



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

Στοχαστική διερεύνηση και προσομοίωση της  
ταχύτητας του ανέμου:  
Εφαρμογή στην διαχείριση αιολικής εγκατάστασης



Διπλωματική Εργασία  
Αναστάσιος Γκολέμης

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ. Πολιτικός  
Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2019





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

---

**Στοχαστική διερεύνηση και προσομοίωση της ταχύτητας του ανέμου:  
Εφαρμογή στην διαχείριση αιολικής εγκατάστασης**

---

**Διπλωματική Εργασία**  
Αναστάσιος Γκολέμης

**Επιβλέπων:** Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ  
**Συνεπιβλέπων:** Παναγιώτης Δημητριάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Αθήνα, Φεβρουάριος 2019



Copyright © Αναστάσιος Γκολέμης, 2019  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του Αναστασίου Γκολέμη. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Anastasios Golemis, 2019  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).



Αναστάσιος Γκολέμης (2019)

Στοχαστική διερεύνηση και προσομοίωση της ταχύτητας του ανέμου:  
Εφαρμογή στην διαχείριση αιολικής εγκατάστασης

Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Anastasios Golemis (2019)

Investigation and simulation on the stochastic nature of the wind speed;  
Application to the management of a wind power plant

Department of Water Resources & Environmental Engineering, School of Civil  
Engineering, National Technical University of Athens.





# *Ευχαριστίες*

---

Με την εκπόνηση και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, σηματοδοτείται και το τέλος της πενταετούς φοίτησής μου, στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Όπως κάθε τέλος όμως, έτσι και αυτό, σηματοδοτεί και την αρχή νέων κεφαλαίων στην ζωή.

Κατά την διάρκεια της πενταετούς φοίτησης, απέκτησα ισχυρές βάσεις, γνώσεις και μία μικρή εμπειρία στο επάγγελμα του Πολιτικού Μηχανικού, καθώς επίσης είχα την ευκαιρία να γνωρίσω υπέροχα και ξεχωριστά άτομα, που έχω την τιμή να αποκαλώ φίλους. Όλοι σας και ο καθένας ξεχωριστά συνέβαλε στην διαμόρφωση του τωρινού μου χαρακτήρα και θα ήθελα να σας ευχαριστήσω για αυτό.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Δημήτρη Κουτσογιάννη, για τις κρίσιμες και καθοριστικές συμβουλές του σε καίρια ζητήματα της εργασίας μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Μαμάση, καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Καρακατσάνη για την απλόχερη συνεισφορά τους, σε εμπειρικές γνώσεις, πάνω σε θέματα της εργασίας.

Καθοριστικός, και τον ευχαριστώ πολύ για αυτό, υπήρξε επίσης στο όλο εγχείρημα, ο ρόλος του διδάκτορα και θα έλεγα πλέον φίλου μου Παναγιώτη Δημητριάδη, ο οποίος αποτελεί πρότυπο, όχι μόνο επιστήμονα και ερευνητή αλλά και ανθρώπου. Τον ευχαριστώ πολύ, για την πολύτιμη συνδρομή του, όλους αυτούς του μήνες προσπάθειας, για την απλόχερη και ανιδιοτελή μεταλαμπάδευση γνώσεων και για τον χρόνο τον οποίο αφιέρωσε στην συνεργασία μας.

Τέλος δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, για την ηθική και υλική στήριξη τους, και ιδιαίτερα τον αδελφό μου Βαγγέλη Γκολέμη, ο οποίος με βοήθησε με ιδέες και πράξεις όχι μόνο κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και κατά την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Άκης Γκολέμης  
Φεβρουάριος 2019, Αθήνα



***Αφιέρωση***

*Στην οικογένεια μου και στους διαχρονικά, κατά τα εκπαιδευτικά μου χρόνια  
δασκάλους.*





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Στοχαστική διερεύνηση και προσομοίωση της ταχύτητας του ανέμου :  
Εφαρμογή στην διαχείριση αιολικής εγκατάστασης**

**Αναστάσιος Γκολέμης**

**Επιβλέπων:** Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

**Συνεπιβλέπων:** Παναγιώτης Δημητριάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Φεβρουάριος 2019

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την εκμετάλλευση όλο και περισσότερο των ορυκτών καυσίμων, εμφανίζεται επιτακτική η ανάγκη στροφής της ανθρωπότητας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Από τις αρχές του 21ου αιώνα η επιστημονική κοινότητα, έχει πραγματοποιήσει τεράστια άλματα, με σκοπό την εκμετάλλευση όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μία από τις πλέον ευρέως γνωστές και αξιοποιήσιμες είναι η αιολική ενέργεια, η οποία αποτελεί από τις βασικότερες μορφές, στην οποία ο ανθρώπινος παράγοντας, βασίστηκε στο παρελθόν, και πρόκειται να στηριχθεί και στο μέλλον. Η πρόβλεψη απόδοσης αυτών των συστημάτων βασίζεται, σε ωριαία ή ημερήσια δεδομένα, επειδή αυτά τα δεδομένα είναι συνήθως τα μόνα διαθέσιμα. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας, είναι η προσπάθεια διερεύνησης της στοχαστικής φύσης και της χρονικής εξέλιξης της ταχύτητας του ανέμου, σε ωριαίο βήμα, με τελικό στόχο την δημιουργία ενός στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης και αναπαραγωγής της τελευταίας, πραγματοποιώντας την ανάλυση σε παγκόσμια κλίμακα. Για την περιγραφή του ανέμου ελέγχθηκαν διάφορες κατανομές, με την καλύτερη προσαρμογή να πετυχαίνεται με την κατανομή PBF (γνωστή και ως Burr), σύμφωνα, με την βοήθεια δεικτών στατιστικής ανάλυσης αποτελεσμάτων. Ο άνεμος είναι μία ανέλιξη η οποία

προσομοιώνεται με ένα στοχαστικό μοντέλο, στο οποίο χρησιμοποιούμε ντετερμινιστικές συναρτήσεις. Προκειμένου να προσομοιωθεί σωστά, προσαρμόζονται οι ντετερμινιστικές συναρτήσεις, δηλαδή οι ωριαίες και μηνιαίες περιοδικότητες, χρησιμοποιώντας κάποια μοντέλα διπλής περιοδικότητας. Εν συνεχεία, πραγματοποιείται η δημιουργία ενός ψευδο-κυκλοστάσιμου μοντέλου μακροπρόθεσμης εμμονής, με σκοπό την αναπαραγωγή της ταχύτητας του ανέμου. Το μοντέλο ελέγχεται και ικανοποιεί την διατήρηση της κατανομής, συνεπώς των τεσσάρων κεντρικών ροπών (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία και κύρτωση), καθώς και την παράμετρο Hurst που εκφράζει την (μακροπρόθεσμη) εμμονή και συσχέτιση.

Τελευταίο, αλλά εξίσου σημαντικό μέρος, είναι η εξέταση της οικονομικής διαχείρισης μίας αιολικής εγκατάστασης. Ελέγχεται η διαφορά στην πρόβλεψη των χρημάτων που θα αποφέρει η αιολική εγκατάσταση για κάθε μία από τις εξεταζόμενες κατανομές, καθώς και η οικονομική ανάλυση της επένδυσης μιας αιολικής εγκατάστασης με και χωρίς αντικατάστασή της μετά το πέρας του χρόνου ζωής της. Παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα κόστη και συντάσσονται πίνακες χρηματοροών με βάση την ενεργειακή απόδοση, ώστε να υπολογιστεί ο δείκτης της καθαρής παρούσας αξίας.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES & ENVIRONMENTAL ENGINEERING  
DIPLOMA THESIS

**Investigation and simulation on the stochastic nature of the wind speed;  
Application to the management of a wind power plant**

**Anastasios Golemis**

**Supervisor:** Dr. Demetris Koutsoyiannis, Professor of NTUA

**Co-supervisor:** Dr. Panayiotis Dimitriadis

February 2019

## ABSTRACT

With the progress of technology and the increasingly exploitation of the fossil fuels, there is an urgent need to turn humanity into renewable energy sources. Since the beginning of the 21st century, the scientific community has made huge leaps to exploit all renewable energy sources. One of the most widely known and exploitable is the wind power, which is one of the most important forms in which the human factor had relied on in the past, and is going to rely on in the future. The performance prediction of these systems is based on hourly data because these are usually the only ones available. The aim of this work is to investigate the stochastic nature and time evolution of wind speed in an hourly step, with the ultimate goal of creating a stochastic model of simulation and reproduction of the latter, carrying out the analysis on a global scale. Several distributions were checked for the wind description, with the best adjustment being achieved with the PBF distribution (also known as Burr), according to statistical analysis results. Wind is a process that is simulated by a stochastic model, in which we use deterministic functions. In order to simulate properly, deterministic functions, namely hourly and monthly periodicities, are adapted using some dual periodicity models. Subsequently, a pseudo-cyclostationary, long-term persistence model is created to replicate the wind speed. The model is checked and satisfies the maintenance of the distribution of the four central moments

(mean value, standard deviation, asymmetry and kurtosis), as well as the Hurst parameter that expresses (long-term) persistence and correlation.

Last but not least, is the examination of the financial management of a wind power plant. The difference in the forecast of the money that the wind power plant will produce for each one of the analyzed distributions, as well as the economic analysis in the investment of a wind power plant with and without its replacement at the end of its lifespan, is studied. All costs are presented in detail and cash flow tables based on energy efficiency are compiled in order to calculate the net present value indicator.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	xix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	xxiii
<b>1</b> ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Στόχοι Εργασίας.....	1
<b>2</b> ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	3
<b>3</b> ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	5
3.1 Πως δημιουργείται η Αιολική Ενέργεια .....	5
3.1.1 Από πού προέρχεται η Αιολική Ενέργεια.....	5
3.1.2 Άνεμος λόγω Διαφοράς Θερμοκρασίας.....	5
3.1.3 Η δύναμη Coriolis .....	7
3.1.4 Πώς η δύναμη Coriolis επηρεάζει τον άνεμο σε παγκόσμια κλίμακα .....	8
3.2 Είδη Ανέμων .....	8
3.2.1 Επιφανειακός Άνεμος.....	8
3.2.2 Γεωστροφικός Άνεμος.....	9
3.3 Όργανα Μέτρησης του Ανέμου.....	10
3.3.1 Ανεμόμετρο .....	10
3.3.2 Ραντάρ Doppler .....	11
3.3.3 Laser-Based LIDAR (Light Detection And Ranging).....	11
3.3.4 Sound-Based SODAR (SOund Detection And Ranging) .....	12
<b>4</b> ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	13
4.1 Δεδομένα και Περιοχές Μελέτης .....	13
4.2 Διπλή Κυκλοστασιμότητα της Ταχύτητας του Ανέμου .....	16
4.3 Μοντέλα διπλής κυκλοστασιμότητας .....	16
4.3.1 Μέση τιμή.....	17
4.3.2 Τυπική απόκλιση .....	18
4.3.3 Ασυμμετρία .....	18
4.4 Ομογενοποίηση .....	19
4.5 Ανάλυση των πιθανών κατανομών που περιγράφουν τον άνεμο.....	19
4.5.1 Η κατανομή Pareto- Burr-Feller (PBF) .....	19

4.5.2	Η κατανομή Generalized Pareto.....	21
4.5.3	Η κατανομή Weibull .....	22
4.5.4	Η κατανομή Lognormal .....	23
4.5.5	Η κατανομή Gamma .....	24
4.5.6	Η κατανομή Rayleigh .....	25
4.6	Η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας .....	26
4.7	Προσαρμογή της εμπειρικής Cdf και Pdf σε καθεμία από τις μελετώμενες κατανομές.....	27
4.8	Δείκτες στατιστικής ανάλυσης αποτελεσμάτων προσαρμογής .....	33
4.9	Στατιστικές ροπές για τους σταθμούς.....	36
4.10	Τεστ προσαρμογής της ουράς.....	38
4.11	Συσχέτιση καταλληλότερης κατανομής που προσμοιάζει τον άνεμο με τα χρόνια μετρήσεων.....	40
<b>5</b>	<b>ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....</b>	<b>43</b>
5.1	Θεωρητικό υπόβαθρο των στοχαστικών ανελίξεων.....	43
5.2	Εφαρμογή της διαδικασίας της Ομογενοποίησης .....	44
5.3	Στοιχεία δυναμικής φαινομένου Hurst – Kolmogorov.....	47
5.4	Το κλιμακόγραμμα ως εργαλείο και τα αποτελέσματα των σταθμών .....	50
5.5	Παραγωγή Συνθετικών Χρονοσειρών .....	52
5.5.1	Το μοντέλο συμμετρικού κυλιόμενου μέσου (symmetric moving average - SMA).....	53
5.5.2	Εφαρμογή των μοντέλων διπλής κυκλοστασιμότητας .....	54
5.5.3	Εκτίμηση παραμέτρων – Μέθοδος των ροπών – Μοντέλα διπλής κυκλοστασιμότητας.....	57
5.5.4	Εφαρμογή της αντίστροφης διαδικασίας της Ομογενοποίησης .....	61
5.6	Μελέτη ετεροσυσχετίσεων μεταξύ των υποπεριόδων.....	64
5.7	Σύγκριση της εμπειρικής Cdf και Pdf με τις συνθετικές Χρονοσειρές .....	66
5.8	Σχέση με τα χρόνια .....	71
<b>6</b>	<b>ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....</b>	<b>75</b>
6.1	Θεωρητικό υπόβαθρο για την αιολική ενέργεια .....	77
6.1.1	Συντελεστής δυναμικότητας (Capacity Factor) .....	77
6.1.2	Το λογαριθμικό προφίλ του ανέμου .....	78
6.2	Εφαρμογή των συνθετικών χρονοσειρών για κάθε κατανομή σε πραγματική ανεμογεννήτρια.....	80
6.3	Οικονομική ανάλυση για επένδυση σε ανεμογεννήτρια.....	83
6.3.1	Βασικές έννοιες Αξιολόγησης Επενδύσεων .....	85
6.3.2	Οικονομική διαχείριση : Περίπτωση 1 <sup>η</sup> :.....	91

6.3.3 Οικονομική διαχείριση : Περίπτωση 2 <sup>η</sup> :.....	95
<b>7</b> ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	99
<b>8</b> ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	101
Ξενόγλωσση.....	101
Ελληνόγλωσση.....	102
Ηλεκτρονικές Ιστοσελίδες .....	103



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Ο Στρόβιλος του Ήρωνα.....	3
Σχήμα 2.2: Η ανεμογεννήτρια ύψους 10 μέτρων του James Blyth.....	4
Σχήμα 3.1: Υπέρυθρη εικόνα της θερμοκρασίας της θάλασσας.....	6
Σχήμα 3.2: Περιστροφή της Γης.....	6
Σχήμα 3.3 (α,β) : Σχηματική απεικόνιση της δύναμης Coriolis.....	7
Σχήμα 3.4: Σχηματική απεικόνιση του γεωστροφικού ανέμου.....	8
Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση του γεωστροφικού ανέμου.....	10
Σχήμα 3.6(α,β) : Απλό ανεμόμετρο (αριστερά), και ανεμόμετρο Θερμού σύρματος (Hot - Wire anemometer) (δεξιά).....	10
Σχήμα 3.7: Ραντάρ Doppler.....	11
Σχήμα 3.8: LIDAR τοποθετημένο πάνω σε ανεμογεννήτρια.....	12
Σχήμα 3.9: SODAR.....	12
Σχήμα 4.1: Ποσοστό των σταθμών των οποίων τα μηδενικά δεν ξεπερνούν το 15% των μετρήσεών τους.....	14
Σχήμα 4.2: Σύνολο σταθμών αρχικά.....	14
Σχήμα 4.3: Σύνολο σταθμών μετά τον 1 <sup>ο</sup> έλεγχο ποιότητας.....	15
Σχήμα 4.4: Τελικοί σταθμοί μετά τον 2 <sup>ο</sup> έλεγχο ποιότητας.....	15
Σχήμα 4.5: Μορφές της Pdf της κατανομής PBF για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων $a, c, k$ .....	20
Σχήμα 4.6 (α,β) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής PBF για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $a$ και για σταθερές τιμές των άλλων 2 ( $c=5$ $k=2$ ).....	21
Σχήμα 4.7 (α,β) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής Generalized Pareto για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων $\sigma, \xi$ .....	22
Σχήμα 4.8 (α,β) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής Weibull για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων $a, b$ . (Στα σχήματα όπου $\lambda=a$ και όπου $k=b$ ).....	23
Σχήμα 4.9 (α,β) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής Lognormal για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων $\mu, \sigma$ .....	24
Σχήμα 4.10 (α,β) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής Gamma για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων $k, \theta$ .....	25
Σχήμα 4.11 (α,β) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής Rayleigh για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $\sigma$ .....	26
Σχήμα 4.12: Παράδειγμα όπου φαίνεται η διαφορά της Cdf και της inverse Cdf.....	28
Σχήμα 4.13 : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf με τις αντίστοιχες Pdf των μελετώμενων κατανομών.....	29
Σχήμα 4.14: Σύγκριση της εμπειρικής Cdf με τις αντίστοιχες Cdf των μελετώμενων κατανομών.....	29
Σχήμα 4.15 (α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής PBF.....	30
Σχήμα 4.16 (α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής Generalized Pareto.....	30
Σχήμα 4.17(α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής Weibull.....	31
Σχήμα 4.18 (α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής Lognormal.....	31
Σχήμα 4.19 (α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής Gamma.....	32
Σχήμα 4.20 (α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής Rayleigh.....	32
Σχήμα 4.21 : Η απόκλιση στην προσαρμογή της κάθε κατανομής για κάθε υποπερίοδο με τον δείκτη Nash.....	35
Σχήμα 4.22 : Η απόκλιση στην προσαρμογή της κάθε κατανομής για κάθε υποπερίοδο με τον δείκτη C.....	35

Σχήμα 4.23 : Διάγραμμα μέσης τιμής με τυπική απόκλιση για κάθε σταθμό υπολογισμένα με τις C ροπές. ....	36
Σχήμα 4.24 : Διάγραμμα μέσης τιμής με τυπική απόκλιση για κάθε σταθμό υπολογισμένα με τις L ροπές. ....	37
Σχήμα 4.25 : Διάγραμμα συντελεστή ασυμμετρίας με τον συντελεστή κύρτωσης για κάθε σταθμό υπολογισμένα με τις C ροπές. ....	37
Σχήμα 4.26: Διάγραμμα συντελεστή ασυμμετρίας με τον συντελεστή κύρτωσης για κάθε σταθμό υπολογισμένα με τις L ροπές.....	38
Σχήμα 4.27: Η Pdf function για threshold $c=4$ m/s σε διπλά λογαριθμικό χαρτί.....	39
Σχήμα 4.28: Η survival function για threshold $c=4$ m/s σε διπλά λογαριθμικό χαρτί.....	39
Σχήμα 4.29: Ποσοστό των σταθμών που προσαρμόζονται καλύτερα σε κάθε κατανομή για threshold $C=1-25$ .....	40
Σχήμα 4.30: Συσχέτιση του αριθμού δεδομένων με την κατανομή που μπορεί να περιγράψει την συμπεριφορά του ανέμου. ....	41
Σχήμα 4.31: Συσχέτιση του αριθμού δεδομένων με την κατανομή που μπορεί να περιγράψει την συμπεριφορά του ανέμου. ....	41
Σχήμα 5.1 (α,β): Η ημερήσια περιοδικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) πριν την ομογενοποίηση. ....	45
Σχήμα 5.2 (α,β): Η εποχικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) πριν την ομογενοποίηση.....	45
Σχήμα 5.3: Η ημερήσια περιοδικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) μετά την ομογενοποίηση.....	46
Σχήμα 5.4 (α,β): Η εποχικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) πριν την ομογενοποίηση.....	46
Σχήμα 5.5: 200 τυχαία αποτελέσματα ρουλέτας .....	47
Σχήμα 5.6: Κλιμακογράμματα μίας ΗΗΚ ανέλιξης, για συντελεστές Hurst $H=0.5$ & $H=0.8$ . ....	48
Σχήμα 5.7: Τα μέσα κλιμακογράμματα των παρατηρημένων χρονοσειρών, των ομογενοποιημένων και του προσαρμοσμένου μοντέλου για την PBF. ....	52
Σχήμα 5.8: Η ημερήσια περιοδικότητα στην μέση τιμή για την παρατηρημένη χρονοσειρά (συνεχόμενη γραμμή) και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας (διακεκομμένη γραμμή) . ....	54
Σχήμα 5.9: Η εποχικότητα στην μέση τιμή για την παρατηρημένη χρονοσειρά και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας. ....	55
Σχήμα 5.10: Η ημερήσια περιοδικότητα στην τυπική απόκλιση για την παρατηρημένη χρονοσειρά (συνεχόμενη γραμμή) και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας (διακεκομμένη γραμμή) . ....	55
Σχήμα 5.11: Η εποχικότητα στην τυπική απόκλιση για την παρατηρημένη χρονοσειρά και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας. ....	55
Σχήμα 5.12: Η ημερήσια περιοδικότητα στην ασυμμετρία για την παρατηρημένη χρονοσειρά (συνεχόμενη γραμμή) και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας (διακεκομμένη γραμμή) . ....	56
Σχήμα 5.13: Η εποχικότητα στην ασυμμετρία για την παρατηρημένη χρονοσειρά (συνεχόμενη γραμμή) και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας (διακεκομμένη γραμμή). ....	56
Σχήμα 5.14 (α,β): Η ημερήσια περιοδικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) στην συνθετική χρονοσειρά πριν την αντίστροφη ομογενοποίηση.....	62
Σχήμα 5.15 (α,β): Η εποχικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) στην συνθετική χρονοσειρά πριν την αντίστροφη ομογενοποίηση. ....	62
Σχήμα 5.16 (α,β): Η εποχικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) στην συνθετική χρονοσειρά πριν την αντίστροφη ομογενοποίηση. ....	63
Σχήμα 5.17 (α,β): Η εποχικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) στην συνθετική χρονοσειρά μετά την αντίστροφη ομογενοποίηση.....	63
Σχήμα 5.18: Ετεροσυσχετίσεις μεταξύ τριμήνων, για το ίδιο τρίωρο, για όλους τους σταθμούς και για χρονική υστέρηση 1.....	64
Σχήμα 5.19: Ετεροσυσχετίσεις μεταξύ τριώνων, μέσα στην ίδια σεζόν (τρίμηνο), για όλους τους σταθμούς και για χρονική υστέρηση 1.....	65

Σχήμα 5.20 (α,β): Ετεροσυσχετίσεις μεταξύ τριμήνων, για το ίδιο τρίωρο, για τον σταθμό του MIT και για χρονική υστέρηση 1, για την παρατηρημένη χρονοσειρά (αριστερά) και την συνθετική (δεξιά). ..	65
Σχήμα 5.21: Ετεροσυσχετίσεις μεταξύ τρίωρων, μέσα στην ίδια σεζόν (τρίμηνο), για τον σταθμό του MIT και για χρονική υστέρηση 1, για την παρατηρημένη χρονοσειρά. ....	66
Σχήμα 5.22: Ετεροσυσχετίσεις μεταξύ τρίωρων, μέσα στην ίδια σεζόν (τρίμηνο), για τον σταθμό του MIT και για χρονική υστέρηση 1, για την συνθετική χρονοσειρά. ....	66
Σχήμα 5.23 (α,β) : Διαγράμματα σύγκρισης της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της συνθετικής χρονοσειράς. ....	67
Σχήμα 5.24 (α,β): Διαγράμματα σύγκρισης της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της συνθετικής χρονοσειράς για το 1ο τρίμηνο και 1ο τρίωρο. ....	67
Σχήμα 5.25 (α,β): Διαγράμματα σύγκρισης της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της συνθετικής χρονοσειράς για το 2ο τρίμηνο και 4ο τρίωρο. ....	68
Σχήμα 5.26 (α,β): Διαγράμματα σύγκρισης της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της συνθετικής χρονοσειράς για το 3ο τρίμηνο και 6ο τρίωρο. ....	68
Σχήμα 5.27 (α,β): Διαγράμματα σύγκρισης της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της συνθετικής χρονοσειράς για το 4ο τρίμηνο και 8ο τρίωρο. ....	69
Σχήμα 5.28 (α,β): Η μέση τιμή (αριστερά) και η τυπική απόκλιση (δεξιά) της απόκλισης της κατανομής PBF που παράχθηκε από την αντίστοιχη θεωρητική PBF με τις ίδιες παραμέτρους. ....	72
Σχήμα 5.29: Ποσοστό συνθετικών χρονοσειρών που ταιριάζει καλύτερα σε κάθε κατανομή.....	73
Σχήμα 5.30: Κλιμακογράμματα των συνθετικών χρονοσειρών σε σχέση με αυτό της παρατηρημένης χρονοσειράς στον σταθμό του MIT για την μέγιστη κλίμακα. ....	74
Σχήμα 6.1: Παγκόσμια αθροιστική εγκατεστημένη αιολική ισχύς 2001-2017.....	75
Σχήμα 6.2: Παγκόσμια ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς 2001-2017.....	75
Σχήμα 6.3: Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως ανά πηγή (συνεχής γραμμή) και με πρόβλεψη (διακεκομμένη γραμμή).....	76
Σχήμα 6.4: Ετήσιοι συντελεστές δυναμικότητας για την αιολική ενέργεια σε παγκόσμια κλίμακα, για την περίοδο 1996-2016.....	77
Σχήμα 6.5: Ετήσιοι συντελεστές δυναμικότητας για κάθε μορφή ενέργειας στις Η.Π.Α για την περίοδο 2013-2017.....	78
Σχήμα 6.6: Ετήσιοι συντελεστές δυναμικότητας για κάθε μορφή ενέργειας στο Ηνωμένο Βασίλειο για την περίοδο 2007-2015.....	78
Σχήμα 6.7: Λογαριθμικό προφίλ μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το υ΄ψομετρο. ....	80
Σχήμα 6.8: Παραγωγή ενέργειας για κάθε κατανομή για 400,000 ώρες. ....	80
Σχήμα 6.9: Τμήμα της υποπαράγραφου ΙΓ.5 του άρθρου 1 του Ν. 4254/2014. ....	82
Σχήμα 6.10: Διαφορά στα τελικά έσοδα από την PBF για κάθε κατανομή. ....	82
Σχήμα 6.11: Η παραγωγή ενέργειας σε TWh για τις 100 συνθετικές χρονοσειρές των 200,000 ωρών. ....	85
Σχήμα 6.12: Η παραγωγή ενέργειας σε TWh για τις 100 συνθετικές χρονοσειρές των 400,000 ωρών. ....	85
Σχήμα 6.13: Ετήσιος δείκτης πληθωρισμού (κανονική γραμμή) και πρόβλεψης (διακεκομμένη γραμμή) με στοιχεία από το ΔΝΤ. ....	87
Σχήμα 6.14: Τμήμα της παραγράφου 2 του άρθρου 3 του Ν.3752/2009, ΦΕΚ Α 40/4.3.2009. ....	88
Σχήμα 6.15: Τμήμα του Ν. 3299/2004. ....	88
Σχήμα 6.16: Αθροιστικές χρηματικές ροές για την αιολική εγκατάσταση - Περίπτωση 1. ....	93
Σχήμα 6.17: Αθροιστικές χρηματικές ροές για την αιολική εγκατάσταση - Περίπτωση 2. ....	96





## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

<i>Πίνακας 3.1: Πίνακας με τις επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου για κάθε γεωγραφικό πλάτος.....</i>	<i>8</i>
<i>Πίνακας 6.1: Πίνακας ενδεικτικών συντελεστών τραχύτητας. ....</i>	<i>79</i>
<i>Πίνακας 6.2: Επιπλέον κόστη στην τοποθέτηση μιας ανεμογεννήτριας.....</i>	<i>84</i>
<i>Πίνακας 6.3: Φορολογικά κλιμάκια με την ισχύουσα νομοθεσία.....</i>	<i>90</i>
<i>Πίνακας 6.4: Οι συντελεστές αποσβέσεων σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία. ....</i>	<i>91</i>
<i>Πίνακας 6.5: Δεδομένα επένδυσης αιολικής εγκατάστασης - Περίπτωση 1. ....</i>	<i>92</i>
<i>Πίνακας 6.6: Πίνακας ταμειακών ροών για την αιολική εγκατάσταση - Περίπτωση 1. ....</i>	<i>94</i>
<i>Πίνακας 6.7: Δεδομένα επένδυσης αιολικής εγκατάστασης - Περίπτωση 2. ....</i>	<i>95</i>
<i>Πίνακας 6.8: Πίνακας ταμειακών ροών για την αιολική εγκατάσταση - Περίπτωση 2.....</i>	<i>97</i>



*“Από τότε που κουράστηκα να ψάχνω, έμαθα να βρίσκω. Κι από τότε που ο άνεμος μου εναντιώθηκε, έμαθα να σαλπάρω με όλους τους ανέμους.”*

Φρίντριχ Νίτσε, 1844-1900

*“Υπάρχουν τριών ειδών ψεύδη: τα συνήθη, τα καταστρεπτικά και η στατιστική.”*

Βενιαμίν Ντισραέλι, 1804-1881



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

## 1.1 Στόχοι Εργασίας

1. Η κατανόηση της αιτιοκρατίας για την διεργασία της ταχύτητας του ανέμου σε όλες τις χρονικές κλίμακες.
2. Η πρόταση νέας κατανομής για την διεργασία της ταχύτητας του ανέμου σε ωριαία και μηνιαία χρονική κλίμακα.
3. Ο στατιστικός έλεγχος των προηγούμενων κατανομών.
4. Η μελέτη της στοχαστικής φύσης και δομής της ταχύτητας του ανέμου.
5. Η μελέτη των ετεροσυσχετίσεων των ωρών και μηνών για την ταχύτητα του ανέμου.
6. Η δημιουργία ενός ψευδο-κυκλοστάσιμου μοντέλου μακροπρόθεσμης εμμονής διατηρώντας την κατανομή με σκοπό την αναπαραγωγή της ταχύτητας του ανέμου.
7. Η εφαρμογή του μοντέλου και η σύγκριση των παραχθέντων αποτελεσμάτων με τα εμπειρικά παρατηρημένα δεδομένα.
8. Τέλος, η αξιοποίηση των συνθετικών χρονοσειρών σημειακής χωρικής κλίμακας που παρήχθησαν με σκοπό την εφαρμογή στην οικονομική διαχείριση μιας αιολικής εγκατάστασης.



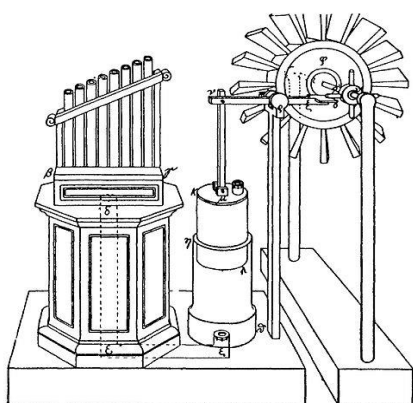
## 2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

---

Από την αρχαιότητα, οι άνθρωποι προσπαθούν να αξιοποιήσουν κάθε μορφή ενέργειας για να αναπτύξουν τον πολιτισμό τους. Μία από τις πιο παλιές μορφές ενέργειας που έχει εκμεταλλευθεί είναι αυτή του ανέμου, η οποία αξιοποιείται από την στιγμή που οι άνθρωποι άρχισαν να χρησιμοποιούν τα πανιά. Πάνω από 5.000 χρόνια πριν, οι αρχαίοι Αιγύπτιοι εκμεταλλεύθηκαν τον άνεμο για να μπορέσουν να πλεύσουν πλοία στον ποταμό Νείλο.

Ο αυτοκράτορας της Βαβυλώνας, Χαμουραμπί, σχεδίαζε να αξιοποιήσει την αιολική ενέργεια για ένα φιλόδοξο έργο άρδευσης τον 17<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. Μέχρι το 200 π.Χ. είχαν χρησιμοποιηθεί απλές αντλίες νερού με ανεμογεννήτριες στην Κίνα, και ανεμόμυλοι με πλεκτά πτερύγια άλεθαν σιτηρά στην Περσία και τη Μέση Ανατολή.

Το πρώτο παράδειγμα αιολικής μηχανής, ήταν από τον Έρωνα τον Αλεξανδρέα (300 - 230 π.Χ.). Ο Έρωνας έφτιαξε μια συσκευή, που περιελάμβανε έναν μικρό στρόβιλο ο οποίος τροφοδοτούσε ένα έμβολο και ανάγκαζε τον αέρα να περνά μέσα από τους σωλήνες του οργάνου δημιουργώντας ήχους και σφυρίγματα, σαν τον ήχο μίας φλογέρας (Σχήμα 2.1). Με άλλα λόγια, ο πεπιεσμένος αέρας που δημιουργεί ο μικρός στρόβιλος στο έμβολο, διοχετεύεται στον κάθε αυλό πιέζοντας ένα πλήκτρο, το οποίο ανοίγει την αντίστοιχη κάτω τρύπα του κάθε αυλού.



Σχήμα 2.1: Ο Στρόβιλος του Έρωνα.

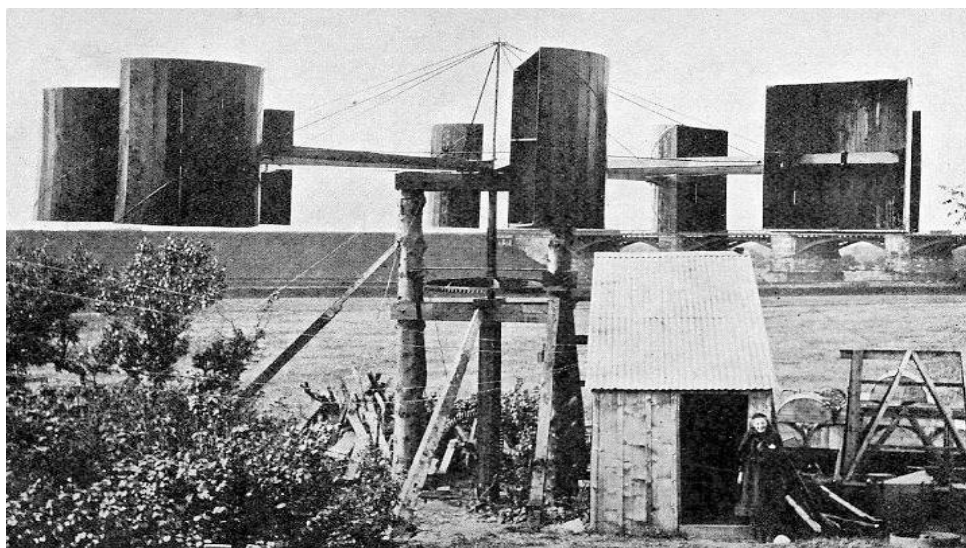
Πρακτικά, οι πρώτοι ανεμόμυλοι υπήρξαν στην Περσία από τον 9<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ., ίσως και από τον 7<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ., όπου χρησιμοποιήθηκαν για την άντληση νερού και την εξαγωγή χυμού από ζαχαροκάλαμο. Η χρήση ανεμόμυλων επεκτάθηκε ραγδαία στην Μέση Ανατολή και την κεντρική Ασία και αργότερα εξαπλώθηκε στην Κίνα και την Ινδία.

Με τις εκστρατείες και το εμπόριο η τεχνολογία για την αιολική ενέργεια διαδόθηκε και στην Ευρώπη, και νέοι τρόποι χρήσης της τελευταίας τελικά εξαπλώθηκαν σε όλον, τον τότε, γνωστό κόσμο. Μέχρι το 1000 μ.Χ., οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιούνταν εκτεταμένα στη Μέση Ανατολή για την παραγωγή τροφίμων, καθώς και για την άντληση θαλασσινού νερού και την παραγωγή αλατιού στην Κίνα και τη Σικελία.

Τον 14<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. οι Ολλανδοί ανέπτυξαν τεράστιους ανεμόμυλους για να αποστραγγίσουν τις περιοχές του δέλτα του ποταμού Ρήνου, όπου υπήρχαν πολλά έλη και λίμνες.

Τον 18<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. οι αποικιοκράτες στην Αμερική χρησιμοποίησαν τους ανεμόμυλους για να αντλήσουν νερό για την παραγωγή αλατιού, να κόψουν ξύλα και να αλέσουν σιτηρά κατά τη διάρκεια της αμερικανικής επανάστασης. Στη Μύκονο και σε άλλα νησιά της Ελλάδας οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για τη μίξη του αλευριού και παρέμειναν σε χρήση μέχρι τις αρχές του 20<sup>ού</sup> αιώνα. Πολλοί από αυτούς είναι τώρα ανακαινισμένοι για να κατοικηθούν.

Η πρώτη ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος κατασκευάστηκε στη Σκωτία τον Ιούλιο του 1887 από τον καθηγητή James Blyth του κολlegίου Anderson's, στην Γλασκώβη (πρόδρομος του Πανεπιστημίου Strathclyde). Η ανεμογεννήτρια ύψους 10 μέτρων, που ήταν φτιαγμένη με πανιά, εγκαταστάθηκε στον κήπο του εξοχικού σπιτιού του, και χρησιμοποιήθηκε για τη φόρτιση των συσσωρευτών που ανέπτυξε ο Γάλλος Camille Alphonse Faure, για να τροφοδοτήσει τον φωτισμό στο εξοχικό του σπίτι, κάνοντάς το έτσι, το πρώτο σπίτι στον κόσμο που διαθέτει ηλεκτρική ενέργεια από τον άνεμο. (Σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2: Η ανεμογεννήτρια ύψους 10 μέτρων του James Blyth.



## 3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

### 3.1 Πως δημιουργείται η Αιολική Ενέργεια

#### 3.1.1 Από πού προέρχεται η Αιολική Ενέργεια

Όλες οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, (εκτός από την παλιρροιακή και γεωθερμική ενέργεια) τελικά προέρχονται από τον ήλιο. Αναφορικά:

Α) Ηλιακή Ενέργεια: Τα φωτοβολταϊκά πάνελ αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια

Β) Υδροηλεκτρική Ενέργεια: Η ηλιακή ενέργεια εξατμίζει επίσης το νερό που πέφτει ως βροχή και συσσωρεύεται σε ταμιευτήρες με την κατασκευή φραγμάτων.

Γ) Κυματική Ενέργεια: Τα κύματα δημιουργούνται εξαιτίας του ανέμου, ο οποίος είναι αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας.

Δ) Βιοκαύσιμο: Δημιουργείται από τα δέντρα, που αναπτύσσονται με την βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ε) Αιολική Ενέργεια: Οι ανεμογεννήτριες αξιοποιούν την δύναμη του ανέμου, ο οποίος είναι αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

Ο ήλιος ακτινοβολεί 174.423.000.000.000 kWh (κιλοβατώρες) ενέργειας στη γη ανά ώρα. Με άλλα λόγια, η γη λαμβάνει  $1,74 \times 10^{17}$  watts ισχύος. Περίπου το 1 έως 2% της ενέργειας που προέρχεται από τον ήλιο μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Αυτό είναι ίσο περίπου, με 50 έως 100 φορές περισσότερο από την ενέργεια που μετατρέπεται σε βιομάζα από όλα τα φυτά στη γη.

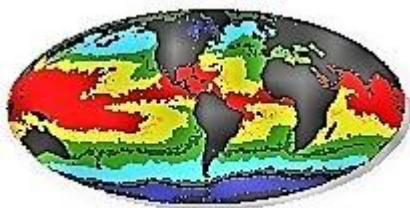
#### 3.1.2 Άνεμος λόγω Διαφοράς Θερμοκρασίας

Η εκπομπή ηλιακής ακτινοβολίας από τον ήλιο είναι  $1,37 \text{ kW}/\text{m}^2$  στην επιφάνεια της γης, η οποία έχει τον ήλιο ως κέντρο και ακτίνες τη μέση τροχιά της γης. Η ακτινοβολία

χτυπά έναν κυκλικό δίσκο με έκταση  $1,27 \times 10^{14} \text{ m}^2$ . Έτσι, η ακτινοβολία που εκπέμπεται στη γη είναι :

$$1,37 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} * 1,27 \times 10^{14} \text{ m}^2 = 1,74 \times 10^{17} \text{ W}$$

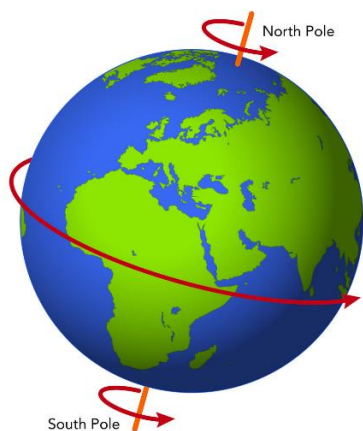
Οι περιοχές γύρω από τον ισημερινό, σε γεωγραφικό πλάτος  $0^\circ$ , θερμαίνονται περισσότερο από τον ήλιο από ό,τι το υπόλοιπο της υδρογείου, αφού οι ακτίνες του ηλίου πέφτουν σχεδόν κάθετα καθόλη την διάρκεια του χρόνου. Αυτές οι ζεστές περιοχές υποδεικνύονται με ζεστά χρώματα, κόκκινο και κίτρινο σε αυτή την υπέρυθρη εικόνα της θερμοκρασίας της θάλασσας. (Σχήμα 3.1)



Σχήμα 3.1: Υπέρυθρη εικόνα της θερμοκρασίας της θάλασσας.

Ο ζεστός αέρας από τον ισημερινό είναι ελαφρύτερος από τον κρύο αέρα και εγείρεται στον ουρανό μέχρι να φτάσει σε υψόμετρο περίπου 10 χλμ., όπου και θα εξαπλωθεί στον Βορρά και στον Νότο. Εάν η Γη δεν περιστρεφόταν, ο αέρας απλά θα έφτανε στον Βόρειο και στον Νότιο πόλο, θα βυθιζόταν μέχρι την επιφάνεια του εδάφους και θα επέστρεφε ξανά στον ισημερινό.

Δεδομένου όμως ότι η Γη περιστρέφεται, αριστερόστροφα (αντίθετα από τους δείκτες του ρολογιού) (Σχήμα 3.2), κάθε κίνηση στο Βόρειο ημισφαίριο εκτρέπεται προς τα δεξιά και στο νότιο ημισφαίριο αντιστρόφως, προς τα αριστερά, και εφόσον η δύναμη είναι κάθετη στην ταχύτητα, οι τροχιές των ανέμων είναι κυκλικές. Αυτή η φαινομενική δύναμη κάμψης είναι γνωστή ως δύναμη Coriolis. (Πήρε το όνομά της από τον Γάλλο μαθηματικό Gustave Gaspard de Coriolis 1792-1843).

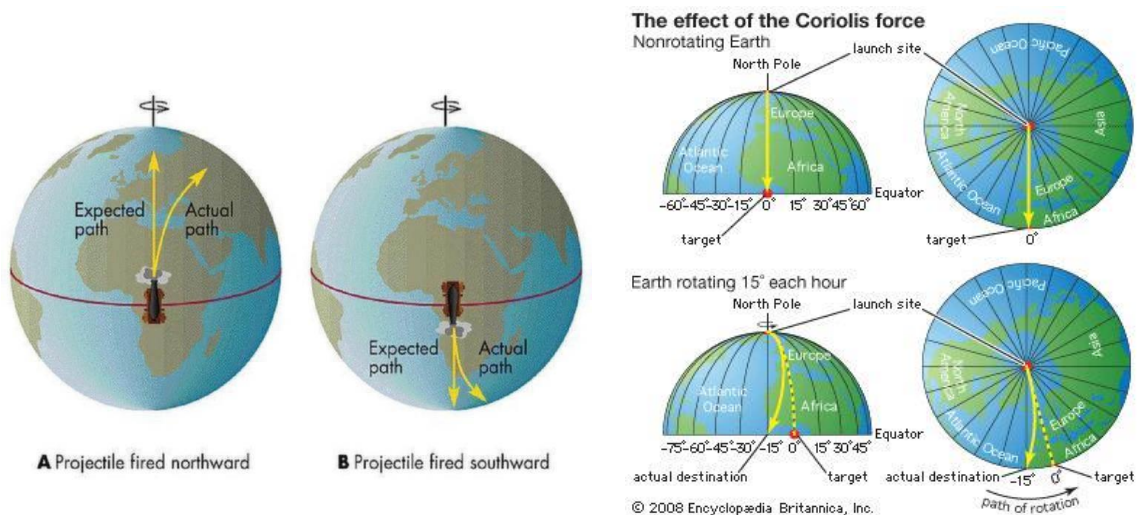


Σχήμα 3.2: Περιστροφή της Γης.

### 3.1.3 Η δύναμη Coriolis

Μια σημαντική περίπτωση όπου παρατηρείται η δύναμη Coriolis, είναι στην περιστρεφόμενη Γη με την ατμόσφαιρά της. Η ατμόσφαιρα περιστρέφεται σε συγχρονισμό με την επιφάνεια της Γης, λόγω των δυνάμεων τριβής μεταξύ των μορίων της ατμόσφαιρας (ιξώδες του αέρα) και της επιφάνειας της Γης, η οποία προκαλεί την παράσυρση των μορίων του αέρα και την κίνησή τους σε συγχρονισμό με την επιφάνεια της γης.

Καθώς η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της, τα πάντα που είναι συνδεδεμένα με αυτήν, συμπεριλαμβανομένης και της ατμόσφαιράς της, στρέφονται με αυτήν. Ένα αντικείμενο το οποίο κινείται χωρίς να έλκεται μαζί με την περιστροφή της επιφάνειας ή της ατμόσφαιρας, όπως μία βαλλιστική δοκιμή ή μια ανεξάρτητη μάζα αέρα μέσα στην ατμόσφαιρα, ταξιδεύει σε ευθεία κίνηση πάνω από την περιστρεφόμενη Γη. Από την περιστρεφόμενη οπτική μας γωνία στον πλανήτη, η κατεύθυνση της κίνησης της βαλλιστικής δοκιμής αλλάζει καθώς μετακινείται, γέρνοντας προς την αντίθετη κατεύθυνση από την πραγματική μας κίνηση. Βλέποντάς το από ένα σταθερό σημείο στο διάστημα ακριβώς πάνω από τον Βόρειο πόλο, οποιοδήποτε σημείο της γης στο βόρειο ημισφαίριο γυρίζει αριστερόστροφα - και, σταθεροποιώντας το βλέμμα μας σε αυτή τη θέση, οποιοδήποτε άλλο σημείο στο συγκεκριμένο ημισφαίριο περιστρέφεται γύρω από αυτό με τον ίδιο τρόπο. Επομένως, το ίχνος στο έδαφος ενός ελεύθερα κινούμενου σώματος σε βαλλιστική δοκιμή που ταξιδεύει από ένα σημείο στο άλλο, κάμπτεται δεξιόστροφα, η οποία συμβατικά χαρακτηρίζεται ως "δεξιά". (Σχήμα 3.3 & 3.4)



Σχήμα 3.3 (α,β) : Σχηματική απεικόνιση της δύναμης Coriolis.

Η δύναμη Coriolis είναι ένα ορατό φαινόμενο. Οι σιδηροδρομικές διαδρομές φθείρονται ταχύτερα στη μία πλευρά από την άλλη. Οι κοίτες των ποταμών σκάβονται βαθύτερα στη μία πλευρά σε σχέση με την άλλη (το ποια πλευρά εξαρτάται από το ημισφαίριο στο οποίο βρίσκονται).

3.1.4 Πώς η δύναμη Coriolis επηρεάζει τον άνεμο σε παγκόσμια κλίμακα  
 Ο άνεμος εγείρεται από τον ισημερινό και κινείται βόρεια και νότια στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Στον ισημερινό η δύναμη Coriolis είναι μηδενική. Περίπου στις 30° γεωγραφικού πλάτους και των δύο ημισφαιρίων, η δύναμη Coriolis εμποδίζει τον αέρα να κινηθεί μακρύτερα. Σε αυτό το γεωγραφικό πλάτος υπάρχει μια περιοχή υψηλής πίεσης, καθώς ο αέρας αρχίζει να βυθίζεται ξανά. Καθώς ο άνεμος εγείρεται από τον ισημερινό, δημιουργείται μια περιοχή χαμηλής πίεσης κοντά στο επίπεδο του εδάφους που θα προσελκύει άνεμους από το Βορρά και το Νότο. Τέλος στους Πόλους, θα υπάρξει υψηλή πίεση λόγω της ψύξης του αέρα.



Σχήμα 3.4: Σχηματική απεικόνιση του γεωστροφικού ανέμου.

Λαμβάνοντας υπόψη και τη δύναμη κάμψης της δύναμης Coriolis, έχουμε τα ακόλουθα γενικά αποτελέσματα για την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου:

Γεωγραφικό Πλάτος	90° – 60° B	60° – 30° B	30° – 0° B	0° – 30° N	30° – 60° N	60° – 90° N
Διεύθυνση Ανέμου	ΒΑ	ΝΔ	ΒΑ	ΝΑ	ΒΔ	ΝΑ

Πίνακας 3.1: Πίνακας με τις επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου για κάθε γεωγραφικό πλάτος.

Αυτά τα στοιχεία είναι εξαιρετικά σημαντικά σε περιοχές όπου προβλέπεται η τοποθέτηση ανεμογεννήτριας, αλλά υπάρχει έλλειψη δεδομένων.

## 3.2 Είδη Ανέμων

### 3.2.1 Επιφανειακός Άνεμος

Οι άνεμοι επηρεάζονται πολύ από την επιφάνεια του εδάφους σε υψόμετρα μέχρι και τα 100 μέτρα. Ο άνεμος επιβραδύνεται από την τραχύτητα της επιφάνειας της γης και τα εμπόδια στο έδαφος. Οι επιφανειακοί άνεμοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, την θαλάσσια και την ορεινή αύρα.

#### Θαλάσσια Αύρα

Ο ήλιος θερμαίνει τις χερσαίες μάζες πιο γρήγορα από τη θάλασσα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο αέρας εγείρεται, ρέει προς τη θάλασσα, και δημιουργεί χαμηλό

βαρομετρικό στο επίπεδο του εδάφους όπου προσελκύεται ο δροσερός αέρας από τη θάλασσα. Αυτό ονομάζεται θαλάσσια αύρα. Κατά το σούρουπο, υπάρχει συχνά μια περίοδος ηρεμίας όπου οι θερμοκρασίες στην ξηρά και την θάλασσα είναι ίσες. Τη νύχτα ο άνεμος φυσά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Ο αέρας στην ξηρά το βράδυ έχει γενικά χαμηλότερες ταχύτητες, επειδή η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ξηράς και θάλασσας είναι μικρότερες τη νύχτα.

### Ορεινή Αύρα

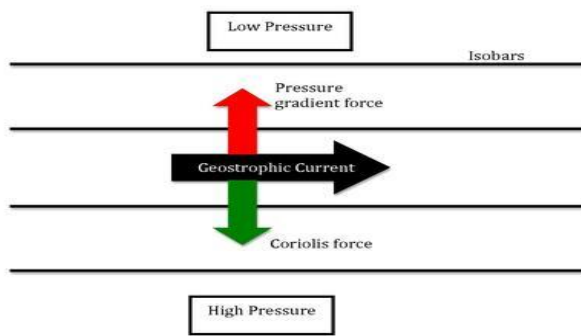
Οι ορεινές περιοχές παρουσιάζουν πολλά ενδιαφέροντα μοτίβα καιρού. Ένα παράδειγμα είναι ο άνεμος σε κοιλάδες, ο οποίος ξεκινά από τις νότιες πλαγιές (αντίστοιχα από τις βόρειες πλαγιές στο νότιο ημισφαίριο). Όταν οι πλαγιές και ο συνάμα ο αέρας θερμαίνονται, η πυκνότητα του αέρα μειώνεται και ο αέρας ανεβαίνει προς την κορυφή ακολουθώντας την επιφάνεια της κλίσης. Τη νύχτα η κατεύθυνση του ανέμου αντιστρέφεται και κινείται από την κορυφή προς τα κάτω.

Οι μουσώνες (συγκεκριμένη περίοδος του χρόνου όπου συμβαίνει η πλειοψηφία των βροχοπτώσεων) που είναι γνωστοί από τη νοτιοανατολική Ασία, είναι στην πραγματικότητα μια μορφή της θαλάσσιας και της ορεινής αύρας σε μεγάλη κλίμακα, που ποικίλλει ως προς την κατεύθυνση του ανέμου μεταξύ των εποχών, επειδή οι χερσαίες μάζες θερμαίνονται ή ψύχονται πιο γρήγορα από τη θάλασσα.

### 3.2.2 Γεωστροφικός Άνεμος

Οι γεωστροφικοί άνεμοι λαμβάνουν χώρα σε υψόμετρα άνω των 1000 μέτρων, και είναι μία ειδική περίπτωση, όπου ο εγχειρόμενος αέρας φτάνει σε μία κατάσταση ισορροπίας δύο μόνο δυνάμεων, της Coriolis και της διαφοράς πίεσης.

Ο αέρας κινείται φυσικά από περιοχές υψηλής πίεσης σε περιοχές χαμηλής πίεσης, λόγω της δύναμης που προκαλεί η διαφορά δυναμικού. Μόλις όμως ο αέρας αρχίσει να κινείται, η δύναμη Coriolis τον εκτοπίζει. Η εκτροπή είναι προς τα δεξιά στο βόρειο ημισφαίριο και προς τα αριστερά στο νότιο ημισφαίριο. Καθώς ο αέρας μετακινείται από τις περιοχές υψηλής πίεσης, η ταχύτητά του αυξάνεται, όπως και η εκτροπή λόγω της Coriolis. Η εκτροπή αυξάνεται μέχρις ότου οι δυνάμεις Coriolis και διαφοράς πίεσης να βρίσκονται σε γεωστροφική ισορροπία: σε αυτό το σημείο, ο αέρας δεν κινείται πλέον από υψηλές σε χαμηλές πιέσεις, αλλά μετακινείται κατά μήκος ενός ισοβαρούς. Να σημειωθεί ότι αυτή η εξήγηση, υποθέτει ότι η ατμόσφαιρα ξεκινά σε μια γεωστροφικά μη ισορροπημένη κατάσταση και περιγράφει πώς μια τέτοια κατάσταση θα εξελιχθεί σε μια ισορροπημένη ροή. Στην πράξη βέβαια, η ροή είναι σχεδόν πάντα ισορροπημένη. *Συνοπτικά επομένως, η δύναμη Coriolis δρα σε ορθή γωνία με τη ροή και όταν εξισορροπείται με τη δύναμη διαφοράς πίεσης, η προκύπτουσα ροή είναι γνωστή ως γεωστροφική (Σχήμα 3.5).* Η γεωστροφική ισορροπία συμβάλλει στην εξήγηση, γιατί στο βόρειο ημισφαίριο συστήματα χαμηλής πίεσης (ή κυκλώνες), περιστρέφονται αριστερόστροφα και συστήματα υψηλής πίεσης (ή αντικυκλώνες) στρέφονται δεξιόστροφα και αντιστρόφως στο νότιο ημισφαίριο.



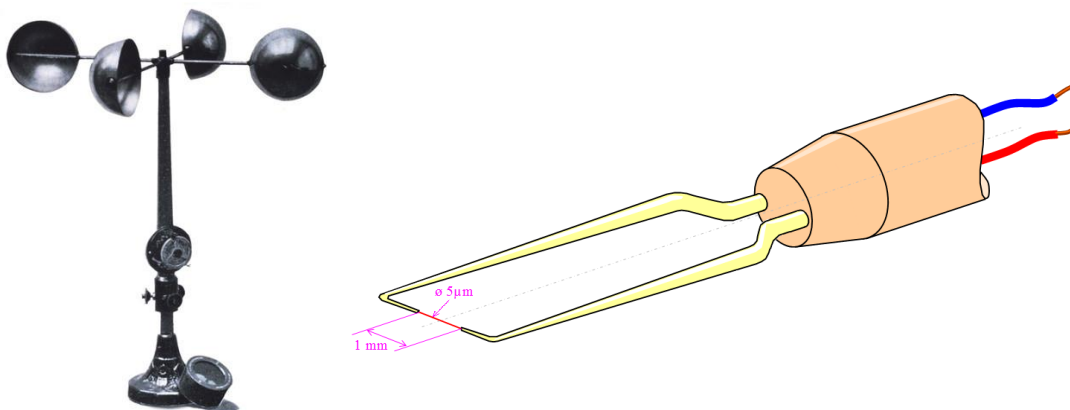
Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση του γεωστροφικού ανέμου.

### 3.3 Όργανα Μέτρησης του Ανέμου

#### 3.3.1 Ανεμόμετρο

Το ανεμόμετρο είναι ένα από τα απλούστερα μετεωρολογικά εργαλεία, που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου. Το απλό ανεμόμετρο αποτελείται από έλικα με κύπελλα στα άκρα των λεπίδων για να πιάσει τον άνεμο. Η ταχύτητα που δημιουργεί ο αέρας στην περιστροφή του έλικα καθορίζει την ταχύτητα του ανέμου. (Σχήμα 3.7 (α))

Τα ανεμόμετρα θερμού σύρματος μπορούν να μετρήσουν πολύ μικρές μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου και χρησιμοποιείται για την έμμεση ταχύτητα της ροής, με βάση την συνεχή παρακολούθηση των θερμικών απωλειών γύρω από ένα θερμαινόμενο αισθητήρα. (Σχήμα 3.7 (β))



Σχήμα 3.6(α,β) : Απλό ανεμόμετρο (αριστερά), και ανεμόμετρο Θερμού σύρματος (Hot - Wire anemometer) (δεξιά).

### 3.3.2 Ραντάρ Doppler

Οι επιστήμονες ανέπτυξαν το ραντάρ Doppler στη δεκαετία του 1960 για να μετρήσουν την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου στις καταιγίδες. Πριν από αυτό, ήταν πολύ δύσκολο να γνωρίζουμε τι συνέβαινε στο εσωτερικό της καταιγίδας. Το ραντάρ Doppler έφερε την επανάσταση στις μετεωρολογικές μελέτες, με τη μέτρηση της ταχύτητας και της διεύθυνσης ενός κινούμενου αντικειμένου, όπως τα σταγονίδια βροχής στον αέρα. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς το ραντάρ στέλνει τα μικροκύματα προς μια περιοχή και στη συνέχεια μετρά τον τρόπο με τον οποίο άλλαξαν τα κύματα, καθώς αυτά επιστρέφουν προς τη συσκευή εκπομπής μικροκυμάτων. (Σχήμα 3.7)



Σχήμα 3.7: Ραντάρ Doppler

### 3.3.3 Laser-Based LIDAR (Light Detection And Ranging)

Η συγκεκριμένη συσκευή λειτουργεί σαν το ραντάρ Doppler, με την διαφορά ότι αντί μιας δέσμης μικροκυμάτων χρησιμοποιούνται ακτίνες λέιζερ. Σε αντίθεση με το ραντάρ, το LIDAR μετράει τις ταχύτητες του ανέμου που βρίσκονται πιο κοντά στο έδαφος και αναλύει τις επιπτώσεις του ανέμου σε κτίρια και δέντρα, τα οποία βρίσκονται στο έδαφος. Το LIDAR μετρά την ταχύτητα του ανέμου, αναλύοντας την ταχύτητα μερικών δεσμίδων φωτός που ανακλούν πίσω στον πομπό, από τις φυσικές μικροσκοπικές σταγόνες υγρασίας στον αέρα. Η ταχύτητα με την οποία επιστρέφει το φως του λέιζερ πίσω στον πομπό καθορίζει την ταχύτητα του ανέμου. Παρά το γεγονός ότι έχει πολλές χρήσεις, το LIDAR είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στη βαθμονόμηση του σφάλματος εκτροπής των ανεμογεννητριών, με την έννοια ότι βελτιστοποιείται η τοποθέτησή της, ώστε το σφάλμα εκτροπής, που είναι η μετατόπιση μεταξύ της πραγματικής κατεύθυνσης του ανέμου και της κατεύθυνσης του στροβίλου, να είναι το ελάχιστο. (Σχήμα 3.8)



*Σχήμα 3.8: LIDAR τοποθετημένο πάνω σε ανεμογεννήτρια.*

#### 3.3.4 Sound-Based SODAR (SOund Detection And Ranging)

Η συγκεκριμένη συσκευή χρησιμοποιεί επίσης το φαινόμενο Doppler για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του ανέμου. Έχει ακριβώς τον ίδιο τρόπο λειτουργίας με το LIDAR, με την διαφορά ότι εδώ χρησιμοποιούνται κύματα ήχου αντί για δέσμες φωτός. Όπως το LIDAR, μετράει τις ταχύτητες ανέμου κοντά στο έδαφος και χρησιμοποιείται συνήθως για τη βαθμονόμηση ανεμογεννητριών. (Σχήμα 3.9)



*Σχήμα 3.9: SODAR*



## 4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

---

### 4.1 Δεδομένα και Περιοχές Μελέτης

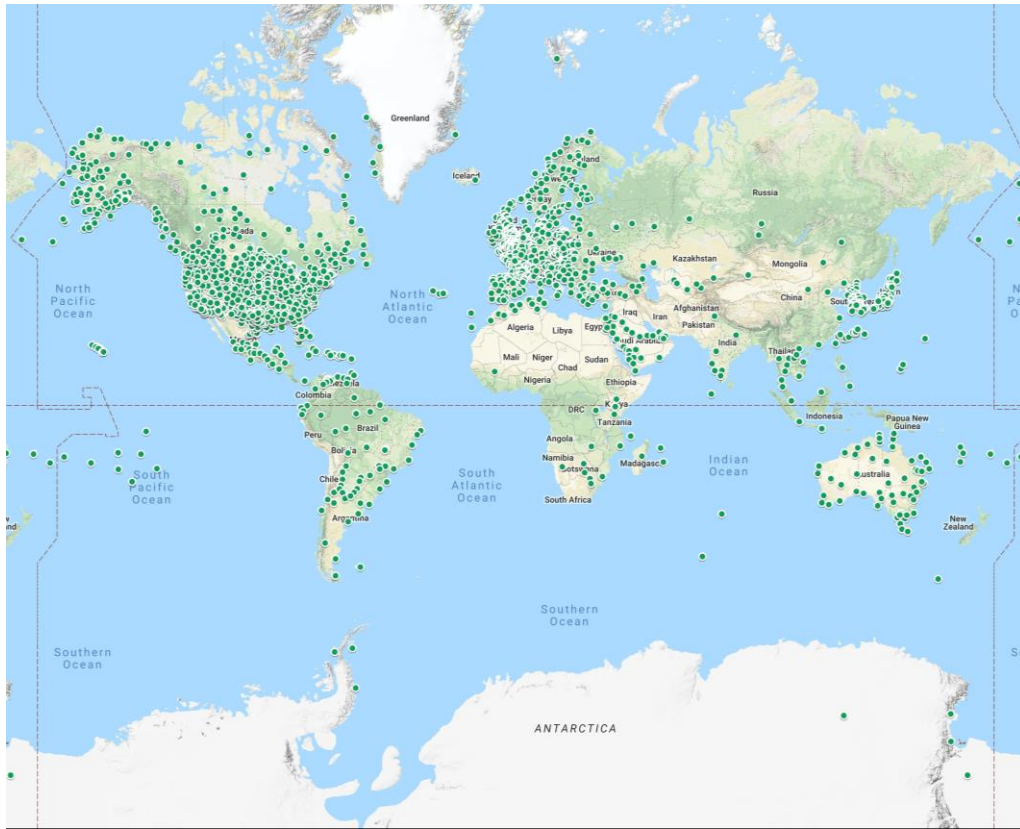
Για τη διερεύνηση της στοχαστικής ανάλυσης του ανέμου, συλλέχθηκαν δεδομένα ταχύτητας ανέμου από μία μεγάλη βάση δεδομένων 15000 μετεωρολογικών σταθμών παγκοσμίως, εκ των οποίων 7572 λειτουργούν μέχρι σήμερα (Σχήμα 4.2) (πηγή: National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>). Οι χρονοσειρές τους χωρίστηκαν σε 32 υποπεριόδους, 4 τρίμηνα και 8 τρίωρα, για την αντιμετώπιση της διπλής κυκλοστασιμότητας του ανέμου (θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο). Στη συνέχεια, σε αυτούς τους σταθμούς έγιναν κάποιοι ποιοτικοί και ποσοτικοί έλεγχοι της πληροφορίας τους.

- Το πρώτο κριτήριο που έπρεπε να πληρούν ήταν να έχουν τουλάχιστον 1000 ωριαίες τιμές σε κάθε υποπερίοδο, δηλαδή να υπάρχουν τουλάχιστον τρία χρόνια μετρήσεων για κάθε σεζόν ( $3h \times 30d \times 3m \times 3y = 810$ ). Από τους 7572 συνολικά σταθμούς, αυτό το κριτήριο το πληρούσαν 2579 σταθμοί (Σχήμα 4.3).
- Το δεύτερο κριτήριο αφορούσε το σύνολο των μηδενικών για κάθε σταθμό, το οποίο δεν έπρεπε να ξεπερνάει το 15% των μετρήσεων. Τελικώς, έμειναν 1973 σταθμοί (Σχήμα 4.4).

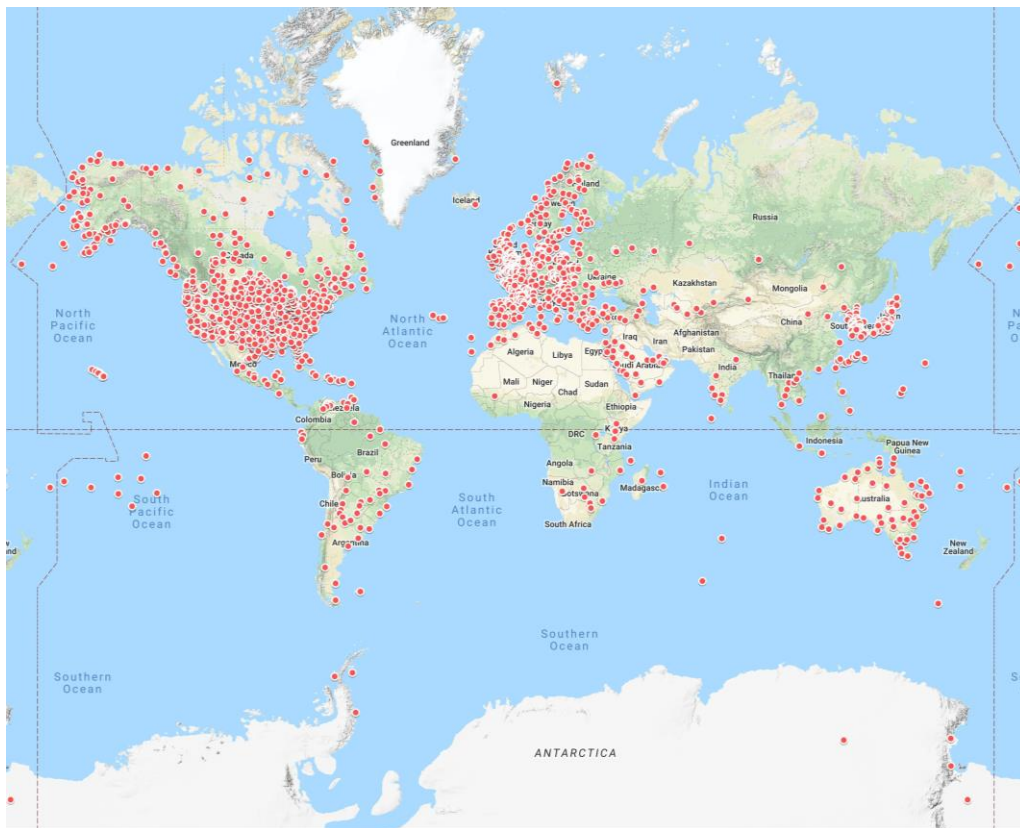
Για το 2<sup>ο</sup> κριτήριο παρατηρήθηκε ότι, οι σταθμοί των οποίων τα μηδενικά δεν ξεπερνούν το 15% των μετρήσεών τους, αντιστοιχεί στο 77% περίπου των σταθμών που πέρασαν από τον 1<sup>ο</sup> έλεγχο, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.1.

Φαίνεται τελικώς, ότι η συντριπτική πλειοψηφία των λειτουργικών σταθμών βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο.





Σχήμα 4.3: Σύνολο σταθμών μετά τον 1<sup>ο</sup> έλεγχο ποιότητας.



Σχήμα 4.4: Τελικοί σταθμοί μετά τον 2<sup>ο</sup> έλεγχο ποιότητας.

## 4.2 Διπλή Κυκλοστασιμότητα της Ταχύτητας του Ανέμου

Μία ανέλιξη είναι **στάσιμη** όταν οι στατιστικές παράμετροί της δεν μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. **Κυκλοστάσιμη** ονομάζεται η ανέλιξη της οποίας οι στατιστικές παράμετροι είναι περιοδικές συναρτήσεις του χρόνου. (Κουτσογιάννης, 2013).

Η μεταβλητή της ταχύτητας ανέμου, παρουσιάζει διπλή κυκλοστασιμότητα, μηνιαία και ωριαία. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε μήνα και κάθε ώρα παρατηρούνται διαφορετικά χαρακτηριστικά της ανέλιξης, όπως μέση τιμή και τυπική απόκλιση. Λαμβάνοντας υπ' όψιν και τη διπλή κυκλοστασιμότητα, η στοχαστική ανάλυση και προσομοίωση θα είναι πιο έγκυρες.

Για την αντιμετώπιση λοιπόν, της διπλής κυκλοστασιμότητας, τα δεδομένα των σταθμών χωρίστηκαν σε τέσσερα τρίμηνα (σεζόν) μέσα στον χρόνο, και οχτώ τρίωρα μέσα στην μέρα, όπου τα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς του ανέμου, παρατηρήθηκε ότι παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Έτσι κάθε χρονοσειρά ανέμου από κάθε σταθμό χωρίστηκε σε 32 επιμέρους υποπεριόδους ( $4$  (3μηνα) \*  $8$  (3ωρα) ). Έπειτα, εφαρμόστηκε μια διαδικασία, ώστε να εξαλειφθεί η διπλή κυκλοστασιμότητα του ανέμου, η ομογενοποίηση. Γενικότερα αξίζει να σημειωθεί ότι, μελετώντας την διεργασία σε παγκόσμια κλίμακα, συμπεραίνουμε ότι, η εμφανής διπλή περιοδικότητα δεν είναι παντού εξίσου έντονη. Αυτό οφείλεται σε αρκετούς παράγοντες και άλλες διεργασίες, όπως παραδείγματος χάριν η νεφοκάλυψη, που επηρεάζουν την ηλιακή ακτινοβολία, αφού εισέλθει στην ατμόσφαιρα.

## 4.3 Μοντέλα διπλής κυκλοστασιμότητας

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν μερικές εκδοχές ντετερμινιστικών μοντέλων και θα γίνει προσπάθεια να εφαρμοστεί το καταλληλότερο από αυτά στην ωριαία και εποχιακή κατανομή του ανέμου. Για την περιγραφή της διπλής κυκλοστασιμότητας έχουν αναπτυχθεί μοντέλα, που συνδυάζουν τριγωνομετρικές και εκθετικές συναρτήσεις.

Κάθε μοντέλο περιλαμβάνει έναν αριθμό παραμέτρων. Η τιμή τους υπολογίζεται από την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος τετραγωνικών σφαλμάτων μεταξύ παρατηρημένων τιμών των ανελιξεων και θεωρητικών τιμών του μοντέλου. Με άλλα λόγια από το μοντέλο κατασκευάζεται ένας νέος πίνακας, ο οποίος έχει τιμές παραπλήσιες του αρχικού. Σε κάθε σταθμό αντιστοιχίζεται ένα σύνολο παραμέτρων το οποίο σε συνδυασμό με τη μέση τιμή, την τυπική απόκλιση και την ασυμμετρία της ανέλιξης του σταθμού, είναι ικανό να περιγράψει επιτυχώς τη συμπεριφορά του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους.

Ο λόγος της δημιουργίας αρμονικών συναρτήσεων, είναι για να υπάρχει μικρότερος αριθμός παραμέτρων για κάθε υποπερίοδο. Έτσι, με αυτόν τον τρόπο, σε μία τριπαραμετρική κατανομή, όπως η [PBF](#), αντί για 3(παράμετρους) × 32(υποπεριόδους) = 96 παράμετρους, με την εφαρμογή των αρμονικών συναρτήσεων θα υπάρχουν τελικά 4(παράμετροι μέσης τιμής) + 4(παράμετροι τυπικής απόκλισης) + 1(παράμετρος ασυμμετρίας) = 9 παράμετρους.

Έτσι τελικά σε μία κατανομή 3 παραμέτρων, χρειάζεται να επιλυθούν ακριβώς 3 εξισώσεις για να βρεθούν οι τιμές των 3 αυτών παραμέτρων. Εξισώνουμε λοιπόν, τις 3 πρώτες κεντρικές ροπές, με τις υπολογισμένες τιμές των ροπών από την παρατηρημένη χρονοσειρά για κάθε υποπερίοδο. Έτσι έχουμε :

$$E[x] = \mu_{subperiod} \quad (4.1)$$

$$E[x^2] - E[x]^2 = \sigma^2_{subperiod} \quad (4.2)$$

$$\frac{E[x^3] - 3\mu\sigma^2 - \mu^3}{\sigma^3} = \gamma_{1,subperiod} \quad (4.3)$$

όπου  $\mu, \sigma^2, \gamma_1$  είναι η μέση τιμή, η διασπορά και ο συντελεστής ασυμμετρίας για κάθε υποπερίοδο. Εφόσον οι ροπές εξαρτώνται από τις παραμέτρους κάθε κατανομής, έχοντας αυτές τις 3 εξισώσεις υπολογίζουμε τις παραμέτρους για κάθε υποπερίοδο.

#### 4.3.1 Μέση τιμή

Μία αρκετά γρήγορη και εύκολη προσέγγιση είναι το ακόλουθο μοντέλο, το οποίο περιγράφει τη διπλή κυκλοστασιμότητα χρησιμοποιώντας συνδυασμό τριγωνομετρικών και εκθετικών συναρτήσεων. Βασίστηκε σε ένα μοντέλο των Dimitriadis and Koutsoyiannis (2015a), το οποίο βελτιώθηκε από τους Deligiannis et al. (2016).

$$\mu_c = \left( (a_1 + a_2 C_m(t)) \exp(C_h(t)) + a_3 C_m(t) + a_4 \right) \mu \quad (4.4)$$

όπου οι δύο συναρτήσεις που περιγράφουν τη διπλή περιοδικότητα είναι οι εξής:

$$C_m(t) = \cos \left( 2\pi \frac{(t_m - a_m)}{T_m} \right) \quad (4.5)$$

$$C_h(t) = \cos \left( 2\pi \frac{(t_h - a_h)}{T_h} \right) \quad (4.6)$$

Επιπροσθέτως:

$\mu_c$  : είναι η μέση τιμή της ανέλιξης που δίνει το μοντέλο για κάθε τρίμηνο και τρίωρο

$\mu$  : η μέση τιμή της ανέλιξης

$t_h$  : ο συνεχής χρόνος μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 8<sup>ου</sup> τρίωρου (3h) , τιμές μεταξύ 1 και 8

$t_m$  : ο συνεχής χρόνος μεταξύ 1<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> τρίμηνου, τιμές μεταξύ 1 και 4

$T_h = 8$  ( τρίωρα (3h) )

$T_m = 4$  ( τρίμηνα (σεζόν) )

$a_h$  : παράμετρος που δείχνει το τρίωρο αιχμής (μεταξύ 1 και 8)

$a_m$  : παράμετρος που δείχνει το τρίμηνο αιχμής (μεταξύ 1 και 4)

$a_1, a_2, a_3, a_4$  : οι αδιάστατες παράμετροι που αναζητούνται ώστε να αντιπροσωπεύεται βέλτιστα η ανέλιξη.

Ο συντελεστής  $a_1$  σχετίζεται με την ημερήσια περιοδικότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ωριαία διακύμανση του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη η τιμή του συντελεστή. Οι συντελεστές  $a_2$  και  $a_3$  σχετίζονται με την εποχιακή περιοδικότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η μηνιαία διακύμανση του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή  $a_3$ . Όσον αφορά το συντελεστή  $a_2$ , είναι απαραίτητος διότι συνδυαζόμενος με τον  $a_3$ , επιτρέπει στο μοντέλο να περιγράψει όλες τις συνηθέστερες συμπεριφορές του ανέμου παγκοσμίως. Μερικές από τις συμπεριφορές αυτές είναι: (α) απότομη ωριαία αιχμή σε ορισμένους μήνες και σταθερός άνεμος στους υπόλοιπους, (β) περίπου παράλληλες μεταξύ τους μηνιαίες καμπύλες, (γ) παρόμοια τιμή της μέγιστης ταχύτητας σε όλους τους μήνες και σημαντικά διαφορετική τιμή ελάχιστης ταχύτητας, (δ) εναλλαγή του μήνα αιχμής για διαφορετικές ώρες της ημέρας. Ο συντελεστής  $a_4$  είναι απαραίτητος ώστε το μοντέλο να πιάσει τη μέση τιμή της ανέλιξης. (Deligiannis et al, 2016).

#### 4.3.2 Τυπική απόκλιση

Αντίστοιχα με την μέση τιμή, έτσι και η τυπική απόκλιση προσεγγίζεται με ένα μοντέλο που περιγράφει την διπλή κυκλοστασιμότητα χρησιμοποιώντας μόνο τριγωνομετρικές συναρτήσεις αυτή τη φορά. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι:

$$\sigma_c = \left( (a_1 + a_2 C_m(t)) \sin(C_h(t)) + a_3 C_m(t) + a_4 \right) \sigma \quad (4.7)$$

όπου οι δύο συναρτήσεις που περιγράφουν τη διπλή περιοδικότητα είναι οι ίδιες με αυτές της μέσης τιμής (4.5) και (4.6), καθώς και οι συντελεστές στην σχέση (4.7).

#### 4.3.3 Ασυμμετρία

Τέλος ο συντελεστής ασυμμετρίας, για τον συγκεκριμένο σταθμό φάνηκε να μην παρουσιάζει ούτε κάποια συγκεκριμένη περιοδικότητα, αλλά ούτε και μεγάλη διακύμανση, οπότε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρήθηκε σταθερός και ίσος με την μέση τιμή των συντελεστών ασυμμετρίας του σταθμού, δηλαδή των 32 υποπεριόδων.

#### 4.4 Ομογενοποίηση

Η διαδικασία της ομογενοποίησης, είναι μία διαδικασία που εφαρμόζεται ώστε να εξαλειφθεί η διπλή περιοδικότητα του ανέμου, έτσι ώστε να απαλειφθεί η ανέλιξη από το ντετερμινιστικό κομμάτι της και να μείνει μόνο η στοχαστική της δομή. Αυτό που πρακτικά γίνεται, είναι ότι εφαρμόζουμε την  $cdf : F(x_{i,j} ; p_{i,j})$  σε καθεμία από τις ημερήσιες – εποχιακές ανελιξεις (υποπεριόδους), με τα εκτιμώμενα, π.χ.  $i = 4 \times j = 8$ , σετ παραμέτρων  $p_{i,j}$ , και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την πρότυπη κανονική (Gaussian), ή οποιασδήποτε άλλης κατανομής την συνάρτηση σε καθεμία από τις ημερήσιες – εποχιακές ανελιξεις (υποπεριόδους), δηλαδή :

$$y = N^{-1}(F(x_{i,j} ; p_{i,j}); 0,1) \quad (4.8)$$

Εδώ αξίζει να σημειωθεί, ότι στην περίπτωση που οι ημερήσιες – εποχιακές ανελιξεις είναι όλες Gaussian, η προτεινόμενη ομογενοποίηση είναι ισοδύναμη με το τυποποιημένο σχήμα κανονικοποίησης, όπου για κάθε ανέλιξη αφαιρείται ο μέσος όρος και το υπόλοιπο διαιρείται με την τυπική απόκλιση.

Με αυτόν τον έμμεσο τρόπο λοιπόν, οι χρονοσειρές μπορούν να ομογενοποιηθούν από  $x_{i,j} \sim F(x_{i,j} ; p_{i,j})$  σε  $y \sim N(0,1)$ . Σε περίπτωση που η περιθώρια συνάρτηση κατανομής είναι άγνωστη ή δύσκολο να υπολογιστεί, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη γραμμικοί μετασχηματισμοί, με βάση τη μεγιστοποίηση της εντροπίας (Koutsoyiannis et al., 2008; Dimitriadis and Koutsoyiannis, 2015b).

#### 4.5 Ανάλυση των πιθανών κατανομών που περιγράφουν τον άνεμο

Στην συνέχεια σκοπός είναι η εύρεση και προσαρμογή, μίας κατάλληλης περιθώριας συνάρτησης κατανομής (marginal distribution function) ικανής να περιγράψει όλο το φάσμα των ημερήσιων και μηνιαίων χρονοσειρών με ωριαίο βήμα. Στην βιβλιογραφία, η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη κατανομή για να περιγράψει τον άνεμο είναι η Weibull. Σε διάφορες αναφορές υπήρχε προσαρμογή του ανέμου στις: PBF, Lognormal, Gamma και Rayleigh. Επομένως, επειδή είναι μείζονος σημασίας η προσαρμογή στην σωστή κατανομή και η εξαγωγή των κατάλληλων παραμέτρων της, έτσι ώστε να προσομοιάζει όσο το δυνατόν καλύτερα την εμπειρική κατανομή, έγινε διερεύνηση και των πέντε προαναφερόμενων κατανομών, με μοναδικό σκοπό την παραγωγή χρονοσειρών όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα.

##### 4.5.1 Η κατανομή Pareto- Burr-Feller (PBF)

Η κατανομή Burr εισήχθη αρχικά από τον Burr (1942) έχοντας δύο παραμέτρους. Μια πρόσθετη παράμετρος κλίμακας εισήχθη από τον Tadikamalla (1980). Περιλαμβάνει, επικαλύπτει, ή έχει ως οριακή περίπτωση, πολλές κοινώς χρησιμοποιούμενες κατανομές όπως η Gamma, η Lognormal και η Loglogistic. Η κατανομή Burr έχει δύο

ασυμπτωτικές οριακές περιπτώσεις: την Weibull και την Pareto Type I. Η ονομασία για την συγκεκριμένη κατανομή ποικίλλει ανάλογα με τον συγγραφέα. Χρησιμοποιούνται ονομασίες όπως Pareto type IV, Burr type VII ή και Burr type XII. Για την αποφυγή τέτοιων συγχύσεων, οι Koutsoyiannis et al. (2016) πρότειναν την ονομασία Pareto- Burr-Feller (PBF), προς τιμήν : του Ιταλού πολιτικού μηχανικού, οικονομολόγου και κοινωνιολόγου V. Pareto, ο οποίος ανακάλυψε μία οικογένεια κατανομών δύναμης για τη διερεύνηση της κατανομής του μεγέθους των εισοδημάτων σε μια κοινωνία, του Burr ο οποίος αναγνώρισε και ανέλυσε (αλλά χωρίς να δώσει αιτιολόγηση) μια συνάρτηση που προτάθηκε αρχικά σε αλγεβρική μορφή από τον Bierens de Haan, και στον Feller ο οποίος τη συνέδεσε με τη συνάρτηση και κατανομή Beta.

Η κατανομή PBF είναι μια κατανομή τριών παραμέτρων και είναι ορισμένη στο  $(0, +\infty)$ . Παραθέτονται οι αναλυτικοί τύποι της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Pdf) και της συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας (Cdf).

Η Cumulative Distribution Function (Cdf) είναι η :

$$F(x|\alpha, c, k) = 1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{x}{a}\right)^c\right)^k}, x > 0, \alpha > 0, c > 0, k > 0. \quad (4.9)$$

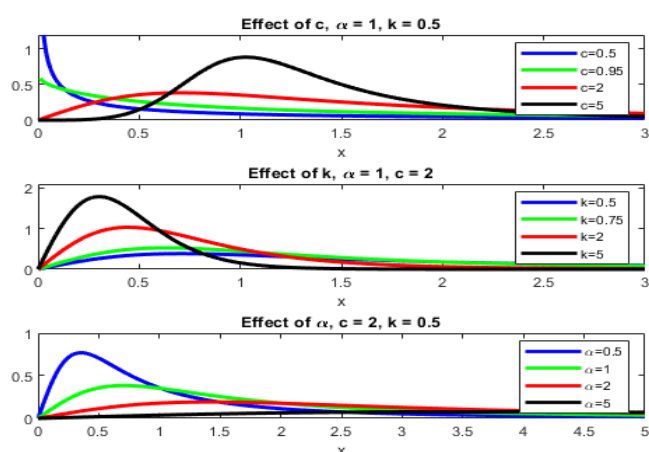
Η Probability Density Function (Pdf) είναι η :

$$f(x|\alpha, c, k) = \frac{\frac{kc}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{c-1}}{\left(1 + \left(\frac{x}{a}\right)^c\right)^{k+1}}, x > 0, \alpha > 0, c > 0, k > 0. \quad (4.10)$$

όπου:

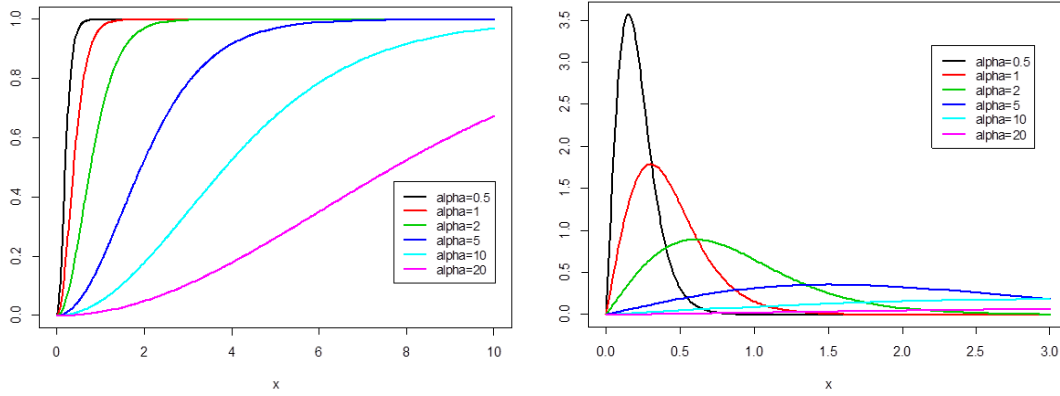
$a$  : είναι η παράμετρος κλίμακας

$c, k$  : είναι οι παράμετροι σχήματος



Σχήμα 4.5: Μορφές της Pdf της κατανομής PBF για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων  $a, c, k$ .





Σχήμα 4.6 ( $\alpha, \beta$ ) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής PBF για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου  $a$  και για σταθερές τιμές των άλλων 2 ( $c=5, k=2$ ).

Αν στην κατανομή PBF  $k \rightarrow \infty, a \rightarrow \infty, \frac{a}{k^{1/c}} = \theta$ , τότε η τελευταία μετατρέπεται σε μία κατανομή 2 παραμέτρων με Cdf :

$$F(x|\theta, c) = 1 - e^{-(x/\theta)^c}, x > 0, \theta > 0, c > 0. \quad (4.11)$$

μετατρέπεται δηλαδή στην κατανομή Weibull.

#### 4.5.2 Η κατανομή Generalized Pareto

Η κατανομή Generalized Pareto είναι μια οικογένεια συνεχών κατανομών πιθανότητας. Συχνά χρησιμοποιείται για να μοντελοποιεί τις ουρές άλλων κατανομών.

Η κατανομή Generalized Pareto είναι μια κατανομή δύο παραμέτρων και είναι ορισμένη στο  $(0, +\infty)$ . Παραθέτονται οι αναλυτικοί τύποι της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Pdf) και της συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας (Cdf).

Η Cumulative Distribution Function (Cdf) είναι η :

$$F(x|\sigma, \xi) = 1 - \left(1 + \xi \frac{x}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}, x > 0, \sigma > 0, -\infty < \xi < +\infty. \quad (4.12)$$

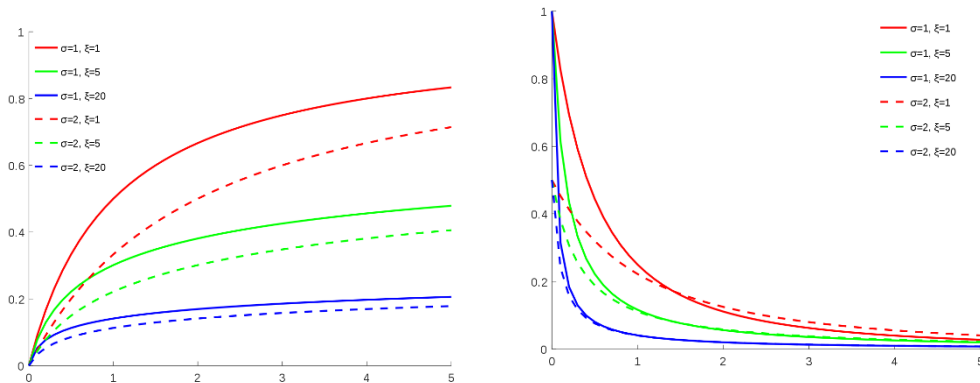
Η Probability Density Function (Pdf) είναι η :

$$f(x|\sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + \xi \frac{x}{\sigma}\right)^{-\left(\frac{1}{\xi} + 1\right)}, x > 0, \sigma > 0, -\infty < \xi < +\infty. \quad (4.13)$$

όπου:

$\sigma$  : είναι η παράμετρος κλίμακας

$\xi$  : είναι η παράμετρος σχήματος



Σχήμα 4.7 (α,β) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής Generalized Pareto για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων  $\sigma, \xi$ .

#### 4.5.3 Η κατανομή Weibull

Η κατανομή Weibull είναι μία συνεχής κατανομή πιθανότητας. Πήρε το όνομά της από τον Σουηδό μαθηματικό Waloddi Weibull, ο οποίος την περιέγραψε λεπτομερώς το 1951, παρόλο που για πρώτη φορά εμφανίστηκε από τον Fréchet (1927) και εφαρμόστηκε τελικά από τους Rosin & Rammler (1933) για την περιγραφή της κατανομής μεγέθους σωματιδίων.

Η κατανομή Weibull είναι μια κατανομή δύο παραμέτρων και είναι ορισμένη στο  $(0, +\infty)$ . Παραθέτονται οι αναλυτικοί τύποι της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Pdf) και της συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας (Cdf).

Η Cumulative Distribution Function (Cdf) είναι η :

$$F(x|\alpha, b) = 1 - e^{-(x/a)^b}, x > 0, \alpha > 0, b > 0. \quad (4.14)$$

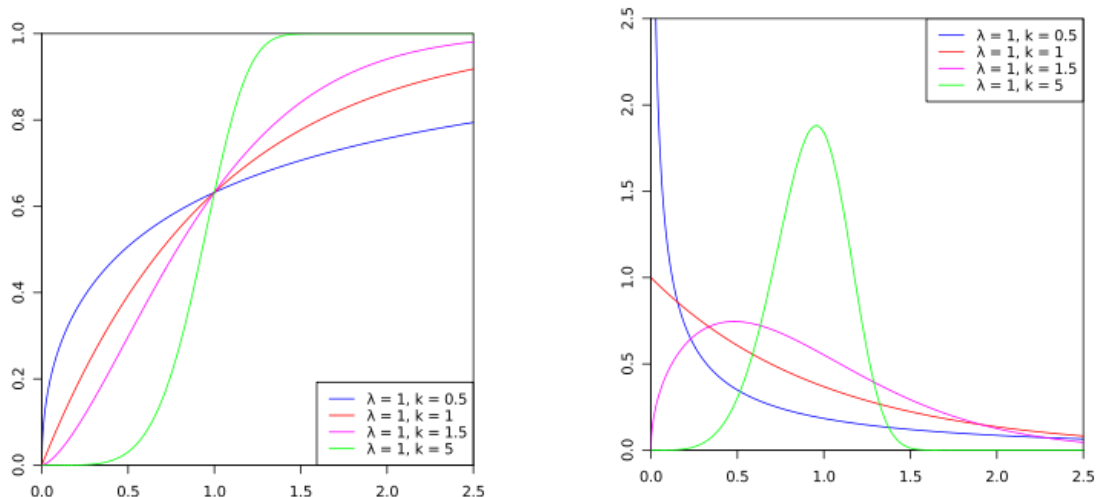
Η Probability Density Function (Pdf) είναι η :

$$f(x|\alpha, b) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-(x/a)^b}, x > 0, \alpha > 0, b > 0. \quad (4.15)$$

όπου:

$\alpha$  : είναι η παράμετρος κλίμακας

$b$  : είναι η παράμετρος σχήματος



Σχήμα 4.8 (α,β) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής Weibull για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων  $a, b$ . (Στα σχήματα όπου  $\lambda=a$  και όπου  $k=b$ ).

Αν στην κατανομή Weibull  $a = \sqrt{2}\sigma$  και  $b = 2$  τότε έχουμε την κατανομή Rayleigh, μίας παραμέτρου, με Cdf :

$$F(x|\sigma) = 1 - e^{-x^2/(2\sigma^2)}, x \geq 0, \sigma > 0. \quad (4.16)$$

#### 4.5.4 Η κατανομή Lognormal

Η κατανομή Lognormal είναι μια συνεχής κατανομή πιθανότητας μιας τυχαίας μεταβλητής, της οποίας ο λογάριθμος είναι κανονικά κατανεμημένος.

Μια τυχαία μεταβλητή, η οποία ακολουθεί την Lognormal κατανομή, λαμβάνει μόνο θετικές πραγματικές τιμές, αφού είναι ορισμένη στο  $(0, +\infty)$ .

Παραθέτονται οι αναλυτικοί τύποι της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Pdf) και της συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας (Cdf).

Η Cumulative Distribution Function (Cdf) είναι η :

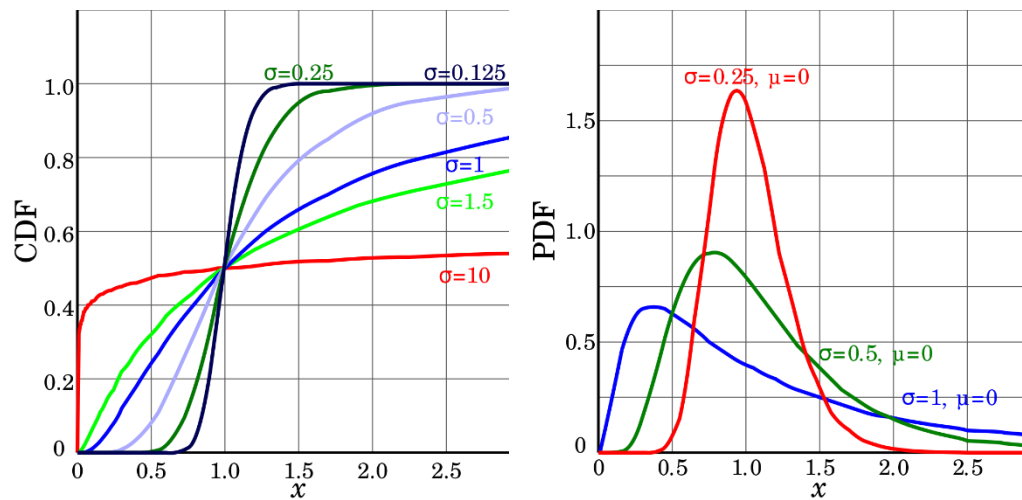
$$F(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[ \frac{\ln(x) - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right], x > 0, -\infty < \mu < +\infty, \sigma > 0. \quad (4.17)$$

Η Probability Density Function (Pdf) είναι η :

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}}, x > 0, -\infty < \mu < +\infty, \sigma > 0. \quad (4.18)$$

Με δεδομένη μια τυχαία μεταβλητή  $X$  που ακολουθεί την κατανομή Lognormal και δύο παραμέτρους  $\mu$  και  $\sigma$  που είναι αντίστοιχα η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του φυσικού λογαρίθμου της μεταβλητής, τότε ο λογάριθμος του  $X$  κατανέμεται

κανονικά και μπορούμε να γράψουμε το  $X$  ως :  $X = e^{\mu+\sigma z}$ , με το  $Z$  μία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1.



Σχήμα 4.9 (α,β) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής Lognormal για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων  $\mu, \sigma$ .

#### 4.5.5 Η κατανομή Gamma

Η κατανομή Gamma βασίζεται σε μία οικογένεια κατανομών με δύο παραμέτρους. Οι chi-square<sup>1</sup> και οι εκθετικές κατανομές, οι οποίες είναι «παιδιά» της κατανομής Gamma, είναι κατανομές μίας παραμέτρου, σταθεροποιώντας μία από τις δύο παραμέτρους Gamma.

Η κατανομή Gamma είναι μια κατανομή δύο παραμέτρων και είναι ορισμένη στο  $(0, +\infty)$ . Παραθέτονται οι αναλυτικοί τύποι της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Pdf) και της συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας (Cdf).

Η Cumulative Distribution Function (Cdf) είναι η :

$$F(x|k, \theta) = \frac{1}{\Gamma(k)} \gamma\left(k, \frac{x}{\theta}\right), x > 0, k > 0, \theta > 0. \quad (4.19)$$

Η Probability Density Function (Pdf) είναι η :

$$f(x|k, \theta) = \frac{1}{\Gamma(k) \theta^k} x^{k-1} e^{-\frac{x}{\theta}}, x > 0, k > 0, \theta > 0. \quad (4.20)$$

όπου :

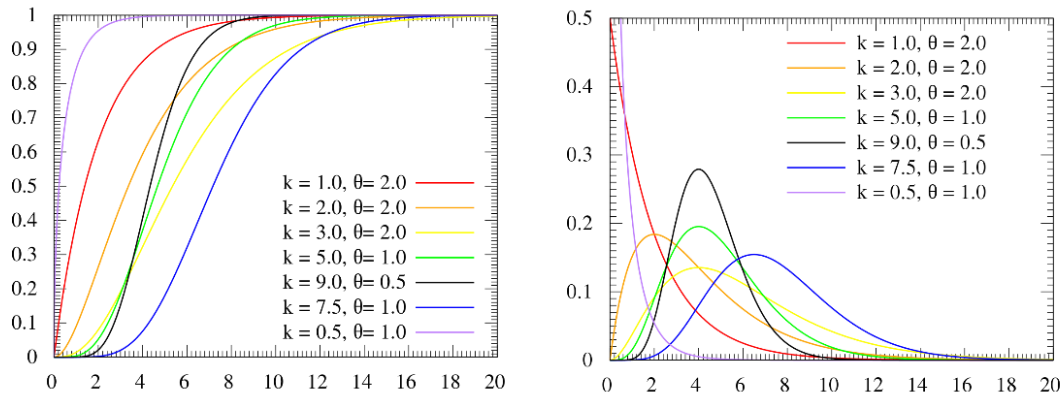
$\Gamma(k)$  : η συνάρτηση Γάμμα υπολογισμένη στο σημείο  $k$ ,

<sup>1</sup> Η κατανομή chi-square είναι μια ειδική περίπτωση της κατανομής Gamma και είναι μία από τις πιο διαδεδομένες κατανομές πιθανοτήτων στην επαγωγική στατιστική, ιδίως σε δοκιμές υποθέσεων ή στην κατασκευή διαστημάτων εμπιστοσύνης.

$\gamma\left(k, \frac{x}{\theta}\right)$  : η ατελής συνάρτηση Γάμμα.

$\theta$  : είναι η παράμετρος κλίμακας

$k$  : είναι η παράμετρος σχήματος



Σχήμα 4.10 (α,β) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής Gamma για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων  $k, \theta$ .

#### 4.5.6 Η κατανομή Rayleigh

Η κατανομή πήρε το όνομά της από τον Λόρδο Rayleigh. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι ειδική περίπτωση της κατανομής Weibull.

Η κατανομή Rayleigh είναι μια κατανομή με μία παράμετρο και είναι ορισμένη στο  $(0, +\infty)$ . Παραθέτονται οι αναλυτικοί τύποι της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Pdf) και της συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας (Cdf).

Η Cumulative Distribution Function (Cdf) είναι η :

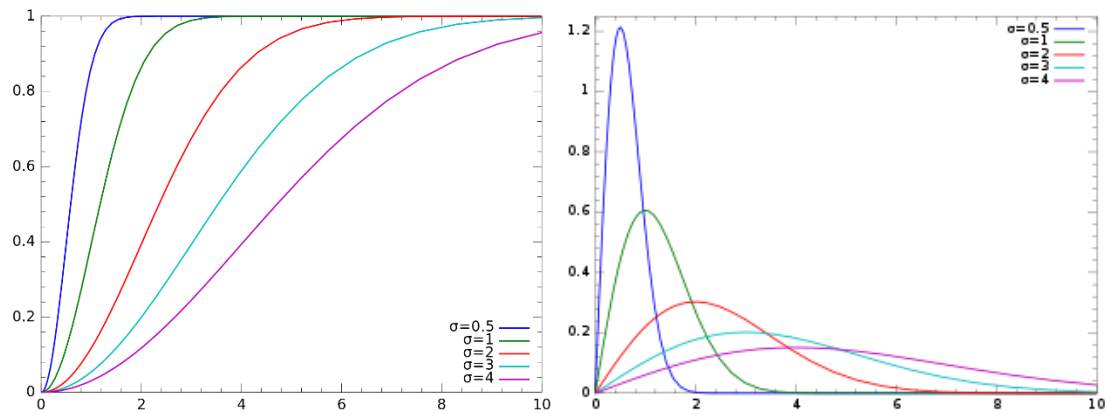
$$F(x|\sigma) = 1 - e^{-x^2/(2\sigma^2)}, x \geq 0, \sigma > 0. \quad (4.21)$$

Η Probability Density Function (Pdf) είναι η :

$$f(x|\sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/(2\sigma^2)}, x \geq 0, \sigma > 0. \quad (4.22)$$

όπου :

$\sigma$  : είναι η παράμετρος κλίμακας



Σχήμα 4.11 (α,β) : Μορφές της Cdf (αριστερά) και Pdf (δεξιά) της κατανομής Rayleigh για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου  $\sigma$ .

#### 4.6 Η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας

Η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των παραμέτρων των εξεταζόμενων κατανομών, και αποτελεί μία γενική τεχνική κατασκευής εκτιμητή για μία άγνωστη παράμετρο  $\theta$ , πραγματική ή διανυσματική και γενικότερα για μία άγνωστη τιμή  $g(\theta)$ . Σε ειδικές περιπτώσεις, η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε από τον Gauss, αλλά και νωρίτερα από τον Laplace (γνωστό και από τον τύπο της κλασικής πιθανότητας). Όμως, ως γενική μέθοδος εκτίμησης προτάθηκε, ονομάστηκε και καθιερώθηκε από τον Fisher σε μια σειρά εργασιών του, Fisher (1912, 1922, 1925, 1934), όπου μελέτησε τις ιδιότητές της. Η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας έχει πλέον ταυτιστεί με το όνομα του Fisher, μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε πάρα πολλά προβλήματα εκτίμησης, ερμηνεύεται διαισθητικά πολύ απλά και γενικά παράγει καλούς εκτιμητές, ειδικά για μεγάλο μέγεθος δείγματος.

Ας υποθέσουμε ότι υπάρχει ένα δείγμα  $x_1, x_2, \dots, x_n$  από  $n$  ανεξάρτητες και ταυτόσημα κατανεμημένες παρατηρήσεις, που προέρχονται από μια κατανομή με άγνωστη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $f_0(\cdot)$ . Ωστόσο εικάζεται ότι η συνάρτηση  $f_0$  ανήκει σε μια συγκεκριμένη οικογένεια κατανομών  $\{f(\cdot | \vartheta), \vartheta \in \Theta\}$  (όπου  $\vartheta$  είναι φορέας των παραμέτρων για αυτή την οικογένεια), που ονομάζεται παραμετρικό μοντέλο, έτσι ώστε  $f_0 = f(\cdot | \vartheta_0)$ . Η τιμή  $\vartheta_0$  είναι άγνωστη και αναφέρεται ως η «πραγματική τιμή» του φορέα της παραμέτρου. Είναι επιθυμητό να βρεθεί ένας εκτιμητής  $\hat{\vartheta}$  που θα είναι όσο πιο κοντά γίνεται στην πραγματική τιμή  $\vartheta_0$ . Είτε μία από αυτές είτε και οι δύο οι παρατηρούμενες μεταβλητές  $x_i$  και η παράμετρος  $\vartheta$  μπορεί να είναι φορείς.

Για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας, πρώτα καθορίζεται η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας για όλες τις παρατηρήσεις. Για ένα ανεξάρτητο και ισόνομα κατανεμημένο δείγμα, αυτή η κοινή συνάρτηση πυκνότητας είναι :

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta) = f(x_1 | \theta) \times f(x_2 | \theta) \times \dots \times f(x_n | \theta) \quad (4.23)$$

Τώρα κοιτώντας αυτή τη λειτουργία από μια διαφορετική προοπτική, λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρηθείσες τιμές  $x_1, x_2, \dots, x_n$  να είναι οι σταθεροί "παράμετροι" της λειτουργίας αυτής, όπου  $\theta$  θα είναι η μεταβλητή της συνάρτησης και μπορεί να κυμαίνεται ελεύθερα, αυτή η λειτουργία θα ονομάζεται η πιθανοφάνεια:

$$L(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i | \theta) \quad (4.24)$$

Σημειώστε ότι το ";" υποδηλώνει ένα διαχωρισμό μεταξύ των δύο ορισμάτων:  $\theta$  και των παρατηρήσεων  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Στην πράξη, είναι συχνά πιο βολικό να συνεργαστεί με τον λογάριθμο της συνάρτησης της πιθανοφάνειας, που ονομάζεται λογαριθμική-πιθανοφάνεια:

$$\ln L(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i | \theta) \quad (4.25)$$

ή μέση λογαριθμική-πιθανοφάνεια:

$$\hat{l} = \frac{1}{n} \ln L \quad (4.26)$$

Το καπέλο πάνω από το  $\hat{l}$  δείχνει ότι είναι παρόμοιο με κάποιο εκτιμητή. Πράγματι, το  $\hat{l}$  αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη λογαριθμική-πιθανοφάνεια σε μία μόνο παρατήρηση στο μοντέλο.

Η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας  $\theta_0$ , εκτιμάται βρίσκοντας μια τιμή του  $\theta$  που μεγιστοποιεί το  $\hat{l}(\theta; x)$ . Αυτή η μέθοδος εκτίμησης ορίζει τον εκτιμητή μέγιστης πιθανοφάνειας (ΕΜΠ) του  $\theta_0$ :

$$\hat{\theta}_{mle} \subseteq \{arg \max_{\theta \in \Theta} \hat{l}(\theta; x_1, x_2, \dots, x_n)\} \quad (4.27)$$

αν υπάρχει η μέγιστη. Μια ΕΜΠ εκτίμηση είναι η ίδια, ανεξάρτητα από το αν θα μεγιστοποιήσει την πιθανοφάνεια ή την συνάρτηση της λογαριθμικής πιθανοφάνειας, μιας και ο λογάριθμος είναι μονοτονικά αυξανόμενη συνάρτηση.

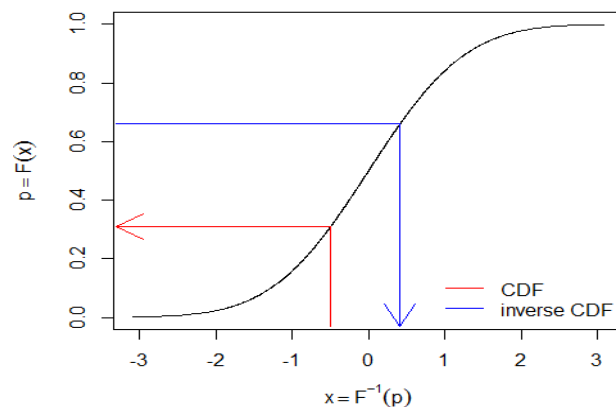
#### 4.7 Προσαρμογή της εμπειρικής Cdf και Pdf σε καθεμία από τις μελετώμενες κατανομές

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επιλογή της πλέον κατάλληλης κατανομής, που περιγράφει με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο την συμπεριφορά του ανέμου είναι απλή, αποτελεσματική και είναι η εξής :

Αρχικά χωρίστηκαν οι χρονοσειρές των τελικών 1973 σταθμών σε 32 υποπεριόδους (8 τρίωρα και 4 τρίμηνα), στις οποίες οι στατιστικές παράμετροι του ανέμου έχουν κοινά χαρακτηριστικά. Τελικά, χρησιμοποιώντας την μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας, εκτιμώνται οι παράμετροι για καθεμία από τις 5 κατανομές που εξετάζονται για κάθε υποπερίοδο.

Έπειτα, προκειμένου να διαπιστωθεί αν τα αποτελέσματα των παραμέτρων, και γενικότερα αν η προσαρμογή στις κατανομές είναι σωστή, με την έννοια ότι κάποια κατανομή μπορεί να μην ταιριάζει στα δεδομένα τόσο καλά όσο οι υπόλοιπες, εφαρμόζονται κάποιες μέθοδοι που δείχνουν την απόκλιση της εμπειρικής Cdf και Pdf από τις αντίστοιχες 5 θεωρητικές κατανομές που εξετάζονται.

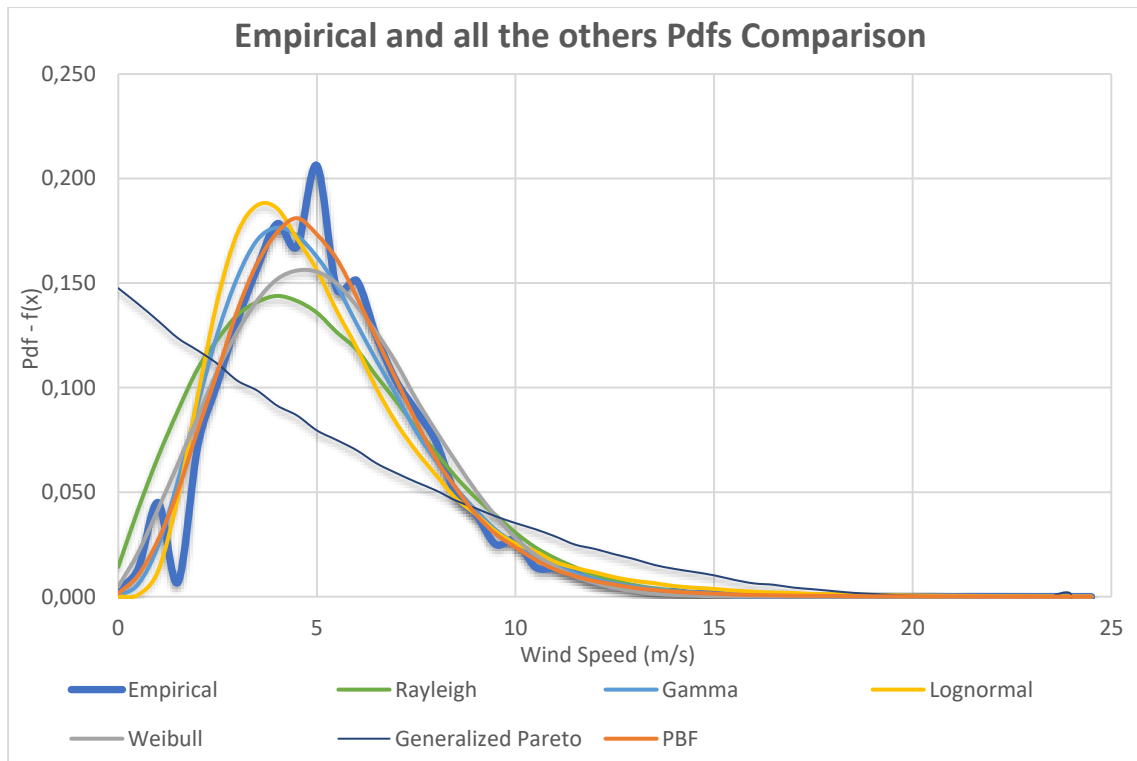
Εκτιμώνται με την μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας οι παράμετροι κάθε κατανομής, έτσι ώστε να προσαρμόζονται όσο το δυνατόν καλύτερα στα δεδομένα. Ύστερα παράγονται για κάθε κατανομή με τις εκτιμηθείσες παραμέτρους, χρονοσειρές ίσου μήκους με το μήκος του κάθε σταθμού, που ακολουθούν την εκάστοτε κατανομή, έτσι ώστε να συγκριθούν. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας την αντίστροφη συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας (inverse Cdf), δηλαδή  $F^{-1}(p) = x$ , όπου  $p \in [0,1]$  με κάθε  $p$  να ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή και να έχει ίση πιθανότητα εμφάνισης. Αν η συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας είναι η  $F(x)$  και υποδηλώνει την συνάρτηση εκείνη η οποία δείχνει την πιθανότητα μίας τυχαίας μεταβλητής  $X$  να είναι μικρότερη ή ίση από κάποια τιμή  $x$ ,  $Pr(X \leq x) = p$ , τότε η αντίστροφη συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας, είναι αυτή η οποία δείχνει για ποια τιμή  $x$  η  $F(x)$  (Cdf) θα έδινε πιθανότητα  $p$ .



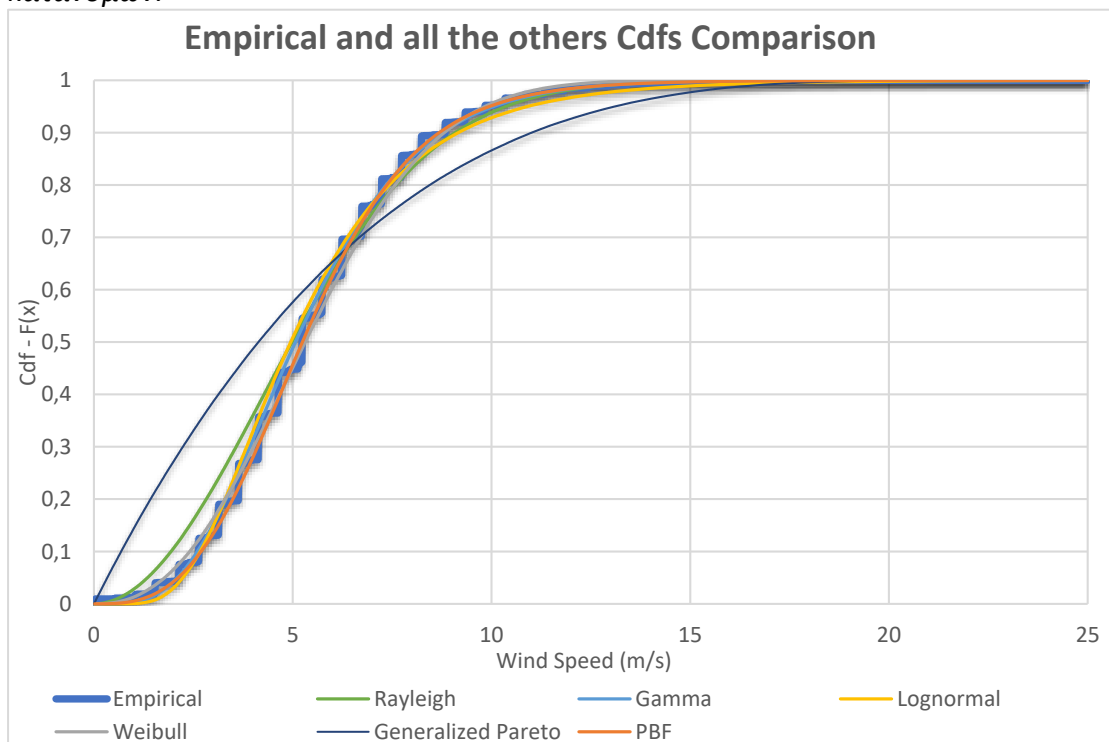
Σχήμα 4.12: Παράδειγμα όπου φαίνεται η διαφορά της Cdf και της inverse Cdf.

Παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τον καλύτερο σταθμό από την βάση δεδομένων μας, τόσο από άποψη ποιότητας (μόλις 0,8% των δεδομένων είναι μηδενικά) όσο και ποσότητας (483.716 ώρες με μετρήσεις από το 1943!), ο οποίος είναι ο μετεωρολογικός σταθμός του πανεπιστημίου MIT στις Η.Π.Α . Να σημειωθεί ότι η προσαρμογή έγινε σε παγκόσμια κλίμακα και στους 1973 σταθμούς που τελικά κρίθηκαν κατάλληλοι και αξιόπιστοι για μελέτη. Ωστόσο, στα διαγράμματα που παρουσιάζονται, επιλέχθηκε ένας σταθμός, ο «καλύτερος», για να δημιουργηθεί μία εικόνα της προσαρμογής. Αναλυτικότερα διαγράμματα για όλους τους σταθμούς θα παρουσιαστούν σε επόμενα υποκεφάλαια. Παρατίθενται παρακάτω κάποια διαγράμματα προσαρμογής σε κάθε κατανομή.

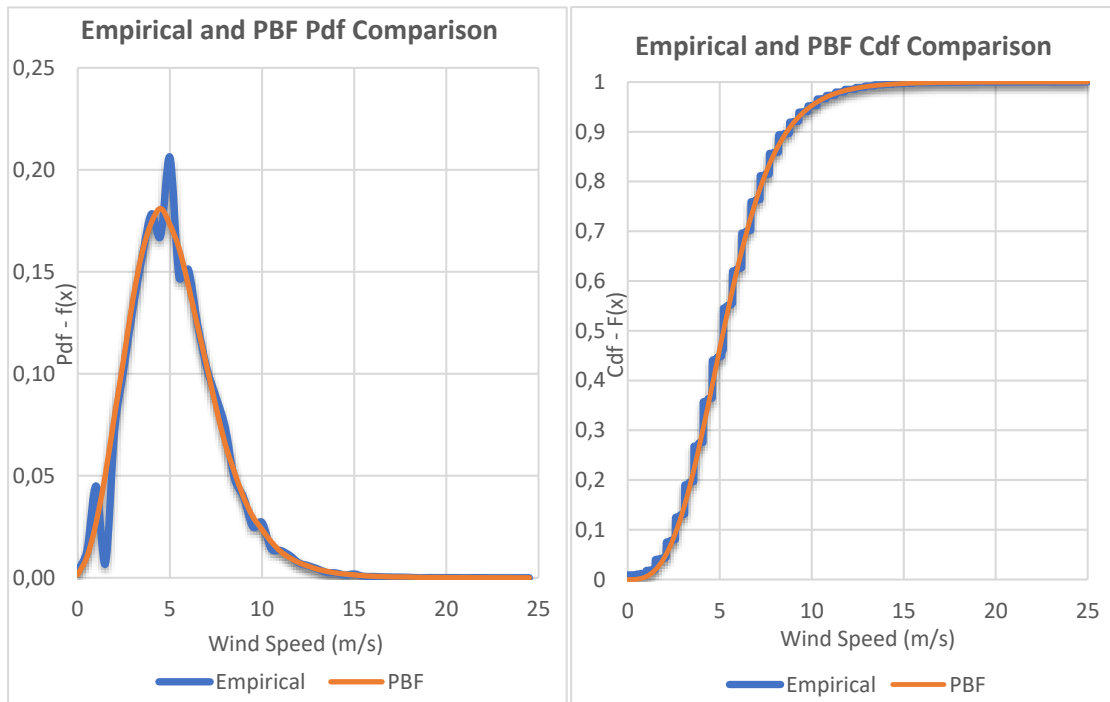




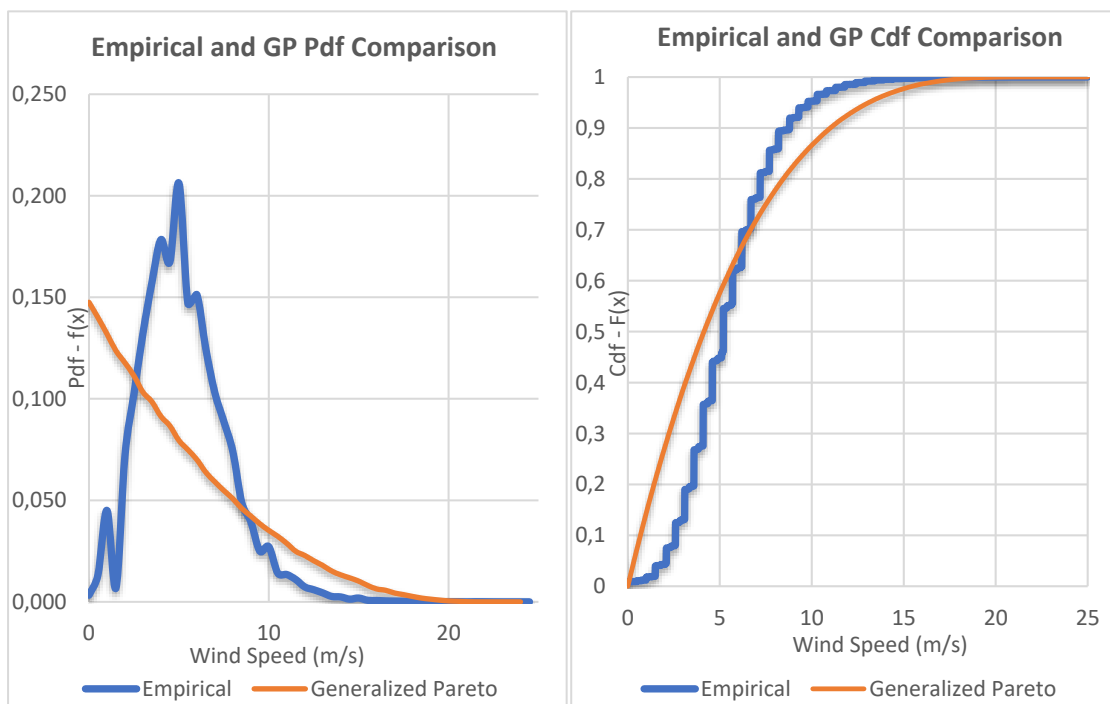
Σχήμα 4.13 : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf με τις αντίστοιχες Pdf των μελετώμενων κατανομών.



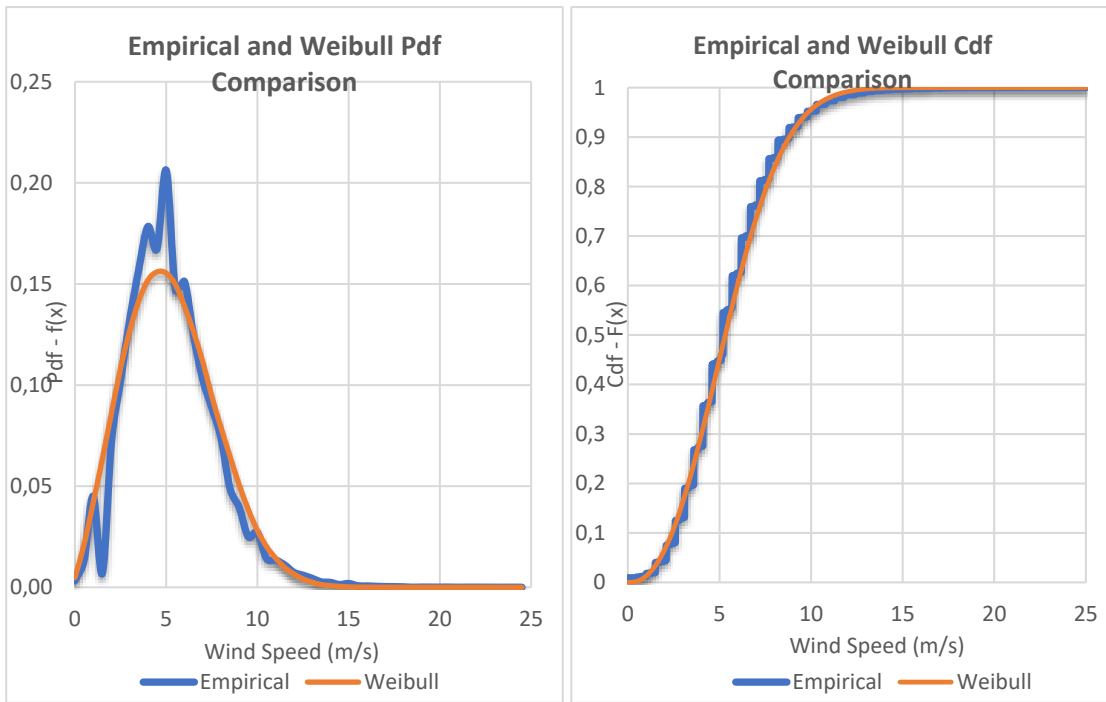
Σχήμα 4.14: Σύγκριση της εμπειρικής Cdf με τις αντίστοιχες Cdf των μελετώμενων κατανομών.



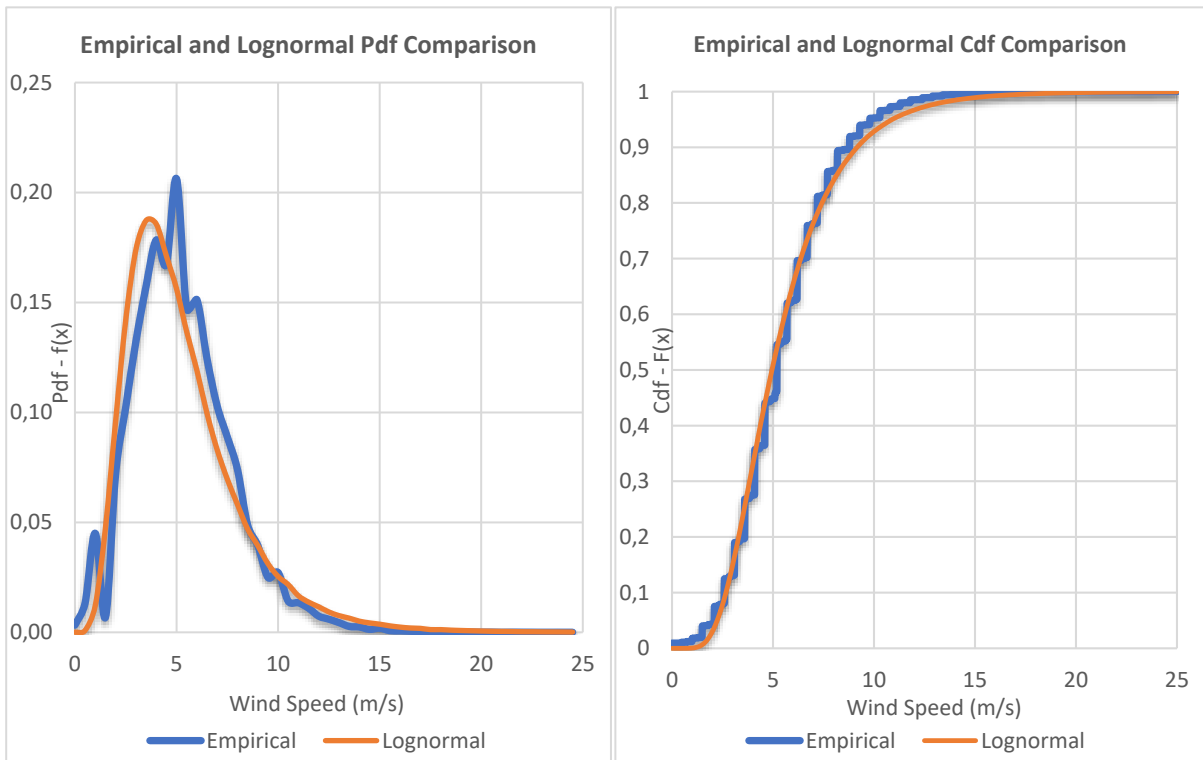
Σχήμα 4.15 (α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής PBF.



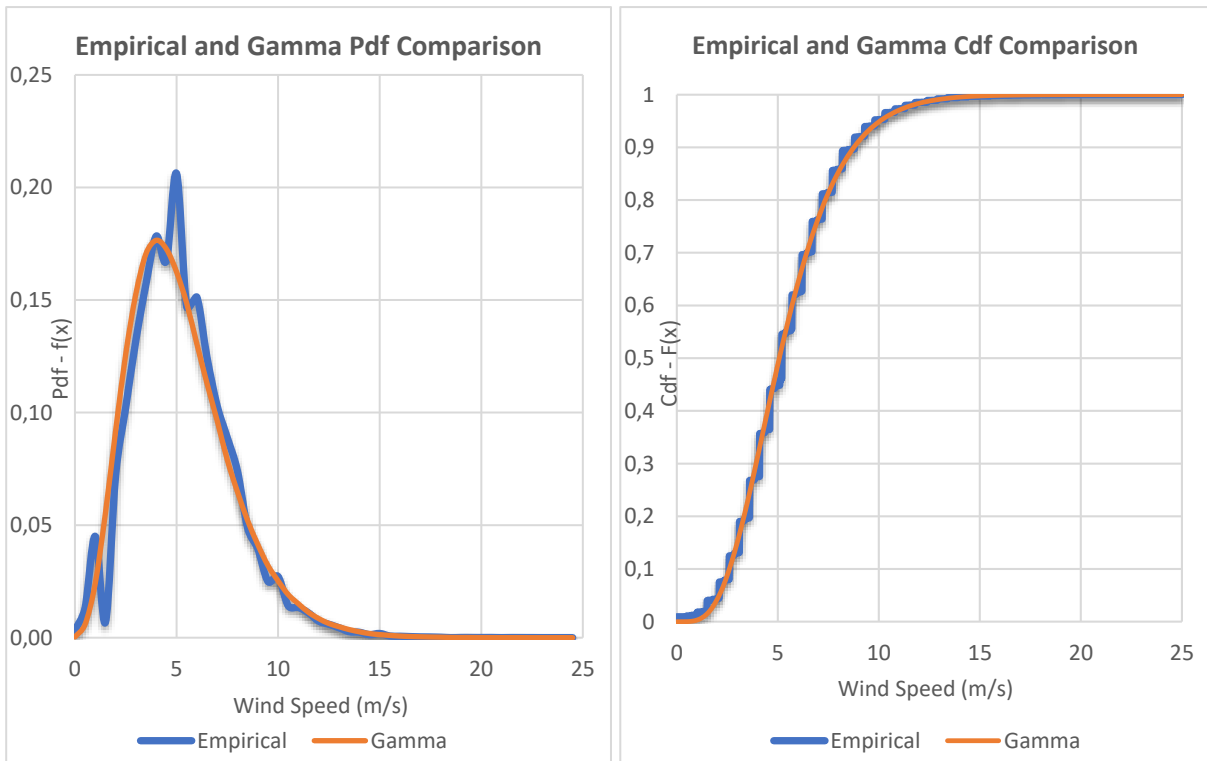
Σχήμα 4.16 (α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής Generalized Pareto.



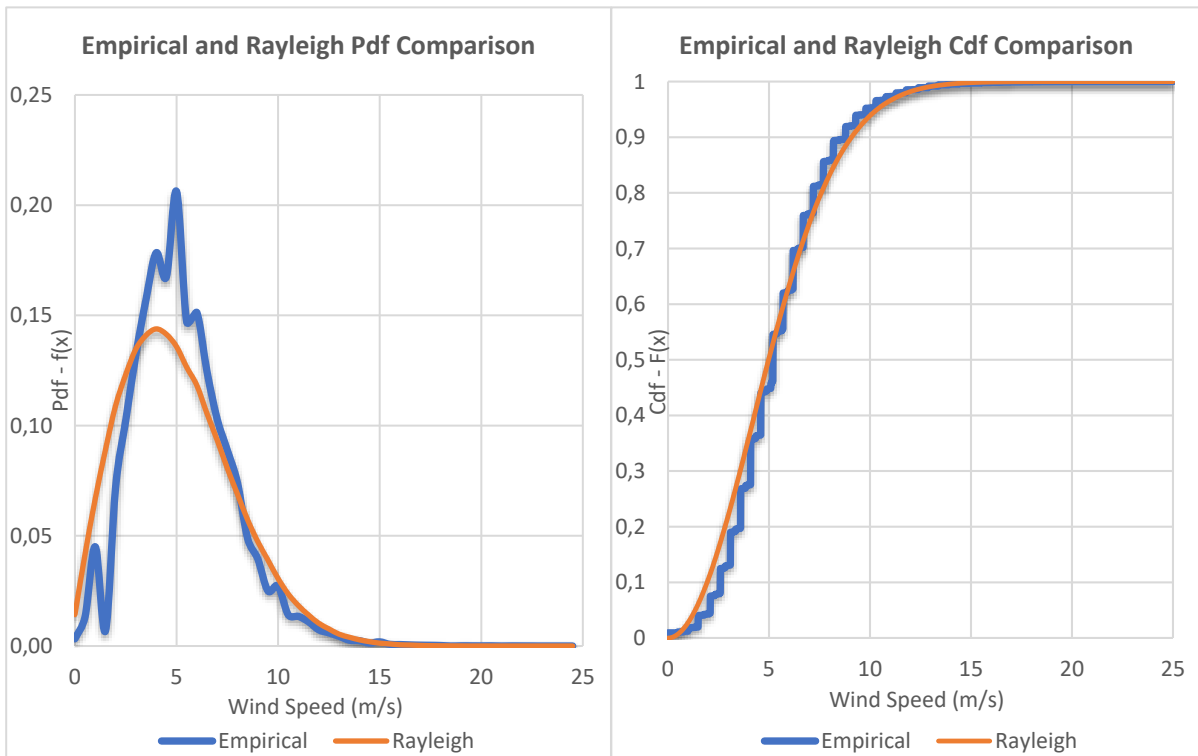
Σχήμα 4.17(α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής Weibull.



Σχήμα 4.18 (α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής Lognormal.



Σχήμα 4.19 (α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής Gamma.



Σχήμα 4.20 (α,β) : Σύγκριση της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της κατανομής Rayleigh.

#### 4.8 Δείκτες στατιστικής ανάλυσης αποτελεσμάτων προσαρμογής

Η προσαρμογή της απόκλισης, ή αλλιώς του «λάθους», της κάθε κατανομής από την εμπειρική γίνεται σε επίπεδο υποπεριόδου, εφόσον σε κάθε υποπερίοδο είναι που εφαρμόζεται κάθε φορά και η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας, έτσι ώστε να εκτιμηθούν οι παράμετροι της κατανομής.

Έτσι, ο έλεγχος της απόκλισης στην προσαρμογή της εμπειρικής Cdf και Pdf για καθεμία από τις μελετώμενες κατανομές έγινε με την χρήση δεικτών αξιολόγησης. Αυτή η απόκλιση μετρήθηκε με 2 διαφορετικούς δείκτες αξιολόγησης. Ο πρώτος είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας Nash–Sutcliffe.

Δείκτης Nash-Sutcliffe (NSE) : Ο συντελεστής αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (NSE) είναι ένας κανονικοποιημένος στατιστικός δείκτης που καθορίζει το μέτρο της ποιότητας του μοντέλου σε σχέση με την αντιπροσωπευτικότητα της διακύμανσης των δεδομένων (Nash and Sutcliffe, 1970). Ο δείκτης NSE κυμαίνεται μεταξύ  $-\infty$  και 1, με  $NSE = 1$  να είναι η βέλτιστη τιμή, όπου υποδηλώνει τέλεια αντιστοίχιση των τιμών του μοντέλου με τις παρατηρημένες τιμές. Τιμές μεγαλύτερες του 0.75 θεωρούνται γενικά ως αποδεκτά επίπεδα απόδοσης. Όταν  $NSE = 0$  οι προβλέψεις του μοντέλου είναι το ίδιο ακριβής με αυτές της μέσης τιμής των παρατηρημένων δεδομένων, ενώ τιμές  $< 0$  δείχνουν ότι η μέση τιμή των δεδομένων που παρατηρήθηκαν είναι ένας καλύτερος προγνωστικός δείκτης από τις προσομοιωμένες τιμές του μοντέλου, οι οποίες αποδεικνύουν πολύ κακή απόδοση (Morigasi, 2007). Ο NSE υπολογίζεται από τη σχέση (4.16):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (F_m^t - F_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (F_o^t - \bar{F}_o)^2} \quad (4.28)$$

όπου :

$\bar{F}_o$ : είναι η μέση τιμή των μετρήσεων

$F_o^t$ : είναι η τιμή της μέτρηση την χρονική στιγμή t

$F_m^t$ : είναι η τιμή του μοντέλου για την χρονική στιγμή t.

όπου εδώ παρατηρείται ότι εκτός της Rayleigh, όλες οι υπόλοιπες κατανομές έχουν συντελεστή Nash  $NSE=1$ , με εξαίρεση κάποιες υποπεριόδους, περίπου το 0.75% αυτών, όπου έχουν  $NSE \leq 0.75$ .

Δείκτης C : Ο συγκεκριμένος δείκτης εφαρμόστηκε από τους Dimitriadis και Koutsoyiannis (2018) και θεωρείται τόσο γρήγορος όσο και αξιόπιστος. Λαμβάνει τιμές από 0 ως  $\infty$  με τιμές κοντά στο 0 να δίνουν την τέλεια προσαρμογή. Η βασική ιδέα, είναι ότι υπολογίζεται η απόλυτη τιμή της διαφοράς μεταξύ του κύριου σώματος της εμπειρικής και της μοντελοποιημένης κατανομής μαζί με τις αριστερές και τις δεξιές ουρές τους. Επομένως, εφόσον λαμβάνεται υπόψιν όλο το σώμα της

κατανομής, θεωρείται ότι δίνει μία καλύτερη εκτίμηση του σφάλματος προσαρμογής και δίνεται από την σχέση (4.16):

$$\varepsilon_f = \sum_{t=1}^T |F_o^t - F_m^t| \sum_{t=1}^T \left| 1 - \frac{F_m^t}{F_o^t} \right| \sum_{t=1}^T \left| 1 - \frac{F_o^t}{F_m^t} \right| \quad (4.29)$$

όπου :

$F_o^t$ : είναι η τιμή της μέτρησης την χρονική στιγμή t

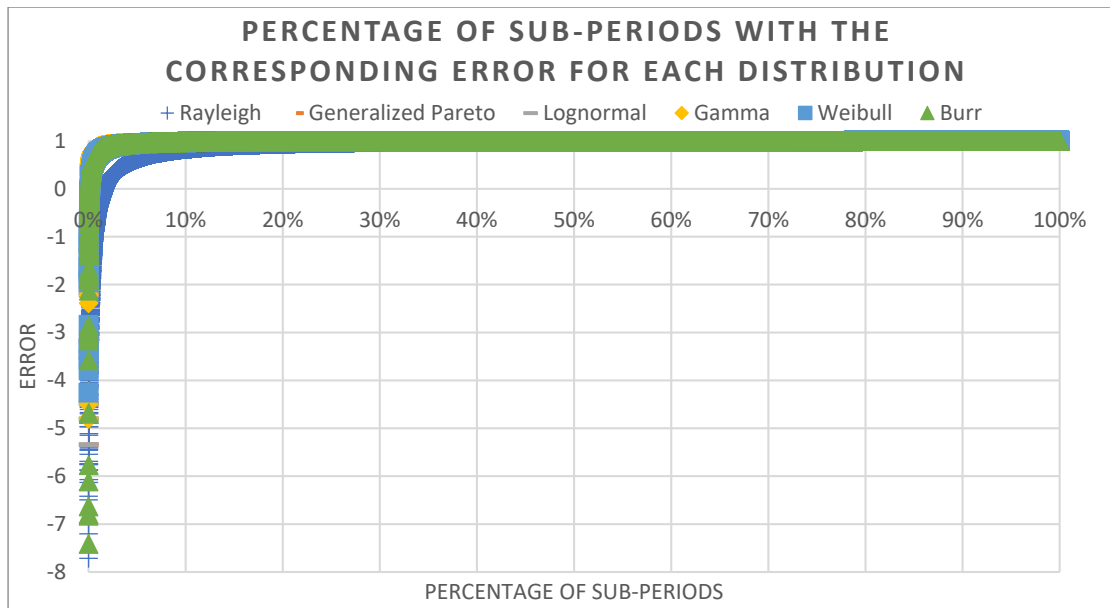
$F_m^t$ : είναι η τιμή του μοντέλου για την χρονική στιγμή t.

εδώ παρατηρείται ότι οι PBF και Weibull έχουν την καλύτερη προσαρμογή, με την πλειοψηφία των υποπεριόδων τους να έχουν σχεδόν μηδενική απόκλιση από τις θεωρητικά προσαρμοζόμενες κατανομές. Η PBF φαίνεται να είναι καλύτερη με τις μέγιστες αποκλίσεις να μην ξεπερνούν το 1 σε αντίθεση με την Weibull.

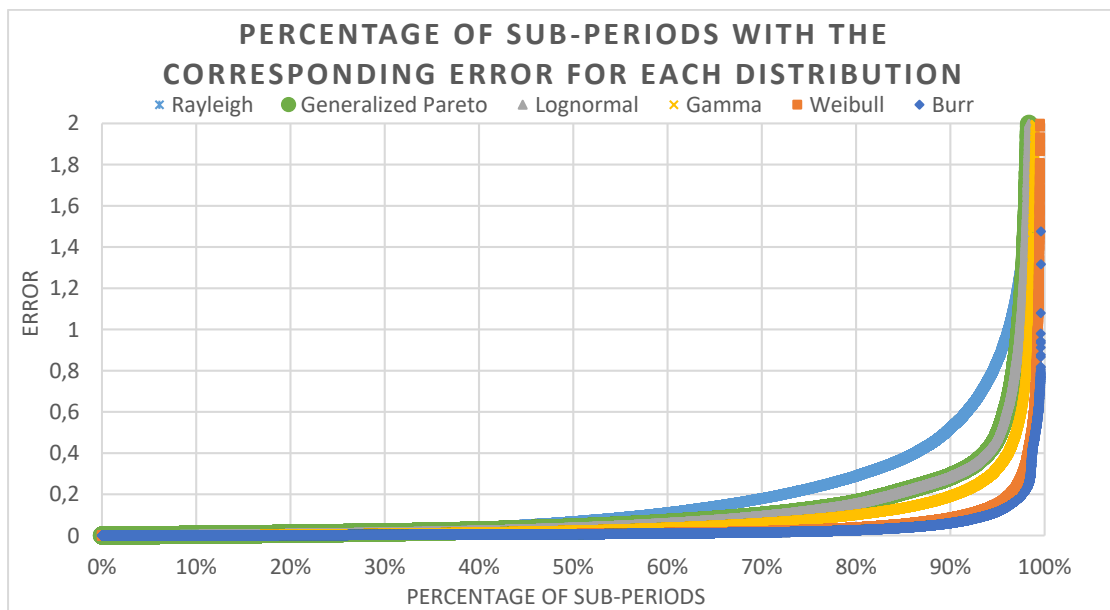
Αυτό που έγινε ουσιαστικά εδώ, εφόσον ελέγχεται η προσαρμογή σε κατανομή, είναι ότι σαν  $F_o^t$  θεωρήθηκε η πιθανότητα να εμφανιστεί τιμή μικρότερη ή ίση με την παρατηρημένη ή με άλλα λόγια σαν  $F_o^t$  θεωρήθηκε η εμπειρική Cdf. Φτιάχτηκε δηλαδή ένας πίνακας από 0 ως 50 ανά 1, και για κάθε στοιχείο του βρίσκεται πόσες μετρήσεις είναι μικρότερες ή ίσες από αυτό σε κάθε υποπερίοδο, εφόσον ανά υποπερίοδο γίνεται η προσαρμογή της εκάστοτε κατανομής. Αν για παράδειγμα θεωρήσουμε την τιμή 5 m/s, και βρεθεί ότι από τις 100 μετρήσεις μιας υποπεριόδου, οι 10 έχουν τιμή έως 5 m/s, έχουμε ότι :  $F_o^5 = \frac{10}{100} = 0,1$ .

Αντίστοιχα σαν  $F_m^t$ , θεωρήθηκε η Cdf της εκάστοτε κατανομής, με παραμέτρους ίσες με αυτές που εκτιμήθηκαν μέσω της μέγιστης πιθανοφάνειας για κάθε υποπερίοδο. Αν για παράδειγμα, έχουμε εκτιμήσει στην κατανομή Weibull τις παραμέτρους  $\alpha=2$  και  $b=1$  για την τιμή 5 έχουμε ότι :  $F_m^5 = 1 - e^{-(5/2)^1} = 0.918$

Τέλος σαν  $\overline{F_o}$  θεωρήθηκε η μέση τιμή όλων των  $F_o^t$ . Είναι δηλαδή ίσο με :  $\frac{\sum_{t=1}^{50} F_o^t}{50}$ .



Σχήμα 4.21 : Η απόκλιση στην προσαρμογή της κάθε κατανομής για κάθε υποπερίοδο με τον δείκτη Nash.



Σχήμα 4.22 : Η απόκλιση στην προσαρμογή της κάθε κατανομής για κάθε υποπερίοδο με τον δείκτη C.

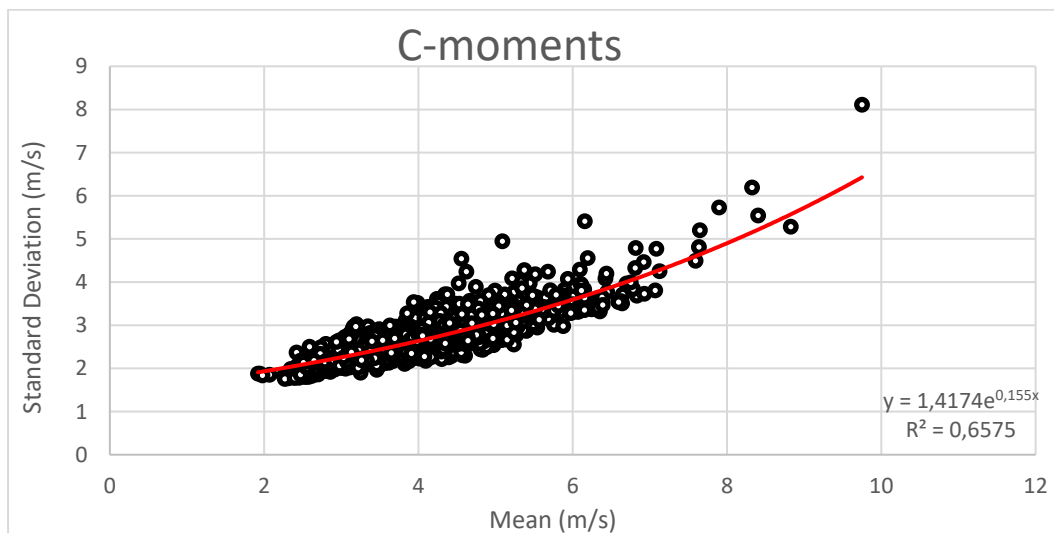
Όπως παρατηρείται με τον δείκτη του Nash, όλες οι κατανομές, εκτός της Rayleigh, δίνουν περίπου το ίδιο σφάλμα στην προσαρμογή. Με τον δείκτη C, που όπως αναφέρθηκε δίνει μία καλύτερη εκτίμηση του σφάλματος συνολικά στην κατανομή, φαίνεται ότι για το 99.5% των σταθμών, η PBF έχει σφάλμα στην προσαρμογή μικρότερο του 0.11, ενώ τα ποσοστά για τις κατανομές Weibull, Gamma, Lognormal, Generalized Pareto και Rayleigh, είναι 0.15, 0.33, 0.47, 0.47 και 0.85 αντίστοιχα. Η PBF

φαίνεται συνεπώς να προσαρμόζεται γενικώς καλύτερα από τις τυπολοιπες κατανομές.

#### 4.9 Στατιστικές ροπές για τους σταθμούς

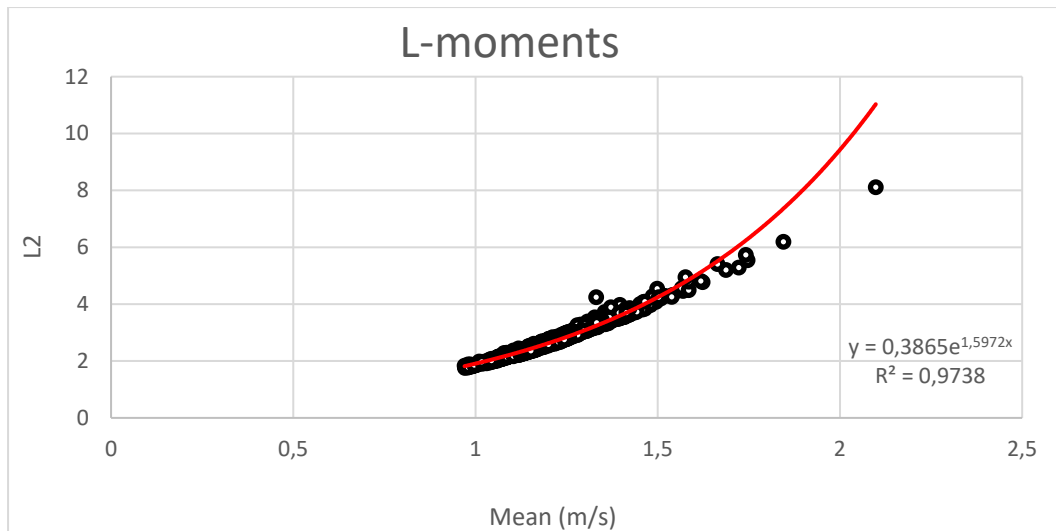
Τα στατιστικά χαρακτηριστικά που είναι βασισμένα μέχρι και την ροπή 4<sup>ης</sup> τάξης παρουσιάζονται παρακάτω σε διαγράμματα. Υπολογίστηκαν τόσο οι κεντρικές όσο και οι L-ροπές. Είναι γνωστό ότι ο υπολογισμός στατιστικών υψηλότερης τάξης, όπως η ασυμμετρία και η κύρτωση (που ονομάζουμε κεντρικές ή C-ροπές), εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του δείγματος και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στην παρουσία υπερβολικών τιμών. Αυτά τα προβλήματα μετριάζουν σε κάποιο βαθμό οι L-ροπές, οπότε και υπολογίστηκαν προκειμένου να δοθεί μια καλύτερη εκτίμηση στα αποτελέσματα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι υπάρχει μια αρκετά καλά ορισμένη σχέση μεταξύ της 1<sup>ης</sup> και της 2<sup>ης</sup> ροπής, ήτοι μέση τιμή και διασπορά - τυπική απόκλιση. Παρουσιάζονται επίσης τα διαγράμματα του συντελεστή ασυμμετρίας και κύρτωσης για κάθε σταθμό, όπου φαίνεται πως τα σημεία βρίσκονται μέσα στα όρια της PBF, χωρίς όμως να υπάρχει κάποια πολύ καλά ορισμένη σχέση όπως στις πρώτες 2 ροπές. Τα όρια των συντελεστών ασυμμετρίας και κύρτωσης της κάθε κατανομής υπολογίστηκαν μέσω ανάλυσης Monte Carlo, παράγοντας 1.000.000 τιμές κάθε φορά, για διαφορετικές τιμές της κάθε παραμέτρου. Η παραπάνω μελέτη διεξήχθη και για τις L ροπές που σε γενικά φαίνεται να έχουν μια καλύτερη εκτίμηση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

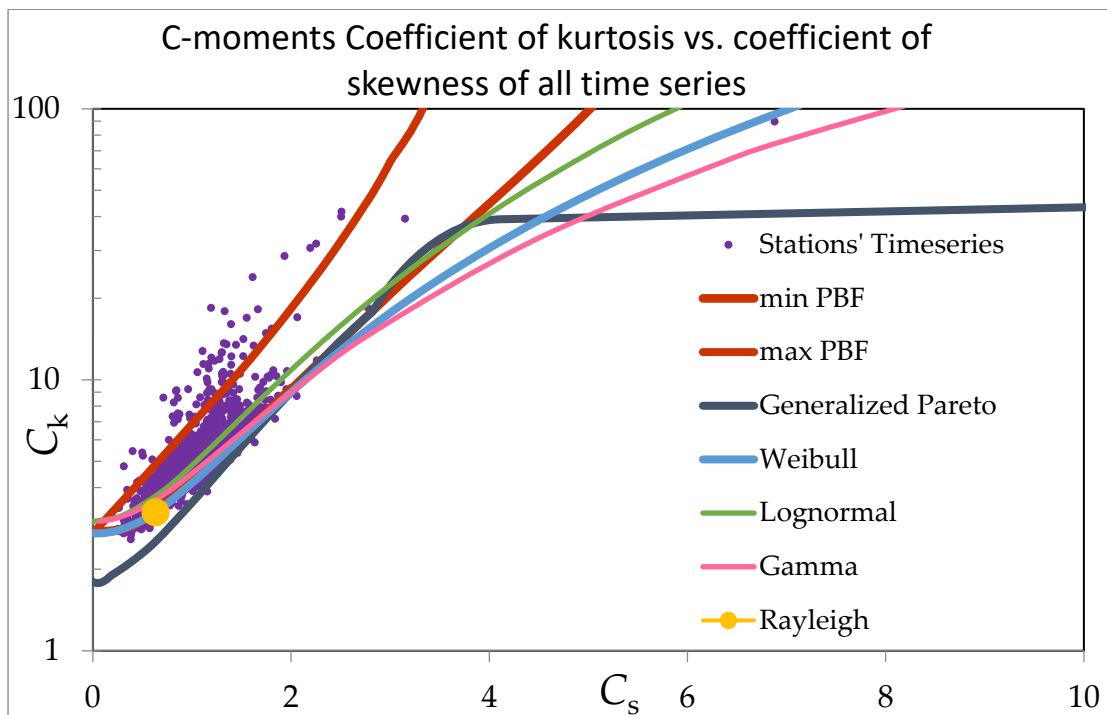


Σχήμα 4.23 : Διάγραμμα μέσης τιμής με τυπική απόκλιση για κάθε σταθμό υπολογισμένα με τις C ροπές.

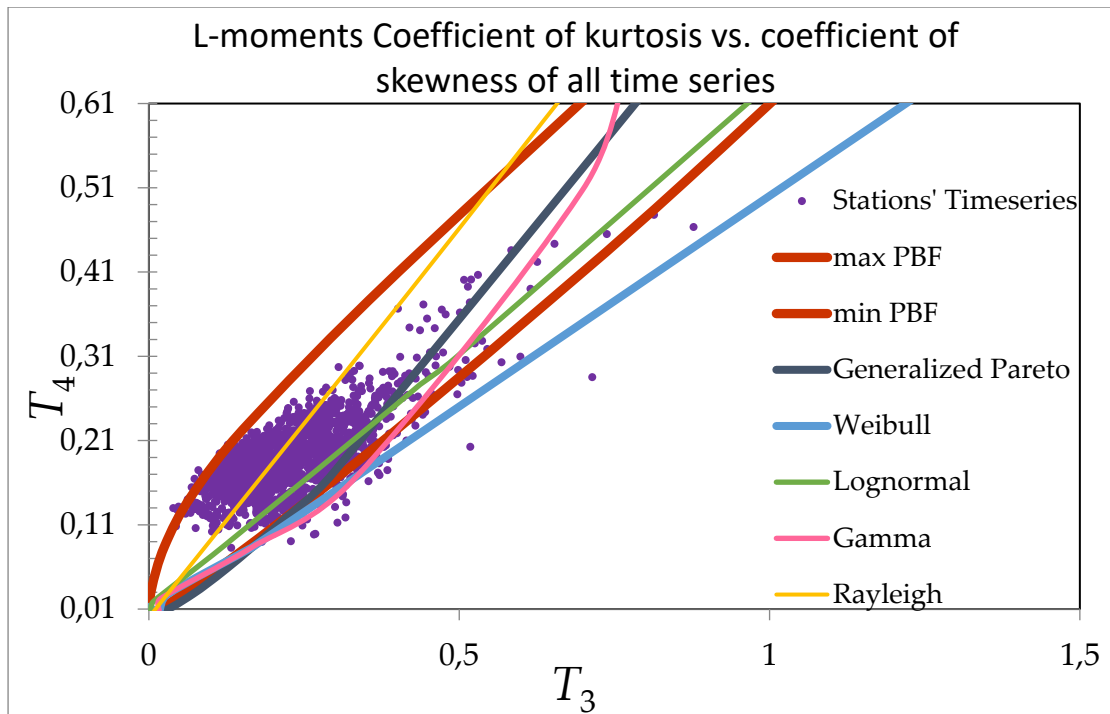




Σχήμα 4.24 : Διάγραμμα μέσης τιμής με τυπική απόκλιση για κάθε σταθμό υπολογισμένα με τις L ροπές.



Σχήμα 4.25 : Διάγραμμα συντελεστή ασυμμετρίας με τον συντελεστή κύρτωσης για κάθε σταθμό υπολογισμένα με τις C ροπές.



Σχήμα 4.26: Διάγραμμα συντελεστή ασυμμετρίας με τον συντελεστή κύρτωσης για κάθε σταθμό υπολογισμένα με τις L ροπές.

#### 4.10 Τεστ προσαρμογής της ουράς

Τελευταίο, αλλά εξίσου σημαντικό είναι το τεστ προσαρμογής της ουράς που εφαρμόζεται στις εμπειρικές κατανομές του κάθε σταθμού. Αυτό που ουσιαστικά γίνεται, είναι ότι ορίζεται κάποιο κατώφλι στην τιμή του ανέμου, το οποίο από εδώ και πέρα θα αναφέρεται ως *threshold* ή  $c$ , και προσαρμόζονται οι εξεταζόμενες κατανομές από την τιμή του *threshold* και πέρα, σύμφωνα με την σχέση (4.30)

$$F_Y^*(y|Y > 0) = \frac{F_X^*(y+c)}{F_X^*(c)} \quad (4.30)$$

όπου :

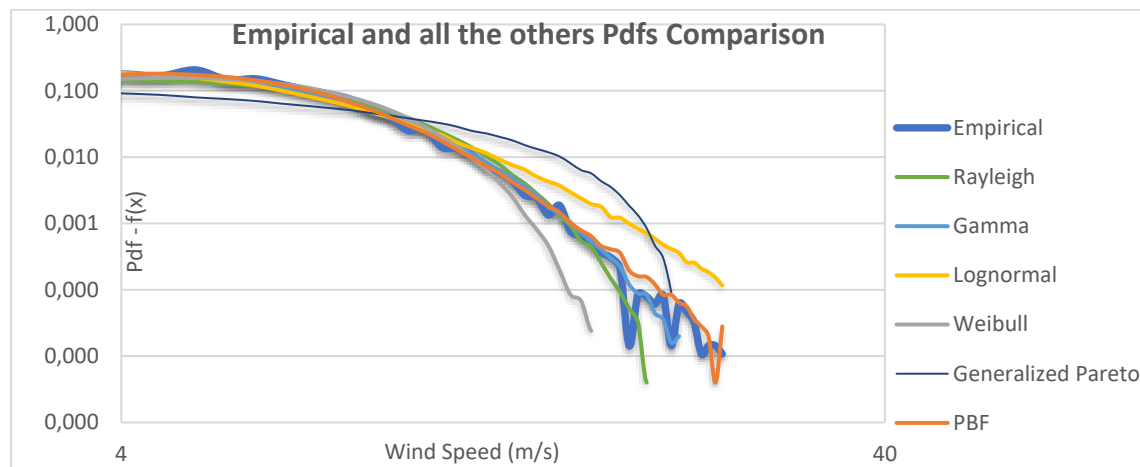
$Y = X - c$ , είναι δηλαδή η κάθε νέα τιμή που προκύπτει, αν από την παρατηρημένη τιμή αφαιρεθεί το *threshold*  $c$ .

$F_Y^*$  : είναι η συνάρτηση επιβίωσης ή Survival function του  $Y$ , υπό τον όρο ότι το  $Y$  είναι θετικό.  $F_Y^*(y|Y > 0)$

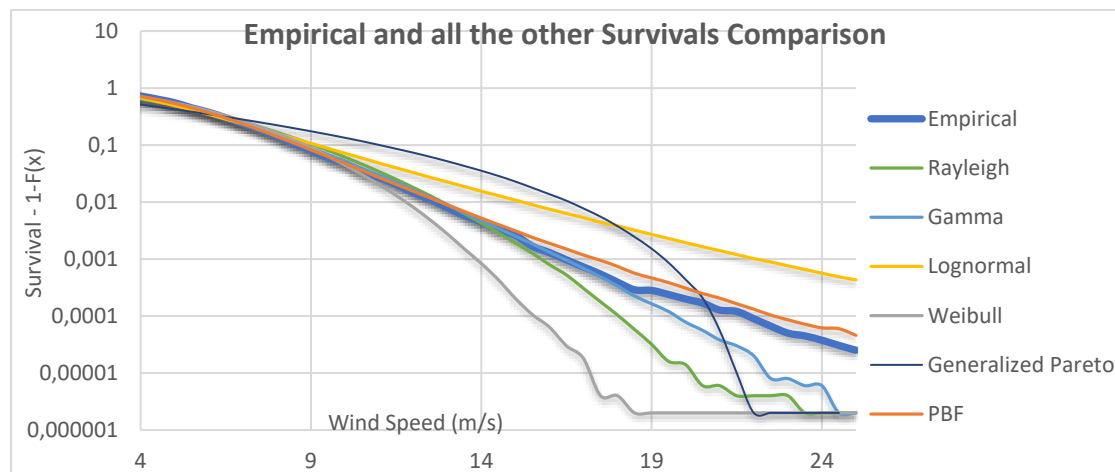
$F_X^*$  : είναι η συνάρτηση επιβίωσης ή Survival function του  $X$ .

Οι κατανομές ελέγχονται για *thresholds* από 1 έως 25 (m/s) ανά 1. Με άλλα λόγια αυτό που γίνεται είναι ότι για κάθε *threshold*, π.χ. για  $c=4$ , υπάρχει μια «κολοβή» κατανομή από την αριστερή μεριά και συγκεκριμένα από 4 m/s και κάτω, και γίνεται

η αντίστοιχη προσαρμογή της κάθε «κολοβής» εξεταζόμενης κατανομής όπως φαίνεται και αρκετά παραστατικά από τα παρακάτω διαγράμματα.



Σχήμα 4.27: Η Pdf function για threshold  $c=4$  m/s σε διπλά λογαριθμικό χαρτί.

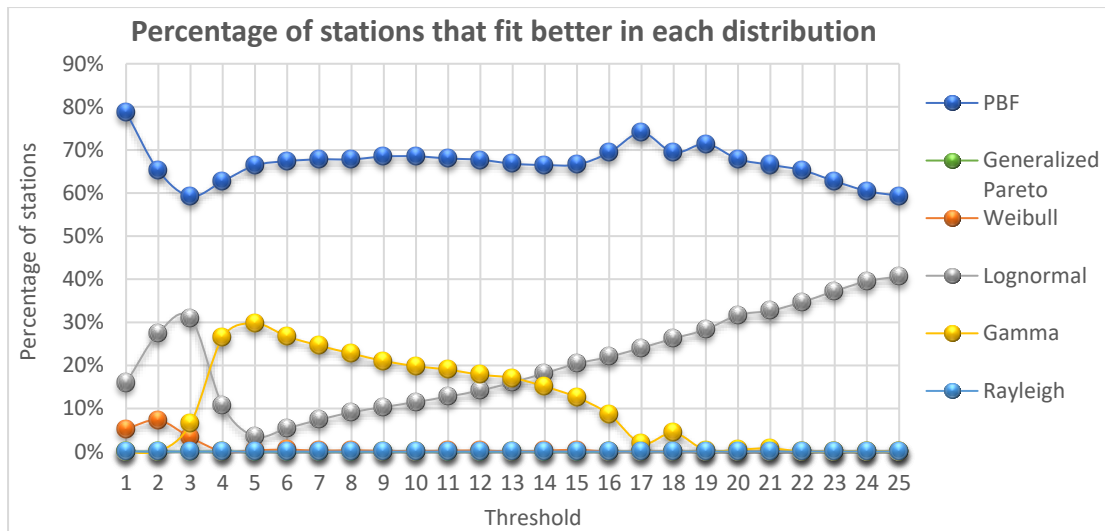


Σχήμα 4.28: Η survival function για threshold  $c=4$  m/s σε διπλά λογαριθμικό χαρτί.

Για καθένα από τα 25 threshold (1 ως 25), ελέγχθηκαν μέσω της σχέσης (4.30) οι αποκλίσεις της προσαρμογής για κάθε σταθμό και ο σταθμός με την μικρότερη απόκλιση θεωρείται ότι προσομοιάζει καλύτερα την εμπειρική κατανομή. Τα αποτελέσματα για όλα τα κατώφλια ή thresholds φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.

Είναι φανερό ότι για κάθε threshold, η καλύτερη προσαρμογή επιτυγχάνεται με την κατανομή PBF.

Συμπερασματικά λοιπόν, η πλέον κατάλληλη κατανομή που περιγράφει την ταχύτητα του ανέμου και ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή του ανέμου είναι η PBF.



Σχήμα 4.29: Ποσοστό των σταθμών που προσαρμόζονται καλύτερα σε κάθε κατανομή για threshold  $C=1-25$ .

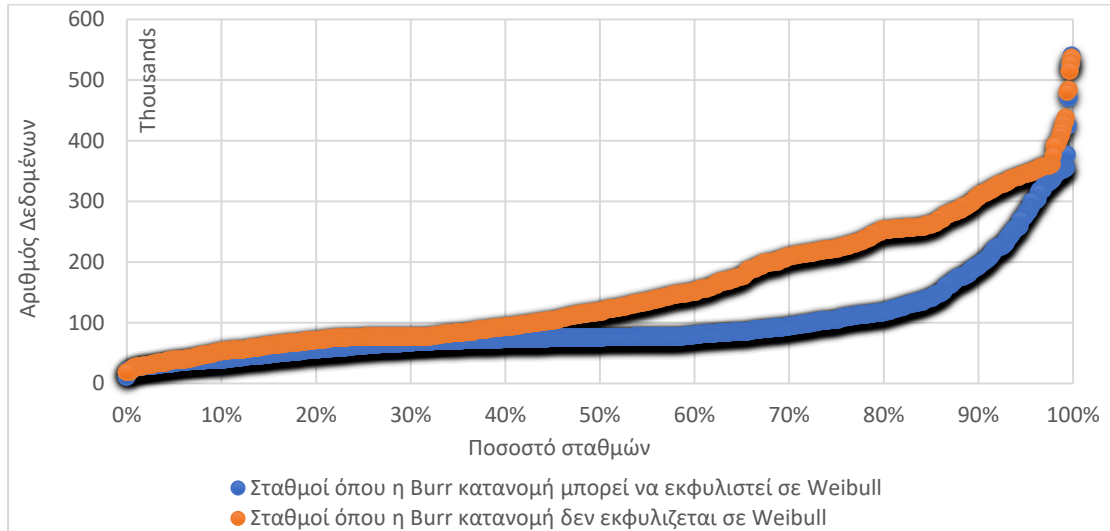
#### 4.11 Συσχέτιση καταλληλότερης κατανομής που προσμοιάζει τον άνεμο με τα χρόνια μετρήσεων

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο εδάφιο (βλέπε εδάφιο [4.5.1](#)) η κατανομή PBF των τριών παραμέτρων μπορεί να εκφυλιστεί στην διπαραμετρική κατανομή Weibull. Κατά την διάρκεια της μελέτης παρατηρήθηκε ότι μερικοί σταθμοί μπορούσαν να περιγραφούν εξίσου καλά τόσο με την κατανομή PBF όσο και με την κατανομή Weibull. Με μερική παραπάνω ανάλυση, παρατηρήθηκε πως ένας πολύ κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την κατανομή την οποία ακολουθεί ο άνεμος είναι τα χρόνια μετρήσεων ή αλλιώς ο αριθμός των δεδομένων, με την έννοια ότι όταν υπάρχουν πολλά χρόνια μετρήσεων η κατανομή φαίνεται να είναι η PBF, σε αντίθεση με τα λίγα χρόνια μετρήσεων που φαίνεται η κατανομή να μπορεί να εκφυλιστεί και σε Weibull. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω.

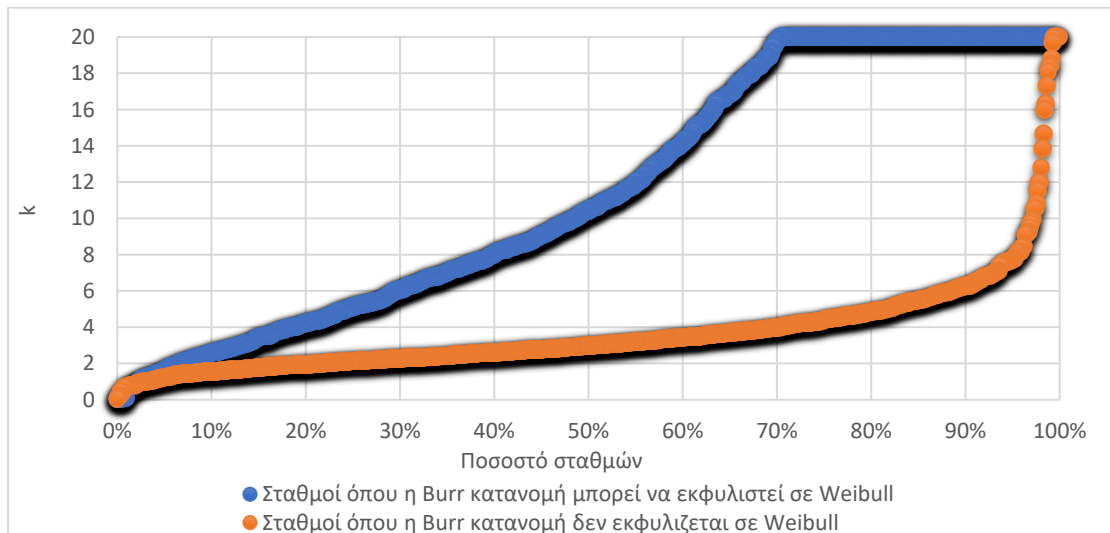
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα το 80% των σταθμών που η κατανομή PBF μπορεί να εκφυλιστεί σε Weibull έχουν κάτω από 100.000 δεδομένα ή κάτω από  $\frac{100.000}{24 \times 365} = 11.4$  χρόνια μετρήσεων. Προφανώς, υπάρχουν και σταθμοί για τους οποίους ταιριάζει η PBF ακόμη και με λίγα χρόνια μετρήσεων, αλλά αν δεν ταιριάζει η PBF πιθανότατα οφείλεται η ποσότητα της πληροφορίας, δηλαδή το πλήθος των μετρήσεων.

Όπως αναφέρθηκε και στην περιγραφή της κατανομής PBF (βλέπε εδάφιο [4.5.1](#)), όταν η παράμετρος  $k$  τείνει προς το άπειρο η κατανομή εκφυλίζεται στην κατανομή Weibull. Από το παρακάτω σχήμα (4.31) φαίνεται ότι όλοι οι σταθμοί για τους οποίους η Burr κατανομή μπορεί να εκφυλιστεί σε Weibull έχουν πού μεγάλο  $k$ . Αναφορικά, μόλις στο 30% των τελευταίων η παράμετρος  $k$  είναι κάτω από 6, όταν το

αντίστοιχο ποσοστό για τους σταθμούς όπου η Burr δεν εκφυλίζεται σε Weibull είναι το 90%. Να σημειωθεί εδώ ότι η παράμετρος  $k$  παίρνει μέγιστη τιμή το 20, καθώς αυτή ήταν η τιμή που θεωρήθηκε σαν «άπειρο».



Σχήμα 4.30: Συσχέτιση του αριθμού δεδομένων με την κατανομή που μπορεί να περιγράψει την συμπεριφορά του ανέμου.



Σχήμα 4.31: Συσχέτιση του αριθμού δεδομένων με την κατανομή που μπορεί να περιγράψει την συμπεριφορά του ανέμου.



## 5 ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

---

### 5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο των στοχαστικών ανελίξεων

Η ανάγκη μαθηματικής περιγραφής και μοντελοποίησης συστημάτων τα οποία εξελίσσονται χρονικά κατά τρόπο που περιέχει, σε μικρό ή μεγάλο βαθμό, τυχαιότητα, (stochasticity, randomness) και όχι κατά τρόπο προσδιοριστικό (deterministic) οδήγησε στην ανάπτυξη της Θεωρίας των Στοχαστικών Ανελίξεων (Stochastic Processes). Όπως εισήχθη αρχικά από τον Kolmogorov, οι στοχαστικές ανελίξεις, είναι οικογένειες τυχαίων μεταβλητών που συχνά χρησιμοποιούνται για να αντιπροσωπεύουν τη χρονική εξέλιξη των φυσικών διεργασιών. Οι φυσικές διεργασίες καθώς και η μαθηματική αναπαράστασή τους ως στοχαστικές ανελίξεις εξελίσσονται σε συνεχή χρόνο. Μια τυχαία μεταβλητή  $x$ , είναι ένα αφηρημένο μαθηματικό αντικείμενο που μπορεί να πάρει όλες τις πιθανές τιμές της σύμφωνα με μια περιθώρια (marginal) συνάρτηση κατανομής  $F(x)$ . Εκτός από την περιθώρια κατανομή, μια στοχαστική ανέλιξη χαρακτηρίζεται επίσης από τη δομή της εξάρτησής της. Σημειώστε ότι στους παραπάνω συμβολισμούς, ένα υπογραμμισμένο σύμβολο υποδηλώνει μια τυχαία μεταβλητή. Μια τυχαία μεταβλητή  $x$  δεν πρέπει να συγχέεται με τις πραγματοποιήσεις της (π.χ. παρατηρήσεις)  $x$  και μια στοχαστική διαδικασία  $x(t)$  δεν πρέπει να συγχέεται με τις πραγματοποιήσεις της (χρονοσειρές)  $x(t)$ . Μια πραγματοποίηση είναι συνήθως γνωστή (π.χ. με παρατήρηση) μόνο σε διακριτό χρόνο, σε χρονικά διαστήματα μήκους  $D$ , με τη λήψη παρατηρήσεων (δειγματοληψία, με περίπου μηδενική απόκριση χρόνου από το όργανο μέτρησης) ανά ίσα χρονικά διαστήματα  $iD$  ( $i = 1, 2, \dots$ ).

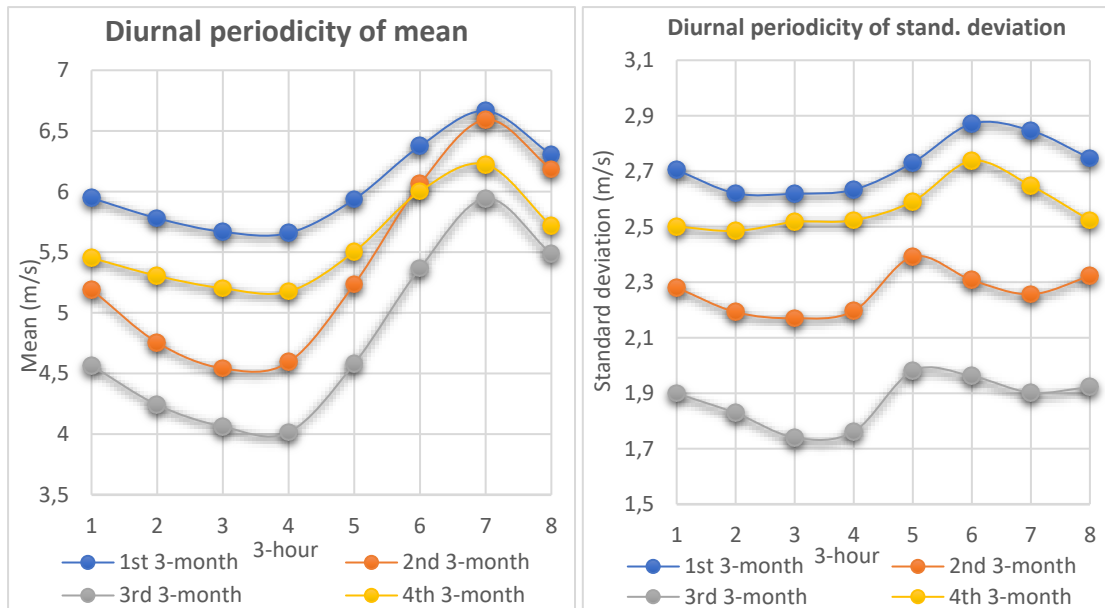
Όλα τα φαινόμενα μπορούν να μελετηθούν : είτε ως στοχαστικά, είτε ως ντετερμινιστικά (μη στοχαστικά) και ένας πολύ απλός τρόπος για να αποφασίσουμε πως θα μελετήσουμε ένα φαινόμενο είναι ο εξής :

<p>Αν η επιστήμη μπορεί να περιγράψει όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν ένα φαινόμενο με απόλυτη ακρίβεια</p>	<p>τότε το φαινόμενο μελετάται ως ντετερμινιστικό. Θεωρείται απόλυτα προβλέψιμο, αν το προσομοιάσουμε με ένα πείραμα θα δίνει συνεχόμενα τα ίδια αποτελέσματα.</p>
<p>Αν η επιστήμη μπορεί να το περιγράψει με ικανοποιητική ακρίβεια</p>	<p>Τότε το φαινόμενο μελετάται είτε ως στοχαστικό, είτε ως ντετερμινιστικό. Όσες φορές και αν πραγματοποιήσουμε το πείραμα δίνει σχεδόν ίδια αποτελέσματα.</p>
<p>Αν η επιστήμη δεν μπορεί να το περιγράψει με σχετική ακρίβεια</p>	<p>Τότε το φαινόμενο μελετάται ως στοχαστικό. Όσες φορές και αν πραγματοποιήσουμε, το πείραμα δεν θα δίνει ίδια αποτελέσματα.</p>

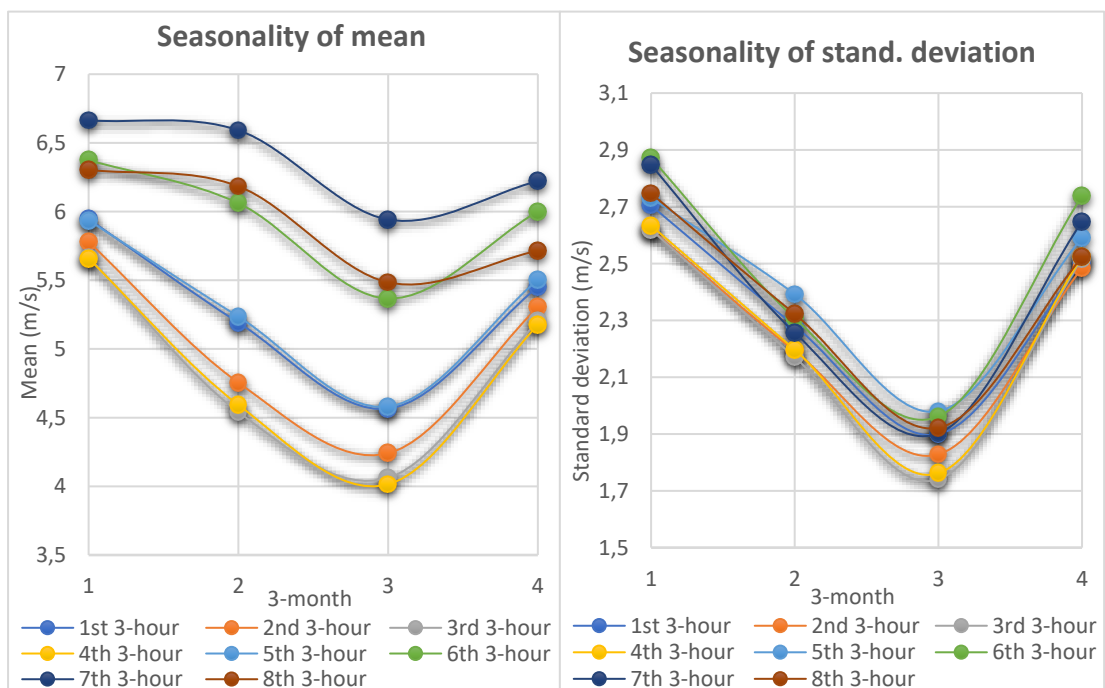
## 5.2 Εφαρμογή της διαδικασίας της Ομογενοποίησης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ([βλέπε κεφ. 4.4](#)), η διαδικασία της ομογενοποίησης, είναι μία διαδικασία που εφαρμόζεται έτσι ώστε να εξαλειφθεί η διπλή περιοδικότητα του ανέμου. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε όλους τους σταθμούς για καθεμία από τις εξεταζόμενες κατανομές και για καθεμία υποπερίοδο και τα αποτελέσματα για τον καλύτερο σταθμό της βάσης δεδομένων μας παρουσιάζονται παρακάτω.





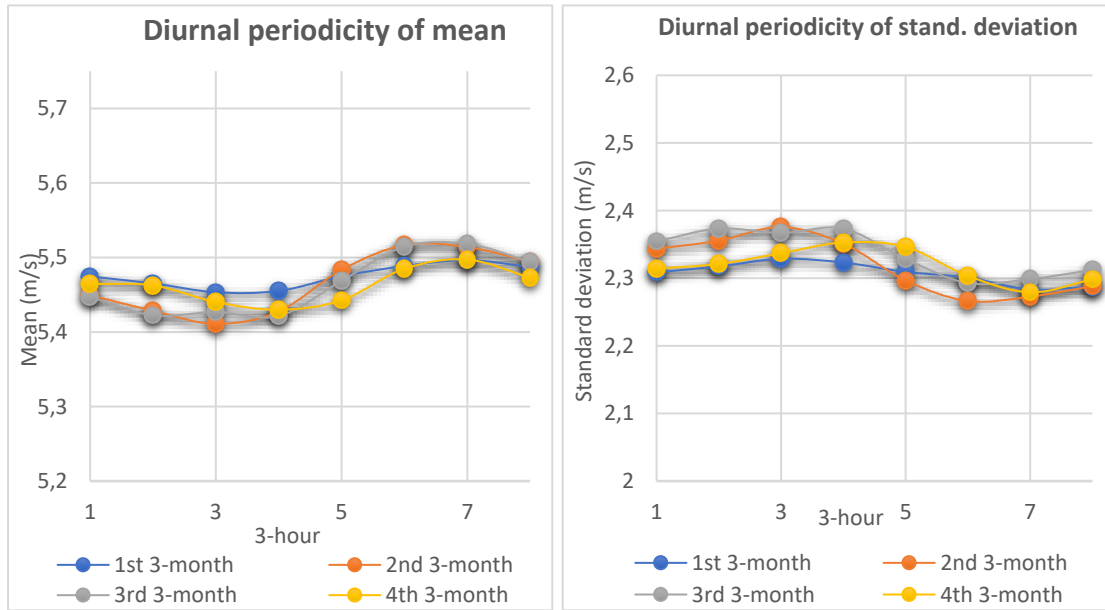
Σχήμα 5.1 (α,β): Η ημερήσια περιοδικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) πριν την ομογενοποίηση.



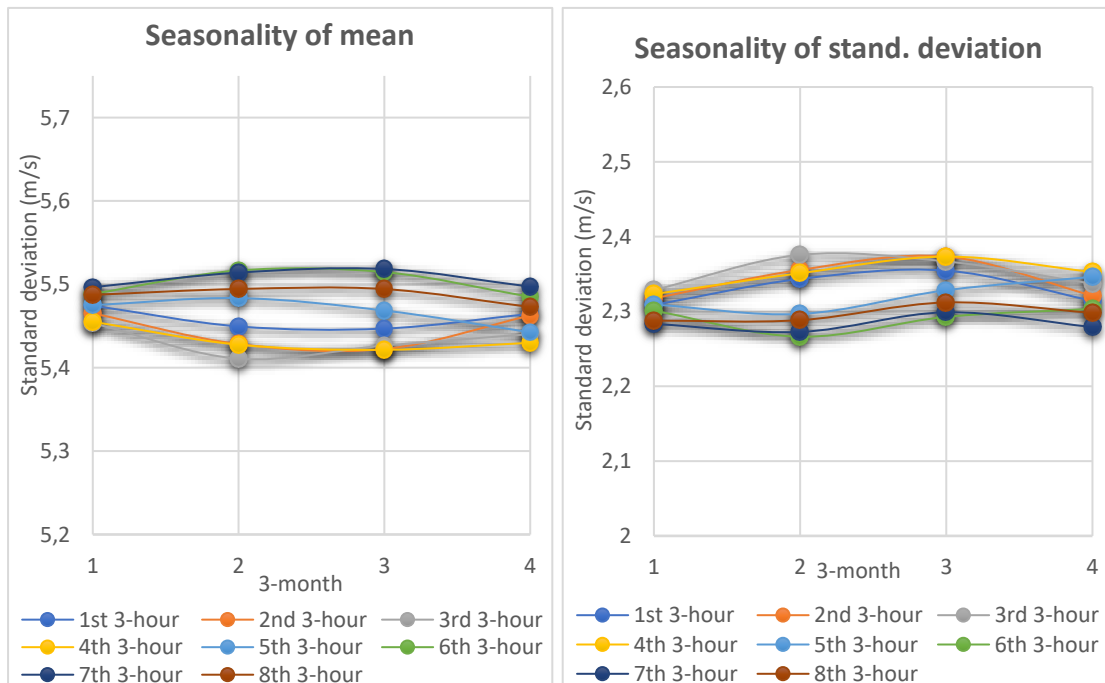
Σχήμα 5.2 (α,β): Η εποχικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) πριν την ομογενοποίηση.

Φαίνεται ότι η μέση τιμή παρουσιάζει περιοδικότητα τόσο ημερήσια όσο και εποχική. Ωστόσο, η τυπική απόκλιση δείχνει να έχει έντονη εποχική περιοδικότητα, αλλά όχι τόσο σημαντική ημερήσια.

Ύστερα για να απαλλαχθεί η χρονοσειρά από τις περιοδικότητες εφαρμόζεται η διαδικασία της ομογενοποίησης. Τα διαγράμματα είναι τα εξής :



Σχήμα 5.3: Η ημερήσια περιοδικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) μετά την ομογενοποίηση.



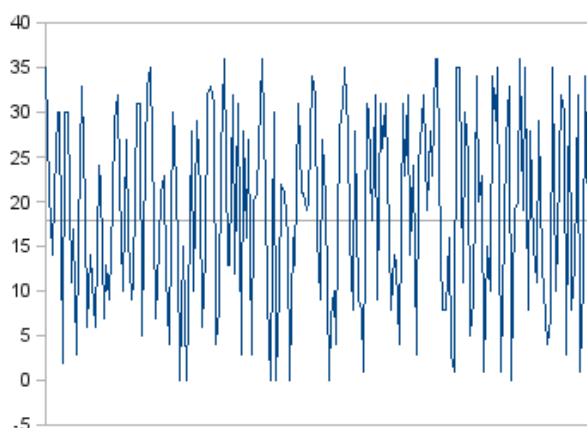
Σχήμα 5.4 (α,β): Η εποχικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) πριν την ομογενοποίηση.

Τελικά, για κάθε υποπερίοδο, μέσω της ομογενοποίησης, η χρονοσειρά μετατρέπεται σε μία στάσιμη ανέλιξη, απαλλάσσοντάς την έτσι από τις περιοδικότητες. Μπορεί να θεωρηθεί λοιπόν, ότι η ομογενοποίηση ήταν επιτυχής.

Εφόσον έφυγαν πια οι περιοδικότητες στην χρονοσειρά, είναι δυνατόν να παραχθούν πλέον συνθετικές χρονοσειρές με την χρήση του μοντέλου συμμετρικού κυλιόμενου μέσου (SMA).

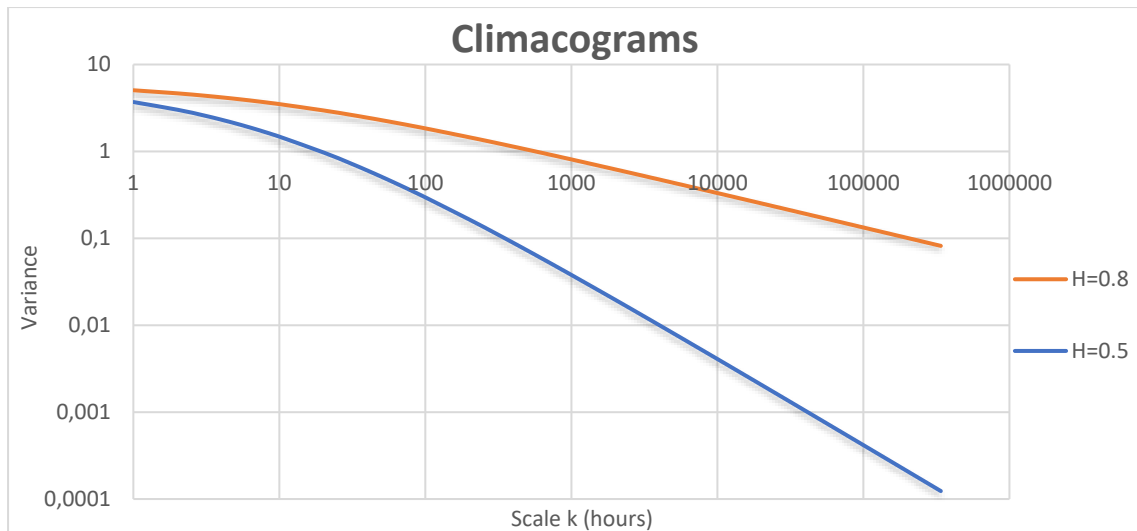
### 5.3 Στοιχεία δυναμικής φαινομένου Hurst – Kolmogorov

Το φαινόμενο της μακροπρόθεσμης εμμονής, ή αλλιώς φαινόμενο Hurst, ανακαλύφθηκε πρώτη φορά από τον υδρολόγο Harold Edwin Hurst (1880-1978), ο οποίος μελέτησε την διακύμανση της στάθμης του νερού του ποταμού Νείλου, ενώ το φαινόμενο διαπιστώθηκε και από τον Andrey Kolmogorov (1903-1987) μελετώντας την τύρβη. Εδώ αξίζει να αναφερθεί η διαφορά πρόβλεψης των αποτελεσμάτων μίας ρουλέτας, σε σχέση με την πρόβλεψη του κλίματος, και επομένως και της ταχύτητας του ανέμου. Στην περίπτωση της ρουλέτας έχουμε ότι η τελευταία είναι απρόβλεπτη βραχυπρόθεσμα, δηλαδή σε μικρές χρονικές κλίμακες, αλλά μακροπρόθεσμα, σε μεγάλες χρονικές κλίμακες, μπορούμε να φανταζόμαστε τις διάφορες εκβάσεις σαν τυχαίο θόρυβο πάνω σε ένα γνωστό σήμα. Μπορούμε να φανταστούμε τα αποτελέσματα της ρουλέτας σαν τυχαίες διακυμάνσεις γύρω από μια μέση τιμή 18.



Σχήμα 5.5: 200 τυχαία αποτελέσματα ρουλέτας

Καθώς η ρουλέτα προσομοιάζει τον λευκό θόρυβο, είναι φανερό γιατί μακροπρόθεσμα η τιμή έκβασης της ρουλέτας είναι προβλέψιμη, όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα, για μία ΗΗΚ (θα εξηγηθεί παρακάτω) ανέλιξη λευκού θορύβου ( $H=0.5$ ) και μία με μακροπρόθεσμη εμμονή ( $H=0.8$ ). Είναι φανερό πως για την ανέλιξη λευκού θορύβου, η διασπορά της μέσης τιμής μειώνεται πιο γρήγορα, όπως επίσης και περισσότερο σε πολύ μεγάλες κλίμακες, δηλαδή μακροπρόθεσμα. Αντίθετα, στην ανέλιξη με μακροπρόθεσμη εμμονή, η διασπορά της μέσης τιμής είναι μεγαλύτερη, και συνεπώς, απρόβλεπτη σε βάθος χρόνου.



Σχήμα 5.6: Κλιμακογράμματα μίας ΗΗΚ ανέλιξης, για συντελεστές Hurst  $H=0.5$  &  $H=0.8$ .

Το κλίμα ωστόσο, περιγράφεται από χαστικές εξισώσεις και είναι αβέβαιο σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Ένα απλό και συνάμα ενδιαφέρον παράδειγμα, το οποίο εξετάζεται και στην παρούσα εργασία, είναι η δημιουργία των εποχών. Είναι σίγουρα εύκολα κατανοητό, πως επειδή οι εποχές οφείλονται στο γεγονός ότι οι ακτίνες του ήλιου πέφτουν υπό διαφορετική γωνία καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Έτσι, κάποιος που ζει στους πόλους ή στον ισημερινό της γης, έχει μία τελείως διαφορετική αντίληψη για τις εποχές. Μια καταιγίδα ή ένας καύσωνας όμως συνήθως δεν έχουν δεσπόζουσα αιτία, αλλά δημιουργούνται χαστικά. Η συμπεριφορά λοιπόν η οποία κάνει την αβεβαιότητα να είναι η μέγιστη δυνατή σε όλες τις κλίμακες λέγεται συμπεριφορά *Hurst-Kolmogorov*.

Ορίζουμε ως παράμετρο Hurst, το μέτρο μακροπρόθεσμης μνήμης μίας χρονοσειράς, που δείχνει τον ρυθμό μεταβολής των αυτοσυσχετίσεων της χρονοσειράς καθώς η υστέρηση μεταξύ ζευγών τιμών αυξάνεται. Αυτό υποδεικνύει ότι στην φύση, τα γεγονότα τείνουν να συμβαίνουν κατά ομάδες (εμμονή). Με άλλα λόγια, ενώ σε μια χρονοσειρά θα περιμέναμε πως η αυτοσυσχέτιση με χρονική υστέρηση 1 ( $lag=1$ ) θα ήταν μεγάλη και μετά όσο αυξάνονταν η χρονική υστέρηση, αυτή θα μειωνόταν απότομα, παρατηρείται πως λόγω της εμμονής δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο αλλά η αυτοσυσχέτιση συνεχίζει να παίρνει σημαντικές μη μηδενικές τιμές. Η παράμετρος Hurst λαμβάνει τιμές μεταξύ  $[0, 1]$ . Προκύπτει ότι :

- Όταν η τιμή του συντελεστή Hurst ισούται με 0.5, τότε δείχνει μία τυχαία μεταβολή (λευκός θόρυβος). Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του στοιχείου στο χρόνο  $t$  και  $t+1$ .
- Εάν η τιμή αυτή είναι  $0 < H < 0.5$ , τότε υπάρχει συμπεριφορά αντίθετη της εμμονής, δηλαδή μια αύξηση της τιμής ακολουθείται από μια μείωση της τιμής.
- Εάν η τιμή αυτή είναι  $0.5 < H < 1$  τότε η χρονοσειρά αυτή έχει εμμονή. Δηλαδή μια μεγάλη τιμή έχει μεγάλη πιθανότητα να ακολουθείται από μια μεγάλη

τιμή και το αντίστοιχο για μικρότερες τιμές, ακόμη και για μεγάλη χρονική υστέρηση. Όσο το  $H$  τείνει στο 1 τόσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τάση. Φυσικές διεργασίες που περιγράφονται από χρονοσειρές αυτής της κατηγορίας είναι πιο δύσκολο να προβλεφθούν, γιατί παρουσιάζουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα (Markonis and Koutsoyiannis 2013).

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης στα δεδομένα της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ένα υβριδικό μοντέλο ανέλιξης Hurst-Kolmogorov, το οποίο από εδώ και πέρα θα αναφέρεται ως ΗΗΚ (Hybrid Hurst-Kolmogorov).

1. Μία ανέλιξη Markov με κλιμακόγραμμα :

$$\gamma(k) = \frac{2\lambda}{k/\alpha} \left(1 - \frac{1 - e^{-k/\alpha}}{k/\alpha}\right) \quad (5.1)$$

μεγιστοποιεί την παραγωγή της εντροπίας στις μικρές χρονικές κλίμακες αλλά την ελαχιστοποιεί για τις μεγάλες.

2. Μία ανέλιξη Hurst-Kolmogorov (HK) με κλιμακόγραμμα :

$$\gamma(k) = \lambda \left(\frac{\alpha}{k}\right)^{2-2H} \quad (5.2)$$

μεγιστοποιεί την παραγωγή της εντροπίας στις μεγάλες χρονικές κλίμακες αλλά την ελαχιστοποιεί για τις μικρές.

3. Μία ανέλιξη Hybrid Hurst-Kolmogorov (ΗΗΚ) με κλιμακόγραμμα :

$$\gamma(k) = \lambda \left(1 + \frac{k}{\alpha}\right)^{2M} \frac{H-1}{M} \quad (5.3)$$

μεγιστοποιεί την παραγωγή της εντροπίας τόσο στις μεγάλες όσο και στις μικρές χρονικές κλίμακες.

Σε αυτούς τους ορισμούς, ως  $\alpha$  και  $\lambda$  ορίζονται οι παράμετροι κλίμακας με διαστάσεις [t] και [x<sup>2</sup>] αντίστοιχα, δηλαδή το  $\alpha$  είναι μία χαρακτηριστική παράμετρος χρόνου, ενώ το  $\lambda$  είναι η διασπορά της ανέλιξης. Η παράμετρος  $H$  είναι η παράμετρος Hurst που καθορίζει τις παγκόσμιες ιδιότητες της ανέλιξης, καθώς το  $k \rightarrow \infty$ . Η παράμετρος  $M$  καθορίζει τις τοπικές ιδιότητες της τελευταίας, καθώς το  $k \rightarrow 0$ . Τόσο η  $H$  όσο και η  $M$  είναι αδιάστατοι αριθμοί με τιμές στο διάστημα (0, 1). Στην περίπτωση όπου  $H=M=0.5$  το ΗΗΚ πρακτικά δεν διαφέρει από μία ανέλιξη Markov, αν και δεν είναι ακριβώς ταυτόσημες. Επιπλέον, καθώς το  $\alpha \rightarrow 0$ , η ανέλιξη τείνει να γίνει καθαρή HK ανέλιξη με τον ίδιο συντελεστή  $H$ . Ακόμη, για κάθε συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων, το ΗΗΚ παρουσιάζει συμπεριφορά Markov για μικρές χρονικές κλίμακες, αν  $M=0.5$  ή παρόμοια με Markov αν  $M \neq 0.5$ , και συμπεριφορά HK για μεγάλες χρονικές κλίμακες.

Για την στοχαστική δομή της ταχύτητας του ανέμου, εξαιτίας και της τύρβης που τον διέπει, υποτέθηκε ένα μοντέλο που αποτελείται από το άθροισμα δύο εξίσου σταθμισμένων διαδικασιών, μίας ΗΗΚ και μίας Markov με κλιμακόγραμμα :

$$\gamma(k) = \frac{\lambda}{2} \left( \left(1 + \frac{k}{\alpha}\right)^{2M} \right)^{\frac{H-1}{M}} + \frac{\lambda}{k/\alpha} \left(1 - \frac{1-e^{-k/\alpha}}{k/\alpha}\right) \quad (5.4)$$

όπου αυτό το μοντέλο προσαρμόστηκε στο κλιμακόγραμμα των σταθμών μελέτης, όπως αναλυτικά περιγράφεται σε επόμενα υποκεφάλαια.

#### 5.4 Το κλιμακόγραμμα ως εργαλείο και τα αποτελέσματα των σταθμών

Ανάμεσα από τα διάφορα στοχαστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται, τα πιο διαδεδομένα είναι το δυναμικό φάσμα, η αυτοσυνδιασπορά και το κλιμακόγραμμα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το κλιμακόγραμμα, το οποίο είναι ένα γρήγορο και αξιόπιστο εργαλείο έτσι ώστε να εντοπίζεται και να υπολογίζεται αξιόπιστα η μακροπρόθεσμη εμμονή και κατ' επέκταση η παράμετρος Hurst. Συσχετίζει την τυπική απόκλιση  $\sigma^{(k)}$  με την κλίμακα. Η αρνητική κλίση που προκύπτει αν προστεθεί στη μονάδα δίνει το συντελεστή Hurst. Σε διάγραμμα διπλά λογαριθμικών αξόνων η κλίση της ευθείας διαιρεμένη με το 2 και προσθέτοντας το ένα υπολογίζει την τιμή της παραμέτρου Hurst. Επίσης, από την σχέση :

$$\sigma^{(k)} = k^{H-1} * \sigma \quad (5.5)$$

λύνοντας ως προς H προκύπτει ο συντελεστής Hurst. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι, το κλιμακόγραμμα συνδέεται άμεσα με την αυτοσυνδιασπορά  $c(h)$  με την σχέση :

$$c(h) = \frac{1}{2} \frac{d^2(\tau^2 \gamma(h))}{d\tau^2} \quad (5.6)$$

όπου  $h$  είναι η χρονική υστέρηση σε μονάδες χρόνου (t). Επίσης, η αυτοσυνδιασπορά συνδέεται με το φάσμα ισχύος με την σχέση :

$$s(w) = 4 \int_0^\infty c(h) \cos(2\pi wh) dh \quad (5.7)$$

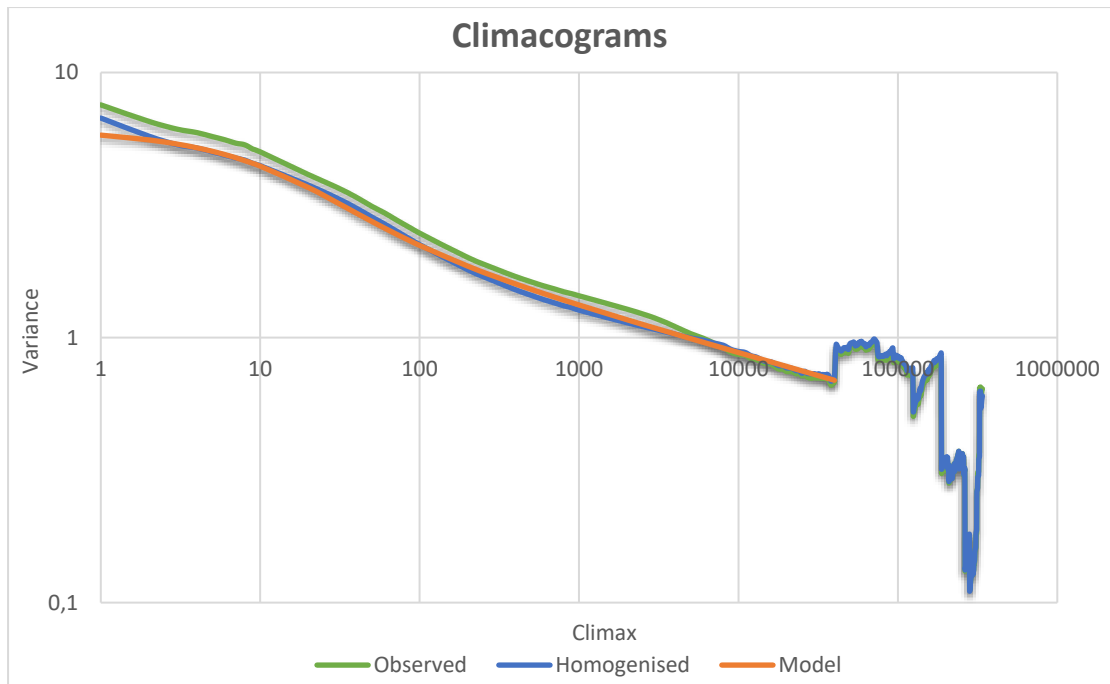
όπου  $w$  είναι η συχνότητα σε μονάδες αντίστροφου χρόνου ( $t^{-1}$ ). Έτσι, κάθε ένα από αυτά τα τρία στοχαστικά εργαλεία περιέχει ακριβώς τις ίδιες πληροφορίες. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι το κλιμακόγραμμα παρέχει καλύτερες εκτιμήσεις από τις άλλες δύο (Dimitriadis and Koutsoyiannis 2015a) και ως εκ τούτου, όλες οι εφαρμογές σε αυτήν την μελέτη βασίζονται σε αυτό.

Επόμενο βήμα ήταν ο υπολογισμός του H με την βοήθεια των κλιμακογραμμάτων. Δημιουργώντας από ένα κλιμακόγραμμα για κάθε έναν σταθμό, προκύπτουν τελικά 1973 κλιμακογράμματα από τα οποία τελικά, ενώνοντάς τα προκύπτει ένα ενιαίο για παγκόσμια κλίμακα. Η ένωση είναι απλή, και αυτό που πρακτικά γίνεται είναι ότι προστίθενται οι διασπορές της κάθε κλίμακας για όλους τους σταθμούς και τελικά διαιρούνται με το σύνολο των κλιμακογραμμάτων που έφταναν ως αυτήν την κλίμακα. Για παράδειγμα, επειδή δεν έχουν όλοι οι σταθμοί το ίδιο μήκος χρονοσειρών, η πρώτη χρονική κλίμακα, ήτοι 1, διαιρείται με 1973 ( το σύνολο των

κλιμακογραμμάτων που είχαν κλίμακα μεγαλύτερη ή ίση του 1) καθώς όλοι οι σταθμοί έχουν μήκος χρονοσειράς μεγαλύτερο της 1<sup>ης</sup> κλίμακας, σε αντίθεση με την τελευταία κλίμακα, ήτοι 339.000 στην οποία συνέβαλαν μόλις 2 κλιμακογράμματα. Με άλλα λόγια αυτό που γίνεται είναι ότι το ενιαίο κλιμακόγραμμα δημιουργείται από τον μέσο όρο όλων των υπολοίπων κλιμακογραμμάτων. Να σημειωθεί εδώ ότι όλα τα κλιμακογράμματα υπολογίσθηκαν μέχρι την μέγιστη κλίμακα συνάθροισης, ήτοι 50% των τιμών. Λέγεται μέγιστη κλίμακα καθώς εκεί βγαίνει η διασπορά από μόλις 2 τιμές (τον μέσο όρο του πρώτου 50% των τιμών, και τον μέσο όρο από το δεύτερο 50% ) και θεωρείται ότι δεν υπάρχει τόσο καλή εκτίμηση. Αυτός είναι και ο λόγος που το κλιμακόγραμμα θεωρείται ότι δίνει πολύ καλή εκτίμηση έως το 10% της κλίμακας συνάθροισης. Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται τόσο για τις παρατηρημένες χρονοσειρές, όσο και για τις ομογενοποιημένες, στις οποίες και εφαρμόζεται το μοντέλο από το άθροισμα δύο εξίσου σταθμισμένων διαδικασιών, μίας ΗΗΚ και μίας Markov, όπως περιεγράφηκε από την σχέση (5.4). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το με το μοντέλο προσαρμόζεται μέχρι το 1<sup>ο</sup> «σπάσιμο» του μέσου ομογενοποιημένου κλιμακογράμματος, αφού μετά υπάρχουν πολύ λίγες τιμές και η εκτίμηση δεν είναι τόσο καλή. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για όλες τις ομογενοποιημένες κατανομές των εξεταζόμενων κατανομών. Τα αποτελέσματα των παραμέτρων του μοντέλου  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $H$  και  $M$  εκτιμήθηκαν για κάθε κατανομή, χωρίς ωστόσο να έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, και είναι ίσες με τις παρακάτω τιμές:

<i>PBF</i> :	$\alpha = 6,756$	$\lambda = 6,220$	$H = 0,913$	$M = 0,282$
<i>Generalized Pareto</i> :	$\alpha = 7,441$	$\lambda = 7,074$	$H = 0,903$	$M = 0,286$
<i>Weibull</i> :	$\alpha = 7,041$	$\lambda = 6,150$	$H = 0,911$	$M = 0,392$
<i>Lognormal</i> :	$\alpha = 7,670$	$\lambda = 5,698$	$H = 0,913$	$M = 0,992$
<i>Gamma</i> :	$\alpha = 7,094$	$\lambda = 6,665$	$H = 0,914$	$M = 0,525$
<i>Rayleigh</i> :	$\alpha = 7,954$	$\lambda = 7,169$	$H = 0,904$	$M = 0,141$

και το αντίστοιχο ενδεικτικό κλιμακόγραμμα για την PBF είναι το εξής :



Σχήμα 5.7: Τα μέσα κλιμακογράμματα των παρατηρημένων χρονοσειρών, των ομογενοποιημένων και του προσαρμοσμένου μοντέλου για την PBF.

## 5.5 Παραγωγή Συνθετικών Χρονοσειρών

Πλέον έχοντας πραγματοποιήσει, όλες τις προηγούμενες αναλύσεις που αφορούν την ταχύτητα του ανέμου, διατίθενται τα απαραίτητα, στοιχεία ώστε να γίνει η προσπάθεια να συντεθεί ένα ψευδο-κυκλοστάσιμο μοντέλο αναπαραγωγής ωριαίας ταχύτητας ανέμου. Αναφέρονται επιγραμματικά τα βήματα της μελέτης, τα οποία ήταν απαραίτητα να πραγματοποιηθούν, για να αποκτηθούν όλα τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο.

Αρχικά, με σκοπό την απαλλαγή από την προαναφερόμενη περιοδικότητα (βλέπε [κεφ. 4.2](#)), επιλέγουμε τον διαχωρισμό της κάθε χρονοσειράς σε 32 επιμέρους χρονοσειρές, 4 τρίμηνα και 8 τρίωρα, όπου ο άνεμος παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά (όπως μέση τιμή, τυπική απόκλιση). Ύστερα, για την εκάστοτε χρονοσειρά μελέτης, με την υιοθέτηση και χρήση της ομογενοποίησης, προσεγγιστικά αφαιρείται από την ανέλιξη τόσο η εποχικότητα, όσο και η ωριαία περιοδικότητα. Πρακτικά, πλέον περιγράφεται η στοχαστική δομή της ανέλιξης του ανέμου, εφόσον αφαιρέθηκε το ντετερμινιστικό κομμάτι της, το οποίο δεν είναι άλλο από τις περιοδικότητες. Στη συνέχεια για τις παραπάνω χρονοσειρές προσαρμόστηκε στην εμπειρική κατανομή η κατανομή [PBF](#) τριών παραμέτρων. Επομένως, για κάθε σταθμό, δημιουργείται ένα σετ  $3 \times 32 = 96$  παραμέτρων, οι οποίες τελικά με την εφαρμογή μοντέλων διπλής κυκλοστασιμότητας (βλ. [κεφ. 4.3](#)), μειώνονται σε 9. Τέλος υπολογίστηκε η παράμετρος Hurst για την ανέλιξη του ανέμου, ο οποίος προέκυψε ως ο μέσος όρος όλων των σταθμών και ίσος με  $H=0.91$ .



5.5.1 Το μοντέλο συμμετρικού κυλιόμενου μέσου (symmetric moving average - SMA)  
 Το σχήμα συμμετρικού κυλιόμενου μέσου (symmetric moving average - SMA) έχει εισαχθεί από τον Koutsoγιάννης (2000) και μετασχηματίζει μία ανέλιξη λευκού θορύβου  $v_j$  σε μία ανέλιξη με αυτοσυσχέτιση  $x_j$  σύμφωνα με τη σχέση :

$$\underline{x}_i = \sum_{j=-q}^q a_{|j|} v_{i+j} = a_q v_{i-q} + \dots + a_1 v_{i-1} + a_0 v_i + a_1 v_{i+1} + \dots + a_q v_{i+q} \quad (5.8)$$

όπου τα  $a_j$  είναι οι συντελεστές βάρους και ο αριθμός τους  $q$  θεωρητικά είναι άπειρος, αλλά στην πράξη λαμβάνει μια πεπερασμένη τιμή. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για τυχούσα συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. Στην περίπτωση του μοντέλου ΗΗΚ μια ρητή έκφραση για τους συντελεστές  $a_j$  μπορεί να μην είναι εύκολο να εξαχθεί. Ωστόσο, μπορούν να υπολογιστούν αριθμητικά μέσω του μετασχηματισμού Fourier του διακριτού φάσματος ισχύος των συντελεστών που συνδέεται άμεσα με το διακριτό φάσμα ισχύος της ανέλιξης. Ορίζοντας ως  $s_\alpha(\omega)$  τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT) της σειράς  $a_j$  και χρησιμοποιώντας την εξίσωση συνέλιξης :

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j a_{i+j} = cov_i \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (5.9)$$

όπου  $cov_i$  η αυτοσυνδιασπορά,

και το γεγονός ότι στο μοντέλο SMA, το  $a_j$  είναι μια άρτια συνάρτηση του  $j$ , αφού  $a_j = a_{-j}$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots$  αποδεικνύεται ότι το  $s_\alpha(\omega)$  σχετίζεται με το φάσμα ισχύος της ανέλιξης  $s_{cov}(\omega)$  από την σχέση :

$$s_\alpha(\omega) = \sqrt{2s_{cov}(\omega)} \quad (5.10)$$

Αυτό επιτρέπει τον άμεσο υπολογισμό του διακριτού μετασχηματισμού Fourier της σειράς  $a_j$  εάν το φάσμα ισχύος της ανέλιξης  $s_{cov}(\omega)$ , ή ισοδύναμα της αυτοσυνδιασποράς  $cov_i$ , είναι γνωστό. Τότε, το  $a_j$  μπορεί να υπολογιστεί από τον αντίστροφο μετασχηματισμό, δηλαδή :

$$a_j = \int_0^{1/2} s_\alpha(\omega) \cos(2\pi j\omega) d\omega \quad (5.11)$$

Εκτός από μερικές ειδικές περιπτώσεις, οι υπολογισμοί που απαιτούνται για τον υπολογισμό του  $a_j$  από το  $cov_j$  μπορούν να εκτελεστούν μόνο αριθμητικά. Ωστόσο, είναι απλοί και μη ευαίσθητοι. Επιπλέον, όλοι οι υπολογισμοί μπορούν να εκτελεστούν χρησιμοποιώντας το γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT), επιτρέποντας έτσι την κατασκευή ενός γρήγορου αλγορίθμου. Η διατήρηση των τριών πρώτων κεντρικών ροπών, συνήθως παρέχει αποδεκτές προσεγγίσεις στις θεωρητικές κατανομές. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, με το μοντέλο που δημιουργούμε διατηρούμε μέχρι και την 4<sup>η</sup> στατιστική ροπή, δηλαδή την κύρτωση, παρόλο που με το συγκεκριμένο μοντέλο μπορούν να διατηρηθούν και ροπές υψηλότερης τάξης. Η ασυμμετρία του λευκού θορύβου δίνεται από την σχέση :

$$C_{s,v} = \frac{(\sum_{j=-q}^q a_{|j|}^2)^{3/2}}{\sum_{j=-q}^q a_{|j|}^3} C_{s,x} \quad (5.12)$$

όπου  $C_{s,x}$  είναι ο συντελεστής ασυμμετρίας του  $\underline{x}_i$ .

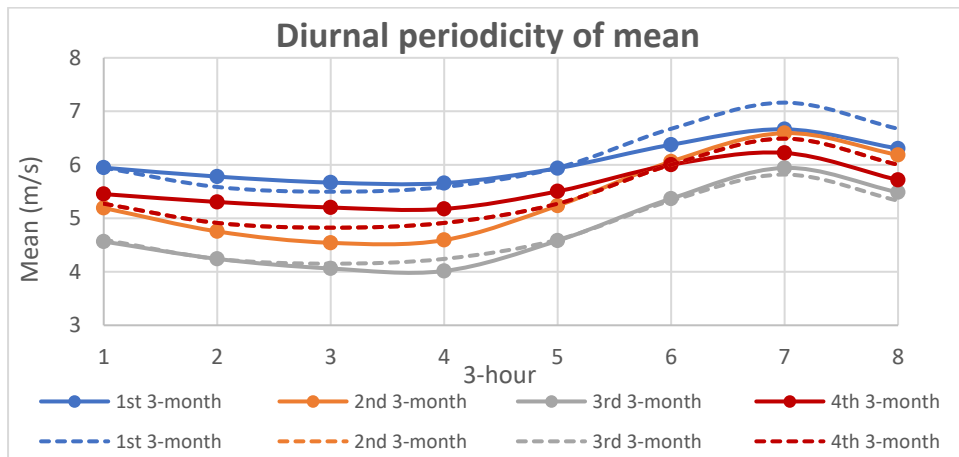
### 5.5.2 Εφαρμογή των μοντέλων διπλής κυκλοστασιμότητας

Όπως αναλυτικά αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.3, χρησιμοποιώντας την κατανομή PBF, χειριζόμαστε για κάθε σταθμό ένα σετ 96 παραμέτρων (3 για κάθε υποπερίοδο έχοντας 32 υποπεριόδους). Προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των παραμέτρων, χρησιμοποιούνται μοντέλα διπλής κυκλοστασιμότητας, που περιγράφουν αρκετά ικανοποιητικά την συμπεριφορά του ανέμου. Οι δύο βασικές συναρτήσεις που περιγράφουν τη διπλή περιοδικότητα, όπως έχει αναφερθεί είναι οι εξής:

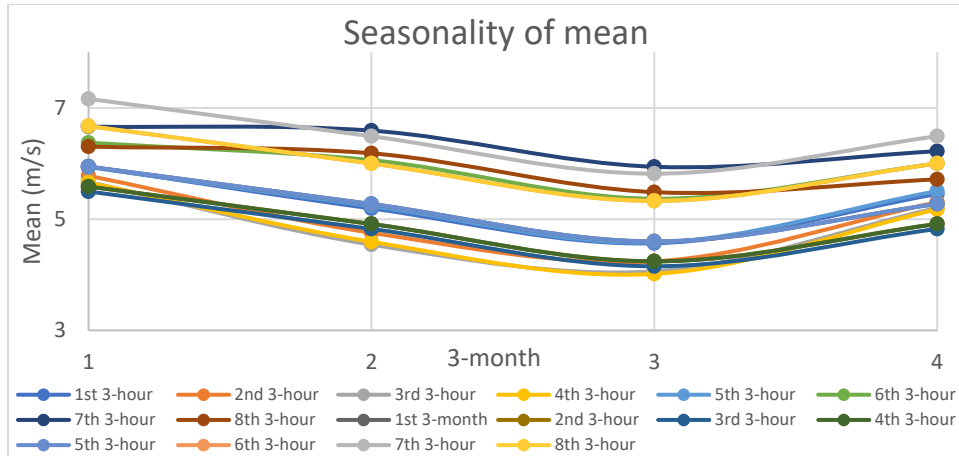
$$C_m(t) = \cos\left(2\pi \frac{(t_m - a_m)}{T_m}\right) \quad (5.13)$$

$$C_h(t) = \cos\left(2\pi \frac{(t_h - a_h)}{T_h}\right) \quad (5.14)$$

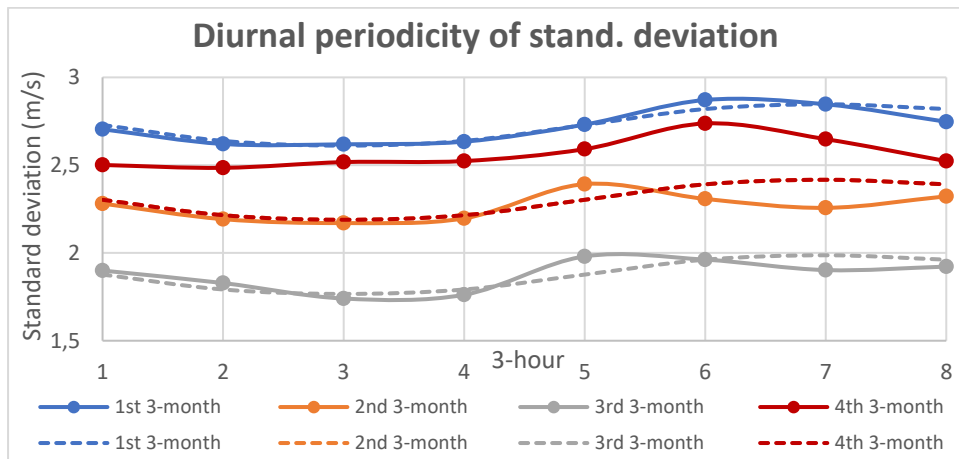
Για τον σταθμό μελέτης, βλέποντας κανείς τα διαγράμματα της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης, αντιλαμβάνεται ότι το τρίωρο αιχμής είναι το 7<sup>ο</sup> και το τρίμηνο αιχμής είναι το 1<sup>ο</sup> (βλέπε διαγράμματα 5.1 και 5.3). Επομένως θεωρώντας τα  $a_h$  και  $a_m$  ίσα με 7 και 1 αντίστοιχα, αναζητούνται οι τιμές των  $a_1, a_2, a_3, a_4$ . Αναζητούνται λοιπόν οι κατάλληλες τιμές έτσι ώστε το μοντέλο να προσομοιάζει όσο το δυνατόν καλύτερα την διπλή περιοδικότητα του ανέμου, με την έννοια ότι για κάθε υποπερίοδο οι στατιστικές ροπές του μοντέλου πρέπει να είναι ίσες με αυτές των παρατηρημένων υποπεριόδων. Τα αποτελέσματα για τιμές των παραμέτρων φαίνεται από τα παρακάτω διαγράμματα :



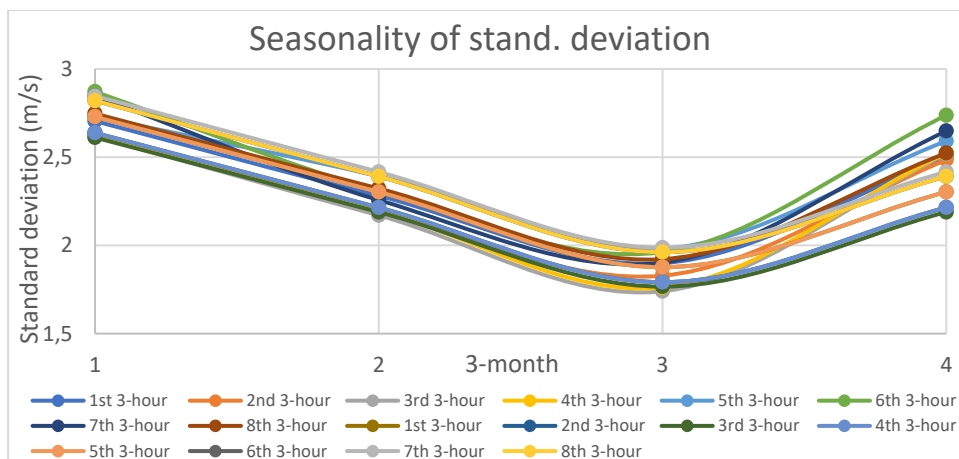
Σχήμα 5.8: Η ημερήσια περιοδικότητα στην μέση τιμή για την παρατηρημένη χρονοσειρά (συνεχόμενη γραμμή) και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας (διακεκομμένη γραμμή).



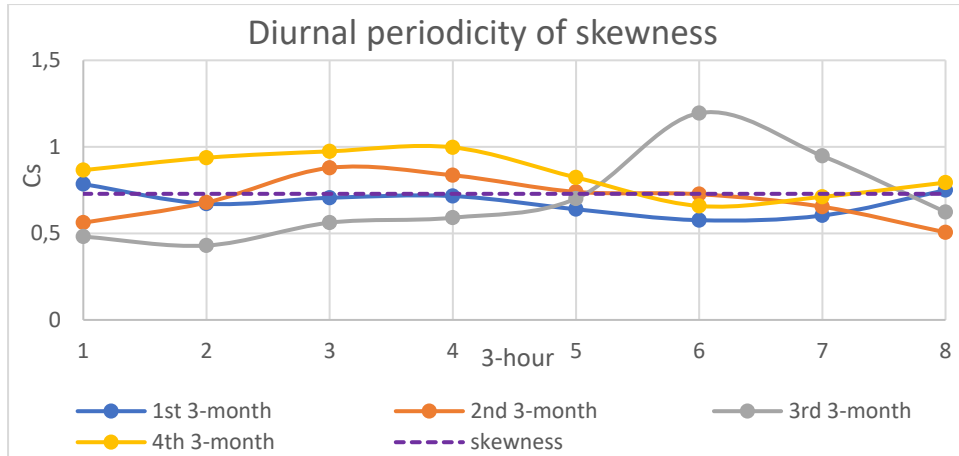
Σχήμα 5.9: Η εποχικότητα στην μέση τιμή για την παρατηρημένη χρονοσειρά και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας.



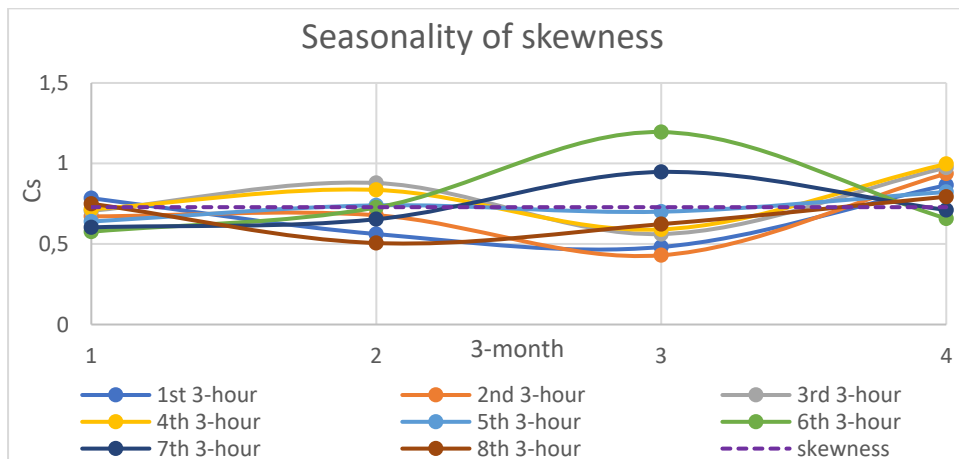
Σχήμα 5.10: Η ημερήσια περιοδικότητα στην τυπική απόκλιση για την παρατηρημένη χρονοσειρά (συνεχόμενη γραμμή) και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας (διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 5.11: Η εποχικότητα στην τυπική απόκλιση για την παρατηρημένη χρονοσειρά και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας.



Σχήμα 5.12: Η ημερήσια περιοδικότητα στην ασυμμετρία για την παρατηρημένη χρονοσειρά (συνεχόμενη γραμμή) και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας (διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 5.13: Η εποχικότητα στην ασυμμετρία για την παρατηρημένη χρονοσειρά (συνεχόμενη γραμμή) και του μοντέλου διπλής κυκλοστασιμότητας (διακεκομμένη γραμμή).

Τα αποτελέσματα των  $a_1, a_2, a_3, a_4$  για την μέση τιμή είναι :

$$a_1 = 0.130 \quad a_2 = 0 \quad a_3 = 0.123 \quad a_4 = 0.838$$

για την τυπική απόκλιση :

$$a_1 = 0.057 \quad a_2 = 0.002 \quad a_3 = 0.181 \quad a_4 = 0.977$$

και για την ασυμμετρία ο συντελεστής  $\alpha$  είναι :

$$\alpha = 1$$

### 5.5.3 Εκτίμηση παραμέτρων – Μέθοδος των ροπών – Μοντέλα διπλής κυκλοστασιμότητας

Έχοντας για κάθε κατανομή τις σχέσεις για τις raw-ροπές, και γνωρίζοντας τις σχέσεις που συνδέουν τις κεντρικές με τις raw ροπές, μπορούν να υπολογιστούν οι κεντρικές ροπές για όλες τις κατανομές. Αυτές οι σχέσεις είναι :

$$\mu_2 = \mu'_2 - \mu^2 \quad (5.15)$$

$$\mu_3 = \mu'_3 - 3\mu\mu'_2 + 2\mu^3 \quad (5.16)$$

και ούτω καθεξής σύμφωνα με το τρίγωνο του Pascal. Στις παραπάνω σχέσεις όπου  $\mu'$  είναι η raw-ροπή και  $\mu$  η κεντρική ροπή.

#### PBF:

Για την κατανομή PBF η ροπή raw r-τάξης δίνεται από την σχέση :

$$E(x^r) = \frac{a^r \lambda_r}{\Gamma(k)} \quad , \quad r < c, \quad r < a \quad (5.17)$$

όπου :

$$\lambda_r = \frac{r}{c} \Gamma\left(\frac{r}{c}\right) \Gamma\left(k - \frac{r}{c}\right) \quad , \quad r = 1, 2, \dots, i \quad (5.18)$$

όπου :

$a, c, k$  : οι παράμετροι της κατανομής PBF

$\Gamma(k)$  : η συνάρτηση Γάμμα.

*Μέση Τιμή :*

Για την πρώτη ροπή και για  $r=1$  επομένως έχουμε :

$$\mu = E[x] \quad (5.19)$$

$$\mu = E[x^1] = \frac{a^1 \lambda_1}{\Gamma(k)} \quad \text{και} \quad \lambda_1 = \frac{1}{c} \Gamma\left(\frac{1}{c}\right) \Gamma\left(k - \frac{1}{c}\right) \rightarrow$$

$$\rightarrow \mu = E[x] = \frac{a \Gamma\left(\frac{1}{c}\right) \Gamma\left(k - \frac{1}{c}\right)}{c \Gamma(k)} \quad , \quad c > 1, \quad a > 1 \quad (5.20)$$

ή αλλιώς

$$\rightarrow \mu = E[x] = \frac{a}{c} \beta\left(\frac{1}{c}, k - \frac{1}{c}\right) \quad , \quad c > 1, \quad a > 1 \quad (5.21)$$

όπου  $\beta(k)$  η συνάρτηση Βήτα που συνδέεται με την Γάμμα με την ιδιότητα :

$$\beta(x, y) = \frac{\Gamma(x)\Gamma(y)}{\Gamma(x+y)} \quad (5.22)$$

*Διασπορά – Τυπική απόκλιση :*

$$var(x) = E[x^2] - (E[x])^2 \quad (5.23)$$

$$E[x^2] = \frac{a^2 \lambda_2}{\Gamma(k)} = \frac{2a^2}{c} \beta\left(\frac{2}{c}, k - \frac{2}{c}\right), \quad c > 2, \quad a > 2$$

$$\sigma^2 = \text{var}(x) = \frac{a^2 \lambda_2}{\Gamma(k)} - \left(\frac{a^1 \lambda_1}{\Gamma(k)}\right)^2 \quad (5.24)$$

ή μετά από αλγεβρικούς χειρισμούς προκύπτει :

$$\sigma^2 = \text{var}(x) = \frac{2a^2}{c} \beta\left(\frac{2}{c}, k - \frac{2}{c}\right) - \frac{a^2}{c^2} \left(\beta\left(\frac{1}{c}, k - \frac{1}{c}\right)\right)^2 \quad (5.25)$$

και αντίστοιχα η τυπική απόκλιση :

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\text{var}(x)} \quad (5.26)$$

Συντελεστής Ασυμμετρίας :

$$\gamma_1 = \frac{E[x^3] - 3\mu\sigma^2 - \mu^3}{\sigma^3} \quad (5.27)$$

όπου  $\mu$  και  $\sigma$  η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα και :

$$E[x^3] = \frac{a^3 \lambda_3}{\Gamma(k)} = \frac{3a^3}{c} \beta\left(\frac{3}{c}, k - \frac{3}{c}\right), \quad c > 3, \quad a > 3 \quad (5.28)$$

Έχοντας εξάγει λοιπόν τις σχέσεις που συνδέουν τις παραμέτρους της κατανομής PBF, ήτοι  $a$ ,  $c$  και  $k$ , με τις στατιστικές της ροπές (σχέσεις (5.18), (5.24), (5.27) ) είναι δυνατόν πλέον με τις πρώτες τρεις ροπές να υπολογίσουμε τις τρεις άγνωστες παραμέτρους της κατανομής. Οι σχέσεις που προκύπτουν και καλούνται να επιλυθούν είναι οι εξής :

$$\mu_{\text{subperiod}} = \frac{a}{c} \beta\left(\frac{1}{c}, k - \frac{1}{c}\right), \quad c > 1, \quad a > 1 \quad (5.29)$$

$$\sigma_{\text{subperiod}}^2 = \frac{2a^2}{c} \beta\left(\frac{2}{c}, k - \frac{2}{c}\right) - \frac{a^2}{c^2} \left(\beta\left(\frac{1}{c}, k - \frac{1}{c}\right)\right)^2 \quad (5.30)$$

$$\gamma_{1,\text{subperiod}} = \frac{\frac{3a^3}{c} \beta\left(\frac{3}{c}, k - \frac{3}{c}\right) - 3\mu_{\text{sp}} \sigma_{\text{sp}}^2 - \mu_{\text{sp}}^3}{\sigma_{\text{sp}}^3} \quad (5.31)$$

όπου η λέξη *subperiod* υποδηλώνει την τιμή που δίνει για κάθε υποπερίοδο το μοντέλο διπλής κυκλοστασιμότητας για κάθε ροπή. Επειδή οι σχέσεις φαίνεται να είναι πεπλεγμένες, η επίλυση γίνεται με δοκιμές τιμών, και συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας τον *solver* του προγράμματος Matlab βρίσκοντας τις τιμές των  $a, c, k$  έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$\mu_{\text{subperiod}} - \mu_{\text{δοκιμής}} = 0 \quad (5.32)$$

$$\sigma_{\text{subperiod}}^2 - \sigma_{\text{δοκιμής}}^2 = 0 \quad (5.33)$$

$$\gamma_{1,\text{subperiod}} - \gamma_{1,\text{δοκιμής}} = 0 \quad (5.34)$$

### **Generalized Pareto:**

Για την κατανομή Generalized Pareto η ροπή raw r-τάξης δίνεται από την σχέση:

$$E(x^r) = \frac{\sigma^r}{(-\xi)^{r+1}} \frac{\Gamma(-r-\frac{1}{\xi})}{\Gamma(1-\frac{1}{\xi})} r! , \quad \xi > -\frac{1}{r} \quad (5.35)$$

Μέση Τιμή :

$$\mu = E[x] = \frac{\sigma}{\xi^2} \frac{\Gamma(-1-\frac{1}{\xi})}{\Gamma(1-\frac{1}{\xi})} , \quad \xi > -1 \quad (5.36)$$

Διασπορά – Τυπική απόκλιση :

$$\sigma^2 = var(x) = E[x^2] - (E[x])^2 = \frac{\sigma^2}{(-\xi)^3} \frac{\Gamma(-2-\frac{1}{\xi})}{\Gamma(1-\frac{1}{\xi})} 2 - \left( \frac{\sigma}{\xi^2} \frac{\Gamma(-1-\frac{1}{\xi})}{\Gamma(1-\frac{1}{\xi})} \right)^2 \quad (5.37)$$

όπου :

k, θ : οι παράμετροι της κατανομής Gamma

### **Weibull:**

Για την κατανομή Weibull η ροπή raw r-τάξης δίνεται από την σχέση :

$$E(x^r) = a^r \Gamma\left(\frac{r}{b} + 1\right) \quad (5.38)$$

όπου :

α, b : οι παράμετροι της κατανομής Weibull

Γ(k) : η συνάρτηση Γάμμα.

Μέση Τιμή :

Για την πρώτη ροπή και για r=1 επομένως έχουμε :

$$\mu = E[x] = a \Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right) \quad (5.39)$$

Διασπορά – Τυπική απόκλιση :

$$\sigma^2 = \text{var}(x) = E[x^2] - (E[x])^2 = a^2 \left( \Gamma\left(\frac{2}{b} + 1\right) - \left( \Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right) \right)^2 \right) \quad (5.40)$$

**Lognormal:**

Για την κατανομή Lognormal η συνάρτηση παραγωγής ροπής r-τάξης δίνεται από την σχέση :

$$E(x^r) = e^{r\mu + \frac{1}{2}r^2\sigma^2} \quad (5.41)$$

όπου :

$\mu, \sigma$  : οι παράμετροι της κατανομής Lognormal

Μέση Τιμή :

Για την πρώτη ροπή και για  $r=1$  επομένως έχουμε :

$$\mu = E[x] = e^{r\mu + \frac{1}{2}r^2\sigma^2} \quad (5.42)$$

Διασπορά – Τυπική απόκλιση :

$$\sigma^2 = \text{var}(x) = E[x^2] - (E[x])^2 = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \quad (5.43)$$

**Gamma:**

Για την κατανομή Gamma:

Μέση Τιμή :

$$\mu = E[x] = k\theta \quad (5.44)$$

Διασπορά – Τυπική απόκλιση :

$$\sigma^2 = \text{var}(x) = k\theta^2 \quad (5.45)$$

όπου :

$k, \theta$  : οι παράμετροι της κατανομής Gamma

**Rayleigh:**

Για την κατανομή Rayleigh:



Μέση Τιμή :

$$\mu = E[x] = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \approx 1.253 \sigma \quad (5.46)$$

όπου :

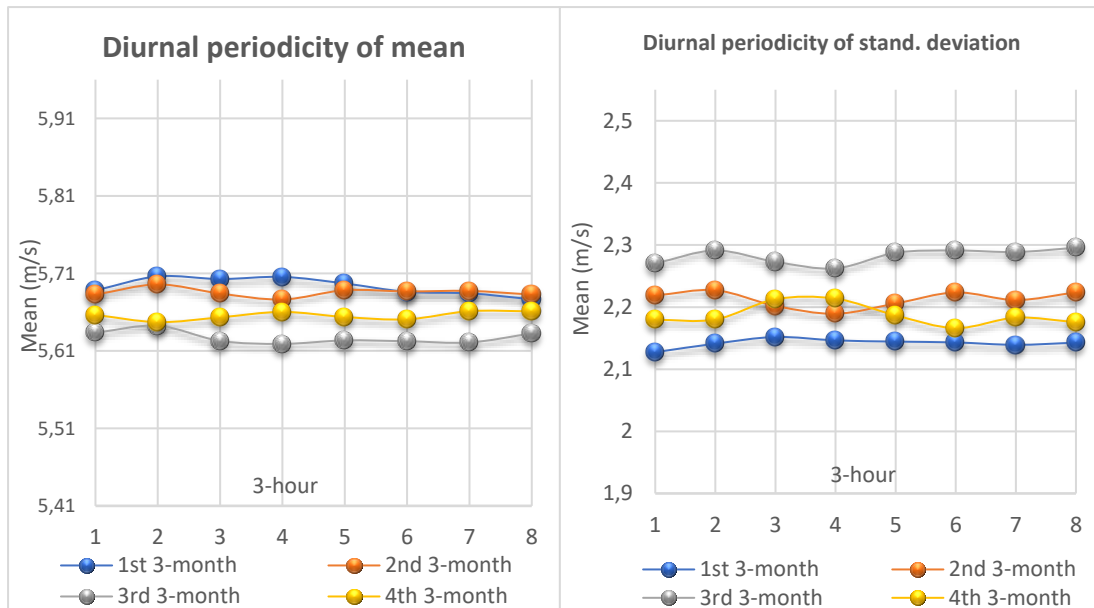
$\sigma$  : η παράμετρος της κατανομής Rayleigh

Να σημειωθεί ότι η διαδικασία που ακολουθείται έπειτα για κάθε κατανομή είναι η ίδια με αυτήν της PBF που περιγράφηκε παραπάνω, με την διαφορά ότι στις κατανομές Weibull, Lognormal, Gamma χρειάζονται μόνο οι 2 πρώτες ροπές, εφόσον έχουν δύο παραμέτρους, και αντίστοιχα στην κατανομή Rayleigh χρειάζεται μόνο η μέση τιμή εφόσον έχει μόνο μία παράμετρο.

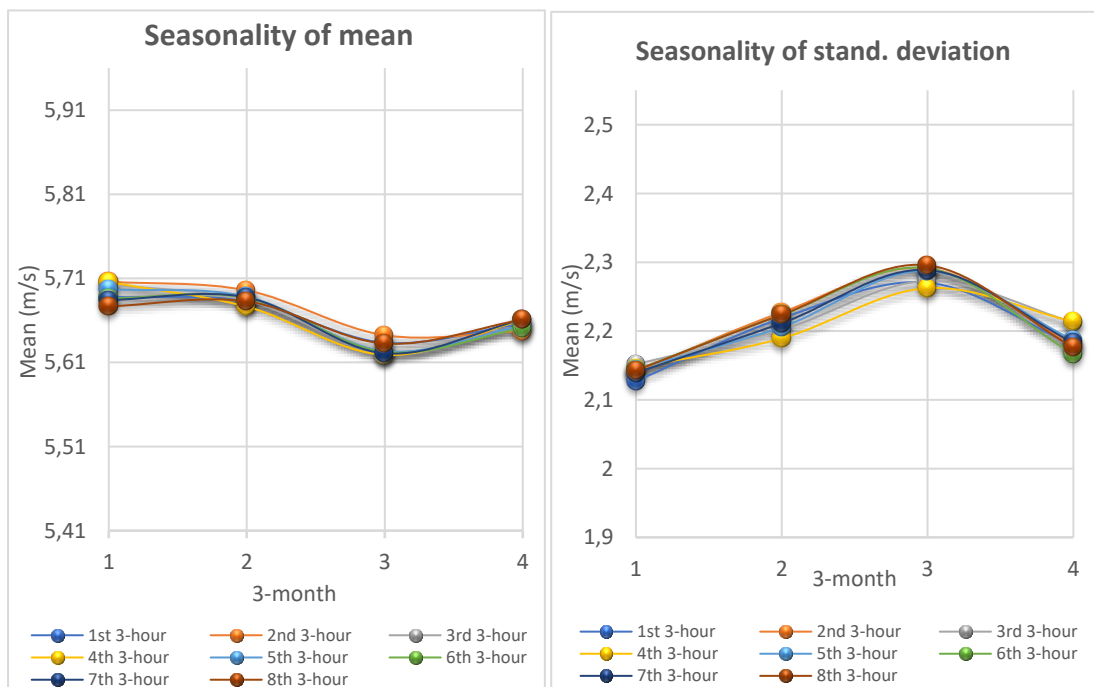
#### 5.5.4 Εφαρμογή της αντίστροφης διαδικασίας της Ομογενοποίησης

Το μοντέλο έχοντας σαν εισόδους τις στατιστικές ροπές της ομογενοποιημένης χρονοσειράς, δηλαδή τις ροπές απαλλαγμένης της περιοδικότητας, παράγει τιμές χωρίς περιοδικότητα. Είναι επιτακτική ανάγκη λοιπόν, για να 'μοντελοποιηθεί σωστά ο άνεμος, να επιστραφεί η περιοδικότητα στις συνθετικές χρονοσειρές που έφυγε με την διαδικασία της ομογενοποίησης. Για να γίνει αυτό, εφαρμόζεται η αντίστροφη διαδικασία της ομογενοποίησης. Αυτό που πρακτικά γίνεται, είναι ότι εφαρμόζουμε την  $\text{cdf} : F(x_{i,j}; p_{i,j})$  σε καθεμία από τις ημερήσιες – εποχιακές ανελίξεις (υποπεριόδους), με τις εκτιμώμενες παραμέτρους για την συνολική χρονοσειρά  $p_{i,j}$ , και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την πρότυπη Gaussian (ή οποιασδήποτε άλλης) κατανομής την συνάρτηση σε καθεμία από τις ημερήσιες – εποχιακές ανελίξεις (υποπεριόδους) με τα εκτιμώμενα, π.χ.  $i = 4 \times j = 8$ , σετ παραμέτρων  $p_{i,j}$ , δηλαδή  $y = N^{-1}(F(x_{i,j}; p_{i,j}))$ .

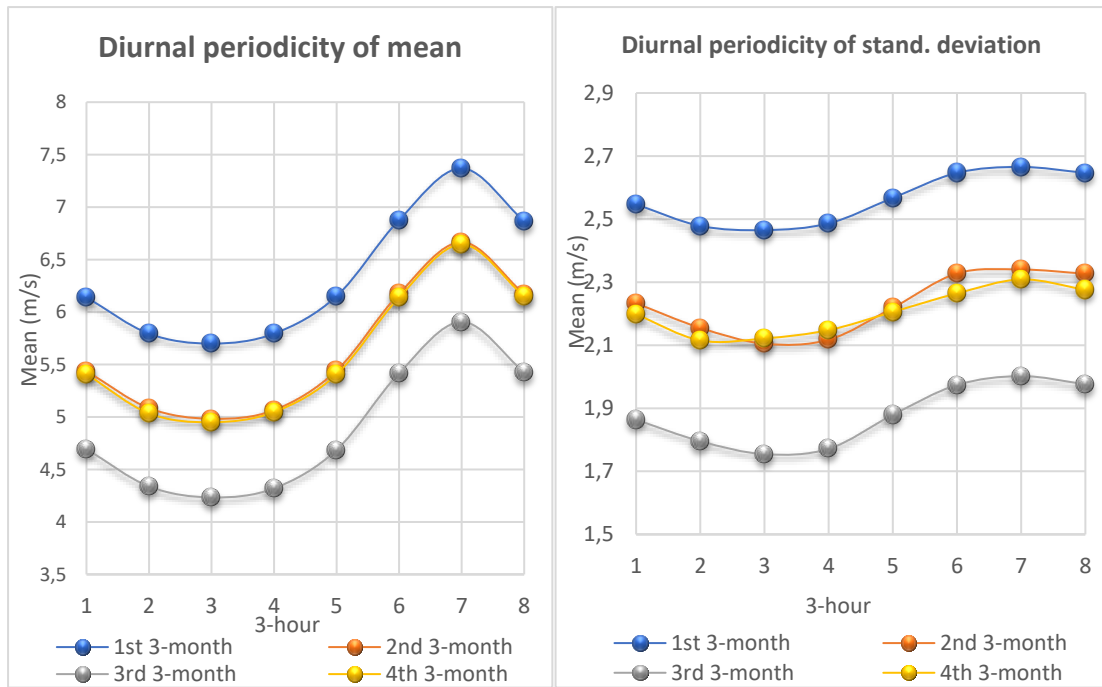
Παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα των στατιστικών ροπών για να διαπιστωθεί η διπλή περιοδικότητα στις συνθετικές χρονοσειρές.



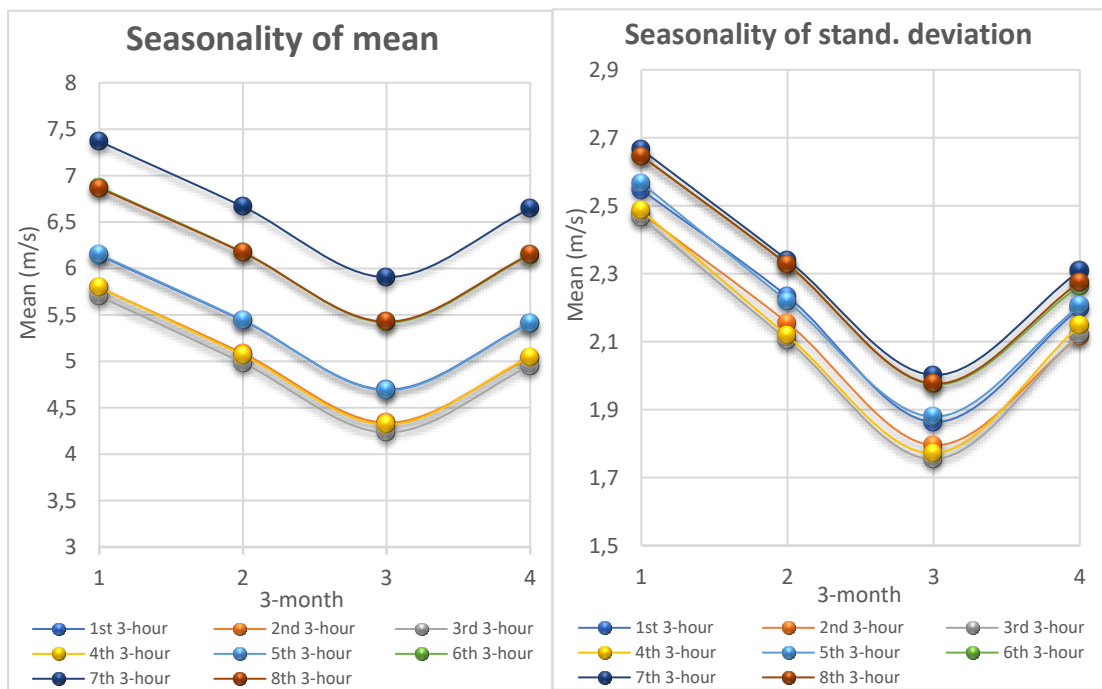
Σχήμα 5.14 (α,β): Η ημερήσια περιοδικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) στην συνθετική χρονοσειρά πριν την αντίστροφη ομογενοποίηση.



Σχήμα 5.15 (α,β): Η εποχικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) στην συνθετική χρονοσειρά πριν την αντίστροφη ομογενοποίηση.



Σχήμα 5.16 (α,β): Η εποχικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) στην συνθετική χρονοσειρά πριν την αντίστροφη ομογενοποίηση.

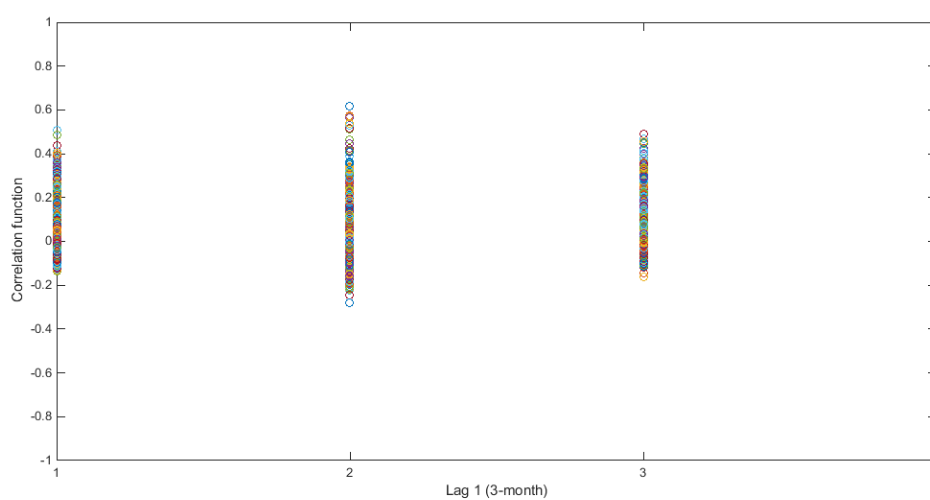


Σχήμα 5.17 (α,β): Η εποχικότητα στην μέση τιμή (αριστερά) και στην τυπική απόκλιση (δεξιά) στην συνθετική χρονοσειρά μετά την αντίστροφη ομογενοποίηση.

Φαίνεται πως η αντίστροφη ομογενοποίηση ήταν επιτυχημένη και επομένως οι συνθετικές χρονοσειρές αντιπροσωπεύουν αρκετά καλά την πραγματική χρονοσειρά.

## 5.6 Μελέτη ετεροσυσχετίσεων μεταξύ των υποπεριόδων

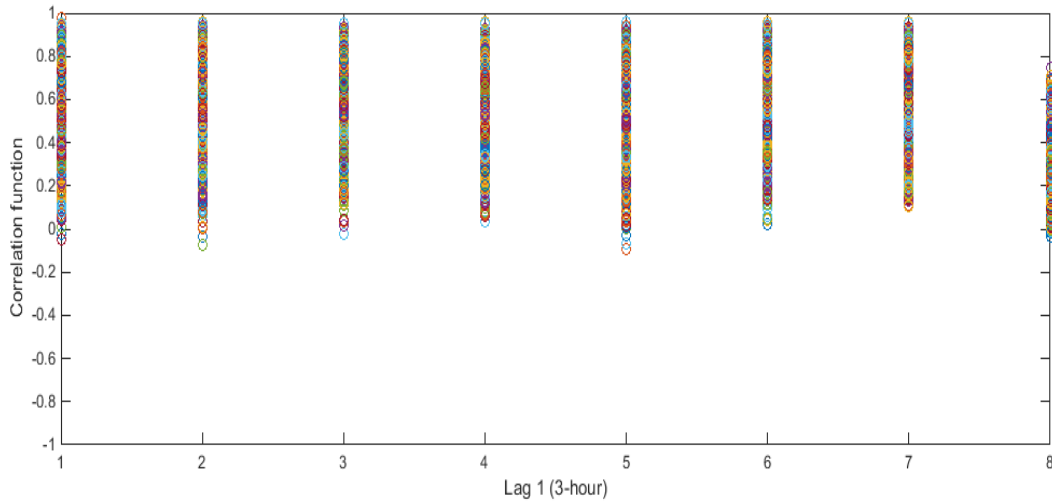
Ένα κομμάτι το οποίο έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι αυτό των ετεροσυσχετίσεων μεταξύ των υποπεριοδών. Πιο αναλυτικά, αυτό που εξετάζεται είναι η συσχέτιση για κάθε υποπερίοδο με χρονική υστέρηση ίση με 1. Με άλλα λόγια, εξετάζεται για παράδειγμα η συσχέτιση του 1<sup>ου</sup> τριώρου με αυτήν του 2<sup>ου</sup>, του 2<sup>ου</sup> με αυτήν του 3<sup>ου</sup> και ούτω καθεξής. Αντίστοιχα μελετάται η συσχέτιση του 1<sup>ου</sup> τριμήνου με αυτήν του 2<sup>ου</sup>, του 2<sup>ου</sup> με αυτήν του 3<sup>ου</sup> κτλ. Αρχικά αποδεικνύεται ότι δεν υφίσταται ισχυρή ετεροσυσχέτιση μεταξύ ίδιων τρίωρων σε διαφορετικές σεζόν (τρίμηνα), πχ το 1<sup>ο</sup> τρίωρο της 1<sup>ης</sup> σεζόν με το 1<sup>ο</sup> τρίωρο της 2<sup>ης</sup> σεζόν. Ακολουθεί το ενδεικτικό διάγραμμα 5.24 ύστερα, από ανάλυση των δεδομένων όλων των σταθμών.



Σχήμα 5.18: Ετεροσυσχετίσεις μεταξύ τριμήνων, για το ίδιο τρίωρο, για όλους τους σταθμούς και για χρονική υστέρηση 1.

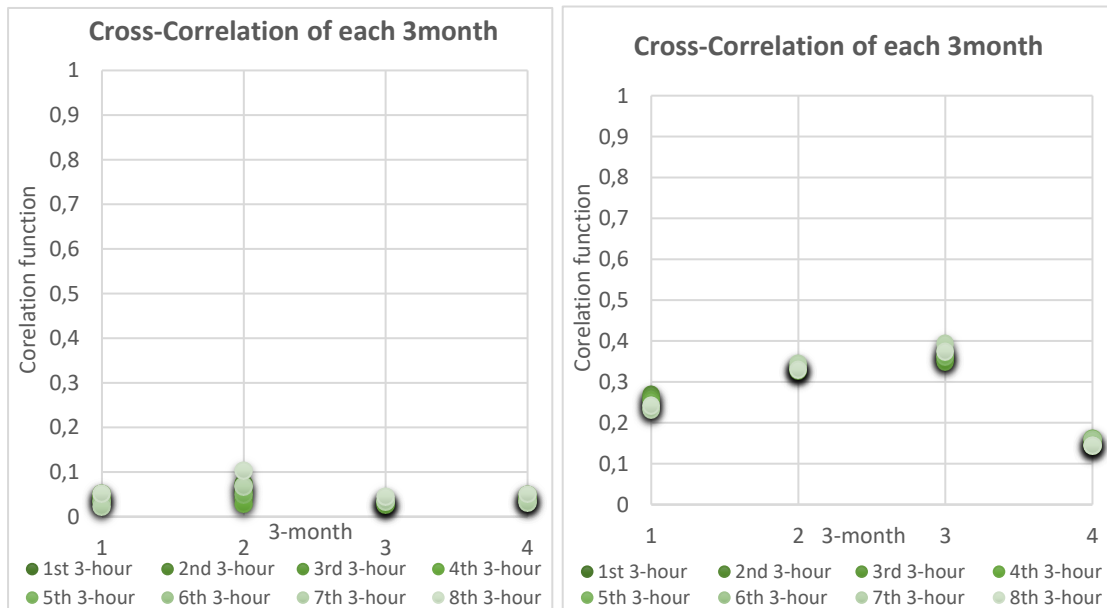
Για 1 φαίνεται η συσχέτιση της πρώτης σεζόν (τρίμηνο) του κάθε τρίωρου (από 1 ως 8) με το αντίστοιχο της 2<sup>ης</sup> σεζόν, για 2 φαίνεται η συσχέτιση της δεύτερης σεζόν του κάθε τρίωρου (από 1 ως 8) με το αντίστοιχο της 3<sup>ης</sup> και ούτω καθεξής.

Στο επόμενο βήμα πραγματοποιήθηκε η μελέτη ετεροσυσχετίσεων του κάθε τρίωρου μέσα στην ίδια σεζόν (τρίμηνο), πχ το 1<sup>ο</sup> τρίωρο του 1<sup>ου</sup> τριμήνου με το 2<sup>ο</sup> τρίωρο του 1<sup>ου</sup> τριμήνου. Παραθετονται τα επόμενα διαγράμματα που αφορούν τις συσχετίσεις μεταξύ τρίωρων για υστέρηση 1, σε εποχιακή (τρίμηνη) κλίμακα για όλους τους σταθμούς



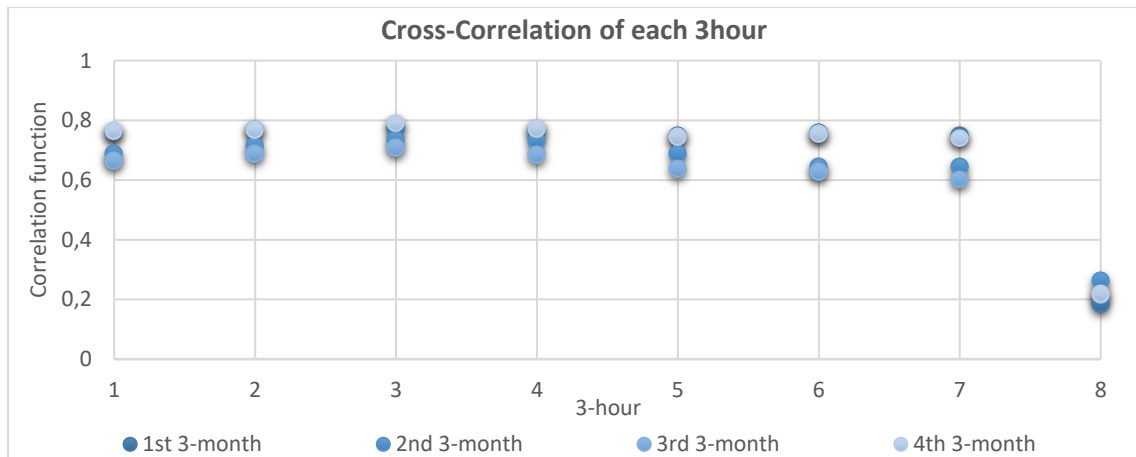
Σχήμα 5.19: Ετεροσυσχετίσεις μεταξύ τρίωρων, μέσα στην ίδια σεζόν (τρίμηνο), για όλους τους σταθμούς και για χρονική υστέρηση 1.

Για 1 φαίνεται η συσχέτιση του πρώτου τρίωρου της κάθε σεζόν (τρίμηνο από 1 ως 4) με το αντίστοιχο της 2<sup>ης</sup>, για 2 φαίνεται η συσχέτιση του δεύτερου τρίωρου της κάθε σεζόν (από 1 ως 4) με το αντίστοιχο της 3<sup>ης</sup> και ούτω καθεξής. Φαίνεται λοιπόν πως οι συσχέτιση μέσα στην μέρα είναι πιο ισχυρή από ότι μέσα στην εποχή.

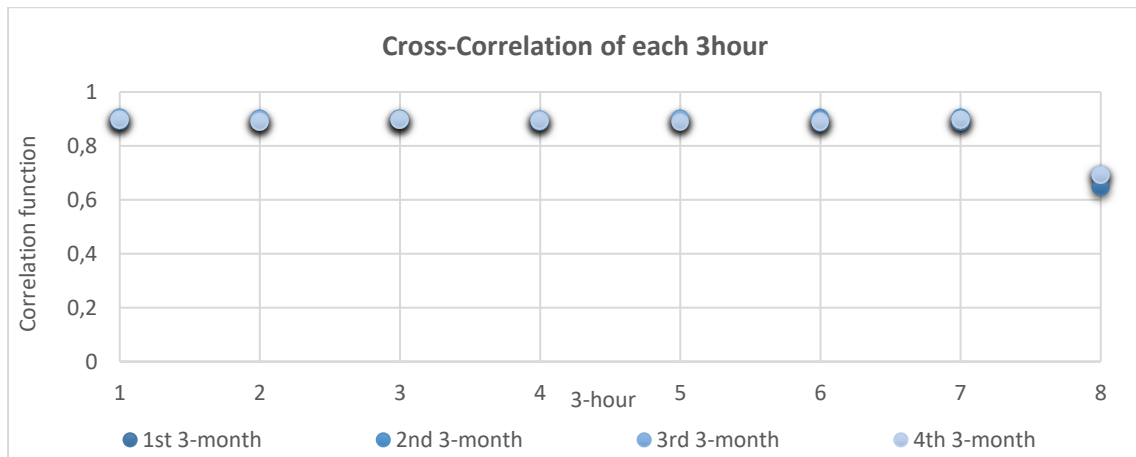


Σχήμα 5.20 (α,β): Ετεροσυσχετίσεις μεταξύ τριμήνων, για το ίδιο τρίωρο, για τον σταθμό του MIT και για χρονική υστέρηση 1, για την παρατηρημένη χρονοσειρά (αριστερά) και την συνθετική (δεξιά).

Για τον σταθμό με τον οποίο παρήχθησαν οι συνθετικές χρονοσειρές μελετήθηκαν οι ετεροσυσχετίσεις μεταξύ των υποπεριοδών όπως παραπάνω, τόσο για την παρατηρημένη χρονοσειρά όσο και για μία συνθετική περίπου ίσου μήκους, ήτοι 400.000 ώρες ή αλλιώς  $\frac{400.000}{24 \times 365} = 45,7$  έτη.



Σχήμα 5.21: Ετεροσυσχετίσεις μεταξύ τρίωρων, μέσα στην ίδια σεζόν (τρίμηνο), για τον σταθμό του MIT και για χρονική υστέρηση 1, για την παρατηρημένη χρονοσειρά.

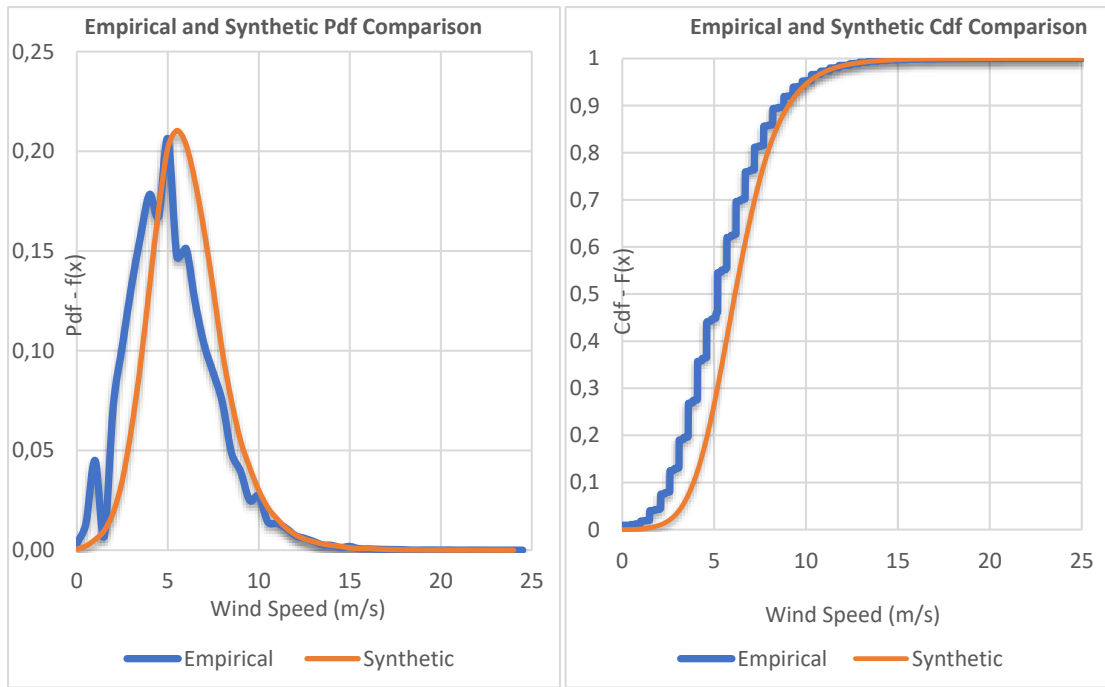


Σχήμα 5.22: Ετεροσυσχετίσεις μεταξύ τρίωρων, μέσα στην ίδια σεζόν (τρίμηνο), για τον σταθμό του MIT και για χρονική υστέρηση 1, για την συνθετική χρονοσειρά.

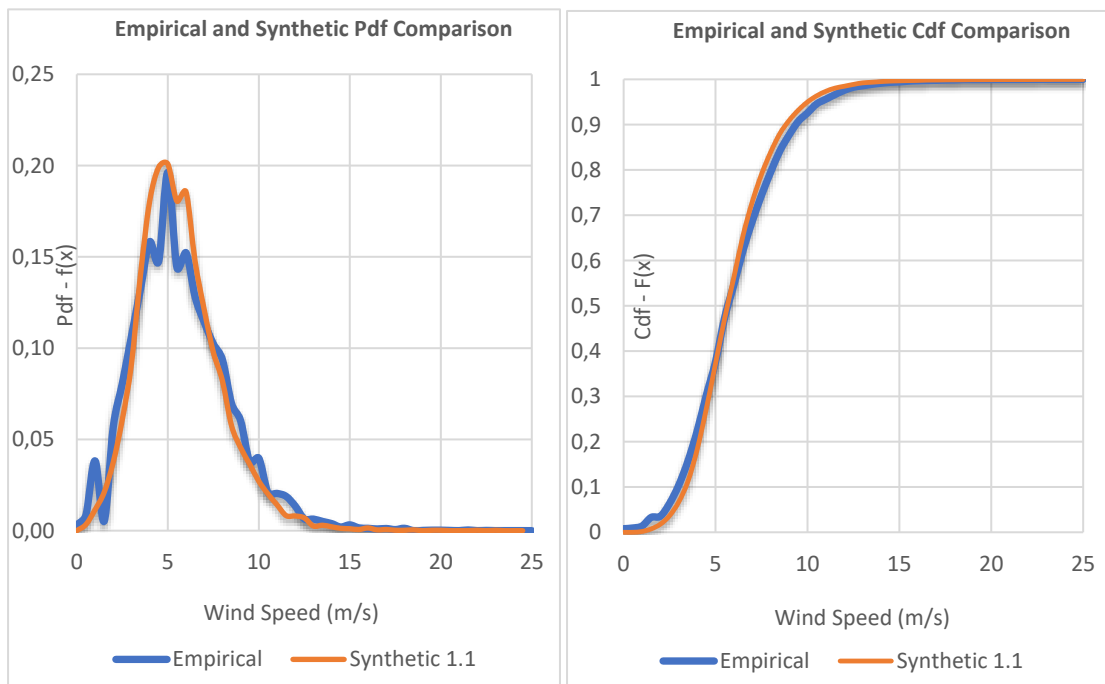
Παρατηρείται λοιπόν, ότι μέσω του μοντέλου που χρησιμοποιούμε αλλά και μέσω της διαδικασίας της ομογενοποίησης, προσεγγιστικά, οι ετεροσυσχετίσεις μεταξύ των υποπεριόδων διατηρούνται σε σημαντικό βαθμό.

### 5.7 Σύγκριση της εμπειρικής Cdf και Pdf με τις συνθετικές Χρονοσειρές

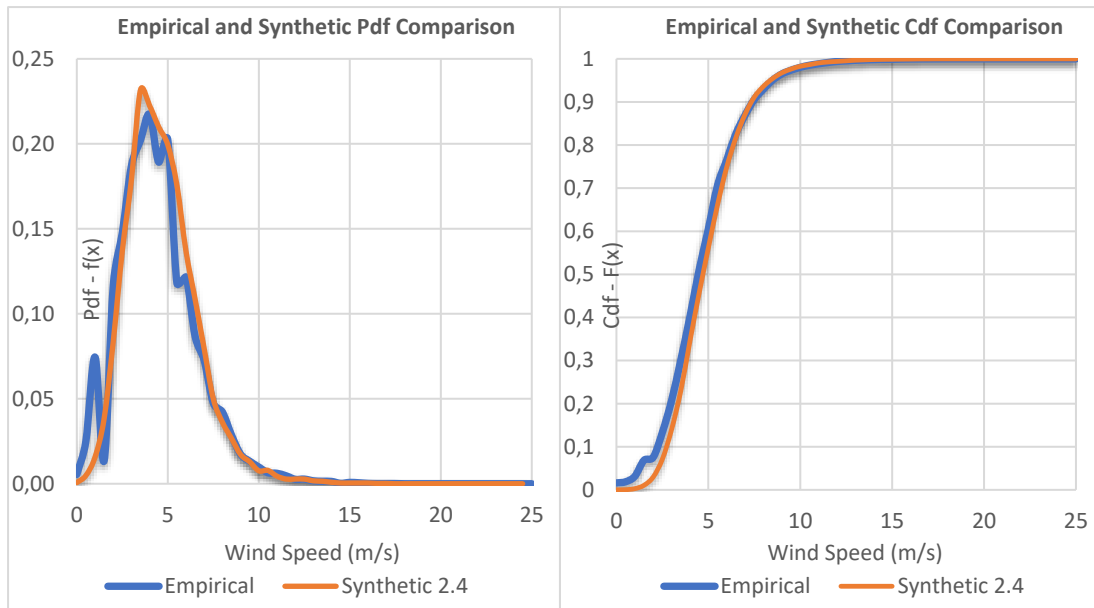
Μετά την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών σκόπιμο είναι γίνει η σύγκριση τους με την εμπειρική κατανομή, τόσο συνολικά, όσο και σε επίπεδο υποπεριόδου. Η συνθετική χρονοσειρά που παρουσιάζεται έχει μήκος ίδιο περίπου με αυτό του σταθμού του MIT και είναι 400.000 ώρες. Παραθέτονται επίσης κάποια διαγράμματα για κάθε υποπερίοδο, έτσι ώστε να δειχθεί ότι η συνθετική χρονοσειρά προσομοιάζει την πραγματική και σε επίπεδο υποπεριόδου.



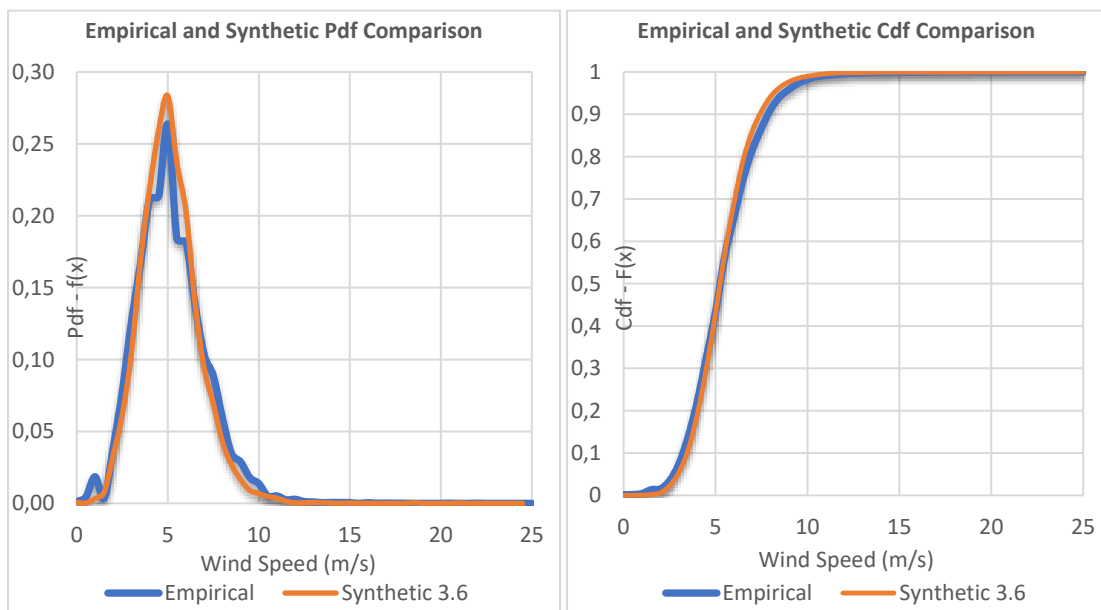
Σχήμα 5.23 (α,β) : Διαγράμματα σύγκρισης της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της συνθετικής χρονοσειράς.



Σχήμα 5.24 (α,β): Διαγράμματα σύγκρισης της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της συνθετικής χρονοσειράς για το 1ο τρίμηνο και 1ο τρίωρο.

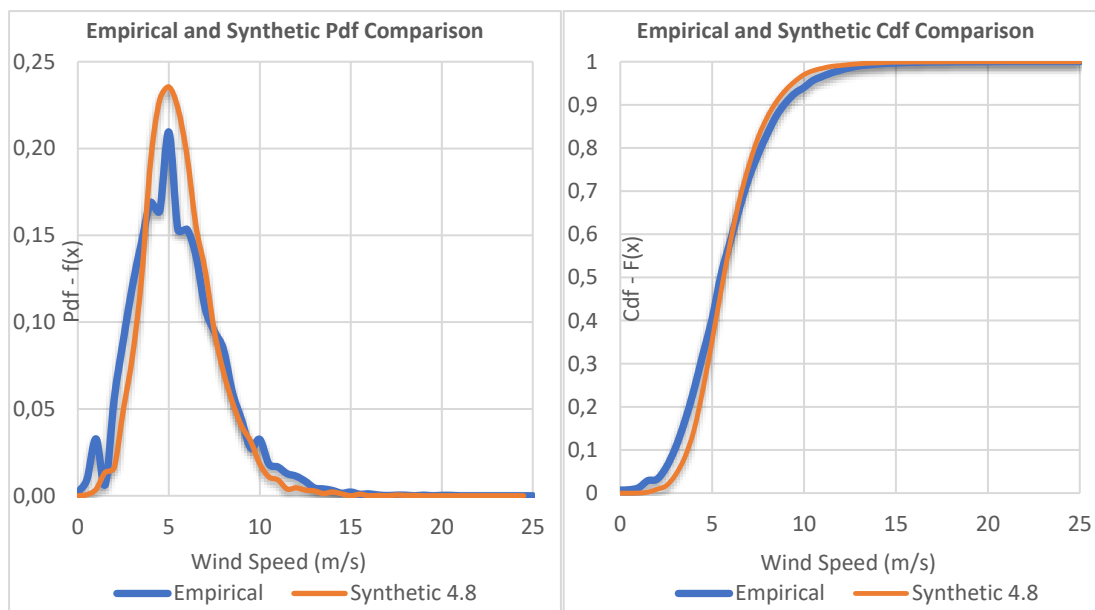


Σχήμα 5.25 (α,β): Διαγράμματα σύγκρισης της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της συνθετικής χρονοσειράς για το 2ο τρίμηνο και 4ο τρίωρο.



Σχήμα 5.26 (α,β): Διαγράμματα σύγκρισης της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της συνθετικής χρονοσειράς για το 3ο τρίμηνο και 6ο τρίωρο.





Σχήμα 5.27 (α,β): Διαγράμματα σύγκρισης της εμπειρικής Pdf (αριστερά) και Cdf (δεξιά) με τις αντίστοιχες Pdf και Cdf της συνθετικής χρονοσειράς για το 4ο τρίμηνο και 8ο τρίωρο.

Για μια καλύτερη εποπτεία παρουσιάζονται σε πίνακες και οι 4 πρώτες στατιστικές ροπές για κάθε υποπερίοδο της παρατηρημένης και της συνθετικής χρονοσειράς.

Μέση Τιμή Υποπεριόδων για την παρατηρημένη χρονοσειρά του σταθμού του MIT								
Τρίωρο Τρίμηνο	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
1°	5,95	5,78	5,67	5,66	5,94	6,37	6,66	6,30
2°	5,19	4,75	4,54	4,59	5,24	6,06	6,59	6,18
3°	4,57	4,24	4,06	4,02	4,58	5,37	5,94	5,48
4°	5,45	5,30	5,20	5,18	5,50	6,00	6,22	5,72

Μέση Τιμή Υποπεριόδων για την συνθετική χρονοσειρά 400,000 ωρών								
Τρίωρο Τρίμηνο	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
1°	5,93	5,54	5,45	5,54	5,88	6,64	7,17	6,68
2°	5,27	4,89	4,83	4,94	5,31	6,02	6,51	6,00
3°	4,67	4,29	4,21	4,29	4,64	5,37	5,86	5,39
4°	5,14	4,78	4,68	4,76	5,12	5,85	6,35	5,86

**Τυπική Απόκλιση Υποπεριόδων για την παρατηρημένη χρονοσειρά του σταθμού του MIT**

Τρίωρο Τρίμηνο \	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
1°	2,70	2,62	2,62	2,63	2,73	2,87	2,85	2,75
2°	2,28	2,19	2,17	2,20	2,39	2,31	2,26	2,32
3°	1,90	1,83	1,74	1,76	1,98	1,96	1,90	1,92
4°	2,50	2,48	2,52	2,52	2,59	2,74	2,65	2,52

**Τυπική Απόκλιση Υποπεριόδων για την συνθετική χρονοσειρά 400,000 ωρών**

Τρίωρο Τρίμηνο \	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
1°	2,29	2,15	2,18	2,25	2,30	2,38	2,44	2,42
2°	2,01	1,92	1,91	1,93	2,01	2,08	2,12	2,06
3°	1,64	1,56	1,58	1,55	1,58	1,66	1,65	1,70
4°	1,94	1,87	1,80	1,78	1,87	1,95	1,96	1,94

**Συντελεστής Ασυμμετρίας Υποπεριόδων για την παρατηρημένη χρονοσειρά του σταθμού του MIT**

Τρίωρο Τρίμηνο \	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
1°	0,78	0,67	0,71	0,72	0,64	0,58	0,60	0,75
2°	0,56	0,68	0,88	0,84	0,74	0,73	0,65	0,51
3°	0,48	0,43	0,56	0,59	0,70	1,20	0,95	0,62
4°	0,87	0,94	0,97	1,00	0,82	0,66	0,71	0,79

**Συντελεστής Ασυμμετρίας Υποπεριόδων για την συνθετική χρονοσειρά 400,000 ωρών**

Τρίωρο Τρίμηνο \	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
1°	1,15	0,93	0,94	1,09	1,15	1,11	1,18	1,29
2°	1,12	0,95	0,91	0,99	0,97	1,19	1,30	1,18
3°	1,03	0,88	1,14	0,87	0,86	1,42	0,78	1,05
4°	1,15	1,12	1,01	0,90	1,00	1,02	0,97	0,91

**Συντελεστής Κύρτωσης Υποπεριόδων για την παρατηρημένη χρονοσειρά του σταθμού του MIT**

Τρίωρο Τρίμηνο \	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
1°	4,41	4,06	4,10	4,07	3,82	3,52	3,59	4,16
2°	4,15	4,41	5,38	4,71	4,02	4,15	4,31	3,76
3°	4,27	4,06	4,72	4,64	5,05	11,73	8,37	5,54
4°	4,88	5,23	5,47	5,76	5,12	3,84	3,99	4,35

Συντελεστής Κύρτωσης Υποπεριόδων για την συνθετική χρονοσειρά 400,000 ωρών								
Τρίωρο Τρίμηνο	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°
1°	7,56	5,34	4,94	5,70	6,27	6,37	6,54	7,98
2°	6,40	4,95	4,69	5,25	5,57	7,90	8,45	7,23
3°	6,37	4,99	6,71	5,52	5,48	14,43	5,37	6,74
4°	6,08	6,14	5,48	5,03	5,58	6,02	6,00	5,07

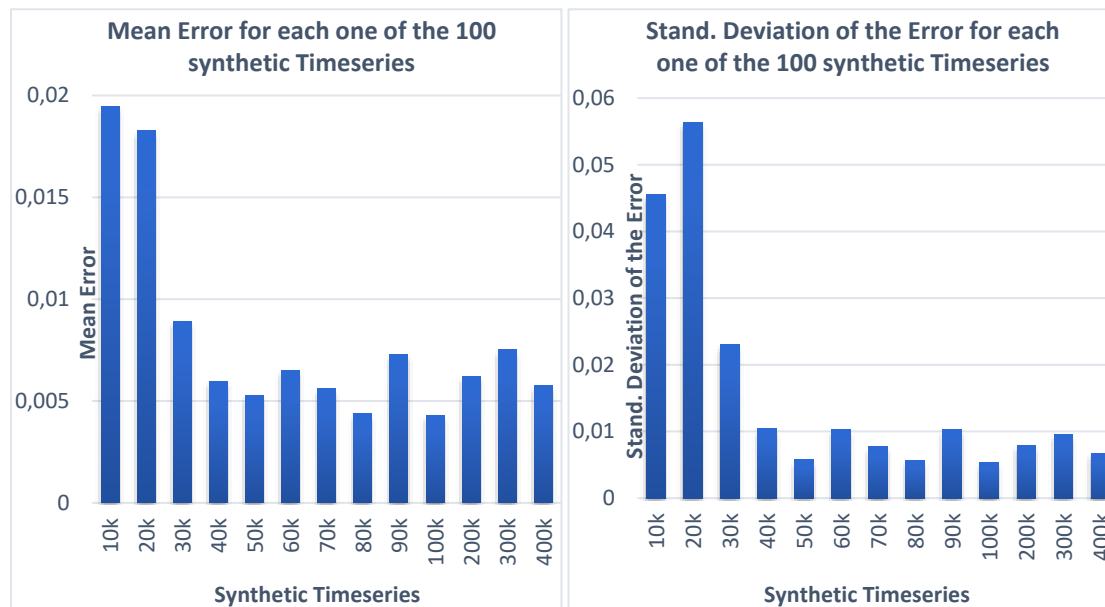
Όπως παρατηρείται το μοντέλο διατηρεί τις 4 πρώτες ροπές σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό, αν σκεφτεί κανείς ότι χρησιμοποιήθηκαν και τα μοντέλα διπλής κυκλοστασιμότητας που αναπόφευκτα μειώνουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αλλά κάνουν το μοντέλο εξαιρετικά πιο εύχρηστο με την μείωση των παραμέτρων που πρέπει να διαχειριστούν.

## 5.8 Σχέση με τα χρόνια

Σε προηγούμενο κεφάλαιο (βλέπε [4.11](#)) αναφέρθηκε, πως υπάρχει η μάλλον συσχέτιση της κατανομής του ανέμου με τα χρόνια παρατηρήσεων ή αλλιώς τον αριθμό των δεδομένων. Είναι λογικό εξάλλου, εφόσον έχοντας λίγα χρόνια μετρήσεων, δεν έχουν προλάβει να παρατηρηθούν οι ακραίες τιμές που προσομοιάζονται από την ουρά της κατανομής. Για να βρεθεί επομένως η κατανομή με την κατάλληλη ουρά πρέπει να υπάρχουν αρκετά χρόνια μετρήσεων. Για να γίνει πιο εύκολα κατανοητό ας θεωρήσουμε μια συνεχή ΗΚ ανέλιξη, όπου η διακύμανση της εκτίμησης της μέσης τιμής είναι  $\gamma(D)/n^{2-2H}$  (Koutsoyiannis 2003) όπου  $n$  είναι το μέγεθος του δείγματος. Κατά συνέπεια, για την εκτίμηση της μέσης τιμής  $\mu$  του πληθυσμού με ένα τυπικό σφάλμα  $\pm \varepsilon$  θα χρειαζόμασταν μία χρονοσειρά μήκους τουλάχιστον  $(\sigma/\varepsilon)^{1/(1-H)}$ , όπου  $\sigma = \sqrt{\gamma(D)}$  είναι η τυπική απόκλιση στην κλίμακα  $D$ . Αν για παράδειγμα θεωρήσουμε ότι η ΗΚ ανέλιξή μας έχει συντελεστή Hurst  $H=0.8$ , για να εκτιμήσουμε της μέσης τιμή της ανέλιξης με ένα τυπικό σφάλμα έστω  $\varepsilon \approx \pm 10\% \sigma$  χρειάζεται μια χρονοσειρά μήκους  $n = 10^5$ . Τέτοια μήκη είναι δύσκολα διαθέσιμα στις παρατηρήσεις των γεωφυσικών διεργασιών, οι οποίες δεν χαρακτηρίζονται μόνο από τη συμπεριφορά ΗΚ, αλλά περιλαμβάνουν και τις (υπό)-ημερήσιες και εποχιακές περιοδικότητες που περιπλέκουν περαιτέρω την εκτίμηση. Ο σταθμός του MIT, ο οποίος χρησιμοποιείται για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών, έχει μήκος, όπως έχει ήδη αναφερθεί σχεδόν  $n = 0.5 \times 10^6$ . Είναι γνωστό ότι με την παραγωγή χρονοσειρών πολύ μεγάλου μήκους, αρχίζουν να επηρεάζουν, και επομένως χρειάζεται να διατηρηθούν και ροπές υψηλότερης τάξης της  $4^{\text{η}}$ , μέχρι την οποία διατηρείται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης.

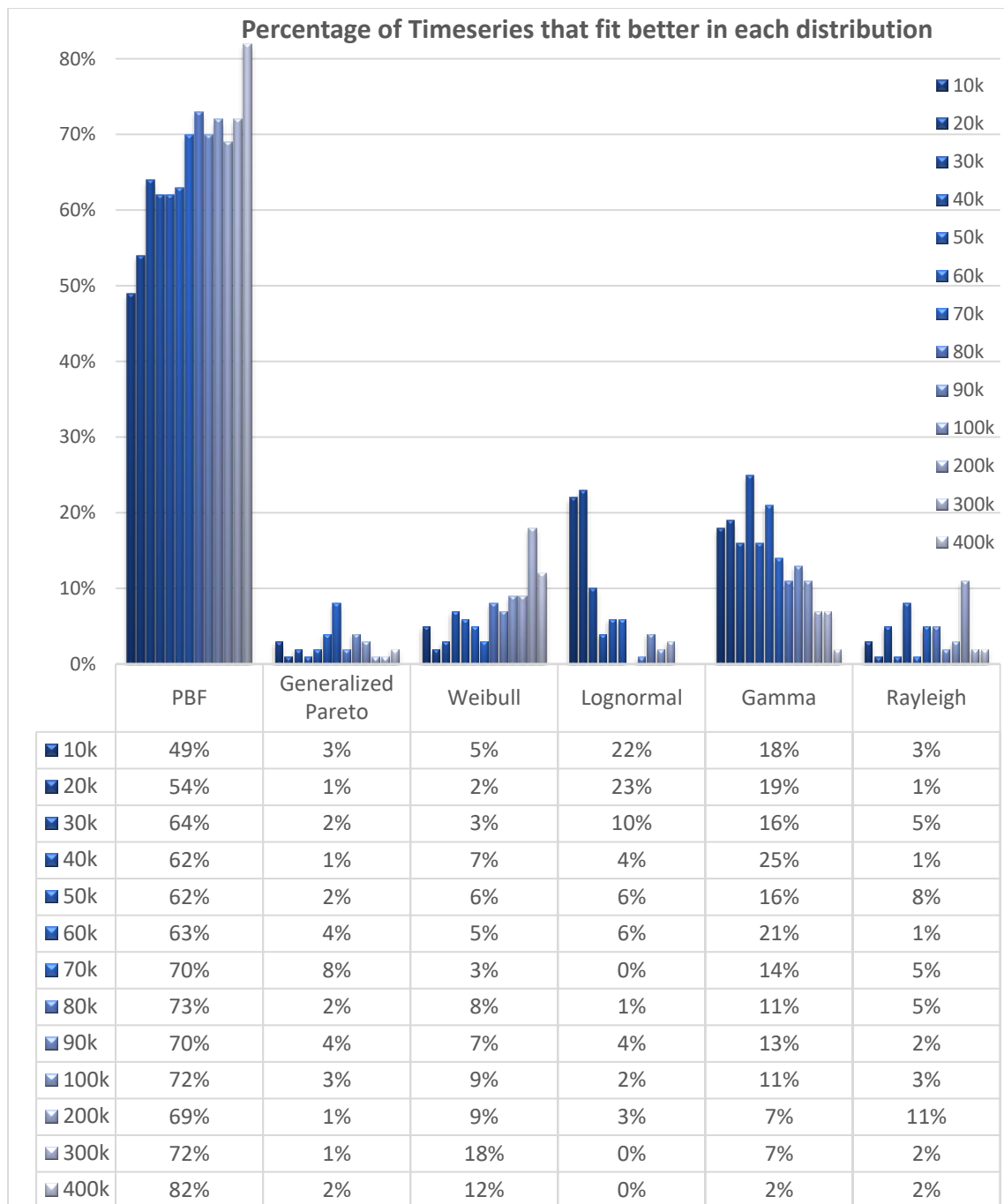
Για να εξεταστεί αυτή η συσχέτιση των χρόνων με την κατανομή του ανέμου έγινε μία ανάλυση Monte Carlo όπου παρήχθησαν χρονοσειρές από 10.000 ώρες (περίπου ένας χρόνος μετρήσεων) έως 1.000.000 ώρες. Για κάθε μήκος που επιλέχθηκε να

εξεταστεί παράγονται 100 χρονοσειρές του ίδιου μήκους έτσι ώστε να μην βασιστούν τα αποτελέσματα σε μία «τυχαία» χρονοσειρά. Τα αποτελέσματα για την κατανομή που ταιριάζει καλύτερα στην κάθε χρονοσειρά που δημιουργήθηκε φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται οι μέσες αποκλίσεις στην προσαρμογή της κατανομής PBF ανάλογα με τα χρόνια.



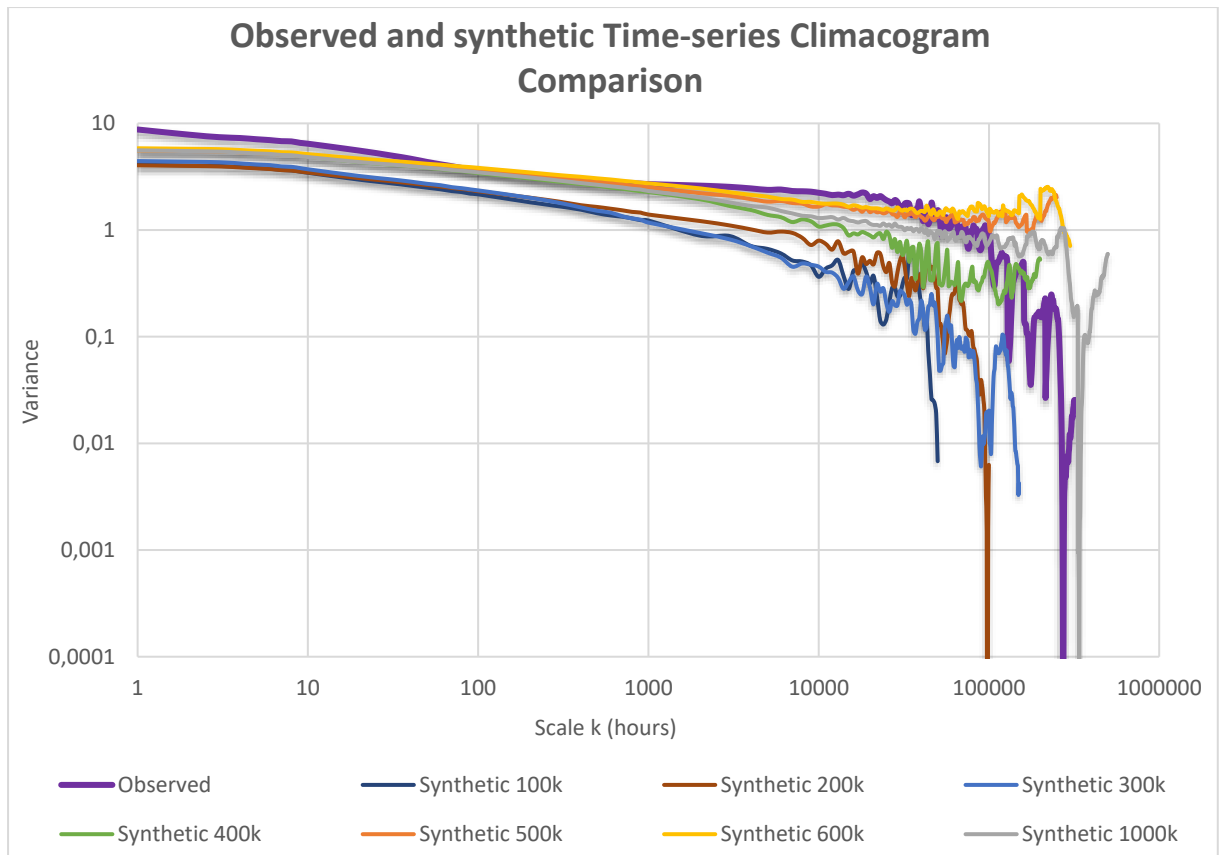
Σχήμα 5.28 (α,β): Η μέση τιμή (αριστερά) και η τυπική απόκλιση (δεξιά) της απόκλισης της κατανομής PBF που παράχθηκε από την αντίστοιχη θεωρητική PBF με τις ίδιες παραμέτρους.

Παρατηρείται αυτό ακριβώς που ειπώθηκε και παραπάνω, ότι δηλαδή για τις μικρές κλίμακες, κυρίως από 10.000 ως 40.000 ώρες, από 100 συνθετικές χρονοσειρές, φαίνεται ότι παρόλο που οι χρονοσειρές παράγονται από την κατανομή PBF, οι μέσες αποκλίσεις από την αντίστοιχη θεωρητική, είναι μεγαλύτερες στις μικρές κλίμακες, και σταθεροποιούνται από 50.000 ώρες και πάνω όπως επίσης και η διασπορά της απόκλισης, όπου φαίνεται να είναι αρκετά μικρή στις μεγάλες κλίμακες. Αυτό διαπιστώνεται καλύτερα και από το παρακάτω διάγραμμα, όπου όντως για μικρές κλίμακες παρόλο που παράγονται οι χρονοσειρές με την κατανομή PBF, τελικά προσαρμόζουν καλύτερα σε άλλη κατανομή.



*Σχήμα 5.29: Ποσοστό συνθετικών χρονοσειρών που ταιριάζει καλύτερα σε κάθε κατανομή*

Τέλος, προβάλλονται τα κλιμακογράμματα από 100.000 ως 1.000.000 ώρες, όπου και εδώ φαίνεται ότι για λίγα χρόνια μετρήσεων, το κλιμακόγραμμα της συνθετικής χρονοσειράς δεν ταιριάζει με το αντίστοιχο της παρατηρημένης, παρόλο που μέσω αυτής παρήχθησαν οι συνθετικές χρονοσειρές. Για τον σταθμό του MIT όπως φαίνεται ως «λίγα» χρόνια θεωρούνται έως τις 300.000 ώρες, καθώς μετά τις 400.000 ώρες φαίνεται να υπάρχει μία σταθεροποίηση των κλιμακογραμμάτων. Τα κλιμακογράμματα που παρουσιάζονται έχουν υπολογιστεί ως την μέγιστη κλίμακα, ήτοι το 50% των τιμών.

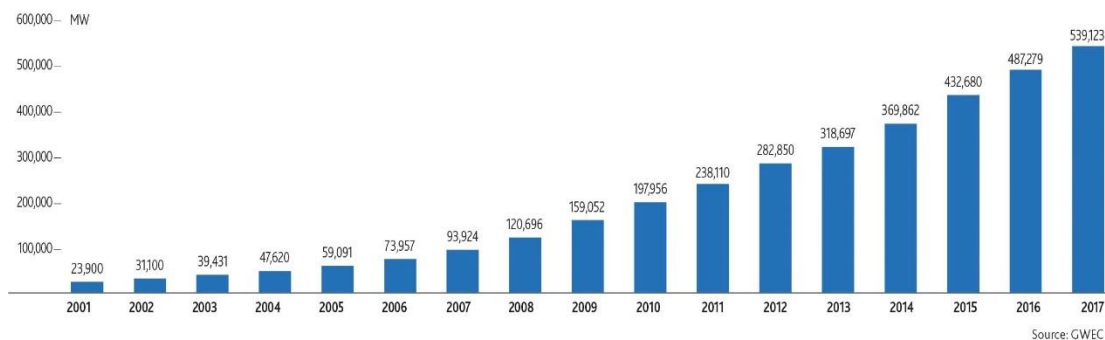


Σχήμα 5.30: Κλιμακογράμματα των συνθετικών χρονοσειρών σε σχέση με αυτό της παρατηρημένης χρονοσειράς στον σταθμό του MIT για την μέγιστη κλίμακα.

## 6 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

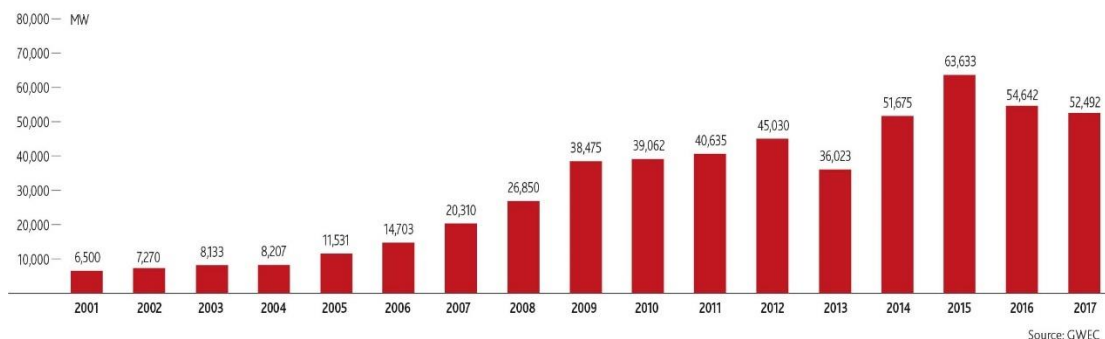
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει πλέον η κατασκευή αιολικών πάρκων, καθώς η ενεργειακή κοινότητα αρχίζει να στρέφεται δυναμικά προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και η αιολική δεν αποτελεί εξαίρεση. Αν αναλογιστεί κανείς ότι το 2017 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ήταν 2.195 GW, ενώ από ανεμογεννήτριες ήταν 539,123 GW, δηλαδή το  $\frac{539,123 \text{ GW}}{2.195 \text{ GW}} = 24,56\%$ , φαίνεται ότι παίζουν σημαντικό ρόλο σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα διαγράμματα ετήσιας εγκατάστασης αιολικής ισχύς παγκοσμίως φαίνονται παρακάτω.

GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017



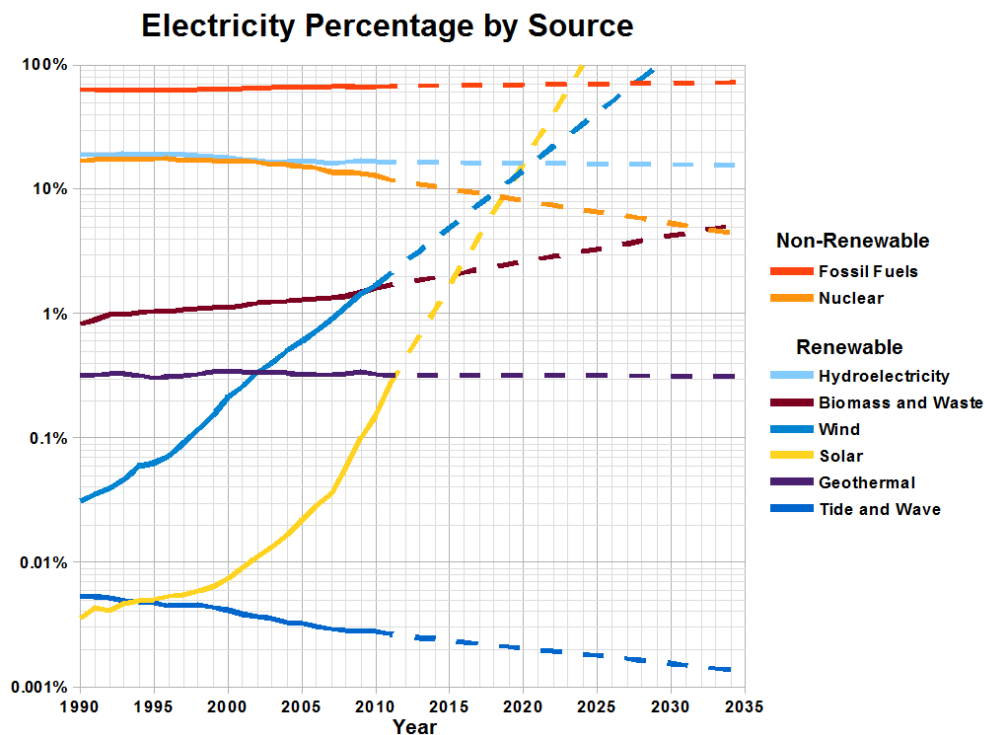
Σχήμα 6.1: Παγκόσμια αθροιστική εγκατεστημένη αιολική ισχύς 2001-2017

GLOBAL ANNUAL INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017



Σχήμα 6.2: Παγκόσμια ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς 2001-2017

Η τάση για στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και ιδιαίτερα προς την αιολική φαίνεται πως είναι ανοδική, και σύμφωνα με προβλέψεις θα είναι ακόμη μεγαλύτερη, παίζοντας κυρίαρχο ρόλο τα επόμενα χρόνια.



Σχήμα 6.3: Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως ανά πηγή (συνεχής γραμμή) και με πρόβλεψη (διακεκομμένη γραμμή).

Τελικό στάδιο της παρούσας μελέτης, είναι να παραχθούν χρονοσειρές ίσου μήκους για κάθε μία από τις εξεταζόμενες κατανομές και να εφαρμοστούν σε μία ανεμογεννήτρια. Πιο συγκεκριμένα, η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Enercon και είναι το μοντέλο E-82. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιείται μέχρι και ταχύτητα ανέμου ίση με 34 m/s , σε αντίθεση με τις κλασσικές ανεμογεννήτριες που σταματάνε την λειτουργία τους όταν ο άνεμος φτάσει την τιμή των 25 m/s .



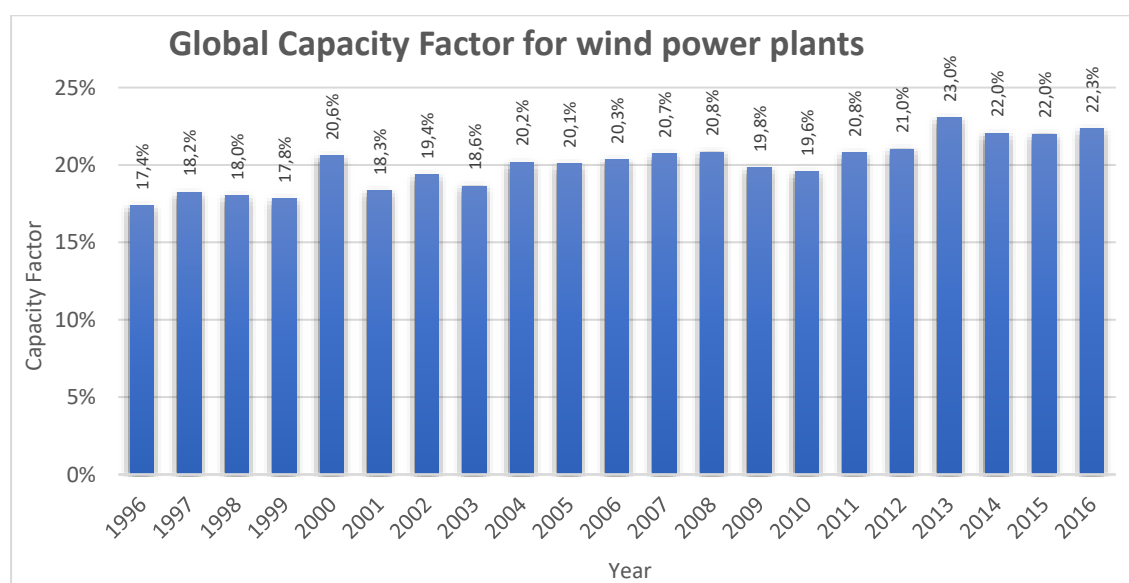
## 6.1 Θεωρητικό υπόβαθρο για την αιολική ενέργεια

### 6.1.1 Συντελεστής δυναμικότητας (Capacity Factor)

Ένα εξίσου σημαντικό κομμάτι που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψιν, για την απόφαση αν θα γίνει ή όχι η επένδυση είναι ο συντελεστής δυναμικότητας (capacity factor). Ο συντελεστής δυναμικότητας είναι ο λόγος των μονάδων πραγματικής ηλεκτρικής ενέργειας για μια δεδομένη χρονική περίοδο, προς τη μέγιστη δυνατή ισχύ ηλεκτρικής ενέργειας κατά την εν λόγω περίοδο. Ο συντελεστής δυναμικότητας ορίζεται για κάθε εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση διαφόρων τύπων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και δίνεται από τον τύπο :

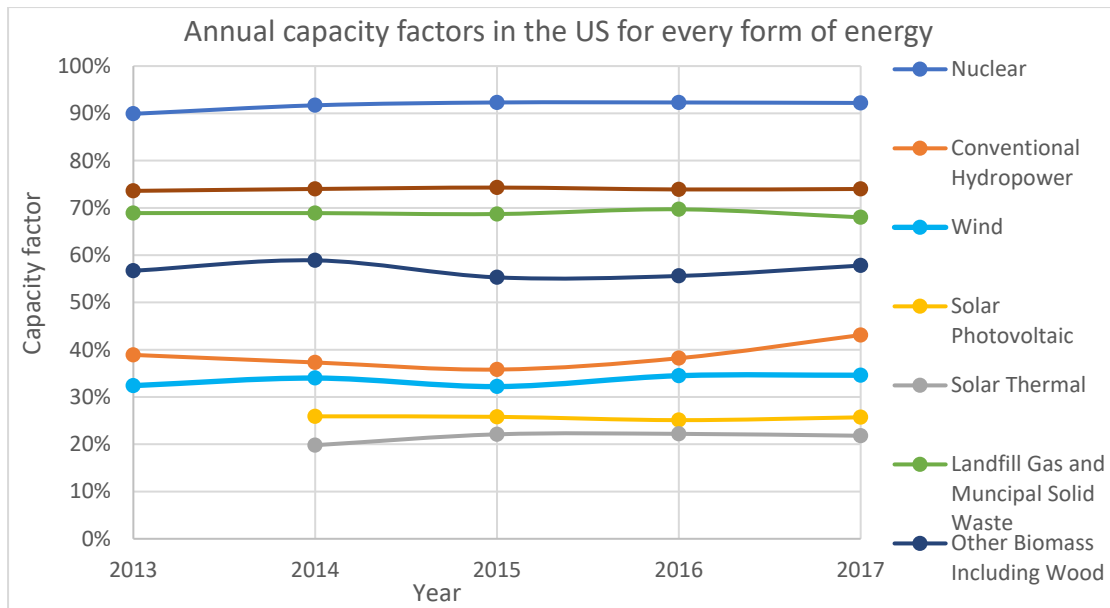
$$CF = \frac{\text{Actual Energy Production}}{\text{Total installed capacity} \times \text{hours of the study period}} \quad (6.1)$$

Συλλέγοντας δεδομένα για την παγκόσμια ετήσια παραγόμενη και εγκατεστημένη αιολική ενέργεια από την αμερικανική ΕΙΑ (US Energy Information Administration) (<https://www.eia.gov/beta/international/data/browser/>), και μετά από ίδια επεξεργασία, οι ετήσιοι συντελεστές δυναμικότητας σε παγκόσμια κλίμακα, κυμαίνονται κοντά στο 20%, όπως φαίνεται και από το παρακάτω γράφημα.

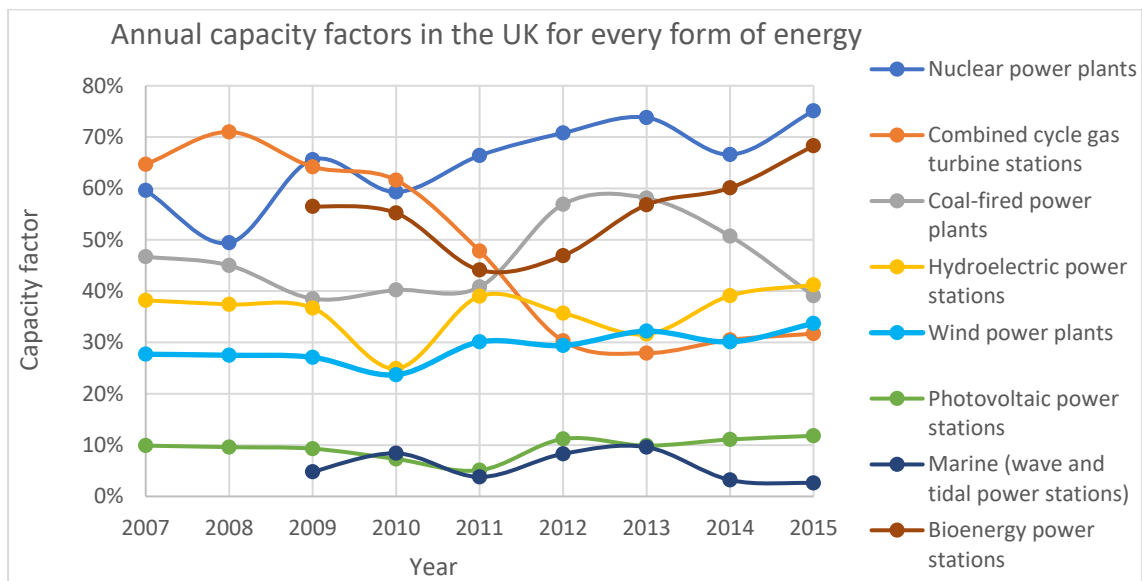


Σχήμα 6.4: Ετήσιοι συντελεστές δυναμικότητας για την αιολική ενέργεια σε παγκόσμια κλίμακα, για την περίοδο 1996-2016

Επίσης με στοιχεία από την αμερικανική ΕΙΑ (US Energy Information Administration), οι ετήσιοι συντελεστές δυναμικότητας για κάθε μορφή ενέργειας για την περίοδο 2013-2017 είναι :



Σχήμα 6.5: Ετήσιοι συντελεστές δυναμικότητας για κάθε μορφή ενέργειας στις Η.Π.Α για την περίοδο 2013-2017



Σχήμα 6.6: Ετήσιοι συντελεστές δυναμικότητας για κάθε μορφή ενέργειας στο Ηνωμένο Βασίλειο για την περίοδο 2007-2015

Φαίνεται λοιπόν, πως για την αιολική ενέργεια, οι συντελεστές δυναμικότητας κυμαίνονται κοντά στο 35% στις Η.Π.Α και κοντά στο 30% στο Ηνωμένο Βασίλειο, τιμές σαφώς υψηλότερες σε σχέση με τον αντίστοιχο δείκτη σε παγκόσμιο επίπεδο.

### 6.1.2 Το λογαριθμικό προφίλ του ανέμου

Το λογαριθμικό προφίλ του ανέμου είναι μια ημι-εμπειρική σχέση που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κατακόρυφη κατανομή της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου μέσα στο ατμοσφαιρικό επιφανειακό

στρώμα. Στο έδαφος, ο άνεμος επηρεάζεται έντονα από τα εμπόδια και την τραχύτητα της επιφάνειας. Αρκετά πάνω από το έδαφος, στα αδιατάρακτα στρώματα του γεωστροφικού ανέμου (σε περίπου 5 χλμ. πάνω από το έδαφος) ο άνεμος δεν επηρεάζεται πλέον από την επιφάνεια. Μεταξύ αυτών των δύο άκρων, η ταχύτητα του ανέμου αλλάζει με το ύψος σύμφωνα με την σχέση :

$$V(z) = V(z_1) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (6.2)$$

όπου:

$V(z)$  (m/sec): Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος  $z$

$V(z_1)$  (m/sec): Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς  $z_1$

$z_0$  (m): μήκος τραχύτητας περιοχής

όπου το  $z_0$  λαμβάνει τιμές ανάλογα με το έδαφος και την περιοχή στην οποία έγινε η περιοχή. Αναφορικά οι τιμές είναι :

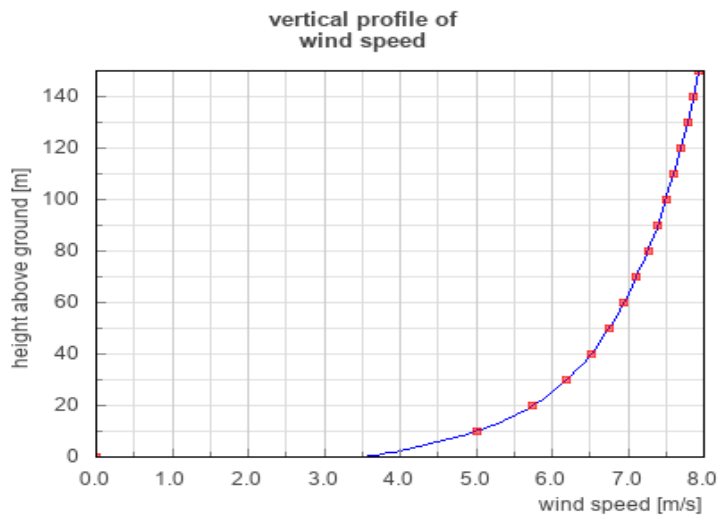
Κατηγορία τραχύτητας	Μήκος τραχύτητας $z_0$	Τύποι κάλυψης γης
0	0,0002 m	Επιφάνειες νερού: θάλασσες και λίμνες
0,5	0,0024 m	Ανοιχτό έδαφος με λεία επιφάνεια, π.χ. σκυρόδεμα, αεροδρόμια, χλοοτάπητα κλπ.
1	0,03 m	Ανοιχτή γεωργική γη χωρίς περιφράξεις και φράκτες, ίσως μερικά χωριστά κτίρια και πολύ ήπιους λόφους
1,5	0,055 m	Καλλιεργήσιμη γη με λίγα κτίρια και φράκτες ύψους το πολύ 8 m που χωρίζονται μεταξύ τους για περισσότερα από 1 km
2	0,1 m	Καλλιεργήσιμη γη με λίγα κτίρια και φράκτες ύψους το πολύ 8 m που χωρίζονται μεταξύ τους για περίπου 500 m
2,5	0,2 m	Καλλιεργήσιμη γη με πολλά δέντρα, θάμνους και φυτά ή φράκτες ύψους 8 m που χωρίζονται μεταξύ τους για περίπου 250 m
3	0,4 m	Πόλεις, χωριά, καλλιεργήσιμη γη με πολλούς ή ψηλούς φράκτες, δάση και πολύ τραχύ και άνισο έδαφος
3,5	0,6 m	Μεγάλες πόλεις με ψηλά κτίρια
4	1,6 m	Μεγάλες πόλεις με ψηλά κτίρια και ουρανοξύστες

Πίνακας 6.1: Πίνακας ενδεικτικών συντελεστών τραχύτητας.

Στα πλαίσια της εργασίας θεωρείται μία μέση κατηγορία τραχύτητας, η 2, με μήκος τραχύτητας  $z_0 = 0,1$  m. Επίσης,  $z_1 = 10$  m και  $z = 80$  m, αφού οι μετρήσεις που έγιναν ήταν σε υψόμετρο 10m και η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε υψόμετρο 80m. Συνεπώς, για αυτούς τους αριθμούς, ο άνεμος σε 80m ύψος είναι:

$$V(z) = V(z_1) \frac{\ln\left(\frac{80}{0,1}\right)}{\ln\left(\frac{10}{0,1}\right)} = V(z_1) * 1,45$$

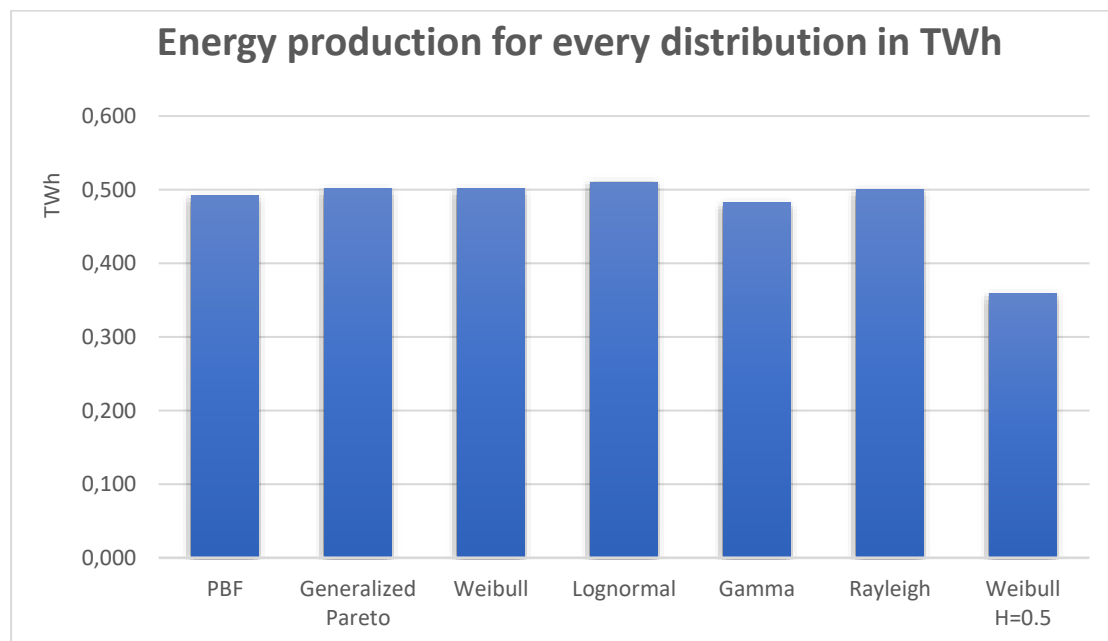
σχεδόν 1,5 φορά ταχύτερος σε σχέση με αυτόν των 10m. Το προφίλ λογαριθμικής μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, για τους συγκεκριμένους αριθμούς (με επίπεδο αναφοράς τα 10m) φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 6.7: Λογαριθμικό προφίλ μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το υΐψομετρο.

## 6.2 Εφαρμογή των συνθετικών χρονοσειρών για κάθε κατανομή σε πραγματική ανεμογεννήτρια

Σε πρώτο στάδιο θα εφαρμοστούν οι χρονοσειρές που παρήχθησαν για κάθε κατανομή, έτσι ώστε να διαπιστωθεί η υπάρχουσα ή μη (και κατά πόσο) διαφορά στην εκτίμηση του κέρδους, που θα υπήρχε σε μία ανεμογεννήτρια ισχύος 3 MW, αν τελικά θεωρηθεί ότι ο άνεμος ακολουθεί άλλη κατανομή από την PBF. Τα αποτελέσματα στην παραγωγή ενέργειας από την ίδια συνθετική χρονοσειρά για διαφορετική κατανομή φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 6.8: Παραγωγή ενέργειας για κάθε κατανομή για 400.000 ώρες.

Φαίνεται τελικά πως όλες οι κατανομές παράγουν σε γενικές γραμμές το ίδιο ποσό ενέργειας για 400.000 ώρες, με την PBF να είναι αυτή που παράγει την λιγότερη ενέργεια και να υποεκτιμά, ελάχιστα, την παραγωγή ενέργειας σε βάθος χρόνου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως όταν παρήχθησαν χρονοσειρές με την κατανομή Weibull, με το ίδιο μήκος χρονοσειράς αλλά με τον συντελεστή Hurst  $H=0,5$  αποτελέσματα ήταν πολύ διαφορετικά. Ο συντελεστής  $H=0,5$  υποδηλώνει ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του στοιχείου στο χρόνο  $t$  και  $t+1$ , άρα ότι έχουμε μία ανέλιξη λευκού θορύβου. Επομένως, δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των τιμών και οι τιμές με χαμηλούς ανέμους δεν έρχονται πια σε ομάδες, όπως ούτε και οι υψηλές φυσικά. Ωστόσο, σε βάθος χρόνου ο λευκός θόρυβος είναι πιο προβλέψιμος από μία ανέλιξη ΗΚ. Αυτό φαίνεται και από το μοντέλο που χρησιμοποιούμε (συνδυασμός ΗΚ και Markov), όπου στην κλίμακα 400.000 η διασπορά της μέσης τιμής είναι  $0,44$  και  $0,16 \times 10^{-3}$  για συντελεστή  $H = 0,91$  και  $H = 0,5$  αντίστοιχα. Συνεπώς, μία ανέλιξη λευκού θορύβου, σε αντίθεση με μία ΗΚ, σε βάθος χρόνου ο λευκός θόρυβος θα δίνει τιμές κοντά στην μέση τιμή, και επομένως σταθερή ενέργεια, σε αντίθεση με αυτήν του ΗΚ που μπορεί να δίνει αρκετά χαμηλές τιμές ή αντίστοιχα αρκετά μεγάλες. Αυτή πιθανότατα είναι η εξήγηση, που η ανέλιξη για  $H=0,5$  δίνει μικρότερη παραγωγή ενέργειας από ότι για  $H=0,91$ .

Με στοιχεία από το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ), στην εφημερίδα της κυβέρνησης σύμφωνα με την υποπαράγραφο ΙΓ.5 του άρθρου 1 του Ν. 4254/2014 (<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=lf4HREBW5ZI%3D&tabid=506&language=el-GR>) και μετά την αναπροσαρμογή των τιμολογίων του άρθρου 13 του Ν. 3468/2006, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από Παραγωγό ή Αυτοπαραγωγό μέσω σταθμού χρήσης ΑΠΕ, και ιδιαίτερα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Αιολική ενέργεια που αξιοποιείται με χερσαίες εγκαταστάσεις, η τιμή ενέργειας για παραγωγό συνδεδεμένο στο σύστημα ανέρχεται στα  $105 \text{ €/MWh}$  ή αλλιώς στα  $0,105 \text{ €/kWh}$ .

τος των 6 μηνών, η αποζημίωση κάθε φορά γίνεται με τη μικρότερη τιμή εκ των δύο υποπεριπτώσεων α' και β' της παρούσας.

ΥΠΟΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ ΙΓ.5: ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΑΡΘΡΟΥ 13 ΤΟΥ Ν. 3468/2006

1. Η περίπτωση β' της παραγράφου 1 του άρθρου 13 του ν. 3468/2006 αντικαθίσταται, για όλους τους σταθμούς ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ που τίθενται σε δοκιμαστική λει-

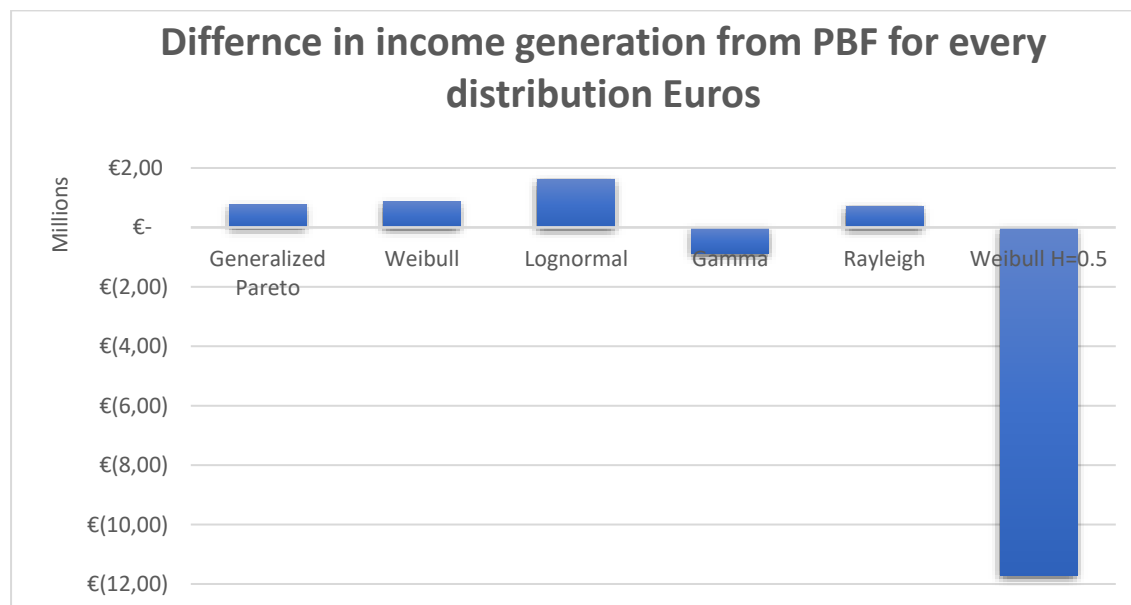
τουργία ή ενεργοποιείται η σύνδεσή τους μετά την έναρξη ισχύος της παρούσας παραγράφου, ως εξής:  
«β) Η τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας κατά την προηγούμενη περίπτωση εκτός από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκούς σταθμούς για τους οποίους έχουν οριστεί ξεχωριστές τιμές από το ν. 3734/2009 (Α' 8), όπως ισχύει, γίνεται με βάση τα στοιχεία του ακόλουθου πίνακα:

Πίνακας Α

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από:		Τιμή Ενέργειας (€/MWh) χωρίς ενίσχυση (ΧΕ)	Τιμή Ενέργειας (€/MWh) με ενίσχυση (ΜΕ)
1	Αιολική Ενέργεια που αξιοποιείται με χερσαίες εγκαταστάσεις ισχύος ≤5 MW	105	85
2	Αιολική ενέργεια που αξιοποιείται με χερσαίες εγκαταστάσεις ισχύος > 5 MW	105	82
3	Αιολική Ενέργεια που αξιοποιείται με χερσαίες εγκαταστάσεις στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά	110	90
4	Υδραυλική Ενέργεια που αξιοποιείται με μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ ≤1 MWe	105	85
5	Υδραυλική Ενέργεια που αξιοποιείται με μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ από 1 MWe έως και 5 MWe	105	83
6	Υδραυλική Ενέργεια που αξιοποιείται με μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς με εγκατεστημένη ισχύ από 5 MWe έως και 15 MWe	100	80
7	Ηλιακή ενέργεια που αξιοποιείται από ηλιοθερμικούς σταθμούς	260	200

Σχήμα 6.9: Τμήμα της υποπαραγράφου ΙΓ.5 του άρθρου 1 του Ν. 4254/2014.

Η υπερεκτίμηση των χρημάτων που θα αποφέρει η επένδυση θεωρώντας άλλη κατανομή από την PBF, λαμβάνοντας υπόψιν και την μακροπρόθεσμη εμμόνη (συντελεστής Hurst) φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 6.10: Διαφορά στα τελικά έσοδα από την PBF για κάθε κατανομή.

### 6.3 Οικονομική ανάλυση για επένδυση σε ανεμογεννήτρια

Επίσης ένα άλλο φλέγον ζήτημα με τις ανεμογεννήτριες, και γενικότερα με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι αν καταφέρνουν ποτέ να αποσβέσουν το κόστος που χρειάστηκε για να εγκατασταθούν. Η διάρκεια ζωής μίας σύγχρονης ανεμογεννήτριας καλής ποιότητας είναι 20 χρόνια. Ανάλογα με το πόσο φυσάει και την τύρβη του αέρα στην συγκεκριμένη περιοχή, ο στρόβιλος μπορεί να διαρκέσει 25 χρόνια ή και περισσότερο. Είναι απίθανο ότι μια ανεμογεννήτρια θα διαρκέσει περισσότερο από αυτό επειδή υποβάλλονται σε αρκετά ακραία φορτία καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο σχήμα μιας ανεμογεννήτριας, όπου τα βασικά στοιχεία (τα πτερύγια και ο πύργος) στερεώνονται μόνο σε ένα άκρο και υπόκεινται στην πλήρη δύναμη του ανέμου. Επίσης, επειδή η ισχύς στον άνεμο αυξάνεται με τον κύβο της ταχύτητας, τα ακραία φορτία μπορούν να είναι καταστροφικά για ολόκληρο τον σχεδιασμό και για αυτό οι ανεμογεννήτριες πρέπει να κλείσουν ώστε να προστατευθούν σε υψηλούς ανέμους. Στο τέλος της ζωής της μπορεί απλά να αφαιρεθεί και να αντικατασταθεί με μία άλλη.

Οι ιδανικοί συντελεστές φορτίου που θεωρητικά παράγονται από τις ταχύτητες ανέμου σε ιδανικές συνθήκες, αγνοούν έναν αριθμό παραγόντων που μειώνουν την πραγματική απόδοση που επιτυγχάνεται από ένα αιολικό πάρκο σε δεδομένη θέση και ύψος του ρότορα. Αυτοί είναι :

1. Μηχανολογικός εξοπλισμός: Η ανάλυση συνολικά, δείχνει χρόνο διακοπής 4-7% για τα αιολικά πάρκα και τις ηλεκτρικές υποδομές στις οποίες στηρίζονται, πράγμα που σημαίνει μείωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 11%, καθώς οι στρόβιλοι, κατά μέσο όρο, καταστρέφονται γρηγορότερα σε σημεία με περισσότερο αέρα, σε σχέση με τις μέσες συνθήκες.
2. Απόδοση λειτουργίας: Τα συστήματα ελέγχου, τα μη ευθυγραμμισμένα εξαρτήματα και οι απώλειες ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό των αιολικών πάρκων, διαπιστώθηκε ότι μειώνουν την απόδοση κατά 2% στις καλές εγκαταστάσεις, σε σχέση με την παρεχόμενη καμπύλη ισχύος της τουρμπίνας.
3. Φαινόμενα Τύρβης: Τα αιολικά πάρκα υποφέρουν από απώλεια ισχύος, καθώς οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ γειτονικών στροβίλων αυξάνουν τις αναταράξεις και μειώνουν τις ταχύτητες του ανέμου. Για σχετικά μικρά (μέχρι 20 στροβίλους) χερσαίες αιολικά πάρκα οι εκτιμήσεις απώλειας κυμαίνονται μεταξύ 5 και 15%.
4. Η γήρανση του στροβίλου: Με βάση τα ευρήματα από έρευνα που διεξήχθη σε αιολικά πάρκα στο Ηνωμένο Βασίλειο, βρέθηκε ότι οι ανεμογεννήτριες χάνουν  $1.6\% \pm 0.2\%$  της παραγωγής τους ανά έτος.
5. Συνθήκες σημείου εγκατάστασης: Οι ατέλειες στο περιβάλλον ενός στροβίλου όπως για παράδειγμα: η ένταση στροβιλισμού, η κλίση εδάφους, φαινόμενα εμπλοκής των πτερυγίων, ρύπανση των πτερυγίων (από ρύπους, πάγο,

έντομα κλπ.) ή κάλυψη από τον περιβάλλοντα χώρο, είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν με έναν μόνο συντελεστή. Η εκτίμηση ωστόσο είναι 2-5%.

Στην παρούσα μελέτη λαμβάνεται υπόψιν μόνο η γήρανση του στροβίλου, ίση με 1.5% ανά έτος.

Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας E-82 για το οποίο βρέθηκαν στοιχεία κοστίζει περίπου 2.8 εκατομμύρια €. Ωστόσο υπάρχουν και άλλα επιπλέον κόστη τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψιν όπως είναι η θεμελίωση ή η σύνδεση στο δίκτυο. Για να υλοποιηθεί λοιπόν ένα ολοκληρωμένο έργο εγκατάστασης πρέπει να συνυπολογιστούν αυτές οι υποχρεωτικές και αναγκαίες δαπάνες. Με βάση περιορισμένη επιλογή δεδομένων από τη Γερμανία, τη Δανία, την Ισπανία και το Ηνωμένο Βασίλειο, προκύπτουν τα εξής δεδομένα :

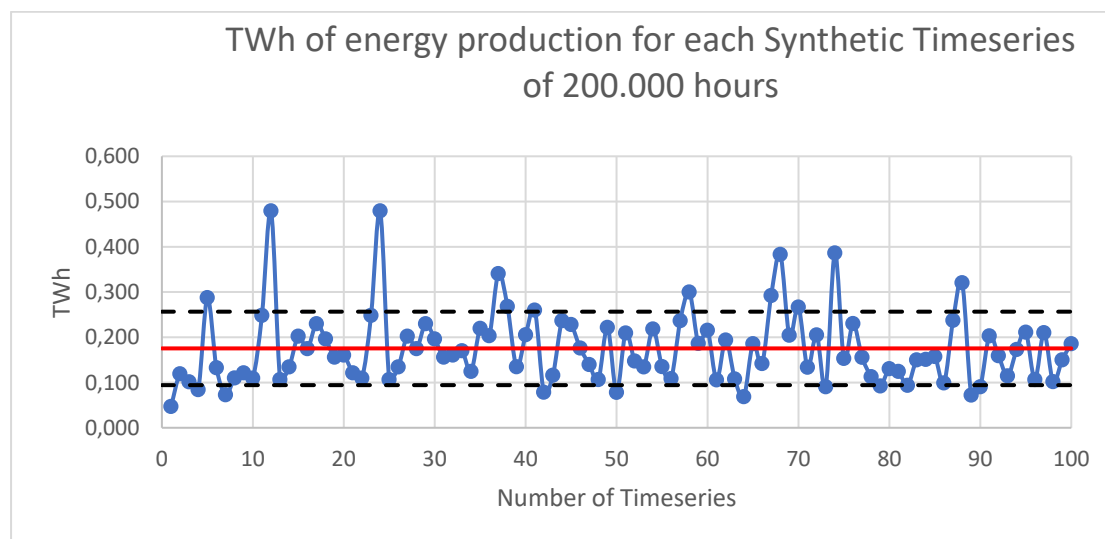
	Μερίδιο από το συνολικό κόστος	Τυπικό μερίδιο των επιπλέον δαπανών
<b>Ανεμογεννήτρια Turbine (exworks)</b>	68-84 %	—
<b>Θεμελίωση Foundation</b>	1-9 %	20-25 %
<b>Ηλεκτρική Εγκατάσταση Electric installation</b>	1-9 %	10-15 %
<b>Σύνδεση με το Δίκτυο Grid connection</b>	2-10 %	35-45 %
<b>Συμβουλευτικό κόστος Consultancy</b>	1-3 %	5-10 %
<b>Γεωτεχνική Μελέτη Land</b>	1-5 %	5-10 %
<b>Κατασκευή Δρόμου Road construction</b>	1-5 %	5-10 %

Πίνακας 6.2: Επιπλέον κόστη στην τοποθέτηση μιας ανεμογεννήτριας.

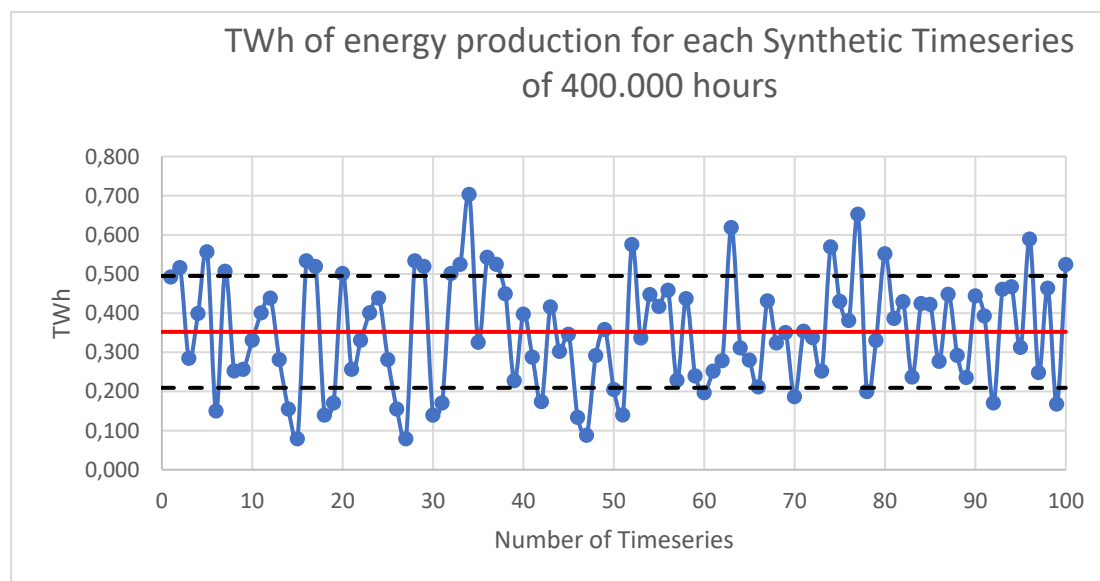
Φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα πως το κόστος των επιπλέον δαπανών ανέρχεται από 16 ως 32 % του κόστους της ανεμογεννήτριας. Αν επομένως εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια που επιλέχθηκε, και χωρίς βλάβη της γενικότητας ως θεωρηθεί ότι οι επιπλέον δαπάνες παίρνουν μια μέση τιμή, περίπου ίση με το 25% του κόστους της ανεμογεννήτριας, τότε το τελικό κόστος ανέρχεται στα :  $2.8 \times 1.25 = 3.5$  εκατομμύρια €. Σε αυτό το κόστος πρέπει να συνυπολογιστούν και τα ετήσια, πάγια έξοδα, για την συντήρηση, εγγύηση και ασφάλεια της ανεμογεννήτριας, τα οποία ανέρχονται στα 115 χιλιάδες € = 0.115 εκατομμύρια €/έτος και τα χρηματοοικονομικά έξοδα. Σαν χρηματοοικονομικά έξοδα ορίζονται το κόστος, οι τόκοι και άλλες επιβαρύνσεις που ενέχονται στο δανεισμό χρημάτων για την κατασκευή ή την αγορά περιουσιακών στοιχείων. Θα ελεγχθούν 2 περιπτώσεις, μία στην οποία αντικαθίσταται η ανεμογεννήτρια μετά το πέρας του χρόνου ζωής της, έτσι ώστε να εκμεταλλευθούν περεταίρω όλα τα προηγούμενα έργα και οι μελέτες που έγιναν για την εγκατάστασή της, και μία στην οποία η ανεμογεννήτρια δεν αντικαθίσταται. Σαν χρόνος ζωής για την κάθε ανεμογεννήτρια θα ληφθεί η τιμή των 200.000 ωρών ή αλλιώς  $\frac{200.000}{8.760} = 22,83$  έτη. Από τις 100 χρονοσειρές που παρήχθησαν για κάθε μία από τις 200.000 και 400.000 ώρες λαμβάνεται ο μέσος όρος της ενέργειας που παράγεται και κατά συνέπεια των χρημάτων που θα αποφέρει. Στα



διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω, φαίνεται επίσης η μέση τιμή και η διαφορά μίας τυπικής απόκλισης από την μέση τιμή.



Σχήμα 6.11: Η παραγωγή ενέργειας σε TWh για τις 100 συνθετικές χρονοσειρές των 200.000 ωρών.



Σχήμα 6.12: Η παραγωγή ενέργειας σε TWh για τις 100 συνθετικές χρονοσειρές των 400.000 ωρών.

Επιλέγεται λοιπόν η μέση τιμή των 0,175 TWh και 0,352 TWh , για τις 200.000 και τις 400.000 ώρες αντίστοιχα. Ας θεωρηθεί, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι η ανεμογεννήτρια παράγει σταθερή ενέργεια κάθε έτος.

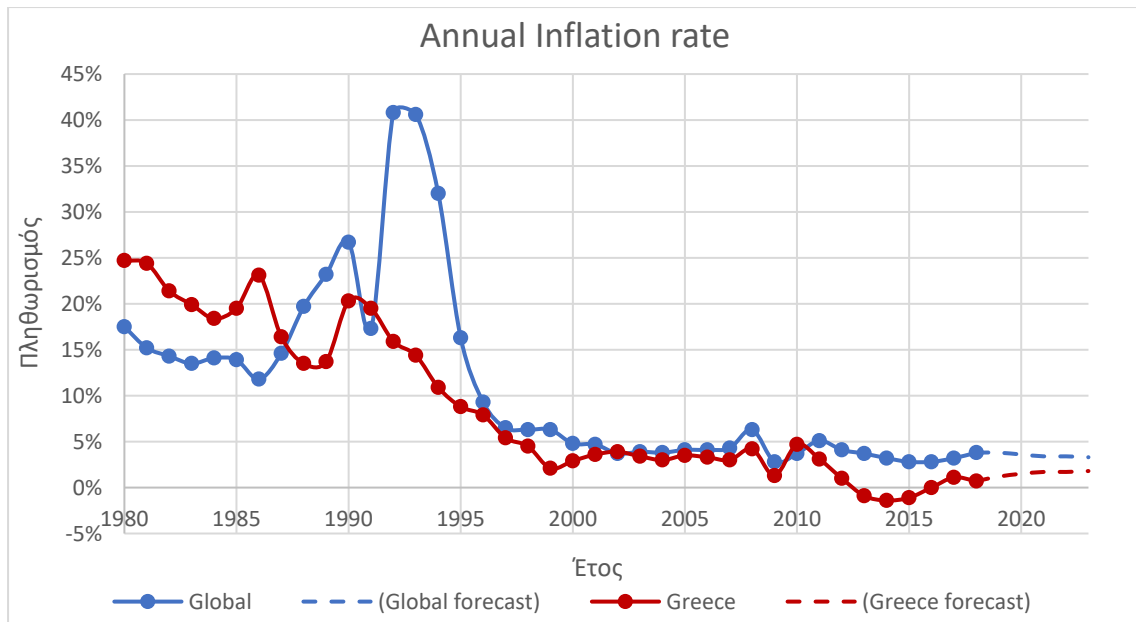
### 6.3.1 Βασικές έννοιες Αξιολόγησης Επενδύσεων

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να εισαχθεί μία νέα έννοια, αυτή της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) (Net present value (NPV)). Ως καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ)

ορίζεται το άθροισμα των παρούσων αξιών των εισερχόμενων και εξερχόμενων ταμειακών ροών κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Μετράει το πλεόνασμα ή την έλλειψη ταμειακών ροών, σε όρους παρούσας αξίας, σε σχέση με το κόστος κεφαλαίων (cost of funds) που χρησιμοποιήθηκαν για μια επένδυση. Η καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ) είναι ένα χρήσιμο εργαλείο που χρησιμοποιείται στην οικονομική επιστήμη (economics), στα χρηματοοικονομικά (finance) και στη λογιστική (accounting) για να καθοριστεί αν μια επένδυση ή ένα έργο κρίνεται συμφέρον για να χρηματοδοτηθεί ή όχι. Ο προσδιορισμός της αξίας ενός σχεδίου είναι δύσκολη, επειδή υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τη μέτρηση της αξίας των μελλοντικών ταμειακών ροών, ωστόσο επιλέγεται η μέθοδος της καθαρής παρούσας αξίας.

Όταν γίνεται μία επένδυση, ο επενδυτής για να αποφασίσει αν θα προχωρήσει τελικά στην υλοποίηση του επενδυτικού σχεδίου πρέπει να υπολογίσει αν τελικά η τελευταία θα είναι κερδοφόρα ή όχι και κατά πόσο. Κάθε επένδυση εμπεριέχει κάποιο ρίσκο, πράγμα που σημαίνει, ότι η επένδυση υπάρχει πιθανότητα να μην αποφέρει τα αναμενόμενα κέρδη, ή ακόμη χειρότερα να ζημιώσει τον επενδυτή. Επίσης η αξία του χρήματος μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Λόγω αυτής ακριβώς της *χρονικής αξίας του χρήματος (αντιστάθμισμα για την απώλεια καταναλωτικής ισχύος)* αλλά και του *ρίσκου* που υπάρχει στην κάθε επένδυση, τα άτομα μπορούν να θυσιάσουν μέρος της κατανάλωσης για επενδύσεις όταν υπάρξει η κατάλληλη «αποζημίωση». Αν στα παραπάνω συνυπολογιστεί και ο πληθωρισμός, ο οποίος εκφράζει τη μείωση της αγοραστικής δύναμης του χρήματος, δηλαδή το γεγονός ότι με την πάροδο του χρόνου με το ίδιο ποσό μπορούν να αγοραστούν ολοένα και λιγότερα αγαθά η κατάλληλη «αποζημίωση» θα πρέπει να είναι ακόμη μεγαλύτερη. Ο πληθωρισμός εκφράζεται με την αύξηση τιμών σε αγαθά και υπηρεσίες και η ποσοστιαία μεταβολή τους δίνεται από τον συντελεστή πληθωρισμού  $f$  (ετήσια βάση). Συνεπώς, λόγω των τριών παραπάνω παραγόντων, ένα ευρώ στο μέλλον αξίζει λιγότερο από όσο ένα ευρώ σήμερα. Το προεξοφλητικό επιτόκιο είναι ένας τρόπος για να μετρηθεί ακριβώς αυτό. Με άλλα λόγια, το προεξοφλητικό επιτόκιο είναι το επιτόκιο με το οποίο η μελλοντική αξία μιας επένδυσης μετατρέπεται σε παρούσα (σημερινή) αξία.

Για την καθαρή αξία των χρημάτων στον χρόνο και για το ρίσκο της επένδυσης, θεωρείται μία απόδοση της τάξης του 2,5% και 3% αντίστοιχα. Με στοιχεία από το Διεθνές Νομισματικό Ταμείο (ΔΝΤ ή IMF) στην Ελλάδα ο μέσος ετήσιος πληθωρισμός μετά την είσοδο της χώρας στην ΟΝΕ (2001) τρέχει με 1,93%, όταν ο αντίστοιχος παγκόσμιος μέσος όρος, για την ίδια περίοδο είναι στο 3,81%. Ας θεωρηθεί ότι ο πληθωρισμός είναι ίσος με τον Ελληνικό μέσο όρο 2% τον χρόνο. Το προεξοφλητικό επιτόκιο λοιπόν θα πρέπει να ληφθεί ίσο με  $(1 + 2,5\%)(1 + 3\%)(1 + 2\%) - 1 \cong 7,7\%$ . Ωστόσο, το παραπάνω υπολογισμένο θα πρέπει να το επιτρέπει η νομοθεσία και να εγκριθεί από την υπεύθυνη ελεγκτική αρχή, όπως θα περιγραφεί και αναλυτικότερα παρακάτω.



Σχήμα 6.13: Ετήσιος δείκτης πληθωρισμού (κανονική γραμμή) και πρόβλεψης (διακεκομμένη γραμμή) με στοιχεία από το ΔΝΤ.

Μία προβλεπόμενη τιμή στο μέλλον, υπολογίζεται σε παρούσα αξία λόγω του πληθωρισμού σύμφωνα με τον τύπο:

$$P = S (1 + f)^n \quad (6.3)$$

όπου :

$S$  : η προβλεπόμενη για το χρόνο  $t$  (σε σταθερές τιμές) τιμή

$f$  : ο συντελεστής πληθωρισμού

$P$  : η μελλοντική τιμή σε τρέχουσες τιμές

Όλα τα ποσά για να γίνει σύγκριση θα πρέπει να αναχθούν στην παρούσα αξία τους για να έχουν την ίδια χρονική βάση. Τα 3,5 εκατομμύρια € που θα δαπανηθούν σήμερα είναι ήδη υπολογισμένα στην παρούσα αξία τους. Έπειτα από τροποποίηση του αναπτυξιακού νόμου 3299/2004 η παράγραφος 1 του άρθρου 3 αντικαθίσταται σύμφωνα με την παράγραφο 2 του άρθρου 3 του Ν.3752/2009, ΦΕΚ Α 40/4.3.2009, επενδυτικά σχέδια παραγωγής ηλεκτρισμού από ήπιες μορφές ενέργειας και ειδικότερα την αιολική, ανεξαρτήτως εγκατεστημένης ισχύος, εντάσσονται στην κατηγορία 4.

«vi. Επενδυτικά σχέδια παραγωγής ηλεκτρισμού από ήπιες μορφές ενέργειας και ειδικότερα την αιολική, την υδροηλεκτρική, τη γεωθερμική και τη βιομάζα, ανεξαρτήτως εγκατεστημένης ισχύος επενδυτικά σχέδια συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Επίσης επενδυτικά σχέδια παραγωγής ηλεκτρισμού από την ηλιακή ενέργεια, εξαιρουμένων των σχεδίων παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος μεγαλύτερης από 2MW - ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ 4.»

*Σχήμα 6.14: Τμήμα της παραγράφου 2 του άρθρου 3 του Ν.3752/2009,ΦΕΚ Α 40/4.3.2009.*

Από τον αρχικό νόμο, για την εφαρμογή των διατάξεων του άρθρου αυτού στην κατηγορία 1 περιλαμβάνονται οι κατηγορίες 3, 4 και 5 της κατάταξης των επενδυτικών σχεδίων του άρθρου 3 παράγραφος 1 και στην κατηγορία 2 περιλαμβάνονται οι αντίστοιχες κατηγορίες 1 και 2. Επομένως η κατηγορία στην οποία εντάσσεται το επενδυτικό έργο είναι η κατηγορία 1.

1 .α. Για τα επενδυτικά σχέδια της παραγράφου 1 του άρθρου 3 παρέχονται κατά περιοχή και κατηγορία οι ακόλουθες ενισχύσεις:

Για την εφαρμογή των διατάξεων του άρθρου αυτού στην κατηγορία 1 περιλαμβάνονται οι κατηγορίες 3, 4 και 5 της κατάταξης των επενδυτικών σχεδίων του άρθρου 3 παράγραφος 1 και στην κατηγορία 2 περιλαμβάνονται οι αντίστοιχες κατηγορίες 1 και 2.

Επιχορήγηση ή και επιδότηση χρηματοδοτικής μίσθωσης ή επιδότηση του κόστους της δημιουργούμενης απασχόλησης:

Περιοχή Α` - Κατηγορία 1 - 20%

- Κατηγορία 2 - 15%

Περιοχή Β` - Κατηγορία 1 - 30%

- Κατηγορία 2 - 25%

Περιοχή Γ` - Κατηγορία 1 - 40%

- Κατηγορία 2 - 35%

Η εναλλακτικά Φορολογική απαλλαγή

Περιοχή Α` - Κατηγορία 1 - 60%

- Κατηγορία 2 - 50%

Περιοχή Β` - Κατηγορία 1 - 100%

- Κατηγορία 2 - 100%

Περιοχή Γ` - Κατηγορία 1 - 100%

- Κατηγορία 2 - 100%

*Σχήμα 6.15: Τμήμα του Ν. 3299/2004.*

Ανάλογα λοιπόν με την περιοχή στην οποία πρόκειται να κατασκευαστεί η ανεμογεννήτρια, επιχορηγείται το 20-40% της επένδυσης. Θεωρώντας ότι βρίσκεται στην Περιοχή Β' το ποσό της επιχορήγησης ανέρχεται στο 30% της επένδυσης και το υπόλοιπο κόστος θεωρείται ότι καλύπτεται κατά το 30% από δανειακά κεφάλαια, με επιτόκιο 6%, και το υπόλοιπο 40% με ίδια κεφάλαια.

Η δόση του δανείου (Δ), το χρεολύσιο (Χ) και ο τόκος (Τ) για κάθε έτος υπολογίζονται με βάση τους παρακάτω τύπους :

$$\Delta = \left( i + \frac{i}{(1+i)^{n-1}} \right) \times K \quad (6.4)$$

$$T = AK \times i \quad (6.5)$$

$$X = \Delta - T \quad (6.6)$$

όπου:

$i$  = επιτόκιο του δανείου

$K$  = δανειακό κεφάλαιο

$AK$  = Ανεξόφλητο Κεφάλαιο

$n$  = περίοδος αποπληρωμής δανείου σε έτη

Επιπροσθέτως, όλοι οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών προσφέρουν μακροπρόθεσμα πακέτα εγγύησης και συντήρησης, τα οποία ως θεωρήσουμε ότι επιλέγονται να αγοραστούν, και αν συνυπολογιστεί και η ετήσια ασφάλεια της ανεμογεννήτριας για το συγκεκριμένο μοντέλο έχουμε ότι τα έξοδα ανέρχονται περίπου σε 115 χιλιάδες € = 0,115 εκατομμύρια €/έτος, τα οποία πρέπει να αναχθούν για κάθε χρόνο στην παρούσα αξία τους σύμφωνα με την σχέση (6.3).

Στη διάρκεια του χρόνου απόσβεσης (διάρκεια ζωής του έργου) θα πρέπει να γίνει αντικατάσταση της ανεμογεννήτριας. Το αντίστοιχο κόστος θα πρέπει να αναχθεί σε αρχικό κόστος. Αν  $F$  είναι το κόστος της ανεμογεννήτριας σε σημερινές τιμές, τότε το ισοδύναμο αρχικό κόστος  $P$  προσδιορίζεται από τον τύπο του ανατοκισμού:

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \quad (6.7)$$

όπου:

$P$  : η παρούσα αξία

$A$  : είναι το κόστος της ανεμογεννήτριας σε σημερινές τιμές

$i$  : το πληθωριστικό επιτόκιο.

Έτσι το ενδιάμεσο κόστος αντικατάστασης της ανεμογεννήτριας μετά από  $n_2$  έτη, μετατρέπεται σε πάγια δαπάνη στην αρχή της οικονομικής ζωής των έργων. Το ολικό κόστος των ανεμογεννητριών είναι ίσο με  $F$  (αρχική εγκατάσταση), προσαυξημένο κατά  $P$  για μία αντικατάσταση. Αυτό θα πρέπει και πάλι να αναχθεί σε ετήσια βάση, σύμφωνα με την σχέση (6.3).

Τέλος, η παραγωγή ρεύματος θεωρείται επιχειρηματική δραστηριότητα και φορολογείται σαν εισόδημα από επιχειρηματική δραστηριότητα σύμφωνα με τα παρακάτω κλιμάκια :

Κλιμάκιο εισοδήματος (ευρώ)	Φορολογικός συντελεστής %	Φόρος κλιμακίου (ευρώ)
20.000,00	22%	4.400,00
10.000,00	29%	2.900,00
10.000,00	37%	3.700,00
Υπερβάλλον	45%	

Πίνακας 6.3: Φορολογικά κλιμάκια με την ισχύουσα νομοθεσία.

Με τη μέθοδο των αποσβέσεων επιδιώκεται η κατανομή του κόστους παγίων στοιχείων σε όλο το χρόνο ζωής τους και η αντίστοιχη επιβάρυνση του κόστους παραγωγής (με συνέπεια και την αντίστοιχη φορολογική ελάφρυνση). Η πρακτική των αποσβέσεων συνίσταται στην αφαίρεση ενός συγκεκριμένου ποσού από τα ακαθάριστα κέρδη σε ετήσια βάση, μέχρις ότου το άθροισμα των ετήσιων αποσβέσεων να γίνει ίσο με την αξία αγοράς των πάγιων στοιχείων. Η επιβάρυνση αυτή δεν αποτελεί πραγματική ταμειακή εκροή κατά τα έτη της παραγωγικής λειτουργίας, αφού η δαπάνη για την απόκτηση του περιουσιακού στοιχείου σημειώθηκε κατά την χρονική στιγμή «μηδέν» της επένδυσης. Κατά την αξιολόγηση επενδυτικών στοιχείων είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται η μέθοδος απόσβεσης που προβλέπεται από το ισχύον φορολογικό καθεστώς. Για τον υπολογισμό των αποσβέσεων ενός παγίου περιουσιακού στοιχείου, πρέπει να είναι γνωστά:

- Η δαπάνη για την αγορά, μεταφορά, εγκατάσταση και όλα τα πιθανά έξοδα που απαιτούνται μέχρι την έναρξη της λειτουργίας του (αρχικό κόστος επένδυσης).
- Ο χρήσιμος χρόνος ζωής του.
- Η υπολειμματική αξία που αποτελεί τα πιθανά έσοδα που θα προκύψουν κατά την εκποίηση του περιουσιακού στοιχείου, μετά το χρήσιμο χρόνο ζωής του.

Η αξία που θα αποσβεστεί είναι η διαφορά μεταξύ του αρχικού κόστους επένδυσης και της υπολειμματικής αξίας. Με την κλασική σταθερή μέθοδο απόσβεσης, το ετήσιο ύψος της απόσβεσης ισούται με το πηλίκο της παραπάνω διαφοράς προς το χρήσιμο χρόνο ζωής. Στην πράξη η σταθερή μέθοδος εφαρμόζεται με τη χρήση ενός σταθερού ποσοστού (ή συντελεστή απόσβεσης) στη θέση του χρήσιμου χρόνου ζωής. Για κάθε κατηγορία περιουσιακού στοιχείου, ισχύει ένας ανώτατος συντελεστής απόσβεσης που καθορίζεται νομοθετικά. Με τους νόμους περί κινήτρων οι συντελεστές αυτοί είναι δυνατόν να προσαυξηθούν ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης της επένδυσης. Η προσαύξηση αυτή, που επιτυγχάνεται και με άλλες μη σταθερές μεθόδους απόσβεσης (με τις οποίες το ετήσιο ύψος απόσβεσης μειώνεται με το χρόνο), αποτελεί μια έμμεση οικονομική ενίσχυση της επιχείρησης, ιδιαίτερα χρήσιμη κατά τα πρώτα χρόνια λειτουργίας της.

Στην ερμηνεία των διατάξεων περί αποσβέσεων των παγίων περιουσιακών στοιχείων των επιχειρήσεων της παρ. 22 του άρθρου 3 και της περ. ζ της παρ. 1 του άρθρου 28 του Ν.4110/2013 (ΦΕΚ Α' 17) , έγινε η εξής αναφορά :

«Από τον παραπάνω καθορισμό των νέων συντελεστών απόσβεσης, προκύπτει ότι εάν κάποιο πάγιο δεν περιλαμβάνεται σ' αυτόν, ο συντελεστής απόσβεσης αυτού θα είναι εκείνος των «λοιπών πάγιων στοιχείων» δηλαδή δέκα τοις εκατό (10%) για όλους τους κλάδους επιχειρήσεων και όχι εκείνος που τυχόν προκύπτει από την ωφέλιμη διάρκεια ζωής του παγίου αυτού. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί ότι δεν πρέπει να γίνεται καταχρηστική εφαρμογή του συντελεστή απόσβεσης 10% των «λοιπών πάγιων στοιχείων» κάθε φορά που διαπιστώνεται ότι κάποια πάγια δεν περιγράφονται επακριβώς στον πίνακα των προβλεπόμενων νέων συντελεστών απόσβεσης.

Π.χ. για τα αιολικά πάρκα και τις φωτοβολταϊκές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο παραπάνω συντελεστής 10% για την απόσβεσή τους, αλλά ο ορθός συντελεστής 4% για τις «μη κτιριακές εγκαταστάσεις»»,

και επομένως δεν μπορεί να θεωρηθεί μεγαλύτερο προεξοφλητικό επιτόκιο από το 4%, σύμφωνα με την νομοθεσία. Τελικώς ο συντελεστής απόσβεσης θεωρείται ίσος με 4%.

Οι συντελεστές αποσβέσεων ορίζονται, από την Νομοθεσία, ως εξής:

Κτιριακές εγκαταστάσεις, γραφεία, οικίες:	4%
Βιομηχανοστάσια, αποθήκες σταθμοί, μη κτιριακές εγκαταστάσεις:	4%
Μηχανήματα:	10%
Εξοπλισμός (εκτός Η/Υ και λογισμικού):	10%
Λοιπά πάγια στοιχεία:	10%

Πίνακας 6.4: Οι συντελεστές αποσβέσεων σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία.

Ο συντελεστής απόσβεσης κεφαλαίου (Capital recovery factor), δίνεται από την σχέση :

$$A = P \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6.8)$$

όπου :

A : η περιοδική εισπραξη (δόση)

P : το παρόν κεφάλαιο

n : ο αριθμός των περιόδων εισπραξης

i : το προεξοφλητικό επιτόκιο

### 6.3.2 Οικονομική διαχείριση : Περίπτωση 1<sup>η</sup> :

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση της μη αντικατάστασης της ανεμογεννήτριας μετά το πέρας του χρόνου ζωής της. Λαμβάνεται λοιπόν ο χρόνος ζωής όλων των έργων ίσος με  $n = 22,83 \cong 23$  έτη και προεξοφλητικό επιτόκιο ίσο με 4%.

Σαν έξοδα λογίζονται το κόστος αγοράς και εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας, που όπως αναφέρθηκε ανέρχεται στα 3,5 εκατομμύρια €, από τα οποία το 30% = 1,05 εκατομμύρια €, επιδοτείται από το κράτος, το 40% = 1,4 εκατομμύρια € καλύπτεται από ίδια κεφάλαια και το υπόλοιπο 30% = 1,05 εκατομμύρια € από δανειακά. Συνυπολογίζονται επίσης τα ετήσια έξοδα συντήρησης με κόστος 115 χιλιάδες €/έτος και το δάνειο που αποπληρώνεται στην τράπεζα μέσα σε 8 χρόνια με ύψος δόσης  $\approx 169$  χιλιάδες €/έτος.

Τα αντίστοιχα ετήσια έσοδα που ανέρχονται από την πώληση της ενέργειας που παράγεται ανέρχονται σε 105 €/MWh.

Το δάνειο θα αποπληρωθεί σε 15 χρόνια, η δόση του, για το δανειακό κεφάλαιο, οι τόκοι και το χρεολύσιο σε ετήσια βάση υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.4), (6.5) και (6.6) αντίστοιχα. Ο ετήσιος πληθωρισμός θεωρείται ίσος με 2% και επηρεάζει τις ετήσιες χρηματοροές, οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν στην παρούσα αξία τους. Πιο συγκεκριμένα, επηρεάζονται τα ετήσια έξοδα συντήρησης, όπως και η ετήσιες ταμιακές ροές και οι τιμές τους σε παρούσα αξία υπολογίζονται σύμφωνα με την σχέση (6.3). Οι αποσβέσεις για ωφέλιμο χρόνο ζωής 23 χρόνια και συντελεστή απόσβεσης 4% γίνονται για 15 χρόνια. Ο στρόβιλος της ανεμογεννήτριας κάθε χρόνο χάνει το 1.5% της απόδοσής του. Η ονομαστική ταμειακή ροή του έτους προκύπτει αν αφαιρέσουμε από τα ακαθάριστα έσοδα τους φόρους, τα συνολικά έξοδα και τις αποσβέσεις, και η παρούσα αξία της αν εφαρμόσουμε την σχέση (6.7). Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε :

Πληθωρισμός	2%
Συνολικό κόστος έργων	3.500.000,00 €
Επιχορήγηση	1.050.000,00 €
Δάνειο	1.050.000,00 €
Ίδια κεφάλαια	1.400.000,00 €
Συνολικό κόστος Χωρίς την επιχορήγηση	2.450.000,00 €
Χρόνια Αποπληρωμής Δανείου	15
Επιτόκιο Δανείου	6%
Προεξοφλητικό Επιτόκιο	4%
Χρήσιμος Χρόνος Ζωής (έτη)	23

Πίνακας 6.5: Δεδομένα επένδυσης αιολικής εγκατάστασης - Περίπτωση 1.

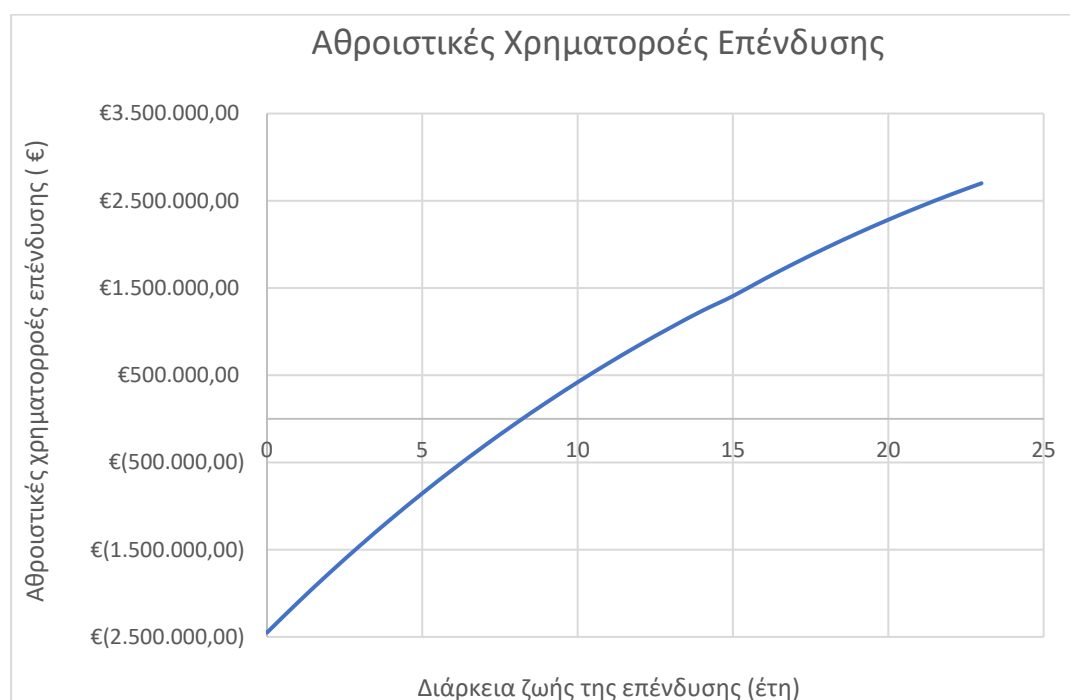
Όπως διαπιστώνεται από τις ετήσιες ταμειακές και αθροιστικές ροές που παρουσιάζονται παρακάτω, η επένδυση θα καταφέρει να αποσβέσει τα χρήματα της επένδυσης μέσα στα 9 πρώτα χρόνια ζωής του ωφέλιμου χρόνου ζωής της. Ο αντίστοιχος συντελεστής δυναμικότητας είναι :

$$CF = \frac{14.7758.75 \text{ MWh}}{3 \text{ MW} \times 200.000 \text{ h}} = 24,6\%$$

υψηλότερος δηλαδή σε σχέση με τον παγκόσμιο συντελεστή δυναμικότητας.



Το αντίστοιχο διάγραμμα αθροιστικών χρηματοροών είναι το εξής :



Σχήμα 6.16: Αθροιστικές χρηματικές ροές για την αιολική εγκατάσταση - Περίπτωση 1.

Για να έβγαινε η επένδυση οριακά χωρίς ζημία, δηλαδή οι αθροιστικές χρηματοροές να έβγαιναν οριακά μηδέν, θα έπρεπε να παραχθούν συνολικά 89.862 MWh, δηλαδή συντελεστή δυναμικότητας:

$$CF = \frac{89.862,29 \text{ MWh}}{3 \text{ MW} \times 200.000 \text{ h}} = 14,9\%$$

Τέλος, από τις 100 συνθετικές χρονοσειρές που παρήχθησαν, βρέθηκε για πόσες από αυτές η επένδυση δεν θα είχε ζημία. Με άλλα λόγια, βρέθηκε η πιθανότητα η ανεμογεννήτρια να παραγάγει περισσότερη ενέργεια από 89862,3 MWh. Αυτή η πιθανότητα, για την 1<sup>η</sup> περίπτωση και τις 200,0.00 ώρες είναι 80,2%. Άρα η επένδυση έχει 80,2% πιθανότητα να είναι κερδοφόρα.

Ετος	Εξόδα		Δάνειο				Εσοδα					Εξόδα		Καθαρές Ταμειακές Ροές		Αθροιστικές Χρηματοροές επένδυσης	
	Ετήσια Εξόδα Συντήρησης	Δόση	Τόκοι	Χρεολύσιο	Ανεξόφλητο Κεφάλαιο	Αποδοση Ανεμογεννητήριας	Ετήσια Αποδοση ΜΜΗ	Τιμή Μονάδος	Ακαθάριστο Εισόδημα	Αποσβέσεις	Φορολογητέο Εισόδημα	Φορολογία	Ονομαστικές	ΚΠΑ			
0							7693,76	105,00€								-	2.450.000,00€
1	1.115.000,00€	108.110,90€	63.000,00€	45.110,90€	1.004.889,10€	100,0%	7693,76	105,00€	807.845,31€	164.907,19€	527.938,12€	230.572,15€	354.162,25€	347.217,89€	-	2.102.782,11€	
2	1.117.300,00€	108.110,90€	60.293,35€	47.817,56€	957.071,54€	98,5%	7578,36	105,00€	795.727,63€	164.907,19€	513.820,44€	224.084,20€	346.232,53€	332.787,90€	-	1.769.994,21€	
3	1.119.646,00€	108.110,90€	57.424,29€	50.886,61€	906.384,93€	97,0%	7462,95	105,00€	783.609,95€	164.907,19€	499.056,76€	217.575,54€	338.277,50€	318.766,45€	-	1.451.227,76€	
4	1.122.038,92€	108.110,90€	54.383,10€	53.727,81€	852.657,13€	95,5%	7347,55	105,00€	771.492,27€	164.907,19€	484.546,16€	211.045,77€	330.296,67€	305.143,07€	-	1.146.084,69€	
5	1.124.479,70€	108.110,90€	51.159,43€	56.951,47€	795.705,65€	94,0%	7232,14	105,00€	759.374,59€	164.907,19€	469.987,70€	204.494,47€	322.289,52€	291.907,55€	-	854.177,14€	
6	1.126.969,29€	108.110,90€	47.742,34€	60.368,56€	735.337,09€	92,5%	7116,73	105,00€	747.256,91€	164.907,19€	455.380,43€	197.921,19€	314.255,52€	279.049,91€	-	575.127,23€	
7	1.129.508,68€	108.110,90€	44.120,23€	63.990,68€	671.346,41€	91,0%	7001,33	105,00€	735.139,23€	164.907,19€	440.723,36€	191.325,51€	306.194,14€	266.560,42€	-	308.566,81€	
8	1.132.098,85€	108.110,90€	40.280,78€	67.830,12€	603.516,29€	89,5%	6885,92	105,00€	723.021,55€	164.907,19€	426.015,51€	184.706,98€	298.104,82€	254.429,59€	-	54.137,22€	
9	1.134.740,83€	108.110,90€	36.210,98€	71.899,97€	531.616,37€	88,0%	6770,51	105,00€	710.903,87€	164.907,19€	411.255,85€	178.065,13€	289.987,01€	242.648,15€	-	188.510,94€	
10	1.137.435,65€	108.110,90€	31.896,98€	76.213,97€	455.402,45€	86,5%	6655,11	105,00€	698.786,19€	164.907,19€	396.443,36€	171.399,51€	281.840,13€	231.207,07€	-	419.718,01€	
11	1.140.184,36€	108.110,90€	27.324,15€	80.786,76€	374.615,69€	85,0%	6539,70	105,00€	686.668,51€	164.907,19€	381.576,96€	164.709,63€	273.663,62€	220.097,53€	-	639.815,54€	
12	1.142.988,05€	108.110,90€	22.476,94€	85.633,96€	288.981,73€	83,5%	6424,29	105,00€	674.550,83€	164.907,19€	366.655,60€	157.995,02€	265.456,87€	209.310,93€	-	849.126,47€	
13	1.145.847,81€	108.110,90€	17.339,90€	90.772,00€	198.209,74€	82,0%	6308,89	105,00€	662.433,15€	164.907,19€	351.678,16€	151.255,17€	257.219,77€	198.838,86€	-	1.047.965,33€	
14	1.148.764,76€	108.110,90€	11.892,58€	96.218,32€	101.991,42€	80,5%	6193,48	105,00€	650.315,47€	164.907,19€	336.643,57€	144.489,58€	248.950,72€	188.673,16€	-	1.236.638,49€	
15	1.151.740,06€	108.110,90€	6.119,49€	101.991,47€	0,00€	79,0%	6078,07	105,00€	638.197,79€	141.299,35€	345.158,38€	148.321,27€	230.025,56€	170.912,38€	-	1.407.550,87€	
16	1.154.774,86€					77,5%	5962,67	105,00€	626.080,11€		471.305,25€	205.087,36€	266.217,89€	193.925,31€	-	1.601.476,18€	
17	1.157.870,36€					76,0%	5847,26	105,00€	613.962,43€		456.092,08€	198.241,43€	257.850,64€	184.147,28€	-	1.785.623,45€	
18	1.161.027,76€					74,5%	5731,85	105,00€	601.844,75€		440.816,99€	191.367,65€	249.449,34€	174.654,30€	-	1.960.277,75€	
19	1.164.248,37€					73,0%	5616,45	105,00€	589.727,07€		425.478,76€	184.465,44€	241.013,32€	165.438,95€	-	2.125.716,70€	
20	1.167.533,28€					71,5%	5501,04	105,00€	577.609,39€		410.076,11€	177.534,25€	232.544,86€	156.494,01€	-	2.282.210,71€	
21	1.170.883,95€					70,0%	5385,64	105,00€	565.491,71€		394.607,76€	170.573,49€	224.034,27€	147.812,39€	-	2.430.023,10€	
22	1.174.301,63€					68,5%	5270,23	105,00€	553.374,04€		379.072,41€	163.582,58€	215.489,82€	139.387,23€	-	2.569.410,33€	
23	1.177.787,66€					67,0%	5154,82	105,00€	541.256,36€		363.468,69€	156.560,91€	206.907,78€	131.211,79€	-	2.700.622,13€	
<b>Σύνολο</b>		1.621.663,53€	571.663,53€	1.050.000,00€	8.477.725,54€		147758,75		15.514.669,12€	2.450.000,00€		4.225.374,26€	6.350.460,56€	5.150.622,13€			

Πίνακας 6.6: Πίνακας ταμειακών ρών για την αιολική εγκατάσταση - Περίπτωση 1.

### 6.3.3 Οικονομική διαχείριση : Περίπτωση 2<sup>η</sup> :

Τελικώς εξετάζεται η περίπτωση της αντικατάστασης της ανεμογεννήτριας μετά το πέρας του χρόνου ζωής της. Λαμβάνεται λοιπόν ο χρόνος ζωής όλων των έργων ίσος με  $n = 45,6 \cong 46$  έτη και θεωρείται προεξοφλητικό επιτόκιο ίσο με 4%. Σαν έξοδα λογίζονται το κόστος αγοράς και εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας, καθώς και αυτό της αντικατάστασής της, το οποίο ανάγεται σε σημερινές τιμές σύμφωνα με την σχέση (6.7) :  $P = \frac{2,8 \text{ εκατομμύρια } \text{€}}{(1+1\%)^{22,8}} = 2,23 \text{ εκατομμύρια } \text{€}$ , που συνολικά ανέρχεται στα 5,73 εκατομμύρια €, από τα οποία το 30% = 1,72 εκατομμύρια €, επιδοτείται από το κράτος, το 40% = 2,29 εκατομμύρια € καλύπτεται από ίδια κεφάλαια και το υπόλοιπο 30% = 1,72 εκατομμύρια € από δανειακά. Συνυπολογίζονται επίσης τα ετήσια έξοδα συντήρησης με κόστος 115 χιλιάδες €/έτος και το δάνειο που αποπληρώνεται στην τράπεζα μέσα σε 15 χρόνια με ύψος δόσης  $\approx 155$  χιλιάδες €/έτος.

Τα αντίστοιχα ετήσια έσοδα που ανέρχονται από την πώληση της ενέργειας που παράγεται ανέρχονται σε 105 €/MWh.

Το δάνειο θα αποπληρωθεί σε 15 χρόνια, η δόση του, για το δανειακό κεφάλαιο, οι τόκοι και το χρεολύσιο σε ετήσια βάση υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.4), (6.5) και (6.6) αντίστοιχα. Ο ετήσιος πληθωρισμός θεωρείται ίσος με 2% και επηρεάζει τις ετήσιες χρηματοροές, οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν στην παρούσα αξία τους. Πιο συγκεκριμένα, επηρεάζονται τα ετήσια έξοδα συντήρησης, όπως και η ετήσιες ταμιακές ροές και οι τιμές τους σε παρούσα αξία υπολογίζονται σύμφωνα με την σχέση (6.3). Οι αποσβέσεις για ωφέλιμο χρόνο ζωής 46 χρόνια και συντελεστή απόσβεσης 4% γίνονται για 21 χρόνια. Ο στρόβιλος της ανεμογεννήτριας κάθε χρόνο χάνει το 1,5% της απόδοσής του. Η ονομαστική ταμειακή ροή του έτους προκύπτει αν αφαιρέσουμε από τα ακαθάριστα έσοδα τους φόρους, τα συνολικά έξοδα και τις αποσβέσεις και η παρούσα αξία της αν εφαρμόσουμε τον σχέση (6.7). Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε :

Πληθωρισμός	2%
Συνολικό κόστος έργων	5.731.007,69 €
Επιχορήγηση	1.719.302,31 €
Δάνειο	1.719.302,31 €
Ίδια κεφάλαια	2.292.403,08 €
Συνολικό κόστος χωρίς την επιχορήγηση	4.011.705,39 €
Χρόνια Αποπληρωμής Δανείου	30
Επιτόκιο Δανείου	6%
Προεξοφλητικό Επιτόκιο	4%
Χρήσιμος Χρόνος Ζωής (έτη)	46

Πίνακας 6.7: Δεδομένα επένδυσης αιολικής εγκατάστασης - Περίπτωση 2.

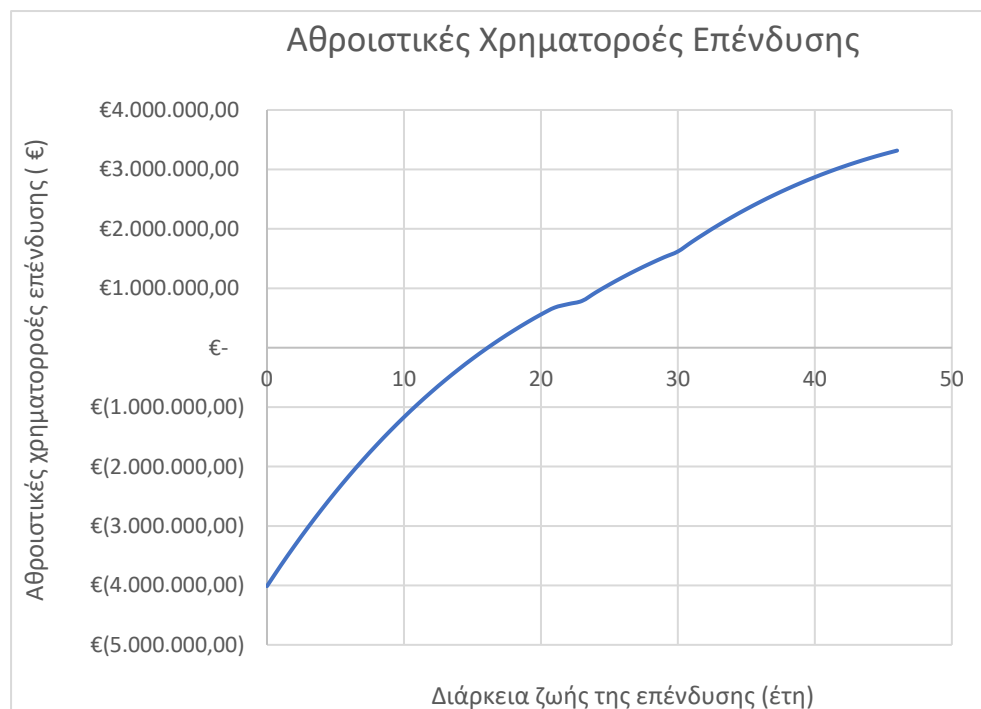
Όπως διαπιστώνεται από τις ετήσιες ταμειακές και αθροιστικές ροές που παρουσιάζονται παρακάτω, η επένδυση θα καταφέρει να αποσβέσει τα χρήματα της

επένδυσης μέσα στον ωφέλιμο χρόνο ζωής της, και μάλιστα στα 17 πρώτα χρόνια λειτουργίας. Ο αντίστοιχος συντελεστής δυναμικότητας είναι :

$$CF = \frac{304.340,74 \text{ MWh}}{3 \text{ MW} \times 400.000 \text{ h}} = 25,3\%$$

υψηλότερος δηλαδή σε σχέση με τον παγκόσμιο συντελεστή δυναμικότητας.

Το αντίστοιχο διάγραμμα αθροιστικών χρηματοροών είναι το εξής :



Σχήμα 6.17: Αθροιστικές χρηματικές ροές για την αιολική εγκατάσταση - Περίπτωση 2.

Για να έβγαινε η επένδυση οριακά χωρίς ζημία, δηλαδή οι αθροιστικές χρηματοροές να έβγαιναν οριακά μηδέν, θα έπρεπε να παραχθούν συνολικά 215.055 MWh, δηλαδή συντελεστή δυναμικότητας:

$$CF = \frac{215.055,5 \text{ MWh}}{3 \text{ MW} \times 400.000 \text{ h}} = 17,9\%$$

Τέλος, από τις 100 συνθετικές χρονοσειρές που παρήχθησαν, βρέθηκε για πόσες από αυτές η επένδυση δεν θα είχε ζημία. Με άλλα λόγια, βρέθηκε η πιθανότητα η ανεμογεννήτρια να παραγάγει περισσότερη ενέργεια από 215.055 MWh. Αυτή η πιθανότητα, για την 2<sup>η</sup> περίπτωση και τις 400.000 ώρες είναι 73,3%. Άρα η επένδυση έχει 73,3% πιθανότητα να είναι κερδοφόρα.





## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Στην παρούσα εργασία, διερευνήθηκαν οι στατιστικές ιδιότητες της μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου σε ωριαία και μηνιαία κλίμακα, με ωριαίο βήμα και εισήχθη μια νέα κατανομή (PBF), ικανή να περιγράψει επαρκώς, την ωριαία ταχύτητα του ανέμου. Η καλή προσαρμογή της κατανομής σε επίπεδο υποπεριόδου, συγκεκριμένο μήνα και ώρα, ελέγχεται με την χρήση και εφαρμογή δεικτών στατιστικής ανάλυσης και δοκιμών προσαρμογής. Με στόχο την μοντελοποίηση της ταχύτητας του ανέμου, γίνεται χρήση μοντέλων διπλής κυκλοστασιμότητας που προσομοιάζουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό την διπλή περιοδικότητα που παρουσιάζει η μεταβλητή του ανέμου. Με την αξιοποίηση των μοντέλων αυτών, γενικεύεται η μεταβλητή για κάθε υποπερίοδο σε παγκόσμια κλίμακα, καταφέροντας έτσι επίσης να μειωθούν οι μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν την μεταβλητή για κάθε υποπερίοδο. Επιπροσθέτως, ελέγχεται η στοχαστική δομή της ωριαίας ταχύτητας του ανέμου με την χρήση του κλιμακογράμματος και προκύπτει ότι η διεργασία, ακολουθεί μια δυναμική συμπεριφορά μακροπρόθεσμης εμμονής Hurst-Kolmogorov, αφού η παράμετρος Hurst υπολογίστηκε κατά μέσο όρο ίση με 0,9. Ωστόσο, για την στοχαστική δομή της ταχύτητας του ανέμου, εξαιτίας και της τύρβης που τον διέπει, υποτέθηκε ένα μοντέλο που αποτελείται από το άθροισμα δύο εξίσου σταθμισμένων διαδικασιών, μίας ΗΗΚ και μίας Markov. Γνωρίζοντας συνεπώς, όλα τα προαναφερόμενα στοιχεία και τις δομές, που απαρτίζουν την μεταβλητή της ταχύτητας του ανέμου, δημιουργήθηκε ένα ψεύδο-κυκλοστάσιμο μοντέλο αναπαραγωγής συνθετικών χρονοσειρών. Το μοντέλο εφαρμόστηκε και αποδεικνύεται ότι διατηρεί, σταθερή την κατανομή της διεργασίας σε μηνιαίο και ωριαίο επίπεδο, τις τέσσερις πρώτες κεντρικές ροπές καθώς και την παράμετρο Hurst που εκφράζει την μακροπρόθεσμη εμμονή και συσχέτιση. Τέλος, παρήχθησαν συνθετικές χρονοσειρές για όλες τις κατανομές που εξετάζονται, και για την πλέον κατάλληλη εξετάστηκε η οικονομική διαχείριση μίας αιολικής εγκατάστασης γύρω από το Ελληνικό νομικό και φορολογικό πλαίσιο, καθώς και την πιθανότητα η τελευταία να είναι κερδοφόρα, στον ωφέλιμο χρόνο της οικονομικής ζωής της, καθιστώντας μία τέτοια επένδυση κερδοφόρα.





## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

### Ξενόγλωσση

- A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series** [Article] / auth. Koutsoyiannis D. // Water Resources Research. - 2000. - VOL. 36. - pp. 1519–1533.
- A stochastic investigation of the intermittent behaviour of wind; application to renewable energy resources management** [Book] / auth. Akis Gkolemis Panayiotis Dimitriadis, Georgios Karakatsanis, Theano Iliopoulou, and Demetris Koutsoyiannis. - 2018.
- A stochastic model for the hourly solar radiation process for application in renewable resources management** [Article] / auth. Giannis Koudouris Panayiotis Dimitriadis, Theano Iliopoulou, Nikos Mamassis, and Demetris Koutsoyiannis. - [s.l.] : Advances in Geosciences, August 14, 2018. - Adv. Geosci., 45, 139–145, 2018. - Vol. 45. - pp. 139–145.
- An analysis of observed daily maximum wind gusts in the UK** [Article] = J. WindEng.Ind.Aerodyn.99 (2011) 845–856 / auth. Richard Hewston StephenR.Dorling // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. - [s.l.] : Elsevier, June 28, 2011. - Vol. 99 (2011). - pp. 845–856.
- Application of stochastic methods to double cyclostationary processes for hourly wind speed simulation** [Article] / auth. Koutsoyiannis Panayiotis Dimitriadis and Demetris // Energy Procedia. - [s.l.] : Elsevier, 2015.
- Climacogram versus autocovariance and power spectrum in stochastic modelling for Markovian and Hurst–Kolmogorov processes** [Article] / auth. Panayiotis Dimitriadis Demetris Koutsoyiannis // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. - [s.l.] : Springer, January 29, 2015. - Volume 29. - pp. 1649–1669.
- From Fractals to Stochastics: Seeking Theoretical Consistency in Analysis of Geophysical Data** [Article] / auth. Demetris Koutsoyiannis Panayiotis Dimitriadis, Federico Lombardo, and Spencer Stevens // Advances in Nonlinear Geosciences. - [s.l.] : Springer International Publishing, 2018.
- Generic and parsimonious stochastic modelling for hydrology and beyond** [Article] / auth. Koutsoyiannis Demetris // Hydrological Sciences Journal. - 2016. - VOL. 61. - pp. 225–244.
- How does wind farm performance decline with age?** [Article] / auth. Iain Staffell Richard Green // Renewable Energy. - [s.l.] : Elsevier, October 28, 2014. - Vol. 66 (2014). - pp. 775–786.

**Hurst-Kolmogorov dynamics in hydroclimatic processes and in the microscale of turbulence** [Book] / auth. Dimitriadis. - 2017.

**Introduction to Wind Energy Systems; Basics, Technology and Operation** [Book] / auth. Wagner Hermann-Josef, Mathur, Jyotirmay. - [s.l.] : Springer, 2013. - ISBN 978-3-642-32976-0.

**On the long-range dependence properties of annual precipitation using a** [Article] / auth. Hristos Tyrallis Panayiotis Dimitriadis, Demetris Koutsoyiannis, Patrick Enda O'Connell, Katerina Tzouka, Theano Iliopoulou // *Advances in Water Resources*. - [s.l.] : Elsevier, 2018. - Vol. 111 (2018). - pp. 301–318.

**On the Three-Parameter Burr Type XII Distribution and its Application to Heavy Tailed Lifetime Data.** [Article] / auth. Mahmoud K. Okasha Mariam Y. Matter // *Journal of advances in mathematics*. - April 22, 2015. - ISSN 2347-1921.

**Stochastic gust model for design calculations of wind turbines** [Article] / auth. Wim Bierbooms Po-Wen Cheng // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. - [s.l.] : Elsevier, 2002. - Vol. 90 (2002). - pp. 1237–1251.

**Stochastic synthesis approximating any process dependence and distribution** [Article] / auth. Panayiotis Dimitriadis Demetris Koutsoyiannis // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. - [s.l.] : Springer, June 2018. - Volume 32. - pp. 1493–1515.

**Uncertainty, entropy, scaling and hydrological stochasticity. 1. Marginal distributional properties of hydrological processes and state scaling** [Article] / auth. Demetris Koutsoyiannis // *Hydrological Sciences Journal*. - June 2005. - ISSN: 0262-6667.

## Ελληνόγλωσση

Κουτσογιάννης Δ., «*Σημειώσεις Στοχαστικών Μεθόδων στους Υδατικούς Πόρους*», Έκδοση 4, 100 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013

Γ. Κουντούρης, «*Στοχαστική διερεύνηση της χρονικής μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας*», Διπλωματική εργασία, 104 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2017.

Η. Δεληγιάννης, «*Διερεύνηση διπλής κυκλοστασιμότητας ανέμου για εφαρμογή σε στοχαστικά μοντέλα πρόβλεψης*», Διπλωματική εργασία, 119 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2016.

Φ. Μαλτέζος, «Αποτίμηση λειτουργίας φωτοβολταϊκών σταθμών», Διπλωματική εργασία, 121 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2013.

Π. Φιτσιλής, «Εισαγωγή στη διαχείριση έργων», Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων ΤΕΙ Θεσσαλίας, 2015

Τεχνοοικονομική Μελέτη Αιολικού πάρκου στην Πελοπόννησο, προμελέτη σκοπιμότητας στα πλαίσια του έργου «Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Υποστήριξη των Ενεργειακών Πολιτικών σε Τοπικό Επίπεδο»

Ν. 4254/2014 «Μέτρα στήριξης και ανάπτυξης της ελληνικής οικονομίας στο πλαίσιο εφαρμογής του Ν. 4046/2012 και άλλες διατάξεις» ΦΕΚ Α' 85/07.04.2014

Ν.3752/2009 «Τροποποιήσεις επενδυτικών νόμων και άλλες διατάξεις», ΦΕΚ Α' 40/4.3.2009

Ν. 3299/2004 «Κίνητρα Ιδιωτικών Επενδύσεων για την Οικονομική Ανάπτυξη και την Περιφερειακή Σύγκλιση»

Ν.4110/2013 «Ρυθμίσεις στη φορολογία εισοδήματος, ρυθμίσεις θεμάτων αρμοδιότητας Υπουργείου Οικονομικών και λοιπές διατάξεις.», (ΦΕΚ Α' 17)

## Ηλεκτρονικές Ιστοσελίδες

<https://www.ncdc.noaa.gov/> (National Centres for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)

<https://www.wikipedia.org/> (Wikipedia)

<https://www.google.com/maps> (Google maps)

<https://www.mathworks.com/help/matlab/> (Matlab help)

<https://www.eia.gov/> (U.S. Energy Information Administration (EIA))

<http://www.ypeka.gr/> (Υπουργείο περιβάλλοντος ενέργειας και κλιματικής αλλαγής ΥΠΕΚΑ)

<https://www.minfin.gr/web/31511/phorologika-themata> (Υπουργείο Οικονομικών)

<http://www.itia.ntua.gr/el/> (Ερευνητική Ομάδα Ιτιάς)

<https://www.enercon.de/home/> (Enercon)

<https://www.imf.org/external/index.htm> (Διεθνές Νομισματικό Ταμείο - IMF)

<http://www.renewablesfirst.co.uk/>

<https://www.wind-energy-the-facts.org/>