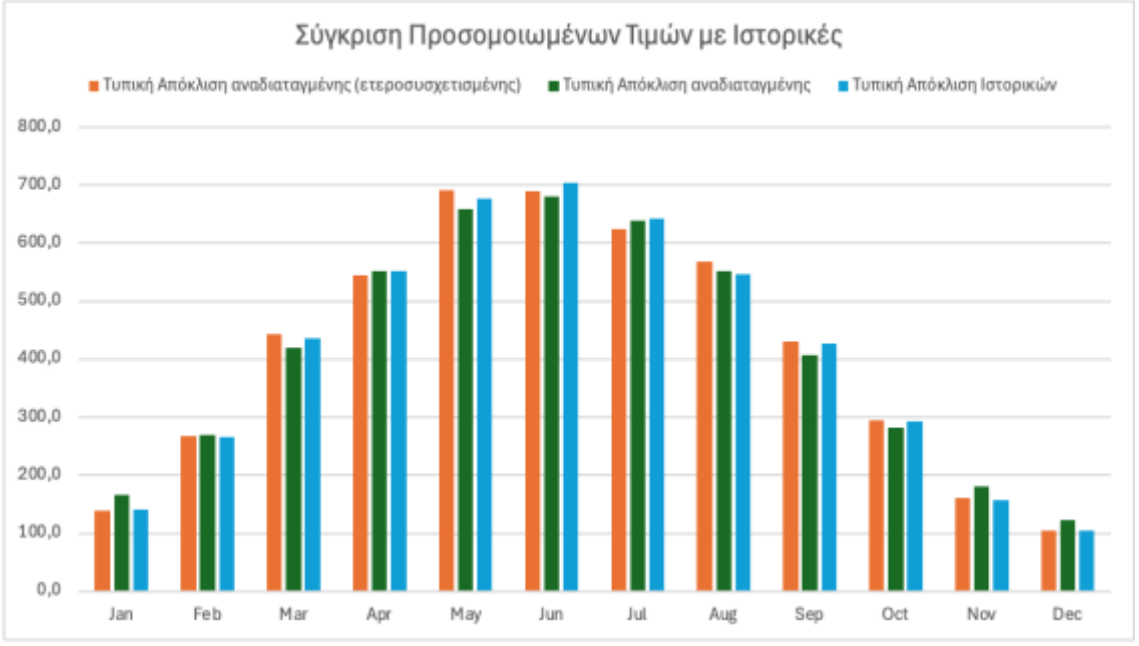
Ηλιακή Ακτινοβολία

Τυπική Απόκλιση Ανά Μήνα

Συγκρίνοντας ιστορικές, συνθετικές αναδιαταγμένες και συνθετικές – αναδιαταγμένες αλλά και ετεροσυσχετισμένες τιμές



Ταχύτητα Ανέμου



Ηλιακή Ακτινοβολία

Ασυμμετρία Ανά Μήνα

Συγκρίνοντας ιστορικές, συνθετικές αναδιαταγμένες και συνθετικές – αναδιαταγμένες αλλά και ετεροσυσχετισμένες τιμές

Ταχύτητα Ανέμου

Ηλιακή Ακτινοβολία

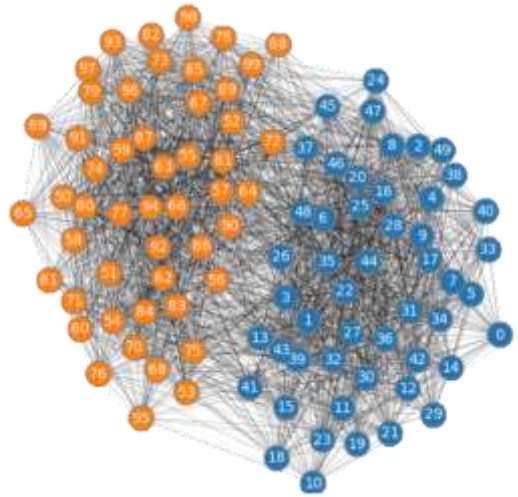
Η αναπαραγωγή της ετεροσυσχέτισης των δύο φυσικών διεργασιών συμβάλλει στην – κατά την πλειοψηφία των περιπτώσεων - καλύτερη προσέγγιση και προσομοίωση των ιστορικών τιμών… ➤ Επετεύχθη καλύτερη ακρίβεια σε πολλά σημεία σύγκρισης.

Δοκιμές προσαρμογής Μεθόδου Αναδιάταξης με διατήρηση της ετεροσυσχέτισης δύο μεταβλητών διαφορετικής κατανομής

Η μέθοδος αναδιάταξης με κριτήριο την ετεροσυσχέτιση δύο μεταβλητών προϋποθέτει τα μελετώμενα μεγέθη να ακολουθούν την ίδια κατανομή.
→**Διερευνήθηκε μαθηματικά** η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου **για περιπτώσεις μεταβλητών με διαφορετικές κατανομές.**

Για ακολουθίες ίδιας κατανομής:

$$\underline{z} = r \cdot \underline{x} + \sqrt{1 - r^2} \cdot \underline{y}$$



Για ακολουθίες διαφορετικής κατανομής:

$$\underline{z} = r \cdot \underline{x} + \sqrt{\frac{\boldsymbol{\sigma_x^2}}{\boldsymbol{\sigma_y^2}}(1 - r^2)} \cdot \underline{y}$$

Δοκιμές προσαρμογής Μεθόδου Αναδιάταξης με διατήρηση της ετεροσυσχέτισης δύο μεταβλητών διαφορετικής κατανομής

Υλοποίηση Δοκιμών Monte Carlo με μεταβλητές διαφορετικών κατανομών (Gamma, Normal) και τυχαίο συντελεστή συσχέτισης.

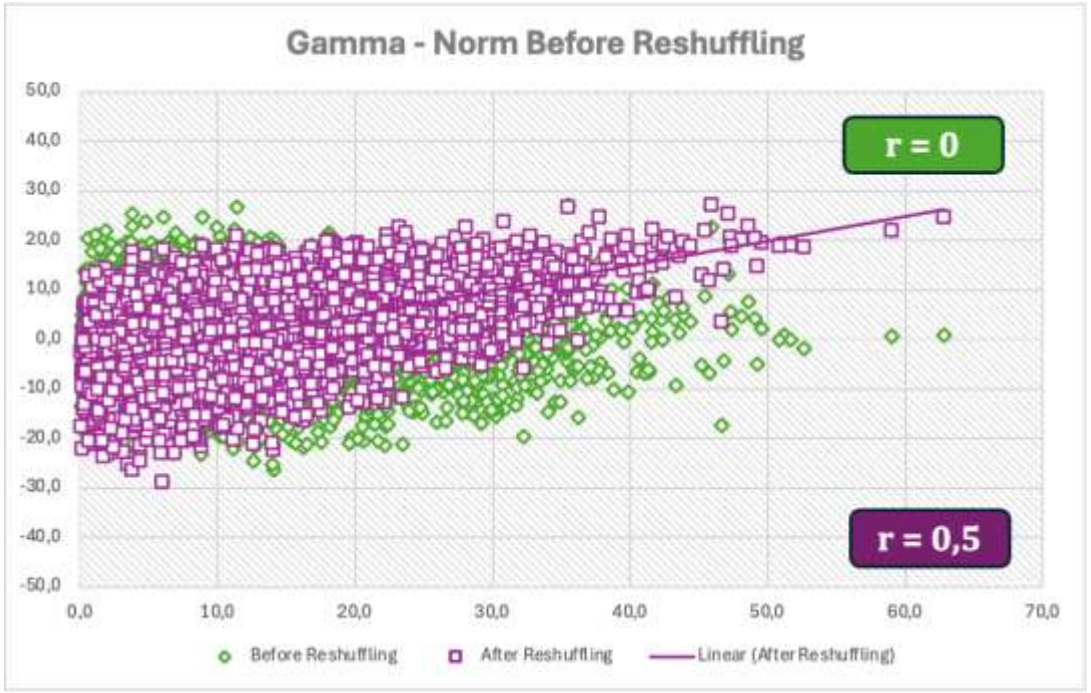
Gamma – Normal
r = 0,50

Gamma – Normal
r = 0,85

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Δοκιμές προσαρμογής Μεθόδου Αναδιάταξης με διατήρηση της ετεροσυσχέτισης δύο μεταβλητών διαφορετικής κατανομής



Ικανοποιητική προσέγγιση, επιβεβαιώνει την μεταξύ τους εξάρτηση και προσαρμόζεται καλύτερα στην εξίσωση ετεροσυσχέτισης.

Παρατηρείται ακόμη καλύτερη προσαρμογή των τιμών μετά την αναδιάταξη, στην εξίσωση ετεροσυσχέτισης.

Συνδυασμός Μεθόδων Αναδιάταξης

Αναδιάταξη για διατήρηση δομής εξάρτησης

Αναδιάταξη για διατήρηση ετεροσυσχέτισης

Πρώτα… αναδιάταξη για κάθε μεταβλητή μεμονωμένα ⇒ συνθετική κατανομή με νέα Ranks
Έπειτα… αναδιάταξη για διατήρηση ετεροσυσχέτισης ⇒ προσομοίωση της συμπεριφοράς εξάρτησης μεταξύ των δύο στοχαστικών διεργασιών

Συμπεράσματα

- **Ανάγκη στοχαστικής προσέγγισης**
  Η στοχαστική μοντελοποίηση κρίνεται αναγκαία για την ρεαλιστική αναπαράσταση φυσικών διεργασιών (άνεμος – ηλιακή ακτινοβολία) σε μελέτες ενεργειακού σχεδιασμού.
- **Αντιμετώπιση εποχικών ασυμμετριών**
  Ο μετασχηματισμός **Box–Cox** με βελτιστοποίηση παραμέτρων ανά μήνα πέτυχε διατήρηση των εποχικών ασυμμετριών στη μεταβλητή της ηλιακής ακτινοβολίας.
- **Διατήρηση δομής εξάρτησης (Hurst–Kolmogorov)**
  Το μοντέλο **SMA** επέτρεψε τη διατήρηση της δεύτερης τάξης εξάρτησης και της μακροχρόνιας μνήμης στις συνθετικές σειρές.
- **Αποκατάσταση περιθώριων κατανομών**
  Μέσω μεθόδου **αναδιάταξης ανά μεταβλητή**, επετεύχθη αποκατάσταση των κατανομών **Gamma** (άνεμος) και **Beta** (ηλιακή ακτινοβολία) με βάση την εποχικότητα και την κατάταξη.
- **Διατήρηση συσχέτισης μεταξύ μεταβλητών**
  Επεκτάθηκε η μέθοδος αναδιάταξης ώστε να διατηρείται η **ετεροσυσχέτιση** μεταξύ ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας, παρά τις διαφορετικές θεωρητικές κατανομές τους.
- **Εφαρμογή σε υβριδικά ενεργειακά συστήματα**
  Η τελική μορφή των συνθετικών χρονοσειρών είναι κατάλληλη για ταυτόχρονη χρήση σε μοντέλα υβριδικών ΑΠΕ, προσφέροντας **ρεαλιστική και αξιόπιστη προσομοίωση**.

Συζήτηση

- **Αντιμετώπιση κρίσιμων ενεργειακών φαινομένων**
  Η προσομοίωση επιτρέπει την αναγνώριση περιόδων ενεργειακής ανομβρίας (droughts) ή υπερπλεονάσματος (excess), που διαταράσσουν την ισορροπία στα δίκτυα υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ.
- **Προληπτική ενεργειακή διαχείριση**
  Μέσω της στοχαστικής αναπαραγωγής της φυσικής διαθεσιμότητας, επιτρέπεται ο **προγραμματισμός αποθήκευσης**, η **προσαρμογή ζήτησης** και η **ευφυής δρομολόγηση φορτίου (smart load shifting)**.
- **Συμβολή σε στρατηγικές ενεργειακής ευελιξίας**
  Τα αποτελέσματα ενισχύουν την ανάγκη για **ενεργειακή αποδοτικότητα σε πραγματικό χρόνο** και **διασύνδεση συστημάτων**, ειδικά σε περιόδους ακραίων διακυμάνσεων.
- **Επιστημονική εναρμόνιση με πρόσφατες έρευνες**
  Τα ευρήματα εναρμονίζονται με σύγχρονες μελέτες (π.χ. **Cameron et al., Ismail et al., Friedemann**), που τονίζουν την ανάγκη για πρόβλεψη και γεφύρωση της **χρονικής ασυμφωνίας παραγωγής – κατανάλωσης**.
- **Σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης**
  Η στοχαστική μεθοδολογία προσφέρει εργαλείο **μακροσκοπικής παρακολούθησης ενδεχόμενων κρίσιμων περιόδων** χαμηλής ή υπερβολικής παραγωγής, υποστηρίζοντας πολιτικές ή ακόμα και επενδυτικές αποφάσεις.
- **Επαναπροσδιορισμός της αβεβαιότητας**
  Η αβεβαιότητα δεν αποτελεί εμπόδιο αλλά **δομικό στοιχείο προς αξιοποίηση**· η στοχαστική θεώρηση οδηγεί σε πιο **ευέλικτα, ασφαλή και βιώσιμα ενεργειακά συστήματα**.

Βιβλιογραφία

Koutsoyiannis, D. *Stochastics of Hydroclimatic Extremes - A Cool Look at Risk*. Kallipos, 2023. www.itia.ntua.gr, http://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/2000/.

Tsekouras, G., and D. Koutsoyiannis. "Stochastic Analysis and Simulation of Hydrometeorological Processes Associated with Wind and Solar Energy." *Renewable Energy*, vol. 63, 2014, pp. 624–33. www.itia.ntua.gr, https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.018.

Dimitriadis, P., and D. Koutsoyiannis. "Stochastic Synthesis Approximating Any Process Dependence and Distribution." *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, vol. 32, no. 6, 2018, pp. 1493–515. www.itia.ntua.gr, https://doi.org/10.1007/s00477-018-1540-2.

Shi, Huanyu, et al. "Wind Speed Distributions Used in Wind Energy Assessment: A Review." *Frontiers in Energy Research*, vol. 9, Nov. 2021. *Frontiers*, https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.769920.

Tsoukalas, Ioannis, et al. "Stochastic Periodic Autoregressive to Anything (SPARTA): Modeling and Simulation of Cyclostationary Processes With Arbitrary Marginal Distributions." *Water Resources Research*, vol. 54, no. 1, Jan. 2018, pp. 161–85. *DOI.org (Crossref)*, https://doi.org/10.1002/2017WR021394.

Koutsoyiannis, D., and P. Dimitriadis. "Towards Generic Simulation for Demanding Stochastic Processes." *Sci*, vol. 3, 2021. *www.itia.ntua.gr*, https://doi.org/10.3390/sci3030034.

Koudouris, G., et al. "Investigation on the Stochastic Nature of the Solar Radiation Process." *Energy Procedia*, vol. 125, 2017, pp. 398–404. www.itia.ntua.gr, http://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/1736/.

O'Connell, P. E., et al. "On the Spatial Scale Dependence of Long-Term Persistence in Global Annual Precipitation Data and the Hurst Phenomenon." *Water Resources Research*, vol. 59, no. 4, 2023. www.itia.ntua.gr, https://doi.org/10.1029/2022WR033133.

Dimitriadis P, Koutsoyiannis D, Iliopoulou T, Papanicolaou P. "A Global-Scale Investigation of Stochastic Similarities in Marginal Distribution and Dependence Structure of Key Hydrological-Cycle Processes". *Hydrology*. 2021; 8(2):59. https://doi.org/10.3390/hydrology8020059.

Iman, Ronald L., and W. J. Conover. "A Distribution-Free Approach to Inducing Rank Correlation among Input Variables." *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, vol. 11, no. 3, Jan. 1982, pp. 311–34. *DOI.org (Crossref)*, https://doi.org/10.1080/03610918208812265.

Ευχαριστώ για τον χρόνο σας

«τὰ πάντα ῥεῖ, μηδέποτε κατὰ τ’αὐτὸ μένειν»