



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΩΡΙΑΙΑΣ
ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ
ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ.



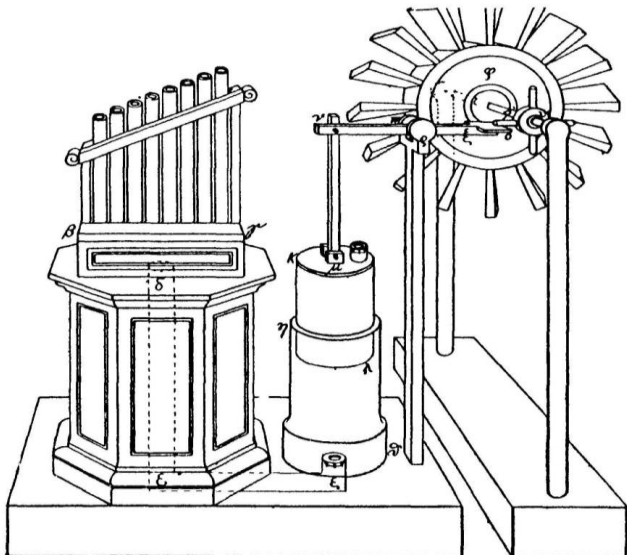
Αριάδνη-Μαρία Φιλιππίδου

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ: ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΝΕΜΟΛΥΛΟ ΣΤΗΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ (1)

- Αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου στη ναυσιπλοΐα ήδη από το 5500 π.Χ.
- Κατασκευή αρχαιότερων ανεμόμυλων στην Περσία (κατακόρυφου άξονα) τον 6^ο έως τον 9^ο μ.Χ. αιώνα
- Πρώτοι ευρωπαϊκοί ανεμόμυλοι το 13^ο αιώνα (οριζόντιου άξονα) για την άντληση νερού και το άλεσμα σιτηρών



Εικ 1. Πρώτη αναφορά σε ανεμόμυλο, από τον μηχανικό Ήρωνα τον 1^ο μ.Χ. αιώνα. (Πηγή: Wikipedia)



Εικ 2. Οι ανεμόμυλοι στο Kinderdijk της Ολλανδίας, κατασκευασμένοι το 18^ο αιώνα. (Πηγή: προσωπικό αρχείο)

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ: ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΝΕΜΟΛΥΛΟ ΣΤΗΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ (2)

- Πρώτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο το 1888 στο Ohio - ανεμογεννήτρια με ισχύ 12 kW και διάμετρο πτερωτής 17 m
- Πρωτεία στην κατασκευή και χρήση ανεμογεννητριών κατέχει η Δανία - 30% της ηλεκτροπαραγωγής της από αιολικά πάρκα
- Στροφή στην αιολική ενέργεια - μείωση εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα
- Ενίσχυση ενεργειακής αυτονομίας

Εικ 3. Οι μεγαλύτερες σύγχρονες ανεμογεννήτριες φτάνουν τα 8 MW σε ισχύ, τα 140 m το ύψος τοποθέτησης και τα 130 m η διάμετρος της πτερωτής. (Πηγή: Google)



Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- Παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς (2014): 370 GW
- Κατανομή ισχύος: 35% Ευρώπη, 31% Κίνα, 19% ΗΠΑ
- Ευρωπαϊκή εγκατεστημένη αιολική ισχύς (2014): 130 GW
- Δυνατότητα κάλυψης του 10% της ευρωπαϊκής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα για το 2014
- Πρωταθλητές στην ΕΕ: Γερμανία (39 GW), Ισπανία (23 GW), Ηνωμένο Βασίλειο (12.5 GW)
- Ευρωπαϊκός στόχος: 20 - 20 - 20
- Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα (2014): 2 GW
- Προβληματικό καθεστώς αδειοδότησης αιολικών πάρκων στην Ελλάδα
- Ηλεκτροπαραγωγή για το 2014: 8% από ΑΠΕ (ΑΔΜΗΕ)

ΑΝΕΜΟΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

- Αιολική ενέργεια - έμμεση μορφή ηλιακής ενέργειας
- 1 - 2% της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης, μετατρέπεται σε άνεμο
- Άνεμοι σε τοπική κλίμακα
 - Θαλάσσια - απόγειος αύρα
 - Καθοδικά ρεύματα από τα βουνά προς τις κοιλάδες
- Μεταβλητότητα ανέμου καθ' ύψος (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999)

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}}$$

- Μεταβλητότητα ανέμου στο χρόνο - αδυναμία μακροπρόθεσμης πρόβλεψης
- Πλούσιο αιολικό δυναμικό (κυρίως σε Κυκλάδες, Δωδεκάνησα, Πελοπόννησο, Εύβοια, Κρήτη)

Εικ 4. Χάρτης Ελλάδας, όπου απεικονίζονται οι θέσεις των σταθμών επεξεργασίας. Πρόκειται για τους εξής σταθμούς της ΕΜΥ: Νέα Αγχίαλος, Λάρισα, Λαμία, Φίλιππος, Τρίκαλα, Αγρίνιο. (Πηγή: Google Earth)

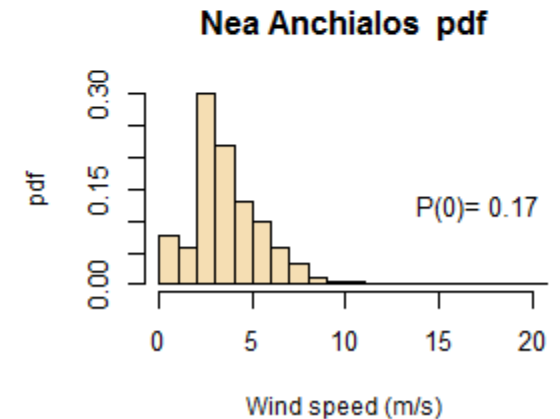
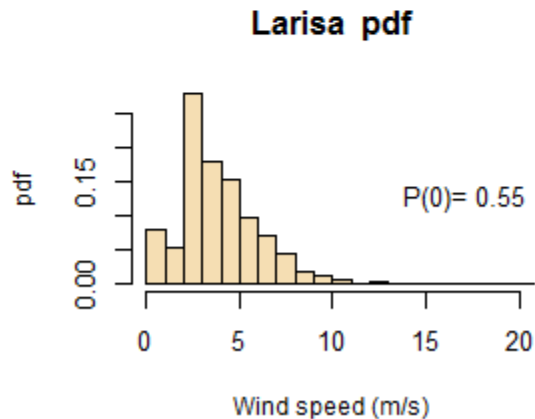
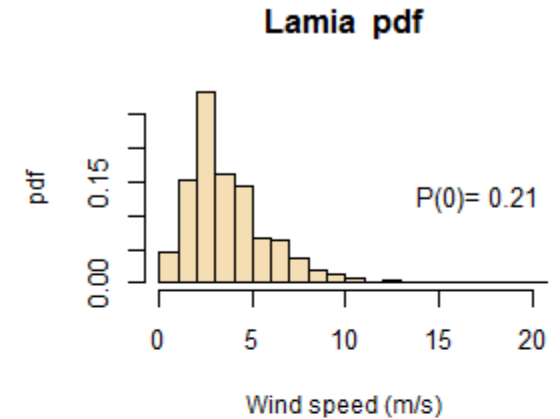
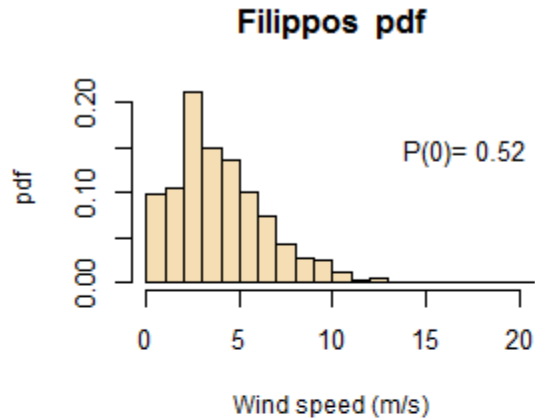


- Λήψη δεδομένων ταχύτητας ανέμου από την υπηρεσία του NCDC
- Η περίοδος και τα έτη μετρήσεων διαφέρουν σε κάθε σταθμό
- Έγινε κανονικοποίηση του χρονικού βήματος μέσω του προγράμματος Υδρογνώμων, ώστε όλες οι μετρήσεις να αναφέρονται σε ακέραιες ώρες

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ

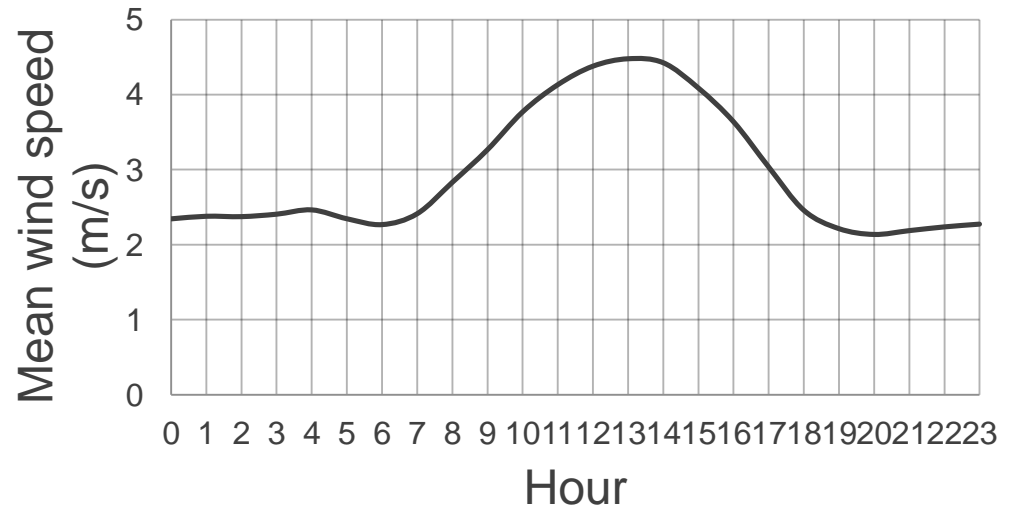
ΓΡΑΦ 1.

- Σημαντικά ποσοστά νηνεμίας $P(0)$
- Αντιμετώπιση ωριαίας ταχύτητας του ανέμου, ως μεταβλητής μικτού τύπου
- Εμφάνιση θετικής ασυμμετρίας και υποεκθετικής ουράς

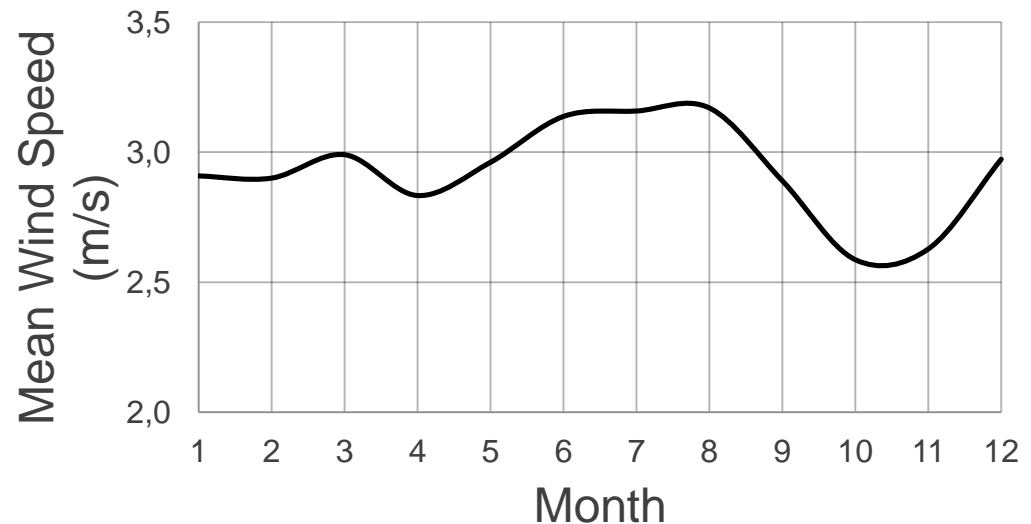


ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΝΕΑ ΑΓΧΙΑΛΟΣ

ΓΡΑΦ 2. Μέση ωριαία ταχύτητα ανέμου. Ο άνεμος εμφανίζει ομαλή, σταδιακή μεταβολή στην ημέρα (περιοδικότητα). Λαμβάνει μέγιστη τιμή στις 13:00. Μέση τιμή τα 3 m/s.

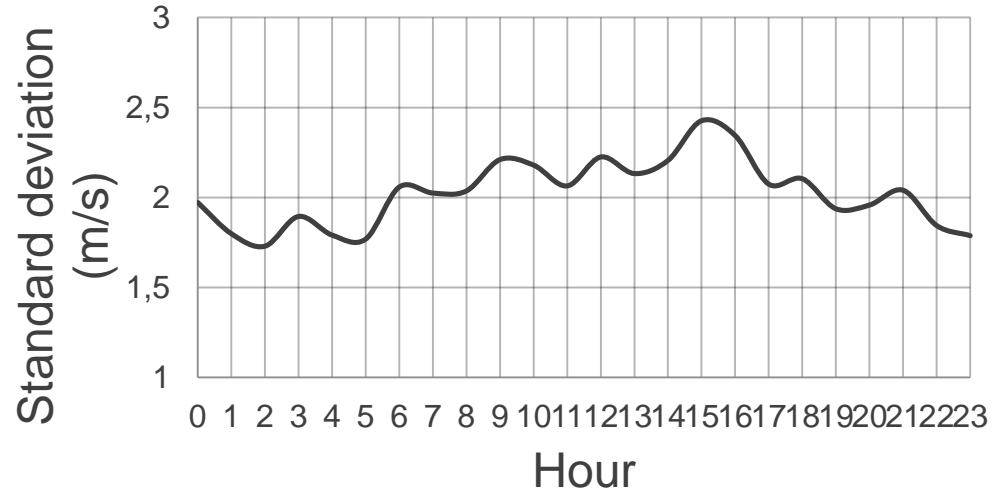


ΓΡΑΦ 3. Μέση ωριαία ταχύτητα ανέμου ανά μήνα. Ο άνεμος εμφανίζει μικρή διακύμανση κατά τη διάρκεια των μηνών. Λαμβάνει μέγιστες τιμές κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες.

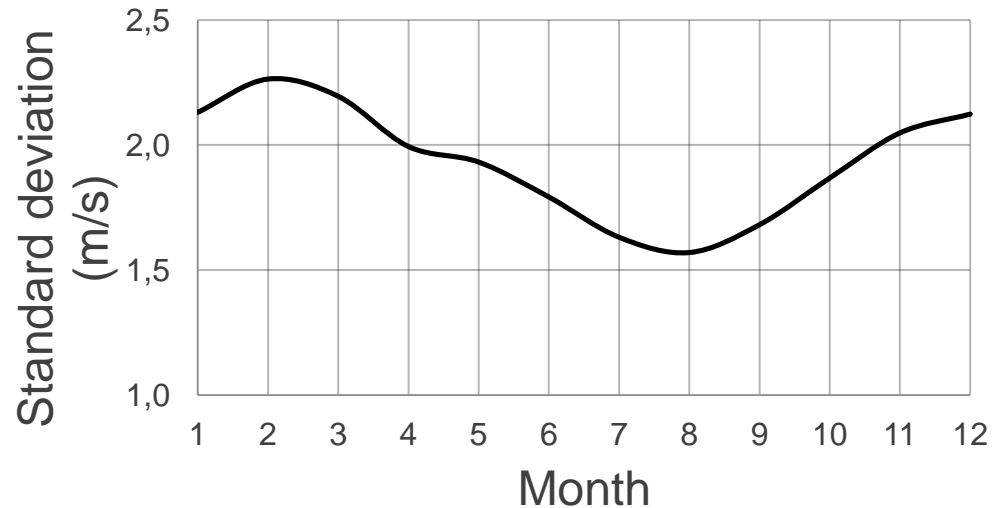


ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΗ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΝΕΑ ΑΓΧΙΑΛΟΣ

ΓΡΑΦ 4. Τυπική απόκλιση ωριαίας ταχύτητας ανέμου. Μικρή αύξηση τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες. Διατηρείται περίπου σταθερή γύρω από τα 2 m/s.

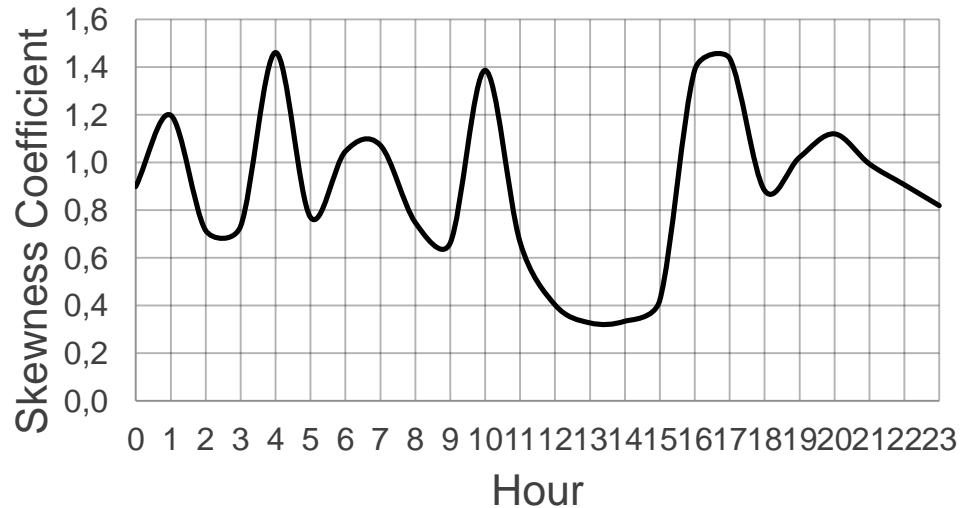


ΓΡΑΦ 5. Τυπική απόκλιση ωριαίας ταχύτητας ανέμου ανά μήνα. Μικρή διακύμανση μεταξύ των μηνών. Μικρότερη τυπική απόκλιση τους θερινούς μήνες.

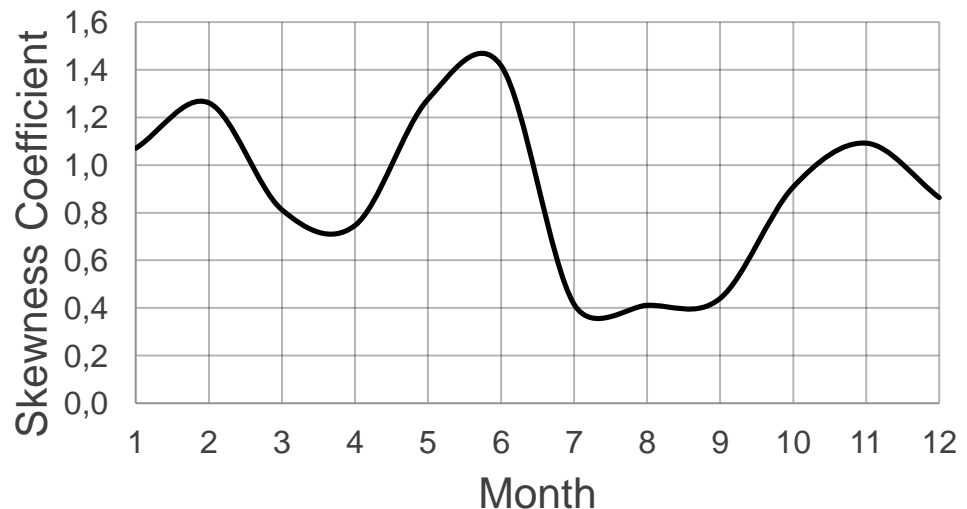


ΔΕΙΓΜΑΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΝΕΑ ΑΓΧΙΑΛΟΣ

ΓΡΑΦ 6. Συντελεστής ασυμμετρίας ωριαίας ταχύτητας ανέμου. Ακανόνιστη μεταβολή μέσα στην ημέρα. Μπορεί να οφείλεται στο μικρό δείγμα και την αβεβαιότητα υπολογισμού της τρίτης ροπής.

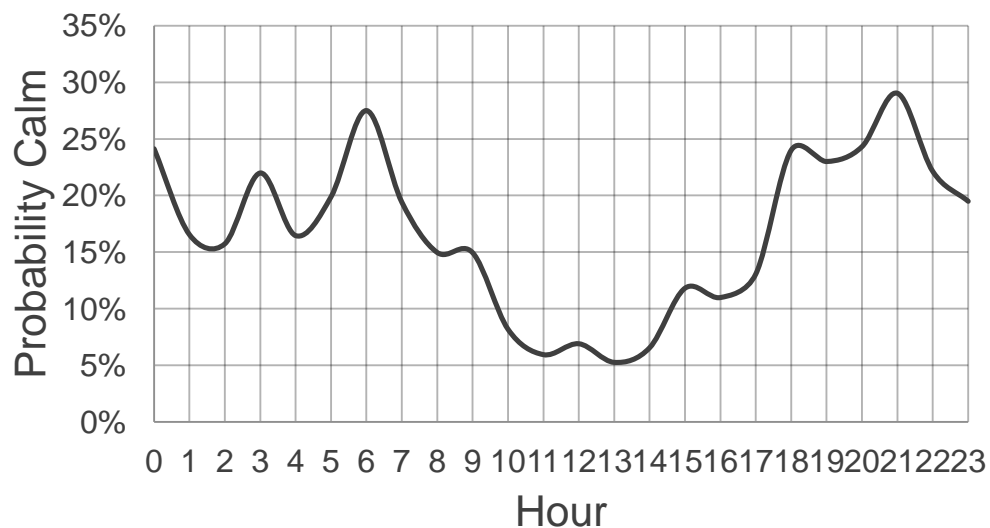


ΓΡΑΦ 7. Συντελεστής ασυμμετρίας ωριαίας ταχύτητας ανέμου ανά μήνα. Ακανόνιστη διακύμανση μεταξύ των μηνών.

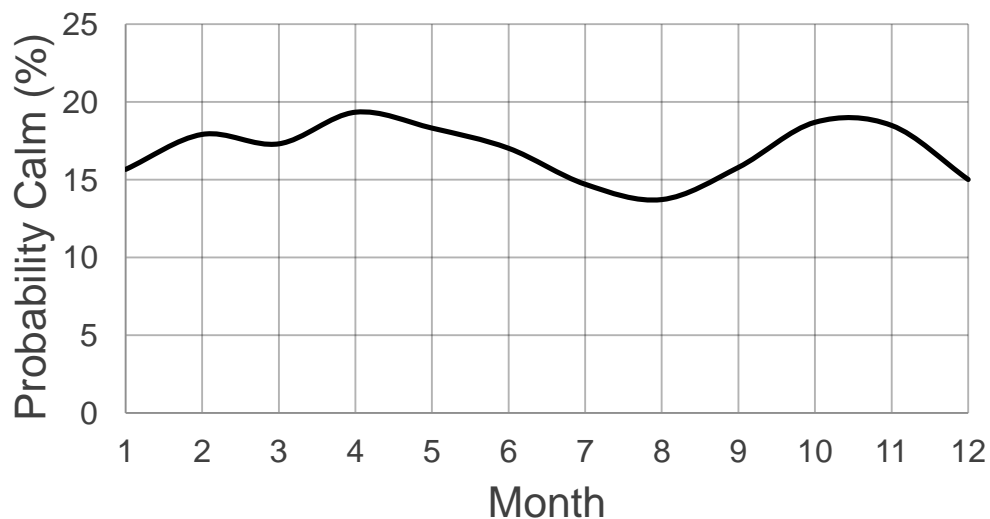


ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΝΗΝΕΜΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΝΕΑ ΑΓΧΙΑΛΟΣ

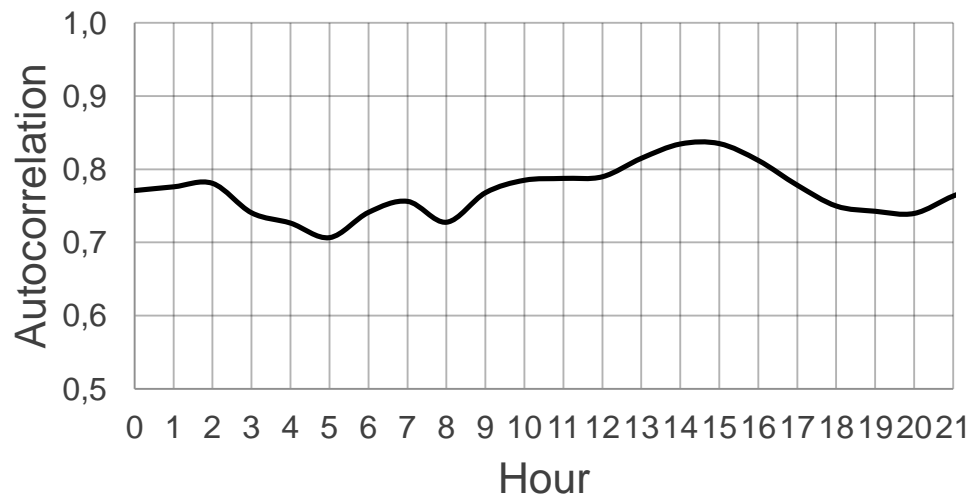
ΓΡΑΦ 8. Πιθανότητα νηνεμίας ωριαίας ταχύτητας ανέμου. Σαφής μείωση τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες.



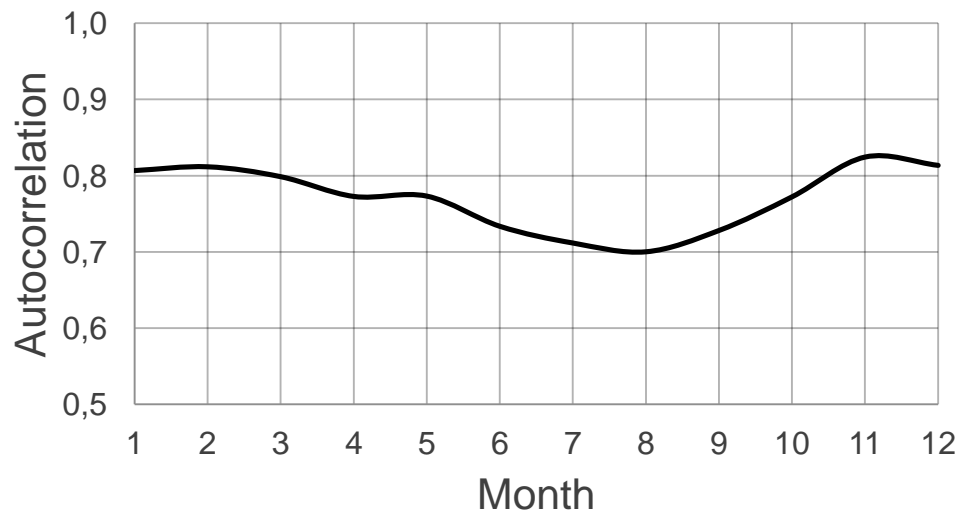
ΓΡΑΦ 9. Πιθανότητα νηνεμίας ωριαίας ταχύτητας ανέμου ανά μήνα. Μικρή μείωση τους θερινούς μήνες.



ΓΡΑΦ 10. Συντελεστής αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης για την ωριαία ταχύτητα ανέμου. Παρατηρείται μικρή αύξηση τις μεσημεριανές ώρες. Ισχυρή δομή αυτοσυσχέτισης, με μέση τιμή 0.75.



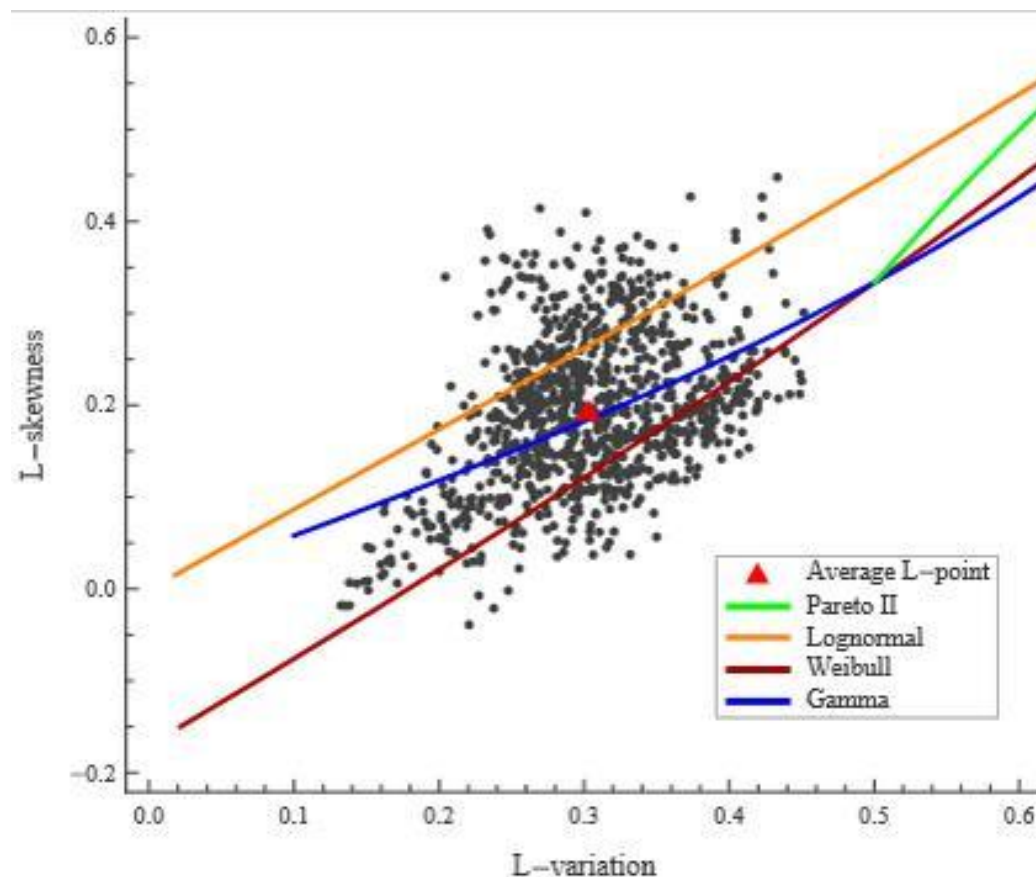
ΓΡΑΦ 11. Συντελεστής αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης για την ωριαία ταχύτητα ανέμου ανά μήνα. Μικρή μείωση τους θερινούς μήνες.



ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ L-ΡΟΠΩΝ

L-Ροπές: περισσότερο αξιόπιστη εκτίμηση των μέτρων θέσης, κλίμακας και σχήματος

- Δεν υπάρχει σαφής ένδειξη για το ποια είναι η κατάλληλη κατανομή μεταξύ των Pareto II, Lognormal, Weibull, Gamma.
- Το μέσο L-σημείο βρίσκεται πάνω στην καμπύλη της κατανομής Gamma.



ΓΡΑΦ 12. Τα σημεία L-διασποράς και L-ασυμμετρίας για κάθε ώρα, μήνα και σταθμό, για τα θετικά δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου.

- Ωριαία ταχύτητα ανέμου - μεταβλητή μικτού τύπου
 - Διακριτό μέρος: οι μηδενικές τιμές της ταχύτητας
 - Συνεχές μέρος: οι θετικές τιμές της ταχύτητας
- Εμφάνιση μεταβλητότητας δύο κύκλων
 - Περιοδικότητα ωριαίας ταχύτητας μέσα στην ημέρα
 - Διακύμανση ωριαίας ταχύτητας μεταξύ των μηνών (εποχικότητα)
- Μείωση πιθανότητας νηνεμίας κατά τις μεσημεριανές ώρες και τους θερινούς μήνες
- Ισχυρή δομή αυτοσυσχέτισης (0.75 η μέση τιμή του συντελεστή αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης)
- Καλύτερη η προσαρμογή της κατανομής γάμα στα δεδομένα της θετικής ταχύτητας

- Αδύνατη η μακροπρόθεσμη πρόβλεψη των μετεωρολογικών διεργασιών (άνεμος) - στοχαστικότητα του ανέμου
- Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας με στοχαστικά μοντέλα
- Παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών που αναπαράγουν τη στοχαστική δομή και τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά του ιστορικού δείγματος
- Χωριστή προσομοίωση των θετικών και των μηδενικών τιμών της ωριαίας ταχύτητας του ανέμου

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ CAR1

- Χρήση διπλά κυκλοστάσιμου μοντέλου αυτοπαλινδρόμησης πρώτης τάξης CAR1 (Cyclostationary AR1), με διατήρηση της ασυμμετρίας
- Τυχαία διαδικασία παραγωγής στοχαστικής ανέλιξης $\underline{x}(t)$ σε διακριτό χρόνο - κάθε τιμή εξαρτάται γραμμικά από την προηγούμενη

$$\underline{x}(t) = a(t) \underline{x}(t-1) + \underline{w}(t)$$

- Στατιστικά χαρακτηριστικά του λευκού θορύβου $\underline{w}(t)$ και του συντελεστή $a(t)$

$$\mu_{\underline{w}}(t) = \mu_x(t) - a(t) \times \mu_x(t-1)$$

$$\sigma_{\underline{w}}^2(t) = (1 - \rho_1(t)^2) \times \sigma_x(t)^2$$

$$CS_{\underline{w}}(t) = \frac{CS_x(t) - \rho_1(t) \times CS_x(t-1)}{(1 - \rho_1(t)^2)^{3/2}}$$

$$a(t) = \frac{\sigma_{\underline{x}}(t)}{\sigma_x(t-1)} \times \rho_1(t)$$

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΛΕΥΚΟΥ ΘΟΥΡΥΒΟΥ

- Διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών του δείγματος, περιλαμβανομένης της θετικής ασυμμετρίας
- Επιλογή τριπαραμετρικής κατανομής γάμα με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = \frac{1}{b\Gamma(c)} \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} \exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)$$

- Παράμετροι θέσης (a), κλίμακας (b), σχήματος (c)

$$a = \mu - cb$$

$$b = \frac{\sigma}{\sqrt{c}}$$

$$c = \frac{4}{CS^2}$$

- Τυχαία διαδικασία κατά την οποία η επόμενη κατάσταση εξαρτάται μόνο από την παρούσα κατάσταση

$$P(\underline{x}_{t+1} = x | \underline{x}_1 = x_1, \underline{x}_2 = x_2, \dots, \underline{x}_t = x_t) = P(\underline{x}_{t+1} = x | \underline{x}_t = x_t)$$

- Παραγωγή αλληλουχίας τιμών 0 (νηνεμία) και 1 (θετική ταχύτητα)
- Κάθε τιμή περιγράφεται πλήρως από πίνακες πιθανοτήτων μετάβασης

$$P_{ij} = \begin{matrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{matrix}$$

- Κάθε γραμμή αποτελείται από συμπληρωματικές πιθανότητες: $P_{00} = 1 - P_{01}$ και $P_{10} = 1 - P_{11}$

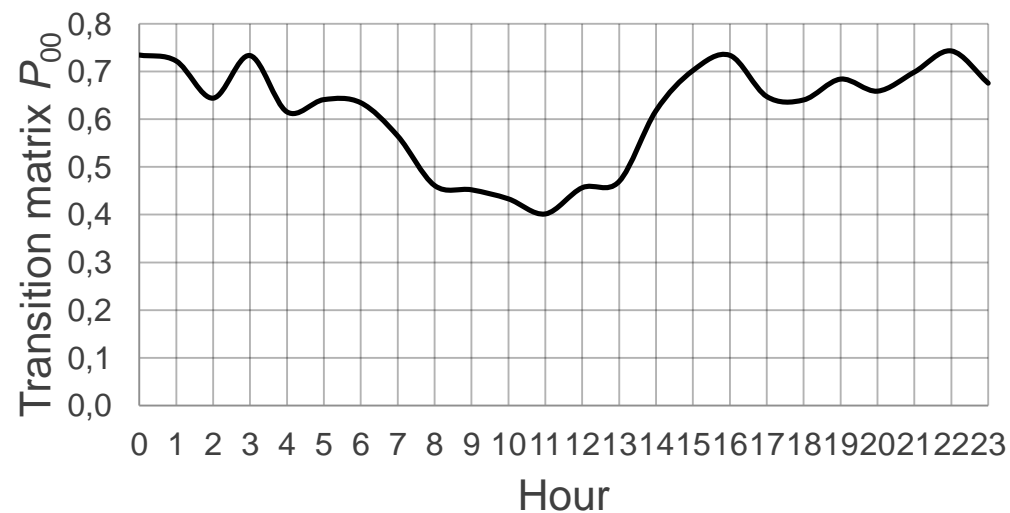
$$P_{00} = \frac{N_{00}}{N_{00} + N_{01}}, P_{10} = \frac{N_{10}}{N_{10} + N_{11}}$$

- Παραγωγή αλυσίδας Markov (τιμών 0 και 1) με τον εξής τρόπο:

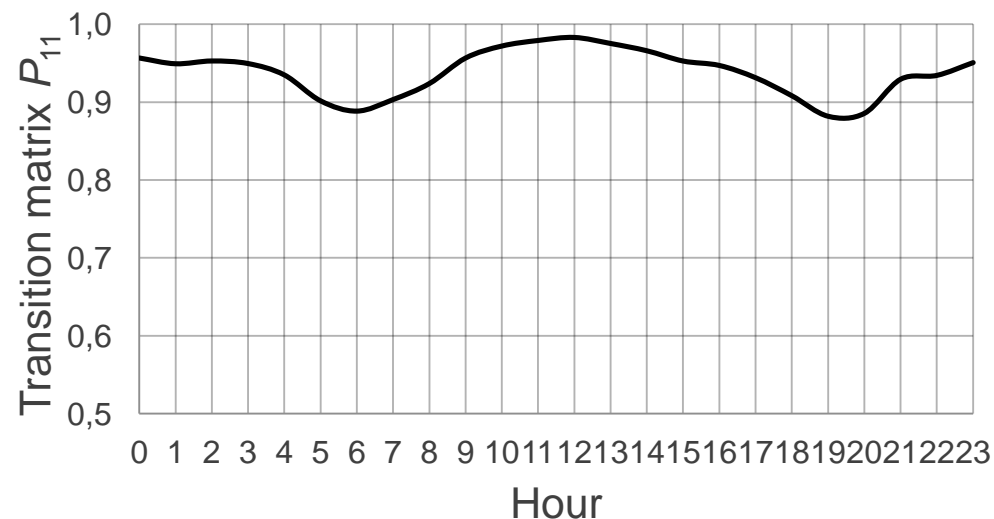
$$B(t) = \begin{matrix} B(t-1) = 0, \text{ if } (u < P_{00}, 0, 1) \\ B(t-1) = 1, \text{ if } (u < P_{10}, 0, 1) \end{matrix}$$

ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΝΕΑ ΑΓΧΙΑΛΟΣ

ΓΡΑΦ 13. Πιθανότητες μετάβασης P_{00} . Περίπτωση την παρούσα ώρα και την προηγούμενη ώρα να επικρατεί νηνεμία.

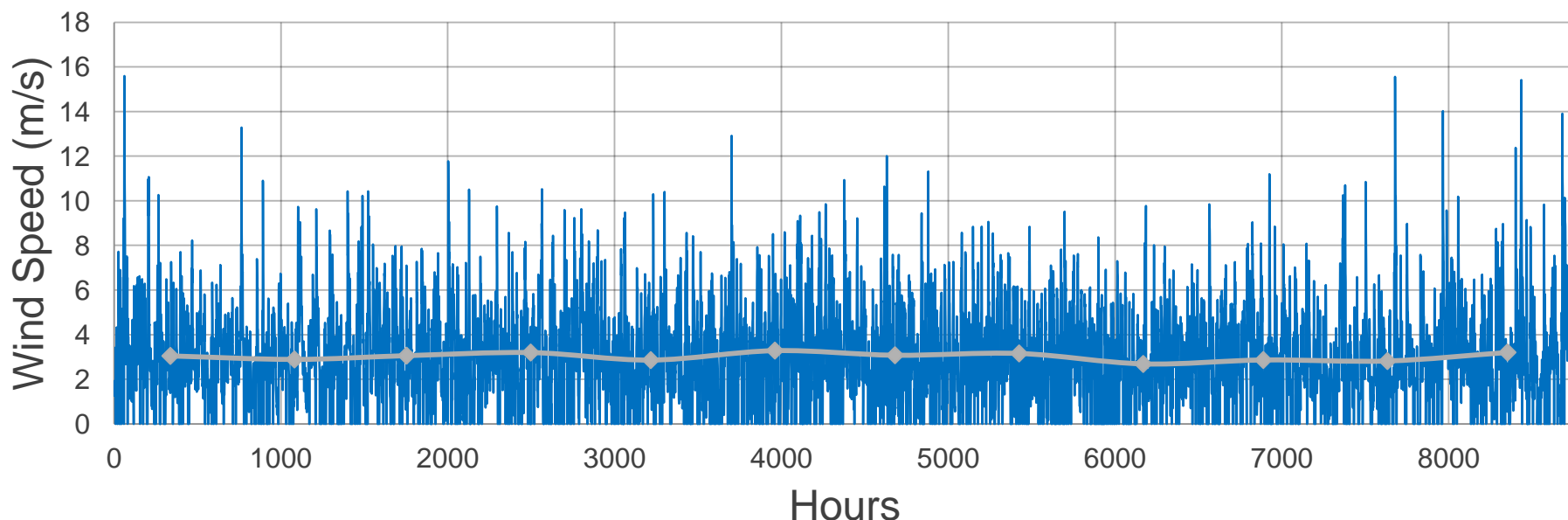


ΓΡΑΦ 14. Πιθανότητες μετάβασης P_{11} . Περίπτωση την παρούσα ώρα αλλά και την προηγούμενη να φυσάει.



ΤΕΛΙΚΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ

- Παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς ωριαίας ταχύτητας του ανέμου 1000 ετών από τα θετικά δεδομένα της ταχύτητας
- Παραγωγή αλυσίδας Markov 1000 ετών για την προσομοίωση των αλληλουχιών μηδενικών και θετικών τιμών της ταχύτητας
- Πολλαπλασιασμός τους για την εξαγωγή της τελικής συνθετικής χρονοσειράς της ωριαίας ταχύτητας του ανέμου



ΓΡΑΦ 15. Προσομοίωση ενός έτους της ωριαίας ταχύτητας του ανέμου

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΤΙΚΗΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ

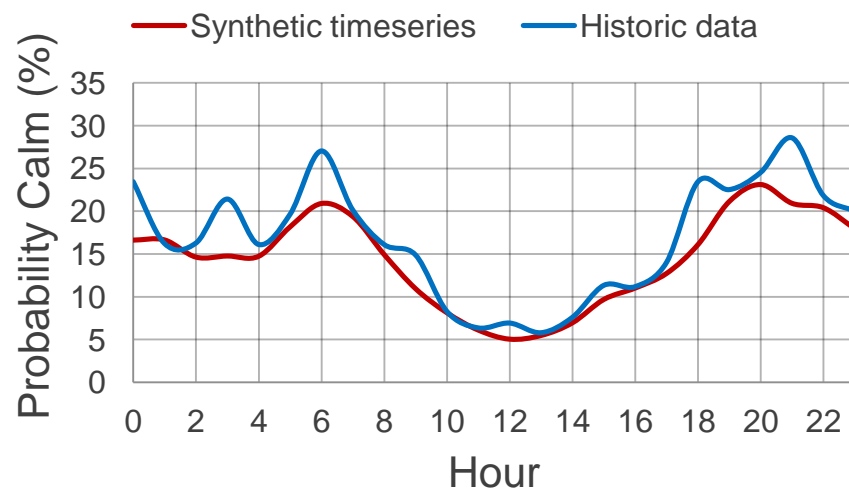
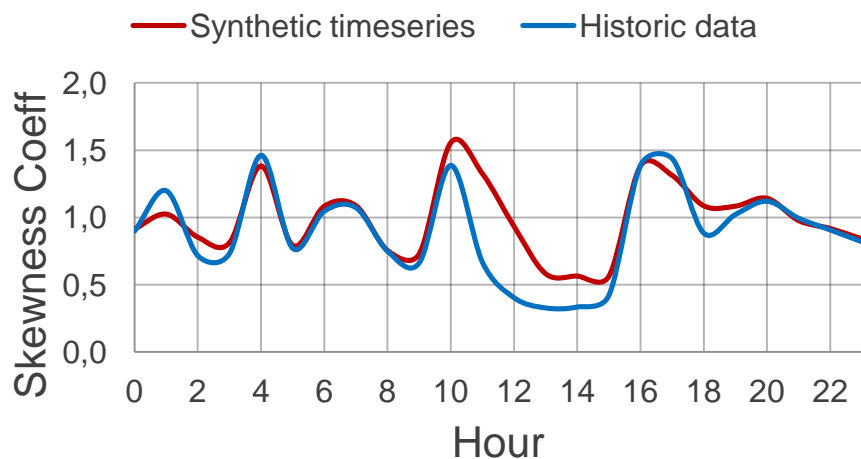
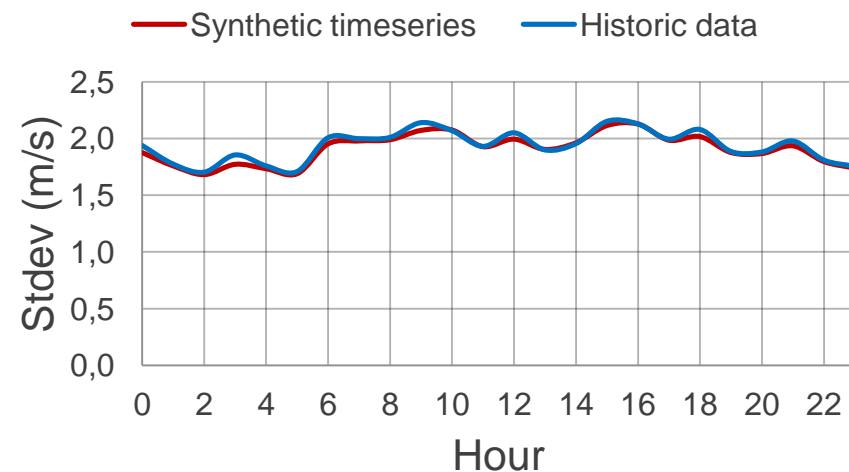
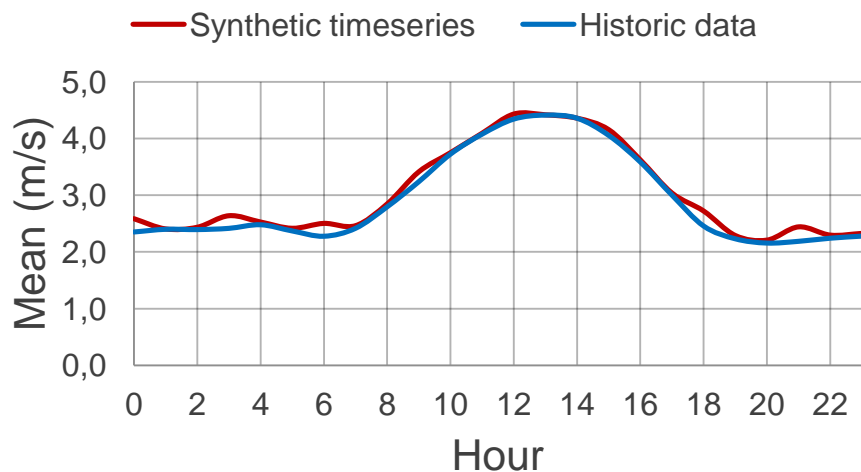
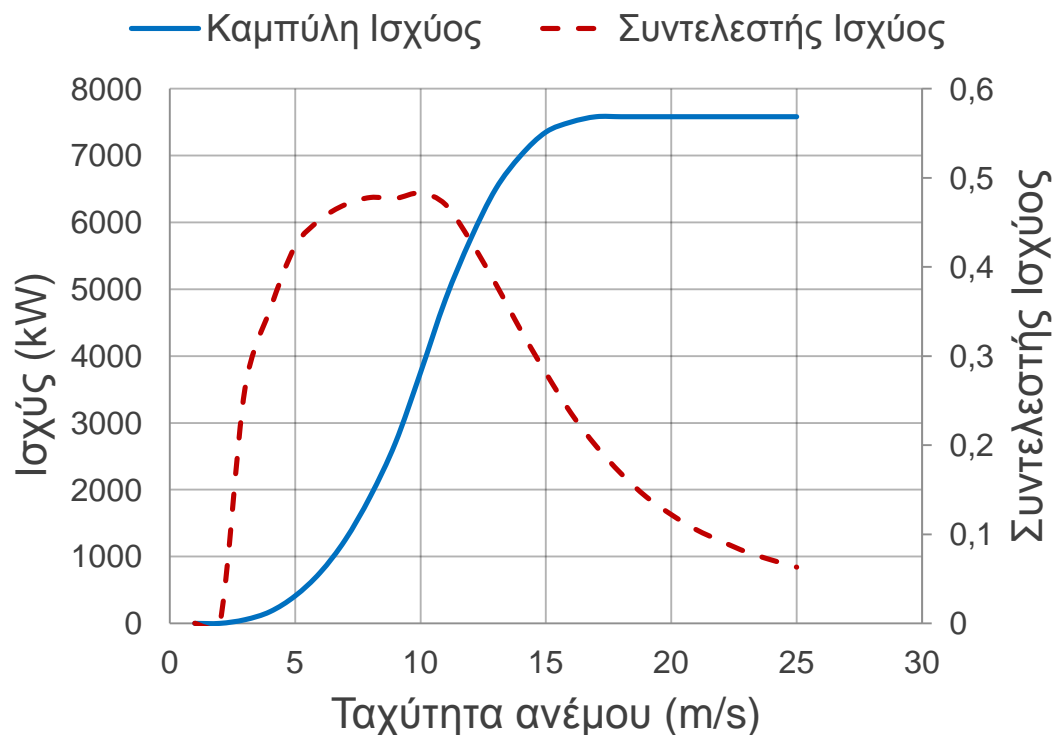


FIG 16 - 19. Γραφήματα για τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση, το συντελεστή ασυμμετρίας και την πιθανότητα νηνεμίας για το σταθμό Νέα Αγχίαλος.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

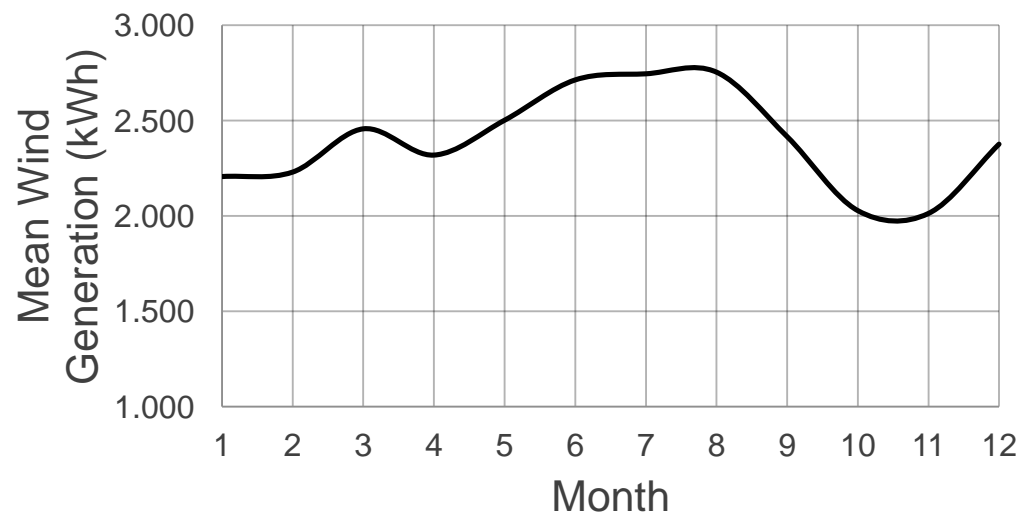
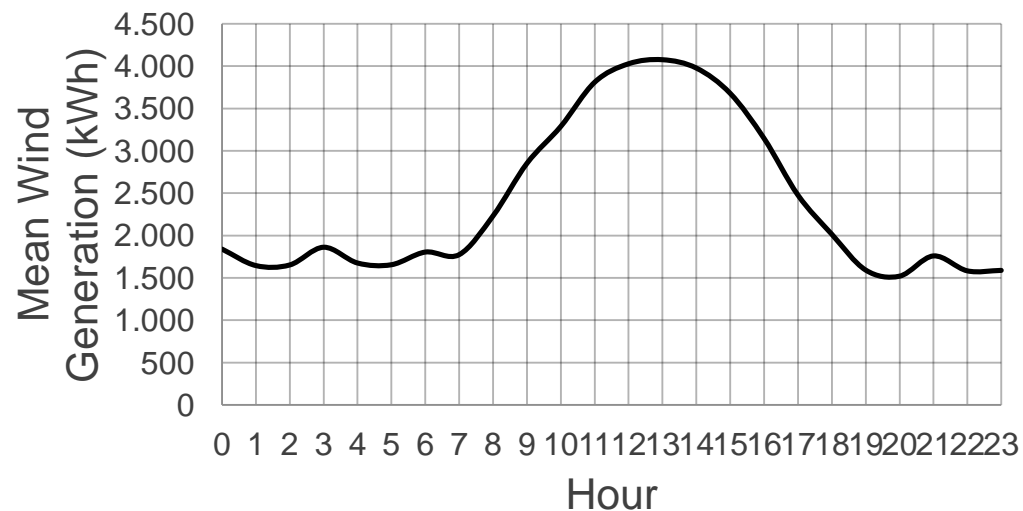


ΓΡΑΦ 20. Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας E126/7.5 MW της Enercon. Παραγωγή μεταξύ 3 - 25 m/s. Ύψος κόμβου τοποθέτησης τα 135 m.

ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΓΡΑΦ 21 - 22. Μέση ωριαία παραγωγή ενέργειας ανά ημέρα και ανά μήνα.

- Μέση ωριαία τιμή: 2.4 MWh
- Μέση ημερήσια τιμή: 57.5 MWh
- Μέση ετήσια τιμή: 21 GWh
- Συντελεστής δυναμικότητας ανεμογεννήτριας: 0.32



Ευχαριστώ!

