



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Στοχαστική Διερεύνηση επίδρασης υπεράκτιων αιολικών πάρκων στους επιφανειακούς κυματισμούς

Διπλωματική Εργασία

Αλεξάνδρα Τρομπούκη, Αθήνα 2022

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Παναγιώτης Δημητριάδης, Δρ Πολιτικός Μηχανικός



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Στοχαστική Διερεύνηση επίδρασης υπεράκτιων αιολικών πάρκων στους επιφανειακούς κυματισμούς

Διπλωματική Εργασία

Αλεξάνδρα Τρομπούκη

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ Πολιτικός Μηχανικός,
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Παναγιώτης Δημητριάδης, Δρ Πολιτικός Μηχανικός

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

Οκτώβριος 2022, Αθήνα

Αλεξάνδρα Τρομπούκη

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κουτσογιάννη Δημήτριο, Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την βοήθεια και την καθοδήγησή του σε όλα τα επίπεδα καθώς και για την εισαγωγή του στοχαστικού τρόπου σκέψης στο προπτυχιακό πρόγραμμα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημητριάδη Παναγιώτη, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό, για την πολύτιμη βοήθεια και συμβολή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας αλλά και τον Μάρκο Αλεξόπουλο για τις εύστοχες παρατηρήσεις του.

Οκτώβριος 2022, Αθήνα

Αλεξάνδρα Τρομπούκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, ολοένα και αυξανόμενο είναι το ενδιαφέρον του τεχνικού και όχι μόνο κόσμου για την αξιοποίηση της ωκεάνιας “πράσινης” ενέργειας και την κατασκευή υπεράκτιων έργων. Στο ανωτέρω πλαίσιο η περιγραφή και ανάλυση του κυματικού πεδίου μιας περιοχής αποτελεί αναγκαία παράμετρο για τον σχεδιασμό των ανωτέρω έργων.

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των κυματισμών, σε μια περιοχή ενδιαφέροντος, είναι συνήθης η συνδυαστική χρήση δορυφορικών δεδομένων και δεδομένων πεδίου (πλωτήρων και υπεράκτιων μετεωρολογικών σταθμών). Ωστόσο, σημαντική είναι και η επίδραση του ανέμου, καθώς οι ανεμογενείς κυματισμοί κυριαρχούν έναντι των υπολοίπων. Επισημαίνεται ότι η ανάλυση της συμπεριφοράς των κυματισμών αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την κατασκευή αλλά και την λειτουργία των υπεράκτιων κατασκευών.

Συγκεκριμένα το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί η **μελέτη της επίδρασης της κατασκευής ενός εν ενεργεία υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην συμπεριφορά των επιφανειακών κυματισμών της περιοχής μελέτης, του ανέμου και η εισαγωγή μιας στοχαστικής διάστασης στην ευρύτερη ανάλυση.**

Η περιοχή που επιλέχθηκε βρίσκεται ανατολικά του Λονδίνου και αφορά το αιολικό πάρκο London Array. Τα χωρικά δεδομένα περιλαμβάνουν μια ευρύτερη περιοχή που περικλείει το θαλάσσιο πάρκο, ενώ οι βασικές μεταβλητές είναι το ύψος κύματος (H_s), η περίοδος των κυματισμών (T_p) και η ταχύτητα ανέμου (V).

Αναφορικά με την επεξεργασία των δεδομένων, υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών και μορφώνονται χάρτες μεταβολής αυτών. Ακόμη, διερευνάται η ενδεχόμενη μεταβολή της περιοδικότητας των βασικών μεταβλητών. Έπειτα, γίνεται χρήση του μονοδιάστατου και δισδιάστατου ή χωρικού κλιμακογράμματος (η διασπορά συναρτήσει της κλίμακας μεγέθους) με στόχο την πληρέστερη περιγραφή του φαινομένου. Τέλος, παράγεται συνθετική χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου, με στόχο την αντιπαραβολή στοχαστικών και ντετερμινιστικών δεδομένων.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συσχετίστηκαν και είναι σε συμφωνία με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, παρουσιάζοντας ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η απομείωση του ύψους κύματος και της ταχύτητας ανέμου είναι της ίδια τάξης μεγέθους, ενώ οι μεταβλητές διέπονται από την δυναμική Hurst-Kolmogorov τόσο σε χρονική αλλά και χωρική κλίμακα. Η επίδραση της κατασκευής του έργου είναι αμελητέα και η κλιματική μεταβολή εντονότερη της τοπικής.

Τα εξαγόμενα συμπεράσματα είναι σημαντικά για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας τέτοιων έργων αλλά και των επικείμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

ABSTRACT

The offshore market is gaining ground among others in the last decade, as the world is heading towards green energy, decarbonization and energy independence. The exploitation of the ocean energy seems to be promising, with hybrid systems (ocean underwater turbines, offshore wind parks, floating panels) achieving high capacity factors of energy production.

The analysis of the wave and the wind field is essential for the design of the above projects. Though the experience in the field is yet minimum, researchers begin to study the combined behavior of wind and waves in coupled atmospheric-ocean models. The direction and intensity of wind affects the wave characteristics and their interaction defines the wake effect of offshore structures.

This work focuses on this effect for wind and wave fields downstream an offshore wind farm, using satellite data for an existing wind park; the London Array project. In more detail, the first four central moments are calculated for the inclusive area of the wind park and the potential effect on the seasonality of wind and wave variants is examined. Also, an added value of this research is the estimation of the temporal and spatial dependence of the variants, through the 1-D and 2-D Climacograms. Finally, a synthetic time series is computed for the variant of wind speed, adding a stochastic dimension to the phenomenon.

The extracted data from the analysis are compared and in-line with the existing literature. The reduction of the significant wave height and wind speed around the park are on the same size-scale and the variants maintain a strong spatio-temporal dependence in higher scales. The impact of the park on the behavior of wind and waves is negligible, when compared to the climatic variances.

Overall, the examination and better understanding of the phenomenon is crucial for the design of offshore structures, as for the case of wind farms, the downstream flow affects the performance of the park. Last but not least, the conclusions made are important for the evaluation of the environmental impact in the area.

Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1	Φυσικά μεγέθη και μέθοδοι μέτρησής τους	14
1.1.1	Άνεμος	14
1.1.2	Κυματισμοί	17
1.2	Αιολική ενέργεια	18
1.3	Χερσαία και θαλάσσια αιολικά πάρκα.....	19
2.	ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ	22
2.1	Εκμετάλλευση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.....	22
2.2	Συγκριτική αξιολόγηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων	23
2.2.1	Με βάση τον τρόπο έδρασης	23
2.2.2	Με βάση το βάθος θεμελίωσης	24
2.2.3	Συγκριτικά στοιχεία μεταξύ αιολικών πάρκων λόγω μεθόδου έδρασης	26
3.	ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	30
3.1	Στατιστικές Μέθοδοι	30
3.1.1	Βασικές έννοιες πιθανοτήτων και στατιστικής	30
3.1.2	Στατιστικές Ροπές	30
3.2	Συσχέτιση.....	31
3.3	Περιοδικότητα	33
3.4	Δυναμική Hurst-Kolmogorov και Κλιμακόγραμμα.....	33
3.5	Στοχαστική σύνθεση.....	35
4.	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	37
4.1	Χαρακτηριστικά έργου	37
4.2	Περιγραφή χαρακτηριστικών περιοχής	39
4.3	Κριτήρια επιλογής	39
4.4	Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν	39
4.5	Βιβλιογραφική επισκόπηση	40
4.6	Αποτελέσματα παρούσας ανάλυσης	43
4.6.1	Χάρτες διαφορών βασικών στατιστικών μεγεθών	43
4.6.2	Ακτινικές τομές μεταβολής βασικών μεταβλητών.....	50
4.6.3	Περιοδικότητα.....	69
4.6.4	Κλιμακογράμματα 1-D και 2-D ανάλυσης κύματος και ανέμου	70
4.6.5	Συνθετική χρονοσειρά και διαγράμματα υπολογισμού	75

5.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	78
5.1	Συζήτηση.....	78
5.1.1	Συμπεριφορά του κύματος	78
5.1.2	Συμπεριφορά του ανέμου	81
5.1.3	Στοχαστική προσομοίωση	82
5.2	Συμπεράσματα	83
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	84
7.	ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

1. 1 Ροή πάνω από λόφους.....	15
1. 2 Ροή ως θαλάσσια αύρα.....	15
1. 3 Συσκευές μέτρησης του ανέμου : (α) κυπελλοφόρο ανεμόμετρο (αριστερά) και (β) ανεμόμετρο υπερήχων (δεξιά)	16
1. 4 Συσκευή μέτρησης του ανέμου: ανεμούριο	16
1. 5 Πλωτή μετρητική συσκευή Buoy (αριστερά) και δορυφόρος μετεωρολογικών μετρήσεων (δεξιά).....	16
1. 6 Πλωτήρας wave rider (Πηγή: Marine service Australia).....	17
2. 1 Εγκατεστημένη ισχύς θαλάσσιων αιολικών πάρκων στην Ευρώπη (2022), (πηγή: Navionics Satellite Map)	22
2. 2 Εγκατεστημένη ισχύς θαλάσσιων αιολικών πάρκων στην Ασία (2022), (πηγή: Navionics Satellite Map)	23
2. 3 Είδη σταθερής θεμελίωσης υπεράκτιων αιολικών πάρκων, (πηγή: www.tethys.com)	25
2. 4 Είδη πλωτών αιολικών πάρκων, (πηγή: International Renewable Energy Agency [IRENA], 2016).....	25
4. 1 London Array (Πηγή: www.londonarray.com).....	37
4. 2 Χωροθέτηση του αιολικού πάρκου (Πηγή: www.londonarray.com).....	38
4. 3 Η διαφορά της μέσης τιμής του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.....	44
4. 4 Η διαφορά της μέσης τιμής του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου	44
4. 5 Η διαφορά της τυπικής απόκλισης του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου	45
4. 6 Η διαφορά της ασυμμετρίας του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου	45
4. 7 Η διαφορά της κύρτωσης του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου	46
4. 8 Η διαφορά της μέσης τιμής της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.....	46
4. 9 Η διαφορά της μέσης τιμής της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου	47
4. 10 Η διαφορά της τυπικής απόκλισης της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου.....	47
4. 11 Η διαφορά της ασυμμετρίας της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου	48
4. 12 Η διαφορά της κύρτωσης της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου	48

4. 13 Διάταξη των ανεμογεννητριών στο υπεράκτιο πάρκο London Array, δορυφορική εικόνα (Πηγή: www.londonarray.com).....	50
4. 14 Μεταβολή της μέσης τιμής του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 0 μοιρών.....	51
4. 15 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 0 μοιρών	51
4. 16 Μεταβολή της ασυμμετρίας του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 0 μοιρών.....	52
4. 17 Μεταβολή της κύρτωσης του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 0 μοιρών.....	52
4. 18 Μεταβολή της μέσης τιμής της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 0 μοιρών	53
4. 19 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 0 μοιρών	53
4. 20 Μεταβολή της ασυμμετρίας της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 0 μοιρών ...	54
4. 21 Μεταβολή της κύρτωσης της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 0 μοιρών	54
4. 22 Μεταβολή της μέσης τιμής του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών.....	55
4. 23 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών	55
4. 24 Μεταβολή της ασυμμετρίας του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών.....	56
4. 25 Μεταβολή της κύρτωσης του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών.....	56
4. 26 Μεταβολή της μέσης τιμής της περιόδου κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών ...	57
4. 27 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της περιόδου κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών	57
4. 28 Μεταβολή της ασυμμετρίας της περιόδου κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών .	58
4. 29 Μεταβολή της ασυμμετρίας της περιόδου κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών .	58
4. 30 Μεταβολή της μέσης τιμής του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 90 μοιρών.....	59
4. 31 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 90 μοιρών	59
4. 32 Μεταβολή της ασυμμετρίας του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 90 μοιρών.....	60
4. 33 Μεταβολή της κύρτωσης του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 90 μοιρών.....	60
4. 34 Μεταβολή της μέση τιμής της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 90 μοιρών	61
4. 35 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 90 μοιρών	61
4. 36 Μεταβολή της ασυμμετρίας της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 90 μοιρών	62
4. 37 Μεταβολή της κύρτωσης της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 90 μοιρών	62
4. 38 Μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 0 μοιρών	63
4. 39 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 0 μοιρών	63
4. 40 Μεταβολή της ασυμμετρίας της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 0 μοιρών	64
4. 41 Μεταβολή της κύρτωσης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 0 μοιρών	64
4. 42 Μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 45 μοιρών	65
4. 43 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 45 μοιρών	65
4. 44 Μεταβολή της ασυμμετρίας της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 45 μοιρών ...	66

4. 45 Μεταβολή της κύρτωσης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 45 μοιρών	66
4. 46 Μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 90 μοιρών	67
4. 47 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 90 μοιρών	67
4. 48 Μεταβολή της ασυμμετρίας της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 90 μοιρών ...	68
4. 49 Μεταβολή της κύρτωσης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 90 μοιρών	68
4. 50 Περιοδικότητα του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του υπεράκτιου πάρκου	69
4. 51 Περιοδικότητα της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του υπεράκτιου πάρκου	69
4. 52 Περιοδικότητα της ταχύτητας ανέμου πριν και μετά την κατασκευή του υπεράκτιου πάρκου	70
4. 53 Χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου V για το σημειακό κέντρο του αιολικού πάρκου London Array	71
4. 54 Κλιμακόγραμμα 1-D της ταχύτητας ανέμου στο σημειακό κέντρο του London Array	71
4. 55 Χρονοσειρές ύψους κύματος Hs για το σημειακό κέντρο του πάρκου London Array.....	72
4. 56 Κλιμακόγραμμα 1-D του ύψους κύματος για το σημειακό κέντρο του πάρκου London Array	72
4. 57 Χρονοσειρές περιόδου κύματος T _p για το σημειακό κέντρο του πάρκου London Array ..	73
4. 58 Κλιμακόγραμμα 1-D της περιόδου κύματος για το σημειακό κέντρο του πάρκου London Array	73
4. 59 Κλιμακόγραμμα 2-D του ύψους κύματος για την περιοχή μελέτης.....	74
4. 60 Κλιμακόγραμμα 2-D της περιόδου κύματος για την περιοχή μελέτης	75
4. 61 Ποσοστιαία μεταβολή της ταχύτητας ανέμου V για διαφορετικές χρονικές περιόδους ..	76
4. 62 Απόλυτη τιμή της ποσοστιαίας μεταβολής της ταχύτητας ανέμου V για διαφορετικές χρονικές περιόδους.....	76
4. 63 Απόλυτη τιμή της ποσοστιαίας μεταβολής της ταχύτητας ανέμου V για μεγαλύτερες σε μήκος χρονικές περιόδους	77
5. 1 Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής του ύψους κύματος Hs για τομή γωνίας 0 μοιρών	78
5. 2 Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής της περιόδου κύματος T _p για τομή γωνίας 0 μοιρών	79
5. 3 Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης του ύψους κύματος Hs για τομή γωνίας 0 μοιρών	80
5. 4 Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης της περιόδου κύματος T _p για τομή γωνίας 0 μοιρών	80
5. 5 Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου V για τομή γωνίας 0 μοιρών	82

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Προβλεπόμενη Εγκατεστημένη Ισχύς έως το 2030, 4Coffshore,2022	28
Πίνακας 2 Διαφορές στατιστικών μεγεθών για τα χαρακτηριστικά του κύματος σε διάφορα σημεία του αιολικού πάρκου	49

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΜΟΝΑΔΩΝ

m	Μέτρα
km	Χιλιόμετρο
MW	Μονάδα ισχύος (mega watt)
GW	Μονάδα ισχύος (giga watt)

ΜΕΤΑΦΡΑΣΜΕΝΗ ΟΡΟΛΟΓΙΑ

Buoy	Πλωτήρας μετρήσεων
Gust	Ριπή ανέμου
Meteorological mast	Μετεωρολογικός σταθμός μετρήσεων
Swell	Ανεμογενή κύματα
Spar buoy floaters	Πλωτήρες τύπου spar
Semi-submersible	Ημι-βυθισμένη πλατφόρμα
Tension leg platform	Πλατφόρμα τεχνολογίας tension leg

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης ενός εν ενεργεία υπεράκτιου αιολικού πάρκου στους επιφανειακούς θαλάσσιους κυματισμούς μιας ευρύτερης περιοχής μελέτης. Η διάρθρωση της εργασίας αρχικά περιλαμβάνει την επεξηγηματική παρουσίαση των μεταβλητών αναφοράς, την περιγραφή των δυνατοτήτων της αιολικής ενέργειας αλλά και των διαφορετικών ειδών έργων εκμετάλλευσης αυτής. Στη συνέχεια αναλύονται με στατιστικές μεθόδους οι μεταβολές των βασικών μεταβλητών για την επιλεχθείσα περιοχή μελέτης. Έπειτα διερευνάται η χωρική και χρονική εξάρτηση τους (long-range dependence), ενώ παράγονται συνθετικές χρονοσειρές προσομοιώνοντας την ροή του ανέμου. Γίνονται αναφορές σε προ-υπάρχουσα βιβλιογραφία, συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και τέλος σχολιασμός αυτών.

1.1 Φυσικά μεγέθη και μέθοδοι μέτρησής τους

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι μεγάλης σημασίας ο ορισμός εξ αρχής των βασικών μεταβλητών του θαλάσσιου πεδίου, οι οποίες για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αφορούν στον άνεμο και στους κυματισμούς.

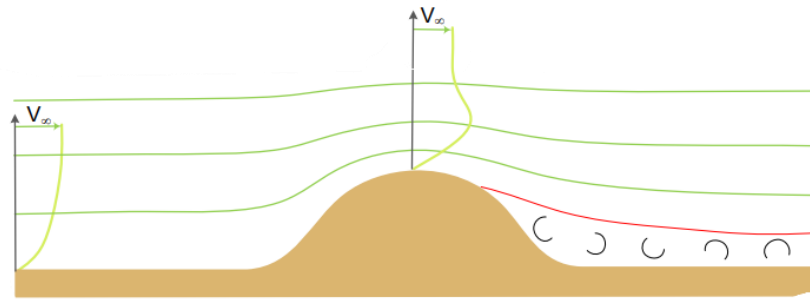
1.1.1 Άνεμος

Ο άνεμος είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος σχεδιασμού για τα παράκτια και υπεράκτια θαλάσσια έργα, τόσο λόγω της ασκούμενης άνεμο-πίεσης στις κατασκευές αλλά και της δημιουργίας των κυμάτων στην επιφάνεια της θάλασσας (ανεμογενείς κυματισμοί).

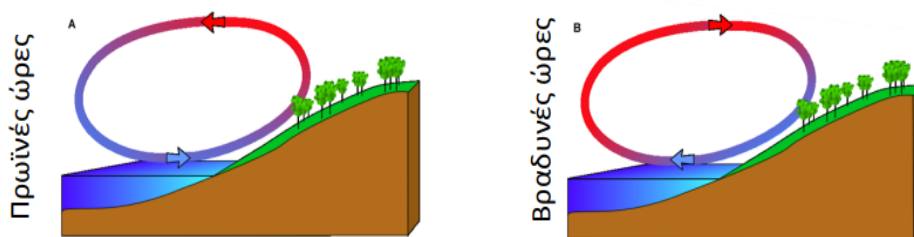
Ο άνεμος δημιουργείται εξαιτίας των διαφορών στην πίεση του αέρα, οι οποίες διαφορές προκύπτουν από τις αντίστοιχες διαφορές θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μια θερμότερη μάζα έχει μικρότερο βάρος από μια ψυχρότερη. Συνεπώς δημιουργείται μια κίνηση από την υψηλότερη προς την χαμηλότερη πίεση, σύμφωνα με την αρχή της εντροπίας (η ροή θερμότητας προς ένα σύστημα αυξάνει την εντροπία του, φυσική τάση για μεγιστοποίηση της εντροπίας σε κάθε σύστημα). Εκτός από την παγκόσμια κυκλοφορία, σε κάθε περιοχή επικρατούν και τοπικά φαινόμενα που έχουν να κάνουν με τη μορφολογία και το κλίμα της.

Η κίνηση του ανέμου πραγματοποιείται αφενός σε τρεις διαστάσεις και αφετέρου σε άπειρες κατευθύνσεις, με την κατακόρυφη να είναι η λιγότερο σημαντική. Ως ρεύμα είναι γνωστή η “κατακόρυφη” αυτή κίνηση του ανέμου. Την κίνηση του ανέμου επίσης επηρεάζει η περιστροφική κίνηση της Γης, με την οποία επιταχύνεται κάθε σωματίδιο του αέρα. Η επίδραση αυτή περιγράφεται συχνά μέσω της περιστροφικής δύναμης Coriolis, η οποία εξισορροπεί την δύναμη λόγω διαφοράς πίεσης, με αποτέλεσμα ο άνεμος να κινείται σχεδόν κατά μήκος των γραμμών ίσης πίεσης ή ισοβαρών. Πρόσθετα, λόγω της στροφικής αυτής κίνησης τα σωματίδια αποκτούν μια στροφορμή με κατεύθυνση από τα δυτικά στα ανατολικά.

Η χαρακτηριστική κίνηση του ανέμου είναι: (α) πάνω από λόφους και (β) πάνω από την θάλασσα.



1. 1 Ροή πάνω από λόφους



1. 2 Ροή ως θαλάσσια αύρα

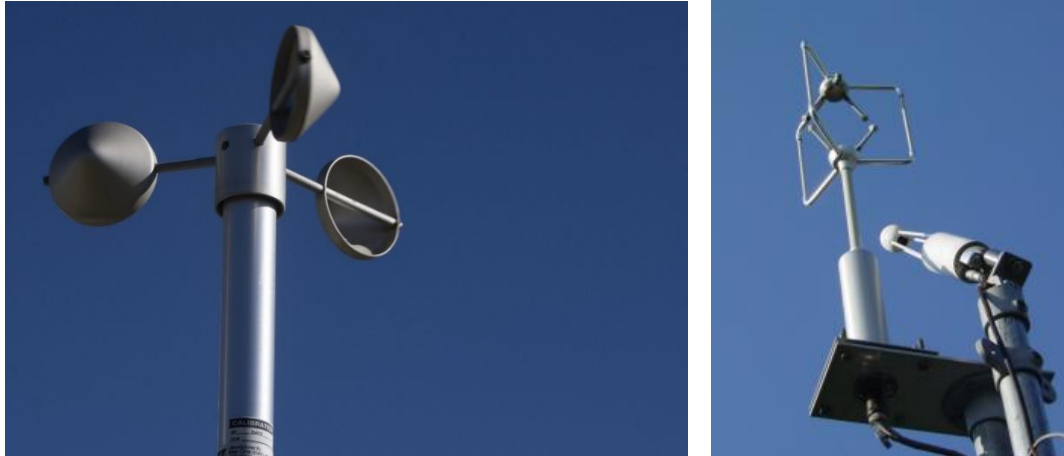
Το βασικό χαρακτηριστικό του ανέμου είναι η ταχύτητα του και αυτή μεταβάλλεται σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάνει σε ένα μέγιστο, αυτό ονομάζεται ριπή ανέμου (gust). Στο φάσμα της ταχύτητας του ανέμου, με χαρακτηριστικές περιόδους της τάξεως του λεπτού (min) είναι ο άνεμος που προκαλεί κυρίως δυναμικές φορτίσεις στις κατασκευές, ενώ με περιόδους της τάξης των λίγων ημερών, ο άνεμος δημιουργεί τους ανεμογενείς κυματισμούς των ωκεανών.

Η ταχύτητα του ανέμου μετριέται σε μίλια/ώρα (miles per hour), κόμβους (knots) ή μέτρα/δευτερόλεπτο (m/sec). Επίσης μετριέται στην κλίμακα Beaufort.

Η αντιστοιχία της ταχύτητας ανέμου V_{10} σε m/s, σε ύψος 10 m, με τον αριθμό Beaufort B, δίνεται από τη σχέση:

$$V_{10} = 0.836 * B^{\frac{3}{2}} \quad (1.1)$$

Η ταχύτητα του ανέμου μετριέται με ανεμόμετρα σε μετρήσεις πεδίου. Τα σύγχρονα ανεμόμετρα μαζί με την τιμή της ταχύτητας δίνουν και την διεύθυνση του ανέμου την στιγμή της μέτρησης (ωρολογιακά και στην κλίμακα των 360°). Τα ανεμόμετρα αυτά μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη πάνω σε κάποια υπεράκτια κατασκευή, είτε σε κάποιον μετρητικό σταθμό περιβαλλοντικών δεικτών (meteorological mast), είτε πάνω σε κάποιον πλωτήρα (buoy).



1. 3 Συσκευές μέτρησης του ανέμου : (α) κυπελλοφόρο ανεμόμετρο (αριστερά) και (β) ανεμόμετρο υπερήχων (δεξιά)



1. 4 Συσκευή μέτρησης του ανέμου: ανεμούριο

Επίσης η ταχύτητα του ανέμου μετριέται μέσω μετεωρολογικών δορυφόρων που σαρώνουν λωρίδες της επιφάνειας της Γης με σχετικά μικρό πλάτος, καταγράφοντας με μεγάλη ακρίβεια την δομή και την σύσταση της γήινης ατμόσφαιρας. Συνεπώς για τον επαρκή χαρακτηρισμό του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής χρησιμοποιούνται όλες οι διαθέσιμες πηγές, με μετρήσεις αναφοράς αυτές του πεδίου, σύμφωνα με τις οποίες “καλιμπράρονται” οι αντίστοιχες δορυφορικές.



1. 5 Πλωτή μετρητική συσκευή Βουογ (αριστερά) και δορυφόρος μετεωρολογικών μετρήσεων (δεξιά)

1.1.2 Κυματισμοί

Ο άνεμος είναι η κυριότερη αιτία δημιουργίας θαλάσσιων κυμάτων. Το πιο σημαντικό είδος κυμάτων είναι τα κύματα βαρύτητας που μεταδίδονται λόγω της δύναμης της βαρύτητας και οφείλονται κυρίως στον άνεμο αλλά και στην πλεύση άλλων σωμάτων στην επιφάνεια της θάλασσας ή την κίνηση άλλων σωμάτων σε μικρό βάθος. Η θαλάσσια διαταραχή επηρεάζεται από την ένταση του ανέμου και αναφέρεται ως “κατάσταση της θάλασσας”. Τα ανεμογενή κύματα δεν σταματούν αμέσως μόλις σταματάει ο άνεμος, αλλά κινούνται μέχρι να αποσβέσουν την ενέργειά τους. Αυτό το είδος κυματισμού είναι γνωστό διεθνώς ως swell. Επίσης υπάρχουν και άλλα είδη κυματισμών που οφείλονται στην περιστροφική κίνηση της Γης και στην επιτάχυνση Coriolis και κυματισμοί που επηρεάζονται από την έλξη άλλων ουράνιων σωμάτων.

Κάποια βασικά χαρακτηριστικά των κυμάτων είναι: το μήκος κύματος (L), το ύψος κύματος (H), η περίοδος κύματος (T), η συχνότητα (f) και η ταχύτητα (u). Για κάθε κυματισμό υπάρχει μια ποικιλία περιόδων που μπορεί να αποδοθεί με το κατάλληλο φάσμα.

Οι κύριες μεταβλητές σχεδιασμού σ’ ένα έργο είναι συνήθως το χαρακτηριστικό ύψος κύματος (H_s) και η μέση περίοδος (T_z).

$$H_s = 4 * \sqrt{m_0} \quad (1.2)$$

όπου m_0 η μηδενική ροπή του φάσματος.

Οι μετρήσεις πεδίου των κυματισμών μιας περιοχής, γίνονται είτε με όργανα επιφανείας (wave riders), είτε με αισθητήρια πίεσης που τοποθετούνται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ή με ηλεκτρόδια που διαπερνούν την θαλάσσια επιφάνεια. Σημαντική πληροφορία για τις μετρήσεις πεδίου είναι και η διεύθυνση των κυματισμών η οποία προκύπτει είτε από ειδικούς πλωτήρες με ραντάρ, είτε από συσκευές υπέρυθρων ακτινοβολιών που τοποθετούνται συνήθως σε θαλάσσιες πλατφόρμες. Διαθέσιμα είναι όπως και στην περίπτωση του ανέμου τα δορυφορικά δεδομένα, σε διαφορετική ανάλυση και χρονική κλίμακα. Σε συνδυασμό όλα τα παραπάνω δεδομένα συνθέτουν το κυματικό προφίλ μιας περιοχής.



1. 6 Πλωτήρας wave rider (Πηγή: Marine service Australia)

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί υπάγονται στην κατηγορία των επιφανειακών κυμάτων. Τα τελευταία δημιουργούνται στην διαχωριστική επιφάνεια δυο ρευστών, στην συγκεκριμένη περίπτωση του νερού και του ανέμου. Μεταξύ των δυο ρευστών υπάρχει μια δυναμική σχέση ανταλλαγής ενέργειας, η οποία καθιστά την περιγραφή του οριακού αυτού στρώματος ιδιαίτερα πολύπλοκη.

1.2 Αιολική ενέργεια

Η ένταξη ολοένα και περισσότερων μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στα συστήματα παραγωγής, αποτελεί πλέον στόχο πολλών ανεπτυγμένων χωρών. Το αυξημένο διαθέσιμο μερίδιο της “πράσινης” ενέργειας δημιουργεί την ανάγκη για αύξηση της αποδοτικότητας των ήδη υπάρχοντων εγκαταστάσεων αλλά και την δημιουργία νέων. Η αιολική ενέργεια έχει σημαντική θέση στο παγκόσμιο “μίγμα” μεταξύ άλλων (ηλιακή, υδροδυναμική κλπ.). Σημαντικό είναι και το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της ωκεάνιας ενέργειας, με εστίαση στην κυματική ενέργεια.

Επιπλέον, η ένταξη διαφορετικών μορφών ενέργειας στην ίδια μονάδα παραγωγής π.χ. ωκεάνιας ενέργειας και αιολικής, αυξάνει την ευελιξία διαχείρισής της (ανεξαρτησία μονάδων παραγωγής) και μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα τους (σχεδιασμός δυο ξεχωριστών μονάδων).

Συγκεκριμένα, η αιολική ενέργεια έχει αναπτυχθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες. Η εκμετάλλευσή της από τον άνθρωπο αποτελεί μια πρακτική που έχει τις ρίζες της στην αρχαιότητα (παραδείγματα: ιστιοφόρα, ανεμόμυλοι κ.α.). Σήμερα ο άνθρωπος επωφελείται της ενέργειας του ανέμου μέσω των ανεμογεννητριών. Πρόκειται για μηχανές μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε πρώτο στάδιο σε δυναμική μέσω της περιστροφής του άξονα της πτερωτής και σε δεύτερο στάδιο σε ηλεκτρικής μέσω της γεννήτριας.

Η αιολική ενέργεια είναι ενταγμένη στο σύστημα με στόχο είτε την πλήρη κάλυψη είτε την συμπλήρωση των ενεργειακών αναγκών. Ημερήσιες προβλέψεις του αιολικού δυναμικού καθορίζουν το ποσοστό συμμετοχής της καθημερινά στο μίγμα ενέργειας. Λόγω της φύσης του ανέμου, η οποία ενέχει την αβεβαιότητα, συχνά παράγεται λιγότερη ή περισσότερη ενέργεια από την ζητούμενη. Το δημιουργούμενο έλλειμμα ενέργειας καλύπτεται από την ένταξη άλλων μορφών ενέργειας (ανανεώσιμων και μη) στο σύστημα, ενώ το πλεόνασμα αυτής είτε αποθηκεύεται, είτε διοχετεύεται στο σύστημα και αξιοποιείται αλλού (π.χ. αφαλάτωση) είτε καταστρέφεται. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η πλέον γνωστή μέθοδος είναι οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) που χρησιμοποιείται για μικρής κλίμακας παραγωγικές μη διασυνδεδεμένες στο δίκτυο μονάδες. Ακόμη υπάρχει και η πρακτική της άντλησης ύδατος και ταμίευσης αυτού, σε τεχνητές λίμνες κατασκευασμένες σε υψόμετρο ικανό για την τροφοδοσία ηλεκτρικού σταθμού, όταν η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας είναι μεγάλη.

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οι ανεμογεννήτριες δεν χωροθετούνται μεμονωμένα, αλλά κατά πολλές, σχηματίζοντας τα λεγόμενα αιολικά πάρκα. Πρόκειται για βιομηχανικές

εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν το πλήθος των ανεμογεννητριών, τα καλώδια μεταφοράς ενέργειας, μετεωρολογικούς σταθμούς πρόβλεψης του παράγοντα ανέμου, τους σταθμούς μετασχηματισμού και όλες τις βοηθητικές υποδομές (π.χ. οδούς πρόσβασης στο έργο). Τα αιολικά πάρκα δύναται να κατασκευασθούν, ανάλογα το αιολικό δυναμικό, την μορφολογία, τις κοινωνικό-οικονομικές συνθήκες και την υπάρχουσα τεχνογνωσία τόσο στο χερσαίο όσο και στο θαλάσσιο περιβάλλον. Σήμερα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς παγκοσμίως ξεπερνά τα 730GW. Οι μεγαλύτεροι παγκόσμιοι κυβερνητικοί και μη οργανισμοί (IRENA, Wind Europe, Global Wind Energy Council, EIA κ.α.) θέτουν στόχους για την επίτευξη υψηλών ποσοστών συμμετοχής στο μίγμα ενέργειας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) έως το 2050. Στην πλειοψηφία τους οι ανεπτυγμένες χώρες διαθέτουν έναν ικανό αριθμό εγκατεστημένης ισχύος προερχόμενης από χερσαία πάρκα, καθώς η ανάπτυξη της έχει προηγηθεί κατά δεκαετίες αυτής των υπεράκτιων.

1.3 Χερσαία και θαλάσσια αιολικά πάρκα

Προκειμένου να γίνει σαφής η αιτία του παραπάνω φαινομένου, σκόπιμη κρίνεται η συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των δύο ειδών πάρκων.

Ανάλογα με την περιοχή, το αιολικό δυναμικό, την υπάρχουσα τεχνογνωσία, την εξειδίκευση των εμπλεκόμενων αλλά και το επενδυτικό κεφάλαιο, υπερτερούν είτε τα χερσαία είτε τα θαλάσσια αιολικά πάρκα.

Ακολουθεί η συγκριτική αξιολόγηση χερσαίων-θαλάσσιων αιολικών πάρκων:

Πλεονεκτήματα χερσαίων αιολικών πάρκων:

- **Μικρότερο κόστος:** οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις είναι μικρότερου κόστους από τις αντίστοιχες για την κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Η απόσβεση κεφαλαίου εκτιμάται ότι είναι πολύ ταχύτερη, σε ορισμένες δε περιπτώσεις έως και 2 έτη μετά τη διασύνδεση του σταθμού στο σύστημα. Επιπλέον πρόκειται για την πιο φθηνή μορφή παραγωγής “πράσινης ενέργειας”, έναντι της ηλιακής ή της πυρηνικής, οπότε η κατασκευή μεγάλης κλίμακας χερσαίων αιολικών πάρκων καθίσταται βιώσιμη για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας.
- **Μικρότερο μήκος καλωδίωσης:** η απόσταση μεταξύ του τελικού καταναλωτή και της μονάδας παραγωγής είναι μικρή, κατ’ επέκταση και οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Μικρός χρόνος εγκατάστασης:** η ανέγερση των ανεμογεννητριών μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα σε λίγους μόνο μήνες.
- **Χαμηλό κόστος συντήρησης:** σε αντίθεση με τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, τα χερσαία έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης και συγκριτικά εύκολη προσβασιμότητα στο πεδίο εργασιών.
- **Μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα:** σε σχέση με άλλες μορφές πράσινης ενέργειας, η επίδραση ενός χερσαίου αιολικού πάρκου είναι περιορισμένη, καθώς δεν εκλύονται τοξικές ουσίες και δεν προκαλεί σημαντικής κλίμακας περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην χλωρίδα και πανίδα της περιοχής.

Μειονεκτήματα χερσαίων αιολικών πάρκων:

- Διακύμανση της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου: η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου επηρεάζονται από το πεδίο, με αποτέλεσμα ένα χερσαίο αιολικό πάρκο, λόγω εξαιρετικά χαμηλών ταχυτήτων ανά περιόδους, σε ετήσια βάση να έχει λιγότερες ώρες λειτουργίας.
- Φυσικά και τεχνητά εμπόδια: η δόμηση και τα φυσικά εμπόδια πλησίον του πάρκου, διαταράσσουν την ροή του ανέμου, με αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής παραγόμενης ενέργειας.
- Μη συνεχής παραγωγή ενέργειας: οι χαμηλές ταχύτητες ανέμου σε ορισμένες εποχές του έτους απαιτούν την συμπληρωματική χρήση ορυκτών καυσίμων. Λόγω του ολοένα και αυξανόμενου μεγέθους των αιολικών πάρκων, η ανάγκη χρήσης ορυκτών καυσίμων θα πρέπει να περιλαμβάνεται στις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού του.
- Οπτική και ακουστική όχληση: οι ανεμογεννήτριες του πάρκου υποβαθμίζουν το φυσικό τοπίο, ειδικά όταν κατασκευάζονται σε μεγάλα υψόμετρα και είναι ορατές στους κοντινούς οικισμούς. Δημιουργούν ηχορύπανση λόγω του έντονου θορύβου των εν λειτουργία στροβίλων τους.

Πλεονεκτήματα υπεράκτιων αιολικών πάρκων:

- Μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας: οι ταχύτητες ανέμου στην θάλασσα είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες στην στεριά και αυτή η διαφορά είναι ικανή να αυξήσει σημαντικά την απόδοση ενός θαλάσσιου πάρκου. Ακόμη, στην θάλασσα χωροθετούνται υψηλότερες ανεμογεννήτριες με μεγαλύτερη ισχύ, εφόσον βρίσκονται σε ικανή απόσταση από την ακτή.
- Σταθερότητα στην παραγωγή ενέργειας: οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου δεν είναι το ίδιο έντονες με εκείνες ενός χερσαίου αιολικού πάρκου, δημιουργώντας σταθερές συνθήκες στην παραγωγή ενέργειας (αυξάνεται η αξιοπιστία).
- Μικρότερο οικολογικό αποτύπωμα: η οπτική όχληση που προκαλούν είναι μικρότερη σε σχέση με ένα χερσαίο αιολικό πάρκο. Δεν ανακύπτουν θέματα χρήσεων γης και κυρίως απαλλοτριώσεων. Κατασκευάζονται εκτός γραμμής πλεύσης, αλιευτικών περιοχών και προστατευόμενων θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Δεν υπάρχουν φυσικά εμπόδια που να ανακόπτουν την ροή του ανέμου. Συνεπώς κατασκευάζονται μεγάλης κλίμακας υπεράκτια αιολικά πάρκα συγκρινόμενα με τα χερσαία και κατ' επέκταση παράγουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, με λιγότερο σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Sargentis et al., 2019).
- Δυνατότητα ένταξης και άλλων μορφών ενέργειας σε ένα υπεράκτιο πάρκο: εκτός της χρήσης φωτοβολταϊκών πάνελ με στόχο την συνδυασμένη παραγωγή ενέργειας, υπάρχει και η δυνατότητα αφαλάτωσης σημαντικών ποσοτήτων νερού από την περίσσεια της αιολικής ενέργειας. Τέλος, σκέψεις υπάρχουν για την παραγωγή ενέργειας υδρογόνου από πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.

Μειονεκτήματα υπεράκτιων αιολικών πάρκων:

- Μεγαλύτερο κόστος: η κατασκευή θαλάσσιων αιολικών πάρκων απαιτεί εξειδικευμένη τεχνογνωσία, είναι περισσότερο απαιτητική και περίπλοκη (ειδικά σε μεγάλα βάθη). Σημαντικά ακριβότερη είναι και η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας με καλώδια, μήκους αρκετών χιλιομέτρων, στον τελικό καταναλωτή.
- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης: ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο δέχεται σημαντικές καταπονήσεις από τα φορτία ανέμου και κύματος. Οι ανάγκες συντήρησης και η δυσκολία προσβασιμότητας είναι μεγάλες, αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας και συντήρησης.
- Οπτική και ακουστική όχληση: ο παραγόμενος θόρυβος του εν λειτουργία πάρκου ενδέχεται να διαταράξει τις ισορροπίες της πανίδας του οικοσυστήματος. Η επίδραση τους στο οικοσύστημα ακόμα δεν έχει μελετηθεί και αξιολογηθεί πλήρως. Συχνά, τα υπεράκτια πάρκα που κατασκευάζονται κοντά στην ακτή, προκαλούν αντιδράσεις στις τοπικές κοινωνίες.
- Δημιουργία μικρής κλίμακας θέσεων εργασίας: σε αντίθεση με τα χερσαία αιολικά, τα υπεράκτια έχουν λιγότερα οφέλη για την τοπική κοινωνία. Τόσο το πάρκο, όσο και οι σταθμοί μεταφοράς ενέργειας κατασκευάζονται εν γένει σε ικανή απόσταση από την τοπική κοινότητα, αδυνατώντας να προσφέρουν θέσεις εργασίας.

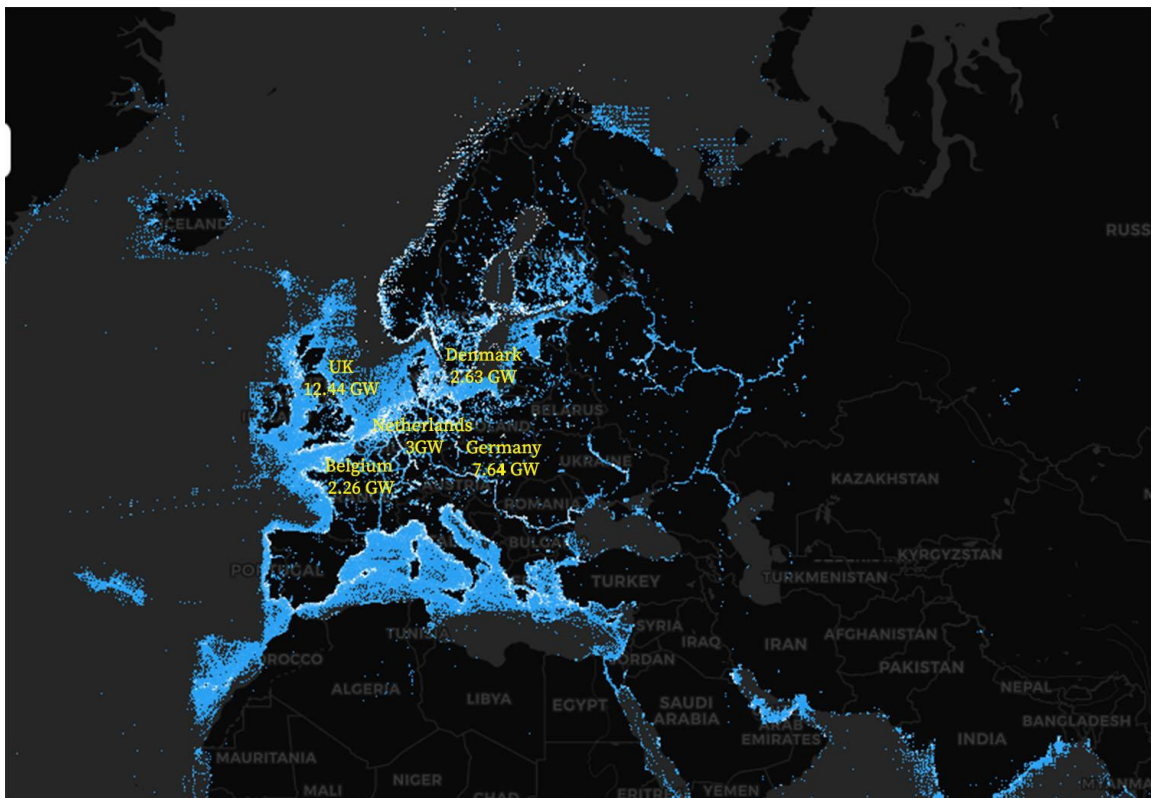
2. ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

2.1 Εκμετάλλευση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας

Η χρήση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι πιο έντονη τα τελευταία 15 έτη, ως μια πολύ αποδοτική μορφή εκμετάλλευσης της “πράσινης” ενέργειας του ανέμου. Ο αριθμός των θαλάσσιων αιολικών πάρκων που κατασκευάζονται και τίθενται σε λειτουργία κάθε χρόνο αυξάνεται σημαντικά. Τα περισσότερα κράτη συμπεριλαμβάνουν πλέον στον ενεργειακό σχεδιασμό τους, βραχυπρόθεσμα αλλά και μακροπρόθεσμα, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα.

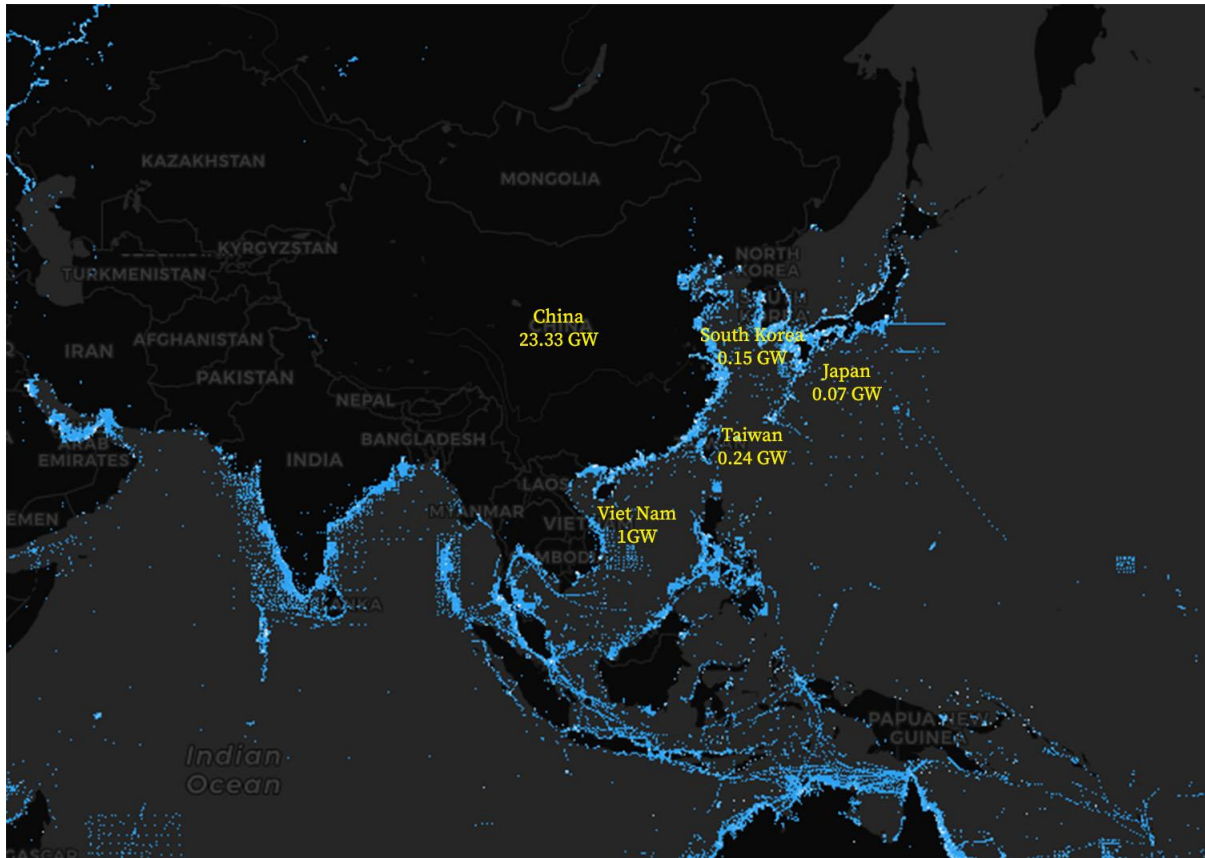
Αρκετές ευρωπαϊκές χώρες ηγούνται του κλάδου, όπως η Δανία, η Μεγάλη Βρετανία, η Γερμανία, η Ολλανδία κλπ. Σήμερα μεγάλο μερίδιο της εγκατεστημένης ισχύς στον υπεράκτιο χώρο κατέχει η Κίνα, ενώ επίσης ακολουθούν και άλλες χώρες της Ασίας (Ταϊβάν, Βιετνάμ κλπ.).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται, για τις χώρες της Ευρώπης με σημαντική παρουσία στον τομέα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, η εγκατεστημένη ισχύς έως και το έτος 2022.



2. 1 Εγκατεστημένη ισχύς θαλάσσιων αιολικών πάρκων στην Ευρώπη (2022), (πηγή: Navionics Satellite Map)

Αντίστοιχα στοιχεία δίνονται και για την Ασία.



2. 2 Εγκατεστημένη ισχύς θαλάσσιων αιολικών πάρκων στην Ασία (2022), (πηγή: Navionics Satellite Map)

2.2 Συγκριτική αξιολόγηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα διακρίνονται, εν γένει, ως προς τον τρόπο έδρασης ή το βάθος θεμελίωσης. Αναλυτικότερα:

2.2.1 Με βάση τον τρόπο έδρασης

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου έδρασης σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του ανέμου, το βάθος του νερού, τις κυματικές συνθήκες της περιοχής, την ποιότητα υλικού του πυθμένα, την απόσταση από τον κοντινότερο ηλεκτρικό σταθμό ενέργειας, την δυνατότητα σχηματισμού πάγου και την επίδραση που θα έχει η εν λόγω κατασκευή στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Σήμερα υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι έδρασης:

I. οι σταθερές θεμελίωσης ανεμογεννήτριες (fixed-bottom wind turbines)

- Βάση Βαρύτητας (gravity base): όπως γίνεται κατανοητό, κύριος παράγοντας έδρασης είναι η δύναμη της βαρύτητας της άνωθεν κατασκευής. Αποτελούνται από κιβώτια σκυροδέματος ή χάλυβα. Στην έδραση του πυλώνα (βάση) της

ανεμογεννήτριας, προκειμένου να προστατεύεται από την επικείμενη διάβρωση, τοποθετούνται ογκόλιθοι ή βράχοι. Παράμετροι σχεδιασμού του έργου είναι οι ασκούμενες δυνάμεις πίεσης από τους κυματισμούς και τον πάγο (Lehmann, 2007).

- Μονός πυλώνας (monopile): ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας αποτελείται από χάλυβα διαμέτρου 3-5m, με βάθος εισχώρησης στον πυθμένα της θάλασσας 4-8 φορές της αρχικής διαμέτρου ανάλογα της ποιότητας υλικού του υποστρώματος (Lehmann, 2007). Σε αυτή την μορφή σταθερής έδρασης, δεν απαιτείται κάποια προεργασία στον πυθμένα, ο οποίος ενδείκνυται να είναι από άμμο ή αμμοχάλικα (ευκολότερη εισχώρηση).
- Τρίποδο (tripod): ένα πλαίσιο χάλυβα συνδέεται με τον πύργο της ανεμογεννήτριας μεταφέροντας τις δυνάμεις από το τον πύργο στους τρεις πυλώνες χάλυβα jackets (Lehmann, 2007). Οι τρεις αυτοί πυλώνες με διάτρηση ή δονήσεις αγκυρώνονται στον πυθμένα. Και αυτός ο τύπος έδρασης απαιτεί ελάχιστη προεργασία του βυθού.

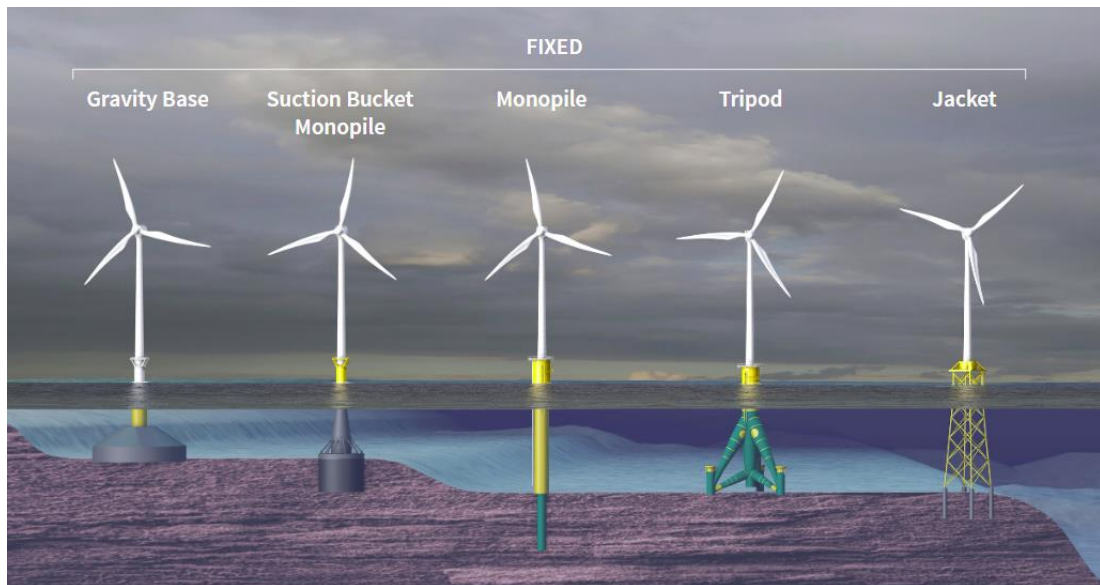
II. οι πλωτές ανεμογεννήτριες (floating wind turbines).

- Spar buoy floaters: αποτελείται από έναν κυλινδρικό κοίλο σωλήνα, μεγαλύτερο σε διάμετρο από τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Πάνω σε αυτόν εδράζεται η ανεμογεννήτρια και λόγω της άνωσης που προκαλείται παραμένει στην επιφάνεια. Οι εργασίες κατασκευής εκτελούνται στον λιμένα και η βάση ρυμουλκείται στα βαθιά, όπου υπολείπεται η σύνδεση των συρμάτων καλωδίων αγκύρωσης και του ηλεκτρικού καλωδίου. Επιδέχεται κλίση μερικών μοιρών, η οποία μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την διαμόρφωση των συρματοσχοινών.
- Semi submersible: ημιβυθισμένη πλατφόρμα χρησιμοποιείται ως πλωτή δομή έδρασης της ανεμογεννήτριας. Η δομή αυτή αποτελείται από κυλίνδρους που συνδέονται μεταξύ τους με σωλήνες. Η γεννήτρια είναι τοποθετημένη πάνω στον έναν κύλινδρο και η κατασκευή αγκυρώνεται με συρμάτινα σχοινιά. Η ανεμογεννήτρια δύναται, ενώ παραμένει όρθια, να στρέφεται ώστε να βρίσκεται στην διεύθυνση του κύριου ανέμου.
- Tension Leg Platform: πρόκειται για μια πλωτή, κοίλη βάση, πάνω στην οποία εδράζεται η ανεμογεννήτρια, η οποία συγκρατείται με προ-εντεταμένα συρματοσχοινά. Είναι η πιο σταθερή δομή σε σχέση με τις προαναφερθείσες και η πιο ακριβή.

2.2.2 Με βάση το βάθος θεμελίωσης

Ένας άλλος τρόπος κατάταξης, αφορά στο βάθος θεμελίωσης των ανεμογεννητριών στα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Αναλυτικότερα διακρίνονται σε:

- **κατασκευές έδρασης σε ρηχά νερά** (βάθη από 0 έως 30 m), όπου χρησιμοποιούνται όλοι οι τύποι έδρασης σταθερής θεμελίωσης.
- **κατασκευές έδρασης σε ενδιάμεσο νερό** (βάθη 30 ως 50 m), όπου χρησιμοποιούνται οι τύποι έδρασης σταθερής θεμελίωσης τρίποδου ή μονού jacket.
- **κατασκευές έδρασης σε βαθιά νερά** (βάθη από 60m και πάνω), όπου χρησιμοποιούνται οι πλωτού τύπου θεμελίωσης.



2. 3 Είδη σταθερής θεμελίωσης υπεράκτιων αιολικών πάρκων, (πηγή: www.tethys.com)



2. 4 Είδη πλωτών αιολικών πάρκων, (πηγή: International Renewable Energy Agency [IRENA], 2016)

2.2.3 Συγκριτικά στοιχεία μεταξύ αιολικών πάρκων λόγω μεθόδου έδρασης

Στον ολοένα αναπτυσσόμενο τομέα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, έχουν καταλάβει σημαντικό έδαφος τα σταθερής έδρασης αιολικά πάρκα. Παρακάτω αναφέρονται κάποια από τα στοιχεία εξαιτίας των οποίων πλεονεκτούν ή μειονεκτούν έναντι των πλωτών.

Πλεονεκτήματα αιολικών πάρκων σταθερής έδρασης:

- Μειωμένο ρίσκο στον τρόπο έδρασης: εφόσον παρόμοιος τρόπος έδρασης χρησιμοποιείται σε αρκετά αιολικά πάρκα, υπάρχει τεχνογνωσία και εμπειρία με αποτέλεσμα να μειώνεται η επισφάλεια στην κατασκευή τους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε ορισμένα αιολικά πάρκα, ήδη οι ανεμογεννήτριες τέτοιου τύπου που χρησιμοποιήθηκαν, λειτουργούν και έχουν ολοκληρώσει τον μισό κύκλο λειτουργίας τους.
- Μικρότερο κόστος κατασκευής-συντήρησης: αποτελούν έργα μικρότερης συνθετότητας. Έχουν μικρότερο κόστος κατασκευής αλλά και συντήρησης.
- Λιγότερες απώλειες ενέργειας: τα σταθερής έδρασης αιολικά πάρκα κατασκευάζονται σε μικρά βάθη και άρα σε απόσταση πλησιέστερα από την ακτή. Συνεπώς το μήκος καλωδίωσης όπως και οι απώλειες στην μεταφορά της ενέργειας είναι μικρότερες.

Μειονεκτήματα αιολικών πάρκων σταθερής έδρασης:

- Κατασκευή in situ: η κατασκευή του κορμού θεμελίωσης πραγματοποιείται επί τόπου, με αποτέλεσμα παραγόμενα προϊόντα μετάλλων και δομικών υλικών, να εκλύονται προκαλώντας ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Επιπλέον, η ως άνω κατασκευή, δημιουργεί ακουστική όχληση στην θαλάσσια πανίδα.
- Υποβάθμιση του υποθαλάσσιου οικοσυστήματος: πέραν των όσων επιπτώσεων δημιουργεί η κατασκευή του πάρκου σταθερής έδρασης στο θαλάσσιο οικοσύστημα, η μη-απομάκρυνση της βάσης έδρασης με την ολοκλήρωση του έργου, αλλοιώνει περαιτέρω το περιβάλλον.

Πλεονεκτήματα πλωτών αιολικών πάρκων:

- Εκμετάλλευση του θαλάσσιου αιολικού δυναμικού: με την κατασκευή πλωτών αιολικών πάρκων καθίσταται δυνατή η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου και σε μεγαλύτερα βάθη.
- Μειωμένη οπτική όχληση: τα πλωτά αιολικά πάρκα, εν γένει, κατασκευάζονται σε σημαντική απόσταση από την ακτογραμμή. Δεν εγείρουν σημαντικές οχλήσεις και δεν προκαλούν σημαντικές αντιδράσεις στην τοπική κοινωνία.
- Μεγαλύτερη αποδοτικότητα: τα χαρακτηριστικά του ανέμου σε μικρότερα βάθη και πλησίον της ακτής είναι διαφορετικά από αυτά της ανοικτής θάλασσας. Η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη και με ηπιότερες διακυμάνσεις. Η αποδοτικότητα ενός πλωτού πάρκου, το οποίο χωροθετείται σε μεγάλα βάθη, είναι υψηλότερη και η παραγόμενη ενέργεια πιο αξιόπιστη.

- Δυνατότητα επανάχρησης της βάσης ανεμογεννήτριας: η βάση έδρασης αποσυναρμολογείται και μπορεί, αφού αποσυναρμολογηθεί από το υπάρχον αιολικό, να χρησιμοποιηθεί σε κάποιο άλλο, προκαλώντας ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Μειονεκτήματα πλωτών αιολικών πάρκων:

- Έλλειψη τεχνογνωσίας: τα πλωτά αιολικά πάρκα μέχρι και σήμερα βρίσκονται σε πολλές χώρες ως επί το πλείστον σε αρχικό στάδιο σχεδιασμού και αδειοδότησης. Επομένως υπάρχει έλλειμμα ακόμα αφενός ως προς την τεχνογνωσία και αφετέρου ως προς την αποκτώμενη εμπειρία από την κατασκευαστική διαδικασία. Ο σχεδιασμός του πλωτού αυτού έργου, αφορά σε ένα σύνθετο επιστημονικό πρόβλημα, με πολλές παραμέτρους αξιολόγησης (φυσικά φαινόμενα, τεχνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές δεσμεύσεις και προδιαγραφές). Δεδομένης της κλίμακας, του τύπου κατασκευής του και της θέσης κατασκευής (μεγάλα βάθη), απαιτεί σημαντικά και αξιόπιστα δεδομένα για τον σχεδιασμό. Η ποιότητά τους, θα πρέπει απαραίτητα να αξιολογείται με προσοχή, ώστε οι παραδοχές που θα γίνουν στον σχεδιασμό του έργου, να έχουν μειωμένο κατασκευαστικό και λειτουργικό ρίσκο.
- Αυξημένο κόστος κατασκευής: όπως προαναφέρθηκε η κατασκευή των πλωτών αιολικών πάρκων έχει πολύ σημαντικό επενδυτικό κόστος που επιφέρει αντίστοιχο ρίσκο. Δυσκολίες υπάρχουν τόσο για την ανάπτυξή τους όσο και στην απόκτηση της αναγκαίας εμπειρίας του τεχνικού αντικειμένου. Τα ολιγάριθμα υπεράκτια πάρκα δημιουργούν, όπως και σε κάθε άλλη περίπτωση, μονοπωλιακά κατεστημένα που επιβραδύνουν την ανάπτυξη των αιολικών πάρκων. Τέλος, απαιτούν λόγω της κατασκευής τους σε μεγάλα βάθη, αυξημένες ανάγκες καλωδίωσης, που αυξάνουν το κόστος και απαιτούν ένα αξιόπιστο/σταθερό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αναμένεται στα επόμενα χρόνια η πτώση της τιμής MWh για τα υπεράκτια πλωτά αιολικά.
- Ανάγκη ύπαρξης υποδομών/εξειδικευμένων υπηρεσιών-προϊόντων: η ανέγερση ενός πλωτού αιολικού πάρκου περιλαμβάνει την συναρμολόγησή του και την ρυμούλκησης του συνήθως σε μεγάλα βάθη στη θάλασσα. Ενδεικτικά αναφέρεται η ανάγκη ύπαρξης υφιστάμενων λιμενικών υποδομών υψηλών προδιαγραφών, ναυπηγικών εγκαταστάσεων και εξειδικευμένων συνεργείων για την εκτέλεση των εργασιών. Θα πρέπει να υπάρχει διαθεσιμότητα στην προμήθεια των αναγκαίων υλικών, που απαιτούνται για την κατασκευή της πλατφόρμας έδρασης των ανεμογεννητριών και των λοιπών συστημάτων μέτρησης και παραγωγής.
- Ανάγκη αξιόπιστου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας: Όπως έχει προαναφερθεί τα πλωτά αιολικά πάρκα θα πρέπει να υπάρχουν επαρκείς υποδομές και στο δίκτυο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας (κίνδυνος πρόκλησης του φαινομένου bottleneck, δηλαδή εισόδου μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας στο δίκτυο).

Συμπερασματικά, παρά τα όποια μειονεκτήματα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, η υπεράκτια αιολική ενέργεια κρίνεται πλέον από τις πιο ανταγωνιστικές του κλάδου των ανανεώσιμων πηγών.

Έως και το 2030 παγκοσμίως, πολλά υπεράκτια αιολικά πάρκα θα βρίσκονται είτε σε φάση σχεδιασμού και αδειοδότησης, είτε ήδη σε φάση κατασκευής. Στον παρακάτω Πίνακα δίνονται σχετικά στοιχεία:

Πίνακας 1 Προβλεπόμενη Εγκατεστημένη Ισχύς έως το 2030, 4Coffshore, 2022

<u>Χώρα</u>	<u>Προβλεπόμενη Εγκατεστημένη Ισχύς έως το 2030 (GW)</u>
Βραζιλία	132.35
Μεγάλη Βρετανία	93.84
Σουηδία	82.02
Κίνα	80.31
Βιετ Ναμ	72.44
Η.Π.Α.	65.81
Ολλανδία	60.7
Ταϊβάν	53.65
Αυστραλία	49.40
Ιαπωνία	48.96
Γερμανία	47.94
Ιρλανδία	39.02
Νότια Κορέα	33.10
Εσθονία	26.46
Ιταλία	26.43
Δανία	23.05
Φιλανδία	22.73
Πολωνία	20.81
Γαλλία	18.12
Νορβηγία	12.01
Φιλιππίνες	9.78
Ισπανία	8.27

Ινδία	3.73
Ελλάδα	2.00
Ρουμανία	1.90
Βέλγιο	1.00
Τανζανία	0.60
Σαουδική Αραβία	0.50
Καναδάς	0.40
Μπαγκλαντές	0.40
Πορτογαλία	0.36
Σρι Λάνκα	0.30
Βερμούδες	0.06

3. ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται στατιστικές και στοχαστικές μέθοδοι ανάλυσης, όπως παρουσιάζεται σε αυτή την ενότητα.

3.1 Στατιστικές Μέθοδοι

3.1.1 Βασικές έννοιες πιθανοτήτων και στατιστικής

Βασικό σύνολο, Ω : σύνολο που τα στοιχεία του δ αντιστοιχούν στις δυνατές εκβάσεις ενός πειράματος ή μιας διεργασίας. Είναι γνωστό και ως δειγματικός χώρος ή θέβαιο γεγονός.

Σ -άλγεβρα ή σ -πεδίο, Σ : σύνολο υποσυνόλων δ του Ω με τις εξής ιδιότητες: (α) $\Omega \in \Sigma$, $\emptyset \in \Sigma$, (β) αν $\delta \in \Sigma$ τότε $\Omega - \delta \in \Sigma$, (γ) η ένωση (αριθμήσιμα) πολλών στοιχείων του Σ είναι στοιχείο του Σ .

Πιθανότητα, $P(\delta)$: απεικόνιση του Σ στο διάστημα $[0,1]$ που πληροί τα εξής αξιώματα:

- i. Μη αρνητικότητα $P(\delta) \geq 0$
- ii. Κανονικοποίηση $P(\Omega) = 1$
- iii. Προσθετικότητα, αν $\delta_1 \delta_2 = \emptyset$, $P(\delta_1 + \delta_2) = P(\delta_1) + P(\delta_2)$

Πιθανοτικός χώρος: η τριάδα (Ω, P, Σ) .

Τυχαία μεταβλητή, $x(\omega)$: απεικόνιση του δειγματικού χώρου στο \mathbb{R} .

Συνάρτηση κατανομής: $F(x)$:= $P\{x \leq x\}$

Πιθανότητα υπέρβασης: $F(x) = P\{x > x\} = 1 - F(x)$

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας: $f(x)$:= $\frac{dF(x)}{dx}$

3.1.2 Στατιστικές Ροπές

Αναμενόμενη τιμή, $E(g(x))$: για μια διακριτή τυχαία (ή στοχαστική) μεταβλητή x που παίρνει τιμές x_1, x_2, \dots, x_j (όπου το j μπορεί να είναι ∞) και $g(x)$ μια αυθαίρετη συνάρτηση του x , έτσι ώστε το $g(x)$ να είναι μια στοχαστική μεταβλητή επίσης, ορίζεται η αναμενόμενη τιμή:

$$E[g(x)] := \sum_{j=1}^J g(x_j)P(x_j) \quad (3.1)$$

Αντίστοιχα για μια συνεχή στοχαστική μεταβλητή x με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f(x)$ η αναμενόμενη τιμή είναι

$$E[g(x)] := \int_{-\infty}^{\infty} g(x)f(x)dx \quad (3.2)$$

Αντικείμενο μελέτης αποτελούν τόσο οι διακριτές μεταβλητές, που αναπαριστούν την πληροφορία των μετρήσεων κύματος και ανέμου αλλά και οι στοχαστικές ή αλλιώς τυχαίες μεταβλητές με την βοήθεια των οποίων θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο κεφάλαιο η στοχαστική προσομοίωση.

Παρακάτω, δίνονται οι ορισμοί των στατιστικών ροπών για στοχαστική μεταβλητή \underline{x} .

Βασικές στατιστικές ροπές διακριτών μεταβλητών:

- ο η μέση τιμή ή η πρώτη ροπή :

$$g(\underline{x})=\underline{x}, \mu:=\mu'_1=E[\underline{x}] \quad (3.3)$$

- οι κεντρικές ροπές τάξης p:

$$g(\underline{x})=(\underline{x} - \mu)^p, \mu^p := E[(\underline{x} - \mu)^p] \quad (3.4)$$

η διασπορά:

$$g(\underline{x})=(\underline{x} - \mu)^2, \gamma:= E[(\underline{x} - \mu)^2]:= \sigma^2 \equiv Var[\underline{x}] \quad (3.5)$$

Η τετραγωνική ρίζα της διασποράς σ , καλείται τυπική απόκλιση ή δεύτερη κεντρική ροπή (standard deviation).

η τρίτη κεντρική ροπή ή ασυμμετρία (skewness):

$$\mu_3 \equiv E[(\underline{x} - \mu)^3] \quad (3.6)$$

$$skew(x) = \frac{E[(\underline{x}-\mu)^3]}{\sigma^3} \quad (3.7)$$

η τέταρτη κεντρική ροπή ή κύρτωση (kurtosis):

$$\mu_4 \equiv E[(\underline{x} - \mu)^4] \quad (3.8)$$

$$kurt(x) = \frac{E[(\underline{x}-\mu)^4]}{\sigma^4} \quad (3.9)$$

Η τυπική απόκλιση εκφράζει την απομάκρυνση των τιμών μιας μεταβλητής από την μέση τιμή. Η ασυμμετρία δηλώνει την λοξότητα μιας κατανομής (η θετική ασυμμετρία γίνεται αντιληπτή με μια κλίση της καμπύλης κατανομής στα αριστερά και αντίστοιχα η αρνητική στα δεξιά). Η κύρτωση δείχνει το πόσο αιχμηρή ή πεπλατυσμένη είναι η συνάρτηση κατανομής (η αιχμηρότητα αντιστοιχεί σε τιμές μεγαλύτερες του 3 και η διαπλάτυνση της καμπύλης σε τιμές μικρότερες του 3). Οι δυο τελευταίες ροπές εξαρτώνται από το πλήθος των παρατηρήσεων και είναι ευαίσθητες στις ακραίες τιμές. Ο υπολογισμός γενικότερα ροπών μεγαλύτερης τάξης, ενέχει αυξημένη αβεβαιότητα.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται ανάλυση των τεσσάρων πρώτων κεντρικών ροπών: της μέσης τιμής, της τυπικής απόκλισης, της ασυμμετρίας και της κύρτωσης.

3.2 Συσχέτιση

Στη συνέχεια θα ορισθεί η έννοια της συνδιασποράς και της συσχέτισης δύο τυχαίων μεταβλητών:

- ο συνδιασπορά των \underline{x} και \underline{y} :

$$\sigma_{xy} := \mu_{11} \equiv Cov[\underline{x}, \underline{y}] \equiv E[(\underline{x} - \mu_x)(\underline{y} - \mu_y)] = E[\underline{xy}] - E[\underline{x}]E[\underline{y}] \quad (3.10)$$

Η συνδιασπορά περιγράφει κατά πόσο οι διακυμάνσεις της μιας μεταβλητής επηρεάζουν τις διακυμάνσεις της άλλης.

- ο συντελεστής συσχέτισης:

$$\rho_{xy} := \frac{\text{Cov}[\underline{x}, \underline{y}]}{\sqrt{\text{Var}[\underline{x}]\text{Var}[\underline{y}]}} \quad (3.11)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης εκφράζει την σχέση της γραμμικής εξάρτησης των μεταβλητών \underline{x} και \underline{y} , παίρνει τιμές από -1 έως 1. Μεταβλητές με συσχέτιση 0 ονομάζονται ασυσχέτιστες. Η τιμή -1 υποδηλώνει ισχυρή αρνητική συσχέτιση και αντίστοιχα η τιμή 1 ισχυρή θετική συσχέτιση. Οι φυσικές μεταβλητές έχουν θετικές συσχετίσεις, οι μεγάλες τιμές τείνουν να ακολουθούνται από μεγάλες τιμές και οι χαμηλές από χαμηλές τιμές αντίστοιχα.

Η περιγραφή φυσικών διεργασιών με ντετερμινιστικές μεθόδους δεν είναι εφικτή καθώς η προσέγγιση αυτή δεν δύναται να περιγράψει επαρκώς την ύπαρξη της τυχαιότητας και μεταβλητότητας στο χρόνο. Αυτό συμβαίνει καθώς η εισαγωγή ακόμα και μικρού ποσοστού σφάλματος στις αρχικές συνθήκες ενός ντετερμινιστικού μοντέλου (πχ. σφάλμα εργαστηριακών μετρήσεων), προκαλεί μεγάλες αποκλίσεις σε μεγάλες κλίμακες, με και χωρίς την ύπαρξη της αβεβαιότητας αυτής.

Σε αντίθεση οι στοχαστικές μέθοδοι κρίνονται κατάλληλες να προσομοιώσουν φυσικά φαινόμενα όπως είναι η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, ο άνεμος, το κύμα κ.α. που διέπονται από τυχαιότητα. Σε επόμενο κεφάλαιο, οι προς μελέτη μεταβλητές θα περιγραφούν μέσω των στοχαστικών ανελίξεων. Η αξιοποίηση στοχαστικών μεθόδων έχει νόημα μόνο στην περίπτωση όπου τα μεγέθη είναι αλληλεξαρτώμενα, σε ένα αρκετά πολύπλοκο σύστημα και η συνάρτηση κατανομής δεν μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά.

Ακόμη, ορίζονται οι έννοιες:

Στοχαστική Ανέλιξη: αποτελείται από στοχαστικές ή τυχαίες μεταβλητές \underline{x}_t που περιγράφουν μια διαδικασία. Η παράμετρος t συχνά παριστάνει χρόνο.

Χρονοσειρά ή δειγματοσυνάρτηση: η υλοποίηση μιας στοχαστικής ανέλιξης σε διακριτό χρόνο ονομάζεται χρονοσειρά.

Αντίστοιχα με τις τυχαίες μεταβλητές ορίζονται και για τις στοχαστικές ανελίξεις η αυτοσυνδιασπορά και η αυτοσυσχέτιση:

- ο αυτοσυνδιασπορά ανέλιξης $C(t;\tau)$, όπου t μια χρονική στιγμή και τ μια μεταγενέστερη χρονική στιγμή:

$$C(t;\tau) := \text{Cov}[\underline{x}(t), \underline{x}(t + \tau)] = E[(\underline{x}(t) - \mu(t))(\underline{x}(t + \tau) - \mu(t + \tau))] \quad (3.12)$$

- ο αυτοσυσχέτιση ανέλιξης $C(t;\tau)$:

$$\rho(t;\tau) := \frac{\text{Cov}[\underline{x}(t), \underline{x}(t+\tau)]}{\sqrt{\text{Var}[\underline{x}(t)]\text{Var}[\underline{x}(t+\tau)]}} = \frac{C(t;\tau)}{\sqrt{C(t;0)C(t+\tau;0)}} \quad (3.13)$$

3.3 Περιοδικότητα

Τα φυσικά φαινόμενα έχουν την τάση να επαναλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η τάση αυτή ονομάζεται περιοδικότητα και εμφανίζεται σε διάφορες κλίμακες: ημερήσια, εποχική ή ετήσια κλίμακα. Στην ετήσια κλίμακα εξαλείφεται κάθε εποχικότητα. Για παράδειγμα η φυσική μεταβλητή του κύματος, έχει αμελητέα ενδοημερήσια περιοδικότητα και σημαντική εποχική. Ο άνεμος αντίστοιχα παρουσιάζει διπλή περιοδικότητα, ενδοημερήσια και εποχική.

3.4 Δυναμική Hurst-Kolmogorov και Κλιμακόγραμμα

Στα φυσικά φαινόμενα παρατηρείται 'αλλαγή' - μεταβλητότητα σε διαφορετικές κλίμακες: μικρές, μεσαίες, μεγάλες. Η μεταβλητότητα αυτή δημιουργεί αυτοσυσχέτιση. Η μεγιστοποίηση αυτής της αβεβαιότητας στα φυσικά συστήματα περιγράφεται από την αρχή μεγιστοποίησης της εντροπίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η αβεβαιότητα σε ένα σύστημα, τόσο πιο σταθερό είναι αυτό.

Ωστόσο, η μεταβλητότητα αυτή των φυσικών διεργασιών δεν φαίνεται να είναι τυχαία, πχ. ένα επεισόδιο καύσωνα (υψηλές θερμοκρασίες) ακολουθείται αντίστοιχα από υψηλές θερμοκρασίες. Η τάση αυτή ομαδοποίησης υψηλών (ή χαμηλών τιμών) σε μεγάλες χρονικές περιόδους υποδεικνύει την ύπαρξη εμμονής μακράς κλίμακας (μακροπρόθεσμη εμμονή). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται δυναμική Hurst-Kolmogorov. Οι διεργασίες που ενέχουν αυτή την δυναμική, διατηρούν αυτοσυσχετίσεις ακόμη και για μεγάλες τιμές υστέρησης (εξάρτηση μεγάλης εμβέλειας) και για μεγάλες τιμές της κλίμακας συνάθροισης.

Η $(0 < H < 1)$ είναι η σταθερά Hurst-Kolmogorov. Φανερώνει τον ρυθμό με τον οποίο οι αυτοσυσχετίσεις μια χρονοσειράς μεταβάλλονται όσο η υστέρηση σε κλίμακα αυξάνεται. Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής Hurst δείχνουν την σχέση των τιμών μιας ανέλιξης σε διαδοχικές χρονικές στιγμές. Για $H < 0.5$ εμφανίζεται φαινόμενο αντίθετο αυτού της εμμονής, όπου οι τιμές έχουν διακυμάνσεις για μεγάλο χρονικό διάστημα στο μέλλον, με μια υψηλή τιμή να ακολουθείται από μια χαμηλή κ.ο.κ. Για τιμή του Hurst $H = 0.5$ οι προς εξέταση τιμές είναι χρονικά ανεξάρτητες, αυξάνονται και μειώνονται τυχαία (συμπεριφορά λευκού θορύβου), ενώ για $H > 0.5$ υπάρχει εμφανώς μια θετική συσχέτιση αυτών.

Συγκεκριμένα, οι μεταβλητές κύματος και ανέμου (ιστορικές και στοχαστικές) θα αναλυθούν ως ανελίξεις με δυναμική Hurst – Kolmogorov ή αλλιώς ανελίξεις απλής ομοιοθεσίας:

Ανέλιξη στην βασική κλίμακα : $x_i, i=1,2,\dots$

Διακριτή κλίμακα: $k=k/D$

$$\text{Συναθροισμένη ανέλιξη: } \underline{X}_i^k = \sum_{l=(i-1)k+1}^{ik} \underline{x}_l \quad (3.14)$$

$$\text{Για } k=1, \underline{X}_i^{(1)} = \underline{x}_i$$

$$\text{Για } k=2, \underline{X}_1^{(2)} = \underline{x}_1 + \underline{x}_2, \underline{X}_2^{(2)} = \underline{x}_3 + \underline{x}_4 \text{ κ.ο.κ.}$$

$$\text{Μέση ανέλιξη σε κλίμακα } \kappa: x_i^{(\kappa)} := \underline{X}_i^{(\kappa)} / \kappa \quad (3.15)$$

$$\text{Αθροιστικό κλιμακόγραμμα: } \Gamma_\kappa = \Gamma(kD) := \text{Var}[X_i^{(\kappa)}] \quad (3.16)$$

$$\text{Κλιμακόγραμμα: } \gamma_\kappa := \gamma(kD) = \text{Var}[\underline{x}_i^{(\kappa)}] \quad (3.17)$$

όπου το κλιμακόγραμμα εκφράζει την διασπορά αυτή μιας ανέλιξης σε κλίμακα κ .

Στη συνέχεια θα γίνει χρήση του απλού κλιμακογράμματος (δίνεται από την μέση ανέλιξη) και όχι του αθροιστικού, καθώς τόσο για τον άνεμο όσο και το κύμα, οι τιμές τους δεν αθροίζονται σε κλίμακα.

Έτσι το κλιμακόγραμμα είναι μια συνάρτηση δύναμης της κλίμακας συνάθροισης κ .

$$\gamma_\kappa := \text{var}[\underline{x}_i^{(\kappa)}] = \frac{\gamma_1}{\kappa^{(2-2H)}}, \quad \Gamma_\kappa := \text{Var}[\underline{X}_i^{(\kappa)}] = \kappa^{2H} \gamma_1 \quad (3.18)$$

Σε λογαριθμικούς άξονες, η κλίση του κλιμακογράμματος ισούνται με το διπλάσιο της τιμής H , αφαιρώντας το 1.

$$\text{κλίση} = 2H - 1 \quad (3.19)$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα σημαντικό εργαλείο περιγραφής της συμπεριφοράς Hurst-Kolmogorov είναι και η αυτοσυσχέτιση. Είναι:

Αυτοσυσχέτιση της ανεξάρτητη της κλίμακας συνάθροισης κ :

$$r_n^{(\kappa)} = r_n = \frac{1}{2} [|n+1|^{2H} + |n-1|^{2H}] - |n|^{2H} \quad (3.20)$$

$$\text{ή προσεγγιστικά} \quad r_n^{(\kappa)} = r_j \sim H(2H-1)n^{(2H-2)} \quad (3.21)$$

Η δυναμική Hurst-Kolmogorov περιγράφεται και μέσα από το φάσμα ισχύος (συνάρτηση δύναμης της συχνότητας):

$$\frac{s_d^{(\kappa)}(\omega)}{\gamma_\kappa} \sim 4(1-H)(2\omega)^{1-2H} \quad (3.22)$$

Η αναπαράσταση της συσχέτισης μέσω του κλιμακογράμματος χαρακτηρίζεται από τα μικρότερα σφάλματα εκτίμησης (σε σχέση με την αυτοσυσχέτιση-αυτοσυσχετόγραμμα ή το φάσμα ισχύος) και για τον λόγο αυτό θα γίνει εκτενής χρήση του παρακάτω.

Η πιο συνήθης και απλή μορφή του κλιμακογράμματος είναι μιας διάστασης (μονοδιάστατο 1-D κλιμακόγραμμα). Με την ίδια λογική, από το μονοδιάστατο κλιμακόγραμμα εξάγεται κλιμακόγραμμα L- διαστάσεων.

Συγκεκριμένα το δισδιάστατο κλιμακόγραμμα (2-D Climacogram) αναπαριστά την χωρική διασπορά συναρτήσεως της κλίμακας. Το πεδίο τιμών της ανέλιξης έχει διαστάσεις ($k \times k$) και οι τιμές ομαδοποιούνται (υπολογισμός της μέσης τιμής αυτών) ανά κ τιμές, όπου κ η κλίμακα. Για τις παραπάνω μέσες τιμές υπολογίζεται η διασπορά και παρουσιάζεται στο χωρικό κλιμακόγραμμα συναρτήσεως της κλίμακας κ .

Το δισδιάστατο κλιμακόγραμμα ορίζεται και ως:

$$\hat{\gamma}(k) = \frac{1}{n^2/k^2} \sum_{i=1}^{n/k} \sum_{j=1}^{n/k} (x_{i,j}^{(k)} - \bar{x})^2 \quad (3.23)$$

Όπου το $\hat{\gamma}$ δηλώνει εκτίμηση, k είναι η αδιαστατοποιημένη χωρική κλίμακα, $x_{i,j}^{(k)}$ είναι ο τοπικός μέσος όρος της ανέλιξης σε κλίμακα k και για κελί (i,j) και το \bar{x} είναι ο μέσος όρος.

3.5 Στοχαστική σύνθεση

Η καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της μακροπρόθεσμης μνήμης των φυσικών φαινομένων μέσω της δυναμικής Hurst-Kolmogorov προσφέρει την δυνατότητα ορθότερης προσομοίωσης τους με στόχο την παραγωγή δεδομένων περισσότερων ετών από τα ήδη διαθέσιμα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται στοχαστική σύνθεση και το προϊόν αυτής είναι στοχαστικές ανελίξεις.

Η επιλογή συγκεκριμένου στοχαστικού μοντέλου και η εκτίμηση των παραμέτρων του βασίζεται στην πρωτογενή πληροφορία που δίνουν οι ιστορικές μετρήσεις (διαθέσιμο δείγμα). Η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών (με μήκος συνήθως πολλαπλάσιο των ιστορικών) δεν αποτελεί ουσιαστική πληροφορία, ούτε υποκαθιστά την πρωτογενή.

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν διαθέσιμα αρκετά μοντέλα στοχαστικής ανάλυσης, όπως το μοντέλο λευκού θορύβου, το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1 AR(1) ή μοντέλο Markov, το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1-κινούμενου μέσου τάξης 1 ARMA(1,1) και τα μοντέλα απλής ομοιοθεσίας.

Το μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης τάξης 1-AR(1) διατηρεί την αυτοσυσχέτιση με υστέρηση 1, όσο μεγαλώνει η κλίμακα η αυτοσυσχέτιση του μοντέλου φθίνει εκθετικά. Το μοντέλο ARMA(1,1) μπορεί να διατηρήσει, εκτός από την μέση τιμή, την διασπορά c_0 και τις αυτοσυνδιασπορές c_1 και c_2 . Τις ίδιες παραμέτρους με το ARMA(1,1) μπορεί να διατηρήσει και το AR(2). Ωστόσο σε αντίθεση με το ARMA(1,1) δεν μπορεί να διατηρήσει ασυμμετρίες και ροπές ανώτερης τάξης.

Γενικά, όσες περισσότερες ροπές διατηρεί ένα στοχαστικό μοντέλο τόσο καλύτερα προσομοιώνει μια κατανομή. Έτσι κάθε γραμμικό στοχαστικό μοντέλο μπορεί να εκφραστεί ως μοντέλο κινούμενου (σταθμισμένου) μέσου άπειρων όρων λευκού θορύβου. Υπάρχει το σχήμα απλής ομοιοθεσίας του ασύμμετρου (AMA-asymmetric moving average) και του συμμετρικού μέσου (SMA-symmetric moving average).

Το τελευταίο είναι αρκετά απλούστερο. Ακόμη, έχει το πλεονέκτημα έναντι των υπολοίπων μοντέλων να μπορεί να προσομοιώσει δομές μακροπρόθεσμης εξάρτησης χρησιμοποιώντας λίγες μεταβλητές σε αντίθεση π.χ. με τα μοντέλα AR, ARMA, ενώ μπορεί να προσαρμοστεί σε γκαουσιανές και μη κατανομές.

Στην παρούσα εργασία η προσομοίωση των φυσικών μεταβλητών θα γίνει με μια επέκταση του μοντέλου SMA (symmetric moving average), λόγω των συγκριτικών πλεονεκτημάτων του. Συγκεκριμένα η μεταβλητή του ανέμου, όπως και πολλές φυσικές μεταβλητές, παρουσιάζει πεπλεγμένη σχέση συσχέτισης και συνεπώς η ανάγκη για απλούστερα μοντέλα προσομοίωσης

γίνεται επιτακτική. Με την βοήθεια του μοντέλου SMA θα γίνει ο υπολογισμός της περιθώριας πιθανοτικής κατανομής, διατηρώντας και τις 4 πρώτες ροπές της μεταβλητής, δηλαδή την μέση τιμή, την τυπική απόκλιση, την ασυμμετρία και την κύρτωση. Για την προσομοίωση μεταβλητής \underline{x}_i θα γίνει χρήση των ροπών αυτών και της μέσης διασποράς της μεταβλητής σε κλίμακα $\gamma(k)$ ή αλλιώς το κλιμακόγραμμα.

Το κλιμακόγραμμα είναι άμεσα συνδεδεμένο με την έννοια της αυτοσυνδιασποράς, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και η αυτοσυνδιασποράς αντίστοιχά με το φάσμα ισχύος της μεταβλητής. Ωστόσο το κλιμακόγραμμα, συγκριτικά με τις υπόλοιπες πηγές πληροφόρησης οδηγεί σε πιο ακριβείς εκτιμήσεις και το μοντέλο SMA βασίζεται σε αυτό.

Στην μέθοδο GHK (Generalized Hurst Kolmogorov)_SMA η ανέλιξη αναπαρίσταται από το άθροισμα των συντελεστών a_j και των όρων v_i λευκού θορύβου:

$$\underline{x}_i = \sum_{j=-l}^l a_{|j|} v_{i+j} \quad (3.24)$$

Όπου ενώ το l θεωρητικά απειρίζεται, παίρνει πεπερασμένο αριθμό τιμών ώστε να διατηρείται η δομή εξάρτησης μέχρι και για υστέρηση l . Ακόμη γίνεται η παραδοχή ότι $E[\underline{x}] = E[\underline{v}] = 0$ και $E[\underline{v}^2] = \text{Var}[\underline{v}] = 1$. Το μοντέλο προσομοίωσης SMA εκ κατασκευής του έχει τυπική απόκλιση μηδέν ($\sigma=0$).

Οι συντελεστές a_j σχετίζονται με τα c_n ως εξής:

$$\sum_{j=-j}^{j-n} a_{|j|} a_{|j+n|} = c_n \quad \text{όπου } n=0,1,2,\dots \quad (3.25)$$

Έτσι για την διαδικασία HK και το κλιμακόγραμμα σε συνεχή χρόνο:

$$\gamma(k) = \frac{\gamma(D)}{k^{2-2H}}$$

όπου $k=k/D$ η διακριτή κλίμακα, $\gamma(D)$ η διασπορά σε κλίμακα D και H ο συντελεστής Hurst.

Για τους συντελεστές a_j δεν προκύπτουν αναλυτικά από κάποια σχέση αλλά ορίζονται μέσα από τον μετασχηματισμό Fourier του ρητού φάσματος ισχύος των συντελεστών που συνδέεται άμεσα με το φάσμα ισχύος της ανέλιξης:

$$s_d^a(\omega) = \sqrt{2s_d(\omega)} \quad (3.26)$$

Όπου $s_d^a(\omega)$ και $s_d(\omega)$ είναι τα φάσματα ισχύος των συντελεστών SMA και της ανέλιξης αντίστοιχα, με $\omega=D/k$ η αδιαστατοποιημένη συχνότητα.

4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η επίδραση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στους επιφανειακούς κυματισμούς, όπως αναγράφεται και στον τίτλο της. Συνεπώς αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η ευρύτερη περιοχή ενός εν λειτουργία θαλάσσιου αιολικού πάρκου. Πρωτοπόρα στην νέα αυτή μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας υπήρξε μεταξύ άλλων ευρωπαϊκών χωρών η Μεγάλη Βρετανία. Θαλάσσια αιολικά πάρκα τέθηκαν υπό κατασκευή ήδη από το 2010 και αρκετά από αυτά σε λειτουργία πριν το 2015, όταν η τεχνογνωσία για την κατασκευή υπεράκτιων αιολικών πάρκων δεν είχε ωριμάσει σημαντικά. Σήμερα η Μεγάλη Βρετανία κατέχει ένα σημαντικό ποσοστό, της τάξης του 23% της παγκόσμιας υπεράκτιας εγκατεστημένης ισχύος.

4.1 Χαρακτηριστικά έργου

Πιο αναλυτικά, επιλέχθηκε να μελετηθεί το **υπεράκτιο αιολικό πάρκο London Array σταθερής θεμελίωσης**, ανατολικά του Λονδίνου και σε απόσταση 22km από την βόρεια ακτή του Kent (στην εκβολή του Τάμεση ποταμού). Οι ακριβείς συντεταγμένες του πάρκου είναι γεωγραφικό πλάτος (latitude) =51.626 και γεωγραφικό μήκος (longitude) =1.496. Μέτοχοι του έργου είναι γνωστές εταιρείες με δραστηριότητα στον κλάδο της ενέργειας παγκοσμίως, η RWE, η Caisse de dépôt et placement du Québec (CDPQ), η Orsted και η Masdar.



4. 1 London Array (Πηγή: www.londonarray.com)

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του πάρκου είναι 630 MW και αποτελείται από 175 ανεμογεννήτριες, ισχύος 3.6MW έκαστη και ύψους 147m. Απέχουν μεταξύ τους αποστάσεις που κυμαίνονται από 650 έως και 1200m καταλαμβάνοντας μια έκταση 122 km².



4. 2 Χωροθέτηση του αιολικού πάρκου (Πηγή: www.londonarray.com)

Πρόκειται για ένα υπεράκτιο πάρκο, σταθερής θεμελίωσης, με 177 πυλώνες, 2 πυλώνες για τους υπεράκτιους σταθμούς μεταφοράς ενέργειας και 175 τουρμπίνες του πάρκου. Αναλυτικότερα, είναι πυλώνες κυκλικής διατομής, από χάλυβα, πακτωμένοι στον πυθμένα της θάλασσας. Κάθε ένας έχει ύψος 68m, πλάτος διαμέτρου 5.7m και ζυγίζει σε βάρος 680 τόνους.

Το βάθος στην περιοχή μελέτης κυμαίνεται από παλιρροιακά βάρη έως και 25m. Το πάρκο έχει κατασκευαστεί εκτός των ορίων που ορίζουν οι γραμμές πλεύσης της περιοχής και σε κοντινή απόσταση από χερσαίο σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας. Συνολικά, οι σταθμοί με τους οποίους είναι διασυνδεδεμένο το έργο είναι τρεις: δυο στην θάλασσα και ένας στην ξηρά.

Ήδη από το 2001, μια σειρά περιβαλλοντικών μελετών στις ακτές του ποταμού Τάμεση, απέδειξε ότι η περιοχή είναι κατάλληλη για την κατασκευή υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Ακολούθησε χρονολογικά η έγκριση της περιοχής ως κατάλληλης για το έργο από το Στέμμα, η διασύνδεσή του μέσω καλωδίου με την ακτή, η κατασκευαστική άδεια του έργου και η έναρξη των εργασιών στην στεριά. Αργότερα το 2012 ολοκληρώθηκαν οι εργασίες εγκατάστασης και διασύνδεσης των ανεμογεννητριών, με το έργο να τίθεται σε λειτουργία το 2013 (Commissioning Day 04/2013), όντας από τα πρώτα υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Ευρώπη με σημαντική εγκατεστημένη ισχύ.

4.2 Περιγραφή χαρακτηριστικών περιοχής

Στην περιοχή οι κυρίως άνεμοι πνέουν δυτικά και νοτιοδυτικά, συνεπώς ο άνεμος κατευθύνεται προς την πόλη του Λονδίνου και άρα χρήζει ανάλυσης η επίδραση της κατασκευής ενός υπεράκτιου σταθερής θεμελίωσης πάρκου στο αιολικό και κυματικό δυναμικό της περιοχής (παράκτια προστασία, κατασκευή χερσαίων αιολικών πάρκων, ναυσιπλοΐα κλπ.).

4.3 Κριτήρια επιλογής

Τα κριτήρια για την επιλογή του συγκεκριμένου υπεράκτιου αιολικού πάρκου αποτέλεσαν:

- (α) το ικανό μέγεθός του τόσο σε έκταση (122km²) και σε εγκατεστημένη ισχύ (630MW) αλλά
- (β) και η ύπαρξη δεδομένων κατ' ελάχιστο 5 ετών για την απαιτούμενη στατιστική ανάλυση (το όριο των 5 ετών προκύπτει ως παραδοχή καθώς δεν είναι πολλά σε αριθμό τα υπεράκτια πάρκα σε λειτουργία περισσότερο από 10 χρόνια).

4.4 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα από την υπηρεσία Copernicus Marine Service, η οποία παρέχει πληροφορίες για θαλάσσιους και περιβαλλοντικούς δείκτες. Οι μεταβλητές ενδιαφέροντος για την παρούσα εργασία είναι οι επιφανειακοί κυματισμοί, συγκεκριμένα το χαρακτηριστικό ύψος κύματος (Hs) και περίοδος κύματος (Tp), και η ταχύτητα του ανέμου (V).

Dataset: Atlantic-European north shelf- wave physics reanalysis

Επιλέχθηκε μια περιοχή σχεδόν τετραγωνικού εμβαδού, 380km X 425km, στο κέντρο της οποίας βρίσκεται το αιολικό πάρκο και έχει ακτίνα τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή του υπεράκτιου πάρκου, αν ορίσουμε ένα σημειακό κέντρο. Η ανάλυση του σετ δεδομένων είναι 0.017° x 0.017° που αντιστοιχεί σε κελιά 1.9km X 1.9km. Συνεπώς, τα προς επεξεργασία κελιά περικλείονται σε μια περιοχή εμβαδού 223 pixels X 199 pixels. Το κέντρο του αιολικού πάρκου βρίσκεται προσεγγιστικά, με την παραδοχή της συμμετρικής χωροθέτησης των ανεμογεννητριών, στο κελί με συντεταγμένες (128,97). Οι διαθέσιμες μετρήσεις είναι τριώρες, στιγμιαία καταγεγραμμένες και οι μεταβλητές προς χρήση είναι: (α) Spectral significant wave height (Hm0) (VHMO) (β) Wave period at spectral peak / peak period (Tp) (VTPK).

Η λήψη των δεδομένων έγινε με συντεταγμένες:

53 B
-1.5 Δ 4.5A
50N

και για 18 έτη συνολικά, χωρισμένο σε δύο χρονικές περιόδους ανάλυσης: (α) 2004-2012 περίοδος 9 ετών πριν την λειτουργία του υπεράκτιου πάρκου και (β) 2013-2021 περίοδος 9 ετών του εν λειτουργία υπεράκτιου πάρκου.

Dataset: Global Ocean Wind L4 Reprocessed 6 hourly Observations

Επιλέχθηκε η ίδια περιοχή συντεταγμένων:

53 B
-1.5 Δ 4.5A
50N

Ωστόσο λόγω διαφορετικής ανάλυσης δεδομένων, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ κάθε κελί, η αντιστοιχία σε χιλιόμετρα είναι 28km X 28km. Τα προς επεξεργασία κελιά είναι λιγότερα σε αριθμό, από ότι της μεταβλητής του κύματος, 25 X 13. Συνεπώς τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, θα είναι πιο αδρά. Για την έκταση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, αντιστοιχούν 4 κελιά δεδομένων και το κέντρο του συμβατικά ορίζεται στο κελί Κ' (13,7). Οι διαθέσιμες μετρήσεις είναι ανά 6 ώρες και οι χρονικές περίοδοι ανάλυσης θα είναι: (α) 2006-2012 και (β) 2013-2019. Η προς μελέτη μεταβλητή είναι αυτή της ταχύτητας ανέμου, wind speed, ενώ πληροφορίες δεν υπάρχουν για την περίοδο ανέμου.

4.5 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Στο σημείο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να δοθεί μια σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση που αφορά σε προγενέστερες έρευνες, σχετικές με την επίδραση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων τόσο στο κυματικό και αιολικό πεδίο.

Σε αντίθεση με τον χερσαία αιολικά πάρκα, η τεχνογνωσία σχεδίασης και υλοποίησης των υπεράκτιων, εμπλουτίζεται διαρκώς με πλήθος πειραμάτων κλίμακας, προσομοιώσεων και δεδομένων. Παρ' όλα αυτά, υστερεί συγκριτικά. Η μελέτη του θαλάσσιου χώρου, όπου δεν υπάρχουν φυσικά εμπόδια, αν και μοιάζει λιγότερη σύνθετη, ενέχει σημαντικές προκλήσεις. Το μήκος τραχύτητας της θαλάσσιας επιφάνειας δεν είναι στατικό, αλλά μεταβάλλεται σύμφωνα με την 'κατάσταση θαλάσσης'.

Η τελευταία είναι μια επαλληλία διαφόρων κυματισμών: (α) τοπικοί κυματισμοί που παράγονται από την ροή του ανέμου και (β) κυματισμοί που παράχθηκαν σε μακρινή απόσταση και σε προηγούμενο χρόνο.

Στην περίπτωση υπεράκτιου αιολικού πάρκου, σύμφωνα με σχετική βιβλιογραφία, η μεταβολή των χαρακτηριστικών του κύματος οφείλεται: στο βάθος, στην περίοδο κύματος, στην χωροθέτηση των ανεμογεννητριών και στις μεταξύ τους αποστάσεις. Υπάρχουν 3 διεργασίες που εκτελούνται κατά την διέλευση του κύματος μέσα από ένα θαλάσσιο αιολικό πάρκο: αδράνεια των κυματισμών και κατά συνέπεια διασπορά ενέργειας, ανάκλαση αυτών στην επιφάνεια των ανεμογεννητριών, ελάττωση του αιολικού δυναμικού λόγω παραγωγής ενέργειας (Erik Damgaard et al., 2013). Με την χρήση αριθμητικών φασματικών μοντέλων,

καθίσταται δυνατή η πληρέστερη περιγραφή της σχέσης ανέμου-κύματος κατά την διέλευσή του από ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής, υποδεικνύουν την επίδραση της αντίστασης (drag resistance) ως αμελητέα, ενώ αντίθετα εκείνη της ανάκλασης των κυματισμών στον πυλώνα των ανεμογεννητριών σημαντική (επηρεάζει το μήκος κύματος ανάντι του έργου-για πάρκα έκτασης της τάξης των 25km² η διαφορά κυμαίνεται μεταξύ 2 και 3%). Ακόμη, για ταχύτητες ανέμου σχετικά χαμηλές, το ένα τρίτο της απομείωσης του ύψους κύματος οφείλεται και στην ανάκλαση και το υπόλοιπο στην αποδυνάμωση του αιολικού δυναμικού. Όσο αυξάνεται είτε η ταχύτητα είτε η απόσταση από το πάρκο η μείωση οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην πτώση της ταχύτητας του ανέμου. Συνολικά, κατάντη του αιολικού πάρκου η απομείωση του ύψους κύματος είναι της τάξης του 5%, ενώ σε απόσταση τρεις φορές μεγαλύτερη από την ακτίνα του της τάξης του 1% (Erik Damgaard et al., 2013). Καθώς οι δυνατότητες συνδυασμένης παραγωγής αιολικής και ωκεάνιας ενέργειας διερευνώνται (Pérez-Collazo et al., 2015), οι απώλειες κυματικής ενέργειας σύμφωνα με τα παραπάνω θα είναι της τάξης του 10%. Τέλος η επίδραση της κατασκευής στην περίοδο κύματος κρίνεται αμελητέα (Christensen et al., 2013), ενώ για μεγαλύτερα αναπτύγματα πελάγους αναμένεται αύξηση κατάντη της τάξης του 1%. Πλέον η τάση στον σχεδιασμό θαλάσσιων αιολικών πάρκων είναι η τοποθέτηση λιγότερων ανεμογεννητριών μεγαλύτερης ισχύος και σε ικανότερες αποστάσεις, με στόχο την απομείωση του φαινομένου της ανάκλασης.

Στη συνέχεια, οι Yang et al.(2014) εκτελώντας προσομοιώσεις με μοντέλα συζευγμένα και μη σε χωρικό επίπεδο αποδεικνύουν ότι η παραγόμενη ενέργεια αυξάνεται κατά 13.6% στην δεύτερη περίπτωση (coupled models) για άνεμο κινούμενο στην ίδια κατεύθυνση με την διάδοση των κυματισμών. Αργότερα, από την προσομοίωση μιας ανεμογεννήτριας εντός αιολικού και κυματικού πεδίου προκύπτει ότι για ροή ανέμου παράλληλα με την διάδοση των κυμάτων swell επιτυγχάνει μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας και ο απόηχος του κύματος διαδίδεται για μεγαλύτερη απόσταση (Al Sam et al., 2015).

Η κατάλληλη επιλογή μοντέλου κρίνεται σημαντική για την πληρέστερη περιγραφή του φαινομένου. Σύμφωνα με Wu et al. (2020) συζευγμένα μοντέλα ωκεανού-ατμόσφαιρας (atmosphere-ocean model) εισάγουν μεγαλύτερη επιρροή στην καμπύλη ενέργειας πυκνότητας (Wind Power Density ή WPD) από ότι ένα συζευγμένο μοντέλο είτε κυματισμού-ατμόσφαιρας (atmosphere-wave model), είτε κυματισμού-ωκεανού (wave-ocean model). Τελικώς συμπεραίνεται ότι όχι μόνο το κύμα επηρεάζει την παραγωγή ενέργειας εντός υπεράκτιου αιολικού πάρκου αλλά και ο άνεμος εξίσου δύναται να επηρεάσει το κυματικό πεδίο (σχέση συσχέτισης).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η περιοχή του German Bight (ΒΔ της Γερμανίας και Δ της Δανίας) στην Βόρεια Θάλασσα όπου ολοένα και περισσότερα MW εγκατεστημένης ενέργειας προστίθενται. Η περιοχή αποτελεί συχνά αντικείμενο μελέτης (Sara Porchetta et al.,2021) με την εφαρμογή μοντέλων μη-συζευγμένων και συζευγμένων ατμόσφαιρας-κύματος. Το συζευγμένο μοντέλο (coupled model) προβλέπει μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας όταν το κύμα και ο άνεμος κινούνται στην ίδια κατεύθυνση ενώ μικρότερη για την περίπτωση που κινούνται αντίθετα από

ότι το μη-συζευγμένο (stand alone model). Η διαφορά των αποτελεσμάτων σε επίπεδο τιμών μπορεί να φτάσει το 20% ενώ η διαφορά στην παραγόμενη ενέργεια το 9%. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στον απόηχο του κύματος (wake effect), ο οποίος είναι μεγαλύτερος αν το κύμα και ο άνεμος ταξιδεύουν προς την ίδια κατεύθυνση, επιβεβαιώνοντας τους Yang et al., (2014). Αυτό συμβαίνει καθώς συντελείται μικρότερη ανάμιξη και το ανάποδο. Τα περισσότερα μοντέλα μεσαίας κλίμακας δεν λαμβάνουν υπόψη τους την αλληλεπίδραση των επιφανειακών κυματισμών στην παραμετροποίηση ενός αιολικού πάρκου. Το συζευγμένο μοντέλο που αναφέρεται νωρίτερα εισάγει ρεαλιστικά μετεωρολογικά δεδομένα. Τελικά, οι μεγαλύτερες διαφορές στην παραγωγή ενέργειας είναι στο κέντρο και στις άκρες του αιολικού πάρκου (Sara Porchetta et al., 2021). Η πρώτη σειρά ανεμογεννητριών λογικά παράγει περισσότερη ενέργεια και οι δεύτερες σειρές λιγότερη λόγω του απόηχου για κύμα και άνεμο κινούμενα στην ίδια κατεύθυνση και το ανάποδο.

Παρότι, τα σύγχρονα μοντέλα προσομοίωσης δύνανται να περιγράψουν αποτελεσματικότερα την σχέση κύματος-ωκεανού-άνεμου-ατμόσφαιρας, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που έχουν καθοριστικό ρόλο. Για παράδειγμα τυρβώδεις αλληλεπιδράσεις απόηχων κυμάτων που κινούνται παράλληλα δύνανται να μειώσουν κι άλλο την παραγωγή ενέργειας (Ondrej fercak et al., 2022).

Όσotόσο στην περιοχή του German Bight είναι εγκατεστημένα περισσότερα από ένα αιολικά πάρκα. Σύμφωνα με Jana Fischereit et al., (May 2022) ένα υπεράκτιο πάρκο μπορεί να μειώσει την παραγόμενη ενέργεια πλησίον πάρκου έως και 10%. Αναλυτικότερα, ο απόηχος κύματος γειτονικών πάρκων επιδρά μακροπρόθεσμα στο κυματικό και αιολικό πεδίο της περιοχής, οι ενεργειακοί πόροι των μεμονωμένων πάρκων μειώνονται και τα πάρκα συμπεριφέρονται σαν να είναι μέλος σε ένα σύμπλεγμα αιολικών πάρκων. Ο Barfuss, (2021) βρήκε μέσω μετρήσεων ότι συντελείται αναδιάταξη της κυματικής ενέργειας από υψηλότερες σε χαμηλότερες τιμές του απόηχου κύματος τουλάχιστον 55km κατάντη.

Κατά Jana Fischereit et al.(May 2022), το χαρακτηριστικό ύψος κύματος στην περιοχή του German Bight όπου βρίσκεται το σύμπλεγμα των αιολικών πάρκων έχει μείωση της τάξης του 3.5%.

Λόγω της μείωσης αυτή η παράκτια διάβρωση αναμένεται λιγότερο έντονη, καθώς και το προφίλ της στερεομεταφοράς είναι διαφορετικό. Μπορεί στην συγκεκριμένη περίπτωση οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις να είναι μικρές, ωστόσο είναι άγνωστο το μέγεθος τους σε υπεράκτια πάρκα μεγαλύτερης έκτασης ή για πάρκα με μεγαλύτερα αναπτύγματα πελάγους κατάντη (BSH, 2021).

Εν κατακλείδι, οι διαφορές μεταξύ συζευγμένων και μη μοντέλων λόγω αλληλεπίδρασης ανέμου και κύματος μπορεί να είναι της τάξης του 20% (Jana Fischereit et al., May 2022) σε συμφωνία με προηγούμενη βιβλιογραφία (Porchetta et al., 2021). Άλλες παράμετροι που πρέπει να συμπεριληφθούν μελλοντικά στην προσομοίωση του φαινομένου είναι η ατμοσφαιρική σταθερότητα, η παλαιότητα των θαλασσών (swell wave age) κλπ.

Οι Christensen et al. (2013) συμπεραίνουν ότι για μικρότερο ανάπτυγμα πελάγους και για ταχύτητα ανέμου (10m/s) η απομείωση είναι μέγιστη καθώς το πεδίο κύματος και ανέμου δεν βρίσκεται ακόμα σε ισορροπία.

Για την ανάπτυξη όλων των παραπάνω μοντέλων απαραίτητη είναι η ύπαρξη δεδομένων πεδίου που να λειτουργούν ως βάση δεδομένων και ελέγχου σφάλματος. Το φαινόμενο του απόηχου που διαδίδεται κατάντη αιολικού πάρκου επηρεάζει την ποιότητα των μετρήσεων. Συνεπώς, πιθανή είναι στο μέλλον και η χρήση δεδομένων στοχαστικής προσομοίωσης για την σχεδίαση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

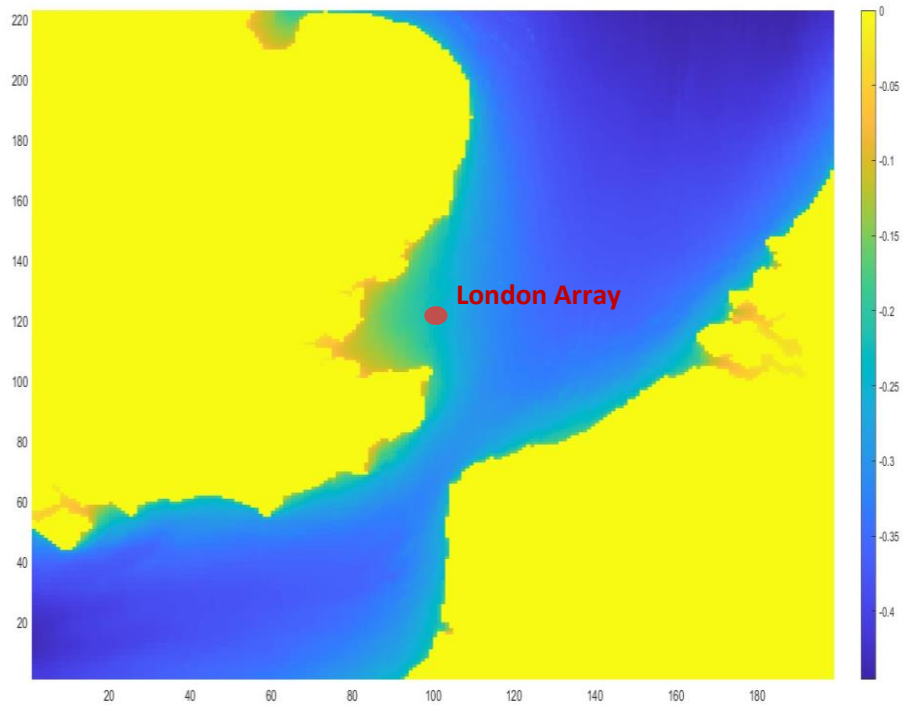
4.6 Αποτελέσματα παρούσας ανάλυσης

Στην παρούσα εργασία, για σκοπούς απλούστευσης, υπετέθη ότι το υπεράκτιο αιολικό πάρκο έχει ένα σημειακό κέντρο, που αντιστοιχεί βάσει των συντεταγμένων του στο κελί K(97,128). Οι χωρικοί χάρτες ύψους κύματος, περιόδου αναλύθηκαν ως προς τα βασικά στατιστικά μεγέθη τους: μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία και κύρτωση για κάθε κελί στην κλίμακα του χρόνου. Συγκεκριμένα, η ενδεχόμενη επίδραση στο κυματικό πεδίο της υπό εξέταση θαλάσσιας περιοχής, προκύπτει μέσα από την μεταβολή των χαρακτηριστικών αυτών στις δυο χρονικές περιόδους: (α) πριν και (β) μετά την λειτουργία του αιολικού πάρκου.

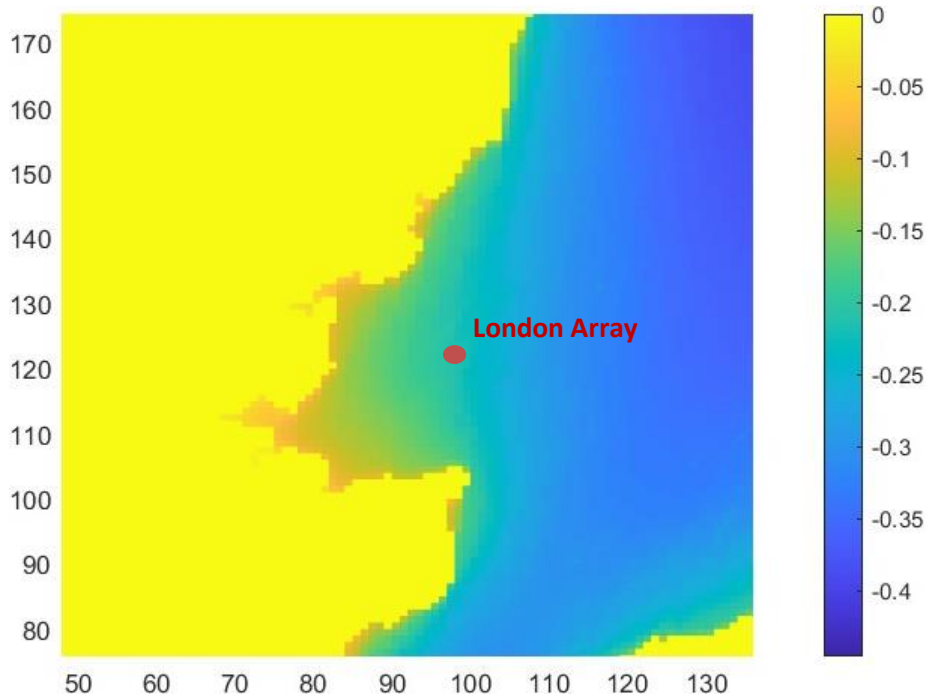
4.6.1 Χάρτες διαφορών βασικών στατιστικών μεγεθών

Παρακάτω υπάρχουν οι χάρτες των βασικών στατιστικών μεγεθών πριν και μετά την εγκατάσταση του υπεράκτιου πάρκου London Array στην περιοχή του ευρύτερου κόλπου. Οι τιμές στους άξονες είναι τα κελιά ανάλυσης: στον x άξονα οι τιμές κυμαίνονται στο εύρος [1,199] και στον y άξονα στο εύρος [1,223]. Ακόμη, οι τιμές στην μπάρα διαβαθμισμένου χρώματος, αντιστοιχούν σε τιμές του ύψους κύματος. Για παράδειγμα, έστω τιμής διαφοράς στο ύψος κύματος 0.5 αυτή έχει μονάδες ύψους κύματος, δηλαδή μέτρα (m). Αντίστοιχα ισχύει για τις μεγαλύτερες ροπές και για τις δυο κυματικές μεταβλητές.

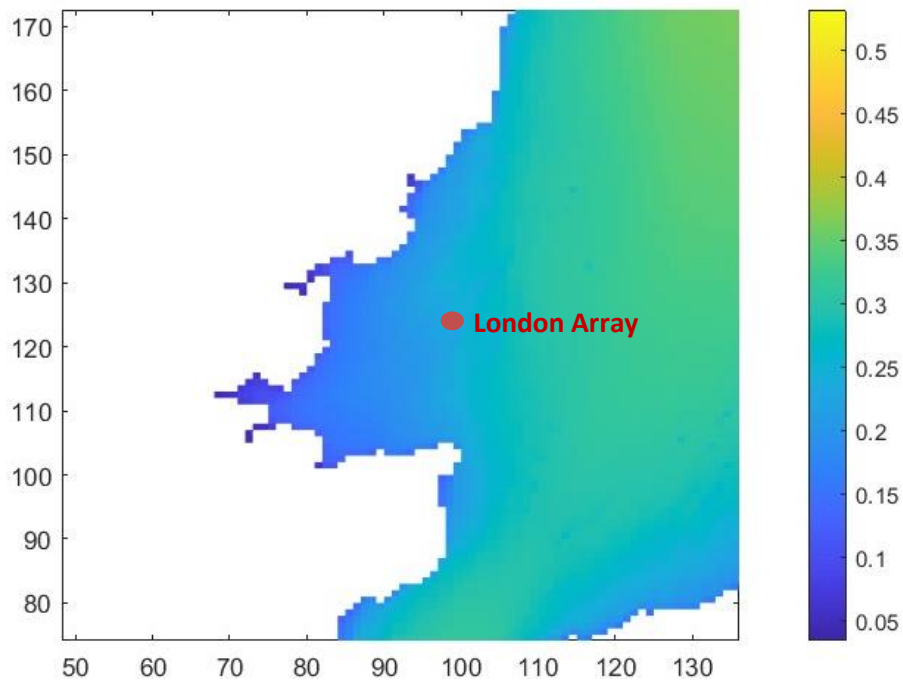
Ύψος κύματος Hs:



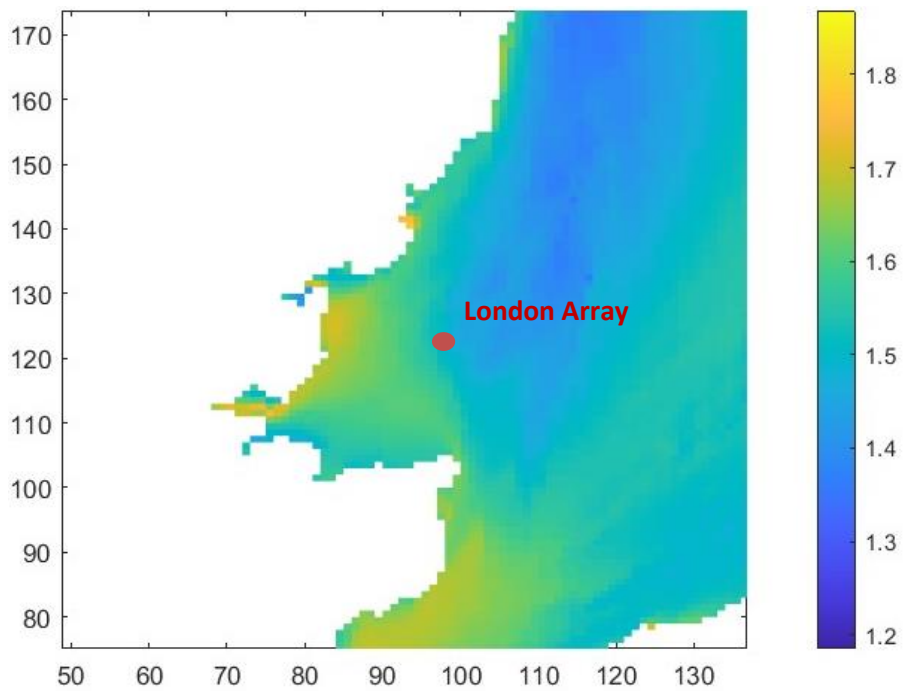
4. 3 Η διαφορά της μέσης τιμής του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην ευρύτερη περιοχή μελέτης



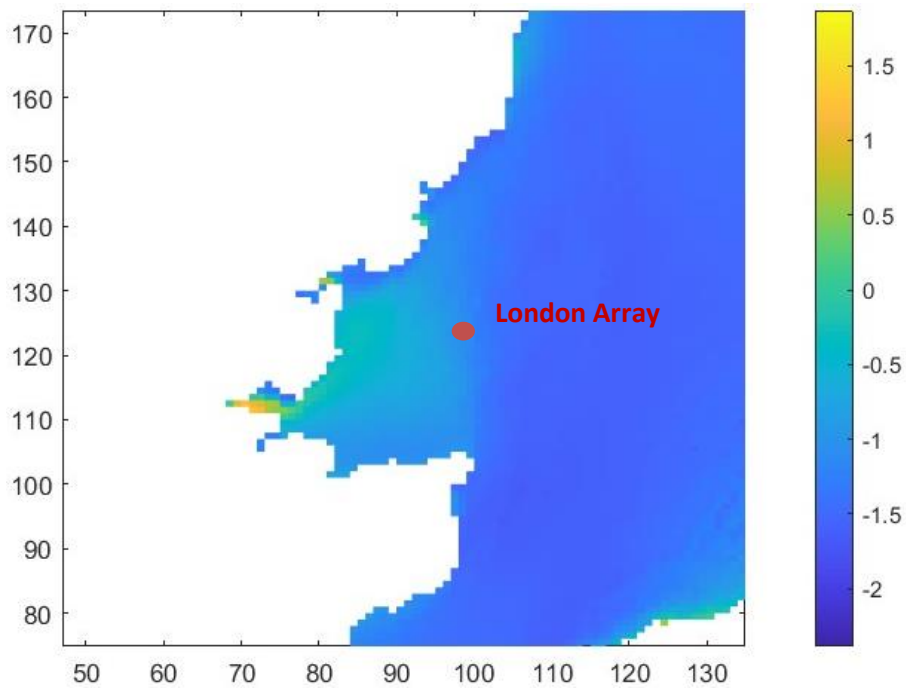
4. 4 Η διαφορά της μέσης τιμής του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου



4. 5 Η διαφορά της τυπικής απόκλισης του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου

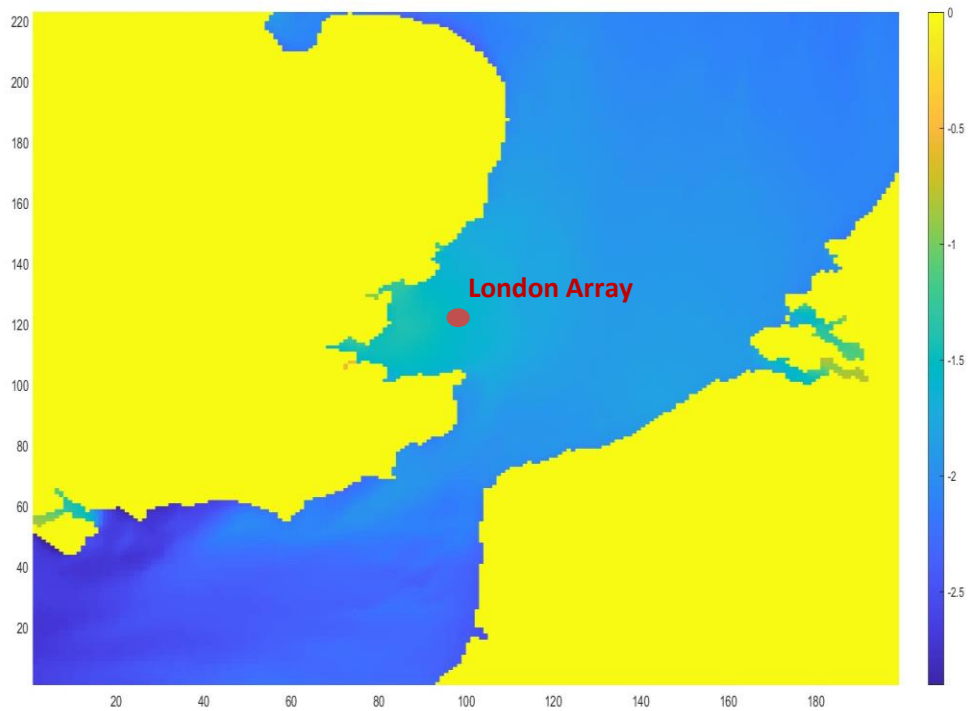


4. 6 Η διαφορά της ασυμμετρίας του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου

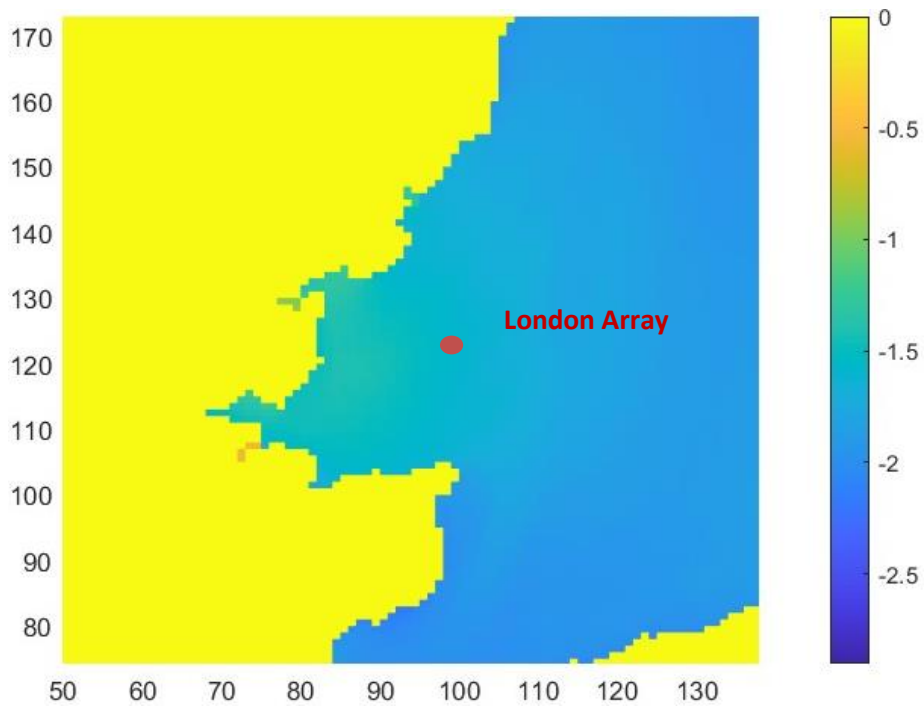


4. 7 Η διαφορά της κύρτωσης του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου

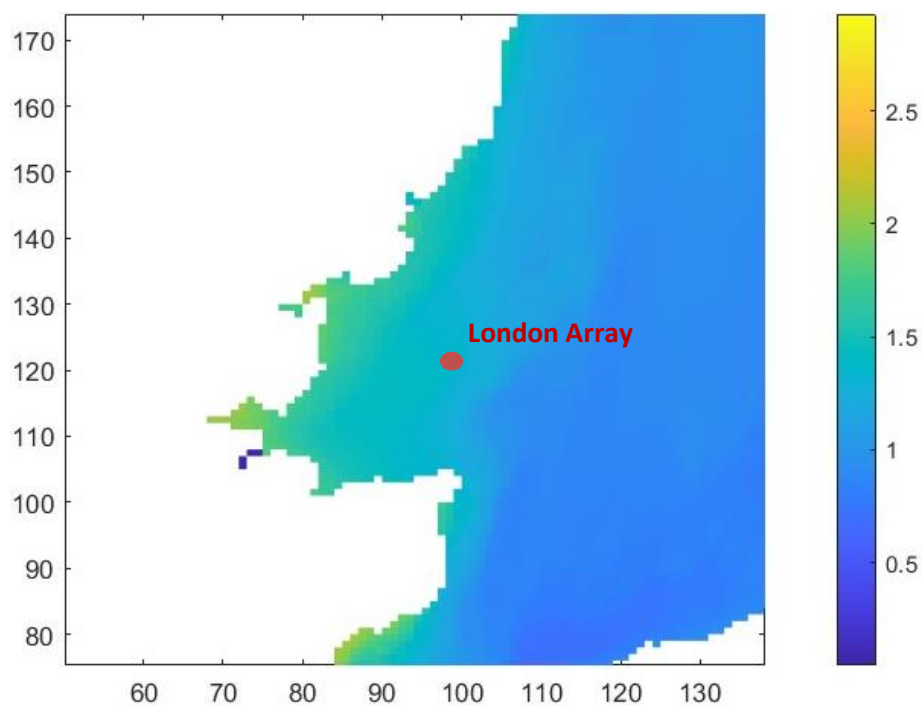
Περίοδος κύματος T_p :



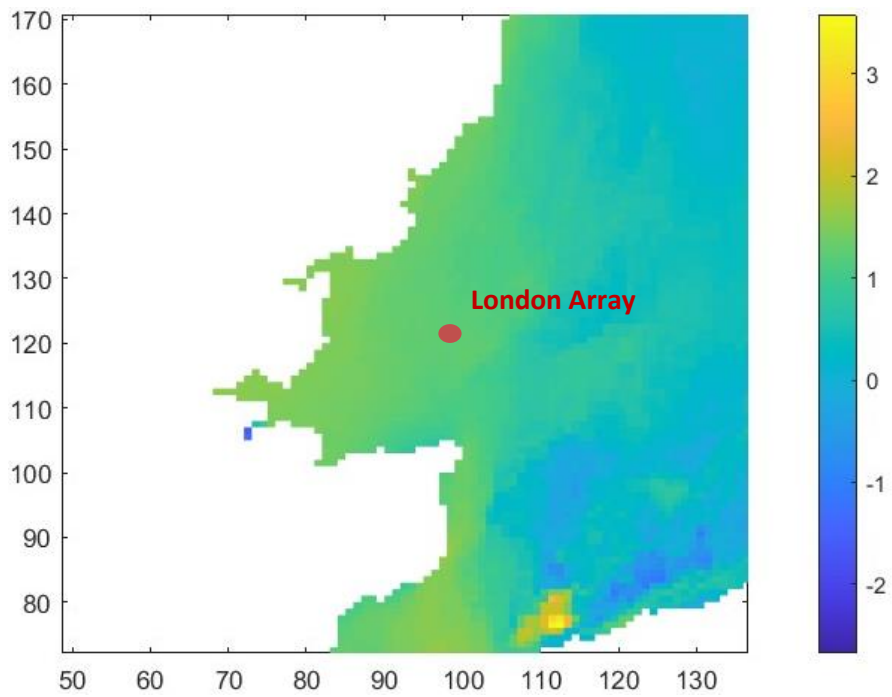
4. 8 Η διαφορά της μέσης τιμής της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην ευρύτερη περιοχή μελέτης



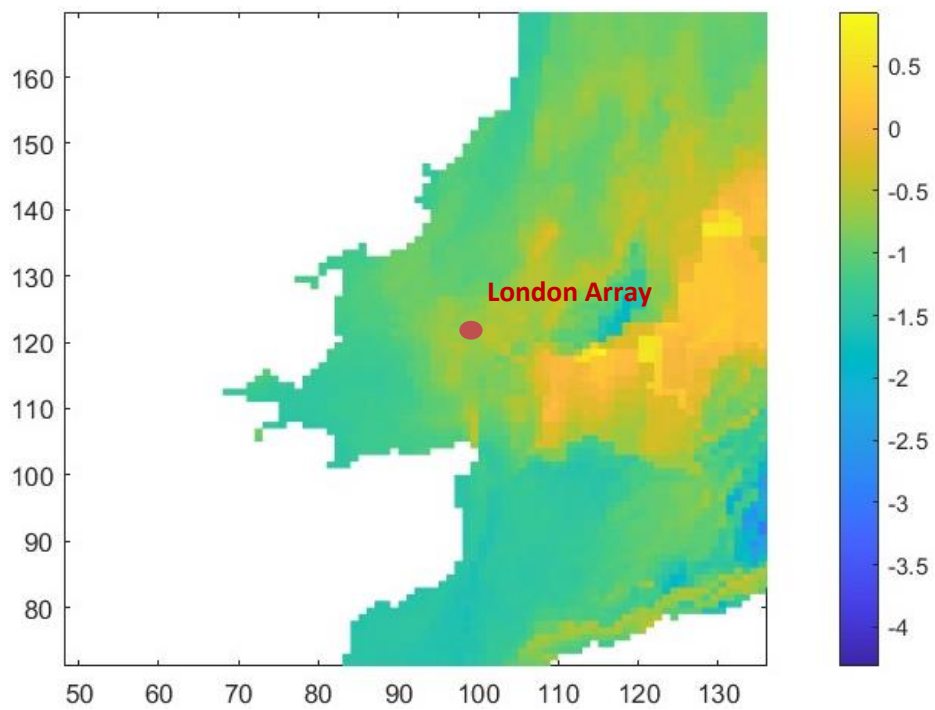
4. 9 Η διαφορά της μέσης τιμής της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου



4. 10 Η διαφορά της τυπικής απόκλισης της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου



4. 11 Η διαφορά της ασυμμετρίας της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου



4. 12 Η διαφορά της κύρτωσης της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του έργου στην περιοχή του πάρκου

Στον παρακάτω πίνακα και στην αντίστοιχη εικόνα, έχουν αριθμηθεί κάποια επιπλέον σημεία, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση του έργου στο κύμα σε όλη την έκταση του αιολικού πάρκου.

Πίνακας 2 Διαφορές στατιστικών μεγεθών για τα χαρακτηριστικά του κύματος σε διάφορα σημεία του αιολικού πάρκου

Σημείο	Κ (Κέντρο)	1	2	3	4	5	6	7	8
Συντεταγμένες χ	97	96	95	99	98	95	97	94	100
Συντεταγμένες Υ	128	130	125	130	127	126	125	128	128
DHs (%) μέση τιμή	1.19%	1.60%	0.76%	1.43%	1.07%	0.91%	0.77%	1.28%	1.18%
DHs (%) τυπική απόκλιση	2.34%	2.93%	1.82%	2.23%	1.78%	2.05%	1.57%	2.77%	2.05%
DHs (%) ασυμμετρία	9.95%	10.08%	9.32%	9.57%	9.54%	9.52%	9.30%	9.77%	10.39%
DHs (%) κύρτωση	13.32%	13.62%	12.59%	12.48%	12.50%	12.79%	12.17%	13.07%	14.00%
DTp (%) μέση τιμή	-0.69%	-0.85%	-0.52%	1.75%	-0.61%	-0.69%	-0.51%	-0.68%	-0.62%
DTp (%) τυπική απόκλιση	-2.69%	-2.99%	-2.18%	-3.39%	-2.31%	-2.48%	-1.89%	-2.70%	-2.11%
DTp (%) ασυμμετρία	5.12%	5.37%	5.08%	-1.02%	7.18%	5.68%	6.26%	5.34%	8.24%
DTp (%) κύρτωση	10.37%	10.83%	10.67%	3.99%	13.13%	11.82%	12.16%	11.23%	14.03%



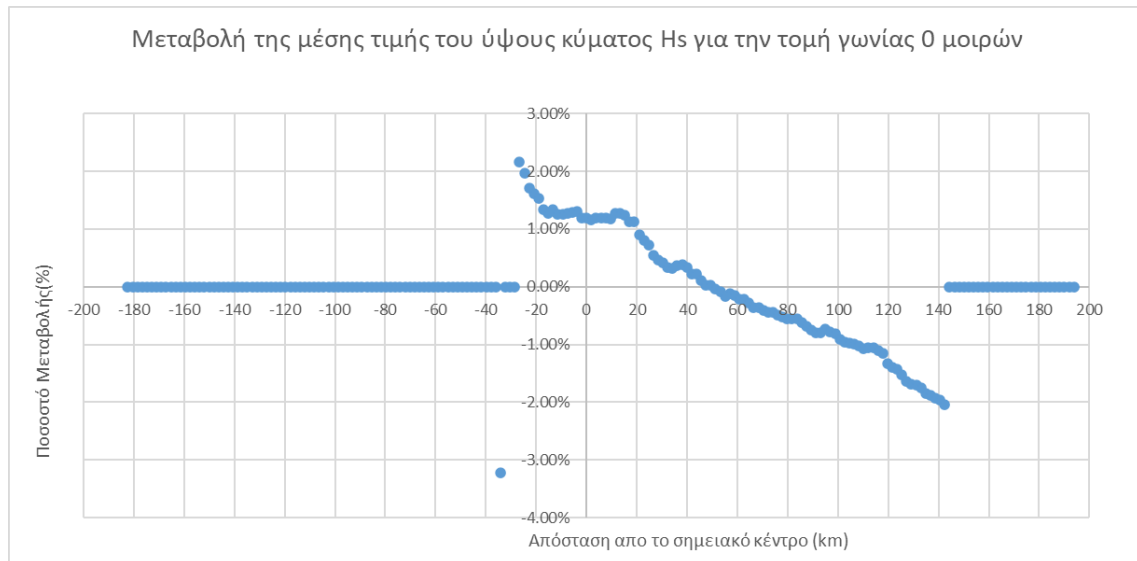
4. 13 Διάταξη των ανεμογεννητριών στο υπεράκτιο πάρκο London Array, δορυφορική εικόνα (Πηγή: www.londonarray.com)

4.6.2 Ακτινικές τομές μεταβολής βασικών μεταβλητών

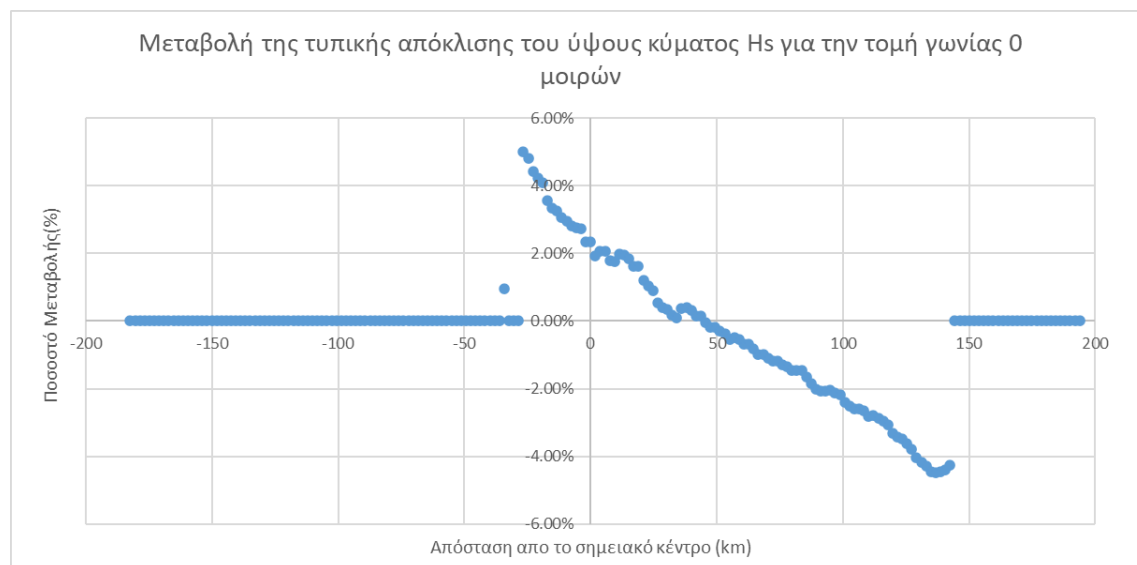
Για την περιοχή ενδιαφέροντος και με στόχο την οπτικοποίηση της μεταβολής των βασικών στατιστικών μεγεθών της μεταβλητής του ύψους κύματος, μορφώνονται τα παρακάτω διαγράμματα ως τομές, διερχόμενες από το σημειακό κέντρο, 0 45 και 90 μοιρών αντίστοιχα.

Για την μεταβλητή του κύματος (ύψος κύματος και περίοδος)

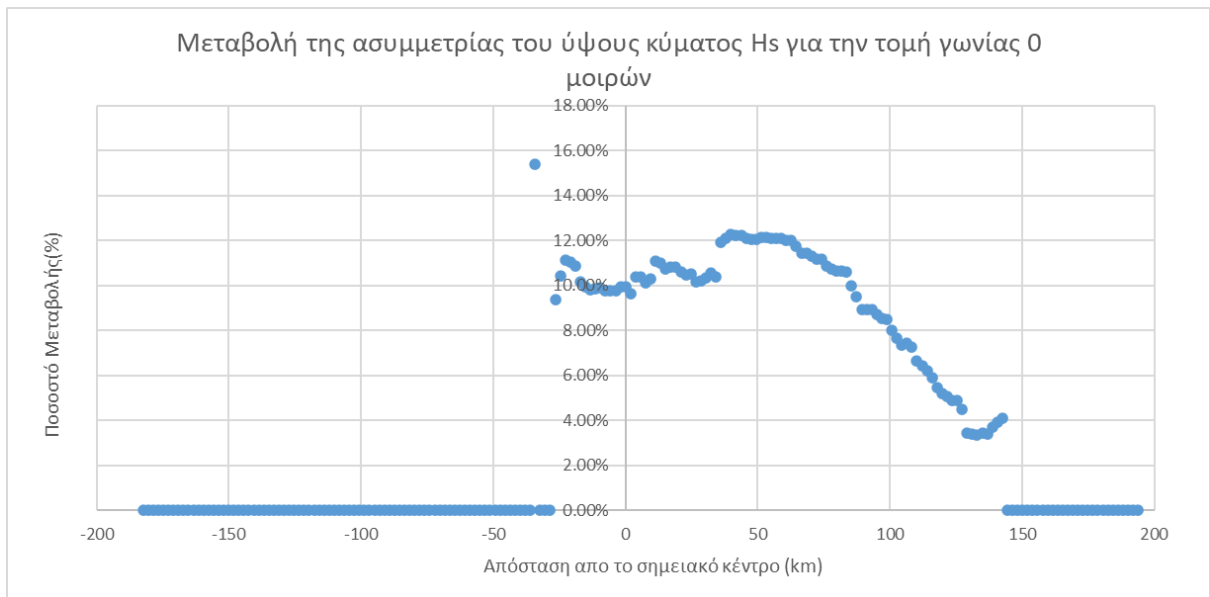
Τομή γωνίας 0°:



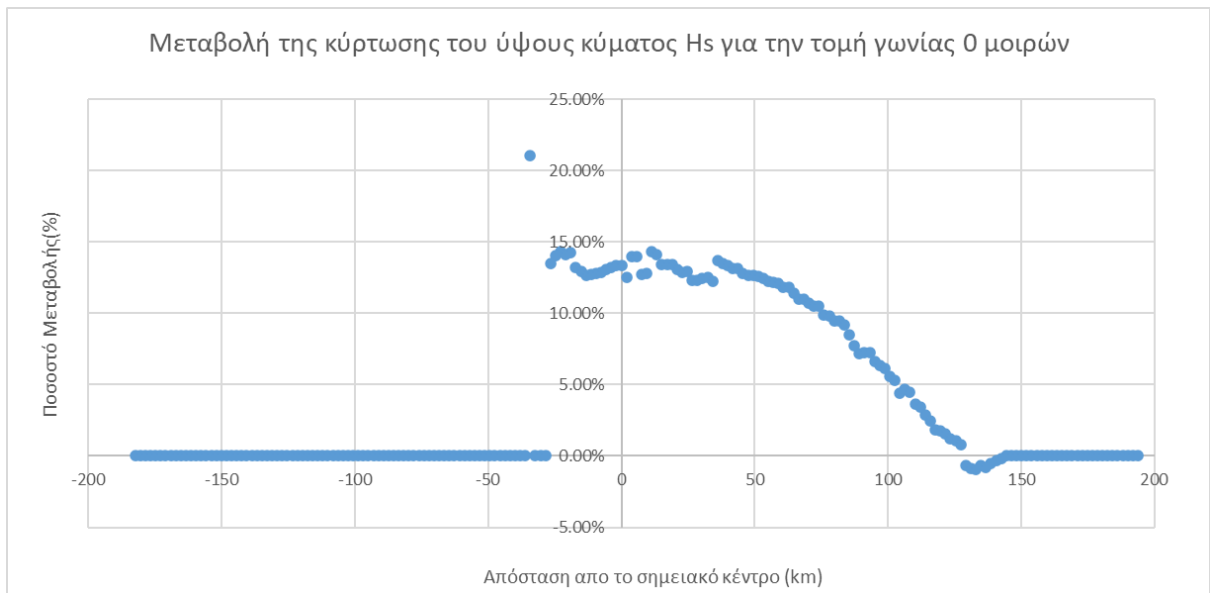
4. 14 Μεταβολή της μέσης τιμής του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 0 μοιρών



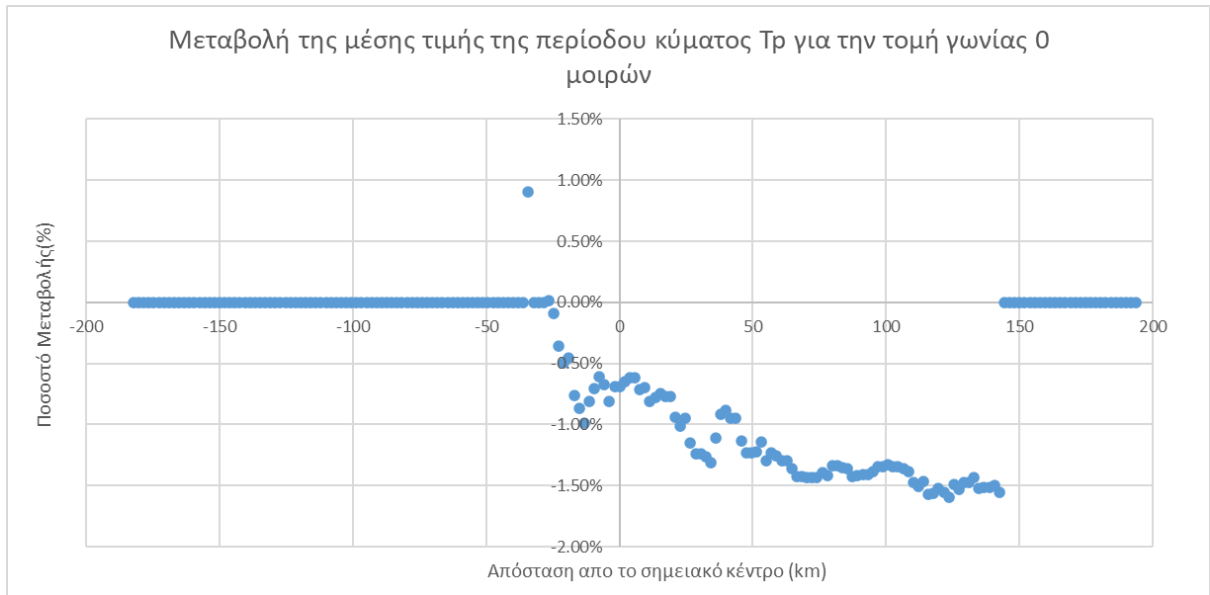
4. 15 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 0 μοιρών



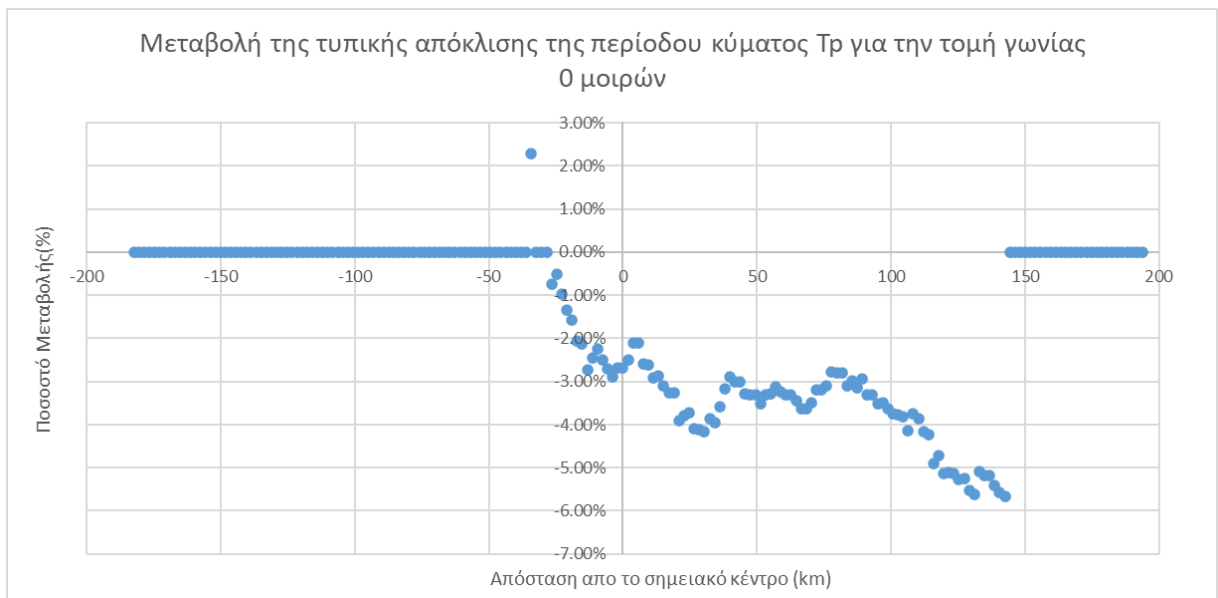
4. 16 Μεταβολή της ασυμμετρίας του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 0 μοιρών



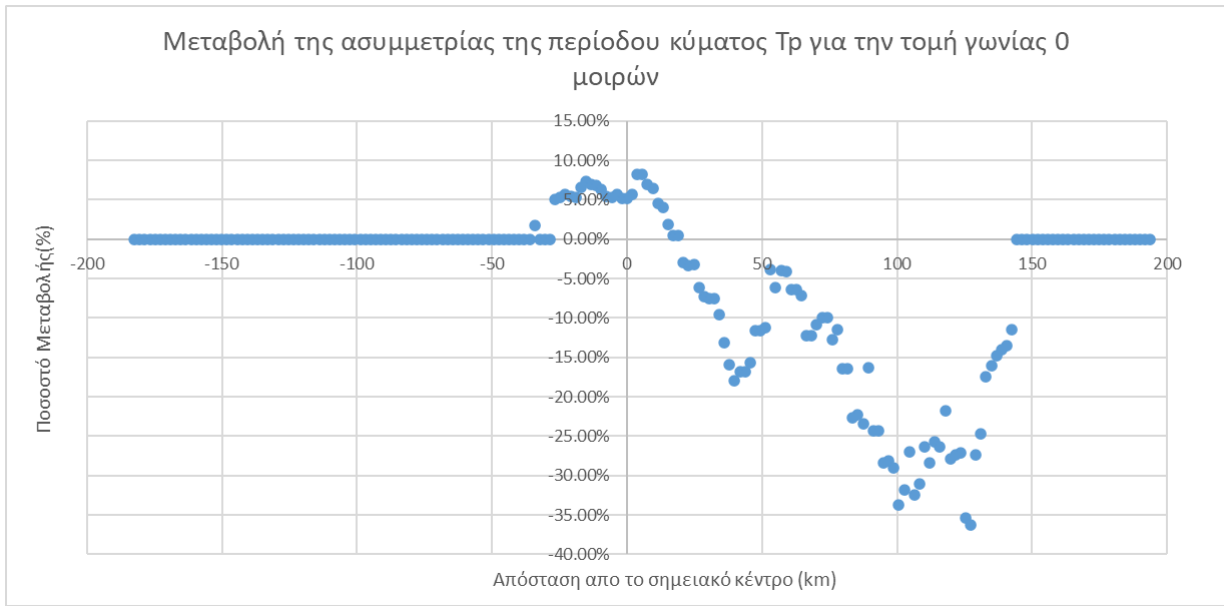
4. 17 Μεταβολή της κύρτωσης του ύψους κύματος H_s για την τομή γωνίας 0 μοιρών



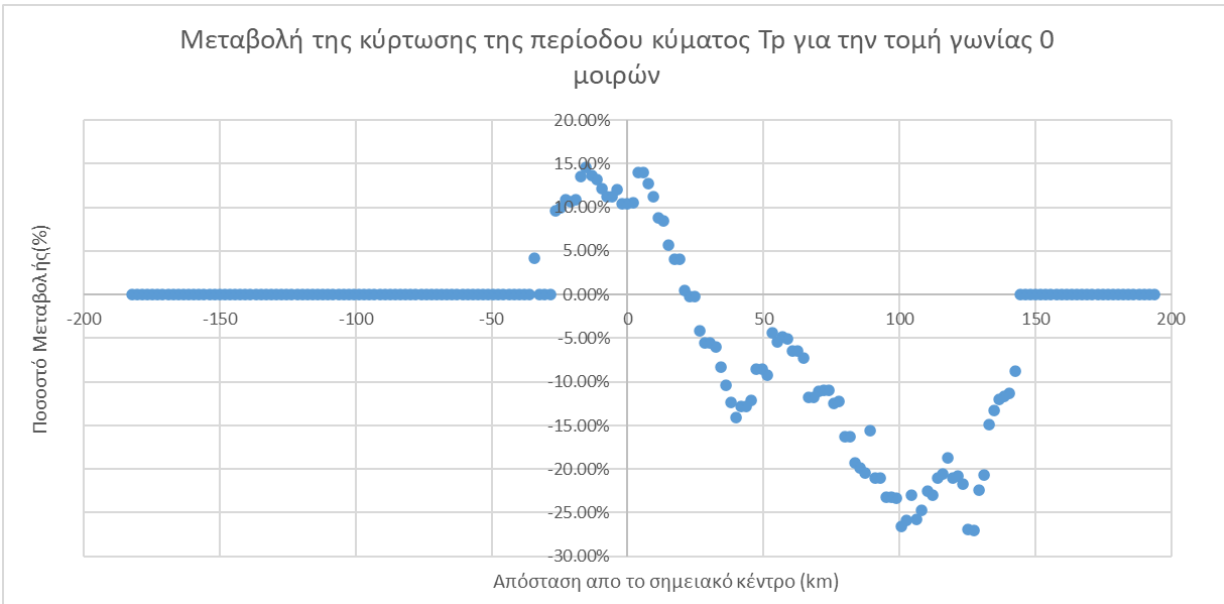
4. 18 Μεταβολή της μέσης τιμής της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 0 μοιρών



4. 19 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 0 μοιρών

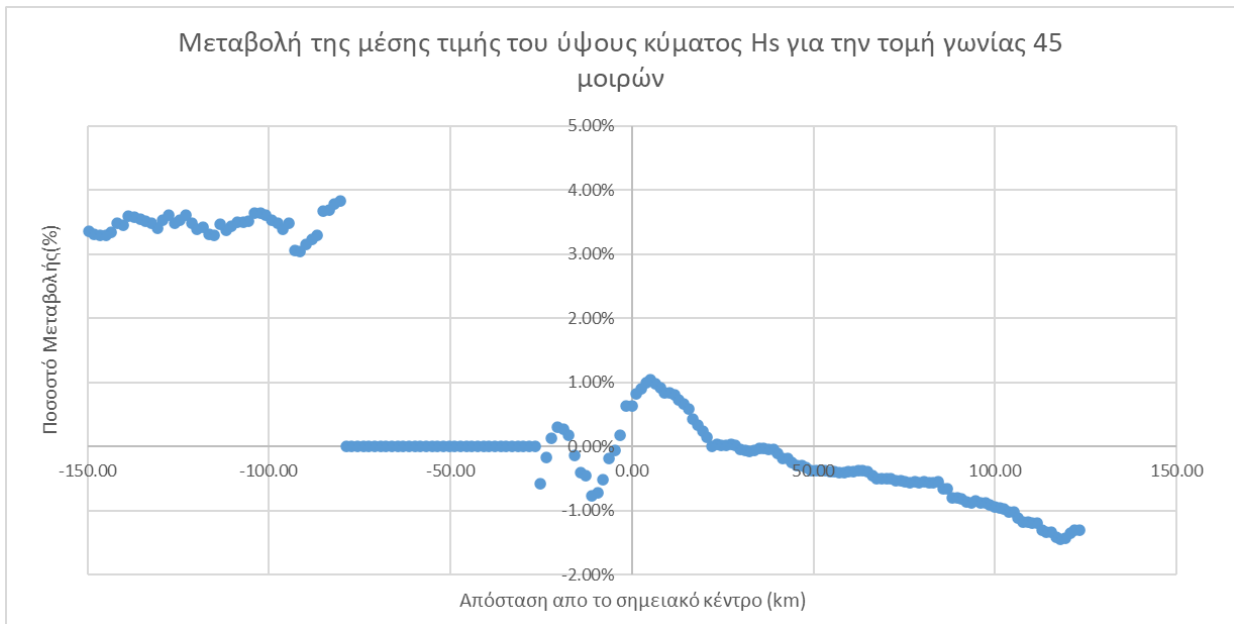


4. 20 Μεταβολή της ασυμμετρίας της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 0 μοιρών

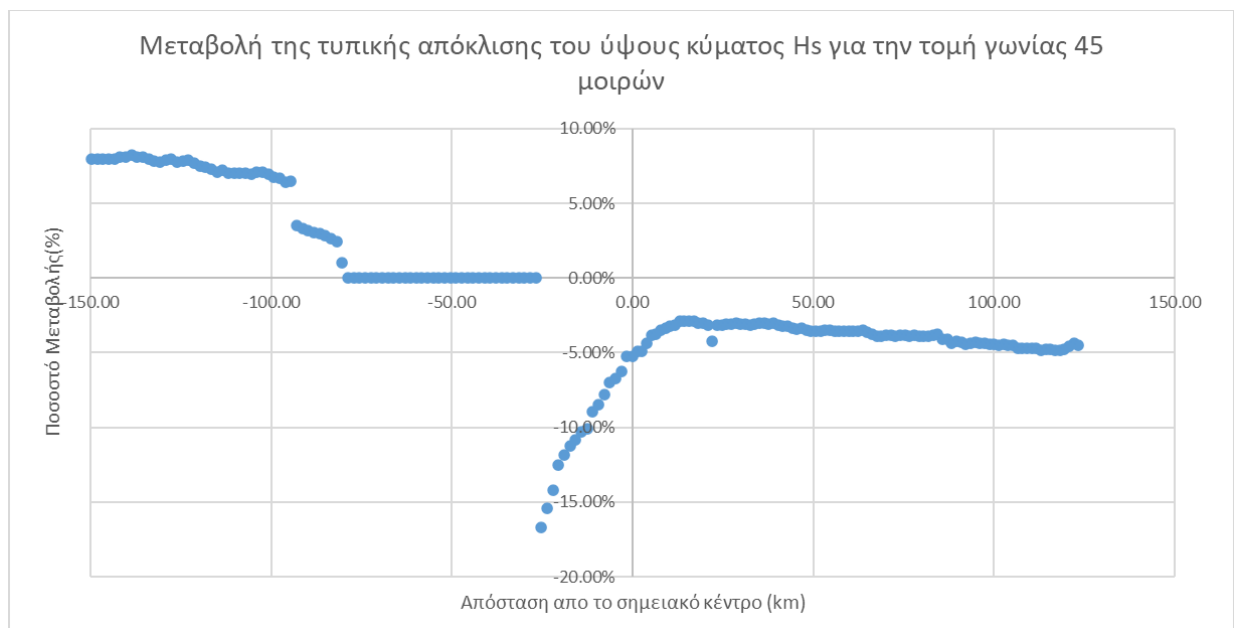


4. 21 Μεταβολή της κύρτωσης της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 0 μοιρών

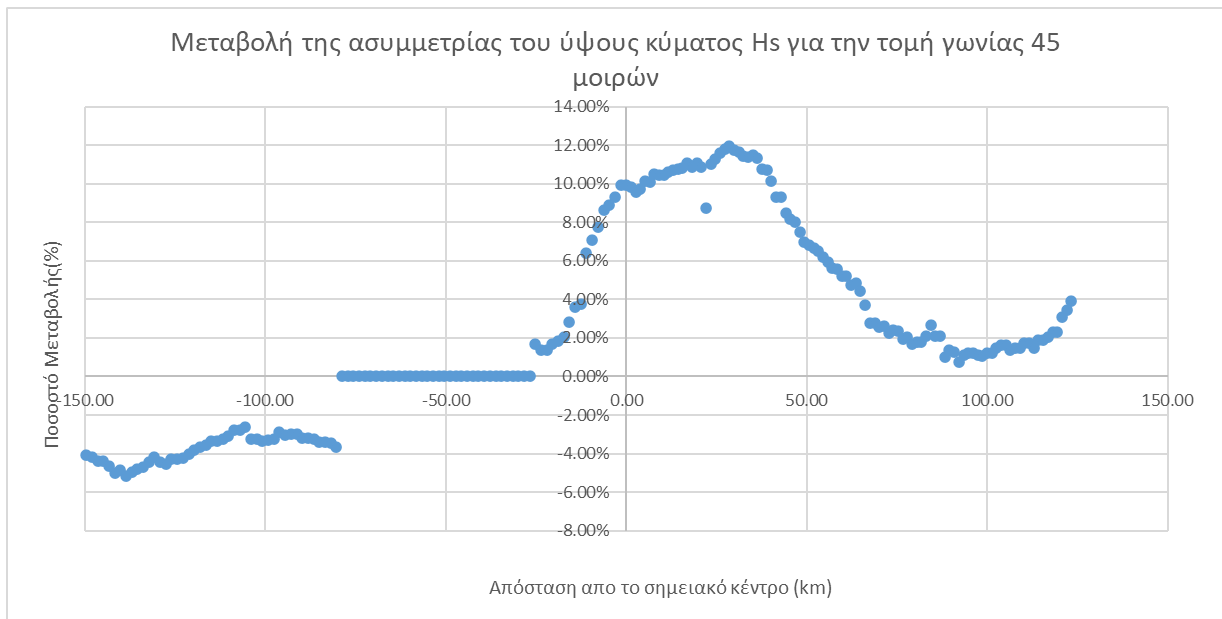
Τομή γωνίας 45° (διεύθυνση ΒΑ):



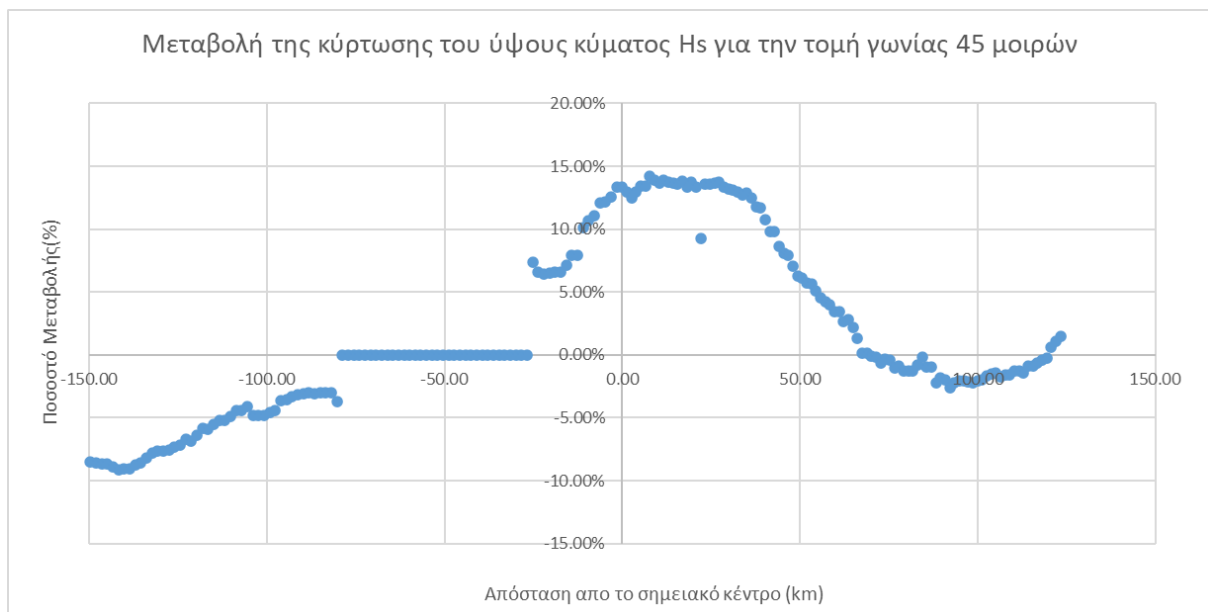
4. 22 Μεταβολή της μέσης τιμής του ύψους κύματος Hs για την τομή γωνίας 45 μοιρών



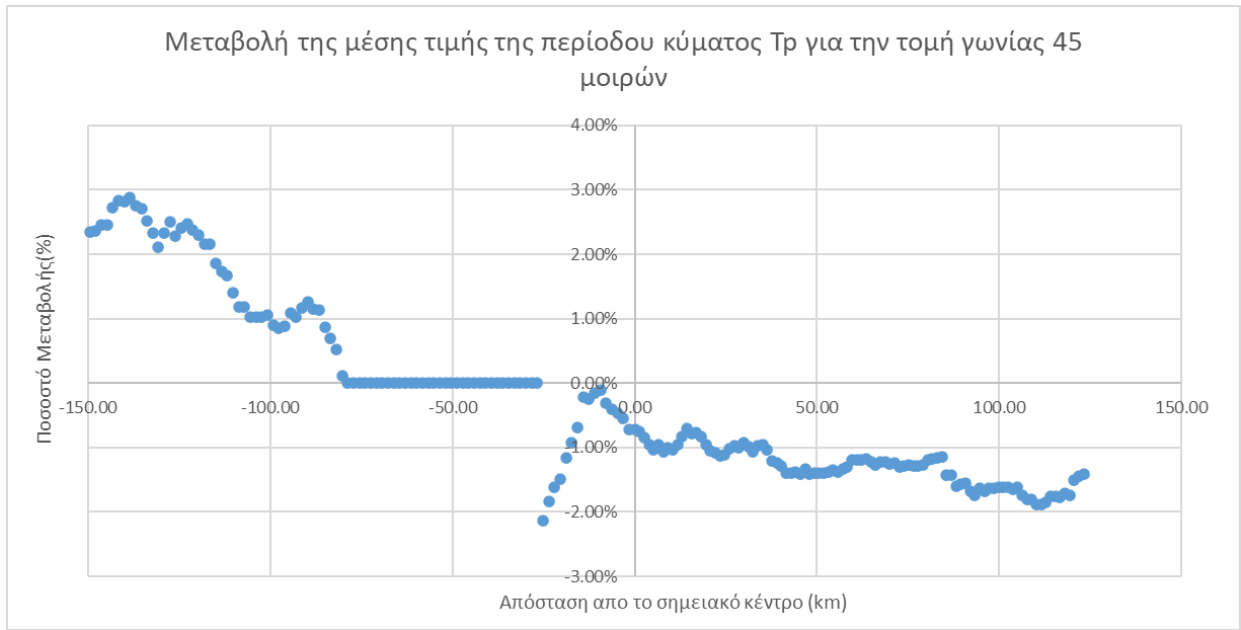
4. 23 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης του ύψους κύματος Hs για την τομή γωνίας 45 μοιρών



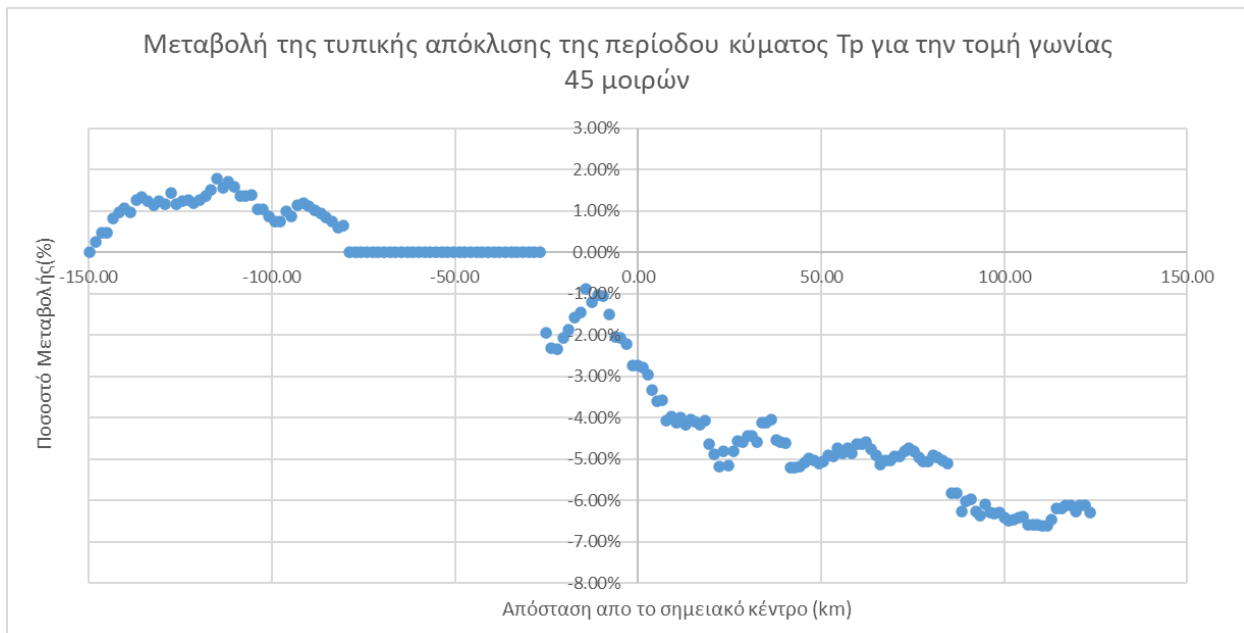
4. 24 Μεταβολή της ασυμμετρίας του ύψους κύματος Hs για την τομή γωνίας 45 μοιρών



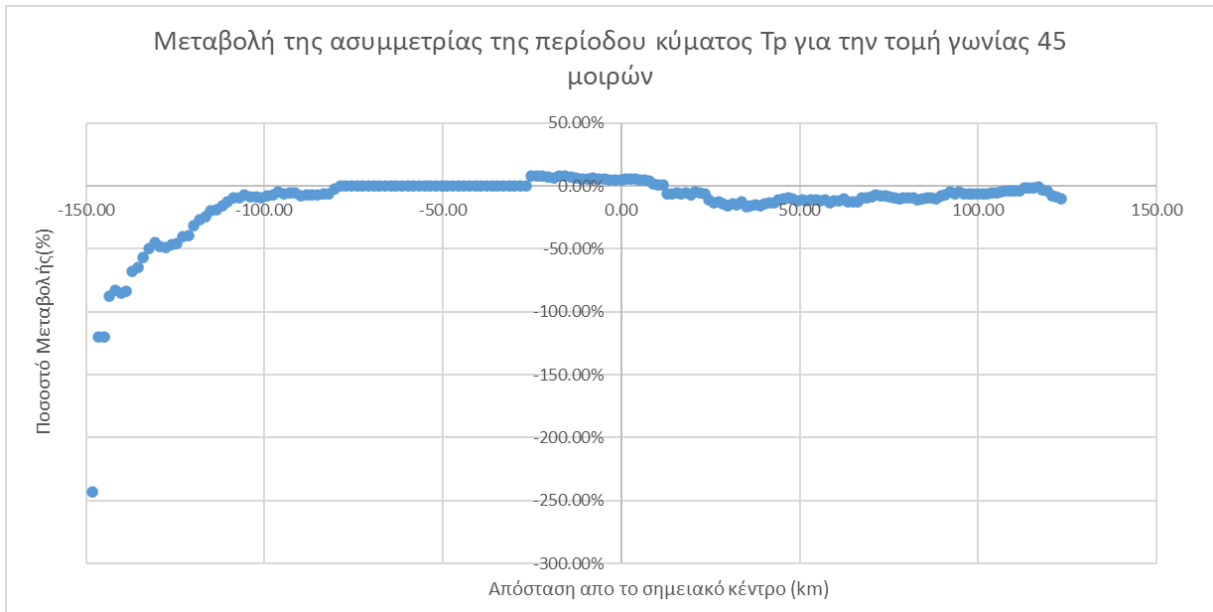
4. 25 Μεταβολή της κύρτωσης του ύψους κύματος Hs για την τομή γωνίας 45 μοιρών



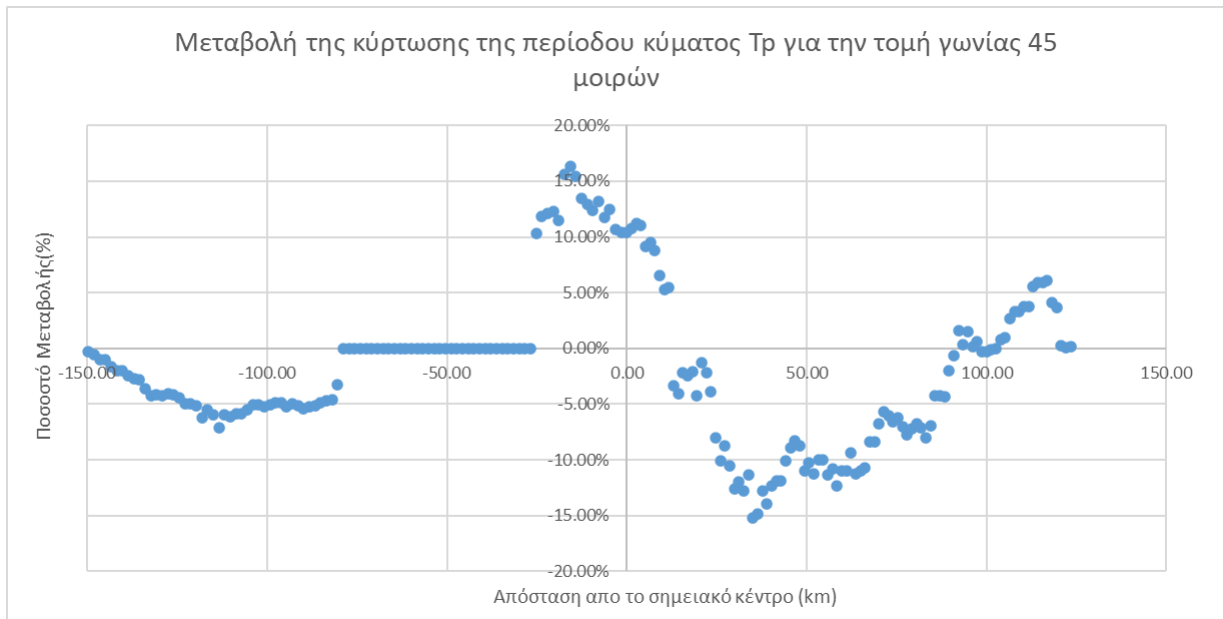
4. 26 Μεταβολή της μέσης τιμής της περιόδου κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών



4. 27 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της περιόδου κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών

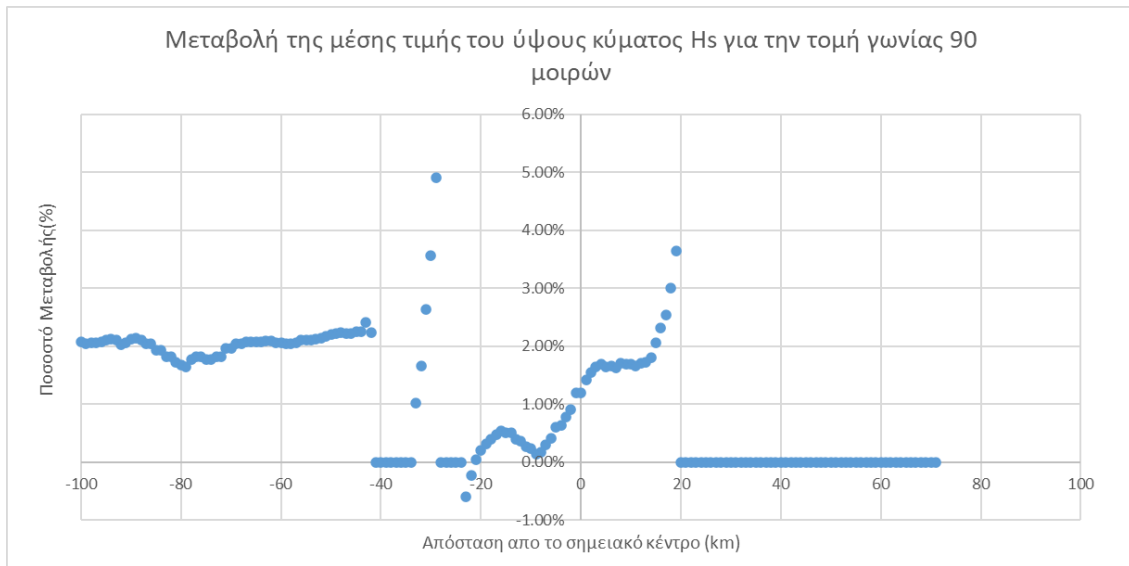


4. 28 Μεταβολή της ασυμμετρίας της περιόδου κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών

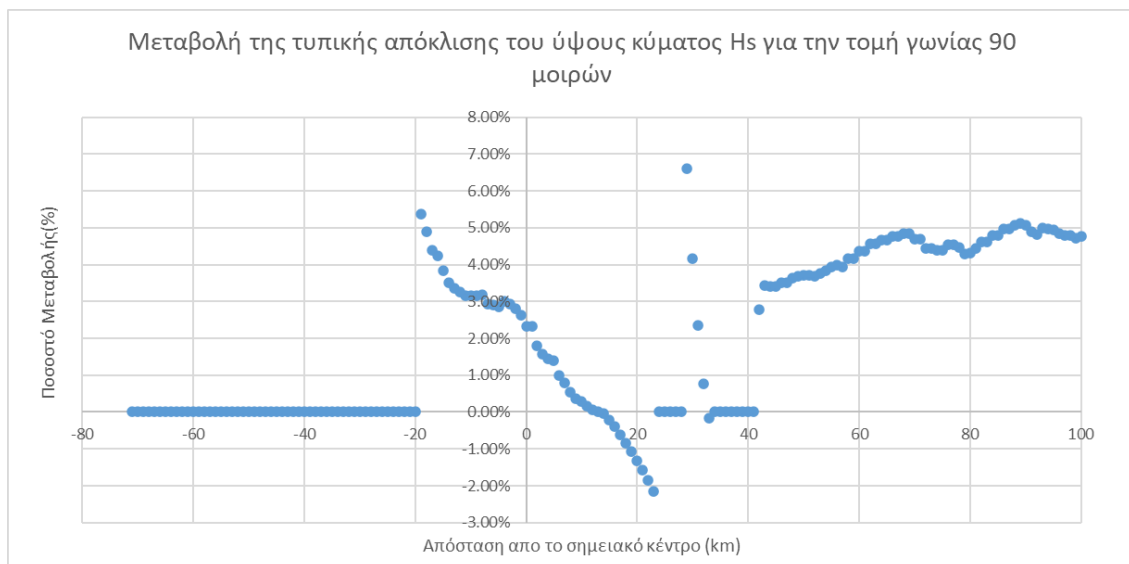


4. 29 Μεταβολή της ασυμμετρίας της περιόδου κύματος H_s για την τομή γωνίας 45 μοιρών

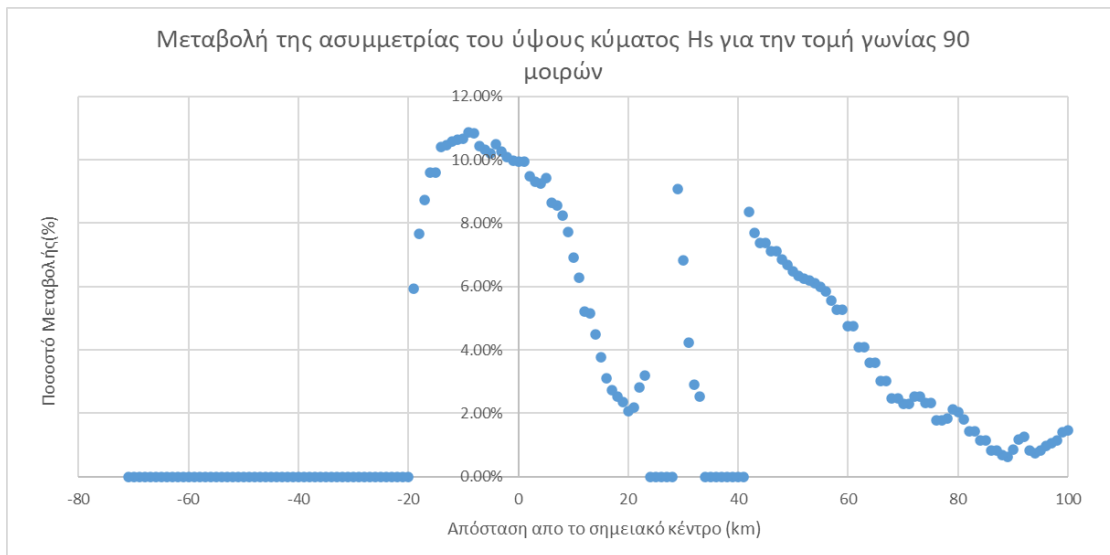
Τομή γωνίας 90°:



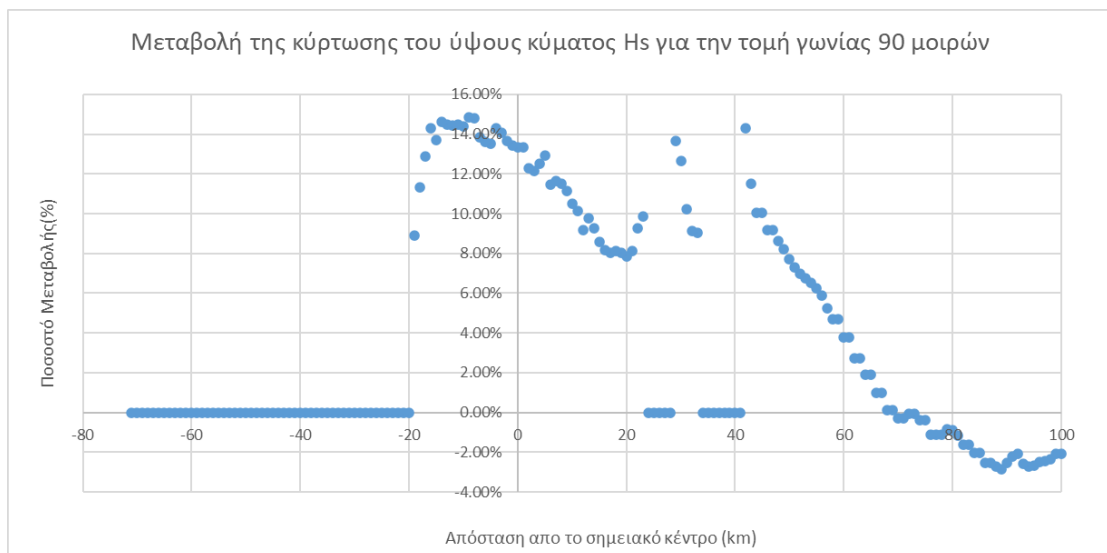
4. 30 Μεταβολή της μέσης τιμής του ύψους κύματος Hs για την τομή γωνίας 90 μοιρών



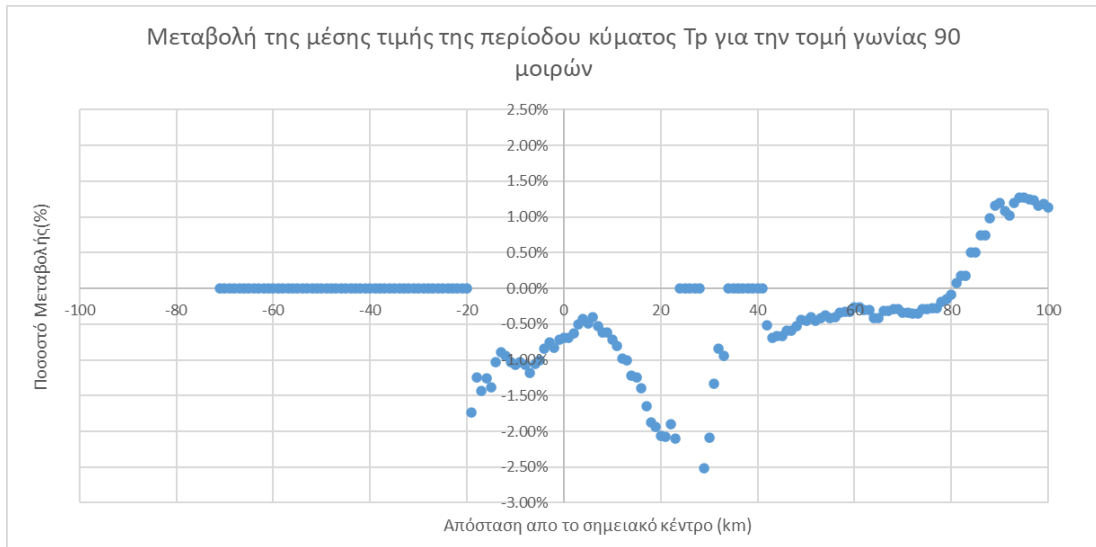
4. 31 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης του ύψους κύματος Hs για την τομή γωνίας 90 μοιρών



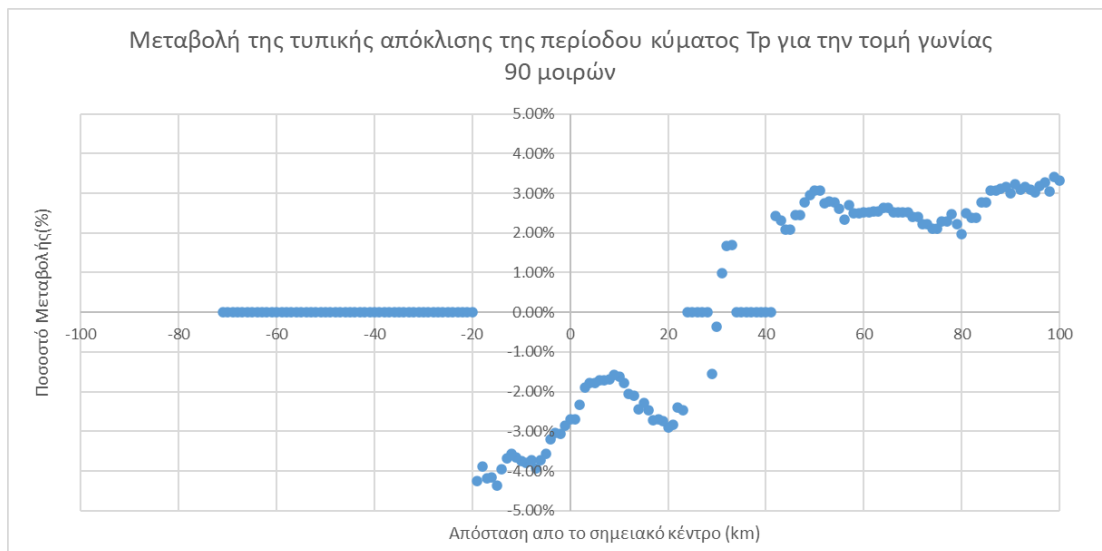
4. 32 Μεταβολή της ασυμμετρίας του ύψους κύματος Hs για την τομή γωνίας 90 μοιρών



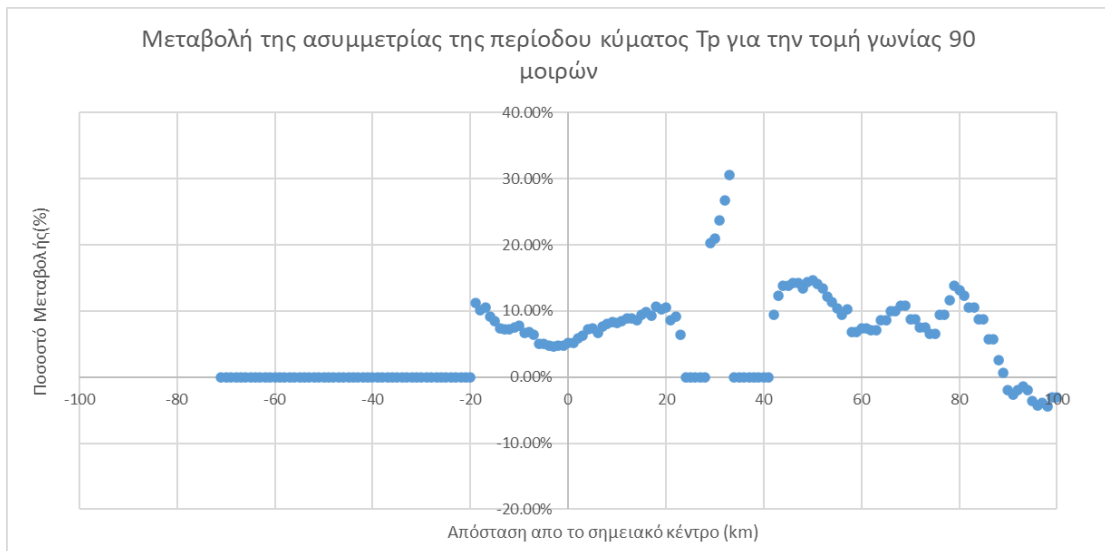
4. 33 Μεταβολή της κύρτωσης του ύψους κύματος Hs για την τομή γωνίας 90 μοιρών



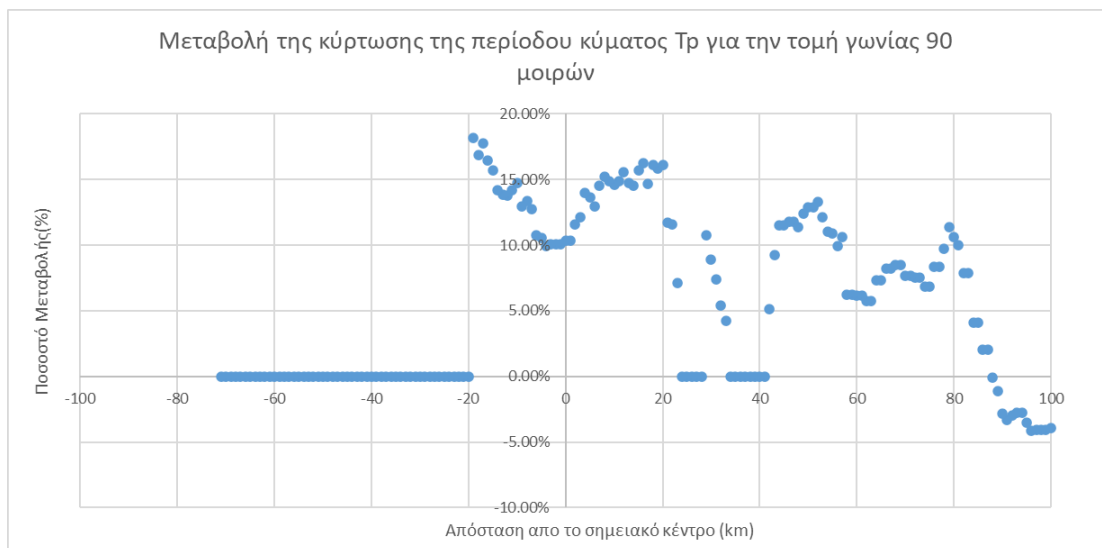
4. 34 Μεταβολή της μέση τιμής της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 90 μοιρών



4. 35 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 90 μοιρών



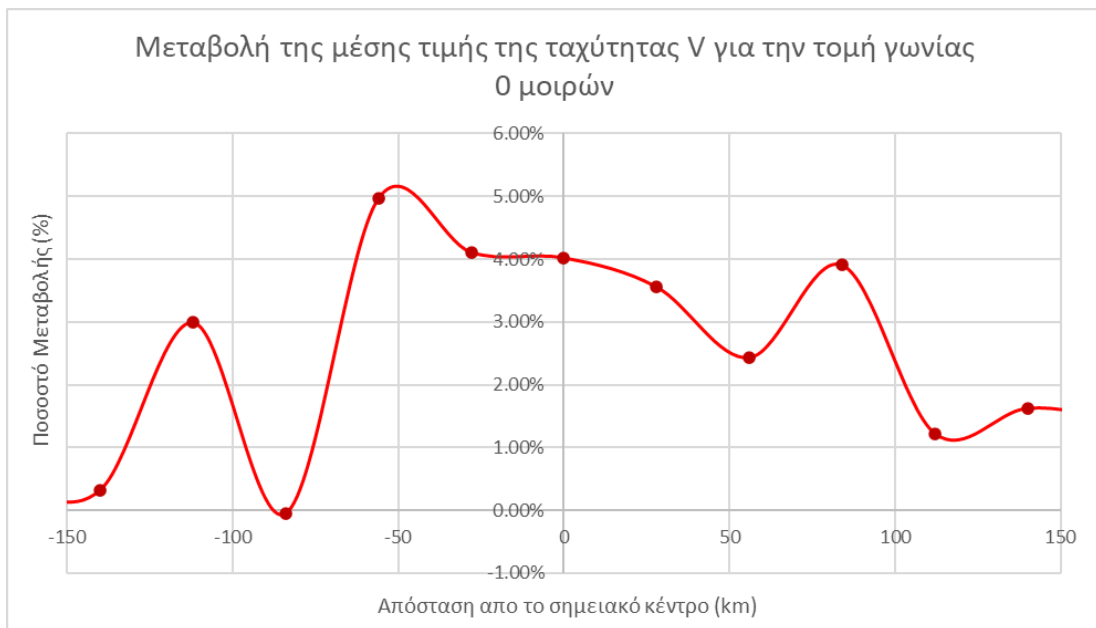
4. 36 Μεταβολή της ασυμμετρίας της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 90 μοιρών



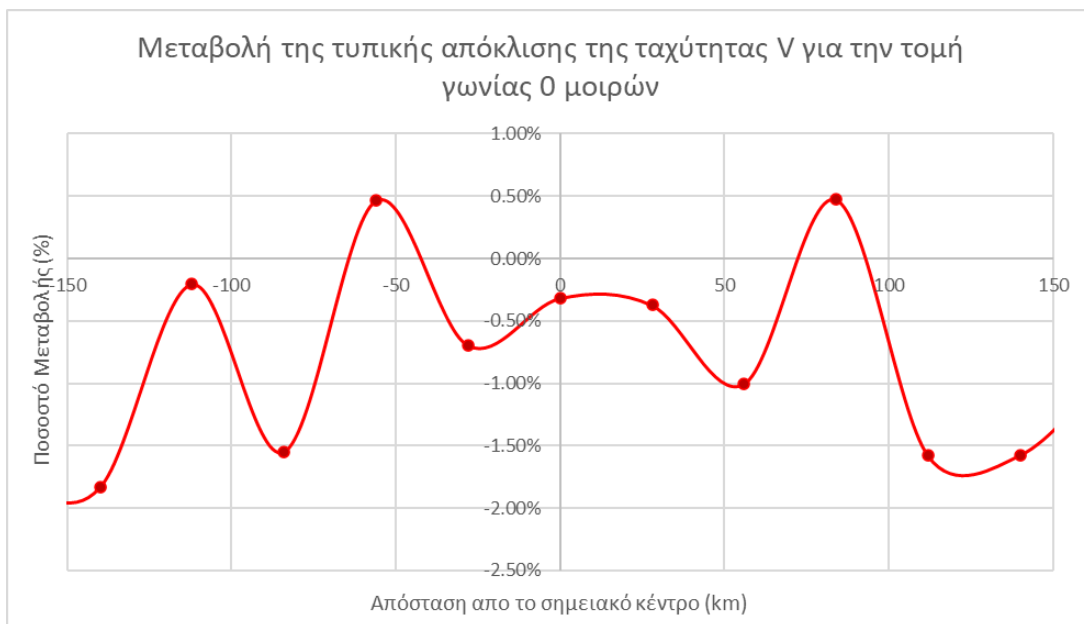
4. 37 Μεταβολή της κύρτωσης της περιόδου κύματος T_p για την τομή γωνίας 90 μοιρών

Για την μεταβλητή του ανέμου (ταχύτητα ανέμου)

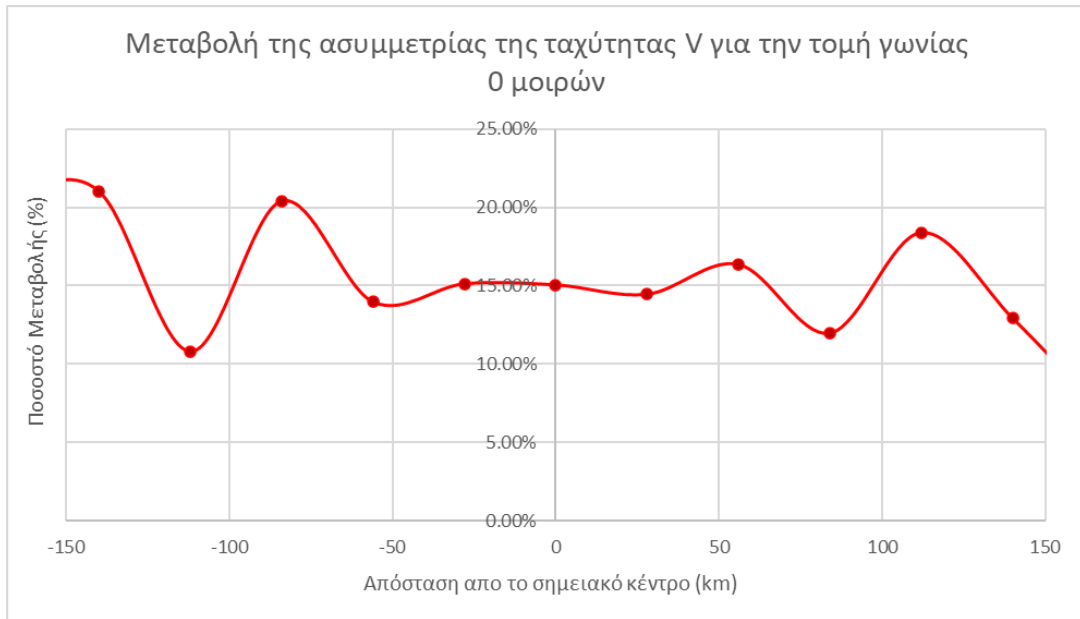
Τομή γωνίας 0°:



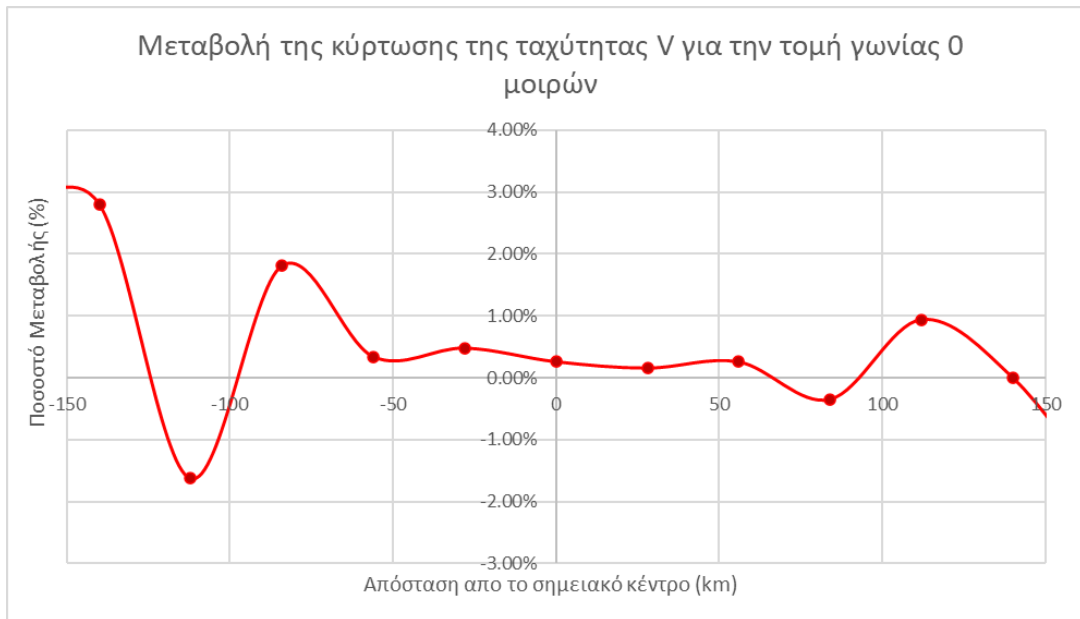
4. 38 Μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 0 μοιρών



4. 39 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 0 μοιρών



4. 40 Μεταβολή της ασυμμετρίας της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 0 μοιρών

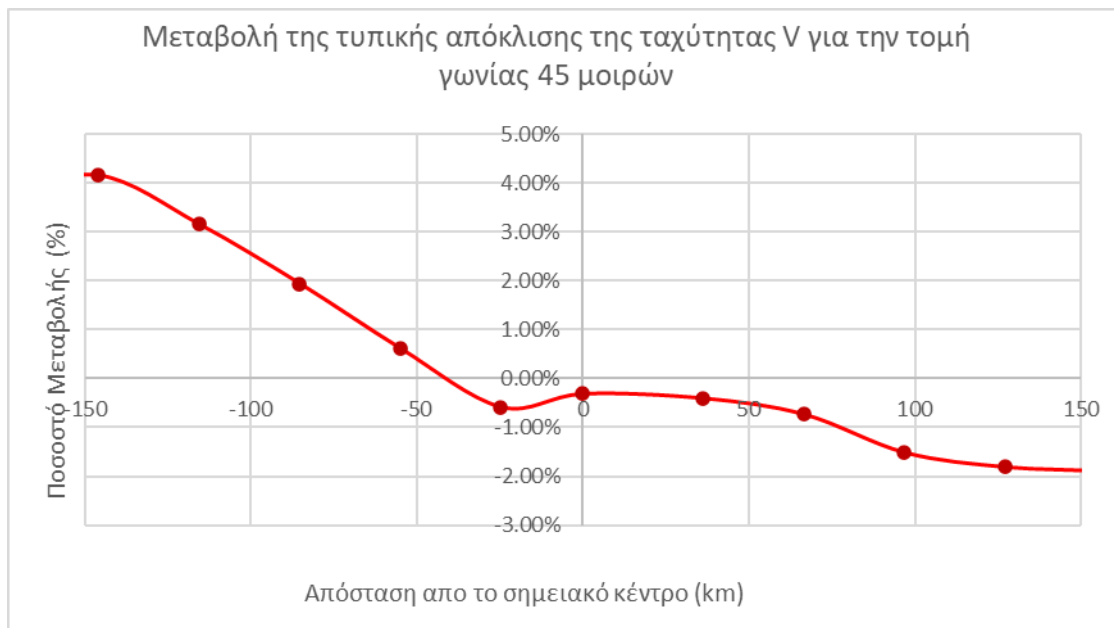


4. 41 Μεταβολή της κύρτωσης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 0 μοιρών

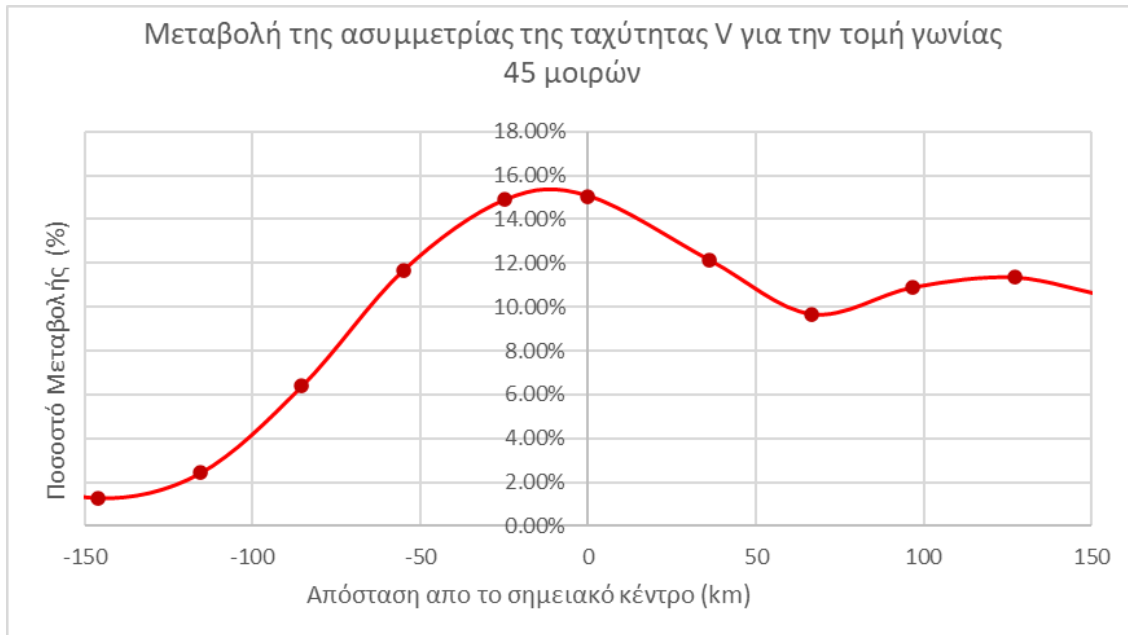
Τομή γωνίας 45°:



4. 42 Μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 45 μοιρών



4. 43 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 45 μοιρών

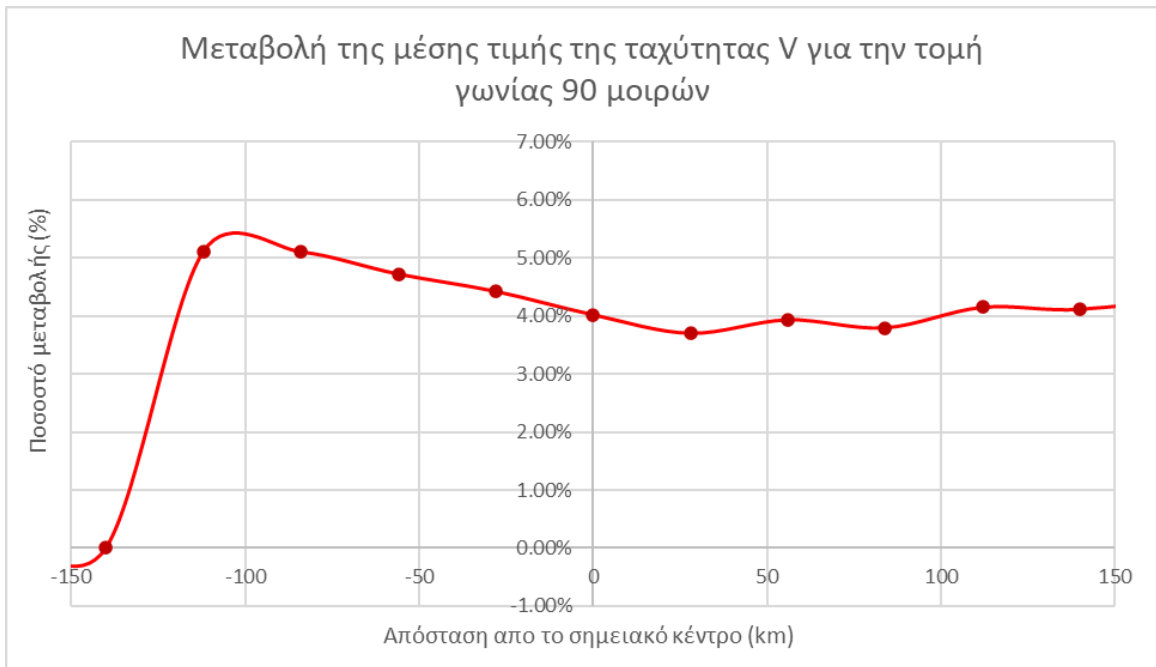


4. 44 Μεταβολή της ασυμμετρίας της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 45 μοιρών

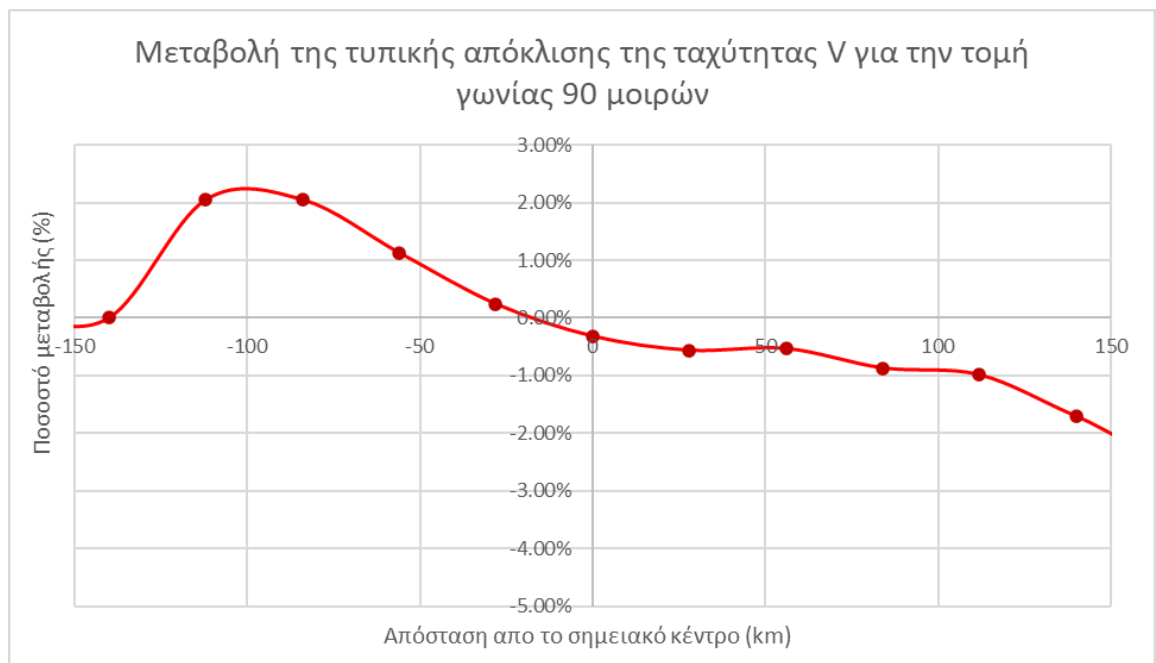


4. 45 Μεταβολή της κύρτωσης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 45 μοιρών

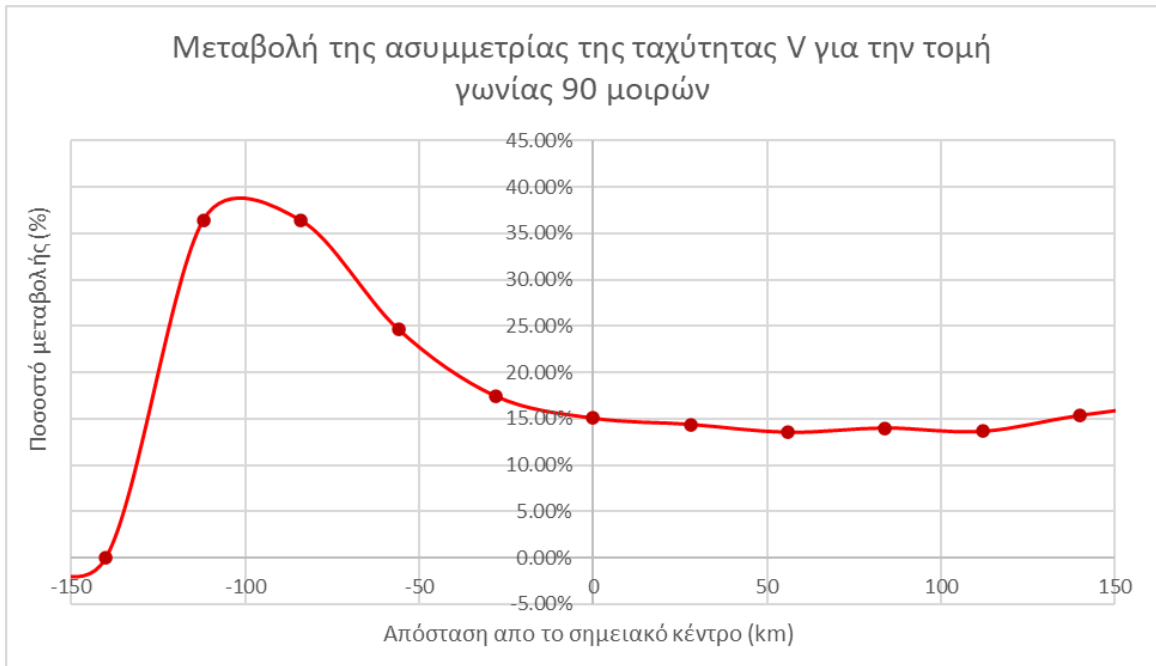
Τομή γωνίας 90°:



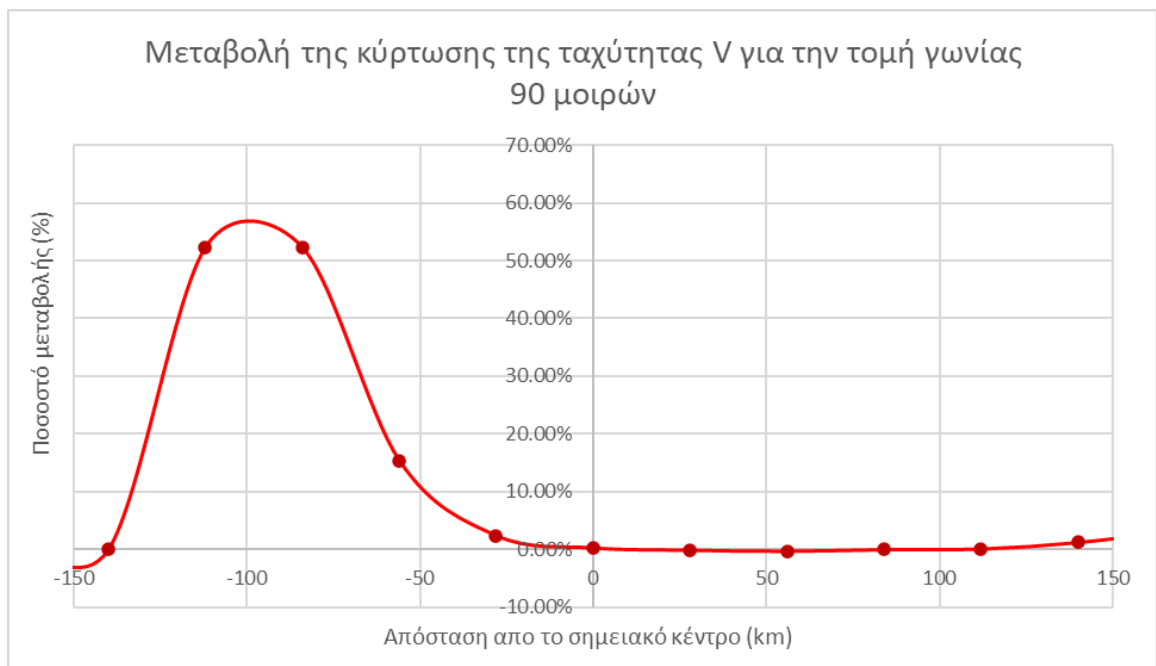
4. 46 Μεταβολή της μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 90 μοιρών



4. 47 Μεταβολή της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 90 μοιρών



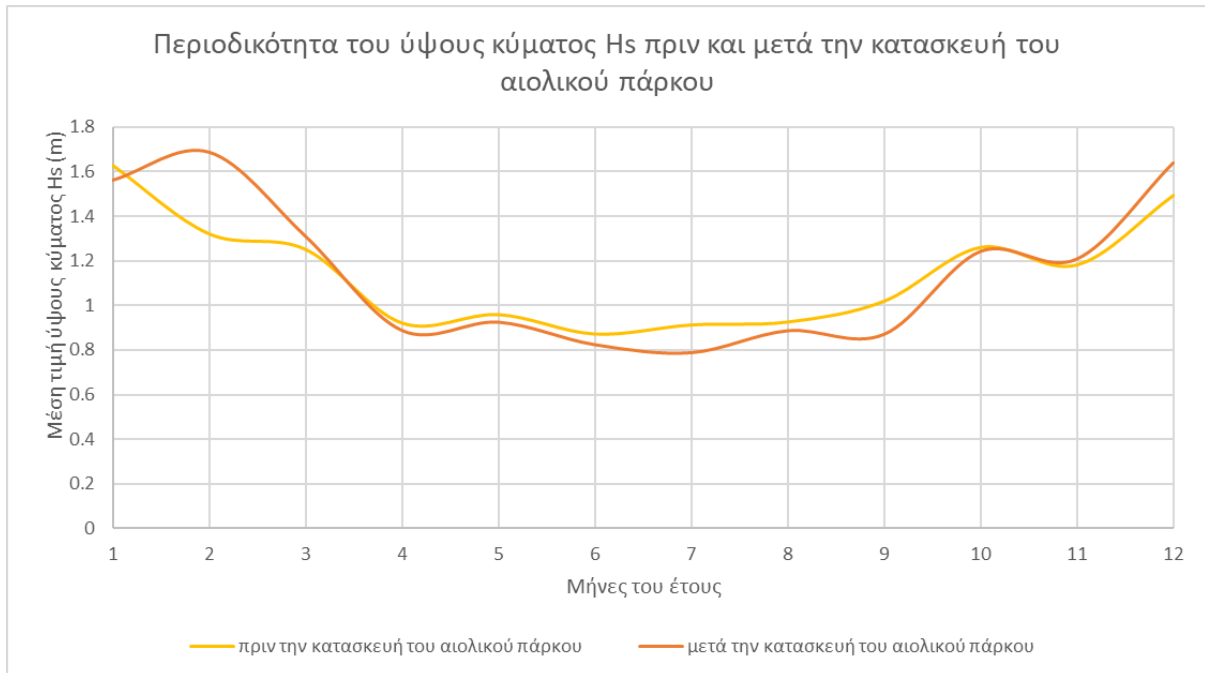
4. 48 Μεταβολή της ασυμμετρίας της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 90 μοιρών



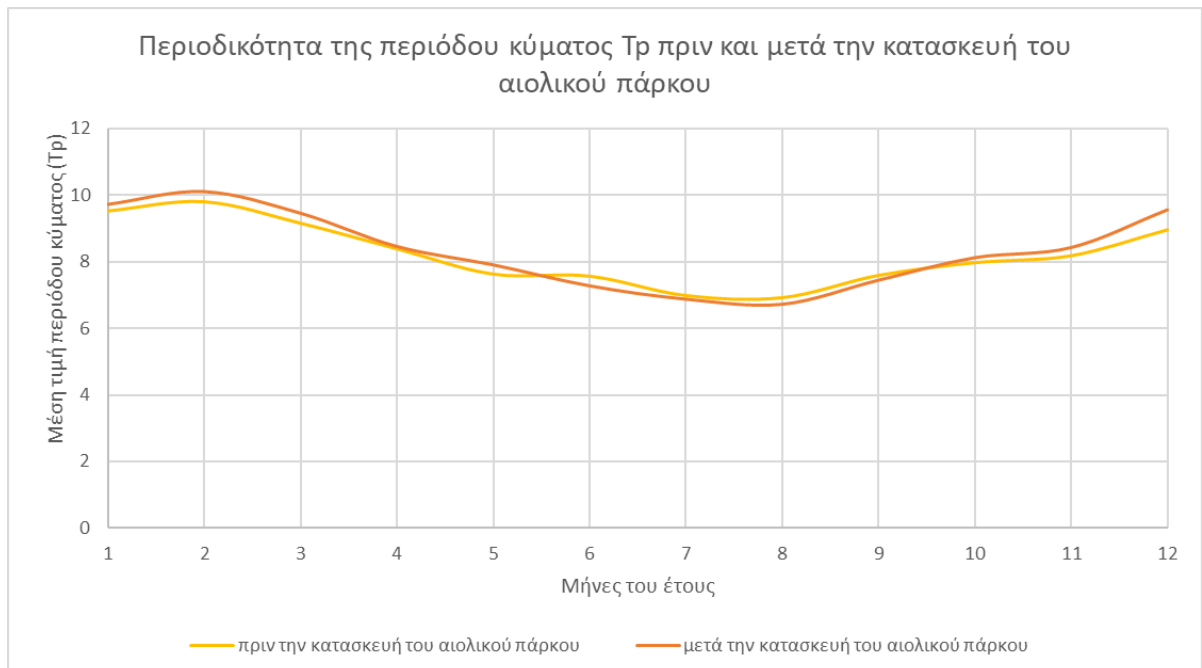
4. 49 Μεταβολή της κύρτωσης της ταχύτητας ανέμου V για την τομή γωνίας 90 μοιρών

4.6.3 Περιοδικότητα

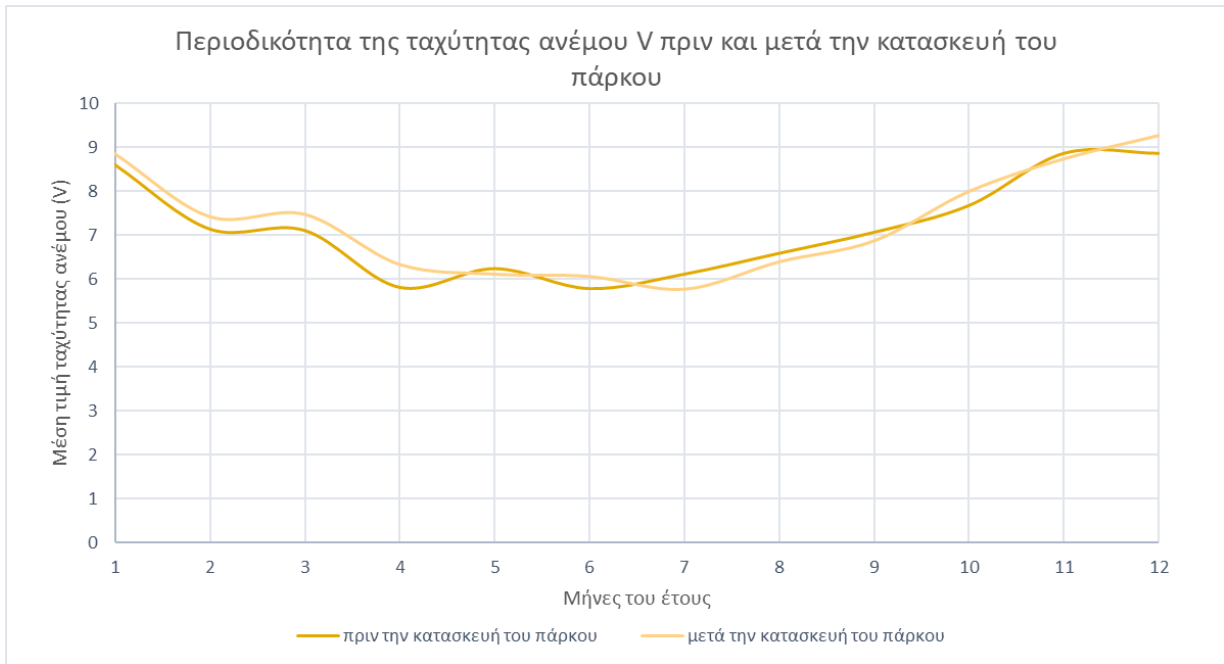
Τα φυσικά φαινόμενα διέπονται από περιοδικότητα, έτσι και το κύμα και ο άνεμος. Παρακάτω εξετάζεται μέσα από την μόρφωση διαγραμμάτων, κατά πόσο μεταβάλλεται η περιοδικότητα λόγω της κατασκευής του υπεράκτιου πάρκου.



4. 50 Περιοδικότητα του ύψους κύματος πριν και μετά την κατασκευή του υπεράκτιου πάρκου



4. 51 Περιοδικότητα της περιόδου κύματος πριν και μετά την κατασκευή του υπεράκτιου πάρκου



4. 52 Περιοδικότητα της ταχύτητας ανέμου πριν και μετά την κατασκευή του υπεράκτιου πάρκου

4.6.4 Κλιμακογράμματα 1-D και 2-D ανάλυσης κύματος και ανέμου

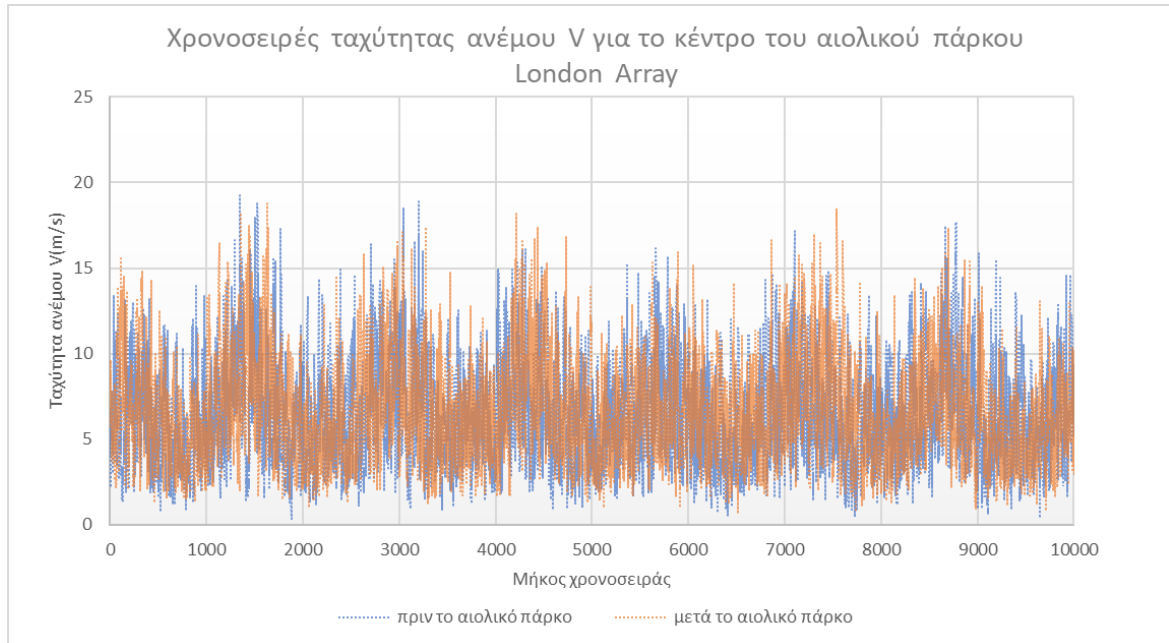
Μια σημαντική προσθήκη στην υπάρχουσα βιβλιογραφία αλλά και στην παρούσα εργασία, είναι η μόρφωση των κλιμακογραμμάτων σε επίπεδο 1-D για το κέντρο του αιολικού πάρκου και τις μεταβλητές κύματος και ανέμου, αλλά και σε 2-D για την συσχέτιση της διασποράς των τιμών με την κλίμακα.

Η τιμή της παραμέτρου Hurst-Kolmogorov υπολογίζεται ως εξής:

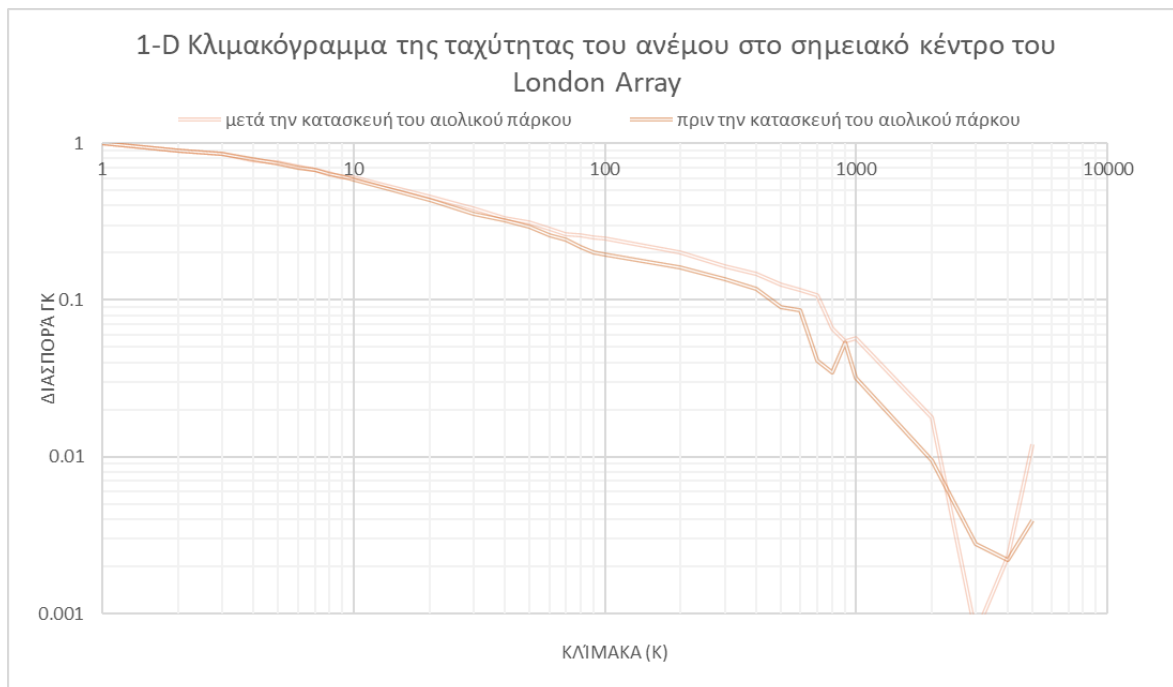
$$\text{κλίση } \lambda = \frac{\gamma\kappa}{\kappa} \quad (4.1) \quad \text{και} \quad H = \frac{2+\lambda}{2} \quad (4.2)$$

4.6.4.1 Κλιμακογράμματα 1-D

Για την μεταβλητή της ταχύτητας ανέμου V:



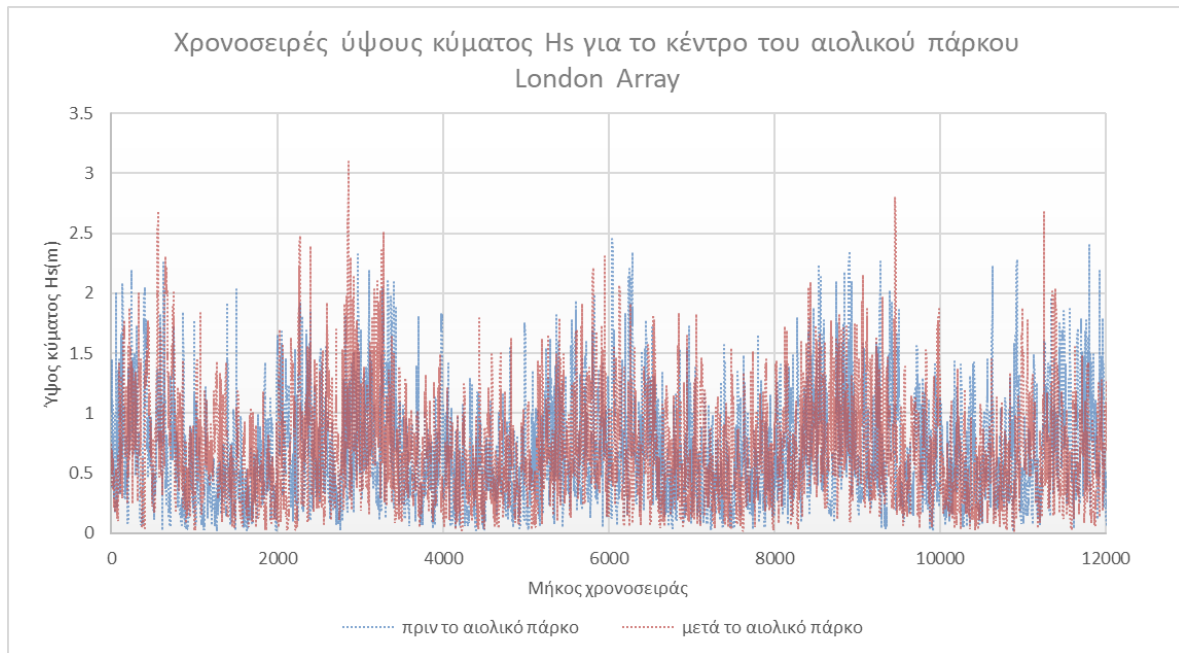
4. 53 Χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου V για το σημειακό κέντρο του αιολικού πάρκου London Array



4. 54 Κλιμακόγραμμα 1-D της ταχύτητας ανέμου στο σημειακό κέντρο του London Array

όπου ο συντελεστής Hurst-Kolmogorov έχει τιμή $H=0.669$ προγενέστερα της κατασκευής του πάρκου και $H=0.694$ μεταγενέστερα.

Για την μεταβλητή του ύψους κύματος H_s και της περιόδου T_p :

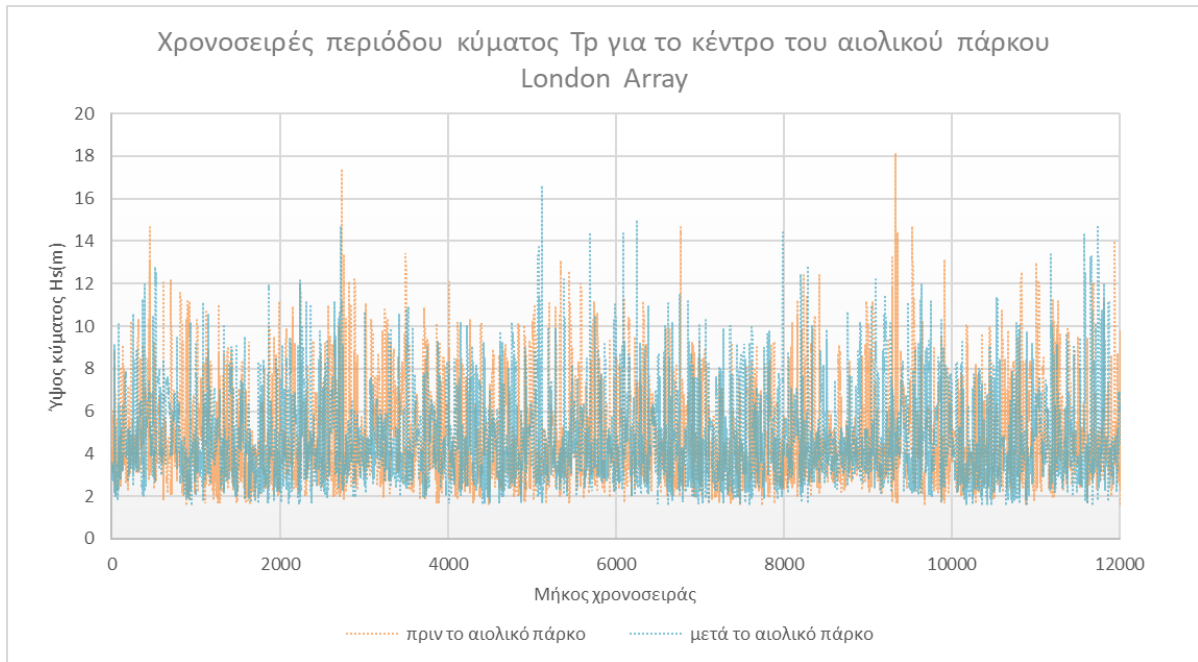


4. 55 Χρονοσειρές ύψους κύματος H_s για το σημειακό κέντρο του πάρκου London Array

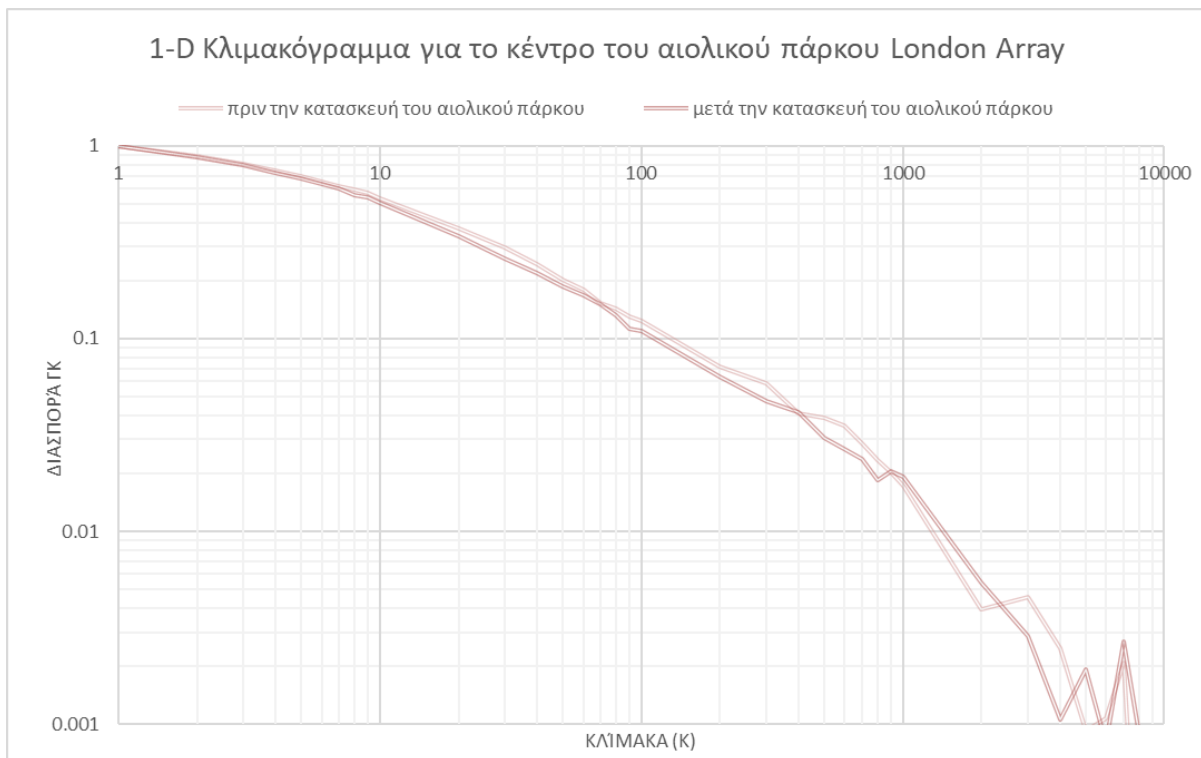


4. 56 Κλιμακόγραμμα 1-D του ύψους κύματος για το σημειακό κέντρο του πάρκου London Array

όπου ο συντελεστής Hurst-Kolmogorov έχει τιμή $H=0.586$ προγενέστερα της κατασκευής του πάρκου και $H=0.682$ μεταγενέστερα.



4. 57 Χρονοσειρές περιόδου κύματος T_r για το σημειακό κέντρο του πάρκου London Array



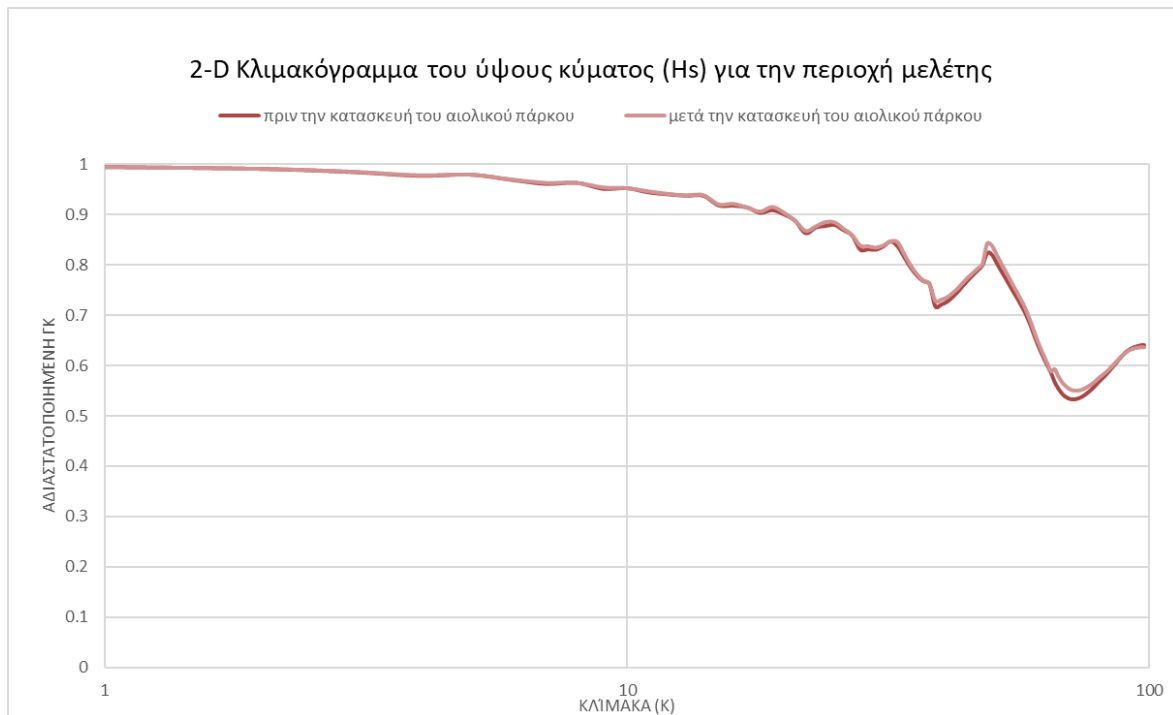
4. 58 Κλιμακόγραμμα 1-D της περιόδου κύματος για το σημειακό κέντρο του πάρκου London Array

όπου ο συντελεστής Hurst-Kolmogorov έχει τιμή $H=0.541$ προγενέστερα της κατασκευής του πάρκου και $H=0.564$ μεταγενέστερα.

4.6.4.2 Κλιμακογράμματα 2-D

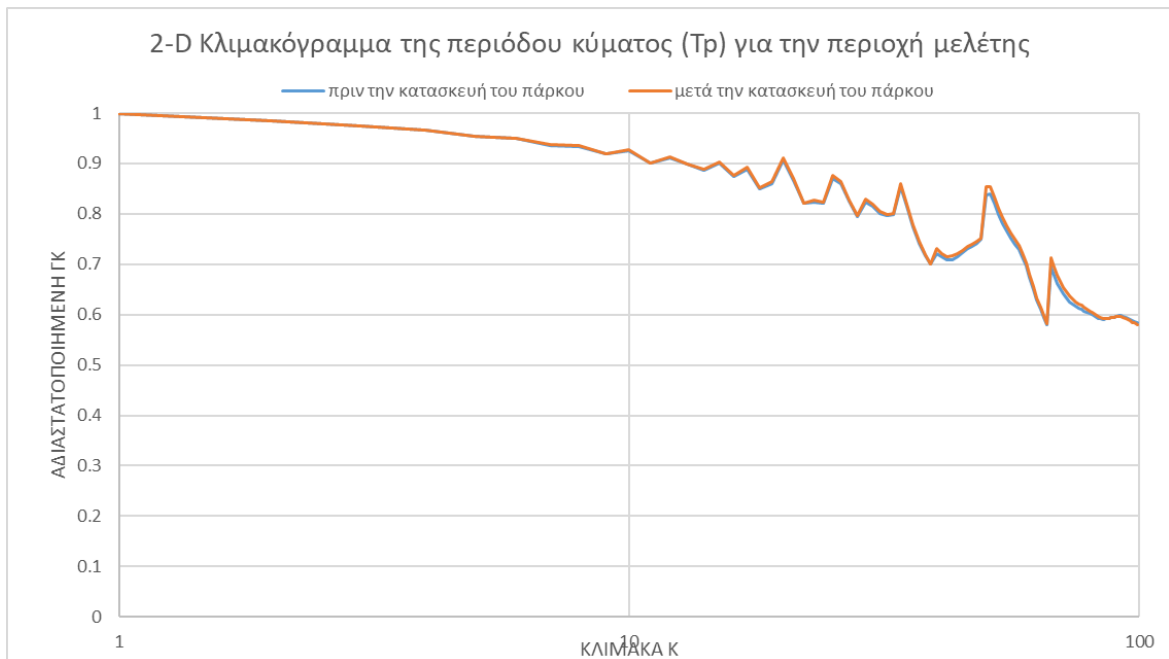
Για την μεταβλητή του ύψους κύματος H_s :

Εκτός από την μονοδιάστατη απεικόνιση της διασποράς συναρτήσεως κλίμακας, ακολούθως αξιοποιείται και το εργαλείο της δισδιάστατης απεικόνισης (2-D Climacogram).



4. 59 Κλιμακόγραμμα 2-D του ύψους κύματος για την περιοχή μελέτης

όπου ο συντελεστής Hurst-Kolmogorov υπολογίζεται $H=0,997646$ πρωτύτερα της κατασκευής του αιολικού πάρκου και $H=0,997662$ μεταγενέστερα.



4. 60 Κλιμακόγραμμα 2-D της περιόδου κύματος για την περιοχή μελέτης

Όπου ο συντελεστής Hurst-Kolmogorov υπολογίζεται $H = 0.997938$ πρωτύτερα της κατασκευής του αιολικού πάρκου και $H = 0.997948$ μεταγενέστερα.

4.6.5 Συνθετική χρονοσειρά και διαγράμματα υπολογισμού

Μεταβλητή της στοχαστικής προσομοίωσης αποτελεί ο άνεμος, συγκεκριμένα η ταχύτητα ανέμου, καθώς αυτός δημιουργεί τους ανεμογεννείς κυματισμούς στο πεδίο.

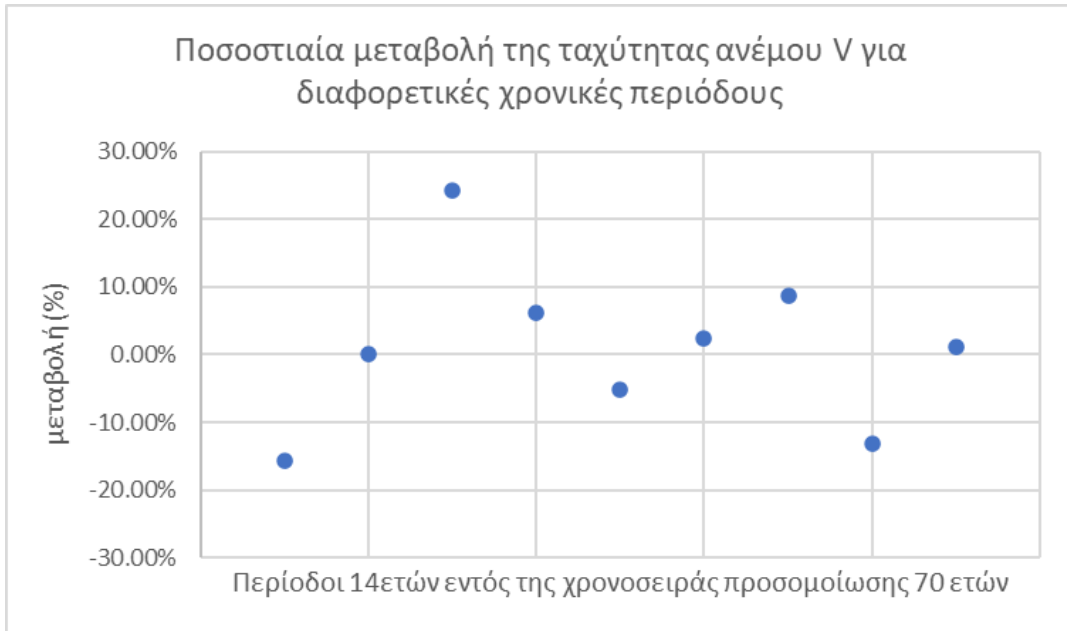
Η διαθέσιμη χρονική περίοδος δεδομένων είναι μικρή (μόνο 14 έτη). Έτσι, ακολουθεί η στοχαστική σύνθεση χρονοσειράς, διερχόμενες από το σημειακό κέντρο της περιοχής μελέτης, με χαρακτηριστικά εκείνα της ιστορικής. Για την προσαρμογή του μοντέλου έγινε χρήση των τεσσάρων πρώτων ροπών της χρονοσειράς μετά την κατασκευή του υπεράκτιου πάρκου και του μονοδιάστατου κλιμακογράμματος στο ορισμένο 'σημειακό κέντρο' (κλιμακόγραμμα μιας διάστασης).

Συγκεκριμένα, η παραγόμενη συνθετική χρονοσειρά διατηρεί τις τέσσερις πρώτες ροπές και εφαρμόζεται στο κλιμακόγραμμα, της ιστορικής χρονοσειράς μετά την κατασκευή του πάρκου. Η στοχαστική σύνθεση πραγματοποιείται με στόχο της ανάδειξη της υπεροχής των κλιματικών έναντι των τοπικών μεταβολών εξαιτίας του πάρκου. Για τον λόγο αυτό παράγεται χρονοσειρά μήκους 70 ετών.

Αρχικά για την χρονοσειρά αυτή μορφώνεται ένα διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής της ταχύτητας ανέμου V για διαφορετικές χρονικές περιόδους. Η ποσοστιαία μεταβολή ορίζεται από την:

$$\Delta V (\%) = ([\text{ταχύτητα } V \text{ μετά το πάρκο}] - [\text{ταχύτητα } V \text{ πριν το πάρκο}]) / [\text{ταχύτητα } V \text{ πριν το πάρκο}]$$

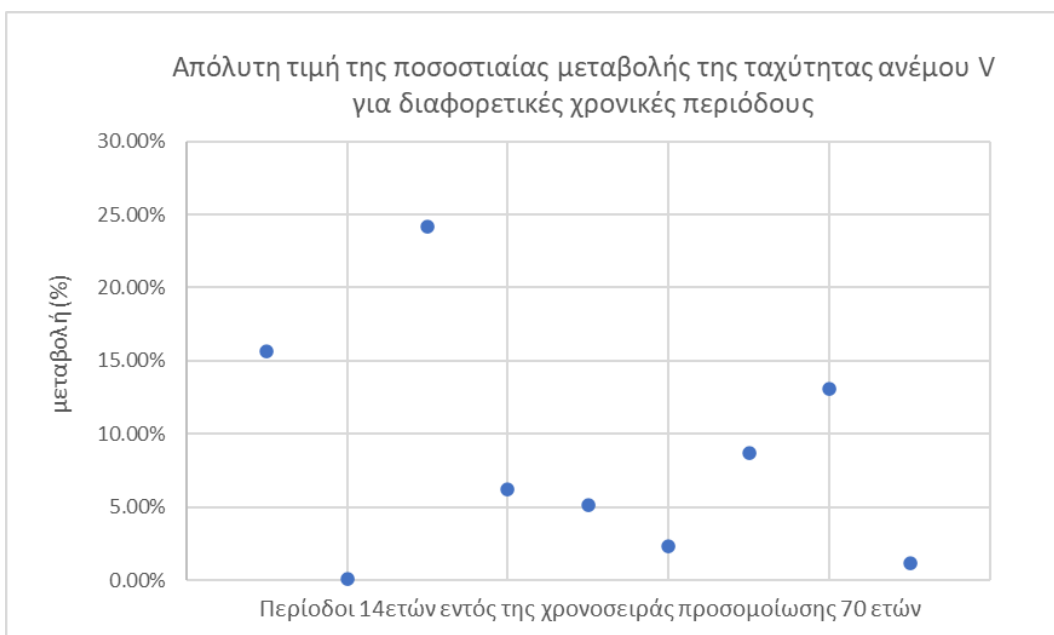
Οι χρονικές περίοδοι έχουν μήκος 14 ετών, όσο και η ιστορική χρονοσειρά, αλλά δεν περιλαμβάνουν την περίοδο πριν και μετά την κατασκευή του πάρκου, αλλά ορίζονται τυχαία στο διάστημα των 70 χρόνων.



4. 61 Ποσοστιαία μεταβολή της ταχύτητας ανέμου V για διαφορετικές χρονικές περιόδους

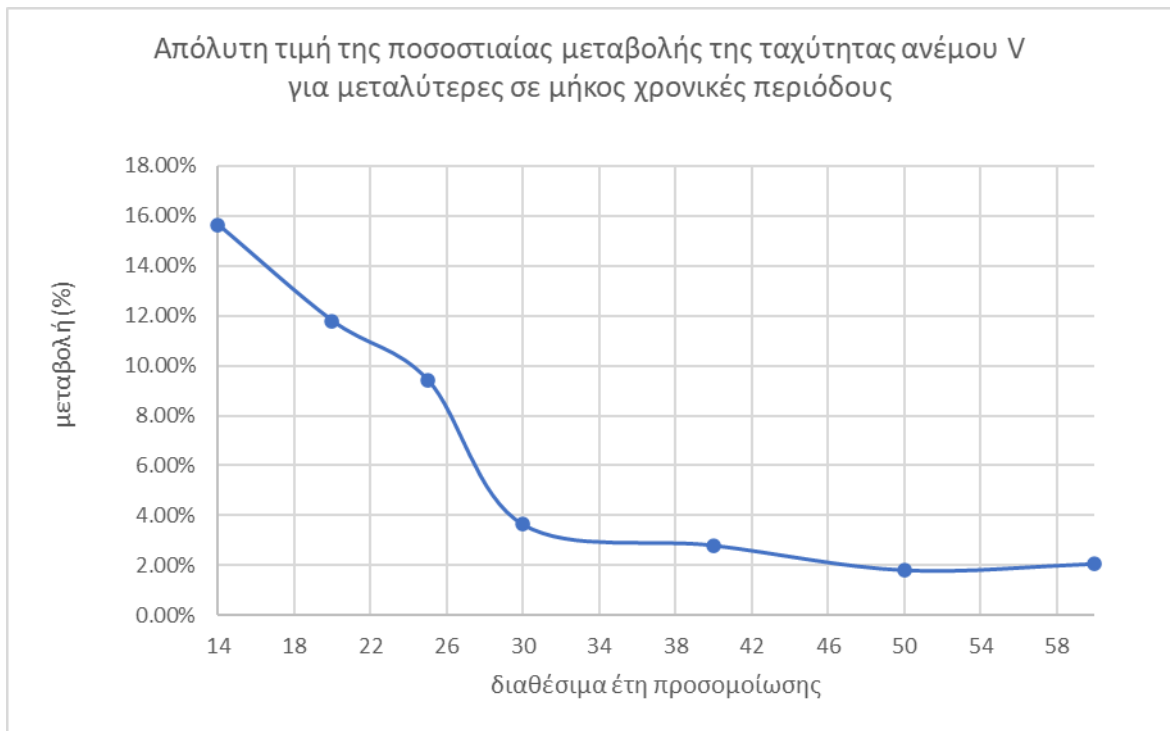
Για διαφορετικές περιόδους οι τιμές της ποσοστιαίας μεταβολής κυμαίνονται από -20% έως και +30%.

Ακόμη, παρουσιάζεται παρακάτω και η απόλυτη τιμή της ποσοστιαίας αυτής μεταβολής.



4. 62 Απόλυτη τιμή της ποσοστιαίας μεταβολής της ταχύτητας ανέμου V για διαφορετικές χρονικές περιόδους

Τέλος, μορφώνεται διάγραμμα της απόλυτης τιμής της ποσοστιαίας μεταβολής της ταχύτητας ανέμου V για περιόδους πριν και μετά την κατασκευή του αιολικού πάρκου. Κέντρο του δείγματος αποτελεί το έτος 2012, όποτε και κατασκευάστηκε το υπεράκτιο πάρκο London Array. Λαμβάνει τιμές συμμετρικές εκατέρωθεν αυτού. Για παράδειγμα το δείγμα 20 ετών, λαμβάνονται 10 έτη πριν και 10 έτη μετά την κατασκευή του πάρκου από τα διαθέσιμα έτη της προσομοίωσης.



4. 63 Απόλυτη τιμή της ποσοστιαίας μεταβολής της ταχύτητας ανέμου V για μεγαλύτερες σε μήκος χρονικές περιόδους

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

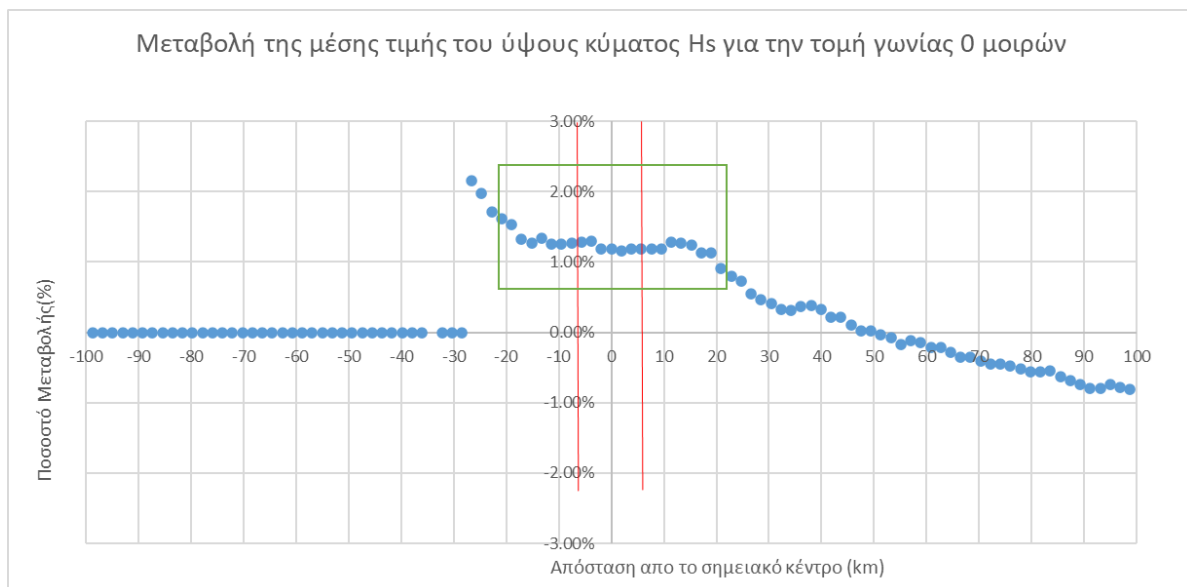
5.1 Συζήτηση

Μετά την εκτέλεση όλων των παραπάνω αναλύσεων, σκόπιμη είναι η προσεκτική αξιολόγησή τους. Τα εξαγόμενα συμπεράσματα χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες: (α) τα συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση του αιολικού πάρκου στην κίνηση των κυματισμών, (β) τα συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση του αιολικού πάρκου στην ροή του ανέμου και (γ) τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την στοχαστική σύνθεση χρονοσειρών.

5.1.1 Συμπεριφορά του κύματος

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα τομών διερχόμενα από το σημειακό κέντρο του αιολικού πάρκου για τις γωνίες : (α) 0° , (β) 45° και (γ) 90° .

Η περίπτωση των 0° φαίνεται να είναι η πιο χαρακτηριστική εκ των υπολοίπων λόγω του ότι οι κυματισμοί διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις χωρίς κάποιο στερεό όριο να παρεμβάλλεται και του ότι η κύρια διεύθυνση ανέμων στην περιοχή είναι η Δυτική.



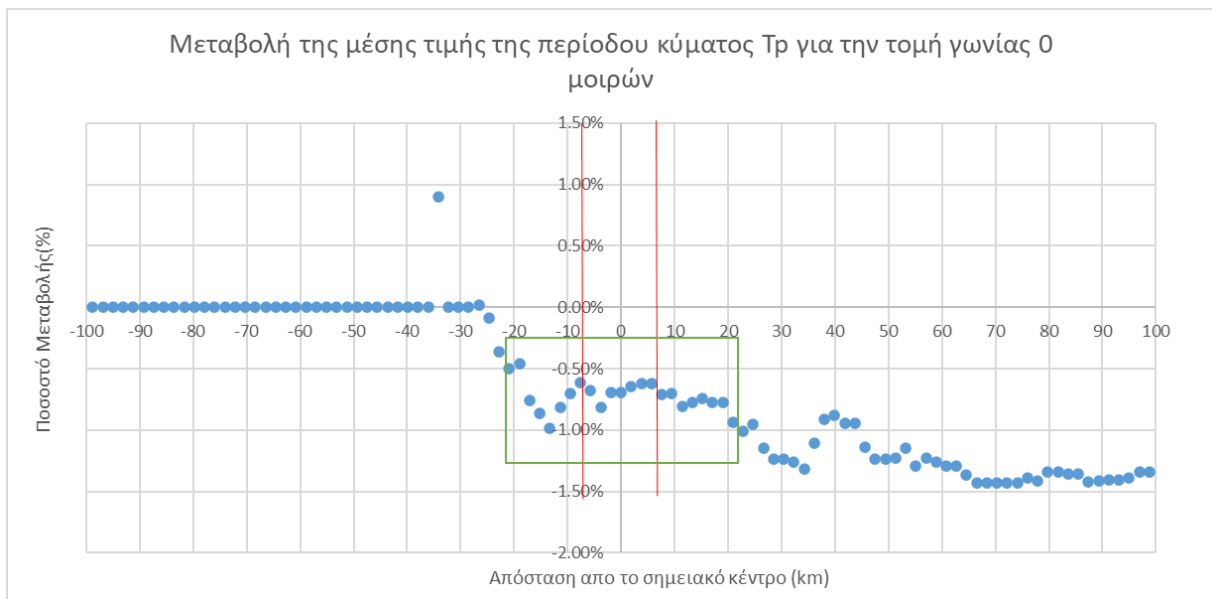
5. 1 Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής του ύψους κύματος H_s για τομή γωνίας 0 μοιρών

Εντός των γραμμών στο διάγραμμα, βρίσκεται το αιολικό πάρκο και εντός πλαισίου η περιοχή επίδρασης αυτού. Εύκολα βγαίνει το συμπέρασμα ότι η κίνηση των κυματισμών 20km ανάντη και 20km κατάντη του σημείου 0 , όπου και βρίσκεται το σημειακό κέντρο του αιολικού πάρκου όπως το ορίσαμε παραπάνω, δεν είναι ανεμπόδιστη. Υπάρχει κάποια κατασκευή η οποία ανακόπτει την ανοδική τάση της μεταβολής στο ύψος κύματος λόγω κλιματικών εμφανών συνθηκών. Η κατασκευή η οποία προκαλεί αυτή την "στασιμότητα" είναι το υπεράκτιο αιολικό πάρκο του London Array. Φαίνεται πως ενώ η έκταση του είναι 122km^2 (ακτίνα 6km κατά προσέγγιση), η ακτίνα επίδρασης του είναι περίπου 3 φορές μεγαλύτερη, περί τα 20km . Αυτό

βρίσκεται σε συμφωνία με την βιβλιογραφία (Fischereit J. et al., 2022), για αιολικά πάρκα μικρότερης έκτασης.

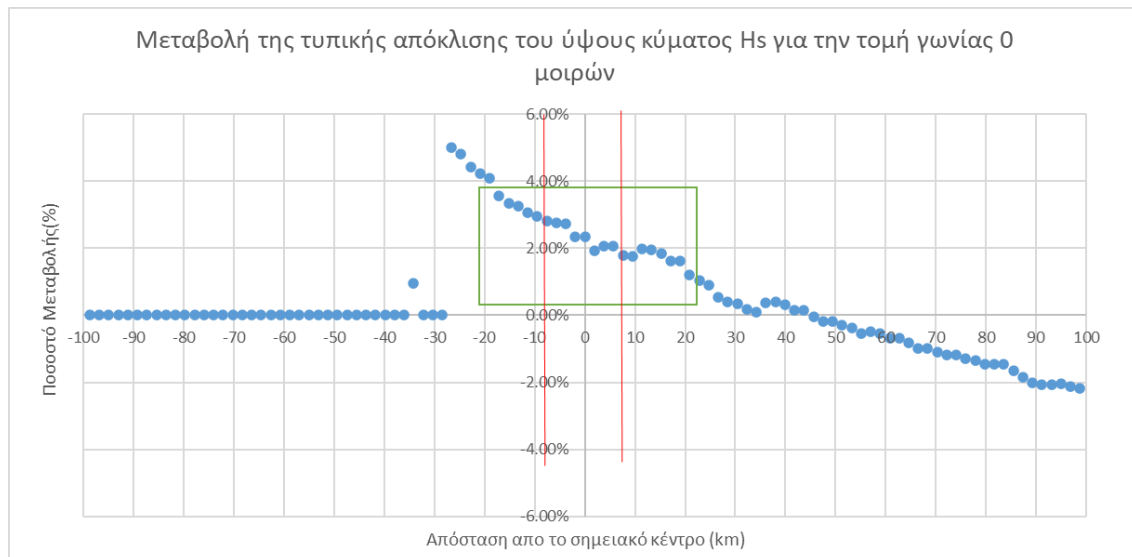
Η συνολική απομείωση του ύψους κύματος λόγω της παρουσίας του υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι της τάξης του 1% .

Όσον αφορά στην συμπεριφορά της περιόδου κύματος T_p των κυματισμών, το ποσοστό μεταβολής είναι μικρότερο της τάξης του 1%. Εντός των γραμμών βρίσκεται το αιολικό πάρκο και εντός πλαισίου η περιοχή επίδρασης αυτού.



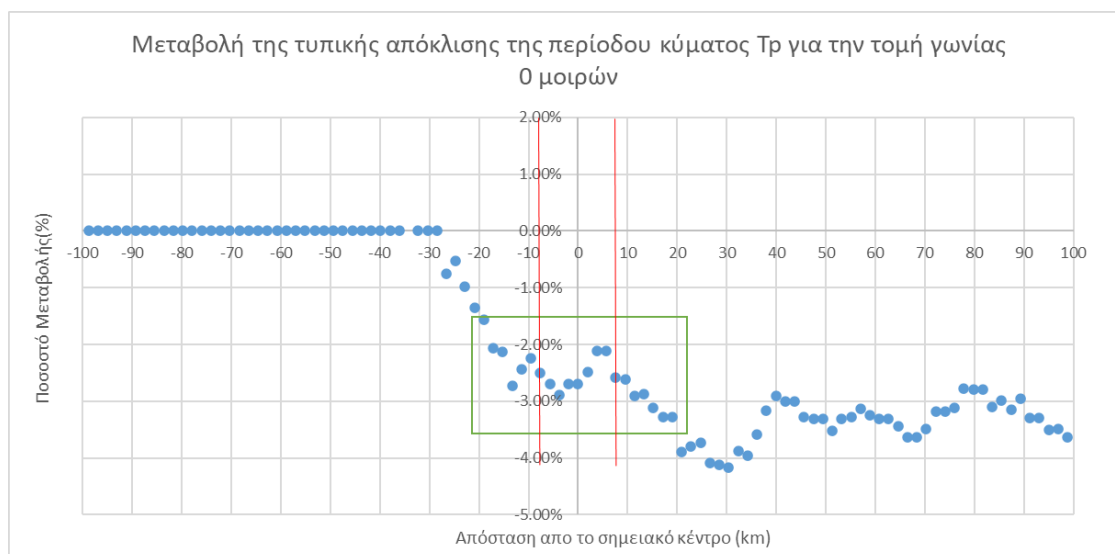
5. 2 Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής της περιόδου κύματος T_p για τομή γωνίας 0 μοιρών

Γενικότερα για την περιοχή επίδρασης του πάρκου, εντός ακτίνας 20km από το σημειακό κέντρο, οι μεγαλύτερες της μέση τιμής ροπές (τυπική απόκλιση, ασυμμετρία και κύρτωση) φαίνεται να εμφανίζουν χαμηλότερα ποσοστά απομείωσης για την μεταβλητή της περιόδου από ότι του ύψους κύματος.



5. 3 Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης του ύψους κύματος H_s για τομή γωνίας 0 μοιρών

Αντίστοιχα ισχύει και για την μεταβλητή της περιόδου κύματος. Παραδείγματος χάριν, για την ροπή της τυπικής απόκλισης στην περίπτωση της περιόδου, η απομείωση είναι μικρότερη της τάξης του τάξης του 1%.



5. 4 Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης της περιόδου κύματος T_p για τομή γωνίας 0 μοιρών

Αντίστοιχες τιμές προκύπτουν και για τις υπόλοιπες ροπές. Επομένως η παρουσία του υπεράκτιου αιολικού πάρκου έχει μεγαλύτερη επίδραση στην μεταβολή της μέσης τιμής των κυματικών μεταβλητών. Αυτό βρίσκεται επίσης σε συμφωνία με την βιβλιογραφία (Fischereit J. et al., 2022).

Επίσης παρατηρείται ότι στην μεταβλητή του ύψους κύματος ασκείται μεγαλύτερη επίδραση από ότι στην μεταβλητή της περιόδου. Και αυτή η παρατήρηση βρίσκεται σε συμφωνία με την βιβλιογραφία.

Τέλος, αξιολογώντας τα κλιμακογράμματα μιας διάστασης και για τις δυο μεταβλητές ενδιαφέροντος των κυματισμών, το ποσοστό μεταβολής του συντελεστή Hurst-Kolmogorov στην περίπτωση του ύψους κύματος είναι της τάξης του 14%, ενώ η τιμή της διασπορά διατηρείται υψηλή και για μεγαλύτερες κλίμακες, τόσο πριν όσο και μετά την κατασκευή του αιολικού πάρκου.

Αντίστοιχα από το κλιμακόγραμμα δυο διαστάσεων συμπεραίνεται ότι χωρική συσχέτιση πρωτύτερα και μεταγενέστερα της κατασκευής του έργου παραμένει σχεδόν ίδια, με ποσοστό μεταβολής μικρότερο του 1%. Συνεπώς η παρουσία του αιολικού πάρκου, μπορεί εντός της ακτίνας επίδρασής του να επηρεάζει ελαφρώς την δυναμική Hurst-Kolmogorov των κυματισμών, αλλά συνολικά η περιοχή μελέτης φαίνεται να μένει σχεδόν ανεπηρέαστη.

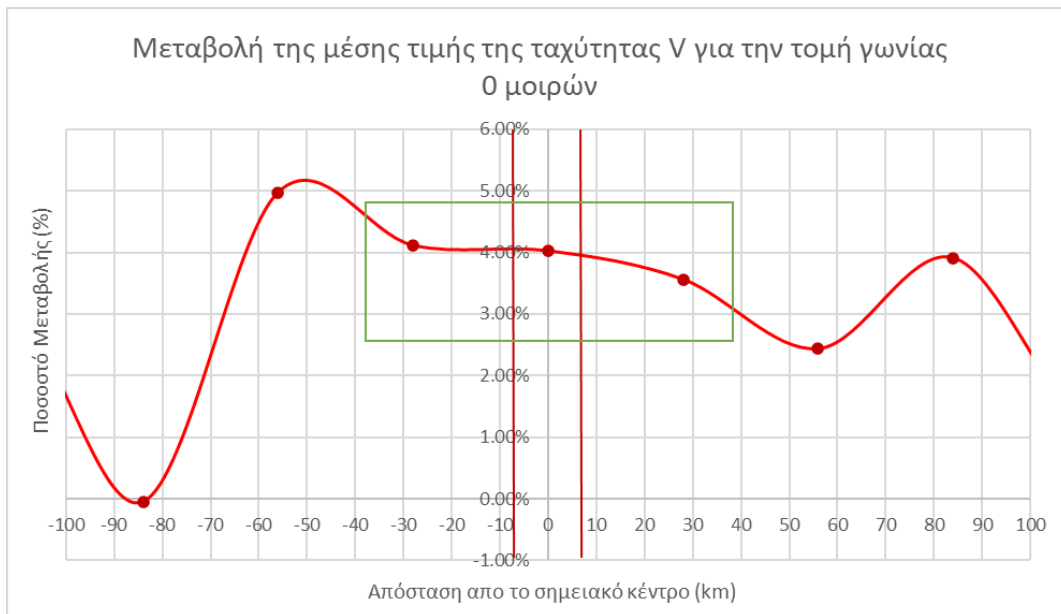
Ως προς την μεταβλητή της περιόδου του κύματος, μέσω του κλιμακογράμματος μιας διάστασης, υπολογίζεται ότι το ποσοστό μεταβολής του συντελεστή Hurst-Kolmogorov στην περίπτωση της περιόδου κύματος είναι της τάξης του 4%, ενώ η τιμή της διασπορά διατηρείται υψηλή και για μεγαλύτερες κλίμακες, τόσο πριν όσο και μετά την κατασκευή του αιολικού πάρκου.

Αντίστοιχα από το κλιμακόγραμμα δυο διαστάσεων, για την περίοδο κύματος, συμπεραίνεται ότι χωρική συσχέτιση πρωτύτερα και μεταγενέστερα της κατασκευής του έργου παραμένει σχεδόν ίδια, με ποσοστό μεταβολής μικρότερο του 1%. Συνεπώς η παρουσία του αιολικού πάρκου, μπορεί εντός της ακτίνας επίδρασής του να επηρεάζει ελαφρώς την δυναμική Hurst-Kolmogorov των κυματισμών, αλλά συνολικά η περιοχή μελέτης φαίνεται να μένει σχεδόν ανεπηρέαστη.

5.1.2 Συμπεριφορά του ανέμου

Όπως και τις μεταβλητές του κύματος, έτσι και για την ταχύτητα ανέμου, στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα τομών διερχόμενα από το σημειακό κέντρο του αιολικού πάρκου για τις γωνίες : (α) 0°, (β) 45° και (γ) 90°.

Η περίπτωση των 0° φαίνεται να είναι η πιο χαρακτηριστική εκ των υπολοίπων λόγω του ότι οι ανεμογενείς κυματισμοί ,που ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία, διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις χωρίς κάποιο στερεό όριο να παρεμβάλλεται και του ότι η κύρια διεύθυνση ανέμων στην περιοχή είναι η Δυτική.



5. 5 Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής της ταχύτητας ανέμου V για τομή γωνίας 0 μοιρών

Η περιοχή, όπως και παραπάνω, που οριοθετείται από τις γραμμές υποδεικνύει την έκταση του πάρκου, ενώ το πλαίσιο την περιοχή επίδρασης των κυματισμών. Η ακτίνα επίδρασης στην περίπτωση του ανέμου φαίνεται να είναι μεγαλύτερη, καθώς πάλι παρατηρείται μια ανομοιομορφία 30 km τόσο ανάντη όσο και κατάντη του σημειακού κέντρου. Η απόσταση στην οποία ακόμη παρατηρείται επίδραση της κατασκευής στην ταχύτητα ανέμου είναι περίπου 7 φορές μεγαλύτερη από την ακτίνα του έργου. Το ποσοστό απομείωσης της ταχύτητας ανέμου είναι της τάξης του 2%.

Όπως και για την μεταβλητή του ύψους κύματος, έτσι και για την περίοδο, οι μεγαλύτερες της μέσης τιμής ροπές έχουν μικρότερα ποσοστά απομείωσης. Για παράδειγμα, ενώ η μέση τιμή στην περιοχή επιρροής του πάρκου απομειώνεται κατά 2%, η τυπική απόκλιση απομειώνεται κατά 1%. Σε κάθε περίπτωση, για όλες τις ροπές είναι αναμφισβήτητη η παρουσία μιας κατασκευής περί του σημειακού κέντρου της περιοχής μελέτης.

Επιπλέον, από το μονοδιάστατο κλιμακόγραμμα του σημειακού κέντρου εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο συντελεστής Hurst-Kolmogorov αυξάνεται κατά 4% μετά την κατασκευή του αιολικού πάρκου. Η τιμή της διασπορά διατηρείται υψηλή και για μεγαλύτερες κλίμακες, τόσο πριν όσο και μετά την κατασκευή του αιολικού πάρκου.

5.1.3 Στοχαστική προσομοίωση

Από τα διαγράμματα ποσοστιαίων μεταβολών εύκολα συμπεραίνεται ότι οι μεταβολές της ταχύτητας ανέμου εντός μιας χρονικής περιόδου -14 ετών-, εντός του μήκους μιας χρονοσειράς, παίρνει αρκετά μεγάλες τιμές. Οι διαφορές είναι της τάξης του 30%, ενώ οι αντίστοιχες τοπικές από την κατασκευή του πάρκου της τάξης του 2%.

Ακόμη, στο διάγραμμα ποσοστιαίων μεταβολών της ταχύτητας ανέμου V οι περίοδοι υπολογισμού έχουν μεγαλύτερο μήκος και εκτείνονται συμμετρικά αριστερά και δεξιά του

έτους 2012 στην κλίμακα του χρόνου. Όσο τα διαθέσιμα χρόνια μετρήσεων αυξάνονται, η καμπύλη δείχνει μείωση της ποσοστιαίας μεταβολής της ταχύτητας ανέμου V.

5.2 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, συμπεραίνεται ότι η επίδραση του υπεράκτιου πάρκου στο κυματικό και αιολικό πεδίο της περιοχής είναι αμελητέα. Η μεταβολή του ύψους κύματος, εντός της περιοχής επίδρασης είναι της τάξης του 1%. Η μεταβολή της περιόδου κύματος, εντός της ίδιας περιοχής επίδρασης είναι μικρότερη της τάξης του 1%. Τέλος η μεταβολή της ταχύτητας ανέμου, εντός της περιοχής επίδρασης - μεγαλύτερη ακτίνα επίδρασης από ότι του κύματος - είναι της τάξης του 2%.

Έτσι, η αμελητέα επίδραση του υπεράκτιου έργου στις μεταβλητές κύματος και ανέμου, αποτέλεσε αφορμή για την σύγκριση των παραπάνω δεδομένων με τις κλιματικές μεταβολές που παρατηρούνται στην περιοχή.

Ήδη από τους χωρικούς χάρτες μεταβολής των κεντρικών ροπών, είναι διακριτή η υπεροχή της κλιματικής επίδρασης έναντι αυτής της τοπικής (λόγω της κατασκευής). Πρώτα αυτό επιβεβαιώνεται από τα κλιμακογράμματα μιας και δυο διαστάσεων, τα οποία δεν έχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις πριν και μετά την κατασκευή του πάρκου. Έπειτα, με την παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς για την μεταβλητή της ταχύτητας ανέμου, οι διαφορές της ταχύτητας του ανέμου, σε περιόδους εκτός της κατασκευής του πάρκου φαίνεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Τέλος, για μεγαλύτερο δείγμα μετρήσεων, μέσω της συνθετικής χρονοσειράς, η διαφορά πριν και μετά την κατασκευή του πάρκου, της ταχύτητας του ανέμου μειώνεται.

Όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνουν ότι οι κλιματικές μεταβολές είναι επικρατέστερες των τοπικών μεταβολών, που προκαλεί η κατασκευή ενός υπεράκτιου πάρκου. Αυτό φυσικά συμπεραίνεται για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης και το συγκεκριμένο θαλάσσιο έργο. Ενδεχόμενα, για μεγαλύτερα αναπτύγματα πελάγους, για διαφορετικές ανεμολογικές συνθήκες, για διαφορετική κλίμακα έργου κ.ά. τα αποτελέσματα να διαφέρουν.

Τέλος, είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με ορισμένους περιορισμούς. Κάποιοι από αυτούς είναι ότι τα διαθέσιμα δεδομένα (reanalysis), ενέχουν αβεβαιότητα. Συγκεκριμένα για την περίπτωση του ανέμου, το επιλεχθέν dataset έχει πιο αδρή ανάλυση από ότι αυτή του κύματος. Ακόμη, λόγω υπολογιστικών δυνατοτήτων δεν έγινε η χρήση μοντέλου προσομοίωσης της συμπεριφοράς των μεταβλητών.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ελληνόγλωσση

Αθανασιάδης Γ. Γ. (2015), Ανάλυση Πλωτών Ανεμογεννητριών, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Γ. Σ. Τριανταφύλλου, 2018, Θεωρία Θαλάσσιων Κυματισμών

Καρδακάρης Κ., 2020, Στοχαστική διερεύνηση και προσομοίωση των ανεμογενών κυματισμών για παραγωγή ενέργειας: εφαρμογές για αξιοποίηση, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Μέμος Κ., (2013), Εισαγωγή στα λιμενικά έργα, Αθήνα

Παπατσούτσος Ι. , Κουτσογιάννης Δ., Παπαλεξίου Σ.Μ., (2015), Στατιστική ανάλυση ακραίων ταχυτήτων του ανέμου, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σημειώσεις του μαθήματος Στοχαστικές Μέθοδοι 9ου εξαμήνου, 2022, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα

Φυτίλης Δ., (2012), Εκτίμηση αιολικού δυναμικού/δυναμικού στον Ελληνικό Θαλάσσιο χώρο και προτάσεις για Υπεράκτια Αιολικά πάρκα, Δημήτριος Φυτίλης, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα

Ξενόγλωσση

Bärfuss K., Schulz-Stellenfleth, J., & Lampert, A. (2021). The Impact of Offshore Wind Farms on Sea State Demonstrated by Airborne LiDAR Measurements. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6), 644. <https://doi.org/10.3390/jmse9060644>

Christensen E. D., Johnson M., Sørensen O. R., Hasager C. B., Badger M., Larsen S. E. (2013), Transmission of wave energy through an offshore wind turbine farm, *Coastal Engineering*, Volume 82, Pages 25-46, ISSN 0378-3839.

Dimitriadis P., Koutsoyiannis D. (2018). Stochastic synthesis approximating any process dependence and distribution. *Stoch Environ Res Risk Assess* 32, 1493–1515 <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1540-2>

Fischereit, Jana, Larsén, Xiaoli G.L., Hahmann A., Andrea (2022). Climatic Impacts of Wind-Wave-Wake Interactions in Offshore Wind Farms. *Frontiers in Energy Research*. 10. 881459. 10.3389/fenrg.2022.881459.

Jenkins D. A., Bakhoday Paskyabi M., Fer I., Gupta A., Adakudlu M., (2012), Modelling the Effect of Ocean Waves on the Atmospheric and Ocean Boundary Layers, *Energy Procedia*, Volume 24, Pages 166-175, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.098>

Kalvig S., Manger E., Hjertager B.H., Jakobsen B.J., (2014), Wave Influenced Wind and the Effect on Offshore Wind Turbine Performance, *Energy Procedia*, Volume 53, Pages 202-213, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.229>

Katikas L., Dimitriadis P., Koutsoyiannis D., Kontos T., 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*, Volume 295, 116873, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116873>.

Koutsoyiannis, D., & Dimitriadis, P. (2021). Towards Generic Simulation for Demanding Stochastic Processes. *Sci*, 3(3), 34. <https://doi.org/10.3390/sci3030034>

Koutsoyiannis. D. (2020). Stochastic of Hydroclimatic Extremes: a Cool Look at risk, Department of Water Resources and Environmental Engineering., School of Civil Engineering., National Technical University of Athens., Edition 0 (For students)., Athens 2020.

Lehmann, L. (2007). Wave Propagation in Infinite Domains wWith Applications to Structure Interaction. *Springer*.

Ondřej Ferčák, Juliaan Bossuyt, Naseem Ali, Raúl Bayoán Cal (2022), Decoupling wind–wave–wake interactions in a fixed-bottom offshore wind turbine, *Applied Energy*, Volume 309, , 118358, ISSN 0306-2619.

Ponce de León S., Bettencourt J.H., Kjerstad N., (2011), Simulation of irregular waves in an offshore wind farm with a spectral wave model, *Continental Shelf Research*, Volume 31, Issue 15, Pages 1541-1557, ISSN 0278-4343, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.07.003>.

Porchetta S., Muñoz-Esparza D., Munters W., Van Beeck J., Van Lipzig N. (2021) Impact of ocean waves on offshore wind farm power production, *Renewable Energy*, Volume 180, , Pages 1179-1193, ISSN 0960-1481.

Sargentis G.-F., P. Dimitriadis P., R. Ioannidis R., T. Iliopoulou T., and D. Koutsoyiannis D., (2019), Stochastic evaluation of landscapes transformed by renewable energy installations and civil works, *Energies*, 12 (4)., 2817, doi:10.3390/en12142817, 2019.

Sargentis, G., Iliopoulou, T., Dimitriadis, P.G., & Koutsoyiannis, D. (2020), Spatial Hurst–Kolmogorov Clustering. *In Encyclopedia*. <https://encyclopedia.pub/entry/2568>

Ιστοσελίδες

<https://londonarray.com/>

<https://www.navionics.com/fin/heatmap>

<https://www.weatheronline.co.uk/weather/maps/>

<https://www.4coffshore.com/windfarms>

<https://eclass.upatras.gr>

<https://ypen.gov.gr/energeia/ape/technologies/aioliki/>

7. ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Η γλώσσα προγραμματισμού που επιλέχθηκε για την υλοποίηση των υπολογισμών είναι η Matlab. Τα δορυφορικά δεδομένα του Copernicus Marine service είναι σε μορφή netCDF.

- ✚ Υπολογισμός της διαφοράς της μέσης τιμής της περιοχής μελέτης για την χρονική περίοδο πριν και μετά την κατασκευή του πάρκου

```
clc;clear all;
for k=4:12;
if k<=9; filename=['200' num2str(k) '.nc']; else filename=['20'
num2str(k) '.nc']; end
A=ncread(filename,'VTPK'); B(:,:,k)=tsnanmean(A,3); [k
tsnanmean(B(:))]
end
C=tsnanmean(B,3); %xlswrite('2_mean.xlsx',C)
for k=13:21;
if k<=9; filename=['200' num2str(k) '.nc']; else filename=['20'
num2str(k) '.nc']; end
D=ncread(filename,'VTPK'); E(:,:,k)=tsnanmean(D,3); [k
tsnanmean(E(:))]
end
F=tsnanmean(E,3); %xlswrite('2_mean.xlsx',C)
G=F-C;
pcolor(G);
mymap=pcolor(G);
mymap.EdgeAlpha=0;
```

- ✚ Υπολογισμός της διαφοράς της τυπικής απόκλισης της περιοχής μελέτης για την χρονική περίοδο πριν και μετά την κατασκευή του πάρκου

```
clc;clear all;
for k=4:12;
if k<=9; filename=['200' num2str(k) '.nc']; else filename=['20'
num2str(k) '.nc']; end
A=ncread(filename,'VTPK'); B(:,:,k)=tsnanstd(A,0,3); [k
tsnanstd(B(:))]
end
C=tsnanstd(B,0,3); %lswrite('xartis_std_london_2013-2021.xlsx',C)
for k=13:21;
if k<=9; filename=['200' num2str(k) '.nc']; else filename=['20'
num2str(k) '.nc']; end
D=ncread(filename,'VTPK'); E(:,:,k)=tsnanstd(D,0,3); [k
tsnanstd(E(:))]
end
F=tsnanstd(D,0,3); %lswrite('xartis_std_london_2013-2021.xlsx',C)
G=F-C;
pcolor(G);
mymap=pcolor(G);
mymap.EdgeAlpha=0;
```

- ✚ Υπολογισμός της διαφοράς της ασυμμετρίας της περιοχής μελέτης για την χρονική περίοδο πριν και μετά την κατασκευή του πάρκου

```
clc;clear all;
```

```

for k=4:12;
if k<=9; filename=['200' num2str(k) '.nc']; else filename=['20'
num2str(k) '.nc']; end
A=ncread(filename,'VTPK'); B(:,:,k)=skewness(A,0,3); [k
skewness(B(:))]
end
C=skewness(B,0,3); %xlswrite('2_skew.xlsx',C)
for k=13:21;
if k<=9; filename=['200' num2str(k) '.nc']; else filename=['20'
num2str(k) '.nc']; end
D=ncread(filename,'VTPK'); E(:,:,k)=skewness(D,0,3); [k
skewness(E(:))]
end
F=skewness(E,0,3); %xlswrite('2_skew.xlsx',C)
G=F-C;
pcolor(G);
mymap=pcolor(G);
mymap.EdgeAlpha=0;

```

- ✚ Υπολογισμός της διαφοράς της κύρτωσης της περιοχής μελέτης για την χρονική περίοδο πριν και μετά την κατασκευή του πάρκου

```

clc;clear all;
for k=4:12;
if k<=9; filename=['200' num2str(k) '.nc']; else filename=['20'
num2str(k) '.nc']; end
A=ncread(filename,'VHM0'); B(:,:,k)=kurtosis(A,0,3); [k
kurtosis(B(:))]
end
C=kurtosis(B,0,3); %xlswrite('2_kurtosis.xlsx',C)
for k=13:21;
if k<=9; filename=['200' num2str(k) '.nc']; else filename=['20'
num2str(k) '.nc']; end
D=ncread(filename,'VHM0'); E(:,:,k)=kurtosis(D,0,3); [k
kurtosis(E(:))]
end
F=kurtosis(E,0,3); %xlswrite('2_kurtosis.xlsx',C)
G=F-C;
pcolor(G);
mymap=pcolor(G);
mymap.EdgeAlpha=0;

```

- ✚ Υπολογισμός της χρονοσειράς για ένα κελί της περιοχής μελέτης για την χρονική περίοδο πριν ή μετά την κατασκευή του πάρκου

```

%xronoseires gia aioliko
clc; clear all; format long;
MK=0;
for MI=28 % 1:199
for MJ=1:223 % 1:223
MK=MK+1; J=0; PI=MI; PJ=MJ;
for I=2013:2021
filename=[num2str(I) '.nc'];
A=ncread(filename,['VHM0']);
for K=1:2920

```



```

J=J+1;
M(J,MK)=A(PI,PJ,K);
end
end
end
MI
end
xlswrite('xronoseira28.xlsx',M)
✚ Υπολογισμός του δισδιάστατου κλιμακογράμματος για την περιοχή μελέτης πριν και
μετά την κατασκευή του αιολικού πάρκου
clc; clear all; format long;

DirRead='D:\10_examino\diplomatikiki\London Array\new wind\Alex\';
DirSave='ProcessTxts\'; XlsName='Climacograms';

Waves=dir(DirRead); NL=numel(Waves)-2; StatsAll=[]; CMall2=[];
CMall3=[]; Mom{1}='mean'; Mom{2}='stdev'; Mom{3}='skewness';
Mom{4}='kurtosis';
for PF=1:NL
tic;
DM=load([DirRead '\\' Waves(PF+2).name]); %PC=imread([DirRead '\\'
Landscape(PF+2).name]); PG=rgb2gray(PC); DM=im2double(PG);
NM=0; NI=numel(DM(:,1)); NJ=numel(DM(1,:)); NIJ=min(NI,NJ);
M=(1:floor(NIJ/2))'; %X=factor(NI); X=[1 X]; K=0; for L=1:numel(X)-2;
for I=1:numel(X)-L; for J=1:numel(X)-I-L+1; K=K+1;
M(K)=prod(X(I:I+J+L-1)); end; end; end; M=[1 sort(unique(M))];
M=M(1:end-1);
for I=1:numel(M)
MAS=NaN(floor(NIJ/M(I)),floor(NIJ/M(I)));
for K=1:floor(NIJ/M(I))
for L=1:floor(NIJ/M(I))
MAS(K,L)=nanmean(nanmean(DM(M(I)*(K-1)+1:M(I)*K,M(I)*(L-
1)+1:M(I)*L)));
end
end
NM=NM+1; CM(NM,1)=M(I); CM(NM,2)=nanvar(MAS(:));
end

CM(:,3)=CM(:,2)/CM(1,2); Stats=[nanmean(DM(:)) nanstd(DM(:))
skewness(DM(:)) kurtosis(DM(:)) NIJ^2]';
CMall2=[CMall2 CM(:,2)]; CMall3=[CMall3 CM(:,3)]; StatsAll=[StatsAll
Stats]; Names{PF}=Waves(PF+2).name;
save([DirSave '\\' Waves(PF+2).name '.mat'], 'DM', 'CM');
[num2str(NI) ' ' num2str(NJ)]
end
xlswrite([XlsName '.xlsx'],Names,'CM','B5'); xlswrite([XlsName
'.xlsx'],M,'CM','A6'); xlswrite([XlsName '.xlsx'],CMall2,'CM','B6');
xlswrite([XlsName '.xlsx'],Names,'CM1','B5'); xlswrite([XlsName
'.xlsx'],M,'CM1','A6'); xlswrite([XlsName
'.xlsx'],CMall3,'CM1','B6');
xlswrite([XlsName '.xlsx'],Names,'Stats','B5'); xlswrite([XlsName
'.xlsx'],Mom,'Stats','A6'); xlswrite([XlsName
'.xlsx'],StatsAll,'Stats','B6');

```

✚ Παραγωγή συνθετικής χρονοσειράς με την μέθοδο GHK_SMA

```
function [S]=SMA4_GHK(Sm,Sv,Ss,Sk,H,q,N)

l=Sv; NA=N; NC=2*NA+1;
Dt=1; k=(0:NC+1)'; Cl=1./(1+k*Dt/q).^(2-2*H);
r=(0:NC)'; Cd=0.5*(((r+1)).^2).*Cl(r+2)+(abs((r-1)).^2).*Cl(abs(r-1)+1)-2*(r.^2).*Cl(r+1));
Sd=4*Dt*(real(fft(Cd))-Cl(2))+2*Dt*Cl(2);
AcT=abs(fft(sqrt(2*Sd)))/(2*NC); AcT=AcT(1:NA+1);

if Cd(1)>=(AcT(1)^2+2*sum(AcT(2:NA+1).^2)); AcE=sqrt((Cd(1)-(AcT(1)^2+2*sum(AcT(2:NA+1).^2))/(2*NA+1)+((AcT(1)+2*sum(AcT(2:NA+1)))/(2*NA+1)).^2)-((AcT(1)+2*sum(AcT(2:NA+1)))/(2*NA+1))); else AcE=0;
end;
AcF=AcT+AcE; AcP=sqrt(Cd(1)./(AcF(1).^2+2*sum(AcF(2:NA+1).^2)));
Ac=AcP*AcF;
SA=[Ac(1+NA:-1:2)' Ac(1) Ac(2:NA+1)'];
Vm=0; Vv=1;
Vs=Ss*((Ac(1)^2+2*sum(Ac(2:NA+1).^2)).^(3/2))/(Ac(1)^3+2*sum(Ac(2:NA+1).^3));

if Sk~=3;
SUM=0; for I=2:NA; SUM=SUM+(Ac(I)^2)*sum(Ac(I+1:NA+1).^2); end
Vk=abs((((Ac(1)^2+2*sum(Ac(2:NA+1).^2)).^2)*Sk)-6*sum(Ac(2:NA+1).^4)-12*(Ac(1)^2)*sum(Ac(2:NA+1).^2)-24*SUM)/(Ac(1)^4+2*sum(Ac(2:NA+1).^4)));
else
Vk=3;
end

if (Ss==0)&&(Sk==3);
CW=1; a=Vm; b=Vv; c=0; d=0;
else
if (Vk-5/3*(Vs)^2-3<=0);
CW=2;
KKF=@(x) [Vs-(2*(abs(x(2))*beta(1+1/abs(x(1)),abs(x(2))))^3-3*abs(x(2))*beta(1+1/abs(x(1)),abs(x(2)))*abs(x(2))*beta(1+2/abs(x(1)),abs(x(2)))+abs(x(2))*beta(1+3/abs(x(1)),abs(x(2)))))/(abs(x(2))*beta(1+2/abs(x(1)),abs(x(2)))- (abs(x(2))*beta(1+1/abs(x(1)),abs(x(2))))^2)^1.5;
Vk-(-3*(abs(x(2))*beta(1+1/abs(x(1)),abs(x(2))))^4+6*(abs(x(2))*beta(1+2/abs(x(1)),abs(x(2))))*(abs(x(2))*beta(1+1/abs(x(1)),abs(x(2))))^2-4*abs(x(2))*beta(1+1/abs(x(1)),abs(x(2)))*abs(x(2))*beta(1+3/abs(x(1)),abs(x(2)))+abs(x(2))*beta(1+4/abs(x(1)),abs(x(2)))))/(abs(x(2))*beta(1+2/abs(x(1)),abs(x(2)))- (abs(x(2))*beta(1+1/abs(x(1)),abs(x(2))))^2)^2];
opt=optimset('Display','off'); warning('off','all');
[KKF,~]=fsolve(KKF,[1 10^2],opt);
a=abs(KKF(1)); b=abs(KKF(2)); d=sqrt(Vv/(b*beta(1+2/a,b)-(b*beta(1+1/a,b))^2)); c=Vm-b*d*beta(1+1/a,b);
else
CW=3;
c=sqrt(3/Vv/(Vk-5/3*(Vs)^2-3));
end
end
```

```

b=(c^2)*Vs*sqrt(Vv)/3;
d=(c^3)*Vv/(b^2+c^2);
a=Vm-b*d/c;
end
end

if CW==1; V=norminv(rand(N+2*NA,1),a,sqrt(b)); end
if CW==2; V=d*(1-(1-rand(N+2*NA,1)).^(1/b)).^(1/a)+c; end
if CW==3;
V1=norminv(rand(N+2*NA,1),0,1); V2=V1.^2; V3=d/c+V2/2/c^2-
sqrt(4*V2*d/c+(V2/c).^2)/2/c; V4=rand(N+2*NA,1);
Z=V3; Z(V4>1./(1+V3*c/d))=((d/c)^2)./V3(V4>1./(1+V3*c/d));
V=a+b*Z+sqrt(Z).*norminv(rand(N+2*NA,1),0,1);
end

S=zeros(N,1); for J=1:N; S(J,1)=SA*V(J:2*NA+J,1); end;
S=S/sqrt(Cl(2))*sqrt(Sv)+Sm;

end

```