



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΙΤΛΟ:

**«ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ  
ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ»**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ, ΔΡ.ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

**ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ, ΔΡ.ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ**

**ΣΟΦΙΑ ΕΦΡΑΙΜΙΑ ΒΡΕΤΤΟΥ**

**ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2022**





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΙΤΛΟ:

**«ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ  
ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ»**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ, ΔΡ.ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

**ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ, ΔΡ.ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ**

**ΣΥΝΤΑΚΤΗΣ: ΣΟΦΙΑ ΕΦΡΑΙΜΙΑ ΒΡΕΤΤΟΥ**

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δοκιμή αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2022



## Ευχαριστίες

Με την παρούσα εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος των σπουδών μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η φοίτηση στη σχολή αυτή αν και απαιτητική σίγουρα μου προσέφερε πολλά εφόδια και έπαιξε σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της προσωπικότητάς μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κουτσογιάννη, επιβλέπων αυτής της εργασίας, ο οποίος ήταν η αφορμή για την ενασχόλησή μου με τις στοχαστικές μεθόδους, καθώς μέσω του μαθήματος Στοχαστικές μέθοδοι του 10<sup>ου</sup> εξαμήνου αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για μένα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημητριάδη Παναγιώτη, συνεπιβλέπων αυτής της εργασίας, για την απεριόριστη βοήθεια, στήριξη και άμεση απόκρισή του κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Με την προτροπή του κ. Δημητριάδη επίσης, συμμετείχα στο διεθνές συνέδριο EGU παρουσιάζοντας εργασία συνέχεια της οποίας αποτελεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Φοίβο Σαργέντη, Θεανώ Ηλιοπούλου και τον διδακτορικό φοιτητή Μάρκο Αλεξόπουλο για τις πολύτιμες συμβουλές τους τόσο για το συνέδριο του EGU όσο και για την παρούσα εργασία.

Τέλος, η παρούσα εργασία δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την βοήθεια του Γιώργου Σταγιάννη, ο οποίος μου παρείχε την κατάλληλη υλικοτεχνική υποδομή για την διεξαγωγή του υπολογιστικού μέρους της εργασίας, και χωρίς την στήριξη και την συμπαράσταση της οικογένειας και των φίλων μου.



# «ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΚΑΙ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ»

## Περίληψη

Η τάση για απομάκρυνση από τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει- μεταξύ των άλλων εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας- στην ραγδαία αύξηση παραγωγής ενέργειας μέσω των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Όσον αφορά στον δομοστατικό σχεδιασμό των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, τα διεθνή πρότυπα προτείνουν χρήση δυναμικών μοντέλων, που κάνουν χρήση μικρού μήκους προσομοίωσης, για τον υπολογισμό των δυνάμεων. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των δυνάμεων με τη βοήθεια στοχαστικών μεθόδων, και η σύγκριση της στοχαστικής προσομοίωσης, ως μεθόδου σχεδιασμού, με τις προτεινόμενες από τα πρότυπα μεθόδους.

Αρχικά, όσον αφορά στην ανάλυση των δεδομένων, επιλέγεται για μελέτη η μεγαλύτερη διαθέσιμη χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου, υψών και περιόδου κύματος, η οποία αφορά καταγραφές στον κόλπο της Αλάσκας. Με χρήση κατάλληλων ντετερμινιστικών εξισώσεων υπολογίζονται οι χρονοσειρές των δυνάμεων οφειλόμενων στα αεροδυναμικά και στα υδροδυναμικά φορτία. Παράλληλα, υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά, οι εποχικές περιοδικότητες και διαμορφώνονται οι κατανομές των χρονοσειρών των δυνάμεων. Στις κατανομές προσαρμόζεται η θεωρητική κατανομή Pareto-Burr-Feller και υπολογίζονται οι τέσσερις πρώτες ροπές από τις παραμέτρους της θεωρητικής κατανομής.

Στη συνέχεια, για την στοχαστική ανάλυση του φαινομένου, μελετάται η δομή συσχέτισης των δυνάμεων μέσω του κλιμακογράμματος. Στα κλιμακογράμματα των δυνάμεων προσαρμόζονται τα στοχαστικά μοντέλα HK (Hurst-Kolmogorov), GHK (Generalized Hurst-Kolmogorov), και HHK (Hybrid Hurst-Kolmogorov). Καλύτερη προσαρμογή εμφανίζει το μοντέλο GHK.

Τέλος, για την πραγματοποίηση της στοχαστικής προσομοίωσης χρησιμοποιείται το μοντέλο GHK στο σχήμα SMA (Symmetric-Moving-Average). Ως παράμετροι εισόδου στο μοντέλο χρησιμοποιούνται οι παράμετροι που προέκυψαν από την προσαρμογή του μοντέλου GHK στο εμπειρικό κλιμακόγραμμα και οι τέσσερις πρώτες στατιστικές ροπές που προέκυψαν από την προσαρμογή της κατανομής PBF στην εμπειρική κατανομή. Επιπλέον, εξετάζεται η προσαρμογή των δεδομένων της προσομοίωσης στα εμπειρικά κλιμακογράμματα και κατανομές, και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα από τις προτεινόμενες από τα πρότυπα μεθόδους.



# “STOCHASTIC SIMULATION OF STRESSES CAUSED BY WIND AND WAVES TO OFFSHORE WIND TURBINES”

## Abstract

The tendency to avoid nonrenewable energy resources in recent years has led- among other alternative modes of energy production- to the rapid development of offshore wind farms. With regard to the structural design, international standards suggest using dynamic models, which use short-term simulations, to calculate the forces exerted on offshore wind turbines. This thesis aims to model the behavior of the forces by using stochastic methods, and compare the stochastic simulation method to the method proposed by the international standards.

Initially, in terms of data analysis, we use the largest available time series of wind speed, wave height and period which includes recordings in the Gulf of Alaska. By using the appropriate deterministic equations, we calculate the time series of forces due to aerodynamic and hydrodynamic loads. Moreover, we calculate the statistic moments, the periodicity and form the distribution of the time series of the forces. The empirical distributions are fitted to the theoretical distribution Pareto-Burr-Feller and by using the parameters of the fitting we calculate the four central moments.

Then, regarding the stochastic analysis, we study the correlation structure of data by using the climacogram. The stochastic models HK, GHK, HHK are fitted to the empirical climacogram with model GHK having the best fit.

Finally, in order to conduct the stochastic simulations we use the GHK model in the SMA scheme. As input parameters we use the parameters resulting from the fitting of the GHK model to the empirical climacogram and the first four moments resulting from the fitting of the PBF distribution to the empirical one. In addition, we examine the fitting of the results of the simulation to the empirical climacogram and

distribution and we compare the results of the simulation with the results of the proposed methods.

## Περιεχόμενα

|  |  |
|--|--|
| Ευχαριστίες.....   | 4  |
| Abstract.....  | 8  |
| Κατάλογος εικόνων.....   | <b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b> |
| Κατάλογος πινάκων .....  | 15   |
| 1 Εισαγωγή .....   | 16   |
| 2 Ισχύουσες μέθοδοι σχεδιασμού .....   | 19   |
| 3 Θεωρητικό υπόβαθρο .....   | 24   |
| 3.1 Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες .....  | 24   |
| 3.1.1 Η εξέλιξη των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και τα πλεονεκτήματά τους<br>24 |  |
| 3.1.2 Φορτία υπεράκτιων ανεμογεννητριών .....                                  | 27   |
| 3.1.3 Δομικά μέλη υπεράκτιων ανεμογεννητριών.....                              | 27   |
| 3.1.4 Έδραση υπεράκτιων ανεμογεννητριών.....                                   | 30   |
| 3.1.5 Υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Ελλάδα.....                                 | 36   |
| 3.2 Άνεμος.....  | 39   |
| 3.3 Κύματα .....   | 43   |
| 3.4 Μετατροπή γενεσιουργών παραγόντων σε δυνάμεις .....                        | 47   |
| 3.4.1 Υδροδυναμικά φορτία .....  | 48   |
| 3.4.2 Αεροδυναμικά φορτία .....  | 57   |
| 4 Ανάλυση δεδομένων .....  | 63   |
| 4.1 Κριτήρια επιλογής και πηγή άντλησης δεδομένων .....                        | 63   |
| 4.2 Χρονοσειρές δεδομένων.....   | 65   |
| 4.2.1 Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου .....  | 65   |
| 4.2.2 Χρονοσειρές ύψους και περιόδου κύματος.....                              | 68   |
| 4.3 Χρονοσειρές δυνάμεων .....   | 70   |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.3.1 | Χρονοσειρά δύναμης λόγω ανέμου .....                              | 71  |
| 4.3.2 | Χρονοσειρά δύναμης λόγω κύματος.....                              | 72  |
| 5     | Στατιστική ανάλυση.....   | 74  |
| 5.1   | Στατιστικές ροπές.....  | 74  |
| 5.2   | Μοντέλα περιοδικότητας.....                                       | 75  |
| 5.3   | Προσαρμογή γνωστών κατανομών.....                                 | 78  |
| 6     | Στοχαστική ανάλυση .....  | 86  |
| 6.1   | Στοχαστικές ανελίξεις.....  | 86  |
| 6.1.1 | Ανέλιξη λευκού θορύβου .....                                      | 87  |
| 6.1.2 | Ανέλιξη Markov.....   | 88  |
| 6.1.3 | Ανέλιξη Hurst- Kolmogorov .....                                   | 88  |
| 6.2   | Κλιμακογράμματα .....   | 88  |
| 6.3   | Προσαρμογή γνωστών στοχαστικών μοντέλων στα κλιμακογράμματα ..... | 91  |
| 6.4   | Στοχαστική σύνθεση .....  | 95  |
| 7     | Συμπεράσματα - Προτάσεις για βελτίωση.....                        | 103 |
| 8     | Βιβλιογραφία.....   | 108 |

## Κατάλογος εικόνων

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 2.1: Συνδυασμοί φόρτισης .....  | 20 |
| Εικόνα 2.2: Επεξήση συμβόλων εικόνας 2.1 .....   | 21 |
| Εικόνα 3.1: Εξέλιξη του μεγέθους των ανεμογεννητριών.....  | 25 |
| Εικόνα 3.2: Αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο .....  | 26 |
| Εικόνα 3.3: Κατασκευή στήριξης ανεμογεννήτριας .....   | 28 |
| Εικόνα 3.4: Πτερύγια ανεμογεννήτριας .....   | 29 |
| Εικόνα 3.5: Δομικά μέλη ανεμογεννήτριας (www.google.com) .....   | 30 |
| Εικόνα 3.6: Gravity based θεμελίωση (Πηγή: Seatower AS).....   | 31 |
| Εικόνα 3.7: Είδη έδρασης υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Από αριστερά: monopile, jacket, twisted jacket, tension-leg floating platform, semi-submersible platform, and spar-buoy. (Πηγή: Josh Bauer/NREL)..... | 32 |
| Εικόνα 3.8: Διάταξη τριπόδου .....   | 34 |
| Εικόνα 3.9: Ύφαλος σε θεμελίωση τύπου jacket.....  | 35 |
| Εικόνα 3.11: Ανεμόμετρο κυπέλλου (πηγή: www.google.gr) .....   | 40 |
| Εικόνα 3.12: Ανεμόμετρο έλικας (πηγή: www.noaa.com) .....  | 41 |
| Εικόνα 3.13: Ανεμόμετρο θερμού σύρματος (πηγή: www.google.com) .....   | 42 |
| Εικόνα 3.14: Ανεμόμετρο Doppler (πηγή: PN Paranicolaou 2017) .....   | 42 |
| Εικόνα 3.15: Ανεμόμετρο υπερήχων .....   | 43 |
| Εικόνα 3.16: Επίδραση δυνάμεων Coriolis.....   | 44 |
| Εικόνα 3.17: Βασικά χαρακτηριστικά κύματος .....   | 45 |
| Εικόνα 3.18: Αλτίμετρο σε δορυφόρο .....   | 46 |
| Εικόνα 3.19: Καταγραφείς πίεσης .....  | 47 |
| Εικόνα 3.20: Κατανομή δύναμης λόγω κύματος.....  | 49 |
| Εικόνα 3.21: Σχέση μεταξύ περίθλασης, δύναμης αδρανείας, οπισθέλκουσας .....   | 50 |
| Εικόνα 3.22: Συντελεστής $\psi$ συναρτήσει $KC/C_{Ds}$ για λείες (συνεχής γραμμή) και τραχείς (διακεκομμένη γραμμή) επιφάνειες. ....   | 54 |
| Εικόνα 3.23: Δυνάμεις που υπολογίστηκαν από την εξίσωση Morison .....  | 56 |
| Εικόνα 3.24: Τύποι υπολογισμού κυμάτων.....  | 57 |
| Εικόνα 3.25: Κατανομή ταχύτητας καθ' ύψος της ανεμογεννήτριας .....  | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 3.26:Συντελεστής C για διάφορες τραχύτητες (Πηγή: DNV RECOMENDED PRACTISE).....                                      | 61 |
| Εικόνα 4.1: Μετρητικός σταθμός .....  | 63 |
| Εικόνα 4.2: Θέση σταθμού μέτρησης.....  | 64 |
| Εικόνα 4.3:Χρονοσειρά ωριαίας ταχύτητας ανέμου ετών 1972-2021.....  | 66 |
| Εικόνα 4.4: Εσφαλμένες καταγραφές ταχύτητας ανέμου .....  | 67 |
| Εικόνα 4.5:Χρονοσειρά ωριαίας ταχύτητας ανέμου Οκτώβριος 1974 .....   | 67 |
| Εικόνα 4.6:Χρονοσειρά ωριαίου ύψους κύματος Hs ετών 1972-2021.....  | 68 |
| Εικόνα 4.7: Χρονοσειρά ωριαίου ύψους κύματος Οκτώβριος 1974 .....   | 69 |
| Εικόνα 4.8: Χρονοσειρά ωριαίας περιόδου κύματος T <sub>p</sub> ετών 1972-2021.....  | 69 |
| Εικόνα 4.9: Χρονοσειρά ωριαίας περιόδου κύματος Οκτώβριος 1974 .....  | 70 |
| Εικόνα 4.10:Χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω ανέμου ετών 1972-2021.....  | 71 |
| Εικόνα 4.11:Χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω ανέμου Οκτώβριος 1974 .....   | 71 |
| Εικόνα 4.12:Χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω κύματος ετών 1972-2021 .....  | 72 |
| Εικόνα 4.13:Χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω κύματος Οκτώβριος 1974.....   | 72 |
| Εικόνα 5.1:Περιοδικότητα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης δύναμης λόγω ανέμου .....  | 76 |
| Εικόνα 5.2:Περιοδικότητα ασυμμετρίας και κύρτωσης δύναμης λόγω ανέμου .....   | 76 |
| Εικόνα 5.3: Περιοδικότητα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης δύναμης λόγω κύματος .....                                      | 77 |
| Εικόνα 5.4:Περιοδικότητα ασυμμετρίας και κύρτωσης δύναμης λόγω ανέμου .....   | 78 |
| Εικόνα 5.5:Πιθανότητα υπέρβασης δύναμης λόγω ανέμου.....  | 81 |
| Εικόνα 5.6: Πιθανότητα υπέρβασης δύναμης λόγω κύματος .....   | 81 |
| Εικόνα 5.7:Προσαρμογή PBF στην εμπειρική συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης της δύναμης λόγω ανέμου.....                       | 83 |
| Εικόνα 5.8:Προσαρμογή PBF στην εμπειρική συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης της δύναμης λόγω κύματος .....                     | 84 |
| Εικόνα 6.1:Παράδειγμα ανέλιξης σε συνεχή και σε διακριτό χρόνο .....  | 87 |
| Εικόνα 6.2:Κλιμακογράμματα ύψους και περιόδου κύματος, ταχύτητας ανέμου, δύναμης λόγω ανέμου και δύναμης λόγω κύματος. .... | 90 |
| Εικόνα 6.3:Προσαρμογή γνωστών μοντέλων στο κλιμακόγραμμα της δύναμης λόγω ανέμου .....                                      | 93 |

|  |     |
|--|-----|
| Εικόνα 6.4:Προσαρμογή γνωστών μοντέλων στο κλιμακόγραμμα της δύναμης λόγω κύματος.....   | 94  |
| Εικόνα 6.5: Συνθετική χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω ανέμου .....   | 99  |
| Εικόνα 6.6: Συνθετική χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω κύματος.....   | 99  |
| Εικόνα 6.7:Κλιμακόγραμμα εμπειρικής και συνθετικής χρονοσειράς δύναμης λόγω ανέμου .....   | 100 |
| Εικόνα 6.8:Κατανομή συνθετικής, εμπειρικής και θεωρητικής χρονοσειράς δύναμης λόγω ανέμου.....   | 100 |
| Εικόνα 6.9:Κλιμακόγραμμα εμπειρικής και συνθετικής χρονοσειράς δύναμης λόγω κύματος.....   | 101 |
| Εικόνα 6.10: Κατανομή συνθετικής, εμπειρικής και θεωρητικής χρονοσειράς δύναμης λόγω κύματος .....   | 101 |
| Εικόνα 7.1: Χρονοσειρά με χρήση μοντέλου AR(1), συντελεστής $H=0,5$ .....  | 104 |
| Εικόνα 7.2: Χρονοσειρά με χρήση του μοντέλου SMA, συντελεστής $H>0,5$ .....  | 104 |
| Εικόνα 7.3:Διαφορές στην τυπική απόκλιση μεταξύ διαφορετικών μοντέλων προσομοίωσης, στον άξονα γ'γ η τυπική απόκλιση της δύναμης λόγω ανέμου, στον χ'χ τα έτη..... | 106 |

## Κατάλογος πινάκων

|  |    |
|--|----|
| Πίνακας 2.1.1: Τιμές συντελεστή ασφαλείας.....   | 23 |
| Πίνακας 3.1 .....  | 39 |
| Πίνακας 3.2: Τιμές συντελεστή τραχύτητας.....  | 53 |
| Πίνακας 4.1: Μεγέθη Monopile για υπολογισμούς δυνάμεων .....                                     | 70 |
| Πίνακας 5.1: Κεντρικές ροπές ταχύτητας ανέμου και δύναμης λόγω αυτού .....                       | 75 |
| Πίνακας 5.2:Κεντρικές ροπές ύψους και περιόδου κύματος και δύναμης που προκύπτει λόγω αυτών..... | 75 |
| Πίνακας 5.3: Περιοδικότητες δύναμης λόγω ανέμου .....  | 77 |
| Πίνακας 5.4: Περιοδικότητες δύναμης λόγω κύματος .....   | 78 |
| Πίνακας 5.5: Συντελεστές PBF για προσαρμογή στη κατανομή δύναμης λόγω ανέμου .....               | 82 |
| Πίνακας 5.6:Στατιστικές ροπές δύναμης λόγω ανέμου από PBF.....                                   | 83 |
| Πίνακας 5.7: Συντελεστές PBF για προσαρμογή στη κατανομή δύναμης λόγω κύματος .....              | 83 |
| Πίνακας 5.8:Στατιστικές ροπές δύναμης λόγω κύματος από PBF .....                                 | 84 |
| Πίνακας 6.1: Παράμετροι Hurst.....   | 91 |
| Πίνακας 6.2:Παράμετροι προσαρμογής μοντέλων στο κλιμακόγραμμα δύναμης λόγω ανέμου .....          | 93 |
| Πίνακας 6.3:Παράμετροι προσαρμογής μοντέλων στο κλιμακόγραμμα δύναμης λόγω κύματος.....          | 95 |



## 1 Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια, γεωθερμική ενέργεια κ.α.)- παρακάτω αναφέρονται ως ΑΠΕ- αποτελούν εναλλακτική λύση αντί των ορυκτών καυσίμων στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η απομάκρυνση από τις ασταθείς και αναξιόπιστες πλέον αγορές ορυκτών καυσίμων, αποτελούν τα σημαντικότερα ίσως πλεονεκτήματα των ΑΠΕ. Η υπεροχή τους και η επερχόμενη ανάπτυξή τους φαίνεται και από την ευνοϊκή νομοθεσία και τους στόχους που τίθενται σε παγκόσμιο επίπεδο αναφορικά με τις ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, στην Ε.Ε. το 2018 τέθηκε ως στόχος μέχρι το 2030 το 32% της ενεργειακής κατανάλωσης της Ευρώπης να προέρχεται από ΑΠΕ, ενώ το 2021 ο στόχος αναθεωρήθηκε στο φιλόδοξο ποσοστό του 40% έως το 2030.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει παρατηρηθεί ραγδαία ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, ο σχεδιασμός και η κατασκευή των οποίων είναι ιδιαίτερα απαιτητικοί και δαπανηροί. Ο άνεμος και τα κύματα είναι οι βασικοί γενεσιουργοί παράγοντες των δυνάμεων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Όπως όλες οι φυσικές διεργασίες, χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα η οποία επιβάλλεται να ληφθεί υπόψη για έναν ασφαλή σχεδιασμό.

Στην διεθνή βιβλιογραφία και στα πρότυπα σχεδιασμού των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, αναφορικά με τα μεγέθη των δυνάμεων σχεδιασμού, γίνεται λόγος για υπολογισμούς μέσω στατικών μοντέλων. Στα στατικά μοντέλα εισάγονται εξισώσεις υπολογισμού των αεροδυναμικών και υδροδυναμικών φορτίων. Για τα δεδομένα του ανέμου και των κυμάτων πραγματοποιούνται μερικές προσομοιώσεις σε κλίμακα δεκαλέπτου. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα στατικά μοντέλα και τα αποτελέσματα δοκιμών προκύπτουν οι δυνάμεις σχεδιασμού.

Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια -απλοποιημένα μεν, ικανοποιητικά (μάλλον) δε- να προσδιοριστούν τα στατιστικά και στοχαστικά χαρακτηριστικά μεγάλου μήκους χρονοσειρών δυνάμεων που οφείλονται στα αεροδυναμικά και υδροδυναμικά φορτία. Μέσω της στατιστικής και στοχαστικής ανάλυσης επιδιώκεται η επεξήγηση της συμπεριφοράς των δυνάμεων και ερευνάται η δυνατότητα πρόβλεψής τους. Επιπλέον, γίνεται στοχαστική προσομοίωση των υπό μελέτη δυνάμεων με σύγχρονη μέθοδο προσομοίωσης και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των προτεινόμενων από τη βιβλιογραφία μεθόδων.

Σε κάθε περίπτωση η πρόγνωση, και η χρήση κατάλληλων μεθόδων για τον υπολογισμό των δυνάμεων που χρησιμοποιούνται στον δομοστατικό σχεδιασμό των υπεράκτιων αιολικών πάρκων αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για τον μελετητή.



## 2 Ισχύουσες μέθοδοι σχεδιασμού

Οι βασικότεροι κανονισμοί και πρότυπα για τον σχεδιασμό των υπεράκτιων ανεμογεννητριών που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία είναι :

- DNV-OS-J101, *Design of Offshore Wind Turbine Structures*
- IEC 61400-3, Wind turbines-Part 3: Design requirements for offshore wind turbines

Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο για τον σχεδιασμό των υπεράκτιων αιολικών πάρκων απαιτείται χρήση ενός μοντέλου στατικού σχεδιασμού για τον υπολογισμό των φορτίων σχεδιασμού. Το στατικό μοντέλο προσδιορίζει τα φορτία σχεδιασμού για ένα εύρος ταχυτήτων ανέμου και υψών κύματος. Σε αυτό το μοντέλο μελετώνται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί φόρτισης και συνθήκες σχεδιασμού.

Οι συνδυασμοί φόρτισης προσδιορίζονται από τον συνδυασμό της επιχειρησιακής λειτουργίας ή άλλων καταστάσεων σχεδιασμού, όπως οι ειδικές συνθήκες συναρμολόγησης ή συντήρησης, με τις εξωτερικές συνθήκες. Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί φόρτισης με εύλογη πιθανότητα εμφάνισης λαμβάνονται υπόψη. Οι περιπτώσεις φορτίου σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση της δομικής ακεραιότητας μιας ανεμογεννήτριας υπολογίζονται συνδυάζοντας (IEC 61400-3):

- κανονικές συνθήκες σχεδιασμού και κανονικές ή ακραίες εξωτερικές συνθήκες.
- καταστάσεις σχεδιασμού σφαλμάτων και κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες
- καταστάσεις σχεδιασμού μεταφοράς, εγκατάστασης και συντήρησης και κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες.

Εάν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ μιας εξαιρετικά ακραίας κατάστασης και μιας κατάστασης σφάλματος, θα πρέπει ως φορτίο σχεδιασμού να λαμβάνεται ένας ρεαλιστικός συνδυασμός των δύο .

| Design situation                               | DL C | Wind condition  | Other conditions  | Type of analysis | Partial safety factors |
|--|------|---|---|------------------|------------------------|
| 1) Power production                            | 1.1  | NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$                              | For extrapolation of extreme events   | U                | N                      |
|  | 1.2  | NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$                              |   | F                | *                      |
|  | 1.3  | ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$                              |   | U                | N                      |
|  | 1.4  | ECD $V_{hub} = V_r - 2 \text{ m/s}, V_r, V_r + 2 \text{ m/s}$ |   | U                | N                      |
|  | 1.5  | EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$                              |   | U                | N                      |
| 2) Power production plus occurrence of fault   | 2.1  | NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$                              | Control system fault or loss of electrical network                                    | U                | N                      |
|  | 2.2  | NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$                              | Protection system or preceding internal electrical fault                              | U                | A                      |
|  | 2.3  | EOG $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ and $V_{out}$           | External or internal electrical fault including loss of electrical network            | U                | A                      |
|  | 2.4  | NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$                              | Control, protection, or electrical system faults including loss of electrical network | F                | *                      |
| 3) Start up                                    | 3.1  | NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$                              |   | F                | *                      |
|  | 3.2  | EOG $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2 \text{ m/s}$ and $V_{out}$   |   | U                | N                      |
|  | 3.3  | EDC $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2 \text{ m/s}$ and $V_{out}$   |   | U                | N                      |
| 4) Normal shut down                            | 4.1  | NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$                              |   | F                | *                      |
|  | 4.2  | EOG $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ and $V_{out}$           |   | U                | N                      |
| 5) Emergency shut down                         | 5.1  | NTM $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ and $V_{out}$           |   | U                | N                      |
| 6) Parked (standing still or idling)           | 6.1  | EWM 50-year recurrence period                                 |   | U                | N                      |
|  | 6.2  | EWM 50-year recurrence period                                 | Loss of electrical network connection   | U                | A                      |
|  | 6.3  | EWM 1-year recurrence period                                  | Extreme yaw misalignment  | U                | N                      |
|  | 6.4  | NTM $V_{hub} < 0,7 V_{ref}$                                   |   | F                | *                      |
| 7) Parked and fault conditions                 | 7.1  | EWM 1-year recurrence period                                  |   | U                | A                      |
| 8) Transport, assembly, maintenance and repair | 8.1  | NTM $V_{maint}$ to be stated by the manufacturer              |   | U                | T                      |
|  | 8.2  | EWM 1-year recurrence period                                  |   | U                | A                      |

Εικόνα 2.1: Συνδυασμοί φόρτισης

| The following abbreviations are used in Table 2: |   |
|--|---|
| DLC  | Design load case  |
| ECD  | Extreme coherent gust with direction change                   |
| EDC  | Extreme direction change                                      |
| EOG  | Extreme operating gust  |
| EWM  | Extreme wind speed model                                      |
| EWS  | Extreme wind shear  |
| NTM  | Normal turbulence model                                       |
| ETM  | Extreme turbulence model                                      |
| NWP  | Normal wind profile model                                     |
| $V_{r\pm 2}$ m/s                                 | Sensitivity to all wind speeds in the range shall be analysed |
| F  | Fatigue   |
| U  | Ultimate strength   |
| N  | Normal  |
| A  | Abnormal  |
| T  | Transport and erection  |
| *  | Partial safety for fatigue                                    |

Εικόνα 2.2: Επεξήση συμβόλων εικόνας 2.1

Η επαλήθευση της επάρκειας του σχεδιασμού γίνεται με υπολογισμό ή / και με δοκιμή. Εάν χρησιμοποιούνται δοκιμές για την επαλήθευση, θα πρέπει οι εξωτερικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της δοκιμής να αντικατοπτρίζουν τις χαρακτηριστικές τιμές και τις καταστάσεις σχεδιασμού που ορίζονται στο πρότυπο σχεδιασμού. Η επιλογή των συνθηκών δοκιμής, συμπεριλαμβανομένων των φορτίων δοκιμής, θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τους κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας.

Επιπλέον επιβάλλεται να επαληθευτεί ότι δεν σημειώνεται υπέρβαση των οριακών τιμών για τη σχεδίαση των ανεμογεννητριών. Οι δοκιμές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο για τον υπολογισμό του δομικού σχεδιασμού, όπως ορίζεται στο πρότυπο ISO 2394.

Η στατική ανάλυση βασίζεται στο πρότυπο ISO 2394. Οι υπολογισμοί εκτελούνται με τη χρήση κατάλληλων μεθόδων. Οι περιγραφές των μεθόδων υπολογισμού θα πρέπει να περιλαμβάνονται στο έντυπο της τεκμηρίωσης του σχεδιασμού. Στο έντυπο τεκμηρίωσης περιλαμβάνονται αποδεικτικά στοιχεία σχετικά με την εγκυρότητα των μεθόδων υπολογισμού ή παραπομπές σε κατάλληλες μελέτες επαλήθευσης.

Τα αεροδυναμικά φορτία είναι στατικά και δυναμικά φορτία που ασκούνται από την ροή του ανέμου στα δομικά μέρη των ανεμογεννητριών. Η φόρτιση εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την πυκνότητα του αέρα και από τα αεροδυναμικά σχήματα των δομικών μελών. Οι εξισώσεις που εισάγονται στο στατικό μοντέλο για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών φορτίων αναλύονται στην παράγραφο 3.4.1 .

Τα υδροδυναμικά φορτία που ασκούνται στον πυλώνα των ανεμογεννητριών προέρχονται από την δύναμη που εισάγουν οι κυματισμοί. Η δύναμη αυτή εξαρτάται από το ύψος και την περίοδο κύματος, από την πυκνότητα του νερού και από τα υδροδυναμικά σχήματα των δομικών μελών. Οι εξισώσεις που εισάγονται στο μοντέλο για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών φορτίων αναλύονται στην παράγραφο 3.4.2 .

Τα φορτία που ασκούνται στις ανεμογεννήτριες υπολογίζονται από στατικά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω και ως δεδομένα χρησιμοποιούν τα αποτελέσματα προσομοιώσεων. Η συνολική περίοδος των δεδομένων φορτίου πρέπει να είναι αρκετή για να εξασφαλίζεται στατιστική αξιοπιστία στην εκτίμηση του χαρακτηριστικού φορτίου. Απαιτούνται τουλάχιστον έξι στοχαστικές προσομοιώσεις σε κλίμακα δεκαλέπτου (ή μία σε κλίμακα μίας ώρας) της ταχύτητας του ανέμου, της περιόδου ή του ύψους κύματος για τον προσδιορισμό των φορτίων μέσω του στατικού μοντέλου.

Οι συντελεστές ασφάλειας λαμβάνουν υπόψη τις αβεβαιότητες και τη μεταβλητότητα των φορτίων και των υλικών, τις αβεβαιότητες στις μεθόδους ανάλυσης και τη σημασία των δομικών στοιχείων όσον αφορά στις συνέπειες της αστοχίας. Για την εξασφάλιση ενός ασφαλούς σχεδιασμού το φορτίο υπολογίζεται ως:

$$F_d = \gamma_f F_k \quad (2.1)$$

Όπου:

$F_d$ : η δύναμη σχεδιασμού

$\gamma_f$ : ο συντελεστής ασφαλείας

$F_k$ : η χαρακτηριστική δύναμη του φορτίου που αντιστοιχεί στην δύναμη η οποία έχει πιθανότητα υπέρβασης 5%.

Πίνακας 2.1.1: Τιμές συντελεστή ασφαλείας

| Δυσμενείς φορτίσεις |                       |                       | Ευμενείς φορτίσεις             |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Κανονικές συνθήκες  | Μη κανονικές συνθήκες | Μεταφορά και ανέγερση | Όλες οι περιπτώσεις σχεδιασμού |
| 1.35                | 1.1                   | 1.5                   | 0.9                            |



### 3 Θεωρητικό υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις έννοιες που θα αναλυθούν στα παρακάτω κεφάλαια. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 3.1 γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά των υπεράκτιων ανεμογεννητριών οι οποίες πρωταγωνιστούν στην παρούσα εργασία. Στα κεφάλαια 3.2 και 3.3 γίνεται αναφορά στα γενεσιουργά μεγέθη - άνεμος και κύμα- των δυνάμεων που θα μελετηθούν παρακάτω. Στα κεφάλαιο 3.4 περιγράφονται οι εξισώσεις μέσω των οποίων υπολογίζονται τα αεροδυναμικά και υδροδυναμικά φορτία.

#### 3.1 Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία αφορά στις δυνάμεις που ασκούνται στον πυλώνα των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και κατ' επέκταση στα υπεράκτια αιολικά πάρκα, κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστούν ορισμένες βασικές έννοιες στον αναγνώστη.

##### 3.1.1 Η εξέλιξη των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και τα πλεονεκτήματά τους

Οι ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις και η ανάγκη για απομάκρυνση από τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οδήγησαν στην ταχύτατη ανάπτυξη εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα εμφανίζουν περισσότερα πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα χερσαία αιολικά. Το διαθέσιμο προς ηλεκτροπαραγωγή αιολικό δυναμικό στη θάλασσα είναι σαφώς μεγαλύτερο απ' ό τι στη στεριά και παράλληλα στη θάλασσα εξαλείφονται ζητήματα αισθητικής και ηχητικής όχλησης. Το γεγονός ότι η συναρμολόγηση γίνεται στη θάλασσα επιτρέπει επίσης την κατασκευή ανεμογεννητριών μεγαλύτερης ισχύος και η διαθεσιμότητα εκτάσεων κατάλληλων για εγκατάσταση αιολικών πάρκων είναι μεγαλύτερη. Τα μειονεκτήματα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων αφορούν κυρίως στο μεγάλο κόστος κατασκευής και εγκατάστασής τους ωστόσο φαίνεται να μπορούν να αντισταθμιστούν από τα πολλαπλά πλεονεκτήματά τους.

Ο τομέας παραγωγής ενέργειας από υπεράκτια αιολικά πάρκα φαίνεται να διαθέτει σημαντικές προοπτικές εξέλιξης και αναμφίβολα θα αποτελέσει βασικό συντελεστή στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας τα επόμενα χρόνια. Αυτό άλλωστε αποδεικνύεται και από την ραγδαία ανάπτυξη του κλάδου τις τελευταίες δεκαετίες.

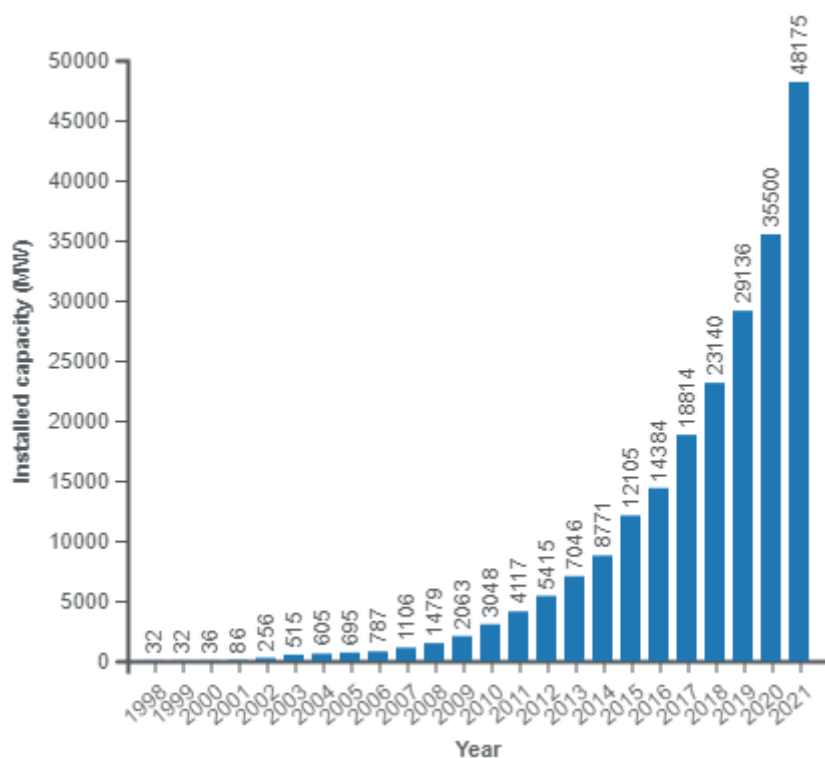


Εικόνα 3.1: Εξέλιξη του μεγέθους των ανεμογεννητριών

Ακολουθεί μία σύντομη ιστορική αναδρομή που αποδεικνύει την ταχύτατη ανάπτυξη αυτού του ενεργειακού κλάδου:

- Το πρώτο αιολικό πάρκο κατασκευάστηκε το 1991 στη Δανία από την Dong Energy (σήμερα Orsted) σε βάθη μεταξύ δύο και πέντε μέτρων. Οι έντεκα ανεμογεννήτριες του πάρκου τροφοδοτούσαν επί 25 χρόνια 2200 νοικοκυριά.
- Μέχρι το 2015, 84 υπεράκτια αιολικά πάρκα είχαν κατασκευαστεί στην Ευρώπη και είχαν συνδεθεί στο σύστημα παράγοντας συνολικά 11027 MW ετησίως.
- Έως και το 2017 η εγκατεστημένη ισχύς των υπεράκτιων αιολικών πάρκων ανερχόταν παγκοσμίως στα 20 GW.
- Το 2020, η υπεράκτια παραγωγική ικανότητα της Ευρώπης ενισχύθηκε κατά 2,9 GW ενώ πλέον παράγονται συνολικά 25 GW από εγκαταστάσεις σε δώδεκα χώρες, χάρη στις 5.000 και πλέον υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.
- Στόχος της ΕΕ είναι μέχρι το 2050 να εξασφαλίσει παραγωγική ικανότητα της τάξεως των 450GW.

Η εκθετική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των υπεράκτιων αιολικών πάρκων μπορεί να παρατηρηθεί και στην εικόνα 3.2:



Εικόνα 3.2: Αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο

Οι πρώτες εγκαταστάσεις υπεράκτιων ανεμογεννητριών απαιτούσαν εύρεση τοποθεσιών με ισχυρό αιολικό δυναμικό και εγγύτητα στην παράκτια ζώνη, καθώς μέχρι πρότινος η έδραση τους περιοριζόταν σε μερικές δεκάδες μέτρα ανάλογα με το είδος της θεμελίωσης (τα είδη της θεμελίωσης αναλύονται στην παράγραφο 3.1.3). Τα τελευταία χρόνια ωστόσο έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία των πλωτών ανεμογεννητριών καθιστώντας περιοχές όπως η Μεσόγειος και η Μαύρη θάλασσα, οι οποίες διαθέτουν μεγάλα βάθη, κατάλληλες για να φιλοξενήσουν πλωτά αιολικά πάρκα. Η σημαντική αυτή διαφοροποίηση στον τρόπο θεμελίωσης ανοίγει νέους ορίζοντες στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ενέργεια του ανέμου, καθώς το μεγαλύτερο βάθος έδρασης συνεπάγεται με μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό προς αξιοποίηση.

### 3.1.2 Φορτία υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια καλείται να αναλάβει πλήθος φορτίων. Τα βασικότερα εξ αυτών είναι:

- ❖ Μόνιμες δράσεις:
  - Βάρος πύργου
  - Βάρος πτερυγίων και ρότορα
  - Υδροστατικές πιέσεις
- ❖ Μεταβλητές δράσεις:
  - Φορτία προσωπικού εγκατάστασης
  - Φορτία γερανού κατά την εγκατάσταση
  - Φορτία λόγω προσέγγισης πλοίων
- ❖ Τυχηματικές δράσεις:
  - Πρόσκρουση πλοίου
  - Πυρκαγιά
  - Έκρηξη
  - Σεισμός
- ❖ Περιβαλλοντικές δράσεις:
  - Αεροδυναμικά φορτία
  - Υδροδυναμικά φορτία κυματισμών και θαλάσσιων ρευμάτων
  - Πάγος – Χιόνι
  - Θερμοκρασία
  - Υποσκαφή θεμελίωσης
  - Παλίρροια

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν μόνο τα αεροδυναμικά και τα υδροδυναμικά φορτία, καθώς δεν αποτελεί στόχο ο σχεδιασμός της ανεμογεννήτριας, αλλά η μελέτη της συμπεριφοράς των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτή.

### 3.1.3 Δομικά μέλη υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Τα βασικά δομικά μέλη των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, τα οποία φαίνονται και στην εικόνα 3.5 είναι:

- Η θεμελίωση (foundation). Τα είδη της θεμελίωσης αναλύονται στο κεφάλαιο 3.1.4.
- Ο πύργος (tower), ο οποίος είναι φτιαγμένος από κυκλικούς ατσάλινους σωλήνες. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι το ύψος του πύργου είναι όση η διάμετρος του κύκλου που σχηματίζουν τα πτερύγια κατά την κίνησή τους.
- Ο φορέας στήριξης (support structure), ο οποίος είναι το συνδετικό τμήμα μεταξύ πύργου και θεμελίωσης (Εικόνα 3.3).



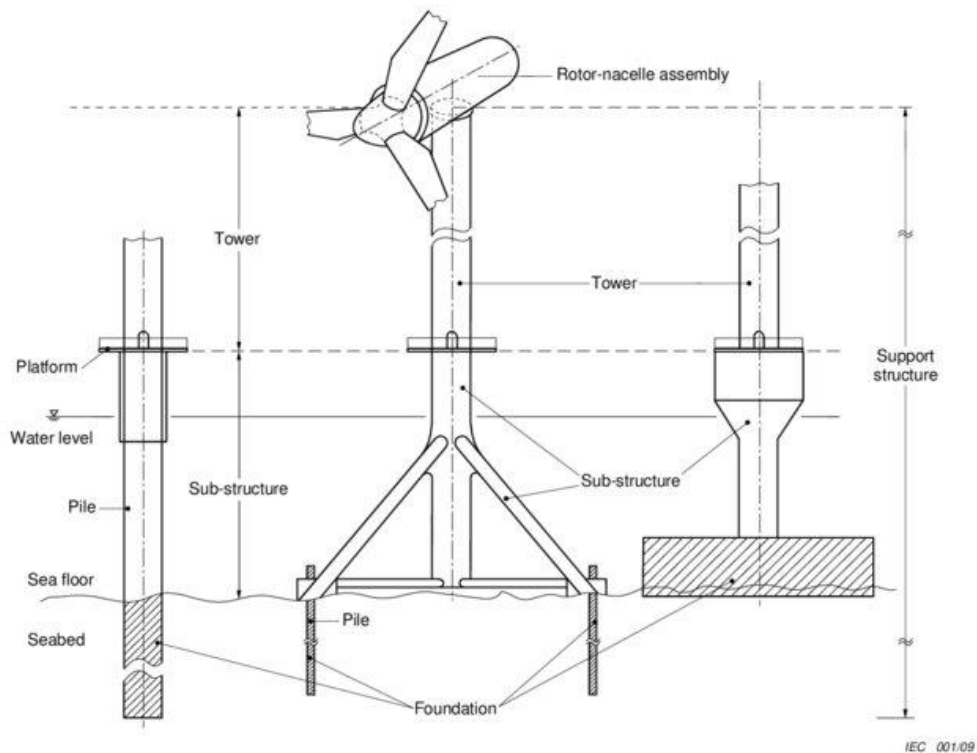
*Εικόνα 3.3: Κατασκευή στήριξης ανεμογεννήτριας*

- Ο ρότορας (rotor), ο οποίος είναι το περιστρεφόμενο τμήμα της ανεμογεννήτριας και αποτελείται από τα πτερύγια (Εικόνα 3.4) και το τμήμα που τα συνδέει (hub).



*Εικόνα 3.4: Πτερύγια ανεμογεννήτριας*

- Η άτρακτος (nacelle), η οποία είναι ένα ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα που μεταφέρει την παραχθείσα κινητική ενέργεια στη γεννήτρια.
- Η γεννήτρια (generator), η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ρότορα σε ηλεκτρική.



Εικόνα 3.5: Δομικά μέλη ανεμογεννήτριας ([www.google.com](http://www.google.com))

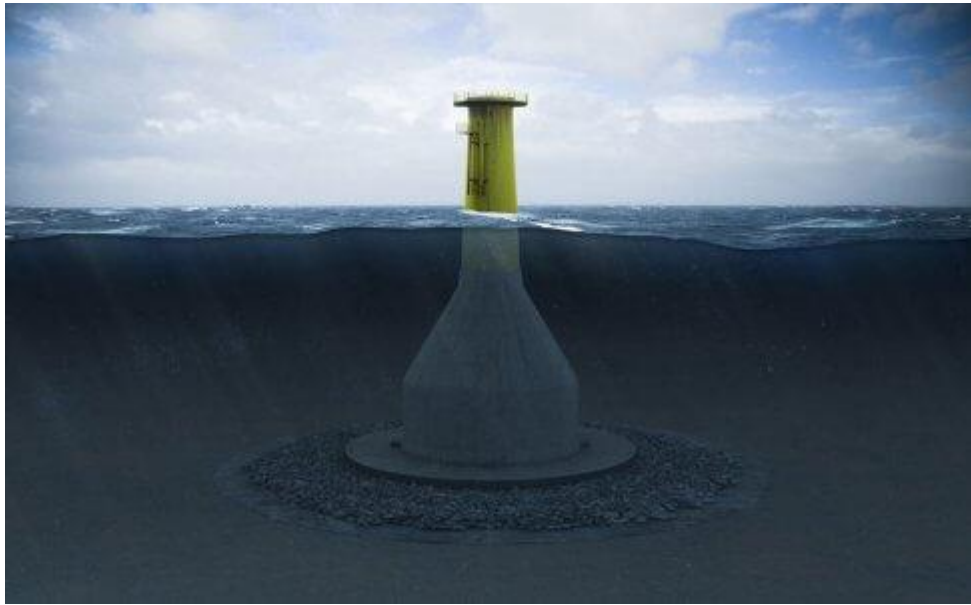
### 3.1.4 Έδραση υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες έδρασης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών:

- Σταθερά εδραζόμενες στον πυθμένα διατάξεις έδρασης
- Πλωτές διατάξεις έδρασης

Σταθερά εδραζόμενες στον πυθμένα διατάξεις:

- Διάταξη μεμονωμένου πασσάλου (Monopile)
- Διάταξη τριπόδου (Tripod)
- Διάταξη χωροδικτύματος (Jacket)
- Διάταξη gravity-based



*Εικόνα 3.6: Gravity based θεμελίωση (Πηγή: Seatower AS)*

Πλωτές διατάξεις:

- Διάταξη τύπου spar
- Διάταξη τύπου Barge
- Διάταξη τύπου TLP (Jacket)
- Διάταξη τύπου Semi





Εικόνα 3.7: Είδη έδρασης υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Από αριστερά: monopile, jacket, twisted jacket, tension-leg floating platform, semi-submersible platform, and spar-buoy. (Πηγή: Josh Bauer/NREL)

Παρακάτω αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε διάταξης έδρασης.

**Διάταξη gravity-based:** είναι κατασκευασμένη από προκατασκευασμένο σκυρόδεμα και καλύπτει βάθη έως 30m.

Πλεονεκτήματα:

- Χρησιμοποιούνται οικονομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα και ο χάλυβας.
- Η τεχνολογία αυτή έχει ήδη εφαρμοστεί στις πετρελαιοβιομηχανίες.
- Τα ρυμουλκά πλοία μπορούν να μεταφέρουν την προκατασκευασμένη θεμελίωση από το λιμάνι μειώνοντας το κόστος και το ρίσκο.

Μειονεκτήματα:

- Απαιτείται επέμβαση στον πυθμένα της θάλασσας, η συνήθως με βυθοκόρηση η οποία τροποποιεί σημαντικά το περιβάλλον στην περιοχή εγκατάστασης.
- Έχει μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω του μεγάλου όγκου της θεμελίωσης.

**Διάταξη μεμονωμένου πασσάλου (Monopile):** κατασκευάζεται από χάλυβα και χρησιμοποιείται για βάθη έως 40m.

Πλεονεκτήματα:

- Έχουν απλό σχεδιασμό και εγκαθίστανται εύκολα.
- Εμφανίζουν καλή συμπεριφορά τόσο σε αμμώδη όσο και βραχώδη εδάφη.
- Έχουν καλή σχέση κόστους- αποτελεσματικότητας για βάθη έως 40m.

Μειονεκτήματα:

- Τα φορτία που προέρχονται από τον άνεμο, τα κύματα ή τον σεισμό μπορεί να προκαλέσουν πρόωρη κόπωση στη θεμελίωση αν δεν ληφθούν υπόψη κατά την κατασκευή.
- Ο ήχος κατά την εγκατάσταση μπορεί να αποπροσανατολίσει, να τραυματίσει και να σκοτώσει θαλάσσια είδη, όπως φάλαινες και χελώνες που είναι ευαίσθητα σε κύματα πίεσης.

**Διάταξη τριπόδου (Tripod):** διαθέτει τρεις βάσεις οι οποίες συνδέονται σε μία κεντρική κυλινδρική στήλη και χρησιμοποιείται για βάθη έως 50m.

Πλεονεκτήματα:

- Δεν απαιτείται εξειδικευμένη προετοιμασία του πυθμένα πριν την εγκατάσταση.
- Προσφέρουν επιπλέον σταθερότητα στην ανεμογεννήτρια.
- Κατάλληλες για μαλακά εδάφη αλλά και για εδάφη με σκληρή άργιλο.

Μειονεκτήματα:

- Το κόστος κατασκευής και συντήρησης είναι μεγαλύτερο από άλλα είδη έδρασης.
- Απαιτείται σχεδιασμός για τον καθαρισμό της θεμελίωσης σε περιοχές με έντονη μεταφορά ιζημάτων.



Εικόνα 3.8: Διάταξη τριπόδου

**Διάταξη χωροδικτυώματος (Jacket):** Χρησιμοποιείται για βάθη έως 60m

Πλεονεκτήματα:

- Η επιφάνεια της θεμελίωσης μπορεί να αποτελέσει τόπο για την ανάπτυξη υφάλων.
- Μπορεί να μεταφερθεί με φορτηγίδα.

- Κατάλληλες για μεσαία ως πυκνή άμμο αλλά και για εδάφη με σκληρή άργιλο.

Μειονεκτήματα:

- Επιτρέπει την ανάπτυξη ειδών που μπορεί να εμποδίζουν την λειτουργία της ανεμογεννήτριας.
- Ο ήχος κατά την εγκατάσταση μπορεί να αποπροσανατολίσει, να τραυματίσει και να σκοτώσει θαλάσσια είδη, όπως φάλαινες και χελώνες που είναι ευαίσθητα σε κύματα πίεσης.



*Εικόνα 3.9: Ύφαλος σε θεμελίωση τύπου jacket*

**Πλωτές διατάξεις (floating foundations):** Έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αιολικών πάρκων σε όλο τον κόσμο αυξάνοντας κατά πολύ τα βάθη εγκατάστασης.

Πλεονεκτήματα:

- Τα βάθη εγκατάστασης έχουν φτάσει τα 200m.
- Εκμεταλλεύονται μεγαλύτερο μέρος του αιολικού δυναμικού που είναι διαθέσιμο στα μεγαλύτερα βάθη.

- Κατάλληλες για μεσαία ως πυκνή άμμο αλλά και για εδάφη με σκληρή άργιλο.

Μειονεκτήματα:

- Οι τένοντες και τα καλώδια μπορεί να επηρεάσουν το θαλάσσιο οικοσύστημα.
- Απαιτείται συνεχής εποπτεία και συντήρηση των καλωδίων.
- Η συναρμολόγηση μπορεί να παρεμποδιστεί από θαλάσσια είδη.

### 3.1.5 Υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα πρόσφατα ψηφίστηκε νομοσχέδιο βάσει του οποίου η πολιτεία θα επιλέγει τις ευρύτερες ζώνες που θα μπορούν να τοποθετηθούν τα αιολικά πάρκα και στη συνέχεια τμήματα αυτών των ζωνών θα παραχωρούνται στους επενδυτές μέσω διαγωνιστικών διαδικασιών. Τα έργα θα επιλέγονται με βάση τις οικονομικές προσφορές των ενδιαφερομένων για την τιμή αποζημίωσης της παραγόμενης ενέργειας, όπως γίνεται σήμερα με τα χερσαία αιολικά και τα φωτοβολταϊκά. Τη χωροθέτηση των θαλάσσιων «οικοπέδων» αλλά και τη διενέργεια των διαγωνισμών πιθανότατα θα αναλάβει η Ελληνική Διαχειριστική Εταιρία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών Πόρων (ΕΔΕΥΕΠ), ενώ κομβικό ρόλο αναλαμβάνει και ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) για τη σύνδεση των θαλάσσιων πάρκων με το δίκτυο μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα οι κυριότερες διατάξεις για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα προβλέπουν τα εξής:

- Με κοινή απόφαση των Υπουργών Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Οικονομικών, Ανάπτυξης, Εξωτερικών, Εθνικής Άμυνας, Πολιτισμού και Αθλητισμού, Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής, Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, και Τουρισμού θα εγκριθεί το Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων (ΥΑΠ), που θα αποτυπώνει σε ποιες θαλάσσιες περιοχές της χώρας είναι δυνατή η ανάπτυξη Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων.
- Με την έκδοση σχετικού Προεδρικού Διατάγματος θα οριοθετηθούν μία ή περισσότερες Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης ΥΑΠ, που αποτελούν τμήματα των θαλάσσιων περιοχών που εμπεριέχονται στο Εθνικό Πρόγραμμα, και θα οριστούν οι όροι ανάπτυξης των έργων σε αυτές.

- Με απόφαση του Φορέα ΥΑΠ, η οποία θα εκδοθεί εντός δύο μηνών από την δημοσίευση του προεδρικού διατάγματος οριοθέτησης των Περιοχών Οργανωμένης Ανάπτυξης ΥΑΠ (ΠΟΑΥΑΠ), θα εκκινήσει η διαδικασία χορήγησης Αδειών Έρευνας ΥΑΠ εντός των οριοθετημένων ΠΟΑΥΑΠ. Οι Άδειες Έρευνας ΥΑΠ θα χορηγούνται σε ενδιαφερόμενους που θα πληρούν συγκεκριμένα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια και θα υποβάλλουν και σχετική εγγυητική επιστολή.
- Οι κάτοχοι των Αδειών Έρευνας ΥΑΠ θα έχουν τη δυνατότητα να εκπονήσουν όλες τις αναγκαίες μετρήσεις και μελέτες εντός των ΠΟΑΥΑΠ για τις οποίες έλαβαν την σχετική Άδεια Έρευνας ΥΑΠ και παράλληλα να συμμετάσχουν στην ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών για την δυνατότητα εγκατάστασης Έργου ΥΑΠ και την λήψη λειτουργικής ενίσχυσης.
- Μετά την πάροδο περίπου 2,5 ετών από την χορήγηση των Αδειών Έρευνας ΥΑΠ θα οριστούν – με Υπουργική Απόφαση – επιμέρους Περιοχές Εγκατάστασης ΥΑΠ, εντός των ΠΟΑΥΑΠ, καθώς και εκτίμηση της μέγιστης ισχύος Έργων ΥΑΠ που εκτιμάται ότι μπορεί να εγκατασταθεί σε κάθε μία από αυτές.
- Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) ακολούθως θα προκηρύξει διαγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών για τη χορήγηση λειτουργικής ενίσχυσης στα Έργα ΥΑΠ που θα αναπτυχθούν εντός των Περιοχών Εγκατάστασης ΥΑΠ αυτών.
- Ο κάθε συμμετέχων στον διαγωνισμό θα υποβάλλει διακριτές προσφορές για κάθε Περιοχή Εγκατάστασης ΥΑΠ, που βρίσκεται εντός της ΠΟΑΥΑΠ που έχει λάβει Άδεια Έρευνας ΥΑΠ και για την οποία επιθυμεί την εγκατάσταση Έργου ΥΑΠ.
- Για την επιλογή του Επενδυτή ΥΑΠ και την χορήγηση λειτουργικής ενίσχυσης, κριτήριο θα είναι η χαμηλότερη τιμή προσφοράς σε ευρώ ανά MWh, για την αποζημίωση της παραγόμενης ενέργειας από το Έργο ΥΑΠ που αναπτύσσεται εντός της συγκεκριμένης Περιοχής Εγκατάστασης ΥΑΠ.
- Ο συμμετέχων που θα επιλεγεί από την ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών για συγκεκριμένη Περιοχή Εγκατάστασης ΥΑΠ θα έχει το

αποκλειστικό δικαίωμα για την αδειοδότηση, ανάπτυξη και εκμετάλλευση του Έργου ΥΑΠ εντός της Περιοχής Εγκατάστασης ΥΑΠ (Επενδυτής ΥΑΠ).

Βάσει μελέτης του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) το Αιγαίο μπορεί να φιλοξενήσει δυναμικό της τάξεως των 10GW υπεράκτιων αιολικών σταθερή έδρασης και 40GW πλωτής έδρασης. Οι ιδανικές περιοχές για πλωτά αιολικά εντοπίζονται στις Κυκλάδες, στο Βόρειο Αιγαίο (μεταξύ Λήμνου και Αγ. Ευστρατίου), στα Δωδεκάνησα (στον άξονα Ικαρίας – Πάτμου – Λέρου), καθώς και μεταξύ Κρήτης και Καρπάθου. Στον καθορισμό των περιοχών ελήφθησαν υπόψη το αιολικό δυναμικό, ο κυματισμός, η σεισμική δραστηριότητα, η κλίση του πυθμένα, τα βάθη κοντά στις ακτές, οι γεωπολιτικές συνθήκες και το εγκεκριμένο δεκαετές πρόγραμμα διασύνδεσης του ΑΔΜΗΕ.

### 3.2 Άνεμος

Άνεμος ονομάζεται το φαινόμενο οριζόντιας μετακίνησης αερίων μαζών σε σχέση με την επιφάνεια της γης. Η κατακόρυφη μετακίνηση αερίων μαζών καλείται ρεύμα, ανοδικό αν πρόκειται για μετακίνηση από τα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα προς τα ανώτερα, και καθοδικό για μετακίνηση από τα κατώτερα προς τα ανώτερα.

Την πρωταρχική γενεσιουργό αιτία του ανέμου αποτελεί η διαφορά πίεσης μεταξύ παρακείμενων τόπων στην επιφάνεια της γης. Η ανομοιόμορφη κατανομή της πίεσης οφείλεται κυρίως στη διαφορά θερμοκρασίας. Έτσι, μεταξύ δύο παρακείμενων περιοχών με διαφορετικές θερμοκρασίες, η ατμοσφαιρική πίεση της πιο θερμής θα είναι μικρότερη από της ψυχρότερης, με αποτέλεσμα την μετακίνηση αέριων μαζών από την ψυχρότερη προς την θερμότερη περιοχή.

Βασικά γνωρίσματα του ανέμου είναι η διεύθυνση και η έντασή του. Η διεύθυνση του ανέμου προσδιορίζεται από το σημείο του ορίζοντα απ' όπου αποπνέει ο άνεμος και εκφράζεται είτε σε μοίρες είτε με σύμβολα ανεμολογίου είτε ονομαστικά (Πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1

| Διεύθυνση | Μοίρες | Επίσημη ονομασία | Διεθνές σύμβολο | Διεθνής ονομασία |
|-----------|--------|------------------|-----------------|------------------|
| B         | 0°     | Βόρειος          | N               | North            |
| BA        | 45°    | Μέσης            | NE              | Northeast        |
| A         | 90°    | Απηλιώτης        | E               | East             |
| NA        | 135°   | Εύρος            | SE              | Southeast        |
| N         | 180°   | Νότιος           | S               | South            |
| NΔ        | 225°   | Λίβας            | SW              | Southwest        |
| Δ         | 270°   | Ζέφυρος          | W               | West             |
| BΔ        | 315°   | Σκίρων           | NW              | Northwest        |

Η ένταση του ανέμου εκφράζεται συνηθέστερα είτε με την εμπειρική κλίμακα Μποφόρ (Beaufort), η οποία βασίζεται στην παρατήρηση των αποτελεσμάτων του ανέμου στη στεριά ή στη θάλασσα, είτε με την ταχύτητά του.



Η αντιστοιχία της ταχύτητας ανέμου  $U_{10}$  σε m/s, σε ύψος 10 m, με τον αριθμό Beaufort δίνεται από τη σχέση (Mamasis, 2000):

$$u_{10} = 0.836B^{3/2} \quad (3.1)$$

Η ταχύτητα του ανέμου μετριέται με την χρήση του ανεμόμετρου. Παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά τα είδη των ανεμομέτρων. Περαιτέρω ανάλυση της αρχής λειτουργίας τους δεν αποτελεί στόχο της παρούσας εργασίας και ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στις αναφερόμενες βιβλιογραφικές πηγές (Drain, LE, 1980).

Συνοπτικά υπάρχουν τα εξής είδη ανεμόμετρων:

- Ανεμόμετρα κυπέλλων (cup anemometers)

Τα ανεμόμετρα κυπέλλων αποτελούνται από κύπελλα στερεωμένα στις άκρες οριζόντιων βραχιόνων. Η δύναμη που ασκεί ο άνεμος στα κύπελλα τα εξαναγκάζει σε περιστροφή και από τον ρυθμό της περιστροφής προσδιορίζουμε την ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 3.10: Ανεμόμετρο κυπέλλου (πηγή: [www.google.gr](http://www.google.gr))

- Ανεμόμετρα έλικας (vane anemometers)

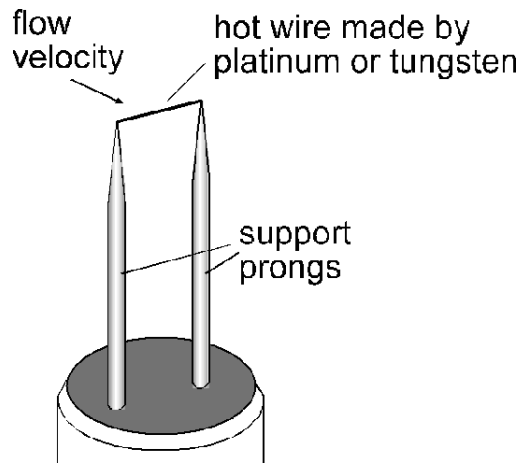
Τα ανεμόμετρα έλικας διαθέτουν έλικες από τη περιστροφή των οποίων υπολογίζεται η ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 3.11: Ανεμόμετρο έλικας (πηγή: [www.noaa.com](http://www.noaa.com))

- Ανεμόμετρα θερμού σύρματος (hot-wire anemometers)

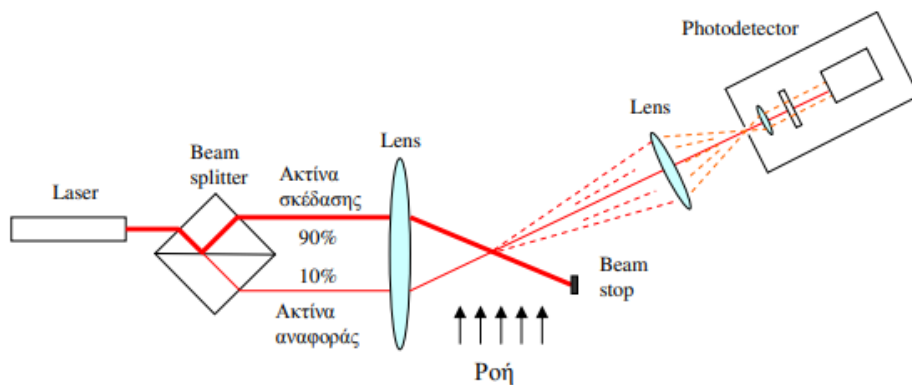
Τα ανεμόμετρα θερμού σύρματος μετρούν την ταχύτητα του ανέμου με τη χρήση ενός λεπτού θερμαινόμενου σύρματος το οποίο ψύχεται κατά την διέλευση του ανέμου.



Εικόνα 3.12: Ανεμόμετρο θερμού σύρματος (πηγή: [www.google.com](http://www.google.com))

- Ανεμόμετρα Doppler

Τα ανεμόμετρα Doppler βασίζονται στην αρχή της ανάμιξης του σκεδασμένου φωτός από την ακτίνα σκέδασης και την ανάμιξή του με το φως μιας ακτίνας αναφοράς στην αρχική του συχνότητα  $\nu_0$  (PN Papanicolaou 2017). Η διάταξη δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.13: Ανεμόμετρο Doppler (πηγή: PN Papanicolaou 2017)

- Ανεμόμετρα υπερήχων

Τα ανεμόμετρα υπερήχων μετρούν την ταχύτητα του ανέμου μέσω του χρόνου στον οποίο τα ηχητικά κύματα κινούνται μεταξύ των μετατροπέων.



*Εικόνα 3.14: Ανεμόμετρο υπερήχων*

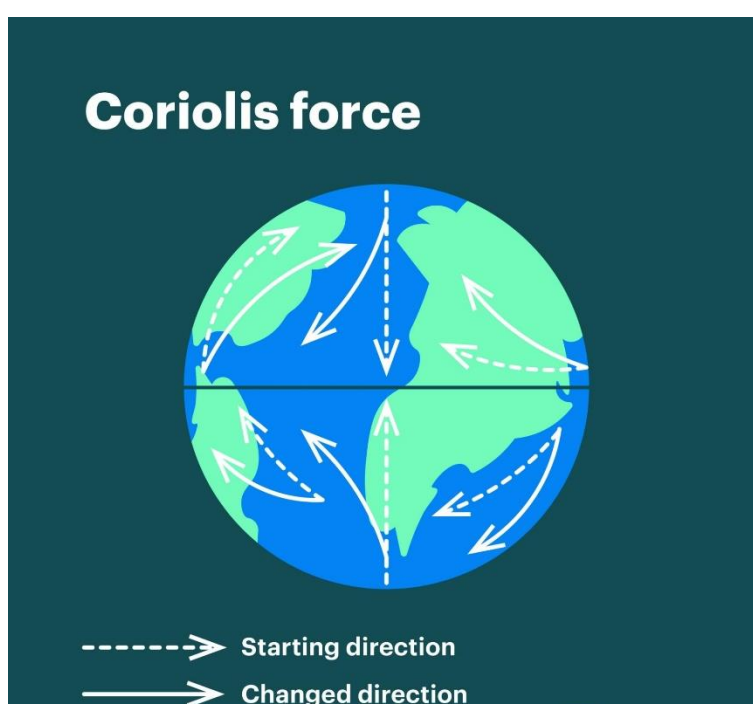
### 3.3 Κύματα

Κύμα ορίζεται μια διαταραχή η οποία διαδίδεται στον χώρο και στον χρόνο. Κυματισμοί είναι το σύνολο των φαινομένων που εμφανίζονται στην επιφάνεια της θάλασσας κυρίως ως αποτέλεσμα της απορρόφησης της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Βέβαια, κυματισμοί προκαλούνται και από τις σεισμικές δονήσεις (tsunami) και από τις ελκτικές δυνάμεις μεταξύ γης και σελήνης (παλίρροια), ωστόσο η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση των ανεμογενών κυματισμών.

Οι επικρατέστερες θεωρίες που περιγράφουν την γένεση των ανεμογενών κυματισμών είναι των Phillips (1957) και Miles (1957). Σύμφωνα με τη θεωρία του Phillips η γένεση του κυματισμού ξεκινά γραμμικά (γραμμική αύξηση του μήκους κύματος) όταν το μήκος κύματος βρεθεί σε συντονισμό με τις διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής πίεσης. Βάσει της θεωρίας του Miles με την πάροδο του χρόνου η αύξηση του μήκους κύματος συνεχίζεται παραβολικά. Αναλυτικά, η δύναμη του ανέμου που πνέει κοντά στην υδάτινη επιφάνεια εξαναγκάζει τα μόρια του νερού σε απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας τους, ενώ δυνάμεις επαναφοράς τείνουν να

κρατήσουν τα μόρια του νερού στην αρχική τους θέση. Αποτέλεσμα της ταυτόχρονης δράσης των δυνάμεων αυτών είναι η ταλάντωση των σωματιδίων του νερού.

Οι δυνάμεις που τείνουν να επαναφέρουν τα μόρια του νερού στην αρχική τους θέση είναι η δύναμη Coriolis που οφείλεται στην περιστροφή της γης και η επιφανειακή τάση. Η δύναμη Coriolis εκτρέπει την διεύθυνση πνοής των ανέμων δεξιά στο βόρειο ημισφαίριο και αριστερά στο νότιο ημισφαίριο, δημιουργώντας μαζί με την δύναμη της πίεσης τον γεωστροφικό άνεμο.



Εικόνα 3.15: Επίδραση δυνάμεων Coriolis

Η διάδοση του κύματος αποτελεί περιοδικό φαινόμενο, δηλαδή συμβαίνει κατά τον ίδιο τρόπο ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την διάδοση των ανεμογενών κυματισμών πραγματοποιείται μεταφορά ενέργειας και όχι μάζας.

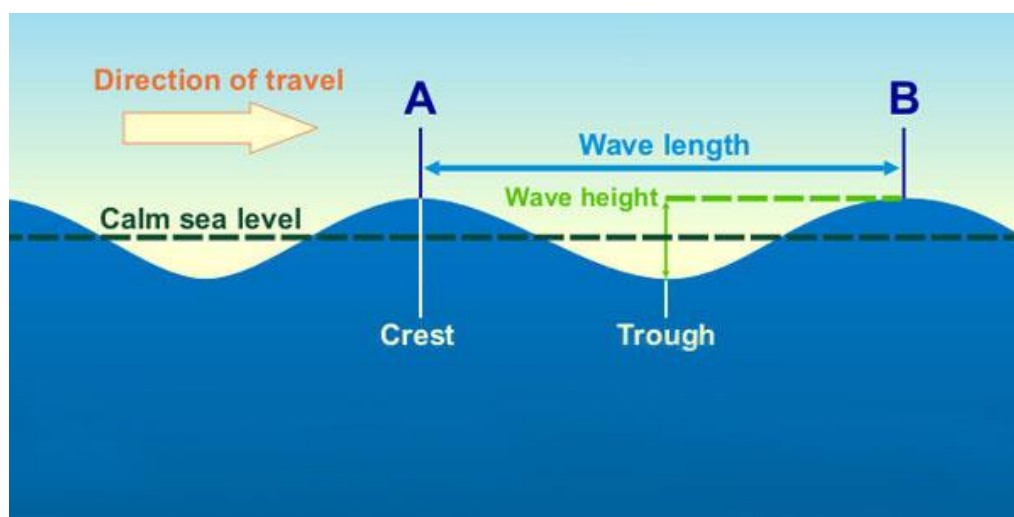
Το ύψος κύματος εξαρτάται από τη διάρκεια πνοής του ανέμου, την ταχύτητά του και το Fetch, δηλαδή το χωρίς εμπόδια ευθύγραμμο και κατά την διεύθυνση

διαδόσεως του κύματος, μέγιστο μήκος της θαλάσσιας περιοχής στην οποία πνέει ο άνεμος.

Παρακάτω παρατίθενται κάποια βασικά γνωρίσματα των κυμάτων τα οποία θα αναλυθούν και στα επόμενα κεφάλαια:

Περίοδος ( $T$ ): είναι η χρονική διάρκεια μεταξύ της γένεσης δύο διαδοχικών διαταραχών.

- Συχνότητα ( $f$ ): είναι ο αριθμός των μηκών κύματος που διέρχονται από ένα σημείο στη μονάδα του χρόνου.
- Κορυφή κύματος: είναι το υψηλότερο σημείο του κύματος.
- Κοιλία κύματος: είναι το χαμηλότερο σημείο του κύματος.
- Μήκος κύματος ( $\lambda$ ): είναι η απόσταση που διανύει το κύμα στη διάρκεια μιας περιόδου ή αλλιώς η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλιών.
- Ύψος κύματος ( $H$ ): είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και μιας κοιλίας.



Εικόνα 3.16: Βασικά χαρακτηριστικά κύματος

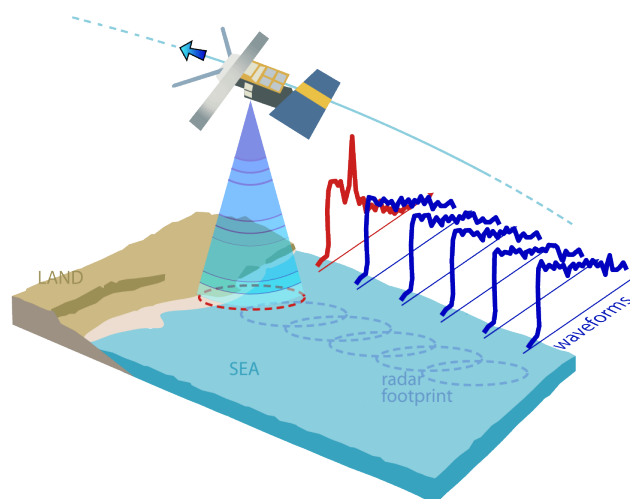
Οι μετεωρολογικοί σταθμοί που καταγράφουν κυματικά δεδομένα μας παρέχουν τιμές για:

- το χαρακτηριστικό ύψος κύματος  $H_s$ , το οποίο ισούται με τη μέση τιμή του  $1/3$  των μεγαλύτερων εκ των καταγραφέντων τιμών.
- τη χαρακτηριστική περίοδο του κύματος  $T_s$ , η οποία προκύπτει κατά τον ίδιο τρόπο με το  $H_s$ .

Τα παραπάνω κυματικά δεδομένα καταγράφονται με τις εξής μεθόδους (Stewart, 1982):

- Δορυφορικά αλτίμετρα

Τα δορυφορικά αλτίμετρα εκπέμπουν μια ραδιοσυχνότητα προς την υδάτινη επιφάνεια και αναλύουν αυτή που ανακλάται από αυτήν. Η ανύψωση ή καθύψωση της υδάτινης επιφάνειας την στιγμή πρόσπτωσης της ραδιοσυχνότητας ισούται με την διαφορά της θέσης του εν τροχιά δορυφόρου και του υψομέτρου της επιφάνειας αναφοράς. Η ακρίβεια μέτρησης είναι  $\pm 10\%$  ([www.altimetry.info](http://www.altimetry.info)).



Εικόνα 3.17: Αλτίμετρο σε δορυφόρο

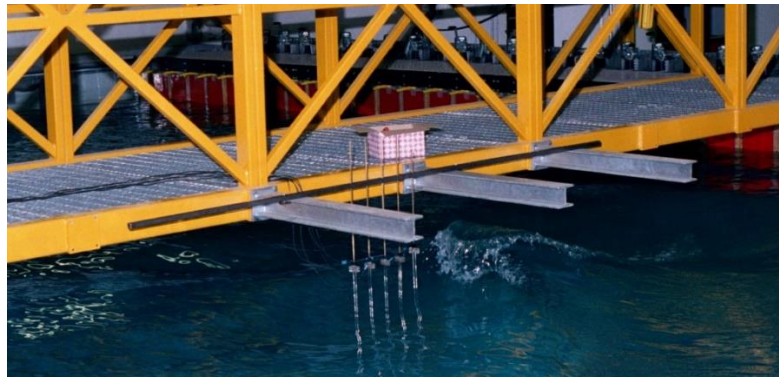
- Επιταχυνσιόμετρα

Τα επιταχυνσιόμετρα τοποθετούνται σε πλωτήρες ή συχνά και στα πλοία και καταγράφουν την κατακόρυφη επιτάχυνση των υδάτινων μορίων. Η διπλή

ολοκλήρωση της επιτάχυνσης μας δίνει την μετατόπιση τους και άρα το ύψος κύματος. Η ακρίβεια της μεθόδου ανέρχεται στο  $\pm 10\%$ .

- Καταγραφείς πίεσης

Οι καταγραφείς πίεσης τοποθετούνται είτε σε πλατφόρμες είτε στον πυθμένα της θάλασσας και καταγράφουν την πίεση του νερού. Λόγω της αναλογίας μεταξύ πίεσης και ύψους υδάτινης στήλης πάνω από το όργανο, η καταγραφθείσα πίεση μετατρέπεται σε ύψος κύματος.



*Εικόνα 3.18: Καταγραφείς πίεσης*

- Ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Synthetic Aperture Radars, SAR)

Τα ραντάρ αποτυπώνουν την υδάτινη επιφάνεια σε υψηλής ποιότητας εικόνες με χωρικό βήμα 6-25 m. Μέσω αυτών των εικόνων μπορεί να γίνει μια προσέγγιση του ύψους κύματος.

### 3.4 Μετατροπή γενεσιουργών παραγόντων σε δυνάμεις

Οι μεταβλητές που μελετήθηκαν παραπάνω (άνεμος, κύμα) εισάγονται σε εξισώσεις για τον προσδιορισμό των δυνάμεων που ασκούνται στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.

Συγκεκριμένα :



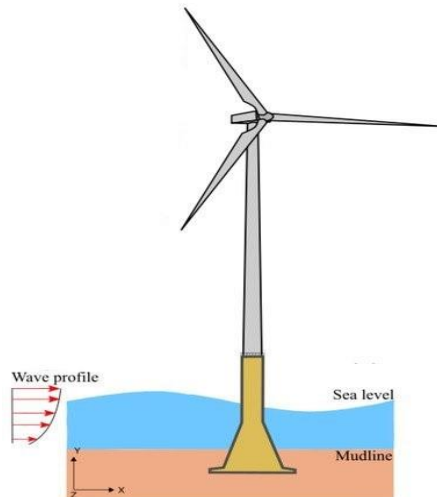
- Μέσω της ταχύτητας του ανέμου προσδιορίζονται τα αεροδυναμικά φορτία στον πυλώνα των ανεμογεννητριών.
- Μέσω του σημαντικού ύψους κύματος και της περιόδου των κυμάτων υπολογίζονται τα υδροδυναμικά φορτία επί των υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

#### 3.4.1 Υδροδυναμικά φορτία

Στον σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας έναντι υδροδυναμικών φορτίων στη παρούσα εργασία λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του ύψους κύματος και της περιόδου κύματος. Για την εφαρμογή των εξισώσεων συνίσταται η χρήση χρονοσειρών δεδομένων τουλάχιστον 10 ετών.

Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά ορισμένες συνθήκες και ταχύτητες αναφοράς ανέμου που χρησιμοποιούνται στους συνδυασμούς φόρτισης DNV-OS-J101 (2015):

- To Normal Wave Height (NWH)
- The Severe Sea State (SSS)
- The Severe Wave Height (SWH)
- The Extreme Sea State (ESS)
- The Extreme Wave Height (EWH)
- The Reduced Wave Height (RWH)

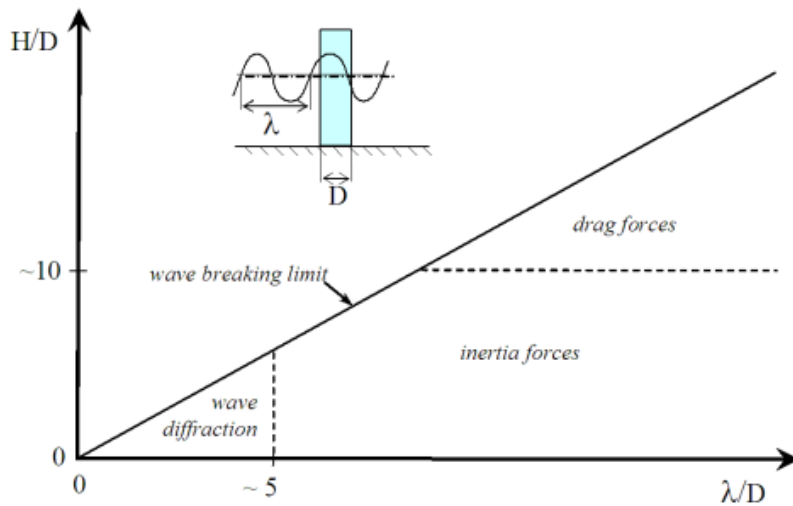


Εικόνα 3.19: Κατανομή δύναμης λόγω κύματος

Για την εκτίμηση των υδροδυναμικών φορτίων γίνεται χρήση της εξίσωσης Morison. Η εξίσωση Morison ή αλλιώς MOJS -από τους τέσσερις συγγραφείς Morison, O'Brien, Johnson και Schaaf- αποτελεί μια ημι-εμπειρική εξίσωση για τον υπολογισμό της δύναμης που ασκείται από τα μη θραυόμενα επιφανειακά κύματα σε έναν βυθισμένο κύλινδρο. Η εξίσωση χρησιμοποιείται ευρέως για εύρεση της δύναμης που ασκείται στον πυλώνα έδρασης υπεράκτιων ανεμογεννητριών και γενικότερα εφαρμόζεται σε κατασκευές για τις οποίες επαληθεύεται η ανισότητα  $D/\lambda < 0,2$  (όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος και  $D$  η διάμετρος της κατασκευής). Η εξίσωση δίνει σαν αποτέλεσμα την συνολική οριζόντια δύναμη ανά μονάδα βάθους.

Η συνολική δύναμη ισούται με το άθροισμα δύο επιμέρους δυνάμεων:

1. Της οπισθέλκουσας δύναμης  $F_D$  (drag force), η οποία είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του κύματος και
2. Της δύναμης αδράνειας της μάζας  $F_I$  (inertia force), η οποία είναι ανάλογη της δύναμης επιτάχυνσης που ασκείται στην μάζα του μετατοπιζόμενου νερού



Εικόνα 3.20: Σχέση μεταξύ περίθλασης, δύναμης αδρανείας, οπισθέλκουσας

Αναλυτικά οι επιμέρους δυνάμεις:

$$1. \quad F_D = 0.5C_D \rho A u |u| \quad (3.2)$$

Όπου:

$F_D$ : οπισθέλκουσα δύναμη

$C_D$ : συντελεστής οπισθέλκουσας- αδιάστατος συντελεστής ο οποίος προσεγγίζεται πειραματικά και εξαρτάται από την γεωμετρία του αντικειμένου στο οποίο ασκείται η δύναμη και από τον αριθμό Reynolds.

$\rho$ : πυκνότητα του ρευστού

$A$ : εμβαδό αναφοράς

$u$ : ταχύτητα κύματος

$$2. \quad F_I = C_M \rho \dot{u} V \quad (3.3)$$

$F_I$ : δύναμη αδράνειας

$C_M$ : συντελεστής αδράνειας ο οποίος προσδιορίζεται πειραματικά,  $C_M = 1 + C_a$ , όπου  $C_a$  ο προστιθέμενος συντελεστής μάζας

$\dot{u} = \frac{du}{dt}$ , επιτάχυνση της ροής

$V$ : όγκος της κατασκευής

Η συνολική δύναμη είναι:

$$F = 0.5 C_D \rho A u |u| + C_M \rho \dot{u} V \quad (3.4)$$

Οι παραπάνω σχέσεις επαληθεύτηκαν μέσω πειραμάτων στο εργαστήριο μηχανικής των ρευστών του πανεπιστημίου της California και για την εφαρμογή τους απαιτείται ο προσδιορισμός της ταχύτητας και της επιτάχυνσης του υπό εξέταση ρευστού. Ο προσδιορισμός των μεγεθών αυτών μπορεί να γίνει- όπως και θα γίνει παρακάτω- με χρήση της κυματικής θεωρίας Airy.

Επιπλέον, για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων θα πρέπει να προσδιοριστούν ο συντελεστής αδράνειας  $C_M$  και ο συντελεστής οπισθέλκουσας  $C_D$ . Οι συντελεστές εξαρτώνται από τον αριθμό Keulegan–Carpenter (KC), τον αριθμό Reynolds (Re), την γεωμετρία και την σχετική τραχύτητα της διατομής.

Ο αριθμός Keulegan–Carpenter (KC) είναι ένας αδιάστατος αριθμός που περιγράφει την σχέση μεταξύ της οπισθέλκουσας δύναμης και της δύναμης αδράνειας σε μια ταλαντωτική ροή ρευστού ή σε αντικείμενα που ταλαντώνονται εντός υγρού που βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. Μικροί αριθμοί KC υποδηλώνουν ότι κυριαρχεί η δύναμη αδράνειας, ενώ για μεγάλους αριθμούς K κυριαρχεί η οπισθέλκουσα.

Ο αριθμός Keulegan–Carpenter (KC) ισούται:

$$K_C = \frac{VT}{L} \quad (3.5)$$

Όπου:

V: η ταχύτητα του ταλαντούμενου ρευστού (m/s)

T: η περίοδος ταλάντωσης (s)

L: η χαρακτηριστική γραμμική διάσταση (m)

Ο αριθμός Reynolds (Re) είναι ένας αδιάστατος αριθμός που ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις ιξώδους. Με τον υπολογισμό του αριθμού Re η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή, κυριαρχούν οι δυνάμεις ιξώδους, ή τυρβώδης όπου κυριαρχούν οι δυνάμεις αδράνειας.

Ο αριθμός Reynolds (Re) ισούται:

$$Re = \frac{VL}{\nu} = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (3.6)$$

Όπου:

V: η ταχύτητα του ρευστού (m/s)

$\nu$ : το κινηματικό ιξώδες (m<sup>2</sup>/s)

L: η χαρακτηριστική γραμμική διάσταση (m)

$\rho$ : η πυκνότητα του ρευστού (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$ : δυναμικό ιξώδες (kg/ms)

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών  $C_D$ ,  $C_M$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής  $C_{DS}$ , ο οποίος είναι ο συντελεστής της οπισθέλκουσας δύναμης για steady-state συνθήκες ροής.

$$C_{DS} = \begin{cases} 0.65 & \text{για } k/D < 10^{-4} \text{ (λεία επιφάνεια)} \\ \frac{29+4\log_{10}(k/D)}{20} & \text{για } 10^{-4} < k/D < 10^{-2} \\ 1.05 & \text{για } k/D > 10^{-2} \text{ (τραχειά επιφάνεια)} \end{cases} \quad (3.7)$$

Όπου  $k$  είναι η επιφανειακή τραχύτητα και  $D$  η διάμετρος του δομικού μέλους. Ενδεικτικά κάποιες τιμές τραχύτητας  $k$  βάσει του υλικού του μέλους:

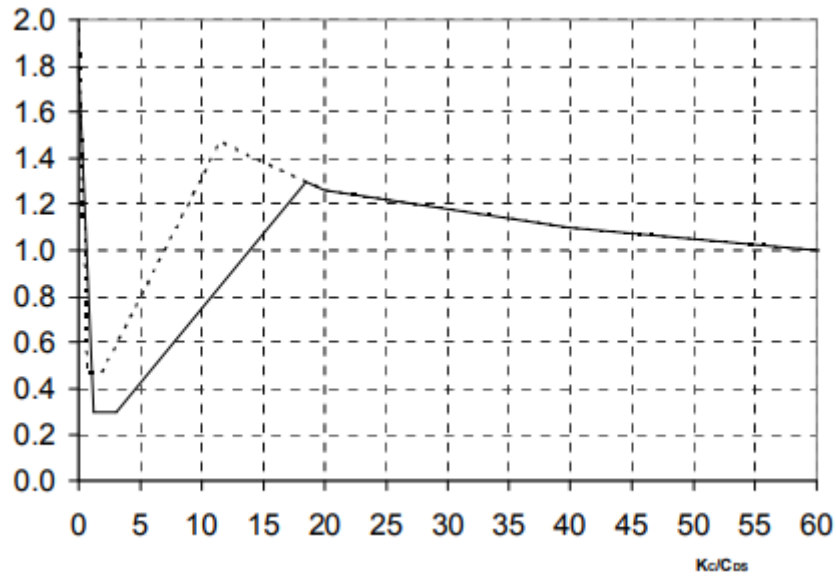
Πίνακας 3.2: Τιμές συντελεστή τραχύτητας

| Υλικό διατομής                     | $k$ (m)                               |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| Καινούριος χάλυβας με επίστρωση    | $5 \cdot 10^{-5}$                     |
| Καινούριος χάλυβας χωρίς επίστρωση | $5 \cdot 10^{-5}$                     |
| Διαβρωμένος χάλυβας                | $3 \cdot 10^{-3}$                     |
| Σκυρόδεμα                          | $3 \cdot 10^{-3}$                     |
| Θαλάσσια βλάστηση                  | $5 \cdot 10^{-3}$ - $5 \cdot 10^{-2}$ |

Ο συντελεστής της οπισθέλκουσας δύναμης  $C_D$  εξαρτάται από τον συντελεστή  $C_{DS}$  και τον αριθμό  $KC$ :

$$C_D = C_{DS} \cdot \psi(C_{DS}, KC) \quad (3.8)$$

Όπου ο συντελεστής  $\psi$  μπορεί να βρεθεί από το παρακάτω διάγραμμα. Η διακεκομμένη γραμμή αφορά σε τραχείς επιφάνειες, ενώ η συνεχής γραμμή σε λείες. Για επιφάνειες ενδιάμεσης τραχύτητας ο συντελεστής  $\psi$  μπορεί να υπολογιστεί με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών για λείες και τραχείς επιφάνειες.



Εικόνα 3.21: Συντελεστής  $\psi$  συναρτήσει  $KC/C_{Ds}$  για λείες (συνεχής γραμμή) και τραχείς (διακεκομμένη γραμμή) επιφάνειες.

Για  $KC < 3$  ο συντελεστής αδρανείας  $C_M = 2$ , ενώ για  $KC > 3$  ο συντελεστής ισούται με:

$$C_M = \max \{ 2.0 - 0.044(KC - 3); 1.6 - (CDS - 0.65) \} \quad (3.9)$$

Για τον υπολογισμό της δύναμης που ασκείται σε ένα κατακόρυφο βυθισμένο δομικό τμήμα της ανεμογεννήτριας ακολουθείτε η παρακάτω διαδικασία:

- Υπολογίζεται η μέγιστη οριζόντια οπισθέλκουσα δύναμη:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}, \text{ για βαθιά νερά} \quad (3.10)$$

Όπου:

$\lambda$ : μήκος κύματος

$T$ : η περίοδος του κύματος

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας

$$F_D = 0.5C_d \rho A u |u|$$

$$U = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \sigma t) \quad (3.11)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.12)$$

Άρα

$$\begin{aligned} F_D &= 0.5C_D\rho \int_{-d}^0 u|u| dz \\ &= 0.5C_D\rho \int_{-d}^0 \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \sigma t) \left| \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \sigma t) \right| dz \\ &= 0.5C_D\rho \int_{-d}^0 \left(\frac{\pi H}{T}\right)^2 e^{2kz} \cos(kx - \sigma t) |\cos(kx - \sigma t)| dz \\ &= 0.5C_D\rho \left(\frac{\pi H}{T}\right)^2 \cos(kx - \sigma t) |\cos(kx - \sigma t)| \int_{-d}^0 e^{2kz} dz \end{aligned} \quad (3.13)$$

Με στόχο να βρεθεί η  $F_{Dmax}$ ,  $\cos(kx - \sigma t) = |\cos(kx - \sigma t)| = 1$

$$\int_{-d}^0 e^{2kz} dz = \frac{1}{2k} (1 - e^{-2kd})$$

$$F_D = 0.5C_D\rho \left(\frac{\pi H}{T}\right)^2 \frac{1}{2k} (1 - e^{-2kd}) \cos(kx - \sigma t) |\cos(kx - \sigma t)|$$

$$F_{Dmax} = 0.5C_D\rho \left(\frac{\pi H}{T}\right)^2 \frac{1}{2k} (1 - e^{-2kd}) \quad (3.14)$$

$$F_D = F_{Dmax} \cos(kx - \sigma t) |\cos(kx - \sigma t)| \quad (3.15)$$

- Υπολογίζεται η μέγιστη οριζόντια δύναμη αδράνειας:

$$F_I = C_M \rho \dot{u} V$$

$$\dot{u} = 2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{kz} \sin(kx - \sigma t) \quad (3.16)$$

Άρα:

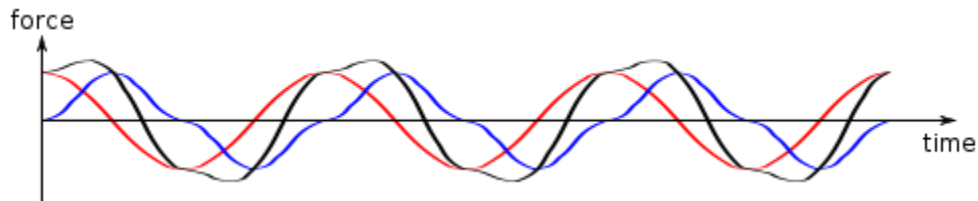
$$\begin{aligned} F_I &= C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} 2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 \sin(kx - \sigma t) \int_{-d}^0 e^{kz} dz \\ &\int_{-d}^0 e^{kz} dz = \frac{1}{k} (1 - e^{-kd}) \end{aligned}$$



$$F_I = C_M \rho \frac{\pi^3 D^2 H}{2T^2} \frac{1}{k} (1 - e^{-kd}) \sin(kx - \sigma t)$$

$$F_{I_{max}} = C_M \rho \frac{\pi^3 D^2 H}{2T^2} \frac{1}{k} (1 - e^{-kd}) \quad (3.17)$$

$$F_I = F_{I_{max}} \sin(kx - \sigma t) \quad (3.18)$$



Εικόνα 3.22: Δυνάμεις που υπολογίστηκαν από την εξίσωση Morison

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η οπισθέλκουσα δύναμη με μπλε χρώμα, η δύναμη αδρανείας με κόκκινο και η συνολική δύναμη με μαύρο. Όπως φαίνεται, για να βρω την συνολική μέγιστη ασκούμενη δύναμη δεν μπορώ να προσθέσω τα μέγιστα των επιμέρους δυνάμεων καθώς αυτά εμφανίζονται με διαφορά φάσης. Επομένως :

- Υπολογίζεται η συνολική δύναμη

$$F = F_D + F_I$$

$$= F_{D_{max}} \cos(kx - \sigma t) |\cos(kx - \sigma t)| + F_{I_{max}} \sin(kx - \sigma t)$$

Θέτουμε  $Y = kx - \sigma t$

$$F = F_{D_{max}} \cos^2(Y) + F_{I_{max}} \sin(Y)$$

Θέλουμε να βρούμε την μέγιστη συνολική δύναμη άρα:  $\frac{dF}{dY} = 0$

Προκύπτει  $\sin(Y) = \frac{B}{2A}$ , οπότε αντικαθιστούμε στην αρχική θέση και βρίσκουμε την συνολική δύναμη.

|                                | $h/L < 0.50$   | $h/L \geq 0.50$   |
|--------------------------------|--|---|
| Ταχύτητα φάσεως                | $C = \frac{g}{\sigma} \tanh kh$  | $C_o = \frac{g}{\sigma}$  |
| Ταχύτητα ομάδας κυμάτων        | $C_g = C \frac{1}{2} (1 + 2kh / \sinh 2kh)$  | $C_{go} = \frac{C_o}{2}$  |
| Μήκος κύματος                  | $L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kh$   | $L_o = \frac{gT^2}{2\pi}$   |
| Αριθμός κύματος                | $k = \frac{2\pi}{L}$   | $k_o = \frac{2\pi}{L_o}$  |
| Οριζόντια ταχύτητα σωματιδίων  | $u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(y+h)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t)$                | $u = \frac{\pi H_o}{T} \exp(k_o y) \cos(k_o x - \sigma t)$                |
| Κατακόρυφη ταχύτητα σωματιδίων | $v = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(y+h)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t)$                | $v = \frac{\pi H_o}{T} \exp(k_o y) \sin(k_o x - \sigma t)$                |
| Οριζόντια θέση σωματιδίων      | $x = x_o - \frac{H}{2} \frac{\cosh k(y_o + h)}{\sinh kh} \sin(kx_o - \sigma t)$        | $x = x_o - \frac{H_o}{2} \exp(k_o y_o) \sin(k_o x_o - \sigma t)$          |
| Κατακόρυφη θέση σωματιδίων     | $y = y_o + \frac{H}{2} \frac{\sinh k(y_o + h)}{\sinh kh} \cos(kx_o - \sigma t)$        | $y = y_o + \frac{H_o}{2} \exp(k_o y_o) \cos(k_o x_o - \sigma t)$          |
| Πίεση                          | $p = -\rho g y + \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh k(y+h)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t)$ | $p = -\rho g y + \rho g \frac{H_o}{2} \exp(k_o y) \cos(k_o x - \sigma t)$ |
| Ενέργεια                       | $E = \frac{1}{8} \rho g H^2 L$   | $E = \frac{1}{8} \rho g H_o^2 L_o$  |
| Ροή ενέργειας                  | $P = \frac{1}{8} \rho g H^2 C \frac{1}{2} (1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh})$                 | $P = \frac{1}{16} \rho g H_o^2 C_o$                                       |

Εικόνα 3.23: Τύποι υπολογισμού κυμάτων

### 3.4.2 Αεροδυναμικά φορτία

Στον σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας έναντι αεροδυναμικής φόρτισης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι κανονικές (normal wind conditions) και οι ακραίες (extreme wind conditions) συνθήκες πνοής του ανέμου. Οι κανονικές συνθήκες πνοής χρησιμοποιούνται σαν βάση για τον προσδιορισμό των καταπονήσεων της κατασκευής αλλά δεν θα πρέπει να αμελούνται και οι ακραίες συνθήκες οι οποίες προκαλούν πολύ μεγάλη καταπόνηση σε όλα τα τμήματα της ανεμογεννήτριας από την θεμελίωση μέχρι τον ρότορα.

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένες συνθήκες και ταχύτητες αναφοράς ανέμου που χρησιμοποιούνται στους συνδυασμούς φόρτισης (DNV-OS-J101, 2014):

Το Normal Wind Profile (NWP) που αναπαριστά τη μέση ταχύτητα του ανέμου σαν συνάρτηση του υψομέτρου πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες συστήνεται ο συντελεστής δύναμης  $\alpha$  στον προσδιορισμό του προφίλ της ταχύτητας να λαμβάνεται ίσος με  $\alpha=0,14$  (εξίσωση 3.19).

Το Normal Turbulence Model (NTM) που αναπαριστά ένα ταραχώδες προφίλ πνοής ανέμου ως την χαρακτηριστική τυπική απόκλιση  $\sigma_{u,c}$  της ταχύτητας του ανέμου. Η  $\sigma_{u,c}$

είναι το ποσοστμόριο 90% της πιθανότητας κατανομής της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας του ανέμου.

Το Extreme Wind Speed Model (EWM) που αναπαριστά ακραίες συνθήκες πνοής του ανέμου με συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς, συνήθως 50 χρόνια. Για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες συστήνεται ο συντελεστής δύναμης  $\alpha$  στον προσδιορισμό του προφίλ της ταχύτητας να λαμβάνεται ίσος με  $\alpha=0,11$  (εξίσωση 3.19).

- Το Extreme Operating Gust (EOG)
- Το Extreme Turbulence Model (ETM)
- Το Extreme Direction Change (EDC)
- Το Extreme Coherent Gust with Direction Change (ECD)
- Το Extreme Wind Shear model (EWS)
- Το Reduced Wind Speed Model (RWM)

Για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών φορτίων που ασκούνται στον πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται ως ταχύτητα αναφοράς η  $U_{10}$ . Η ταχύτητα αυτή αποτελεί τον μέσο όρο των καταγραφόμενων ταχυτήτων ενός δεκαλέπτου. Οι χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό θα πρέπει να διαθέτουν τουλάχιστον 10 χρόνια μετρήσεων. Επίσης, υπολογίζεται και η τυπική απόκλιση  $\sigma_u$  της  $U_{10}$  και ο λόγος  $\sigma_u / U_{10}$  περιγράφει την ένταση της διαταραχής.

Η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από το υψόμετρο και σαν ταχύτητα αναφοράς χρησιμοποιείται η μέση ταχύτητα στο ύψος του άξονα της πτερωτής. Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της μέσης ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Οποιαδήποτε ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί βάση της ταχύτητας αναφοράς με τον ακόλουθο τύπο:

$$U_{10,z} = U_{10,hub} \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^{\alpha} \quad (3.19)$$

Όπου:

$U_{10,z}$  : η μέση ταχύτητα δεκαλέπτου σε απόσταση  $z$  από την στάθμη της θάλασσας

$U_{10,hub}$ : η μέση ταχύτητα δεκαλέπτου στο ύψος του άξονα της πτερωτής

$z$ : το ύψος πάνω από την στάθμη της θάλασσας

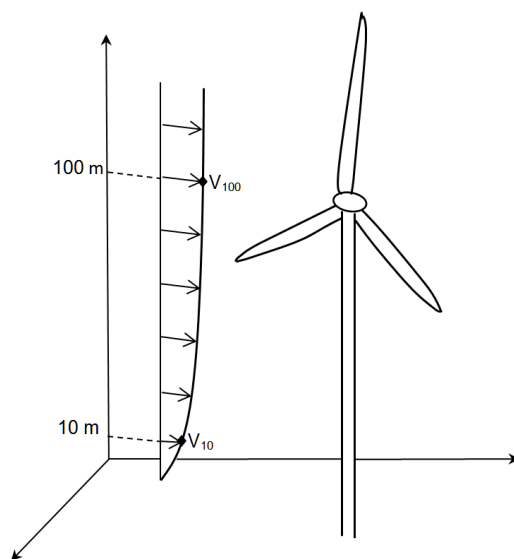
$z_{hub}$ : το υψόμετρο του άξονα της πτερωτής

$\alpha$ : συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από την τραχύτητα

Με χρήση του παρακάτω τύπου υπολογίζεται η μέση ταχύτητα ανέμου  $U$  που πνέει για μέση διάρκεια  $T$ ,  $z$  μέτρα πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Η σχέση αυτή υπολογίζει μέσες ταχύτητες ανέμου μεταξύ διαφορετικών διαρκειών πνοής.

$$U(T, z) = U_{10} \left( 1 + 0.137 \ln \frac{z}{h} - 0.047 \ln \frac{T}{T_{10}} \right) \quad (3.20)$$

Όπου  $h=10\text{m}$ ,  $T_{10}=10$  λεπτά και  $U_{10}$  είναι η μέση ταχύτητα δεκαλέπτου σε ύψος  $h$  από την επιφάνεια της θάλασσας. Για  $T < T_{10}$  η εξίσωση υπολογίζει την πιο πιθανή μέγιστη μέση τιμή για την περίοδο πνοής  $T$ .



Εικόνα 3.24: Κατανομή ταχύτητας καθ' ύψος της ανεμογεννήτριας

Τα δεδομένα της ταχύτητας ανέμου εξαρτώνται από την θερμοκρασία αναφοράς κατά την οποία έγινε η μέτρηση. Επομένως, όταν πρόκειται για τον στατικό σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η θερμοκρασία καθώς η πίεση που ασκείται στον πυλώνα της εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Συνήθως η πυκνότητα του αέρα ισούται με  $1.225 \text{ kg/m}^3$  και σε περιοχές της αρκτικής ζώνης μπορεί να υπάρξει αύξηση μέχρι και 10% (DNV-OS-J101, 2014).

Τα αεροδυναμικά φορτία που ασκούνται σε μια ανεμογεννήτρια εξαρτώνται από τον χρόνο και το υψόμετρο αναφοράς καθώς η ταχύτητα του ανέμου δεν παραμένει σταθερή ούτε στο χρόνο ούτε καθ' ύψος της κατασκευής. Επομένως συνίσταται η φασματική ανάλυση της ταχύτητας του ανέμου. Στην παρούσα εργασία για λόγους απλότητας χρησιμοποιείται η γενικευμένη εξίσωση πίεσης και δύναμης για την παραγωγή μιας χρονοσειράς δύναμης.

Η πίεση που ασκείται στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας ισούται (DNV-OS-J101, 2014).

$$q = \frac{1}{2} \rho_{\alpha} U_{T,z}^2 \quad (3.21)$$

Όπου:

$q$ : η ασκούμενη πίεση

$\rho_{\alpha}$ : η πυκνότητα του αέρα ( $1,226 \text{ kg/m}^3$  σε ξηρό αέρα  $15^{\circ}\text{C}$ )

$U_{T,z}$ : η μέση ταχύτητα του ανέμου για ένα χρονικό διάστημα  $T$  σε υψόμετρο  $z$  πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

Η δύναμη που προκύπτει από την ασκούμενη πίεση ισούται:

$$F_W = C q S \sin a \quad (3.22)$$

Όπου:

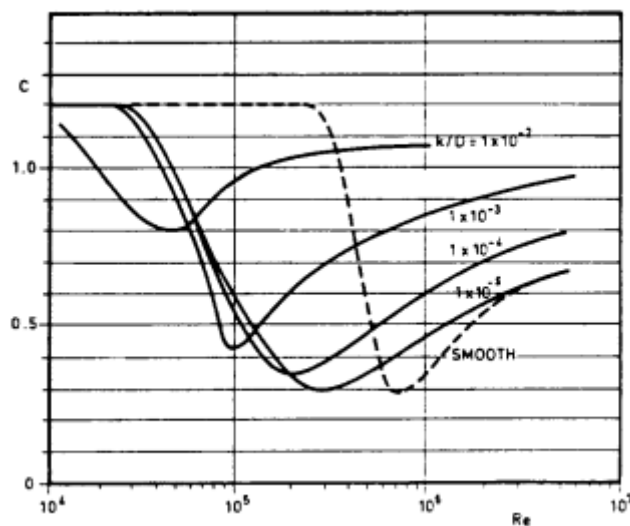
C: συντελεστής σχήματος

q: η ασκούμενη πίεση

S: εμβαδό της κάθετης επιφάνειας στην διεύθυνση της δύναμης

$\alpha$ : η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της δύναμης και της υπό μελέτη επιφάνειας

Ο συντελεστής σχήματος C για διάφορες τραχύτητες (k), διαμέτρους σωλήνα (D) και αριθμούς Reynolds (Re) μπορεί να προσδιοριστεί από την Εικόνα 3.26.



Εικόνα 3.25: Συντελεστής C για διάφορες τραχύτητες (Πηγή: DNV RECOMENDED PRACTISE)

| Υλικό διατομής                     | k (m)                               |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| Καινούριος χάλυβας με επίστρωση    | $5 \cdot 10^{-5}$                   |
| Καινούριος χάλυβας χωρίς επίστρωση | $5 \cdot 10^{-5}$                   |
| Διαβρωμένος χάλυβας                | $3 \cdot 10^{-3}$                   |
| Σκυρόδεμα                          | $3 \cdot 10^{-3}$                   |
| Θαλάσσια βλάστηση                  | $5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$ |

Ο αριθμός Reynolds (Re) ισούται:

$$Re = \frac{VL}{\nu} = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (3.23)$$

Όπου:

V: η ταχύτητα του ρευστού (m/s)

$\nu$ : το κινηματικό ιξώδες (m<sup>2</sup>/s)

L: η χαρακτηριστική γραμμική διάσταση (m)

$\rho$ : η πυκνότητα του ρευστού (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$ : δυναμικό ιξώδες (kg/ms)

## 4 Ανάλυση δεδομένων

### 4.1 Κριτήρια επιλογής και πηγή άντλησης δεδομένων

Για τον υπολογισμό και την στοχαστική διερεύνηση των ασκούμενων δυνάμεων επί των κατασκευών που αναφέρθηκαν παραπάνω, απαιτείται η χρήση χρονοσειρών των γενεσιουργών παραγόντων (ύψος και περίοδος κύματος, ταχύτητα ανέμου) των δυνάμεων.

Αναφορικά με τα μεγέθη που αφορούν στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, κρίνεται απαραίτητο οι χρονοσειρές του ύψους και της περιόδου κύματος καθώς και της ταχύτητας ανέμου να προέρχονται από τον ίδιο σταθμό μέτρησης και να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Οι κυματικές συνθήκες και οι συνθήκες πνοής του ανέμου σχετίζονται, επομένως η συσχέτισή τους πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό. Επιπλέον, είναι επιθυμητή η επιλογή της κατά το δυνατόν μεγαλύτερης χρονοσειράς, ώστε να υπάρχει καλύτερη εποπτεία της συμπεριφοράς του φαινομένου, ενώ είναι σημαντικό να μην λείπουν πολλές καταγραφές από την χρονοσειρά. Επομένως, για να ικανοποιούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις επιλέχθηκε ένας μετρητικός σταθμός στον βόρειο Ειρηνικό ωκεανό, στον κόλπο της Αλάσκας, που ωριαίες τιμές των παραμέτρων από το 1972 έως το 2021.



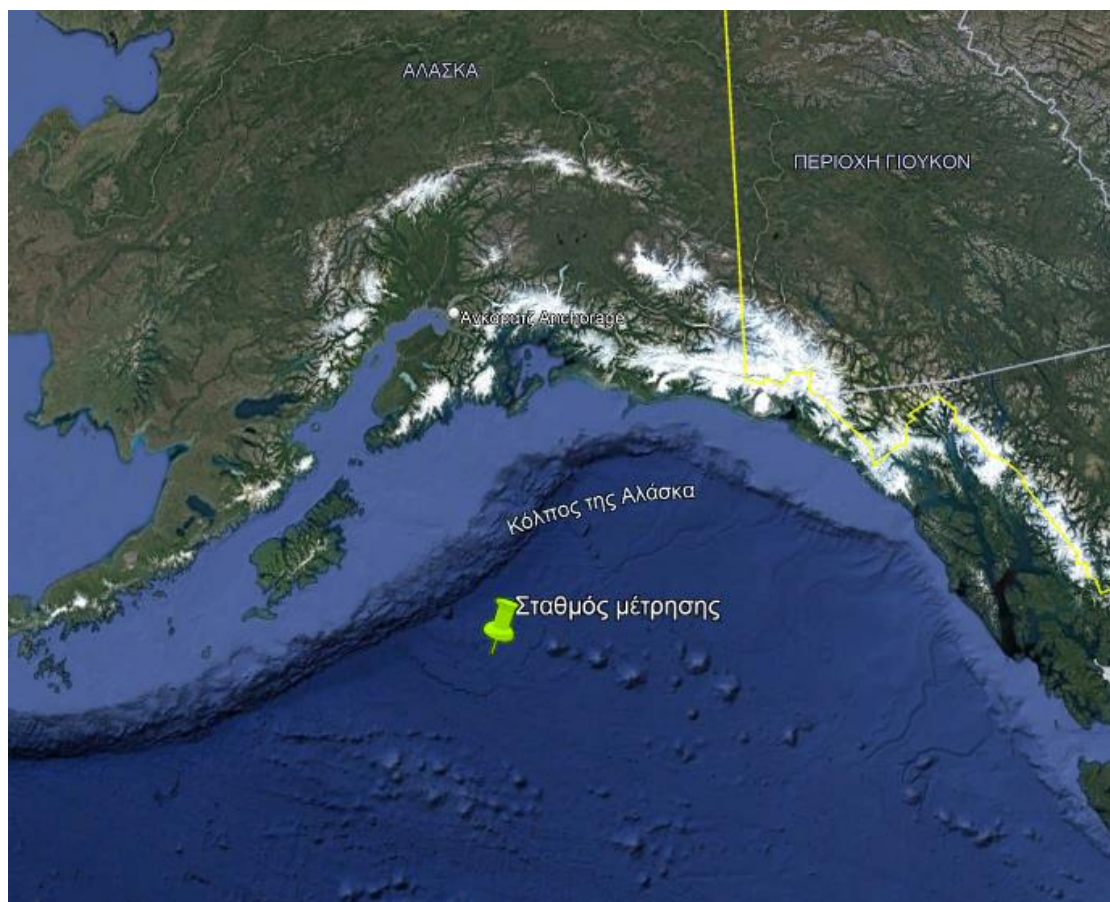
Εικόνα 4.1: Μετρητικός σταθμός



Οι χρονοσειρές του ύψους, της περιόδου κύματος και της ταχύτητας του ανέμου μέσω των οποίων υπολογίζονται οι δυνάμεις στον πυλώνα των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων της NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Επιλέχθηκε αυτή η βάση δεδομένων καθώς διέθετε την μεγαλύτερου μήκους χρονοσειράς με τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν παραπάνω.

Τα χαρακτηριστικά του μετρητικού σταθμού είναι:

- ακριβής θέση:  $56^{\circ}18'1''$  N,  $148^{\circ}1'6''$  W
- διάμετρος δίσκου έδρασης: 3m
- βάθος του νερού: 4129m
- υψόμετρο ανεμόμετρου: 3,8m από την επιφάνεια της θάλασσας



Εικόνα 4.2: Θέση σταθμού μέτρησης

## 4.2 Χρονοσειρές δεδομένων

Χρονοσειρά ή χρονολογική σειρά ονομάζεται το σύνολο των παρατηρήσεων ενός μεγέθους σε διαδοχικά ισαπέχουσες χρονικές στιγμές (χρόνος δειγματοληψίας). Μία χρονοσειρά διαθέτει τρεις ιδιότητες και τρεις συνιστώσες.

### Ιδιότητες:

- Μνήμη (autocorrelation): δείχνει πόσο οι προηγούμενες τιμές μπορούν να επηρεάσουν της επόμενες της χρονοσειράς
- Ομοιογένεια: στατιστική παράμετρος, σε ομοιογενές πεδίο η πιθανότητα να συμβεί ένα γεγονός είναι ίδια όλες τις φορές
- Μονιμότητα (stationarity): η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και οι στατιστικές παράμετροι παραμένουν σταθερές

### Συνιστώσες:

- Τάση (trend): μοτίβο που δείχνει την ανοδική ή καθοδική προδιάθεση μιας χρονοσειράς, μακροπρόθεσμη μεταβολή της μέσης τιμής
- Περιοδικότητα (periodicity): κανονικές κυκλικές ημιτονοειδείς ή συνημιτονοειδείς διακυμάνσεις των τιμών μιας χρονοσειράς σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα
- Εμμονή (persistence): οι ακραίες τιμές τείνουν να ομαδοποιούνται

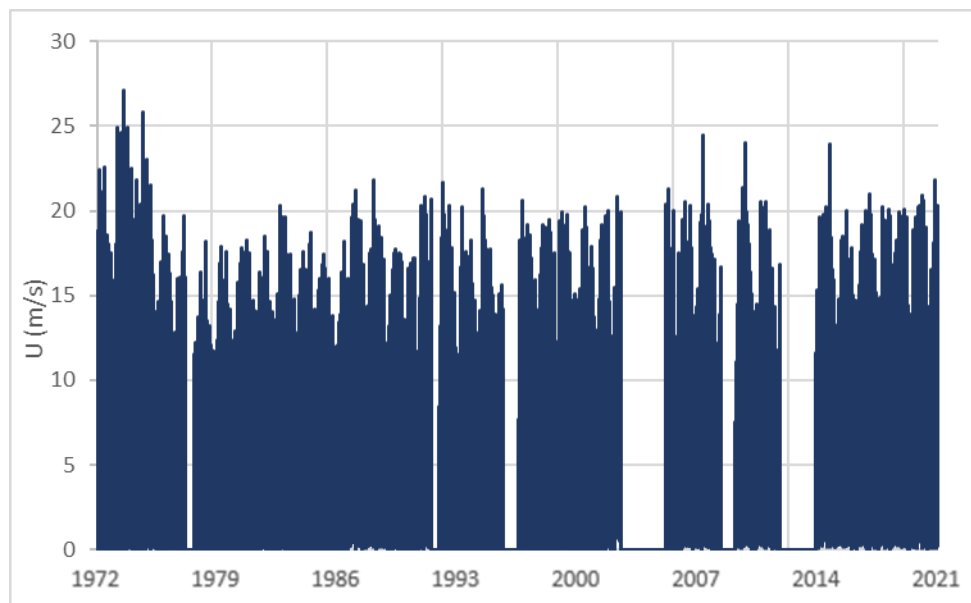
Τα δεδομένα που αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων της NOAA και αφορούν ωριαίες μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου, του ύψους και της περιόδου του κύματος για τα έτη 1972-2021.

### 4.2.1 Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου

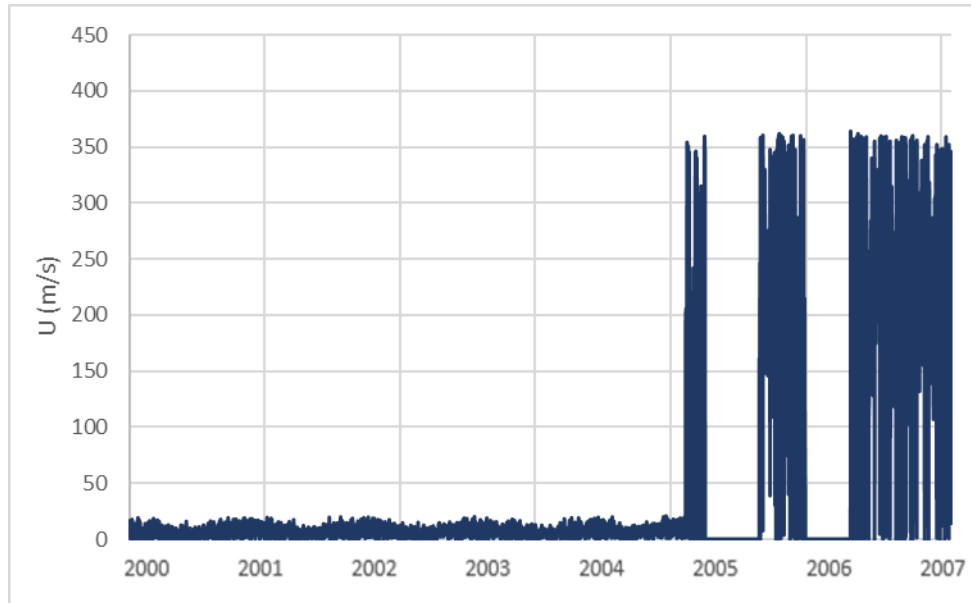
Τα δεδομένα των χρονοσειρών επεξεργάστηκαν ώστε να απαλειφθούν τα τυχόν σφάλματα των καταγραφικών οργάνων.

Συγκεκριμένα για τα δεδομένα ταχύτητας ανέμου:

- Τα δεδομένα της μορφής .99, .999 αντικαταστάθηκαν με κενή μέτρηση “NaN” σύμφωνα με τις οδηγίες της βάσης δεδομένων του NOAA.
- Οι ταχύτητες ανέμου που ήταν μεγαλύτερες των 113 m/s απαλείφθηκαν διότι η συγκεκριμένη ταχύτητα είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου που έχει καταγραφεί.
- Την χρονική περίοδο 2005-2007 φαίνεται να υπήρχε κάποια βλάβη στον σταθμό καταγραφής καθώς οι καταγεγραμμένες τιμές ξεπερνούσαν κατά πολύ τις ανώτερες καταγεγραμμένες τιμές ανέμου(Εικόνα 4.4). Το 2005 ήταν περίοδος τυφώνων στην Αλάσκα επομένως εκτιμάται ότι προκλήθηκε βλάβη στον σταθμό λόγω των έντονων καιρικών φαινομένων. Τα δεδομένα του σταθμού για τα έτη 2005, 2006, 2007 αντικαταστάθηκαν με κενή μέτρηση “NaN”.

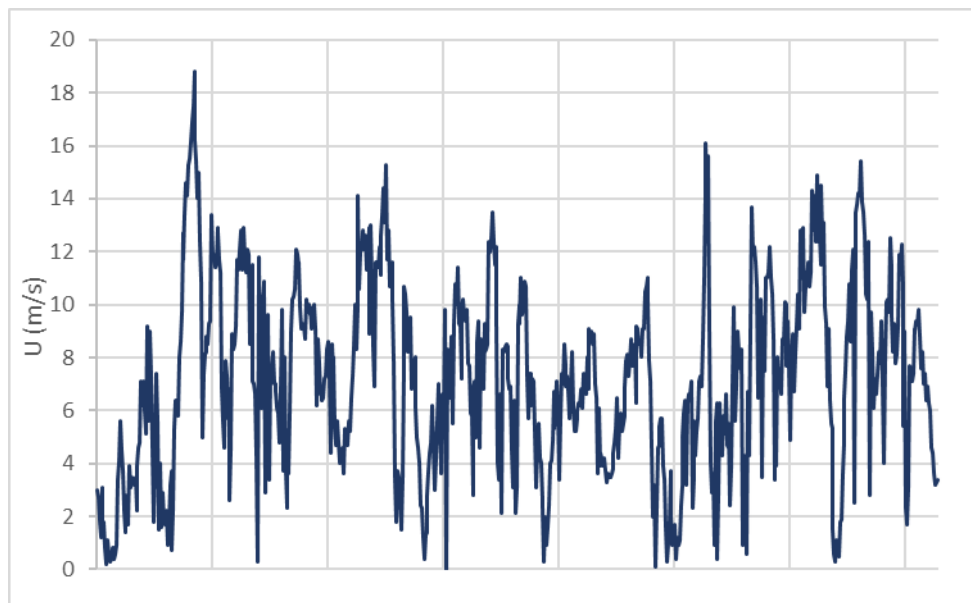


Εικόνα 4.3:Χρονοσειρά ωριαίας ταχύτητας ανέμου ετών 1972-2021



Εικόνα 4.4: Εσφαλμένες καταγραφές ταχύτητας ανέμου

Για καλύτερη εποπτεία της χρονοσειράς στην εικόνα 4.5 παρουσιάζεται η ταχύτητα ανέμου για τον μήνα Οκτώβριο του 1974.



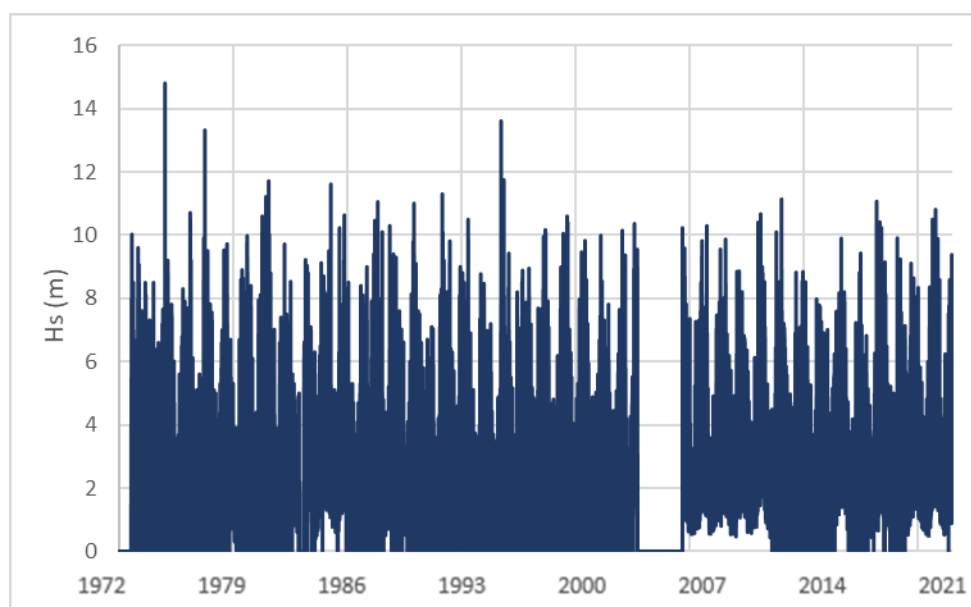
Εικόνα 4.5: Χρονοσειρά ωριαίας ταχύτητας ανέμου Οκτώβριος 1974

#### 4.2.2 Χρονοσειρές ύψους και περιόδου κύματος

Στην επεξεργασία των δεδομένων κύματος ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με τα δεδομένα ταχύτητας ανέμου, δηλαδή:

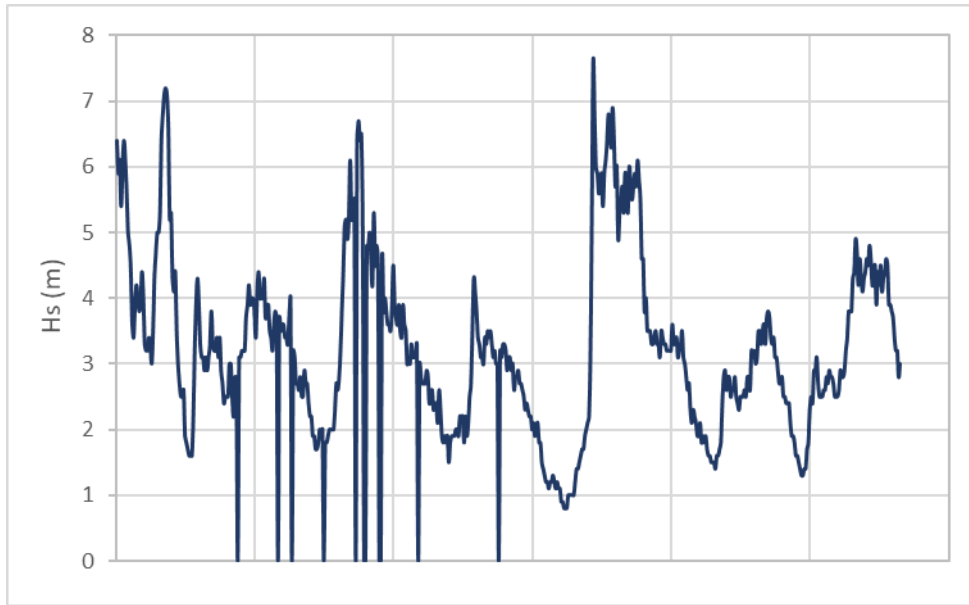
- Τα δεδομένα της μορφής .99, .999 αντικαταστάθηκαν με κενή μέτρηση “NaN” σύμφωνα με τις οδηγίες της βάσης δεδομένων του NOAA.
- Τα ύψη κύματος μεγαλύτερα των 20m αντικαταστάθηκαν με κενή μέτρηση “NaN” διότι το συγκεκριμένο ύψος κύματος είναι το μεγαλύτερο ύψος κύματος που έχει καταγραφεί.
- Οι περίοδοι κύματος μεγαλύτερες των 25 sec αντικαταστάθηκαν με κενή μέτρηση “NaN” διότι η συγκεκριμένη περίοδος κύματος είναι η μεγαλύτερη περίοδος κύματος που έχει καταγραφεί.
- Τα δεδομένα των ετών 2005, 2006, 2007 αντικαταστάθηκαν με κενή μέτρηση “NaN” για τον λόγο που αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Χρονοσειρές ύψους κύματος:



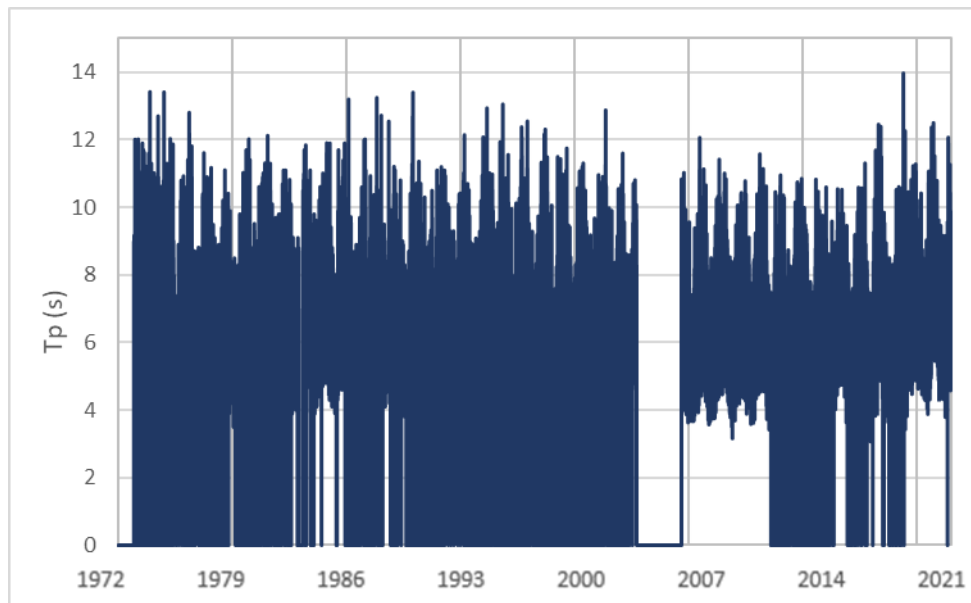
Εικόνα 4.6:Χρονοσειρά ωριαίου ύψους κύματος Hs ετών 1972-2021

Για καλύτερη εποπτεία της χρονοσειράς στην Εικόνα 4.7 παρουσιάζεται το ύψος του κύματος για τον μήνα Οκτώβριο του 1974.



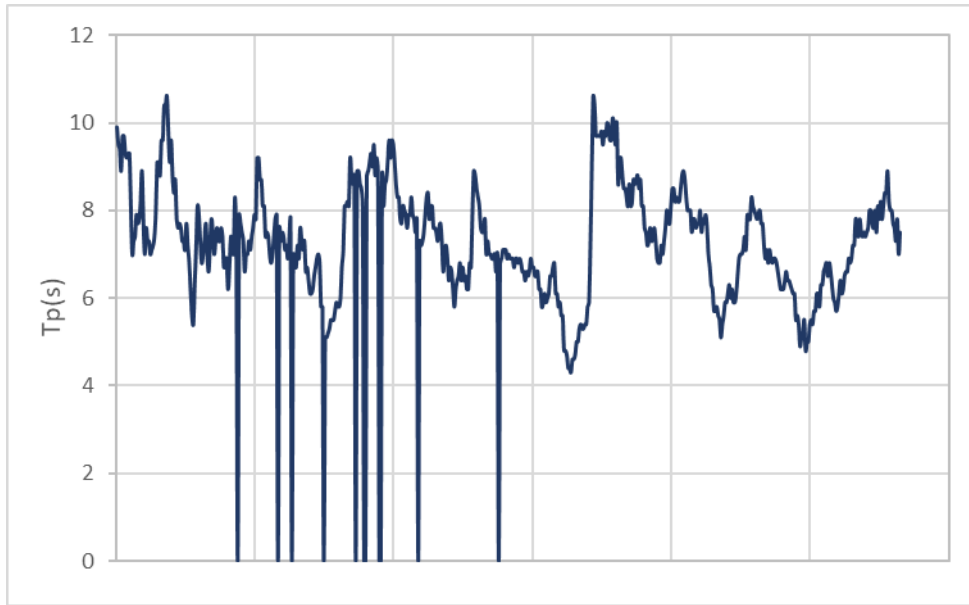
Εικόνα 4.7: Χρονοσειρά ωριαίου ύψους κύματος Οκτώβριος 1974

Χρονοσειρές περιόδου κύματος:



Εικόνα 4.8: Χρονοσειρά ωριαίας περιόδου κύματος  $T_p$  ετών 1972-2021

Για καλύτερη εποπτεία της χρονοσειράς στην Εικόνα 4.9 παρουσιάζεται η περίοδος του κύματος για τον μήνα Οκτώβριο του 1974.



Εικόνα 4.9: Χρονοσειρά ωριαίας περιόδου κύματος Οκτώβριος 1974

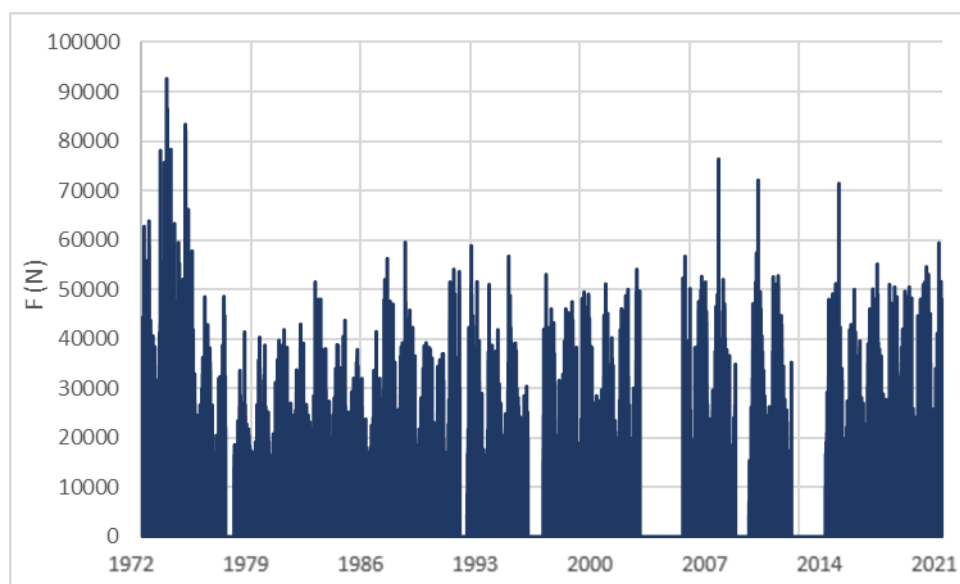
### 4.3 Χρονοσειρές δυνάμεων

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που περιγράφηκαν στα υποκεφάλαια 3.6 Αεροδυναμικά φορτία και 3.7 Υδροδυναμικά φορτία υπολογίζονται οι χρονοσειρές των δυνάμεων. Για τον υπολογισμό των δυνάμεων γίνεται υπόθεση ενός Μονοριλέ με πύργο διαμέτρου  $D=3\text{m}$  ύψους  $H=100\text{m}$  πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και  $d=30\text{m}$  κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Όλα τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται φαίνονται στον πίνακα 4.1 :

Πίνακας 4.1: Μεγέθη Μονοριλέ για υπολογισμούς δυνάμεων

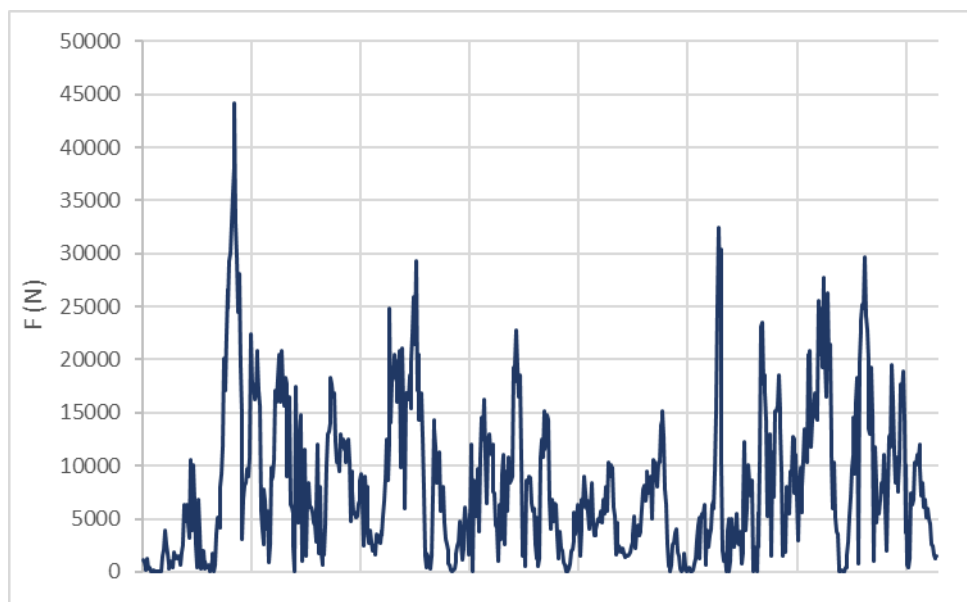
|   |      |
|---|------|
| $D(\text{m})$                             | 4    |
| $H(\text{m})$                             | 100  |
| $d(\text{m})$                             | 30   |
| $C_D$                                     | 1,3  |
| $C_M$                                     | 2    |
| $C$                                       | 0,5  |
| $\rho_w(\text{kg}/\text{m}^3)$            | 1025 |
| $\rho_{\text{air}}(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 1,25 |

#### 4.3.1 Χρονοσειρά δύναμης λόγω ανέμου



Εικόνα 4.10:Χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω ανέμου ετών 1972-2021

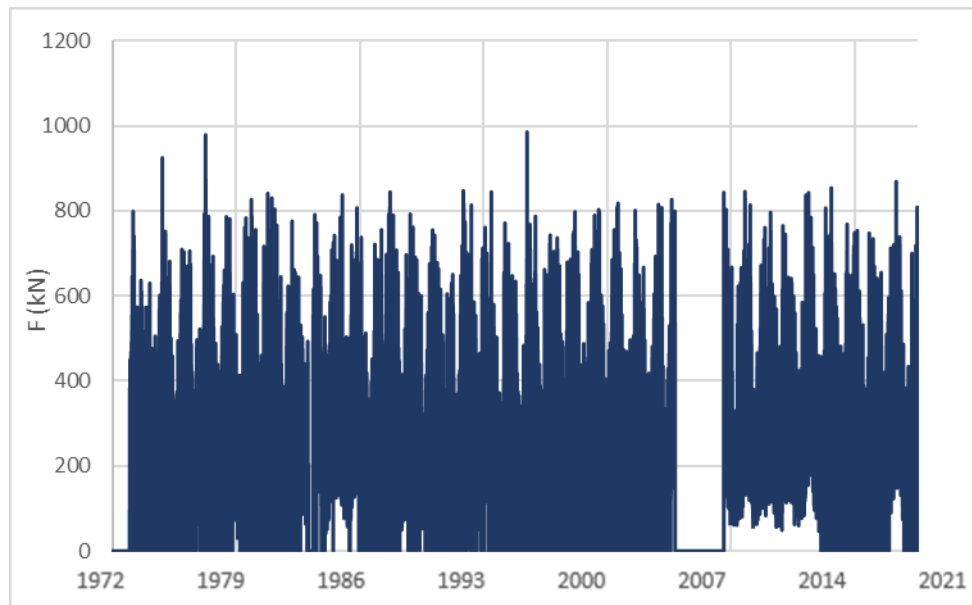
Για καλύτερη εποπτεία της χρονοσειράς στην Εικόνα 4.11 παρουσιάζεται η χρονοσειρά δύναμης λόγω ανέμου για τον μήνα Οκτώβριο του 1974.



Εικόνα 4.11:Χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω ανέμου Οκτώβριος 1974

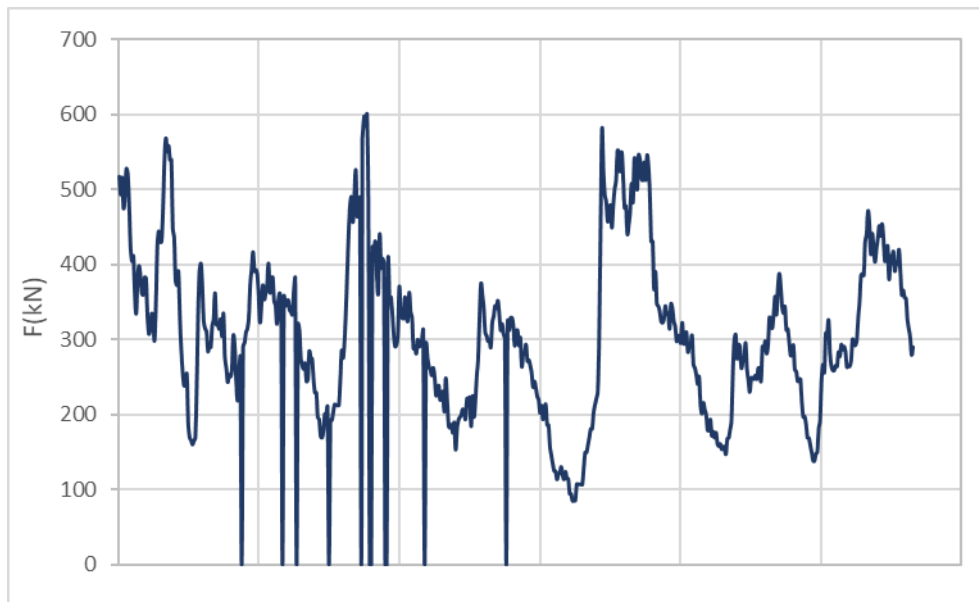


#### 4.3.2 Χρονοσειρά δύναμης λόγω κύματος



Εικόνα 4.12:Χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω κύματος ετών 1972-2021

Για καλύτερη εποπτεία της χρονοσειράς στην Εικόνα 4.13 παρουσιάζεται η χρονοσειρά δύναμης λόγω κύματος για τον μήνα Οκτώβριο του 1974.



Εικόνα 4.13:Χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω κύματος Οκτώβριος 1974



## 5 Στατιστική ανάλυση

### 5.1 Στατιστικές ροπές

Για το κάθε υπό εξέταση μέγεθος υπολογίστηκαν οι 4 πρώτες κεντρικές ροπές. Αυτές είναι οι εξής:

- Μέση τιμή: η πρώτη κεντρική ροπή ή ροπή πρώτης τάξης, η αναμενόμενη τιμή  $E$  μιας μεταβλητής  $X$ .

$$\mu_X = E[X] \quad (5.1)$$

- Διασπορά: η δεύτερη κεντρική ροπή, μετρά την μεταβλητότητα των παρατηρήσεων γύρω από τη μέση τιμή.

$$Var[X] = \sigma_X^2 = \mu_X^{(2)} = E[(X - \mu_X)^2] \quad (5.2)$$

- Ασυμμετρία: η τρίτη κεντρική ροπή, μηδενική τιμή της ασυμμετρίας δείχνει συμμετρική κατανομή. Αν η ασυμμετρία μια κατανομής είναι μεγαλύτερη από το μηδέν τότε η κατανομή είναι θετικά ασύμμετρη και εμφανίζει μεγαλύτερη ουρά προς τα δεξιά. Αντίστοιχα, για τιμές ασυμμετρίας μικρότερες του μηδέν η κατανομή είναι αρνητικά ασύμμετρη με μεγαλύτερη ουρά προς τα αριστερά.

$$Skew(X) = \frac{\mu_X^{(3)}}{\sigma_X^3} = \frac{E[(X - \mu_X)^3]}{\sigma_X^3} \quad (5.3)$$

- Κύρτωση: η τέταρτη κεντρική ροπή, περιγράφει πόσο αιχμηρή ή όχι είναι η συνάρτηση πυκνότητας γύρω από την αιχμή της. Ο συντελεστής της κύρτωσης συγκρίνεται με την τιμή 3, που είναι η κύρτωση της κανονικής κατανομής. Για τιμές μεγαλύτερες του 3 η κατανομή χαρακτηρίζεται λεπτόκυρτη ενώ για τιμές μικρότερες του 3 πλατύκυρτη.

$$Kurt(X) = \frac{\mu_X^{(4)}}{\sigma_X^4} = \frac{E[(X-\mu_X)^4]}{\sigma_X^4} \quad (5.4)$$

Στους πίνακες 5.1, 5.2 φαίνονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των τεσσάρων κεντρικών ροπών της ταχύτητας του ανέμου και της δύναμης που προκύπτει από αυτόν και του ύψους και της περιόδου κύματος και της προκύπτουσας εξ αυτών δύναμης.

Πίνακας 5.1: Κεντρικές ροπές ταχύτητας ανέμου και δύναμης λόγω αυτού

|                        | Ταχύτητα ανέμου (m/s) | Δύναμη (N) |
|------------------------|-----------------------|------------|
| <b>Μέση τιμή</b>       | 7,4                   | 8492,7     |
| <b>Τυπική απόκλιση</b> | 3,6                   | 7659,9     |
| <b>Ασυμμετρία</b>      | 0,4                   | 1,7        |
| <b>Κύρτωση</b>         | -0,003                | 3,9        |

Πίνακας 5.2: Κεντρικές ροπές ύψους και περιόδου κύματος και δύναμης που προκύπτει λόγω αυτών

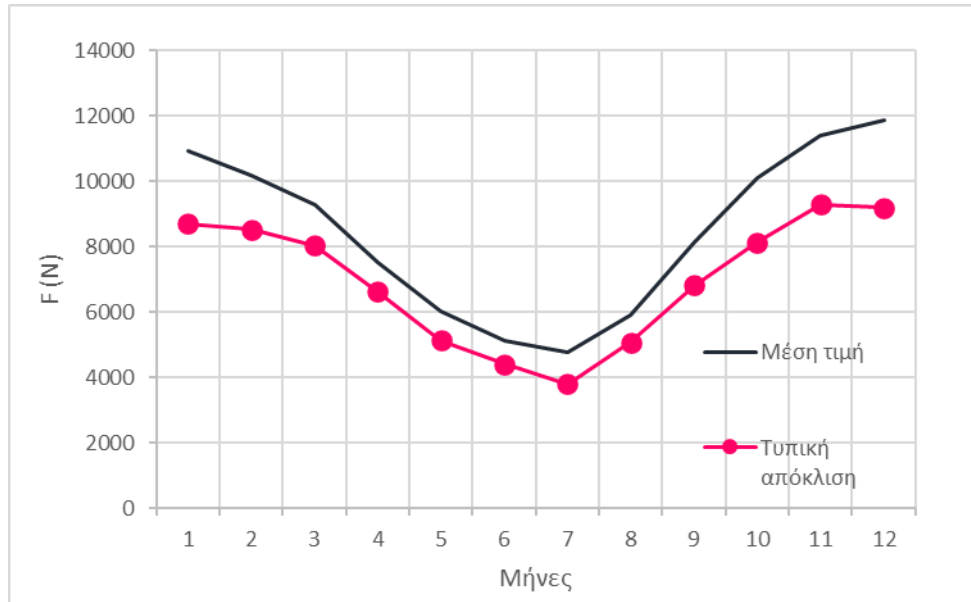
|                        | Hs (m) | Tp (s) | F (kN) |
|------------------------|--------|--------|--------|
| <b>Μέση τιμή</b>       | 2,7    | 6,6    | 266,4  |
| <b>Τυπική απόκλιση</b> | 1,4    | 1,2    | 125,5  |
| <b>Ασυμμετρία</b>      | 1,1    | 0,5    | 0,8    |
| <b>Κύρτωση</b>         | 1,7    | 0,3    | 0,5    |

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ταχύτητας ανέμου, του ύψους και της περιόδου κύματος επιβεβαιώνονται βιβλιογραφικά (Dimitriadis et al. 2021).

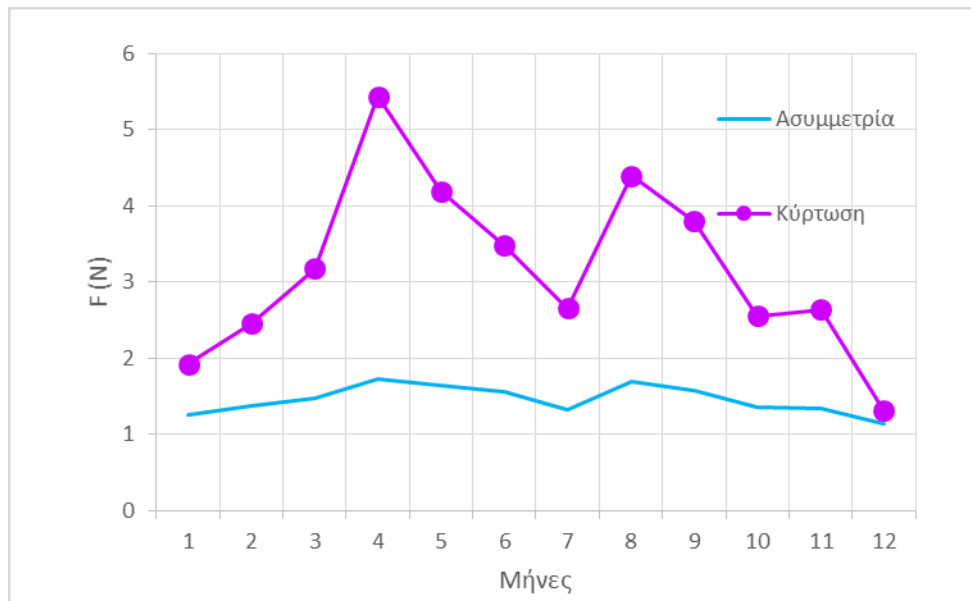
## 5.2 Μοντέλα περιοδικότητας

Τα μοντέλα περιοδικότητας διαμορφώθηκαν υπολογίζοντας την μέση τιμή, την τυπική απόκλιση, την ασυμμετρία και την κύρτωση των δυνάμεων για κάθε μήνα. Ο άνεμος άρα και τα ανεμογενή κύματα εμφανίζουν αδύναμη ενδοημερήσια περιοδικότητα (Katikas et. al, 2021), επομένως μελετάται απευθείας η μηνιαία περιοδικότητα των δυνάμεων.

Για την δύναμη που προκαλείται από τα αεροδυναμικά φορτία:



Εικόνα 5.1:Περιοδικότητα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης δύναμης λόγω ανέμου

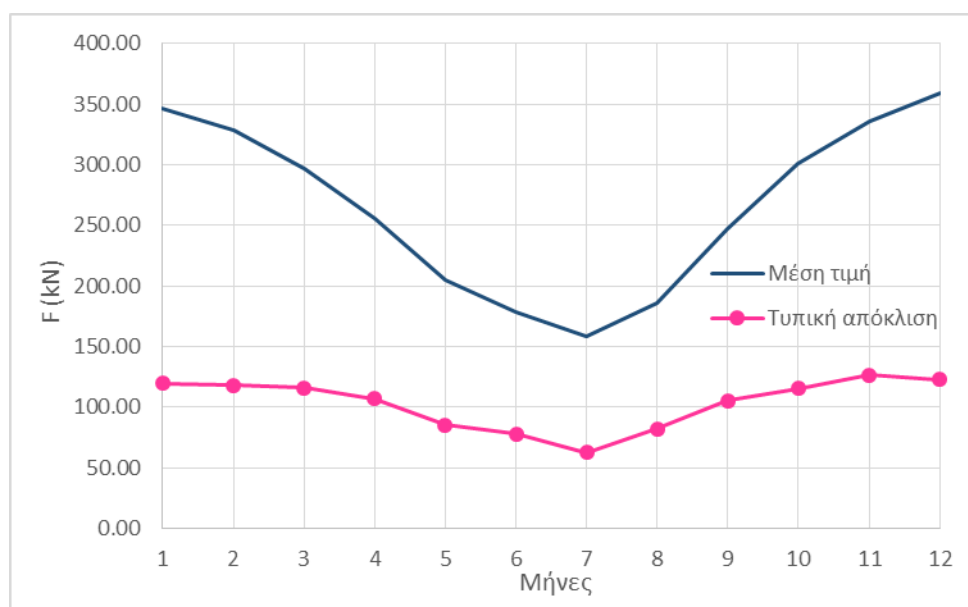


Εικόνα 5.2:Περιοδικότητα ασυμμετρίας και κύρτωσης δύναμης λόγω ανέμου

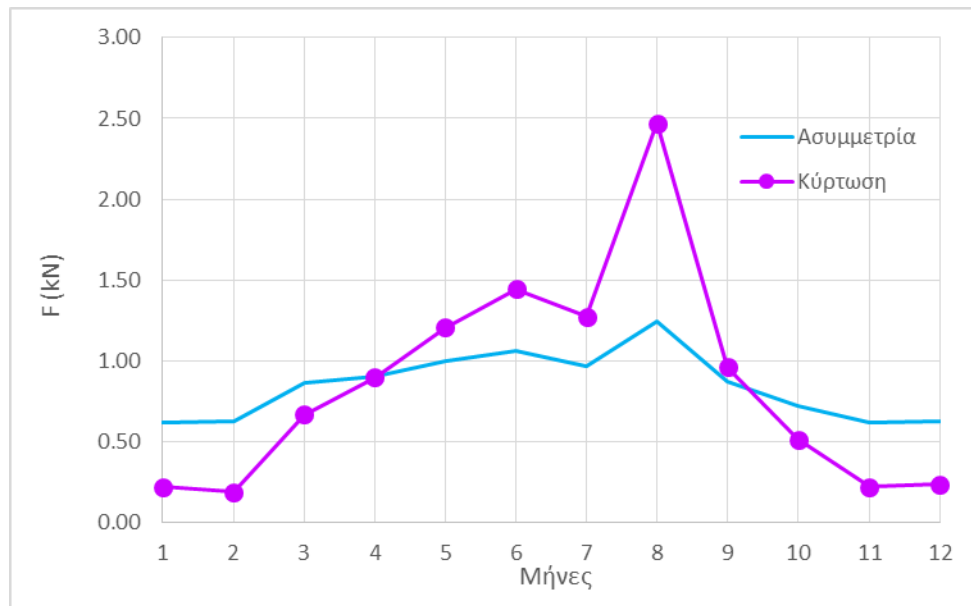
Πίνακας 5.3: Περιοδικότητες δύναμης λόγω ανέμου

| Μήνας | Μέση τιμή | Τυπική απόκλιση | Ασυμμετρία | Κύρτωση |
|-------|-----------|-----------------|------------|---------|
| 1     | 10930,61  | 8692,78         | 1,25       | 1,92    |
| 2     | 10185,37  | 8527,40         | 1,38       | 2,45    |
| 3     | 9290,12   | 8030,89         | 1,47       | 3,17    |
| 4     | 7509,73   | 6620,10         | 1,73       | 5,44    |
| 5     | 6001,45   | 5123,77         | 1,63       | 4,19    |
| 6     | 5109,05   | 4413,03         | 1,55       | 3,47    |
| 7     | 4758,34   | 3800,23         | 1,32       | 2,65    |
| 8     | 5887,51   | 5078,50         | 1,68       | 4,39    |
| 9     | 8153,15   | 6818,76         | 1,58       | 3,80    |
| 10    | 10113,06  | 8126,12         | 1,36       | 2,55    |
| 11    | 11382,69  | 9284,94         | 1,34       | 2,64    |
| 12    | 11861,99  | 9178,28         | 1,13       | 1,31    |

Για την δύναμη που προκαλείται από τα υδροδυναμικά φορτία:



Εικόνα 5.3: Περιοδικότητα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης δύναμης λόγω κύματος



Εικόνα 5.4:Περιοδικότητα ασυμμετρίας και κύρτωσης δύναμης λόγω ανέμου

Πίνακας 5.4: Περιοδικότητες δύναμης λόγω κύματος

| Μήνας | Μέση τιμή | Τυπική απόκλιση | Ασυμμετρία | Κύρτωση |
|-------|-----------|-----------------|------------|---------|
| 1     | 346,32    | 119,38          | 0,62       | 0,22    |
| 2     | 328,54    | 117,75          | 0,63       | 0,19    |
| 3     | 296,51    | 115,81          | 0,86       | 0,67    |
| 4     | 255,82    | 106,75          | 0,90       | 0,90    |
| 5     | 204,86    | 85,12           | 0,99       | 1,20    |
| 6     | 178,03    | 77,62           | 1,06       | 1,44    |
| 7     | 158,35    | 62,72           | 0,97       | 1,27    |
| 8     | 185,82    | 82,04           | 1,24       | 2,47    |
| 9     | 247,02    | 105,24          | 0,87       | 0,96    |
| 10    | 300,59    | 115,45          | 0,72       | 0,51    |
| 11    | 335,94    | 126,27          | 0,61       | 0,22    |
| 12    | 358,85    | 122,83          | 0,63       | 0,24    |

Η περιοδικότητα των δυνάμεων -όπως και των γενεσιουργών τους μεγεθών- είναι αδύναμες επομένως δεν θα χρησιμοποιηθούν αργότερα στο στοχαστικό μοντέλο στο οποίο δίνεται έμφαση στη μεταβλητότητα των δυνάμεων.

### 5.3 Προσαρμογή γνωστών κατανομών

Προχωρώντας, θα γίνει προσαρμογή μιας κατάλληλης συνάρτησης περιθώριας κατανομής στις χρονοσειρές των δυνάμεων. Στην βιβλιογραφία εντοπίζεται η κατανομή Pareto-Burr-Feller ως μια κατανομή με πολύ καλή προσαρμογή στην

ταχύτητα του ανέμου και στο ύψος και την περίοδο κύματος και γενικότερα σε πολλές φυσικές διεργασίες. Επομένως, εύλογα η δοκιμή για την προσαρμογή μιας περιθώριας κατανομής στα δεδομένα θα ξεκινήσει από αυτή τη κατανομή.

Η κατανομή Pareto-Burr-Feller (PBF), όπως προτάθηκε από Koutsoyiannis et al. (2018a) είναι γνωστή και ως Pareto III, IV, Burr XII και Feller. Πρόκειται για μια τριπαραμετρική κατανομή με δύο παραμέτρους σχήματος και μία κλίμακας. Η PBF ορίζεται στο διάστημα  $(0, +\infty)$  και χαρακτηρίζεται ως κατανομή με βαριά ουρά (heavy-tailed distribution). Οι κατανομές με βαριά ουρά (Pareto, Pareto-Burr-Feller, Longnormal) σε αντίθεση με αυτές με την πιο ελαφριά ουρά (Exponential, Gamma, Weibull) διαθέτουν συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης- συνάρτηση επιβίωσης (survival function)- για την οποία γίνεται λόγος παρακάτω- που συγκλίνει πολύ αργά στο μηδέν. Το γεγονός αυτό καθιστά τις κατανομές αυτές κατάλληλες για χρήση σε δεδομένα που εμπεριέχουν ακραίες τιμές και άρα στις περισσότερες φυσικές διεργασίες.

Οι συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας (cdf) και πυκνότητας πιθανότητας (pdf) φαίνονται παρακάτω:

$$\text{Cdf: } F(x; \alpha, \beta, \lambda) = 1 - \left(1 + \left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right)^{-\lambda} \quad x, \alpha, \beta, \lambda > 0 \quad (5.5)$$

$$\text{Pdf: } f(x; \alpha, \beta, \lambda) = \alpha \lambda \beta^{-\alpha} x^{\alpha-1} \left(1 + \left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right)^{-(\lambda+1)}, \quad x, \alpha, \beta, \lambda > 0 \quad (5.6)$$

Όπου  $\alpha, \lambda$  παράμετροι σχήματος και  $\beta$  η παράμετρος κλίμακας.

Οι παράμετροι της Pareto-Burr-Feller (PBF) συνδέονται με τις στατιστικές ροπές με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Μέση τιμή} = \mu_1 \quad (5.7)$$

$$\text{Διασπορά} = -\mu_1^2 + \mu_2 \quad (5.8)$$

$$\text{Ασυμμετρία} = 2\mu_1^3 - 3\mu_1\mu_2 + \mu_3 \quad (5.9)$$



$$\text{Κύρτωση} = -3\mu_1^4 + 6\mu_1^2\mu_2 - 4\mu_1\mu_2 + \mu_4 \quad (5.10)$$

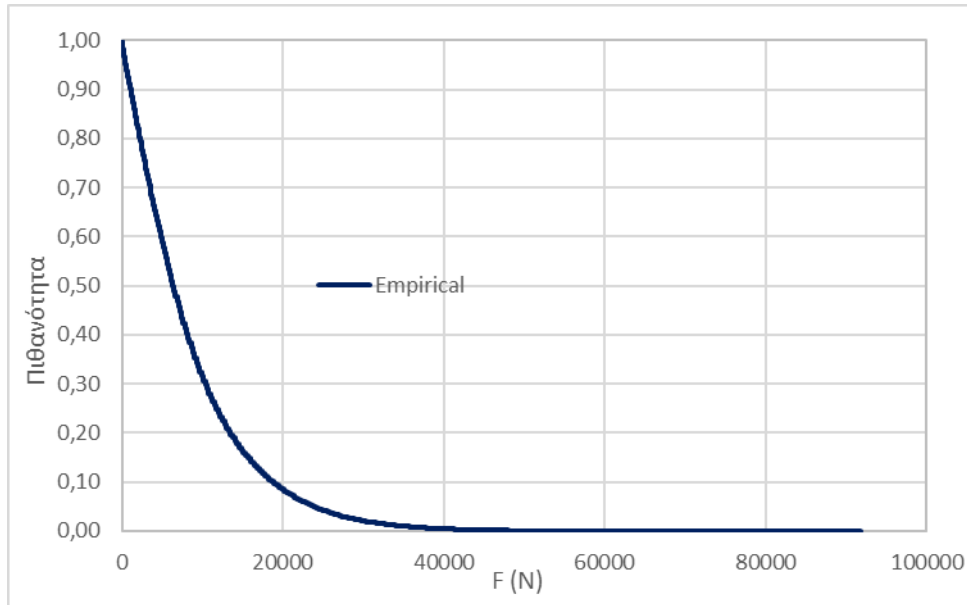
Όπου 
$$\mu_r = \beta^r \lambda \text{Beta} \left( \frac{\alpha\lambda - r}{a}, \frac{a+r}{a} \right) \quad (5.11)$$

Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας  $F(x)$  (cdf) είναι γνωστή και ως συνάρτηση πιθανότητας μη υπέρβασης. Σημαντική για την ανάλυση που θα ακολουθήσει είναι και η συνάρτηση επιβίωσης (survival ή survivor function) η οποία αναπαριστά την πιθανότητα υπέρβασης και ορίζεται ως:

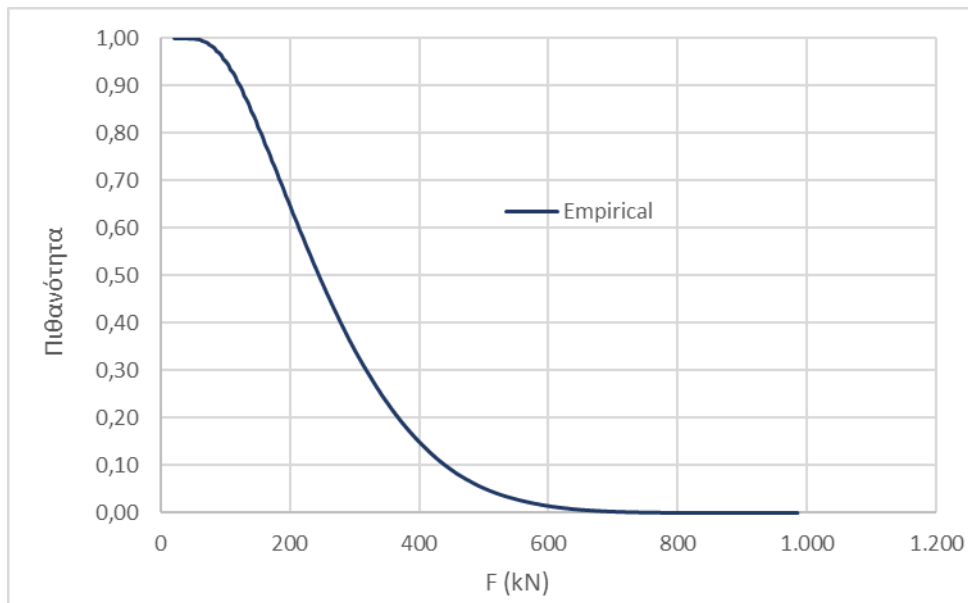
$$\bar{F}(x) := P\{\underline{x} > x\} = 1 - F(x) \quad (5.12)$$

Για την προσαρμογή των κατανομών των δυνάμεων λόγω ανέμου και κύματος θα χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης καθώς:

- δείχνει καλύτερα την ποιότητα προσαρμογής οποιασδήποτε γνωστής κατανομής στα δεδομένα αφού λαμβάνει υπόψη την παρουσία των ακραίων τιμών των δεδομένων.
- δίνει πολύ καλή εικόνα για την ουρά των κατανομών.
- συνδέεται με τις cdf (Εξίσωση 5.5) και pdf (πρώτη παράγωγος cdf). Επομένως η προσαρμογή γνωστής κατανομής στη συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης των δεδομένων συνεπάγεται με την προσαρμογή των cdf, pdf της PBF στις cdf, pdf των δεδομένων.



Εικόνα 5.5: Πιθανότητα υπέρβασης δύναμης λόγω ανέμου



Εικόνα 5.6: Πιθανότητα υπέρβασης δύναμης λόγω κύματος

Η προσαρμογή της συνάρτησης πιθανότητας υπέρβασης της κατανομής PBF στην συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης των δεδομένων έγινε υπολογίζοντας τις

παραμέτρους της PBF για τις οποίες ελαχιστοποιείται ο τύπος του σφάλματος (Dimitriadis and Koutsoyiannis, 2017):

$$\varepsilon_f = \sum_i \left| 1 - \frac{F_m(x_i)}{F_e(x_i)} \right| \sum_i |F_e(x_i) - F_m(x_i)| \sum_i \left| 1 - \frac{F_e(x_i)}{F_m(x_i)} \right| \quad (5.13)$$

Όπου  $F_e$ ,  $F_m$  είναι οι εμπειρικές και οι τιμές του μοντέλου αντίστοιχα.

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προσαρμογή της συνάρτησης επιβίωσης της PBF στη συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης των δεδομένων:

- Διαμορφώθηκαν οι συναρτήσεις πιθανότητας υπέρβασης των χρονοσειρών των δυνάμεων, κατατάσσοντας τις τιμές των δεδομένων σε αύξουσα σειρά και αντιστοιχίζοντας την κάθε τιμή με μία πιθανότητα υπέρβασης.

Όπου η πιθανότητα υπέρβασης:  $F(i) = 1 - i/(N + 1)$  με  $i$  τον αύξοντα αριθμό της εκάστοτε υπό εξέταση τιμής και  $N$  το πλήθος των τιμών.

- Με χρήση της Εξίσωσης 5.5 και με στόχο την ελαχιστοποίηση του σφάλματος της Εξίσωσης 5.13 προσδιορίστηκαν οι παράμετροι  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$  και προσαρμόστηκε η συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης της PBF στα δεδομένα.

Στα διαγράμματα 5.7, 5.8 η εμπειρική και η προσαρμοσμένη σε αυτή θεωρητική συνάρτηση PBF σχεδιάζονται σε λογαριθμικούς άξονες ώστε να έχουμε καλύτερη εποπτεία της προσαρμογής στην ουρά της κατανομής.

Για την προσαρμογή της PBF στη συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης της δύναμης λόγω ανέμου προκύπτουν οι συντελεστές:

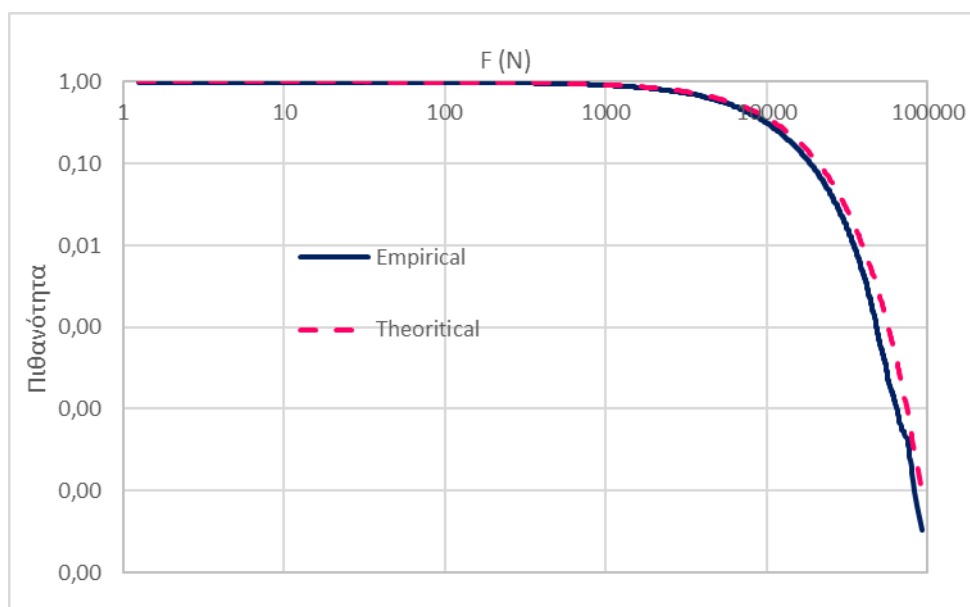
Πίνακας 5.5: Συντελεστές PBF για προσαρμογή στη κατανομή δύναμης λόγω ανέμου

|           |            |
|-----------|------------|
| $\alpha$  | 1,11       |
| $\beta$   | 1168526,85 |
| $\lambda$ | 230,12     |

Υπολογίζονται οι στατιστικές ροπές:

Πίνακας 5.6: Στατιστικές ροπές δύναμης λόγω ανέμου από PBF

|                        |         |
|------------------------|---------|
| <b>Μέση τιμή</b>       | 8496,8  |
| <b>Τυπική απόκλιση</b> | 14277,5 |
| <b>Ασυμμετρία</b>      | 0,3     |
| <b>Κύρτωση</b>         | 0,6     |



Εικόνα 5.7: Προσαρμογή PBF στην εμπειρική συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης της δύναμης λόγω ανέμου

Για την προσαρμογή της PBF στη συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης της δύναμης λόγω κύματος προκύπτουν οι συντελεστές:

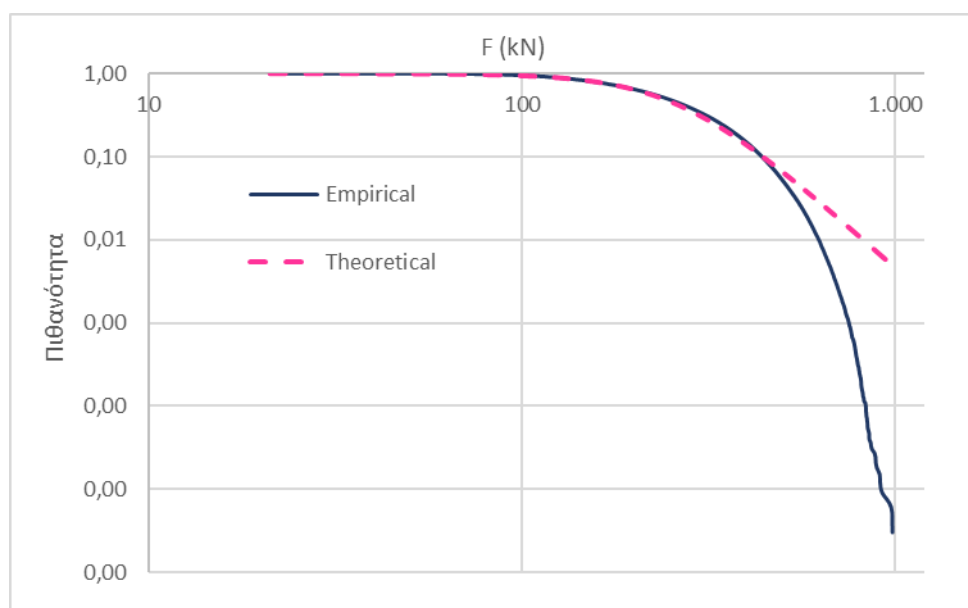
Πίνακας 5.7: Συντελεστές PBF για προσαρμογή στη κατανομή δύναμης λόγω κύματος

|           |        |
|-----------|--------|
| $\alpha$  | 3,15   |
| $\beta$   | 264,89 |
| $\lambda$ | 1,28   |

Υπολογίζονται οι στατιστικές ροπές:

Πίνακας 5.8: Στατιστικές ροπές δύναμης λόγω κύματος από PBF

|                        |       |
|------------------------|-------|
| <b>Μέση τιμή</b>       | 269,2 |
| <b>Τυπική απόκλιση</b> | 412,3 |
| <b>Ασυμμετρία</b>      | 0,2   |
| <b>Κύρτωση</b>         | 20,4  |



Εικόνα 5.8: Προσαρμογή PBF στην εμπειρική συνάρτηση πιθανότητας υπέρβασης της δύναμης λόγω κύματος

Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται πολύ καλή προσαρμογή της θεωρητικής στην εμπειρική κατανομή στο σώμα της κατανομής και αρκετά καλή στην ουρά της. Στην περίπτωση της δύναμης λόγω κύματος η προσαρμογή στην ουρά θα μπορούσε να είναι καλύτερη με χρήση διαφορετικής κατανομής. Οι διαφορές που προκύπτουν στον υπολογισμό των ροπών από την εμπειρική και από τη θεωρητική κατανομή οφείλονται στο πεπερασμένο διαθέσιμο μήκος δείγματος.



## 6 Στοχαστική ανάλυση

### 6.1 Στοχαστικές ανελίξεις

Μια στοχαστική ανέλιξη είναι μια διαδικασία που περιγράφει την μεταβολή μίας ή περισσότερων μεταβλητών υπό καθεστώς αβεβαιότητας. Είναι φανερό πως η εφαρμογή μιας τέτοιας διαδικασίας είναι χρήσιμη στην μελέτη των φυσικών διεργασιών τα οποία σαφώς και χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα. Στοχαστική ανέλιξη ορίζεται ως μια οικογένεια μεταβλητών  $\underline{x}_t$  ή  $\underline{x}(t)$  όπου  $t$  είναι παράμετρος που παίρνει τιμές από ένα κατάλληλο σύνολο  $T$ , δεικτοσύνολο, το οποίο συνήθως παριστάνει τον χρόνο.

Μια στοχαστική ανέλιξη μπορεί να ορίζεται σε διακριτό χρόνο, όταν το δεικτοσύνολο  $T$  αντιστοιχεί σε διακριτές μονάδες χρόνου  $T=\{0, 1, 2, \dots\}$ . Επίσης μπορεί να ορίζεται σε συνεχή χρόνο όταν το δεικτοσύνολο αντιστοιχεί σε συνεχή χρόνο  $T=[0, \infty)$ .

Παρόλο που οι φυσικές διεργασίες εκτυλίσσονται σε συνεχή χρόνο, οι μετρήσεις των φυσικών μεγεθών (ταχύτητα ανέμου, ύψος κύματος κτλ.) και η γένεση στοχαστικών χρονοσειρών γίνονται σε διακριτό χρόνο. Επομένως, θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη τις επιπτώσεις που έχει η διακριτοποίηση στις ιδιότητες της ανέλιξης.

Η αναπαράσταση σε συνεχή χρόνο προέρχεται από την αναπαράσταση σε διακριτό χρόνο:

$$\underline{x}_t := \frac{1}{D} \int_{(t-1)D}^{tD} \underline{x}(u) du \quad (6.1)$$

Όπου  $t \in Z$  αντιπροσωπεύει συνεχή μεταβλητή  $[(t-1)D, tD]$  και  $D$  είναι το χρονικό βήμα.

Η συναθροισμένη ανέλιξη ορίζεται ως:

$$\underline{X}(t) := \int_0^t \underline{x}(u) du \quad (6.2)$$

Διακριτοποιώντας ανά  $D$  σε  $\tau$  διαστήματα λαμβάνουμε την στιγμιαία ανέλιξη:

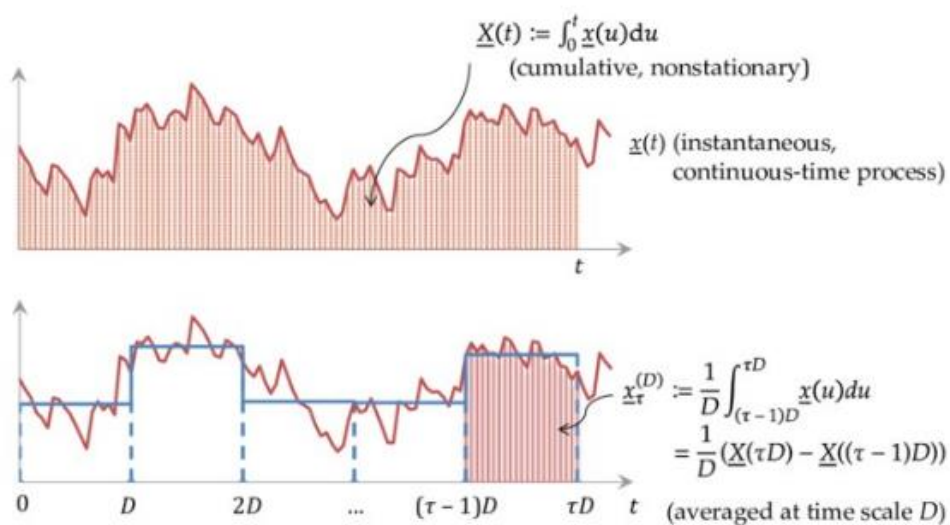
$$\underline{x}_\tau := \underline{x}(\tau D) \quad (6.3)$$

Υπολογίζοντας τον μέσο όρο στη χρονική κλίμακα  $\Delta$  λαμβάνουμε την μέση ανέλιξη:

$$\underline{x}_\tau^{(D)} := (\underline{X}(\tau D) - \underline{X}((\tau - 1)D))/D \quad (6.4)$$

Όπου  $\underline{X}(t)$  η συναθροισμένη ανέλιξη.

Οι παραπάνω σχέσεις αναπαρίστανται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 6.1: Παράδειγμα ανέλιξης σε συνεχή και σε διακριτό χρόνο (Πηγή: Koutsoyiannis, 2000)

Η υλοποίηση μιας στοχαστικής ανέλιξης, δηλαδή ένα σύνολο παρατηρήσεων  $x(t)$  της  $\underline{x}(t)$  ονομάζεται χρονοσειρά ή δειγματοσυνάρτηση.

### 6.1.1 Ανέλιξη λευκού θορύβου

Μια ανέλιξη λευκού θορύβου είναι ένα τυχαίο σήμα παρατηρήσεων. Οι τιμές μιας χρονοσειράς που ακολουθεί ανέλιξη λευκού θορύβου έχουν μηδενική συσχέτιση μεταξύ τους.



### 6.1.2 Ανέλιξη Markov

Σε μία ανέλιξη Markov το μέλλον δεν εξαρτάται από το παρελθόν όταν το παρόν είναι γνωστό (Paroulis, 1991). Σε διακριτό χρόνο η ανέλιξη είναι ίδια με μία ανέλιξη AR(1). Τα πλεονεκτήματα μιας μαρκοβιανής ανέλιξης είναι η απλότητά της και το γεγονός ότι απαιτεί μόνο μια παράμετρο για τον προσδιορισμό της. Ωστόσο, πρόκειται για μια ιδανική περίπτωση ανέλιξης που δεν ανταποκρίνεται στη φύση και άρα ούτε στη συμπεριφορά των φυσικών διεργασιών. Όσο αυξάνει η κλίμακα συνάθροισης τόσο η ανέλιξη πλησιάζει την συμπεριφορά λευκού θορύβου.

### 6.1.3 Ανέλιξη Hurst- Kolmogorov

Μέσω της ανέλιξης HK και της παραμέτρου  $H$  ποσοτικοποιείται η μακροπρόθεσμη εμμονή μιας χρονοσειράς, δηλαδή η τάση της χρονοσειράς να συγκλίνει προς την μέση τιμή ή προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η μεγιστοποίηση της αβεβαιότητας μιας χρονοσειράς ονομάζεται φαινόμενο Hurst.

Ο συντελεστής  $H$  παίρνει τιμές στο διάστημα  $(0,1)$ . Τιμές  $H > 1$  που έχουν παρατηρηθεί στην βιβλιογραφία είναι μη μαθηματικά αποδεκτές (Koutsoyiannis 2013b). Βάσει της τιμής του συντελεστή  $H$  διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Για τιμές  $0 < H < 0,5$  η χρονοσειρά εμφανίζει αντιέμμομη συμπεριφορά και αρνητική αυτοσυσχέτιση. Αυτό σημαίνει ότι μια υψηλή τιμή μπορεί να ακολουθείται από μια χαμηλή τιμή κ.ο.κ.
- Για τιμές  $H=0,5$  η χρονοσειρά έχει συμπεριφορά ανέλιξης λευκού θορύβου, δηλαδή οι τιμές της είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και μεταβάλλονται τυχαία.
- Για τιμές  $0,5 < H < 1$  η χρονοσειρά εμφανίζει μακροπρόθεσμη εμμονή και μακροπρόθεσμη θετική αυτοσυσχέτιση. Αυτό σημαίνει ότι λχ. οι υψηλές τιμές τείνουν να ομαδοποιούνται.

## 6.2 Κλιμακογράμματα

Το κλιμακόγραμμα είναι ένα στοχαστικό εργαλείο το οποίο συσχετίζει την διασπορά (ή τυπική απόκλιση) του μέσου όρου μιας ανέλιξης με τον μέσο όρο της κλίμακας του χρόνου (Koutsoyiannis, 2010). Εάν έχουμε υποθέσει ένα μοντέλο για την ανέλιξη και

βρούμε την διασπορά προκύπτει το θεωρητικό κλιμακόγραμμα, ενώ αν βρούμε τη διασπορά από μια χρονοσειρά προκύπτει το εμπειρικό κλιμακόγραμμα. Μέσω του κλιμακογράμματος ποσοτικοποιείται η παράμετρος Hurst και διερευνάται η ύπαρξη μακροπρόθεσμης εμμονής.

Η παράμετρος Hurst προσεγγίζεται μέσω της κλίσης του κλιμακογράμματος από την σχέση:

$$H = \frac{slope}{2} + 1 \quad (6.5)$$

Το κλιμακόγραμμα παρουσιάζει μικρότερη αβεβαιότητα και μεροληψία συγκριτικά με την αυτοσυσχέτιση και το φάσμα ισχύος μέσω των οποίων επίσης μελετάται η μακροπρόθεσμη εμμονή. Επίσης η μεροληψία του κλιμακογράμματος μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά και να ενσωματωθεί στο μοντέλο. Επομένως, συνίσταται η μακροπρόθεσμη εμμονή να μελετάται με τη χρήση του κλιμακογράμματος. Δεδομένου του κλιμακογράμματος μπορούν να υπολογιστούν η αυτοσυνδιασπορά και το φάσμα ισχύος με τους ακόλουθους τύπους (Koutsoyiannis, 2013b):

Η αυτοσυνδιασπορά:

$$c(\tau) := Cov[\underline{x}(t), \underline{x}(t + \tau)] \quad (6.6)$$

Όπου  $\tau$  είναι η υστέρηση, συνδέεται με το κλιμακόγραμμα με τον τύπο:

$$c(\tau) = \frac{1}{2} \frac{d^2 \Gamma(\tau)}{d\tau^2} = \frac{1}{2} \frac{d^2 (\tau^2 \gamma(\tau))}{d\tau^2} \quad (6.7)$$

Το δυναμικό φάσμα ισχύος, όπου  $w$  η συχνότητα, συνδέεται με την αυτοσυνδιασπορά ως γραμμικός μετασχηματισμός Fourier :

$$s(w) = 4 \int_0^{\infty} c(\tau) \cos(2\pi w \tau) d\tau \quad (6.8)$$

Η διασπορά της συναθροισμένης ανέλιξης  $\underline{X}(t)$  (έχει οριστεί στην ενότητα 5.1) σε χρόνο  $t$ :

$$\Gamma(t) := var[\underline{X}(t)] \quad (6.9)$$

είναι γνωστή ως αθροιστικό κλιμακόγραμμα.

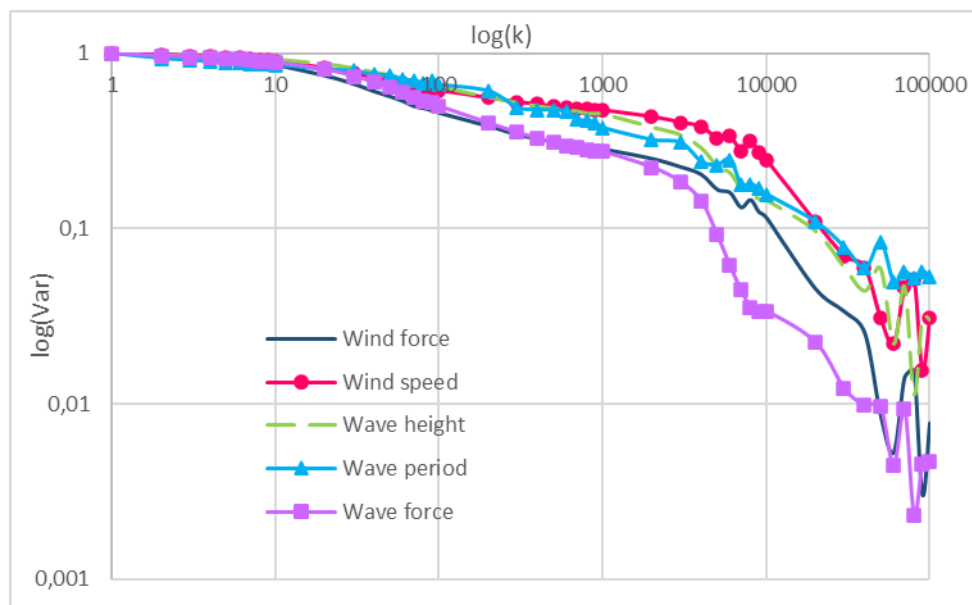
Η διασπορά της μέσης ανέλιξης  $\underline{X}(t)/k$  όπου  $k$  η κλίμακα του χρόνου σαν συνάρτηση της κλίμακας του χρόνου είναι το κλιμακόγραμμα:

$$\gamma(k) := \text{var} \left[ \frac{\underline{X}(t)}{k} \right] = \frac{\Gamma(k)}{k^2} \quad (6.10)$$

Για τον προσδιορισμό του κλιμακογράμματος αρχικά έγινε κανονικοποίηση των δεδομένων αφαιρώντας την μέση τιμή και διαιρώντας με την τυπική απόκλιση την κάθε τιμή της χρονοσειράς. Ως μέγιστη κλίμακα συνάθροισης ορίζεται ως το 50% των τιμών. Στην υπό μελέτη περίπτωση έχουμε στην διάθεσή μας 300.000 τιμές, άρα μέγιστη κλίμακα του κλιμακογράμματος ορίζονται οι 150.000 τιμές. Λόγω του μεγάλου πλήθους δεδομένων οι κλίμακες ήταν οι εξής:

$M = [ (1:9) (1:9)*10 (1:9)*10^2 \dots n/2 ]$ , όπου  $n$  ο αριθμός των δεδομένων.

Τα κλιμακογράμματα των υπό μελέτη δυνάμεων και των γενεσιουργών τους παραγόντων φαίνονται στην Εικόνα 6.2:



Εικόνα 6.2:Κλιμακογράμματα ύψους και περιόδου κύματος, ταχύτητας ανέμου, δύναμης λόγω ανέμου και δύναμης λόγω κύματος.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω μέσω της κλίσης του κλιμακογράμματος μπορεί να προσδιοριστεί η παράμετρος Hurst. Ο υπολογισμός της κλίσης - άρα και της παραμέτρου Hurst- γίνεται στο 10% της μέγιστης κλίμακας διότι για μεγαλύτερες κλίμακες το κλιμακόγραμμα εμφανίζει μεγαλύτερο σφάλμα αφού η διασπορά υπολογίζεται από ολοένα και λιγότερες τιμές (Koutsoyiannis 2003). Στην υπό μελέτη περίπτωση η κλίση υπολογίζεται μέχρι την κλίμακα 30.000. Παρατηρείται ότι από την κλίμακα 10000 έως την κλίμακα 100000 αλλάζει η κλίση επομένως θα έπρεπε να υπολογιστεί και άλλη τιμή του συντελεστή Hurst όμως αυτό θα δημιουργούσε την ανάγκη για την χρήση μοντέλου με επιπλέον παραμέτρους κάτι που δεν τέθηκε ως στόχος της παρούσας εργασίας.

Οι παράμετροι Hurst των παραπάνω μεγεθών φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 6.1: Παράμετροι Hurst

| Μέγεθος             | Κλίση | Hurst |
|---------------------|-------|-------|
| Ταχύτητα ανέμου     | -0,15 | 0,93  |
| Ύψος κύματος        | -0,20 | 0,90  |
| Περίοδος κύματος    | -0,20 | 0,90  |
| Δύναμη λόγω ανέμου  | -0,28 | 0,86  |
| Δύναμη λόγω κύματος | -0,38 | 0,81  |

### 6.3 Προσαρμογή γνωστών στοχαστικών μοντέλων στα κλιμακογράμματα

Για την πραγματοποίηση της στοχαστικής προσομοίωσης (κεφάλαιο 6.5) θα πρέπει να εξεταστεί ποιο μοντέλο στοχαστικών ανελίξεων προσαρμόζεται καλύτερα στα κλιμακογράμματα των δυνάμεων του κεφαλαίου 6.2 ώστε να χρησιμοποιηθούν οι παράμετροί του στην προσομοίωση. Εξετάστηκαν τα μοντέλα:

- Hurst-Kolmogorov (HK):

$$\gamma_k = \gamma_1 k^{2H-2} \quad (6.11)$$

Το μοντέλο ΗΚ περιέχει μόνο μία παράμετρο, την παράμετρο  $H$  και μπορεί να περιγράψει φυσικά φαινόμενα μόνο για τιμές  $0,5 < H < 1$  και όχι πολύ μικρές κλίμακες.

- Hybrid Hurst-Kolmogorov (HHK) (Koutsoyiannis e al.,2017):

$$\gamma(k) = \frac{\lambda}{(1+(k/q)^{2M})^{\frac{1-H}{M}}} \quad (6.12)$$

Όπου  $\lambda$  είναι η διασπορά της ανέλιξης  $\underline{x}(t)$  σε συνεχή χρόνο,  $M$  είναι η παράμετρος fractal,  $H$  η παράμετρος Hurst και  $q$  μια χαρακτηριστική παράμετρος χρόνου. Ειδική περίπτωση του μοντέλου HHK είναι το μοντέλο GHK (ή gHK) που προκύπτει για  $M=1/2$ .

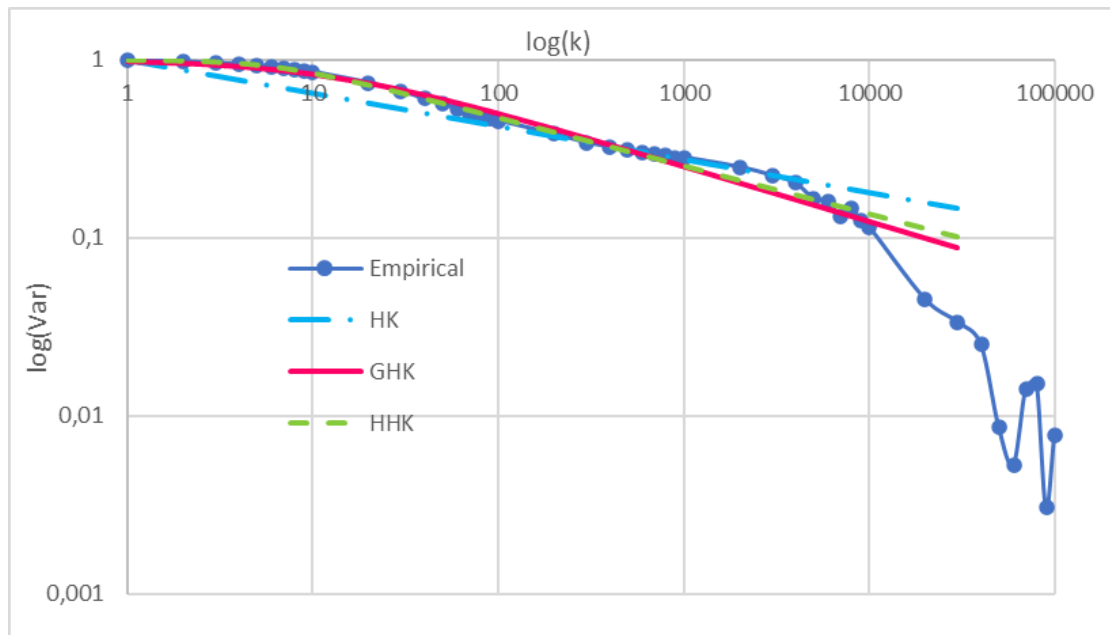
- Generalized Hurst-Kolmogorov (GHK ή gHK):

$$\gamma(k) = \frac{\lambda}{(1+k/q)^{2-2H}} \quad (6.13)$$

Η προσαρμογή των παραπάνω μοντέλων στα κλιμακογράμματα των δυνάμεων έγινε προσδιορίζοντας τις παραμέτρους για τις οποίες ελαχιστοποιείται ο τύπος του σφάλματος που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.3 (Εξίσωση 5.13).

Όπως επισημάνθηκε και παραπάνω η προσαρμογή των κατανομών θα γίνει στο 10% της μέγιστης κλίμακας δηλαδή μέχρι την κλίμακα 30000. Παρατηρείται ότι από την κλίμακα 10000 έως την κλίμακα 100000 αλλάζει η κλίση επομένως θα έπρεπε να υπολογιστεί και άλλη τιμή του συντελεστή Hurst. Αυτό θα δημιουργούσε την ανάγκη για την χρήση μοντέλου με επιπλέον παραμέτρους κάτι που δεν τέθηκε ως στόχος της παρούσας εργασίας.

Για την δύναμη λόγω ανέμου:



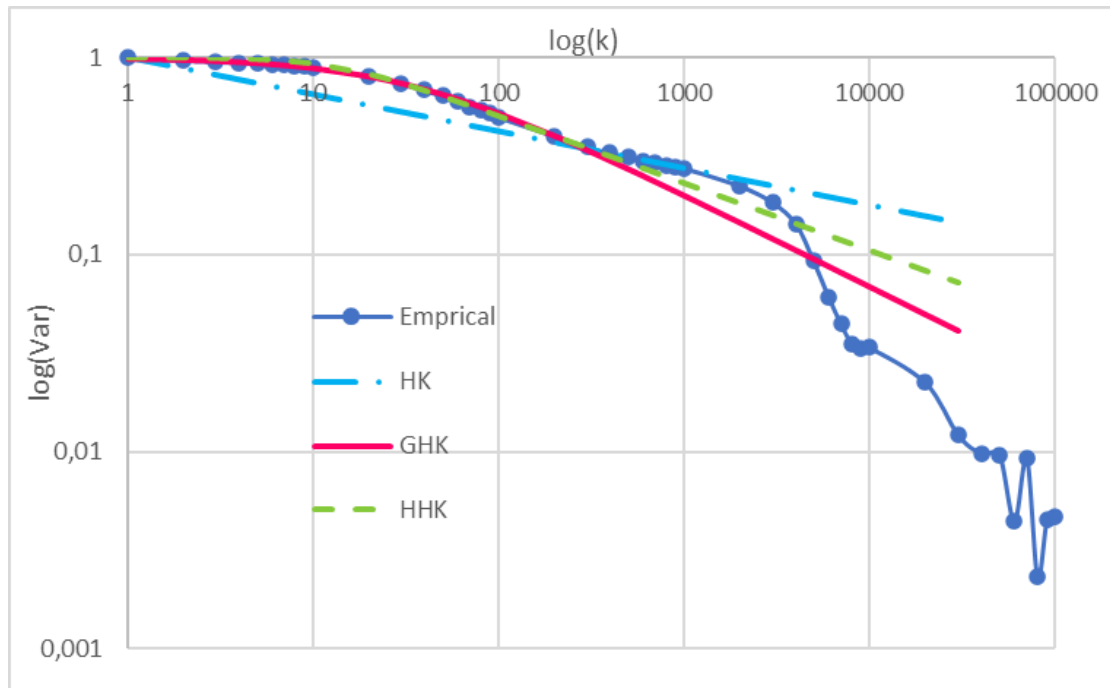
Εικόνα 6.3: Προσαρμογή γνωστών μοντέλων στο κλιμακόγραμμα της δύναμης λόγω ανέμου

Στον πίνακα 6.2 φαίνονται οι παράμετροι των μοντέλων ΗΚ, GHK και ΗΗΚ για τις οποίες ελαχιστοποιείται ο τύπος του σφάλματος στην περίπτωση της προσαρμογής τους στο κλιμακόγραμμα της δύναμης λόγω ανέμου.

Πίνακας 6.2: Παράμετροι προσαρμογής μοντέλων στο κλιμακόγραμμα δύναμης λόγω ανέμου

| Παράμετρος | ΗΚ   | GHK   | ΗΗΚ  |
|------------|------|-------|------|
| <b>H</b>   | 0,91 | 0,85  | 0,92 |
| <b>Q</b>   | -    | 11,73 | 4,93 |
| <b>λ</b>   | -    | 1,00  | 1,00 |
| <b>M</b>   | -    | -     | 0,62 |

Για την δύναμη λόγω κύματος:



Εικόνα 6.4: Προσαρμογή γνωστών μοντέλων στο κλιμακόγραμμα της δύναμης λόγω κύματος

Στον πίνακα 6.3 φαίνονται οι παράμετροι των μοντέλων ΗΚ, ΓΗΚ και ΗΗΚ για τις οποίες ελαχιστοποιείται ο τύπος του σφάλματος στην περίπτωση της προσαρμογής τους στο κλιμακόγραμμα της δύναμης λόγω κύματος.

Πίνακας 6.3: Παράμετροι προσαρμογής μοντέλων στο κλιμακόγραμμα δύναμης λόγω κύματος

| Παράμετρος | ΗΚ   | ΓΗΚ   | ΗΗΚ  |
|------------|------|-------|------|
| <b>H</b>   | 0,91 | 0,77  | 0,92 |
| <b>Q</b>   | -    | 32,97 | 9,12 |
| <b>λ</b>   | -    | 1,00  | 1,00 |
| <b>M</b>   | -    | -     | 0,46 |

Στη στοχαστική σύνθεση που ακολουθεί θα χρησιμοποιηθούν οι παράμετροι του μοντέλου ΓΗΚ καθώς προσαρμόζεται πολύ καλά στα εμπειρικά κλιμακογράμματα κάτι που επιβεβαιώνεται και από την βιβλιογραφία.

#### 6.4 Στοχαστική σύνθεση

Για την καλύτερη αντιμετώπιση της αβεβαιότητας και του ρίσκου που διέπει το σύνολο των φυσικών φαινομένων κρίνεται απαραίτητη η πραγματοποίηση στοχαστικής προσομοίωσης. Μέσω της στοχαστικής προσομοίωσης παράγονται συνθετικές χρονοσειρές οι οποίες αποτελούν πρόβλεψη των τιμών του υπό μελέτη μεγέθους.

Στη βιβλιογραφία υπάρχει πλήθος διαθέσιμων στοχαστικών μοντέλων με πιο γνωστή την οικογένεια μοντέλων αυτοπαλινδρόμησης. Μερικά από αυτά τα μοντέλα είναι τα: AR (autoregressive), ARIMA (autoregressive integrated moving average), ARMA (autoregressive moving average), ARFIMA (autoregressive fractionally integrated moving average). Τα μοντέλα αυτά είναι τεχνητά, με την έννοια ότι δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας ένα αρχικά απλό μοντέλο και επεκτείνοντάς προσθέτοντας επιπλέον όρους, και παρουσιάζουν τα ακόλουθα προβλήματα (Koutsoyiannis 2016):

- Τα μοντέλα αυτά αναφέρονται εξ ορισμού σε διακριτό χρόνο, ενώ τα φυσικά φαινόμενα, τα οποία θέλουμε να μελετήσουμε, εκτυλίσσονται σε συνεχή



χρόνο. Ένα μοντέλο το οποίο έχει οριστεί σε διακριτό χρόνο δεν είναι βέβαιο ότι μπορεί να αντιπροσωπεύει μια συνεχή διεργασία.

- Εκτός των εξαιρέσεων AR(1) και ARMA(1,1), τα μοντέλα αυτοπαλινδρόμησης απαιτούν την προσέγγιση πολλών παραμέτρων για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης.
- Για την χρήση τους απαιτείται ο προσδιορισμός της συνάρτησης της αυτοσυσχέτισης από τα δεδομένα, κάτι που χαρακτηρίζεται από μεροληψία και αβεβαιότητα. Ειδικά σε περιπτώσεις που έχουμε μακροχρόνια εμμονή (long term persistence, LTP), η μεροληψία μπορεί να είναι τόσο μεγάλη που να αποκρύπτει την ύπαρξη της εμμονής, επομένως δεν μπορούν να προσομοιωθούν δεδομένα που εμφανίζουν μακροχρόνια εμμονή.
- Τα μοντέλα αυτά δεν δύνανται να προσομοιώσουν μη Γκαουσιανές διεργασίες.

Δεδομένου ότι οι περισσότερες γεωφυσικές διεργασίες εκτυλίσσονται σε συνεχή χρόνο, εμφανίζουν μακροχρόνια εμμονή και δεν ακολουθούν Γκαουσιανές κατανομές τα παραπάνω μοντέλα κρίνονται ως μη αξιόπιστα για την πραγματοποίηση στοχαστικών προσομοιώσεων.

Το μοντέλο συμμετρικού κυλιόμενου μέσου όρου SMA (symmetric moving average) το οποίο προτάθηκε από τον Koutsoyiannis (2000) και επεκτάθηκε από τους Dimitriadis και Koutsoyiannis (2018) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών οποιασδήποτε μορφής ανέλιξης δευτέρας τάξης. Το μοντέλο αυτό μπορεί να διατηρήσει τις τέσσερις πρώτες (το αναθεωρημένο μοντέλο Dimitriadis και Koutsoyiannis 2021 διατηρεί όλες τις ροπές) κεντρικές ροπές ενώ παράλληλα διατηρεί οποιαδήποτε βραχυχρόνια ή μακροχρόνια εξάρτηση δευτέρας τάξης. Διατηρώντας την τέταρτη κεντρική ροπή (κύρτωση) το μοντέλο μπορεί να λάβει υπόψη του και την περιοδικότητα που συχνά εμφανίζουν οι φυσικές διεργασίες. Παρόλο που τις περισσότερες φορές επαρκούν οι τέσσερις πρώτες ροπές για μια καλή εκτίμηση της συνάρτησης κατανομής, μπορούν να εκτιμηθούν και οι ροπές μεγαλύτερης τάξης τόσο για τις μικρές όσο και για τις μεγάλες κλίμακες.

Το μοντέλο SMA περιγράφεται ως το άθροισμα των γινομένων των συντελεστών  $\alpha_j$  με την ανέλιξη λευκού θορύβου  $v_i$  και δίνεται από την παρακάτω σχέση (Koutsoyiannis 2000):

$$\underline{x}_i = \sum_{j=-l}^l \alpha_{|j|} v_{i+j} \quad (6.14)$$

Όπου  $\alpha_j$  συντελεστές που υπολογίζονται από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και  $v_i$  η ανέλιξη του λευκού θορύβου. Το  $l$  θεωρητικά είναι άπειρο αλλά πρακτικά παίρνει πεπερασμένες τιμές.

Για το μοντέλο HK οι συντελεστές υπολογίζονται με την παρακάτω διαδικασία

$$\text{Υπολογίζεται το κλιμακόγραμμα: } \gamma(k) = \frac{\gamma(D)}{k^{2-2H}} \quad (6.15)$$

$$\text{Και } \alpha_j = C \left( \frac{|j+1|^{H+0.5} + |j-1|^{H+0.5}}{2} - |j|^{H+0.5} \right) \quad (6.16)$$

$$\text{Όπου } C = \sqrt{\frac{2\Gamma(2H+1) \sin(\pi H) \gamma(D)}{\Gamma^2(H+0.5)(1+\sin(\pi H))}}, \text{ όπου } \Gamma(x) \text{ είναι η συνάρτηση Γάμμα} \quad (6.17)$$

Για τα μοντέλα HHK και GHK δεν είναι εύκολο να παραχθούν μη πεπλεγμένες σχέσεις για τους συντελεστές  $\alpha_j$ . Ωστόσο μπορούν να υπολογιστούν μέσω του μετασχηματισμού Fourier του διακριτού φάσματος ισχύος των συντελεστών, το οποίο συνδέεται άμεσα με το διακριτό φάσμα ισχύος της ανέλιξης, βάσει του τύπου:

$$s_d^a(\omega) = \sqrt{2s_d(\omega)} \quad (6.18)$$

Όπου:

$s_d^a(\omega)$ : το φάσμα ισχύος των συντελεστών του μοντέλου SMA

$s_d(\omega)$ : το φάσμα ισχύος της ανέλιξης σε διακριτό χρόνο

$\omega=D/k$ : η αδιαστατοποιημένη συχνότητα

Για τον υπολογισμό των  $\alpha_j$  υπολογίζεται πρώτα το  $s_d^a(\omega)$  από το γνωστό  $s_d(\omega)$  και στη συνέχεια οι συντελεστές με τον παρακάτω μετασχηματισμό:

$$\alpha_j = \int_0^{\frac{1}{2}} s_d^a(\omega) \cos(2\pi\omega j) d\omega \quad (6.19)$$

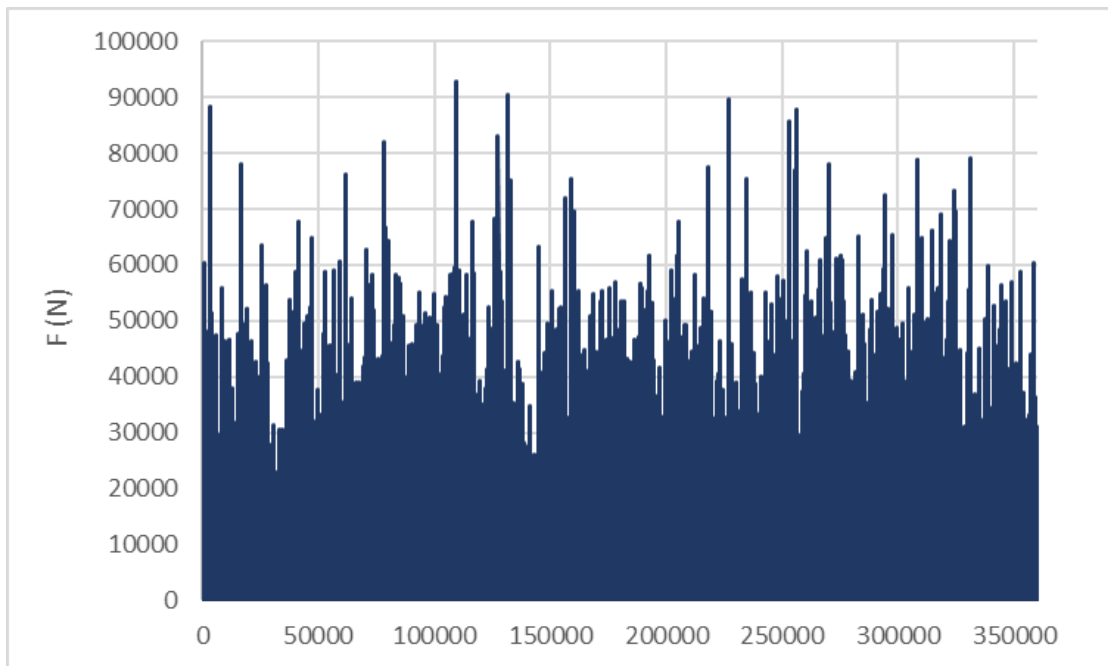
Στην παρούσα εργασία για την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο GHK στο σχήμα SMA που περιγράφηκε παραπάνω. Θα παραχθούν δύο συνθετικές χρονοσειρές, μία για τη δύναμη που προέρχεται από τα αεροδυναμικά φορτία και μία για την δύναμη που προέρχεται από τα υδροδυναμικά φορτία.

Δεδομένα εισόδου θα είναι για κάθε χρονοσειρά:

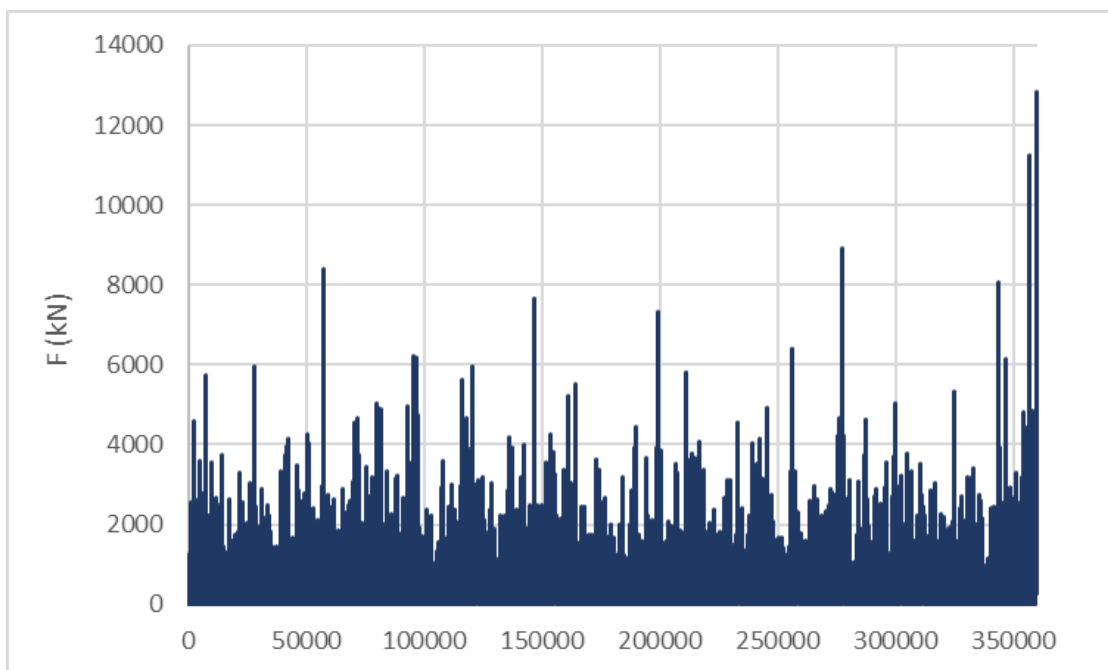
- Οι τέσσερις πρώτες στατιστικές ροπές που υπολογίστηκαν από την κατανομή PBF.
- Οι συντελεστές  $H$ ,  $q$ ,  $\lambda$  για τους οποίους έγινε η προσαρμογή του μοντέλου GHK στα δεδομένα.

Σημειώνεται ότι ο συντελεστής  $H$  που χρησιμοποιήθηκε στη στοχαστική σύνθεση ήταν ελαφρώς αυξημένος σε σχέση με αυτόν που υπολογίστηκε ώστε να συμπεριληφθεί η επίδραση της μεροληψίας η οποία δεν αφαιρέθηκε.

Οι χρονοσειρές των δυνάμεων που προκύπτουν από την προσομοίωση:



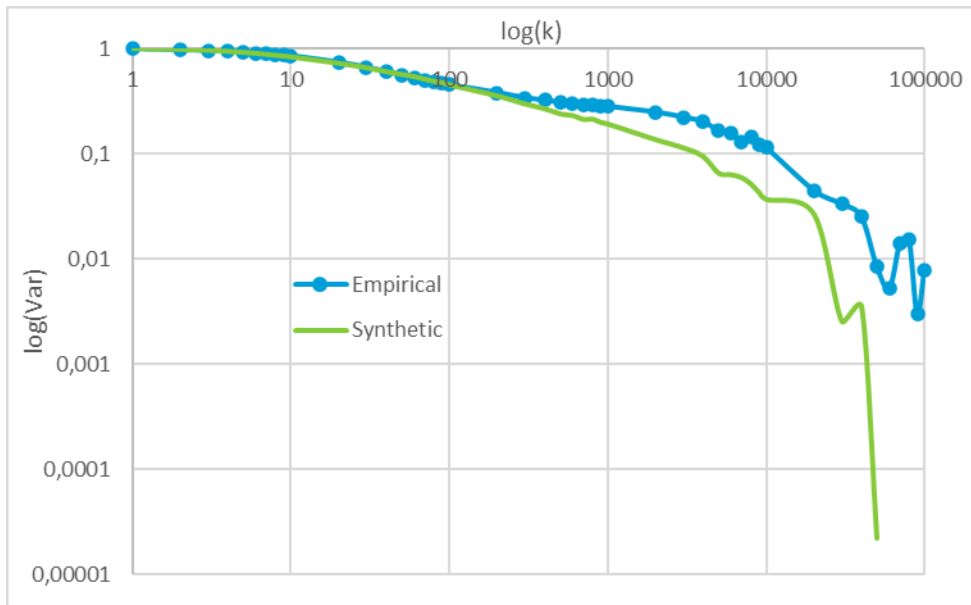
Εικόνα 6.5: Συνθετική χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω ανέμου



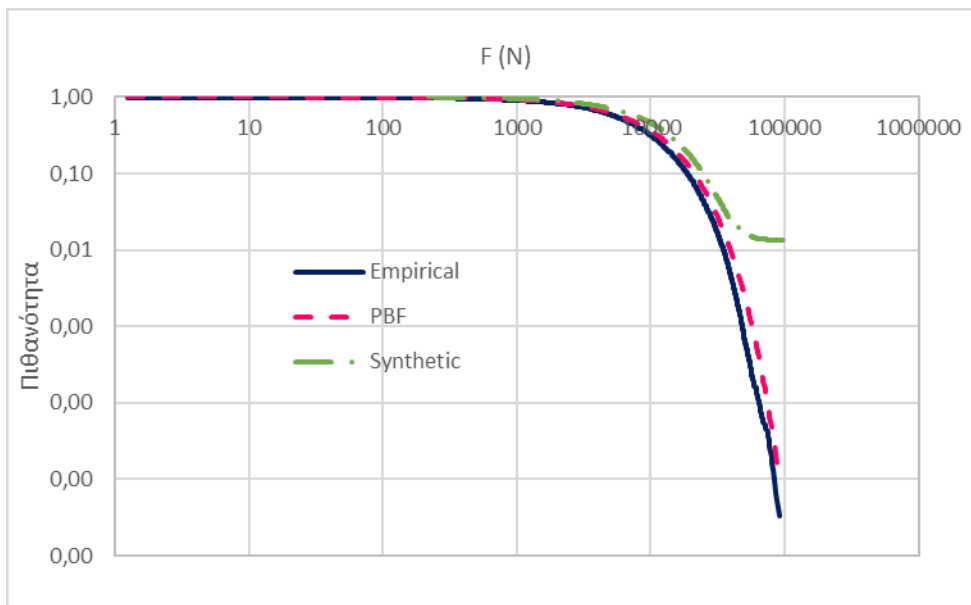
Εικόνα 6.6: Συνθετική χρονοσειρά ωριαίας δύναμης λόγω κύματος

Από τις συνθετικές χρονοσειρές των δυνάμεων διαμορφώνονται τα κλιμακογράμματα και οι κατανομές και εξετάζεται η συμφωνία τους με τα αντίστοιχα των εμπειρικών χρονοσειρών.

Για την δύναμη λόγω ανέμου:

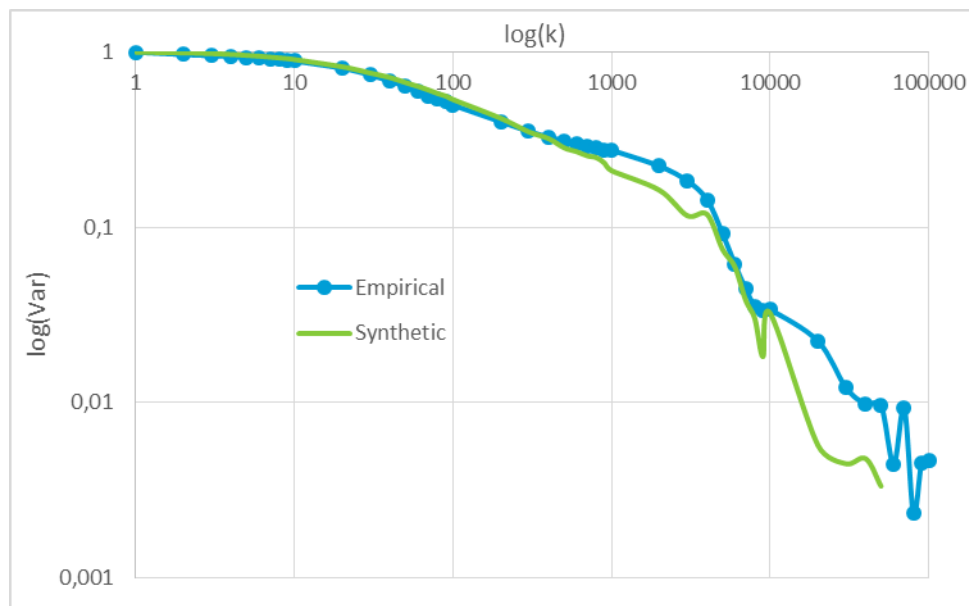


Εικόνα 6.7:Κλιμακόγραμμα εμπειρικής και συνθετικής χρονοσειράς δύναμης λόγω ανέμου

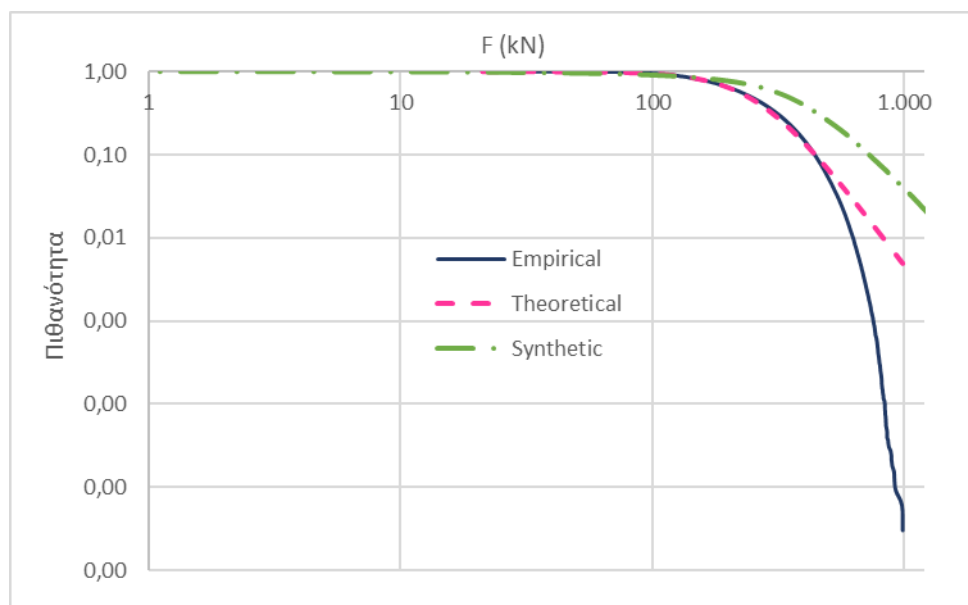


Εικόνα 6.8:Κατανομή συνθετικής, εμπειρικής και θεωρητικής χρονοσειράς δύναμης λόγω ανέμου

Για τη δύναμη λόγω κύματος:



Εικόνα 6.9:Κλιμακόγραμμα εμπειρικής και συνθετικής χρονοσειράς δύναμης λόγω κύματος



Εικόνα 6.10: Κατανομή συνθετικής, εμπειρικής και θεωρητικής χρονοσειράς δύναμης λόγω κύματος

Τόσο στην περίπτωση της δύναμης λόγω ανέμου όσο και στην περίπτωση της δύναμης λόγω κύματος φαίνεται ότι τα κλιμακογράμματα και οι κατανομές των

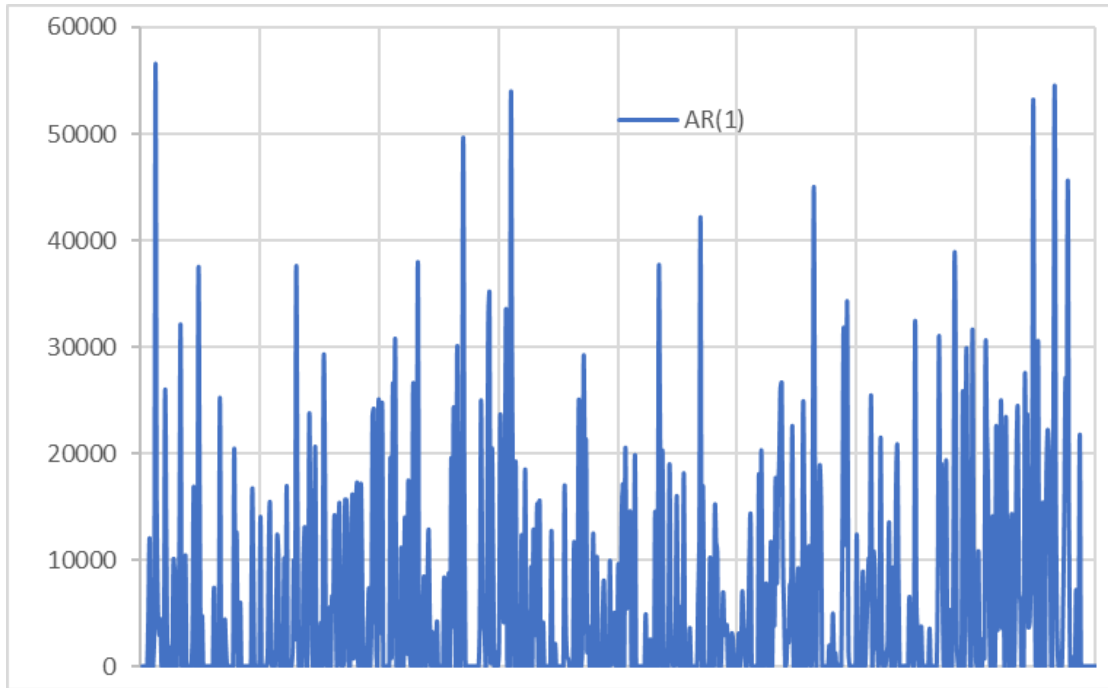
συνθετικών χρονοσειρών να προσαρμόζονται αρκετά καλά στα αντίστοιχα των εμπειρικών χρονοσειρών.

## 7 Συμπεράσματα - Προτάσεις για βελτίωση

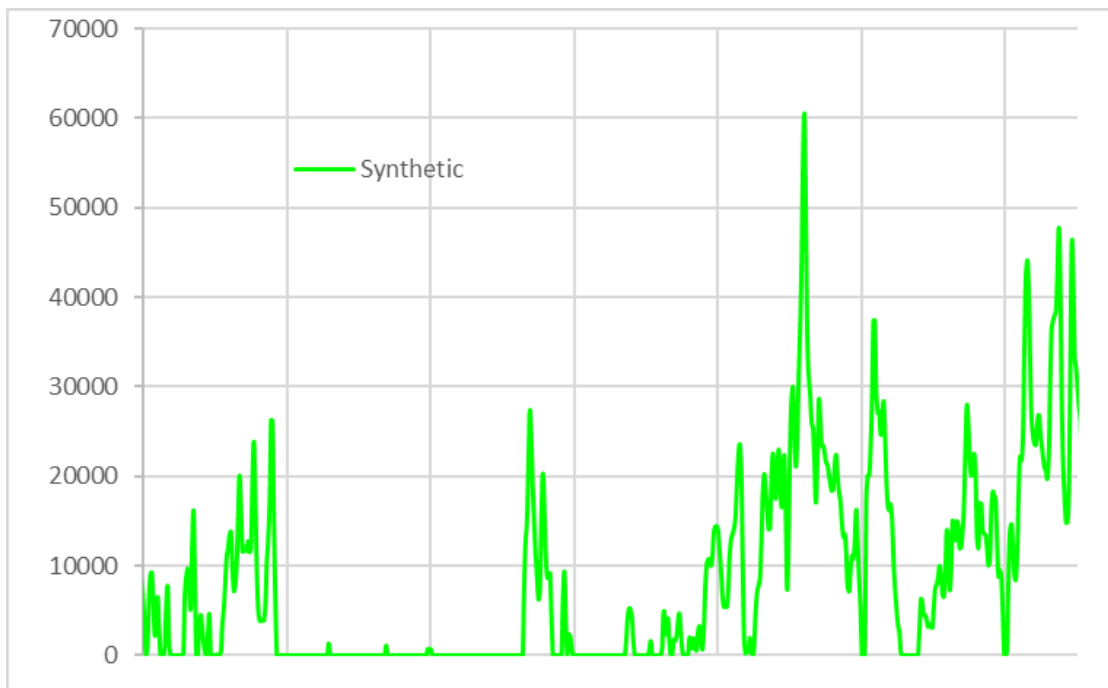
Συμπεράσματα:

- Στον προτεινόμενο από τα πρότυπα υπολογισμό δυνάμεων σχεδιασμού χρησιμοποιείται μικρό μήκος χρονοσειρών. Επίσης, οι χρονοσειρές των δυνάμεων θεωρείται ότι έχουν συμπεριφορά λευκού θορύβου. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα να μην γίνεται σωστή προσαρμογή της εμπειρικής κατανομής στη θεωρητική κατανομή της δύναμης και στο κλιμακόγραμμα, μέσω των οποίων γίνεται αναπαράσταση της συμπεριφοράς της δύναμης. Επιπλέον, καθώς τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι έργα με περίοδο επαναφοράς τουλάχιστον 30 έτη, θα πρέπει και χρονοσειρές των δυνάμεων να είναι μήκους αντίστοιχης τάξης μεγέθους. Θα πρέπει να υπάρχει επαρκές μήκος χρονοσειράς ώστε να λαμβάνονται υπόψη πιθανές ακραίες τιμές και να υπάρχει σαφής εικόνα της συμπεριφοράς των δυνάμεων σχεδιασμού.
- Ως απόρροια του παραπάνω, σε περίπτωση έλλειψης δεδομένων ή λίγων δεδομένων στην περιοχή σχεδιασμού, προτείνεται η χρήση δεδομένων από παγκόσμιους σταθμούς με κατάλληλες τροποποιήσεις.
- Το κλιμακόγραμμα παρουσιάζει μικρότερη αβεβαιότητα και μεροληψία συγκριτικά με την αυτοσυσχέτιση και το φάσμα ισχύος μέσω των οποίων επίσης μελετάται η μακροπρόθεσμη εμμονή. Επίσης, η μεροληψία του κλιμακογράμματος μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά και να ενσωματωθεί στο μοντέλο. Επομένως, συνίσταται η μακροπρόθεσμη εμμονή να μελετάται με τη χρήση του κλιμακογράμματος.
- Λόγω του μικρού μήκους προσομοίωσης, που προτείνεται στα πρότυπα σχεδιασμού, δεν λαμβάνονται υπόψη η μακροπρόθεσμη εμμονή. Οι επιδράσεις της μακροπρόθεσμης εμμονής πχ. κόπωση θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό.





Εικόνα 7.1: Χρονοσειρά με χρήση μοντέλου AR(1), συντελεστής  $H=0,5$



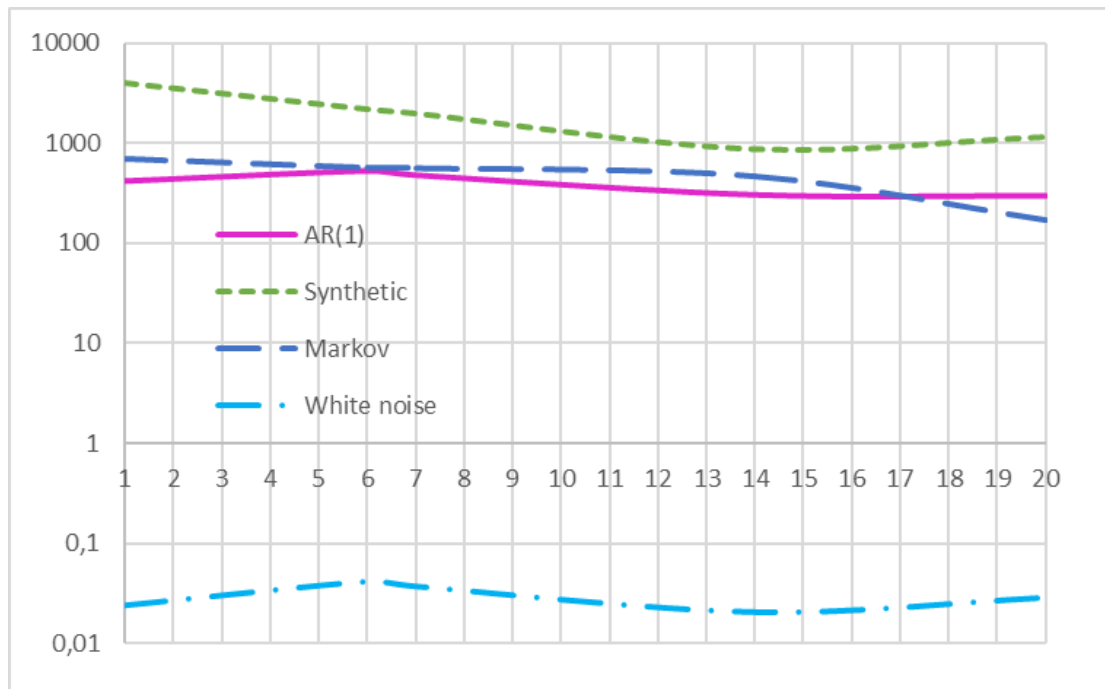
Εικόνα 7.2: Χρονοσειρά με χρήση του μοντέλου SMA, συντελεστής  $H>0,5$

Οι εικόνες 7.1, 7.2 αποτελούν μία μεγέθυνση σε τμήματα της χρονοσειράς της δύναμης λόγω ανέμου που παρήχθησαν με χρήση του μοντέλου AR(1) και SMA αντίστοιχα. Στην περίπτωση του AR(1) δεν λαμβάνεται υπόψη η μακροπρόθεσμη εμμονή και κάθε επόμενη τιμή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες. Στην

περίπτωση του μοντέλου SMA λαμβάνεται υπόψη η μακροπρόθεσμη εμμονή και οι υψηλές ή χαμηλές τιμές τείνουν να εμφανίζονται σε ομάδες. Η αγνόηση της μακροπρόθεσμης εμμονής πιθανότατα έχει επίδραση στον τρόπο υπολογισμού της κόπωσης η οποία εξαρτάται από προηγούμενες καταπονήσεις του υλικού.

- Η μέθοδος προσομοίωσης που προτείνεται από τα πρότυπα σχεδιασμού δεν λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση και αφορά μόνο στην βραχυπρόθεσμη συμπεριφορά της δύναμης. Αντίθετα, η μέθοδος προσομοίωσης που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία προσεγγίζει την κατανομή και τη συσχέτιση με ρητό τρόπο. Στο διάγραμμα της εικόνας 7.1 παρατηρούμε ότι η τυπική απόκλιση – διακύμανση της συνθετικής χρονοσειράς είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει από τα μοντέλα AR(1), Markov, και λευκού θορύβου. Στην περίπτωση σχεδιασμού με χρήση κάποιου από τα AR(1), Markov και λευκό θόρυβο θα οδηγούμασταν σε υποεκτίμηση της δύναμης.

Το διάγραμμα της Εικόνας 7.1 έχει διαμορφωθεί για χρονοσειρές 20 ετών της δύναμης λόγω ανέμου. Οι χρονοσειρές παρήχθησαν με χρήση των μοντέλων SMA (Synthetic στο διάγραμμα), Markov, Ar(1) και λευκού θορύβου(White noise).



Εικόνα 7.3: Διαφορές στην τυπική απόκλιση μεταξύ διαφορετικών μοντέλων προσομοίωσης, στον άξονα  $y$  η τυπική απόκλιση της δύναμης λόγω ανέμου, στον  $x$  τα έτη.

- Οι αρχικές φυσικές διεργασίες (ταχύτητα ανέμου, ύψος κύματος, περίοδος κύματος) εμφανίζουν διαφορές στην κατανομή και στα κλιμακογράμματα με τις δυνάμεις που προκύπτουν από αυτές. Για παράδειγμα, η παράμετρος Hurst μειώνεται στις δυνάμεις.

Παραδοχές- Προτάσεις για βελτίωση:

- Ο υπολογισμός των δυνάμεων έχει γίνει με απλούς ντετερμινιστικούς τύπους. Θα μπορούσε ο υπολογισμός της δύναμης να γίνει μέσω δυναμικών μοντέλων που κάνουν χρήση πεπερασμένων στοιχείων.
- Για την προσαρμογή της εμπειρικής κατανομής χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική κατανομή PBF. Η κατανομή PBF έχει μεγάλη ευελιξία και πολύ καλή προσαρμογή σε πολλές φυσικές διεργασίες (Katikas et al., 2021), επομένως εύλογα

δοκιμάστηκε πρώτη. Η PBF προσαρμόζεται πολύ καλά στην κατανομή της δύναμης, ωστόσο μπορεί να εξεταστεί και η προσαρμογή άλλων κατανομών.

- Το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιείται διατηρεί τις τέσσερις πρώτες ροπές και για αυτό τον λόγο εμφανίζει αρκετές αρνητικές τιμές στις χρονοσειρές. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί το εξελιγμένο μοντέλο (Koutsoyiannis, Dimitriadis 2021) το οποίο διατηρεί όλες τις ροπές.
- Στους Hurst που υπολογίστηκαν από την προσαρμογή των γνωστών μοντέλων στα κλιμακογράμματα δεν έχει αφαιρεθεί η μεροληψία. Η παράλειψη αυτή αντισταθμίζεται χρησιμοποιώντας ελαφρώς αυξημένο συντελεστή Hurst στη προσομοίωση.

## 8 Βιβλιογραφία

### ❖ Ελληνόγλωσση

Κουτσογιάννης Δ., 1997, *Στατιστική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μουτζούρης Κ.Ι., *Θαλάσσια Υδραυλική*.

### ❖ Ξενόγλωσση

Dimitriadis P., and Koutsoyiannis D., 2015, *Climacogram versus autocovariance and power spectrum in stochastic modelling for Markovian and Hurst–Kolmogorov processes*, Stochastic Environmental Research & Risk Assessment.

Dimitriadis P., and Koutsoyiannis D., 2018, *Stochastic synthesis approximating any process dependence and distribution*, Stochastic Environmental Research & Risk Assessment.

Dimitriadis P., Koutsoyiannis D., Iliopoulou T., and Papanicolaou P. , 2021, *A global-scale investigation of stochastic similarities in marginal distribution and dependence structure of key hydrological-cycle processes*.

DNV-OS-J101, 2014, *Design of Offshore Wind Turbine Structures*.

Drain, LE, 1980, *The laser-Doppler technique*. Wiley.

Durst, F, Melling, A, and Whitelaw, JH, 1976, *Principles and practice of laser-Doppler anemometry*. Academic Press.

IEC 61400-3, 2009, Wind turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines.

Katikas L., Dimitriadis P., Koutsoyiannis D., Kontos T., and Kyriakidis P., 2021, *A stochastic simulation scheme for the long-term persistence, heavy-tailed and double periodic behavior of observational and reanalysis wind time-series*, Applied Energy

Koutsoyiannis D., 2000, *A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series*, American Geophysical Union, Water Resources Research.

Koutsoyiannis D., 2003, *Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics*.

Koutsoyiannis D., 2010, *HES Opinions “A random walk on water”*, Hydrological and Earth System Sciences, 14.

Koutsoyiannis D., 2013, *Climacogram-based pseudospectrum: a simple tool to assess scaling properties*, Conference Paper, European Geosciences Union General Assembly.

Koutsoyiannis D., and P. Dimitriadis, 2021, *Towards generic simulation for demanding stochastic processes*, Sci.

Koutsoyiannis D., P. Dimitriadis, F. Lombardo, S. Stevens, 2017, *From fractals to stochastics: Seeking theoretical consistency in analysis of geophysical data*, Springer, 2018.

Koutsoyiannis, D., 2000, *A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series*. Water Resour. Res.

Mamassis N., and Koutsoyiannis D., 2000, *Lecture notes on Hydrometeorology*

Miles, J., 1957, "*On the generation of surface waves by shear flows*". Journal of Fluid Mechanics.

MORISON J. R., M. P. O'BRIEN, J. W. JOHNSON AND S. A. SCHAAF, 1950, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY, CALIFORNIA.

Phillips, O., 1957, "*On the generation of waves by turbulent wind*". Journal of Fluid Mechanics.

PROGRAMMATIC ENVIRONMENTAL ASSESSMENT FOR THE NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION NATIONAL DATA BUOY CENTER, 2018.

Robert H. Stewart, 1980, *Introduction To Physical Oceanography*.

❖ Ιστοσελίδες

[http://en.wikipedia.org/wiki/Offshore\\_wind\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power)

<https://windeurope.org/about-wind/history/>

<https://www.amna.gr/>

<https://www.energy.gov/eere/wind/articles/top-10-things-you-didnt-know-about-offshore-wind-energy>

<https://www.europarl.europa.eu/>

<https://www.windpowerengineering.com/>

