



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΩΤΩΝ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΧΡΙΣΤΙΝΑΣ ΚΟΥΚΟΥΡΑ



Επιβλέπων Καθηγητής:
Γεώργιος Χ. Μπεργελές

Συνεπιβλέπων Καθηγητής:
Βασίλης Α. Ριζιώτης

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Στους γονείς μου
Μαρίνα και Μιχάλη

Στο σημείο αυτό θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Μπεργελέ, ο οποίος μέσα από τα μαθήματά του με ενέπνευσε ώστε να επιλέξω διπλωματική εργασία στον τομέα ρευστών και συγκεκριμένα γύρω από το αντικείμενο της αιολικής ενέργειας.

Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας δε θα ήταν εφικτή χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του. Τον ευχαριστώ τόσο για το βιβλιογραφικό υλικό που μου διέθεσε όσο και για τις συμβουλές και την καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια υλοποίησης της διπλωματικής μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ριζιώτη για τη θετική συμβολή του στην περαίωση αυτής της εργασίας, που με τον ενθουσιασμό του μου έδωσε κουράγιο να συνεχίσω στις δύσκολες στιγμές που αντιμετώπισα. Είμαι ευγνώμων για τη διάθεση του χρόνου του και την προθυμία που επέδειξε κάθε φορά που ζητούσα τη βοήθειά του.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένεια μου για τη υπομονή τους, την αμέριστη υποστήριξη και την αγάπη τους. Το φιλικό και οικογενειακό περιβάλλον που δημιούργησαν γύρω μου, παρείχε όλα εκείνα τα στοιχεία ηρεμίας και ασφάλειας που ήταν απαραίτητα για την επιτυχημένη πορεία μου έως τώρα.

Χριστίνα Κούκουρα

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Περίληψη

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς υπεράκτιων, πλωτών ανεμογεννητριών. Τα συμπεράσματα βασίστηκαν τόσο σε υπολογιστικά, όσο και σε πειραματικά αποτελέσματα.

Το υπολογιστικό μέρος της εργασίας περιλαμβάνει την προσομοίωση μιας πλωτής ανεμογεννήτριας των 5 MW, με τον κώδικα GAST (General Aerodynamic and Structural Tool) που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Αεροδυναμικής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Τα αποτελέσματα της πλωτής ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται σε σύγκριση με αυτά μιας πακτωμένης στη στεριά, προκειμένου να γίνει εύκολα αντιληπτή η επίδραση της κίνησης του πλωτήρα στην απόδοση της μηχανής και η δυναμική σύζευξη των δυνάμεων του συστήματος. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ως προς την περίοδο του κυματισμού και το ύψος κύματος, ώστε να βρούμε την επίδραση αυτών των δύο χαρακτηριστικών στη μηχανή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ενώ η συχνότητα του κύματος επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της ανεμογεννήτριας και τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτή, το ύψος κύματος δεν έχει τόσο σημαντική επίπτωση στην απόδοσή της.

Κύρια συμβολή αυτής της εργασίας είναι το πείραμα που πραγματοποιήθηκε στην Αεροδυναμική σήραγγα του εργαστηρίου Αεροδυναμικής και αφορούσε στην προσομοίωση μιας πλωτής ανεμογεννήτριας. Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο μικρής ανεμογεννήτριας (AIR BREEZE 200 W) και μια βάση η οποία προσομοιώνει τον πλωτήρα. Η βάση αποτελείται από δυο πλάκες, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους με τρία ελατήρια σε διάταξη ισοπλεύρου τριγώνου. Ένας κινητήρας, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος μέσω ενός διωστήρα με τη βάση δίνει κίνηση σε αυτήν προσομοιάζοντας με αυτόν τον τρόπο τον κυματισμό της θάλασσας. Η απόδοση της μηχανής μελετήθηκε για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, ενώ σε κάθε στάδιο της πειραματικής διαδικασίας υπολογίζονταν οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνταν στη μηχανή καθώς και η ισχύς που αυτή παρήγαγε. Τα τελικά αποτελέσματα επαλήθευσαν όσα είχαμε υπολογίσει με τον GAST, καθώς η κίνηση του πλωτήρα επηρεάζει σημαντικά την παραγωγή ισχύος και τα φορτία της μηχανής. Τα διαγράμματα δίνονται τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων προκειμένου να υπολογίσουμε τις κύριες συχνότητες διέγερσης του συστήματος.

Εκτός όμως από το υπολογιστικό και το πειραματικό μέρος, σε αυτήν την εργασία, έγινε και μια ανάλυση του αιολικού δυναμικού των ελληνικών θαλασσών, καθώς και μια μελέτη γύρω από τα νησιά των Κυκλάδων για υπολογισμό του εκμεταλλεύσιμου αιολικού δυναμικού τους. Στο κεφάλαιο αυτό παρέχεται και ένας χάρτης, ο οποίος παρουσιάζει την θαλάσσια έκταση στην οποία μπορούν να εγκατασταθούν υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Abstract

The topic of the current dissertation is the aerodynamic analysis of floating offshore wind turbines. The conclusions are based both on computational and experimental results.

The computational part of this assignment consists of the simulation of a conceptual 5 MW floating offshore wind turbine, with the use of the in-house developed code GAST (General Aerodynamic and Structural Tool). The code has been developed in the laboratory of Aerodynamics at the National Technical University of Athens. The diagrams of the floating wind turbine are presented in contrast to those of an onshore, in order to comprehend better the impact of the floaters motion on the response of the machine and the dynamic coupling of the system. Furthermore, a parametric analysis has been carried out with respect to the peak spectral wave period and the significant wave height, through which we studied the influence of these characteristics to the machine. On the one hand, the wave frequency has a significant impact on the response of the wind turbine, while on the other the significant wave height doesn't seem to affect the machine that much.

The most important part of this dissertation is the experiment that took place in the wind tunnel on the laboratory of Aerodynamics and it is about the simulation of a floating wind turbine. For this purpose a small wind turbine was used (AIR BREEZE 200 W) and a base that simulates the floater. The base consists of two metal plates that are connected through three springs. A motor engine that is connected to the base through a con rod moves it sinusoidal, simulating in this way the waves. The response of the wind turbine was examined for three different wind speeds and each time they were measured the force and the torque acted upon it, as well as the power production. The final results verified our initial estimations with GAST, since the floater's motion affect significantly the power that is produced and the loads on the machine. The diagrams are plotted both in the time and in the frequency domain, in order to find the eigenfrequencies of the system and the main frequencies of excitation.

Apart from the above mentioned, in the current dissertation an analysis of the Greek wind potential across the sea has been carried out, as well as a study around the islands of Cyclades. In this chapter a map is provided, which presents the sea area, where offshore wind farms can be installed.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	13
Περιγραφή τεχνολογικού προβλήματος	13
Διατάξεις πλωτών ανεμογεννητριών	15
Σκοπός της εργασίας.....	16
Διάρθρωση Εργασίας	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	19
1.1 Γενικά στοιχεία για την Αιολική Ενέργεια.....	19
1.2 Χαρακτηριστικά θαλάσσιων αιολικών πάρκων	26
1.3 Ενεργειακή Ευρωπαϊκή Πολιτική.....	33
1.4 Ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα	39
1.5 Θεωρία.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	53
2.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση	53
2.1.1 Πλωτές Διατάξεις	53
2.1.2 Ανάπτυξη Αεροδυναμικών Μοντέλων	58
2.1.3 Αστάθειες και συστήματα ελέγχου	81
2.1.4 Το HYWIND project	105
2.1.5 OC3–Σύγκριση Αεροελαστικών Κωδίκων υπεράκτιων Ανεμογεννητριών	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	113
3.1 Αιολικό Δυναμικό Ελλάδος	113
3.2 Ετήσια παραγωγή ενέργειας	142
3.3 Υπεράκτια αιολικά πάρκα στις Κυκλάδες	148
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	153
4.1 Περιγραφή Κώδικα	153
4.2 Αξιολόγηση Κώδικα	168
4.3 Αποτελέσματα GAST	171

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	195
5.1 Προσομοίωση SolidWorks	195
5.2 Ιδιοσυχνότητες πλωτής ανεμογεννήτριας (Frequency Analysis)	196
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	201
6.1 Περιγραφή Πειράματος	201
6.2 Προσομοίωση κυματισμού	202
6.3 Πρόνευση (Pitch).....	208
6.4 Συμπεράσματα	238
6.5 Διάγραμμα $C_p - \lambda$	240
Βιβλιογραφία	242
Παράρτημα	244

Εισαγωγή

Περιγραφή τεχνολογικού προβλήματος

Οι λύσεις για την ηλεκτροδότηση του πλανήτη λιγότερο και περισσότερο, με αποτέλεσμα να στρεφόμαστε σε άλλου είδους μορφές παραγωγής ενέργειας, τις ανανεώσιμες. Το ενδιαφέρον για την αιολική ενέργεια όμως αυξάνεται με εξαιρετικούς ρυθμούς, καθώς αποτελεί μια καθαρή και προσιτή μορφή ενέργειας, η οποία είναι πιο φθηνή και σίγουρα πιο βαθιά ριζωμένη στο γενετικό μας κώδικα, καθώς οι Έλληνες ανέκαθεν χρησιμοποιούσαν την αιολική ενέργεια για την κίνηση των πλωτών ανεμομηχανών (ιστιοφόρα πλοία), αλλά και στους ανεμόμυλους που κάποτε κοσμούσαν όλο το Αιγαίο.

Πριν από μερικά χρόνια, ο Ολλανδός επιστήμονας Βαν ντεν Μπεργκ έγραφε σε μια εργασία του σχετικά με την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας: «Η Ελλάδα ανήκει στην ελίτ των χωρών που, λόγω ιδανικών κλιματικών συνθηκών, θα έπρεπε να είναι στρωμένη με ανεμογεννήτριες απ' άκρου εις άκρον. Ζητήματα όπως η "αισθητική υποβάθμιση", το υψηλό αρχικό κόστος και οι αντεπισημονικές δεισιδαιμονίες, που βρίσκουν έδαφος εξαιτίας της ελλιπούς ενημέρωσης, θα έπρεπε να έχουν εξαλειφθεί εδώ και δεκαετίες. Πιστεύω ακράδαντα ότι αν είχε εμπιστευτεί την αναπτυσσόμενη τεχνολογία, η Ελλάδα θα ήταν σήμερα σε θέση να καλύψει στο υπερδιπλάσιο την ενεργειακή της χρεία χωρίς να απελευθερώσει ούτε ένα κιλό διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.»

Στην Ευρώπη παρατηρείται ραγδαία αύξηση των αιολικών πάρκων. Το 2009 η ισχύς τους αυξήθηκε κατά 23% και καθώς οι αντιδράσεις για την εγκατάστασή τους στην ενδοχώρα συνεχίζονται, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα κερδίζουν συνεχώς έδαφος. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (EWEA) η ισχύς των υπεράκτιων αιολικών πάρκων το 2010 αυξήθηκε κατά 51%. Κυρίως η Βόρεια Θάλασσα είναι μια υδάτινη έκταση που βρίσκεται σε διαρκή κίνηση, με ανέμους από 8 έως 11 μποφόρ. Δυστυχώς η Ελλάδα αποδεικνύει καθημερινά τον οπισθοδρομικό της χαρακτήρα, σε έναν τομέα στον οποίο θα μπορούσε να είναι πρωτοπόρος, χάρη στο εξαιρετικό αιολικό δυναμικό που διαθέτει. Σύμφωνα με στοιχεία που δημοσίευσε η EWEA, το 2009 η Ελλάδα εγκατέστησε αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 100 MW, λιγότερα από το 2008 που ήταν 114 MW και ακόμα λιγότερα από το 2007 που ήταν 125 MW. Η χρονοβόρα διαδικασία της αδειοδότησης καθιστά την επένδυση σε αιολικά πάρκα στην Ελλάδα άκαρπη. Αν θέλουμε να συμβαδίσουμε με τις τεχνολογικές εξελίξεις, είμαστε υποχρεωμένοι να υπερνικήσουμε αυτά τα εμπόδια και να αφιερώσουμε περισσότερο χρόνο και χρήμα στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι απαιτήσεις μέχρι το 2020 ανέρχονται σε ένα τρις. ευρώ, για την επίτευξη των ενεργειακών και κλιματικών στόχων. Προβλέπεται ότι μέχρι το 2030 η παραγόμενη ενέργεια στην Ευρώπη θα αυξηθεί κατά 23%. Μια τέτοια αύξηση όπως είναι λογικό δεν μπορεί και δεν πρέπει να

επιτευχθεί μόνο με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας, αλλά είναι απαραίτητη η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών. Το κόστος για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Ευρώπης από συμβατικές μεθόδους είναι υπέρογκο, καθώς κάθε χρόνο εξάγονται στις χώρες παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου περίπου 350 δις. ευρώ. Το χρηματικό κόστος όμως δεν είναι τίποτα μπροστά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξαιτίας των εκπομπών από τις συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Για όλους αυτούς τους λόγους λοιπόν, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η έρευνα αυτών των μεθόδων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αιολική ενέργεια αποτελεί την πιο προσιτή και φθηνή 'πράσινη' ενέργεια, γι' αυτό και παρατηρείται ραγδαία ανάπτυξη των εφαρμογών της. Τα προηγούμενα χρόνια οι εφαρμογές της περιορίζονταν μόνο σε εγκαταστάσεις στη στεριά, ενώ την τελευταία δεκαετία έχουν εξαπλωθεί και προς τη θάλασσα. Η συμπεριφορά όμως των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι τελείως διαφορετική από αυτών στη στεριά και γι' αυτό απαιτείται ξεχωριστή μελέτη και έρευνα.

Στην Ελλάδα συγκεκριμένα οι λόγοι για τους οποίους πρέπει να στραφούμε στα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι πολλοί και διαφορετικοί. Πρώτα απ' όλα πρέπει να εκμεταλλευτούμε το εξαιρετικό αιολικό δυναμικό των ελληνικών θαλασσών, προκειμένου να επιτύχουμε τους ενεργειακούς στόχους που μας έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση μέχρι το 2020. Επιπλέον πολλά από τα ελληνικά νησιά δεν είναι διασυνδεδεμένα στο δίκτυο της ηπειρωτικής Ελλάδας και άρα απαιτούν ενεργειακή αυτονομία. Συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, όπως η χρήση πετρελαίου ή λιγνίτη, είναι οικονομικά ασύμφωρες και έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Παράλληλα η έλλειψη νερού και ο περιορισμένος χώρος καθιστούν αδύνατη την εγκατάσταση υδροηλεκτρικών και φωτοβολταϊκών πάρκων αντίστοιχα. Άρα τα υπεράκτια αιολικά πάρκα για την Ελλάδα είναι μονόδρομος.

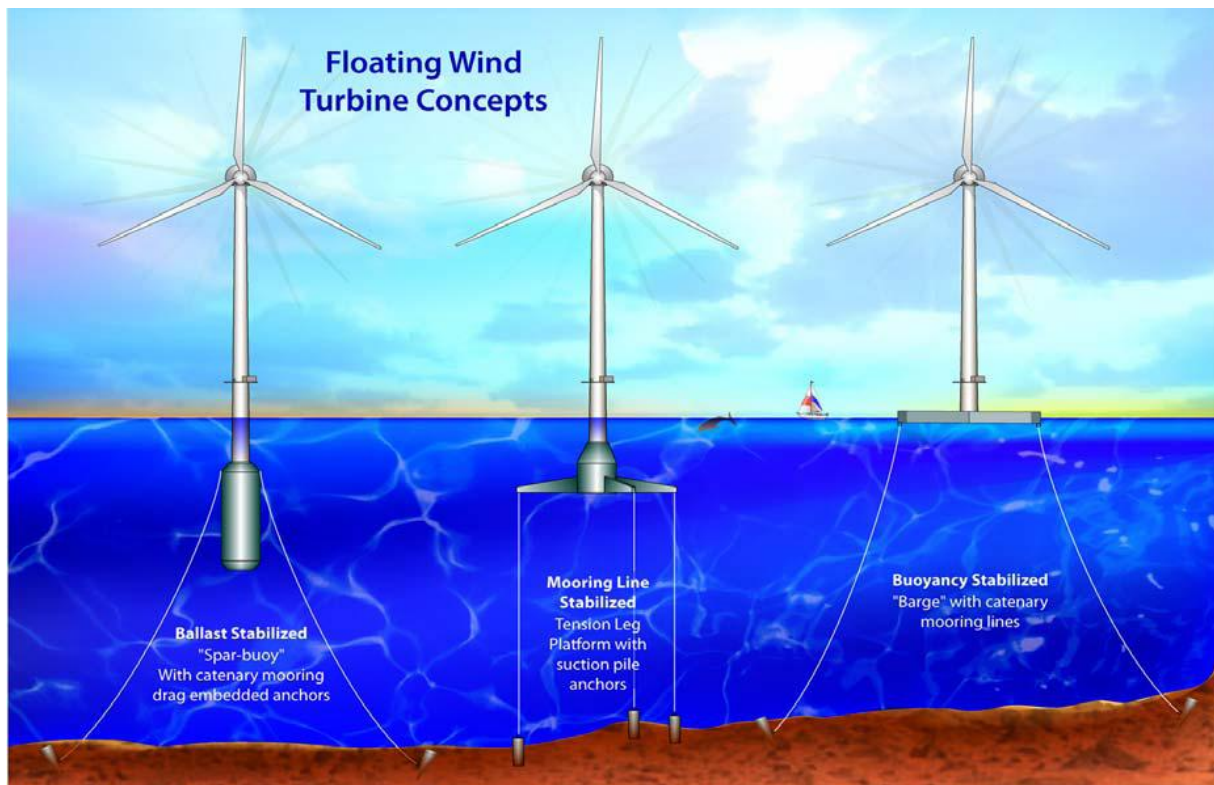
Η υπάρχουσα τεχνολογία για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα μπορεί να εφαρμοσθεί μέχρι βάθος 20 m, όπου ο πύργος της ανεμογεννήτριας είναι πακτωμένος στον πυθμένα. Για μεγαλύτερα βάθη η λύση είναι οι πλωτές κατασκευές, οι οποίες είναι ακόμα σε ερευνητικό στάδιο. Η Ελλάδα ανήκει στη δεύτερη κατηγορία, λόγω του εξαιρετικού βάθους των θαλασσών της, το οποίο σε σημεία μπορεί να φτάνει και τα 300 m.

Στα ήδη υπάρχοντα αιολικά πάρκα οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται είναι των 5 MW. Σύμφωνα με μελέτες του ερευνητικού προγράμματος UpWind project, σε μερικά χρόνια θα είναι εφικτή η κατασκευή ανεμογεννητριών ισχύος 20 MW. Σύμφωνα με το UpWind θα έχουν διάμετρο 200 m, έναντι των 120 που έχουν αυτές των 5 MW. Στα 20 MW οι ανεμογεννήτριες θα μπορούν να δώσουν λύσεις για την αύξηση της ισχύος των υπεράκτιων πάρκων, παρέχοντας πολύ περισσότερη ενέργεια σε χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τις υπάρχουσες μηχανές. Με άλλα λόγια θα

αποτελέσουν τον πιο αποτελεσματικό από πλευράς κόστους τρόπο για να επιτευχθούν μεγάλα επίπεδα παραγωγής. Για τη λειτουργία τους όμως απαιτούνται εξειδικευμένες σχεδιαστικές λύσεις και καινοτομίες τόσο στη σχεδίαση, όσο και στη χρήση ευέλικτων και ελαφριών υλικών.

Διατάξεις πλωτών ανεμογεννητριών

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τρεις διαφορετικοί τρόποι στήριξης μιας πλωτής ανεμογεννήτριας. Διαφέρουν ως προς το μηχανισμό τους για την επίτευξη στατικής ευστάθειας.



Εικόνα 1-NREL

Ο πρώτος τρόπος στήριξης (spar-buoy configuration) χρησιμοποιεί έρμα για να χαμηλώσει το κέντρο βάρους κάτω από το κέντρο πλευστότητας, και αγκυροβολείται είτε με αλυσοειδή καμπυλωτά σχοινιά (όπως φαίνεται στην εικόνα), είτε με τεντωμένα συρματόσχοινα. Ο δεύτερος τρόπος στήριξης (tension leg platform TLP) χρησιμοποιεί ως αγκυροβόλιο ρύματα, τα οποία μένουν τεντωμένα λόγω της πρόσθετης πλευστότητας που δημιουργείται από το κοίλωμα στην πλατφόρμα. Ο τρίτος τρόπος στήριξης (barge configuration) επιτυγχάνει ευστάθεια μέσω της πλευστότητας μιας πλατφόρμας στο επίπεδο της θάλασσας, η οποία αγκυροβολείται με καμπυλωτά συρματόσχοινα.

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι πιο ευαίσθητες σε αστάθειες από τις ανεμογεννήτριες επί εδάφους, εξαιτίας των πρόσθετων υδροδυναμικών αλληλεπιδράσεων από τα κύματα του ωκεανού.

Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του συστήματος των πλωτών ανεμογεννητριών. Για το λόγο αυτό αρχικά χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας GAST, ο οποίος μέσα από δεκάλεπτες προσομοιώσεις προβλέπει την απόκριση μιας πλωτής ανεμογεννήτριας. Ο κώδικας αρχικά αναπτύχθηκε για τη μελέτη ανεμογεννητριών στη στεριά. Με την προσθήκη ημιτονοειδούς κίνησης στη βάση του πύργου, η οποία αντιστοιχεί στους έξι βαθμούς ελευθερίας της πλατφόρμας, προσομοιάζεται η κίνησή της.

Για τη μελέτη του συστήματος όμως, εκτός από υπολογιστικές προβλέψεις απαιτούνται και πειραματικές μετρήσεις. Έτσι σχεδιάστηκε μια βάση η οποία προσομοιώνει τον πλωτήρα. Πάνω του εγκαταστάθηκε μια ανεμογεννήτρια μικρού μεγέθους και όλο το σύστημα τοποθετήθηκε στην αεροδυναμική σήραγγα. Τα αποτελέσματα του πειράματος συγκρίθηκαν με αυτά που προέκυψαν από τον κώδικα.

Παράλληλα έγινε και ανάλυση της ροής γύρω από μια ανεμογεννήτρια 5 MW η οποία είναι η ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται και στις προσομοιώσεις του κώδικα GAST, προκειμένου να δούμε το αποτέλεσμα του ομόρρου. Εκτός όμως από αυτό έγινε και κινηματική ανάλυση του πειράματος, έτσι ώστε να μπορέσουμε να προλέξουμε την κίνηση της βάσης που προσομοιάζει τον πλωτήρα.

Τέλος εκτός από τη μελέτη του πλωτού συστήματος, ήταν ιδιαίτερα σημαντικό να ερευνήσουμε και την κατάσταση στην Ελλάδα, ώστε να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό των ελληνικών θαλασσών. Για το λόγο αυτό έχει γίνει η μελέτη της θαλάσσιας περιοχής των Κυκλάδων και έχει προταθεί ενδεικτικά η εγκατάσταση πέντε υπεράκτιων αιολικών πάρκων 300 MW, ισχύς που αποτελεί το στόχο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Ελλάδα.

Διάρθρωση Εργασίας

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας και μια περίληψη κάθε κεφαλαίου φαίνεται παρακάτω.

Κεφάλαιο 1

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένα γενικά χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας και των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Παράλληλα αναλύεται η ενεργειακή ευρωπαϊκή πολιτική καθώς και η κατάσταση στην Ελλάδα. Τέλος αναφέρονται συνοπτικά στοιχεία της θεωρίας, που αφορούν στον τρόπο υπολογισμού της ισχύος ενός αιολικού πάρκου και στην επίδραση του ομόρρου, καθώς και στοιχεία για τον κυματισμό της θάλασσας.

Κεφάλαιο 2

Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί τη βιβλιογραφική επισκόπηση, όπου παρουσιάζονται διάφορα συστήματα πλωτών ανεμογεννητριών, προβλήματα που προκαλούνται στην ευστάθειά τους, συστήματα ελέγχου, αλλά και η ανάπτυξη αεροδυναμικών και αεροελαστικών μοντέλων οι οποίοι θα προβλέπουν την απόκριση μιας πλωτής ανεμογεννήτριας σε διάφορες καιρικές συνθήκες.

Κεφάλαιο 3

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται το θαλάσσιο αιολικό δυναμικό της Ελλάδας και γίνεται μια μελέτη γύρω από την περιοχή των Κυκλάδων, προκειμένου να υπολογισθεί το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό τους. Για τη μελέτη αυτή λαμβάνονται υπόψη η απόσταση από τη στεριά, οι ακτοπλοϊκές γραμμές, οι χάρτες των βαθών και οι αιολικοί χάρτες.

Κεφάλαιο 4

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται το in-house-developed αεροελαστικό μοντέλο GAST (General Aerodynamic and Structural Tool), το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της απόκρισης μιας πλωτής ανεμογεννήτριας. Για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της κίνησης του πλωτήρα στη μηχανή τα αποτελέσματα της πλωτής ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται σε σύγκριση με αυτά μιας πακτωμένης.

Κεφάλαιο 5

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μοντελοποίηση μιας ανεμογεννήτριας με το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks, καθώς και ανάλυση των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος.

Κεφάλαιο 6

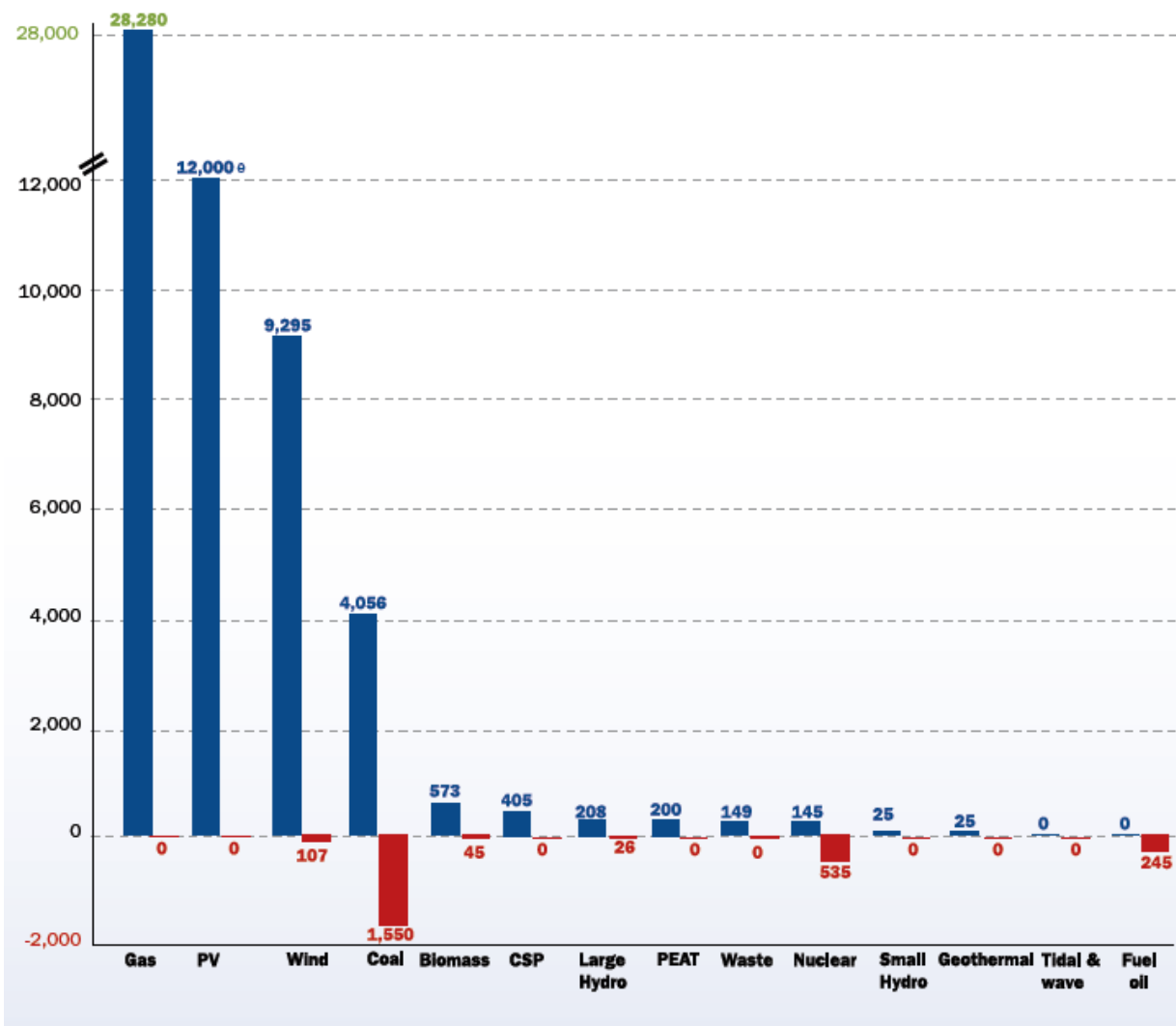
Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος, το οποίο διεξήχθη στην αεροδυναμική σήραγγα του εργαστηρίου Αεροδυναμικής. Η διάταξη αποτελείται από ένα μοντέλο ανεμογεννήτριας 200 W το οποίο είναι εγκατεστημένο πάνω σε μια βάση που στηρίζεται σε ελατήρια και η οποία μέσω ενός κινητήρα προσομοιάζει τον κυματισμό της θάλασσας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Γενικά στοιχεία για την Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια από τις κυριότερες πηγές παραγωγής ενέργειας στην Ευρώπη και το κλειδί για την επίτευξη των ενεργειακών στόχων της μέχρι το 2020. Η χρήση της μπορεί να συμβάλει στο να αποτραπεί η κλιματική αλλαγή και στο να δημιουργηθούν νέες θέσεις εργασίας. Έρευνες έδειξαν ότι το 2009 η αιολική ενέργεια ήταν η αιτία αποφυγής 106 εκατομμυρίων τόνων CO₂, μέγεθος αντίστοιχο με την απομάκρυνση του 25% των αυτοκινήτων από τους ευρωπαϊκούς δρόμους.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνονται οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας διαφόρων πηγών το 2010, καθώς και η κατάργηση πολλών σταθμών που λειτουργούν πολλά χρόνια.



Εικόνα 2-EWEA

Μέχρι το 2020 στόχος της Ευρώπης είναι η εγκατάσταση αιολικών πάρκων συνολικής ισχύος 230 GW (190 GW onshore, 40 GW offshore). Δηλαδή το 14-17% της ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα παράγεται από αιολικά πάρκα, ενώ θα αποφεύγονται 333 εκατομμύρια τόνοι CO₂ κάθε έτος. Παράλληλα η Ευρώπη θα έχει όφελος €28 δισεκατομμύρια το χρόνο από τη μη αγορά των καυσίμων και €8,3 δισεκατομμύρια το χρόνο από την αποφυγή του κόστους εκπομπών CO₂ (εμπορία εκπομπών). Το 2030 ο στόχος είναι 400 GW αιολικής ενέργειας (250 GW onshore, 150 GW offshore), τα οποία αντιστοιχούν στο 26-35% της ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης και συμβάλλουν στην αποφυγή 600 εκατομμυρίων τόνων CO₂. Τότε η Ευρώπη θα έχει από τη μη αγορά των καυσίμων όφελος €56 δισεκατομμύρια το χρόνο και €15 δισεκατομμύρια από την αποφυγή του κόστους εκπομπών CO₂. Για την επίτευξη αυτών των στόχων είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός ενιαίου ευρωπαϊκού δικτύου (supergrid), διευρύνοντας και αναβαθμίζοντας το ήδη υπάρχον δίκτυο. Η Ευρώπη χρειάζεται ένα τέτοιο δίκτυο, ώστε να διαχειριστεί σωστά τα μεγάλα ποσά ενέργειας που θα παράγονται από την αιολική καθιστώντας εφικτό το εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας και μειώνοντας αισθητά τις τιμές.

Πιο συγκεκριμένα το δίκτυο για τη βόρεια Ευρώπη είναι αυτό που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



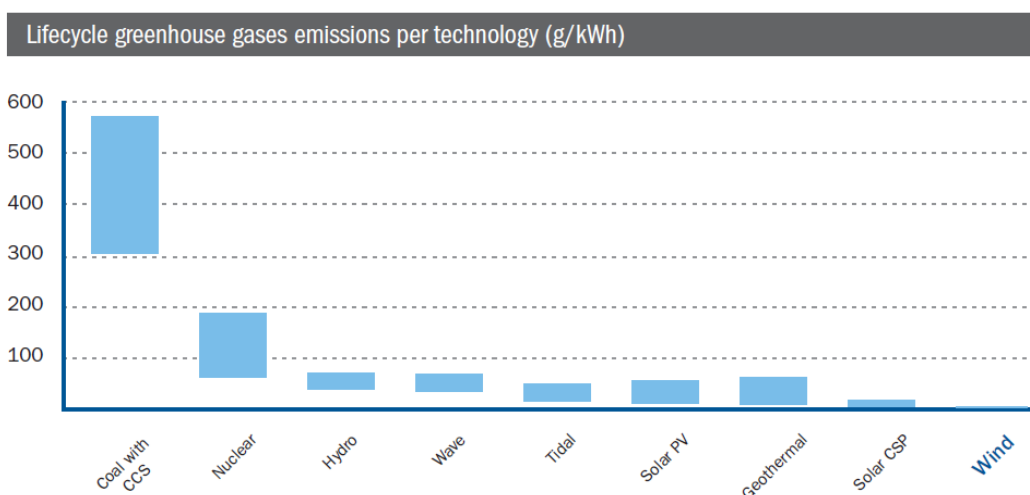
Εικόνα 3-EWEA

Το δίκτυο αυτό βασίζεται σε:

- 11 ήδη υπάρχουσες γραμμές
 - υπό κατασκευή
 - υπό μελέτη από την TSO
 - υπό μελέτη από την TSO ύστερα από πρόταση της EWEA
 - 8 επιπλέον γραμμές που έχει προτείνει η EWEA για το 2020
 - 6 επιπλέον γραμμές που έχει προτείνει η EWEA για το 2030
- } 21 γραμμές υπό
κατασκευή ή
μελέτη

Μια ενιαία ευρωπαϊκή αγορά ηλεκτρισμού με μεγάλα ποσά αιολικής ενέργειας θα κάνει την αγορά ηλεκτρικού ρεύματος ακόμα πιο προσιτή στους καταναλωτές, θα καταστήσει την Ευρώπη ενεργειακά ανεξάρτητη λόγω της μη αναγκαιότητας εισαγωγής ορυκτών καυσίμων και θα συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών του CO₂. Η πτώση των τιμών πώλησης της ενέργειας οφείλεται κυρίως στα χαμηλά κόστη συντήρησης που απαιτούν οι ανεμογεννήτριες, εκτοπίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις πιο ακριβές και ρυπογόνες πηγές εκτός συστήματος. Το ενιαίο ευρωπαϊκό δίκτυο πρέπει να χαρακτηρίζεται από ευελιξία, στο οποίο θα διευκολύνεται η διείσδυση της αιολικής και των άλλων ανανεώσιμων πηγών έναντι των συστημάτων ορυκτών καυσίμων και πυρηνικής ενέργειας. Επιπλέον τα αιολικά πάρκα πρέπει να είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους, ώστε η ισχύς τους να παραμένει σταθερή όταν υπάρχει άνεμος μεγαλύτερης ταχύτητας σε ένα μέρος σε σύγκριση με ένα άλλο. Με άλλα λόγια θα πρέπει να υπολογίζει ταυτόχρονα την παραγωγή και την κατανάλωση ανεξάρτητα από την απόσταση.

Όσον αφορά στο περιβάλλον, όπως αναφέρθηκε η συμβολή της αιολικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντική. Δεν εκπέμπει καθόλου CO₂ κατά την παραγωγή ενέργειας και έχει τις λιγότερες εκπομπές από κάθε άλλη τεχνολογία παραγωγής ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός αιολικού πάρκου. Το ακόλουθο διάγραμμα δείχνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για διάφορες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας.



Εικόνα 4-EWEA

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα η αιολική ενέργεια δεν εκπέμπει άλλα αέρια του θερμοκηπίου ούτε άλλα ρυπογόνα σωματίδια που είναι καρκινογόνα και έχουν επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου. Ως μέρος μια διεθνούς συμφωνίας, η Ευρωπαϊκή Ένωση καθώς και άλλες χώρες είναι υποχρεωμένες να μειώσουν μέχρι και 40% τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2020, με τα επίπεδα του 1990, εκ των οποίων τουλάχιστον τα τρία τέταρτα θα μειωθούν από οικιακή χρήση. Μέχρι το 2050 είναι αναγκαία η μείωση των εκπομπών μέχρι 80-95%, προκειμένου να έχουμε πιθανότητα 50% να αποφύγουμε την αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2°C. Οι πιο ανεπτυγμένες χώρες πρέπει να σταματήσουν να χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα και να στραφούν άμεσα προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια όπως αποδεικνύεται είναι η πιο καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας. Οι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών είναι περιορισμένες και παράλληλα τα οφέλη προς το περιβάλλον πολύ περισσότερα. Επιπλέον η αιολική ενέργεια μπορεί να έχει θετικές επιπτώσεις στη βιοποικιλία μιας περιοχής και να προσφέρει οικολογική αποκατάστασή της τόσο στο έδαφος όσο και στη θάλασσα (onshore, offshore), όπως για παράδειγμα η δημιουργία νέων κατοικιών για τη χλωρίδα και την πανίδα. Οι κατασκευαστές αιολικών πάρκων είναι υποχρεωμένοι πριν την κατασκευή του να παραδώσουν μια ολοκληρωμένη έκθεση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα έχει η κατασκευή του πάρκου στην περιοχή. Έτσι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις μπορούν να μειωθούν ή και να αποφευχθούν πλήρως με σωστό σχεδιασμό.

Είναι πολλές οι φιλοζωικές οργανώσεις που ανησυχούν για τις επιδράσεις των αιολικών πάρκων στα πτηνά και σε άλλα άγρια ζώα. Είναι αποδεδειγμένο ότι η επίδραση της αιολικής ενέργειας στα ζώα μιας περιοχής είναι περιορισμένη σε σχέση με άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες. Παράλληλα γίνονται σημαντικές προσπάθειες αποφυγής κατασκευής αιολικών πάρκων σε περιοχές με μεγάλο αριθμό πτηνών, όπως είναι οι μεταναστευτικοί δρόμοι. Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τη θνησιμότητα των πτηνών εξαιτίας διαφόρων ανθρωπίνων δραστηριοτήτων.

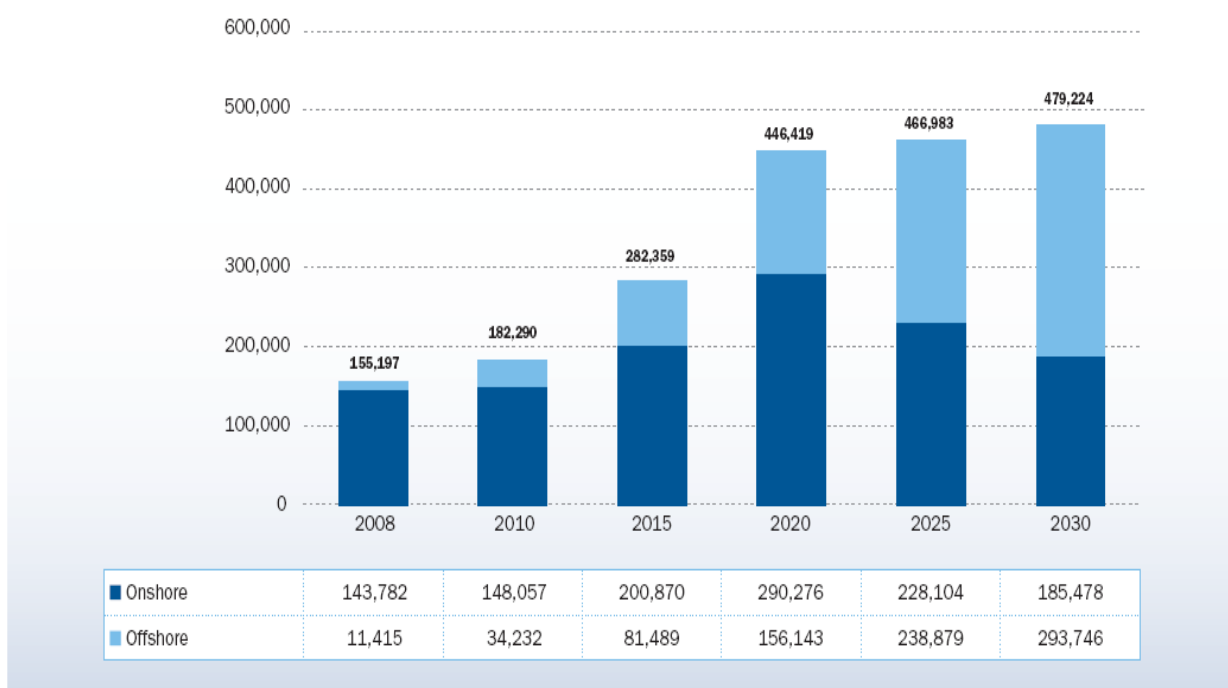
Αιτίες θανάτου πτηνών	Εκτίμηση αριθμού θανάτων
Κτίρια/ Παράθυρα	550 εκατομμύρια
Γραμμές υψηλής τάσης	130 εκατομμύρια
Γάτες	100 εκατομμύρια
Οχήματα	80 εκατομμύρια
Παρασιτοκτόνα	67 εκατομμύρια
Πύργοι επικοινωνίας	4,5 εκατομμύρια
Ανεμογεννήτριες	28,5 χιλιάδες
Αεροπλάνα	25 χιλιάδες

Σύμφωνα με έρευνα που έγινε το 2007, το 71% των Ευρωπαίων στηρίζουν την αιολική ενέργεια, ενώ το 42% το φυσικό αέριο, το 26% το λιθάνθρακα και μόνο το 20% την πυρηνική ενέργεια. Ο θόρυβος που προκαλείται από τις ανεμογεννήτριες δεν ακούγεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 300 m. Άλλοι θόρυβοι όπως ο άνεμος στα δέντρα μπορεί να είναι πιο δυνατοί. Επιπλέον μια έρευνα που διεξήχθη στον Καναδά έδειξε ότι δεν υπάρχουν αποδεικτικά στοιχεία που να δείχνουν ότι ο θόρυβος που προκαλούν οι ανεμογεννήτριες έχουν άμεση επίδραση στην ψυχική υγεία του ανθρώπου. Όσον αφορά στα πλεονεκτήματα που προσφέρει στην τοπική κοινωνία η κατασκευή ενός αιολικού πάρκου, είναι τα έσοδα από την ενοικίαση των εκτάσεων για την εγκατάσταση των πάρκων, καθώς και οι θέσεις εργασίας που δημιουργούνται για τη συντήρηση των ανεμογεννητριών. Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τα επίπεδα θορύβου από διάφορες δραστηριότητες.

Δραστηριότητα	Επίπεδο ήχου (dB)
Όριο Ακοής	0
Αγροτική περιοχή τη νύχτα	20-40
Ήσυχο υπνοδωμάτιο	35
Αιολικό πάρκο στα 350 m	35-45
Πολυσύχναστος δρόμος 5 km	35-45
Αυτοκίνητο με 65 km/h στα 100 m	55
Γραφείο πολλών εργαζομένων	60
Συζήτηση	60
Φορητό με 50 km/h στα 100 m	65
Κίνηση στην πόλη	90
Κομπρεσέρ στα 7 m	95
Αεροσκάφος στα 250 m	105
Όριο πόνου	140

Η αιολική ενέργεια πλεονεκτεί έναντι του μεταβαλλόμενου κόστους των ορυκτών καυσίμων, μειώνοντας το κόστος της ενέργειας. Καθώς η παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο δεν απαιτεί καθόλου καύσιμα, το κόστος της μπορεί να προβλεφθεί με μεγάλη ακρίβεια, σε αντίθεση με τις διακυμάνσεις στο κόστος του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και του λιθάνθρακα.

Ο τομέας της αιολικής ενέργειας δημιουργεί πληθώρα νέων θέσεων εργασίας και βρίσκεται στο επίκεντρο της οικονομίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αλλά στο μέλλον θα χρειαστούν ακόμα περισσότεροι εξειδικευμένοι εργαζόμενοι για να καλυφθούν όλες οι θέσεις από τον τομέα της παραγωγής μέχρι τον τομέα της διοίκησης. Σήμερα στην Ευρώπη απασχολούνται περισσότεροι από 192.000 άνθρωποι στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Στο χρονικό διάστημα από το 2002 μέχρι το 2007 οι εργαζόμενοι στον τομέα αυξήθηκαν κατά 125%, ένας μέσος όρος 33 νέων θέσεων εργασίας καθημερινά. Μέχρι το 2020 ο αριθμός αυτός θα αυξηθεί σε 446.000 και μέχρι το 2030 σε 479.000. Το ακόλουθο διάγραμμα δείχνει τον αριθμό των εργαζομένων τα τελευταία χρόνια.



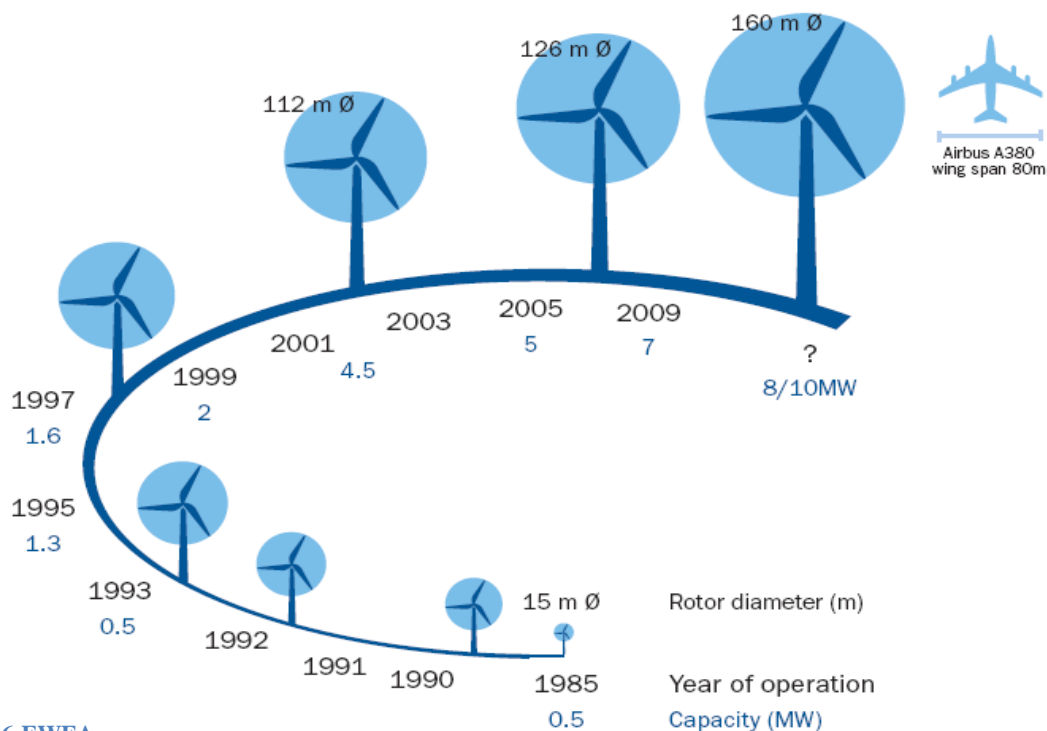
Εικόνα 5-EWEA

Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια είναι ραγδαία, παρόλο που η χρηματοδότηση είναι περιορισμένη.

Τα σημαντικά στοιχεία στην έρευνα της αιολικής ενέργειας είναι:

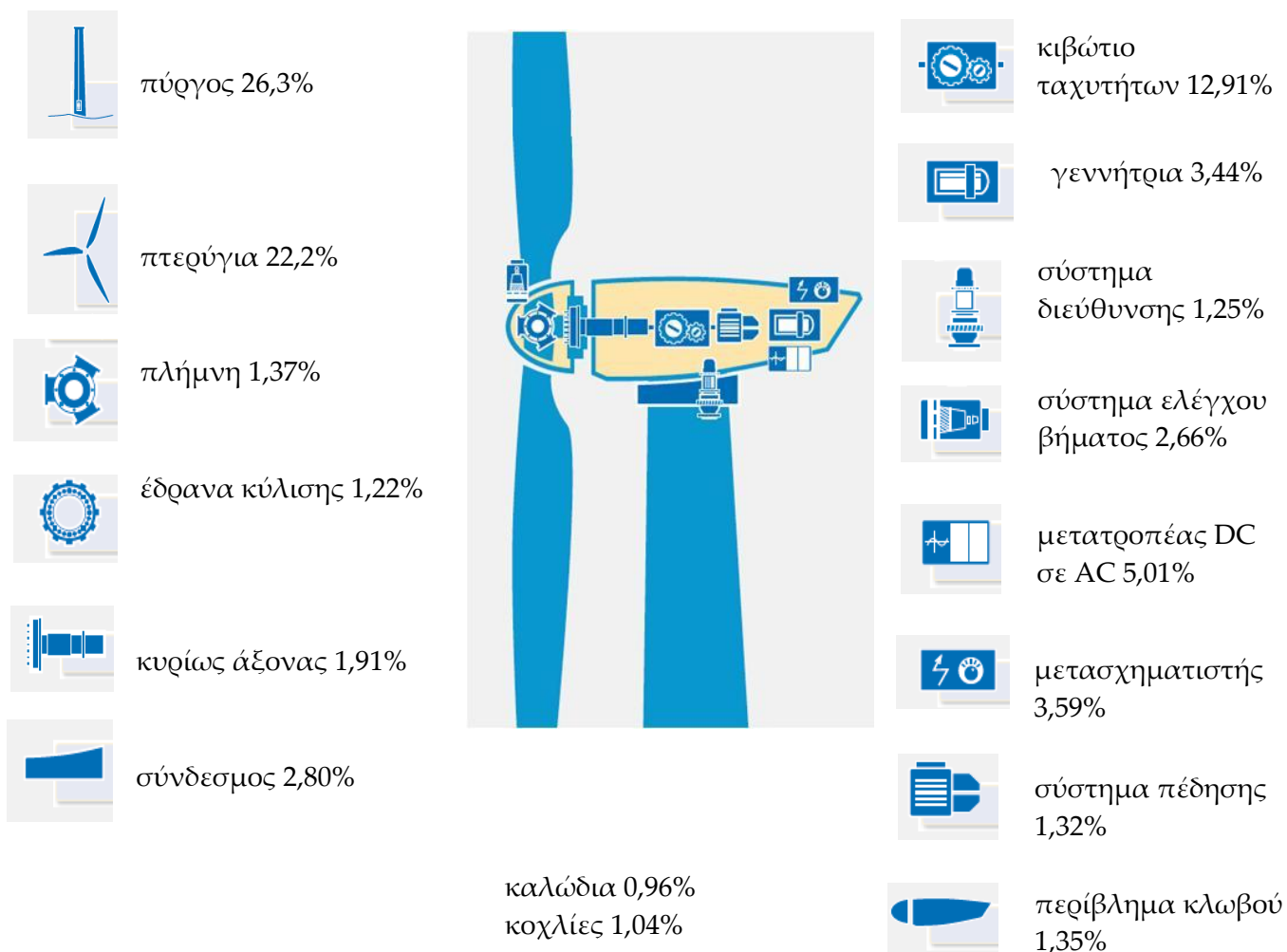
- ✿ Βελτίωση του σχεδιασμού των αιολικών πάρκων.
- ✿ Αύξηση της αξιοπιστίας, της προσβασιμότητας και της απόδοσης των ανεμογεννητριών.
- ✿ Βελτιστοποίηση της συντήρησης, της συναρμολόγησης και της εγκατάστασης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών.
- ✿ Νέες μέθοδοι διαχείρισης του δικτύου που θα επιτρέπουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας προερχόμενα από τα αιολικά πάρκα.
- ✿ Διεύρυνση και βελτίωση των εγκαταστάσεων εκπαίδευσης.

Το ακόλουθο σχήμα δείχνει την εξέλιξη του μεγέθους των ανεμογεννητριών με το πέρασμα του χρόνου.



Εικόνα 6-EWEA

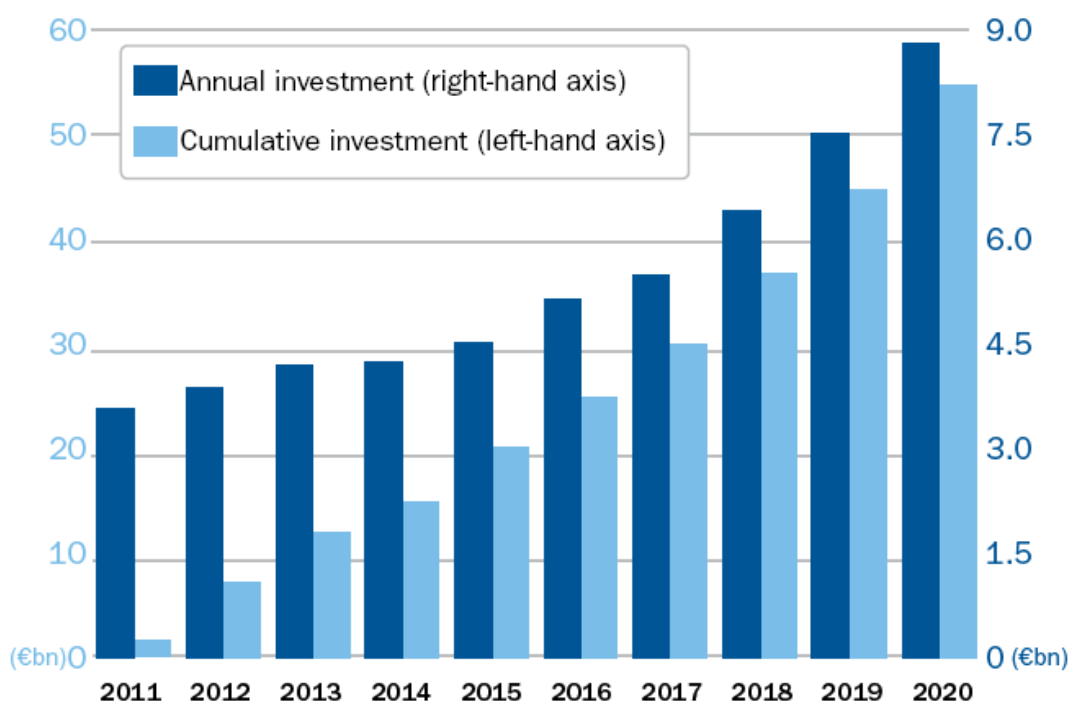
Το συνολικό κόστος μιας ανεμογεννήτριας χωρίζεται στα επιμέρους τμήματα:



1.2 Χαρακτηριστικά θαλάσσιων αιολικών πάρκων

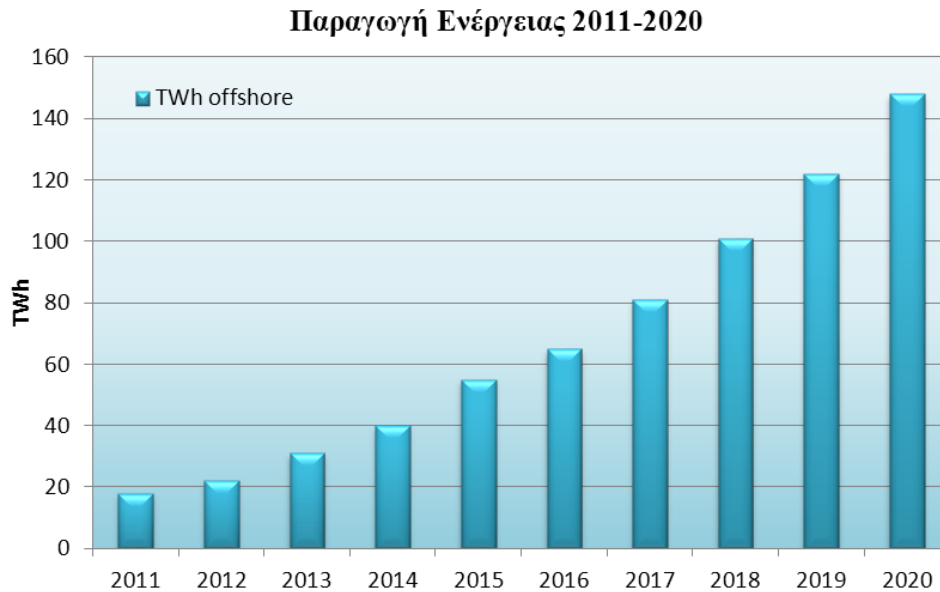
Η εκμετάλλευση του θαλάσσιου αιολικού δυναμικού είναι απαραίτητη για το ενεργειακό μέλλον της Ευρώπης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι μέχρι το 2020 να έχουν εγκατασταθεί υπεράκτια αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 40GW, τα οποία θα δίνουν ενέργεια σε όλη την Ευρώπη μέσω του ενιαίου ηλεκτρικού δικτύου. Η απόφαση πολλών χωρών να εκτελέσουν ναυτικό χωρικό σχεδιασμό (maritime spatial planning, MSP), ώστε να χρησιμοποιήσουν θαλάσσιες περιοχές αποκλειστικά για την εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων και την ανάπτυξη του ηλεκτρικού δικτύου, αποτελεί σηματοδότη για την ανάπτυξη της υπεράκτιας βιομηχανίας και της συνεργασίας της με άλλους τομείς της ναυτιλίας.

Το 2010 το 10% της ετήσιας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος προέρχεται από υπεράκτια αιολικά πάρκα, καθιστώντας τη βιομηχανία αυτή ένα σημαντικό παράγοντα της αγοράς. Πιο συγκεκριμένα το 2010 εγκαταστάθηκαν υπεράκτια αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 1.100 MW, τα οποία αντιστοιχούν σε 11 TWh, καλύπτοντας το 0,3% της ενεργειακής ζήτησης στην Ευρώπη και συμβάλλοντας στην αποφυγή 7 Mt CO₂. Υπολογίζεται ότι οι επενδύσεις για την πραγματοποίηση αυτών των έργων ανέρχονται σε €2,5 δισεκατομμύρια. Το 2011 οι επενδύσεις αναμένεται να είναι €3,3 δισεκατομμύρια, ενώ το 2020 €8,81 δισεκατομμύρια. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζονται οι ετήσιες και οι συνολικές επενδύσεις στον τομέα της υπεράκτιας αιολικής βιομηχανίας σε δισεκατομμύρια ευρώ.



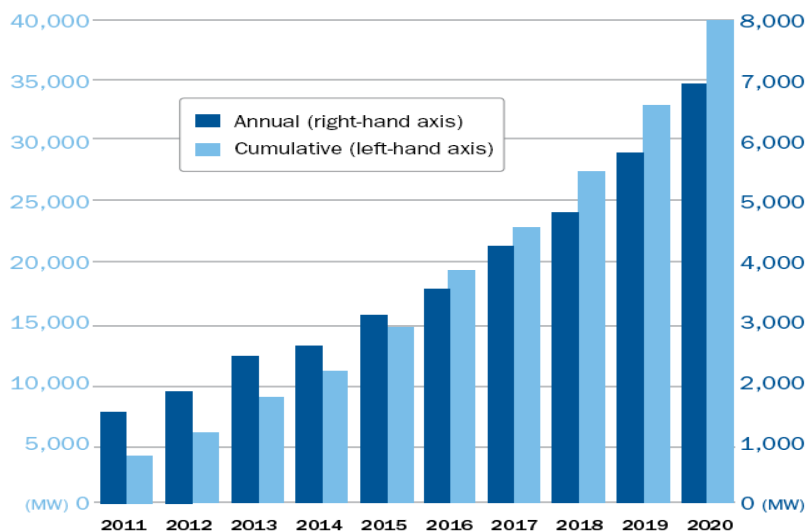
Εικόνα 7-EWEA

Συνολικά βρίσκονται υπό μελέτη αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 100 GW, γεγονός που καθιστά υλοποιήσιμο το στόχο των 150 GW μέχρι το 2030. Αν αυτά πραγματοποιηθούν, τότε θα παράγουν το 10% της ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρώπης και θα συμβάλλουν στην αποφυγή 200 εκατομμυρίων τόνων CO₂ ετησίως. Συγκεκριμένα τα 40 GW που αναμένονται να εγκατασταθούν μέχρι το 2020 θα παράγουν 148 TWh, μέγεθος που αντιστοιχεί στο 3,6%-4,3% της ηλεκτρικής κατανάλωσης της Ευρώπης. Το ακόλουθο διάγραμμα δείχνει την παραγωγή ενέργειας σε TWh από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, μεταξύ 2011 και 2020.



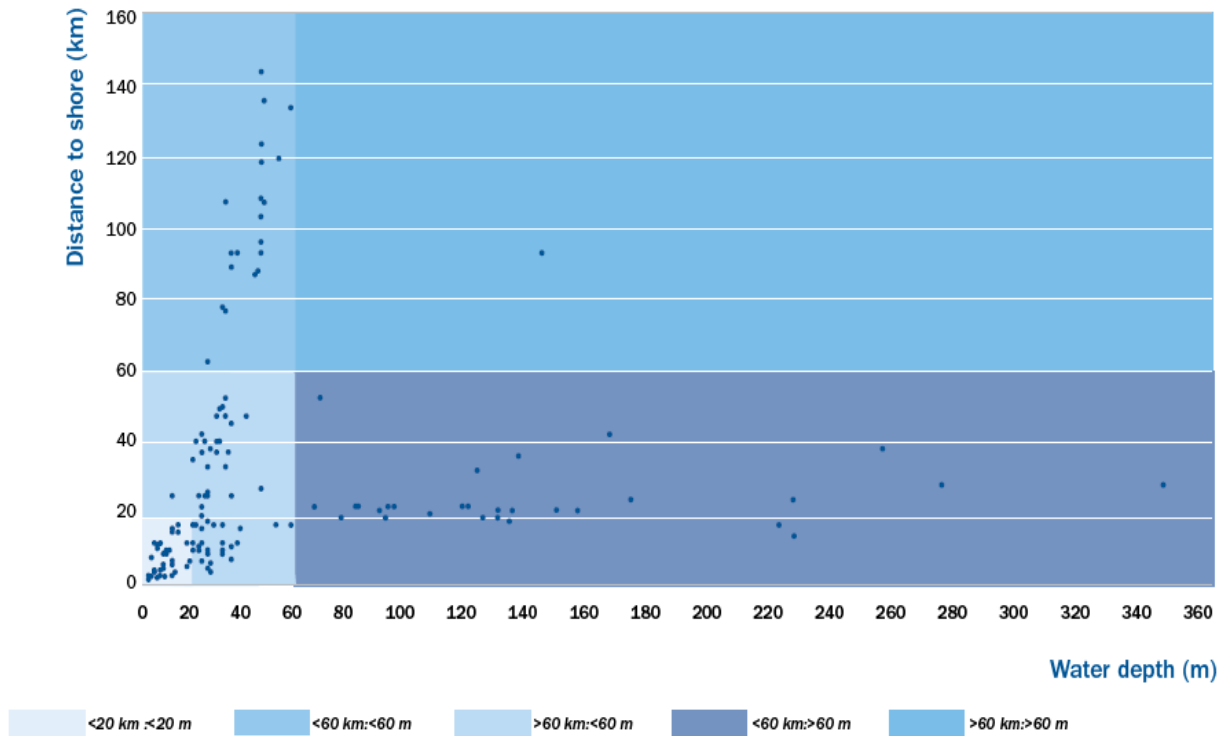
Εικόνα 8-EWEA

Για να επιτευχθεί όμως αυτός ο στόχος, είναι απαραίτητη η αύξηση των εγκατεστημένων πάρκων ετησίως, από 1,5 GW που είναι προγραμματισμένα για το 2011 σε 6,9 GW το 2020. Το διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζει τις ετήσιες και τις συνολικές εγκαταστάσεις στο διάστημα αυτό.



Εικόνα 9-EWEA

Με την πρόοδο της τεχνολογίας τα αιολικά πάρκα θα μπορούν να εγκατασταθούν πιο μακριά από τη στεριά και σε μεγαλύτερα βάθη κι έτσι σταδιακά θα απομακρυνθούν από το πρότυπο του 20:20 (20 km βάθος, 20 km από τη στεριά). Το ακόλουθο σχήμα δείχνει την εξέλιξη αυτή.



Εικόνα 10-EWEA

Είναι γνωστό ότι ένα υπερράκτιο αιολικό πάρκο καταλαμβάνει μεγάλη έκταση, καθώς το μέγεθος του έργου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο για να εξασφαλίζεται η οικονομική βιωσιμότητα του και η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών πρέπει να είναι τέτοια για να ελαχιστοποιείται η επίδραση του ομίχρους. Είναι εφικτή η βελτιστοποίηση της χρήσης των χώρων αυτών για ανάπτυξη κι άλλων εργασιών. Για παράδειγμα τα υπερράκτια αιολικά πάρκα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με μονάδες αφαλάτωσης, ή να συνδυαστούν με άλλες εγκαταστάσεις που εκμεταλλεύονται την ενέργεια των κυμάτων.

Για την υλοποίηση των υπερράκτιων αιολικών πάρκων είναι απαραίτητη η κατασκευή ενός ενιαίου ευρωπαϊκού δικτύου, στο οποίο θα έχουν πρόσβαση και τα πιο απομακρυσμένα πάρκα. Τα πλεονεκτήματα για την Ευρώπη από την κατασκευή αυτού του δικτύου είναι πολυάριθμα:

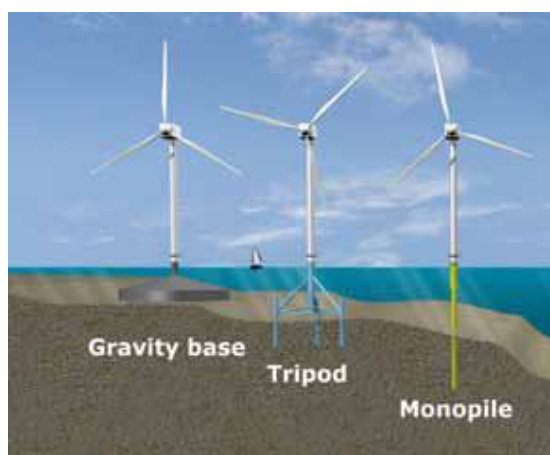
- Η σύνδεση όλων των αιολικών πάρκων σε ένα ενιαίο δίκτυο θα αυξήσει την προβλεπτικότητα της παραγωγής ισχύος.
- Οι διαχειριστές των αιολικών πάρκων θα έχουν τη δυνατότητα να πουλήσουν την παραγόμενη ενέργεια σε περισσότερες από μια χώρες.
- Η σύνδεση στο δίκτυο των πλατφορμών εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου θα μειώσει της εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου από αυτές.

- ❁ Θα υπάρξει η δυνατότητα σύνδεσης και άλλων θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- ❁ Η ενεργειακή ασφάλεια της Ευρώπης θα βελτιωθεί. (EWEA, Oceans of Opportunity, 2009)

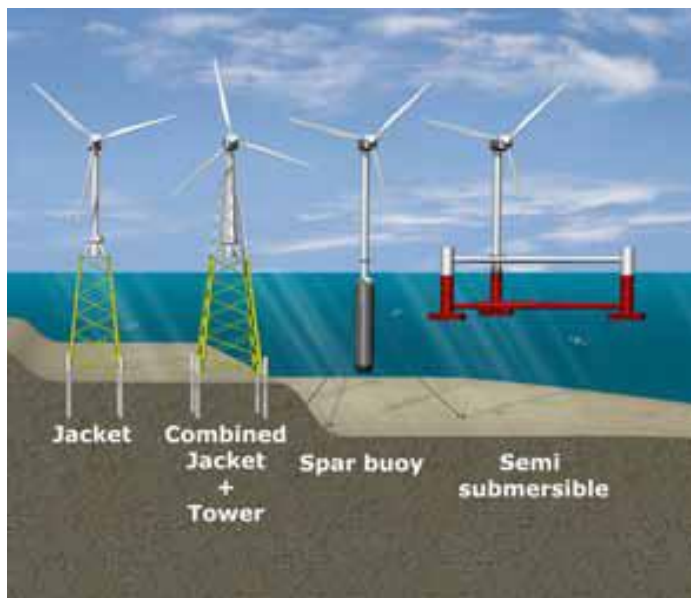
Τελικά ένα ενιαίο ευρωπαϊκό δίκτυο θα συμβάλλει στη δημιουργία μιας ενιαίας ευρωπαϊκής αγοράς ηλεκτρισμού που θα ωφελήσει όλους τους καταναλωτές. Είναι βέβαια λογικό ότι το υπεράκτιο δίκτυο ηλεκτρισμού δεν μπορεί να είναι απομονωμένο από το ηπειρωτικό δίκτυο. Έτσι είναι απαραίτητη η αναβάθμιση και του ηπειρωτικού δικτύου σε ορισμένες γραμμές του. Το ύψος της επένδυσης για την κατασκευή του δικτύου μέχρι το 2030 αναμένεται να είναι €20-30 δισεκατομμύρια.

Τα τελευταία χρόνια ο τομέας της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας έχει αναδειχθεί ως ξεχωριστό κομμάτι της αιολικής βιομηχανίας. Η αγορά των ανεμογεννητριών επί εδάφους είναι ήδη ώριμη, με αξιόπιστα προϊόντα μαζικής παραγωγής και καλά καθιερωμένες διεργασίες. Η τεχνολογική ανάπτυξη βασίζεται στη βελτιστοποίηση της βιομηχανικής επεξεργασίας και στη διαχείριση της αλυσίδας εφοδιασμού. Από την άλλη η κατασκευή υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Τα περισσότερα σχέδια για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες βασίζονται σε προσαρμογή των ήδη υπαρχόντων για ανεμογεννήτριες επί εδάφους. Οι ετήσιες εγκαταστάσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι στα επίπεδα που ήταν οι εγκαταστάσεις επί εδάφους στις αρχές της δεκαετίας του 90. Στα επόμενα χρόνια θα δοθεί έμφαση στην τυποποίηση της διαδικασίας εγκατάστασης, η οποία είναι ιδιαίτερα απαιτητική για τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, και στην ανάπτυξη σχεδίων αποκλειστικά για αυτές, γεγονός που απαιτεί την εξέλιξη καινοτόμων ιδεών.

Σήμερα δεν υπάρχει ανεπτυγμένη υποδομή για τις υπεράκτιες εγκαταστάσεις και σε βάθη άνω των 25 m το κόστος αυξάνει εκθετικά. Οι περισσότερες εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες είναι ονομαστικής ισχύος 2-3 MW και σε βάθη μικρότερα των 20 m. Αυτού του τύπου ανεμογεννήτριες είναι πακτωμένες στον πυθμένα της θάλασσας με έναν από τους τρόπους που φαίνονται στη διπλανή εικόνα.



Εικόνα 11-EWEA



Εικόνα 12-EWEA

Παρόλα αυτά με την αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών και την ανάγκη να κινηθούμε προς μεγαλύτερα βάθη, επιπλέον υποδομή απαιτείται. Σε αυτήν την περίπτωση οι τρόποι στήριξης της ανεμογεννήτριας θα είναι σαν αυτοί που φαίνονται στη ακόλουθη εικόνα. Τέτοιου είδους τεχνολογίες είναι κατάλληλες για βάθη 50-60 m, ανάλογα βέβαια με την επένδυση και τις συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε θέση θαλασσών.

Προκειμένου να είναι δυνατή η εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε μεγαλύτερα βάθη, όπως αυτά της Μεσογείου, των Νορβηγικών ακτών και του Ατλαντικού ωκεανού είναι απαραίτητη η χρήση πλωτών κατασκευών. Αυτή τη στιγμή στην Ευρώπη υπάρχουν τρία πρότυπα πλωτών ανεμογεννητριών:

- ✿ Το πρότυπο Hywind από το Statoil Hydro το οποίο βασίζεται στη στήριξη μέσω έρματος. Αυτού του είδους ο πλωτήρας εκτείνεται 100 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και στερεώνεται στον πυθμένα με τρεις άγκυρες.



Εικόνα 13-EWEA



Εικόνα 14-EWEA

- ✿ Το πρότυπο Blue H, το οποίο πρόσφατα δοκιμάστηκε στην Ιταλία και χρηματοδοτήθηκε από το βρετανικό ETI (UK's Energy Technology Institute), επιλέχθηκε ως ο ιδανικός τύπος για τα βάθη της Μεσογείου.

- ✿ Το πρότυπο Sway που αναπτύχθηκε ύστερα από συνεργασία των Statkraft και Shell, βασίζεται σε ένα πλωτό επιμήκη ιστό ο οποίος εκτείνεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και έχει έρμα στο κάτω μέρος του. Το κέντρο βάρους βρίσκεται πολύ πιο χαμηλά από το κέντρο άνωσης, κάνοντας το σύστημα πιο ευσταθές. Έχει σχεδιασθεί για ανεμογεννήτριες μέχρι 5 MW και για βάθη από 80 έως 300 m.

Όσον αφορά την εγκατάσταση των θαλάσσιων αιολικών πάρκων, ένας αρκετά μεγάλος αριθμός διαφορετικών πλοίων απαιτούνται, τα οποία πολλές φορές προέρχονται από τον τομέα των πλατφορμών εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου. Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στο μέλλον θα είναι η διαθεσιμότητα των κατάλληλων πλοίων για την εγκατάσταση 10.000 ανεμογεννητριών μέχρι το 2020 μαζί με τις απαραίτητες υποδομές. Σε σύγκριση με άλλους τομείς της υπεράκτιας βιομηχανίας, η εγκατάσταση αιολικών πάρκων είναι πιο απαιτητική, εξαιτίας των πολλών ημερών που διαρκεί η εγκατάσταση και της επαναλαμβανόμενης διαδικασίας.

Για την εγκατάσταση των 40 GW μέχρι το 2020, απαιτούνται πλοία ειδικά για τον τομέα της υπεράκτιας αιολικής βιομηχανίας, τα οποία θα μπορούν να εγκαταστήσουν ανεμογεννήτριες σε βάθη 30-40 m και πάνω και θα μπορούν να λειτουργούν σε δύσκολες συνθήκες, ώστε να αυξήσουν τις ημέρες λειτουργίας από 180 σε 260-290 ετησίως. Για μια ελάχιστη χωρητικότητα 10 ανεμογεννητριών, 10 σετ πτερυγίων και 10 πύργων απαιτούνται 12 πλοία εγκατάστασης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των πλοίων που προορίζονται για την εγκατάσταση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι:

- Το μέγεθος των ανεμογεννητριών, καθώς μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες απαιτούν μεγαλύτερα πλοία.
- Το βάθος της θάλασσας, αφού όσο βαθύτερα είναι τα νερά, τόσο πιο ακριβό και μεγάλο πρέπει να είναι το πλοίο.
- Η απόσταση από τη στεριά, καθώς όσο πιο απομακρυσμένο είναι το αιολικό πάρκο από το λιμάνι εφοδιασμού, τόσο πιο υψηλό είναι το κόστος μεταφοράς.
- Βελτιστοποίηση της εγκατάστασης σε συγκεκριμένα καιρικά φαινόμενα (weather window). (EWEA, Oceans of Opportunity, 2009)

Ένα από τα σχέδια για κατασκευή τέτοιου είδους πλοίων είναι το Gaoh Offshore, το οποίο έχει χωρητικότητα 18x 3,6 MW ανεμογεννητριών μαζί με τους δρομείς και τους πύργους και είναι αυτό που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 15-EWEA

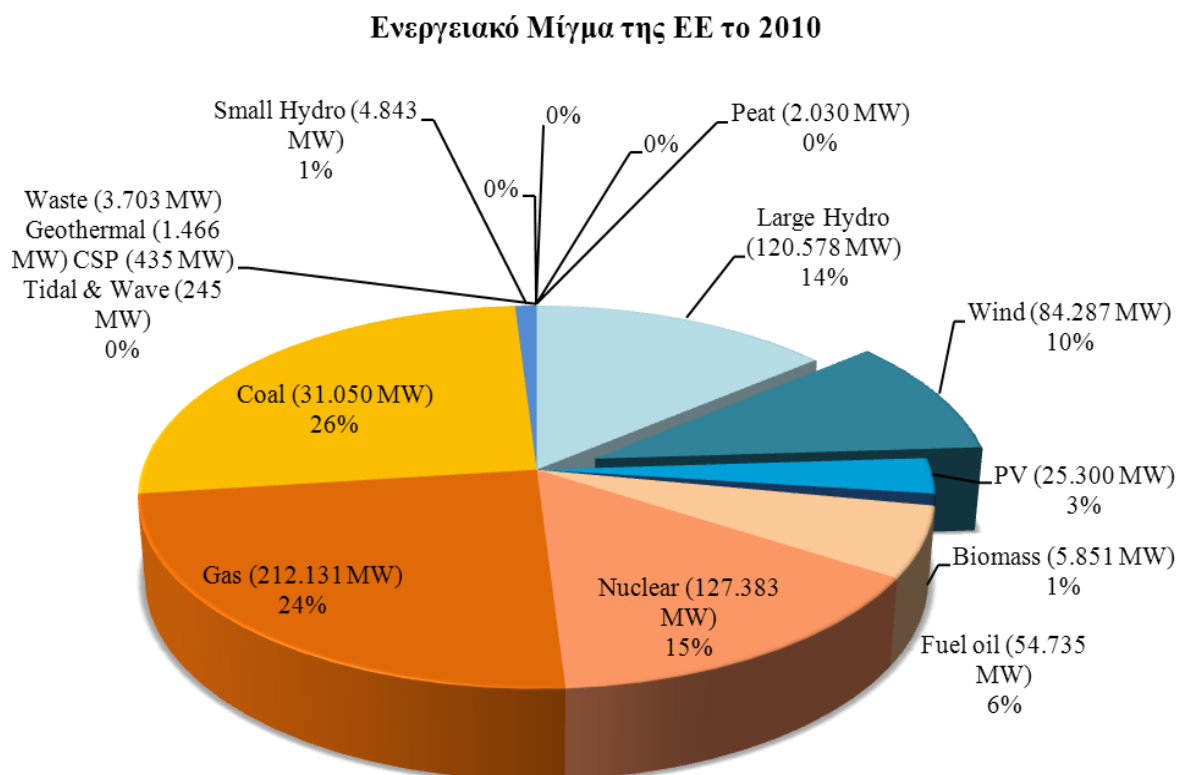
Καταλήγοντας παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες προκλήσεις για τον τομέα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι:

- Η μέτρηση των ανέμων σε κάθε περιοχή για την κατασκευή άτλαντα ανέμου. Παράλληλα απαιτείται και η γνώση περισσότερων λεπτομερειών για την επίδραση του ανέμου σε περίπλοκες κατασκευές, προκειμένου να βελτιωθεί ο σχεδιασμός των ανεμογεννητριών.
- Η κατασκευή της επόμενης γενιάς των ανεμογεννητριών. Αυτό περιλαμβάνει την κατασκευή μεγάλων ανεμογεννητριών 10-20 MW και την ανάπτυξη των απαραίτητων μονάδων ελέγχου.
- Η ανάπτυξη της απαιτούμενης υποδομής όπως πλοία εγκατάστασης και λιμάνια ανεφοδιασμού και η απόκτηση γνώσεων για το φυσικό περιβάλλον, προκειμένου να πραγματοποιηθεί πιο εύκολα ανάλυση επικινδυνότητας του έργου.
- Ναυτικός χωρικός σχεδιασμός (MSP). Με αυτόν τον τρόπο θα διευκολυνθεί ο σχεδιασμός μελλοντικών υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Παράλληλα ένας τέτοιος σχεδιασμός θα ανοίξει το δρόμο για περισσότερες επενδύσεις στον τομέα, καθώς θα αποτελεί μια εγγύηση προς τους επενδυτές για τη μείωση του ρίσκου και τελικά του αρχικού κεφαλαίου.
- Η σωστή εκπαίδευση του προσωπικού που θα επανδρώσει την αγορά της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.

1.3 Ενεργειακή Ευρωπαϊκή Πολιτική

Η αύξηση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι το αποτέλεσμα της ενεργειακής πολιτικής που έχει θέσει η ΕΕ από το 1997 για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και για την ενεργειακή αυτονομία της Ευρώπης. Σαν αποτέλεσμα σήμερα το 20% του ηλεκτρισμού της προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, εκ των οποίων το 5,3% από την αιολική.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνονται τα ποσοστά που αντιστοιχούν σε κάθε μέθοδο παραγωγής ενέργειας για τη συνολική παραγωγή το 2010.

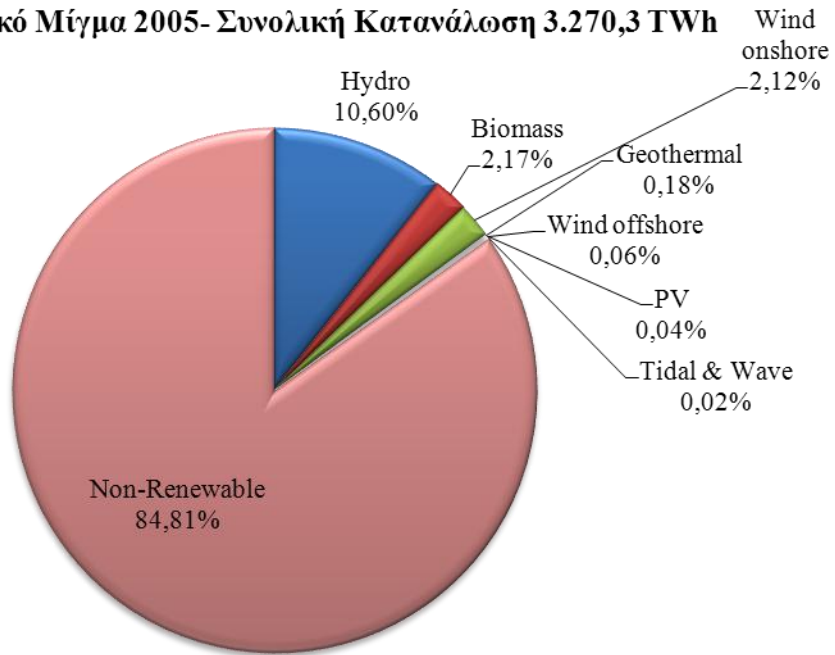


Εικόνα 16-EWEA

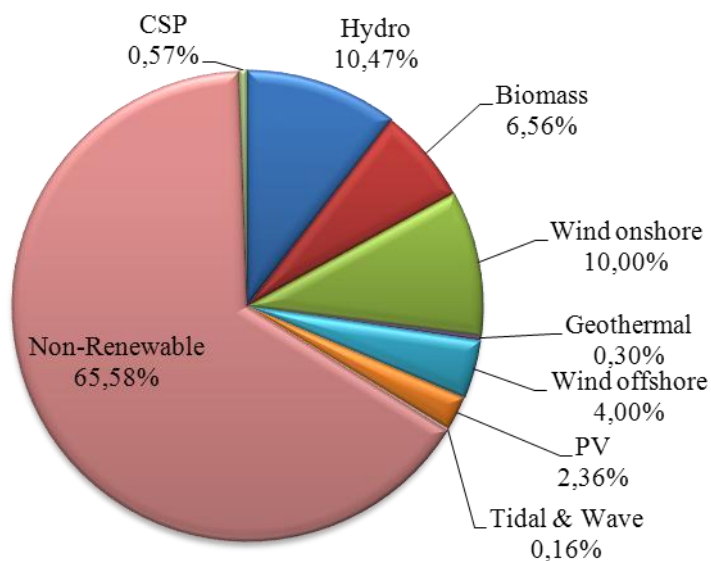
Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οφείλεται στους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέχρι το 2020, σύμφωνα με τους οποίους 34% του ηλεκτρικού ρεύματος θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εκ των οποίων 495 TWh θα προέρχονται από την αιολική ενέργεια (14%). Η ανάπτυξη του τομέα των ανανεώσιμων και μετά το 2020 απαιτεί νέους στόχους, πιο μακροπρόθεσμους οι οποίοι φτάνουν μέχρι το 2050 όπου και αναμένεται μείωση των αερίων εκπομπών της τάξης του 80-95% σε σύγκριση με τα ποσοστά του 1990. Εξαιτίας της μεγάλης διάρκειας ζωής των συμβατικών σταθμών παραγωγής ενέργειας (35-45 χρόνια για τους γαιάνθρακες και 30-35 για το φυσικό αέριο) είναι απαραίτητη η δέσμευση των χωρών ότι δε θα κατασκευαστούν νέοι σταθμοί τέτοιου είδους μετά το 2015.

Το ενεργειακό μίγμα της Ευρώπης έχει αλλάξει σημαντικά και θα αλλάξει ακόμα περισσότερο όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα όπου γίνεται σύγκριση του ενεργειακού μίγματος το 2005 και αυτού που αναμένεται το 2020. Τέσσερις δεκαετίες πριν σχεδόν η μισή από την παραγόμενη ενέργεια στη Ευρώπη προέρχονταν από γαιάνθρακες και ¼ από καύσιμο πετρέλαιο, ενώ το ποσοστό του φυσικού αερίου ήταν στα επίπεδα που είναι τώρα η αιολική ενέργεια. Σήμερα παράγουμε το ¼ της ενέργειας από φυσικό αέριο και μόλις 3% από καύσιμο πετρέλαιο και 20% από ανανεώσιμες πηγές.

Ενεργειακό Μίγμα 2005- Συνολική Κατανάλωση 3.270,3 TWh



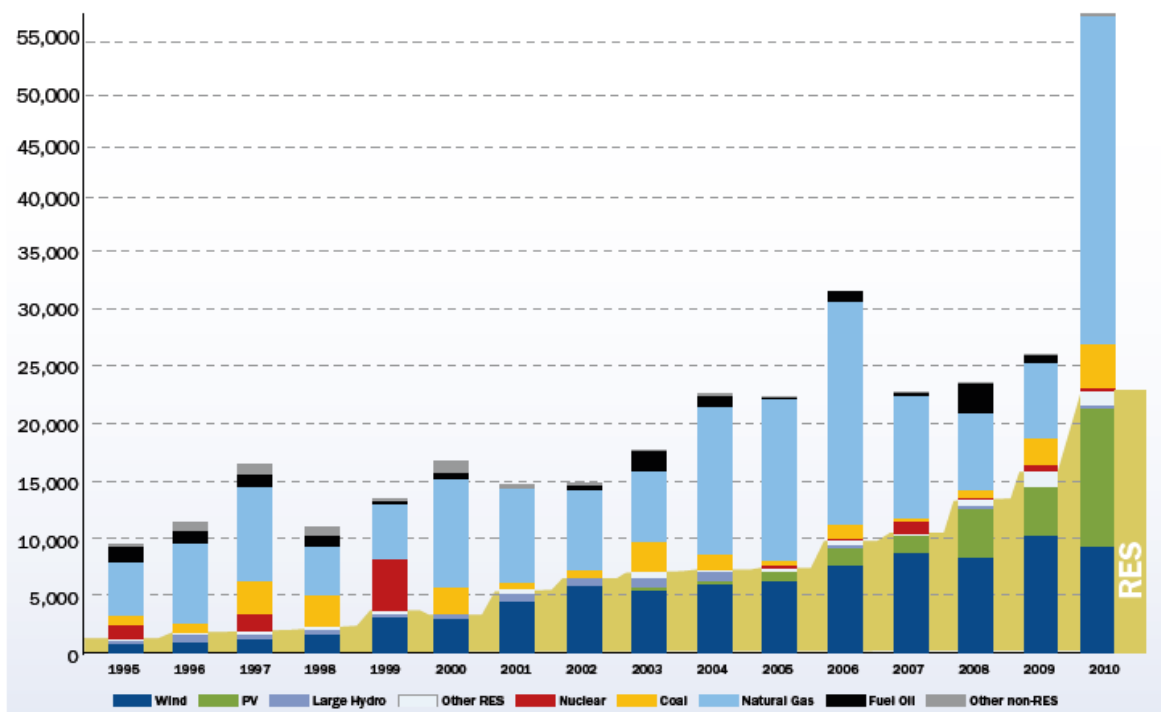
Ενεργειακό Μίγμα 2020- Συνολική Κατανάλωση 3.537,3 TWh



Εικόνα 17-EWEA

Όπως φαίνεται η αιολική ενέργεια αναμένεται να αποτελέσει το μεγαλύτερο κομμάτι των ανανεώσιμων πηγών για την επίτευξη των στόχων που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση μέχρι το 2020.

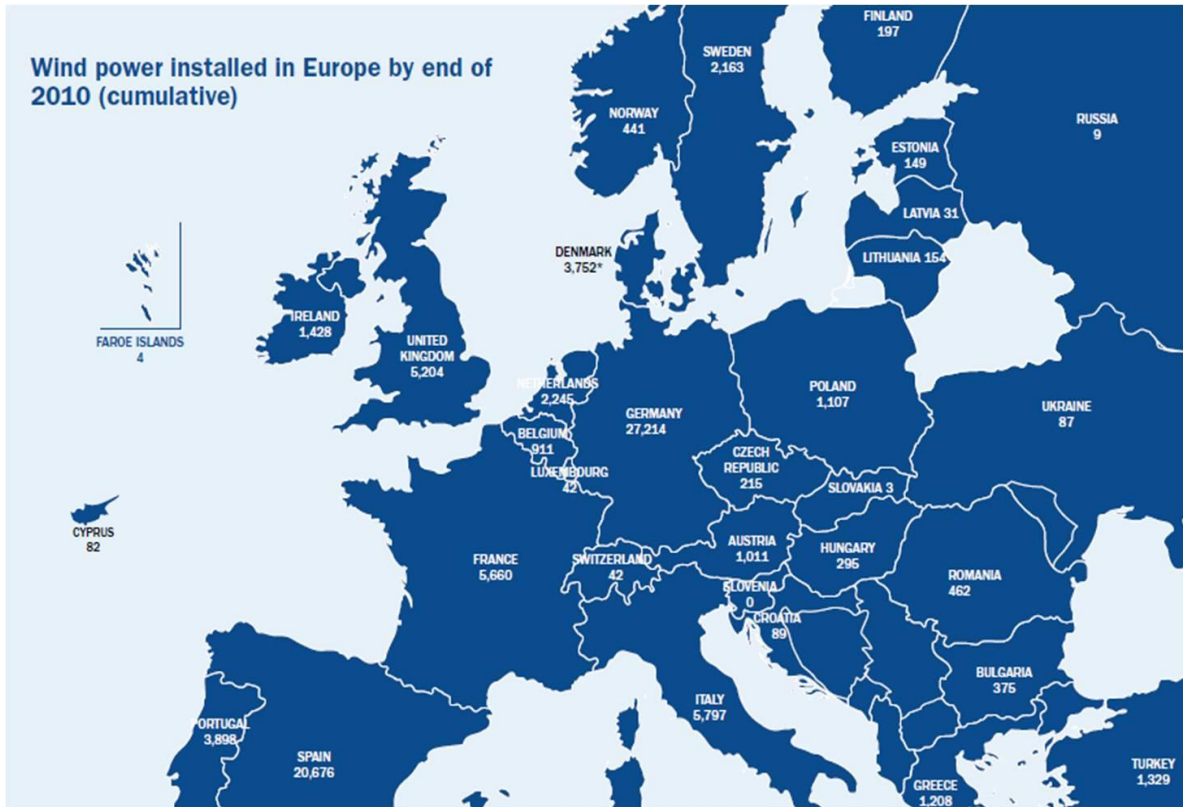
Η αύξηση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές οφείλεται στο γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των νέων εγκαταστάσεων ανήκουν στην τεχνολογία των ανανεώσιμων. Το 1995 η εγκατάσταση νέων σταθμών παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ανέρχονταν σε 1,3 GW, δηλαδή στο 14% των νέων εγκαταστάσεων εκείνης της χρονιάς. Από τότε αυξάνονται σταδιακά σε 13,3 GW το 2008 που αντιστοιχεί στο 57% των νέων εγκαταστάσεων τότε και 17,3 GW το 2009, δηλαδή 63%. Το 2010 ανέρχονταν στα 22,7 GW τα οποία λόγω των αυξημένων νέων σταθμών φυσικού αερίου αντιστοιχούν στο 41% της χρονιάς. Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η πορεία των νέων σταθμών παραγωγής ενέργειας από το 1995 μέχρι το 2010.



Εικόνα 18-EWEA

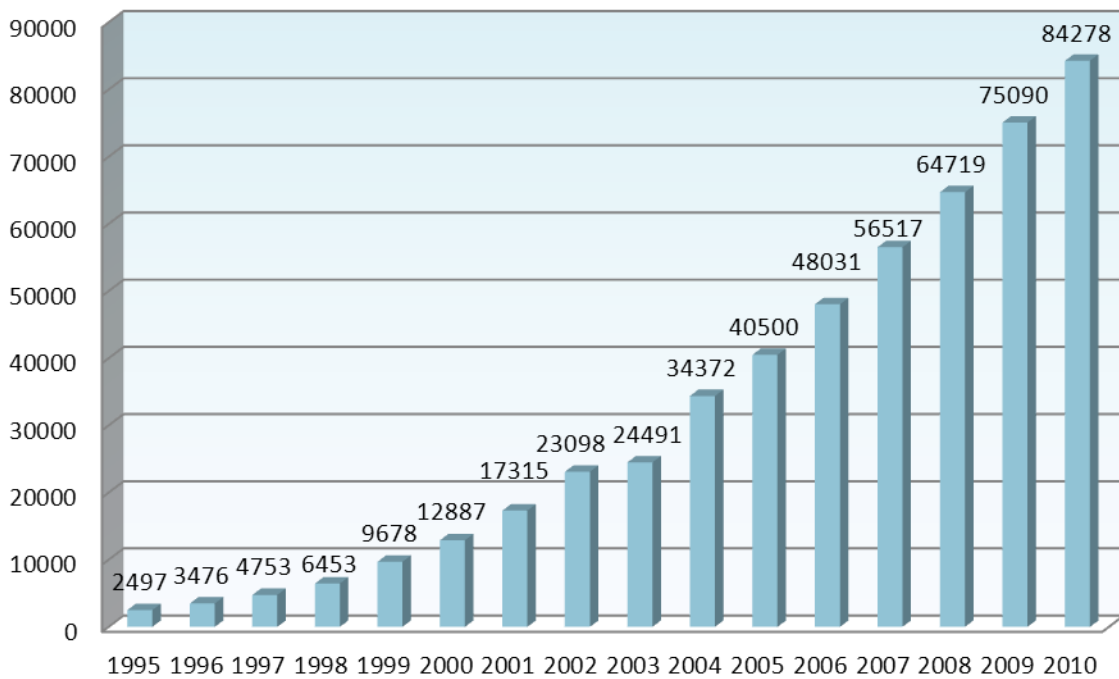
Κάθε χώρα μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι υποχρεωμένη μέχρι το 2020 να παράγει περίπου το 20% της ενέργειας της από ανανεώσιμες πηγές. Συγκεκριμένα η Ελλάδα έχει ανακοινώσει ότι θα ξεπεράσει το όριο αυτό κατά 2,2% και η αιολική ενέργεια (onshore-offshore) θα έχει τη “μερίδα του λέοντος” στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες. Ο τελικός στόχος το 2020 είναι να παράγονται από αιολικά πάρκα 7,5 GW (σήμερα είναι μόλις 1,2 GW), εκ των οποίων 300 MW θα προέρχονται από υπεράκτια πάρκα. Η ετήσια αύξηση της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο αναμένεται ότι θα είναι σταθερή της τάξης των 600 MW. Υπεράκτιες εγκαταστάσεις δε θα υπάρξουν πριν το 2016 και υπολογίζεται ότι η αύξηση της ισχύος που προσφέρουν θα ανέρχεται στα 50 MW κάθε χρόνο. Το 2020 τα υπεράκτια πάρκα αναμένεται να αυξηθούν κατά 100 MW.

Στο χάρτη και στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η παραγωγή ενέργειας από αιολικά πάρκα σε κάθε χώρα της Ευρώπης. Είναι εμφανές ότι η Ελλάδα παρά το εξαιρετικό αιολικό δυναμικό που έχει δεν ανήκει στις χώρες με σημαντική παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο, γεγονός που αναμένεται να αλλάξει τα επόμενα χρόνια.

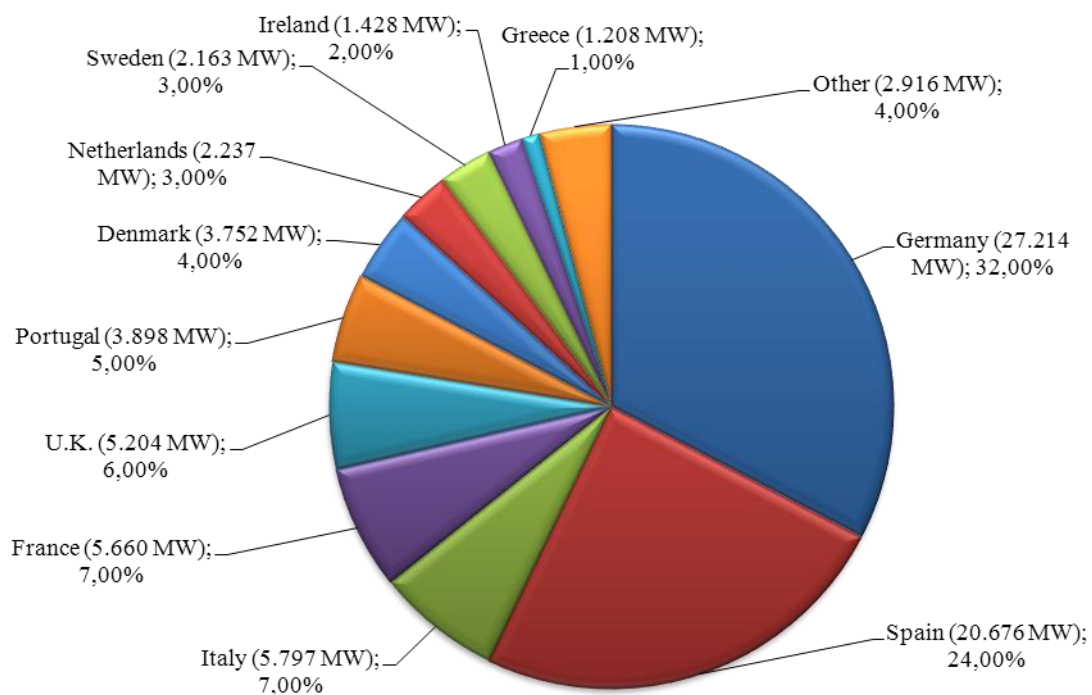


Εικόνα 19-EWEA

Συνολική Παραγωγή ενέργειας από αιολικά πάρκα στην Ευρώπη



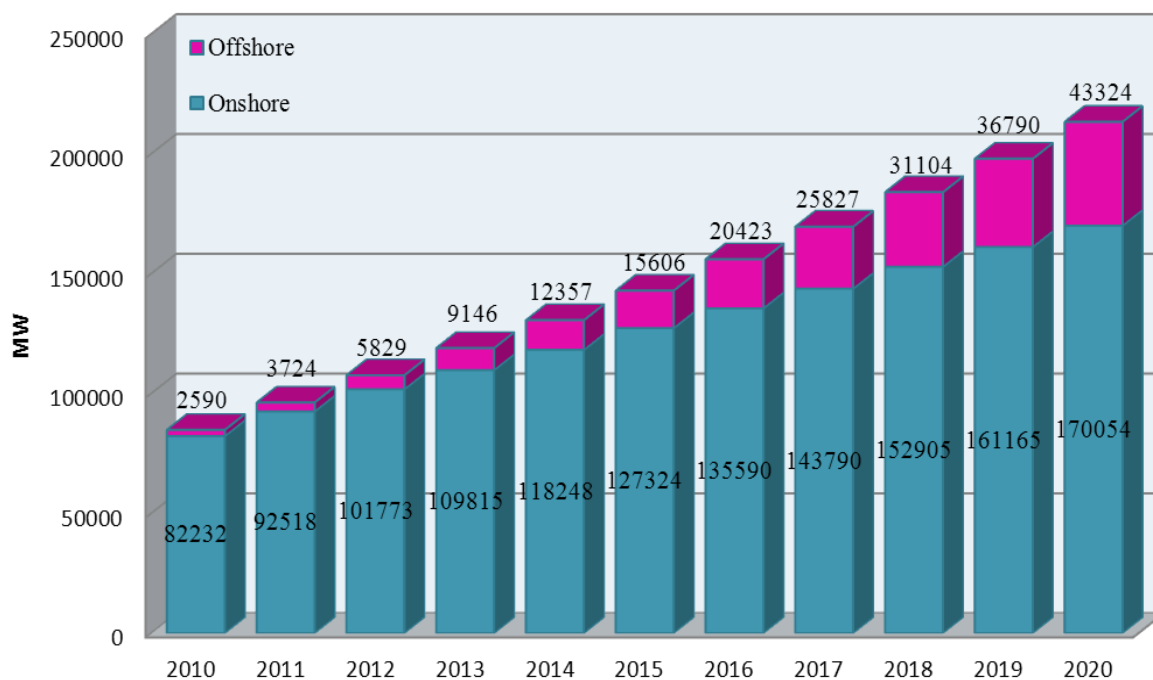
Εικόνα 20-EWEA



Εικόνα 21-EWEA

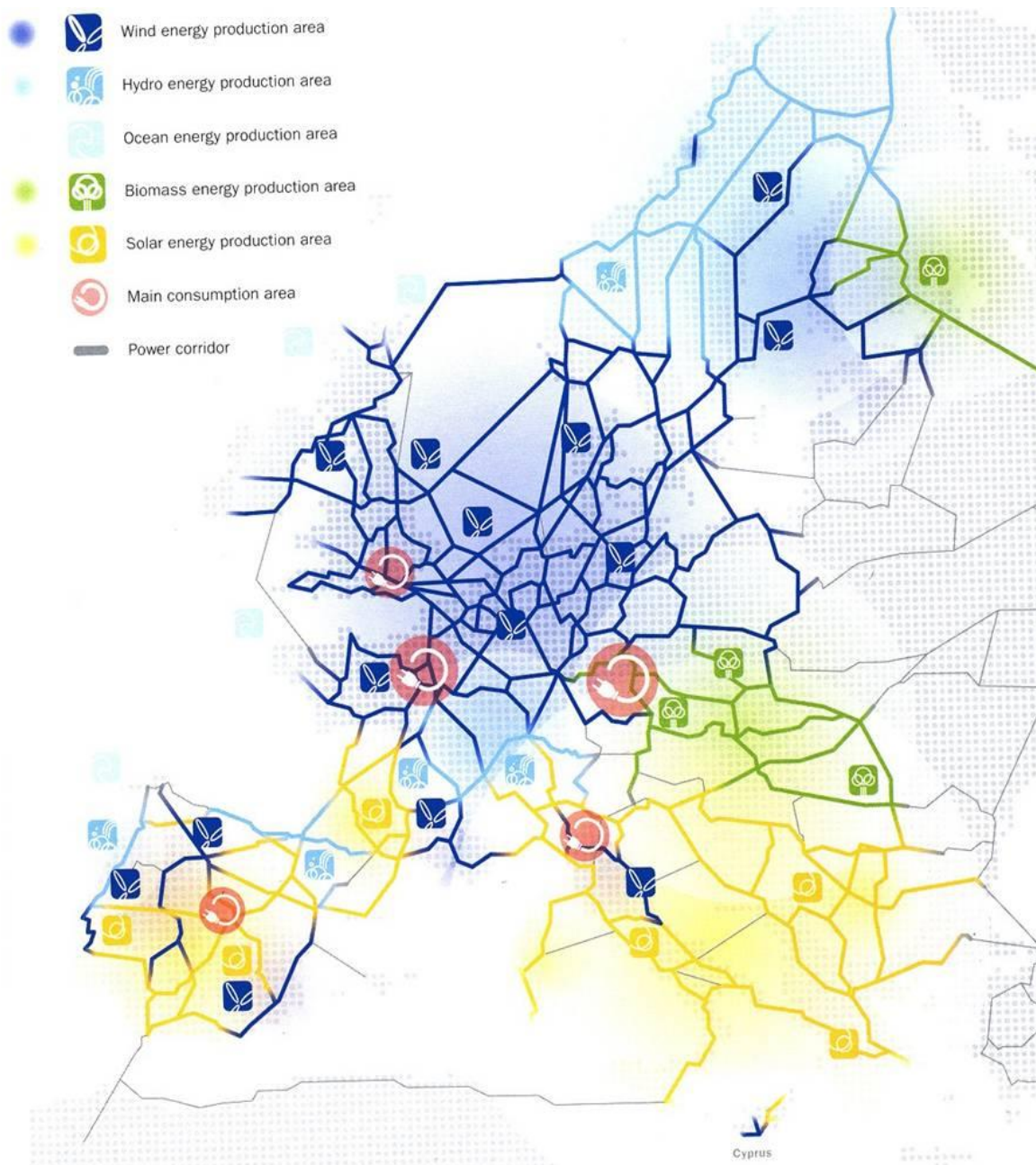
Η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων στην Ευρώπη θα αυξηθεί από 84,5 GW το 2010 σε 213,4 GW το 2020. Η αύξηση της ισχύος των onshore πάρκων θα παρουσιάσει ένα μέγιστο το 2011 και μετά θα αρχίσει να μειώνεται σταδιακά με κατά μέσο όρο αύξηση 1,5%. Αντίθετα η αύξηση της ισχύος των υπεράκτιων πάρκων (offshore) θα έχει ανοδική πορεία μέχρι το 2020 αφού από το 1,1 GW που θα εγκατασταθούν το 2011 θα φτάσουμε στα 6,5 GW που θα εγκατασταθούν το 2020, μια μέση δηλαδή αύξηση της τάξης του 21,5%.

Συνολική Ισχύς από αιολικά πάρκα στην Ευρώπη



Εικόνα 22-EWEA

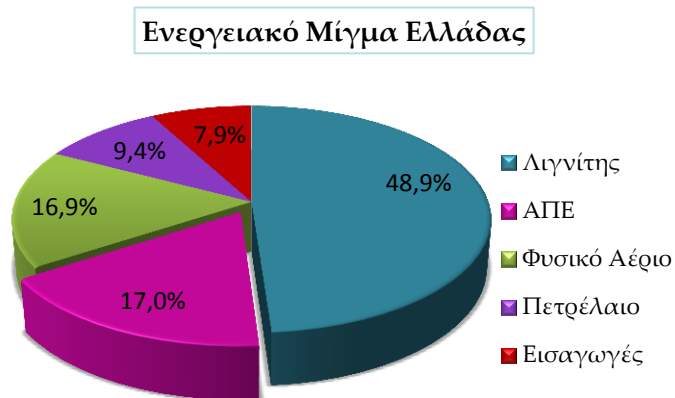
Όπως αναφέρθηκε για τη σωστή διαχείριση της ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει προτείνει την κατασκευή ενός ενιαίου ευρωπαϊκού δικτύου (supergrid). Με αυτό τον τρόπο η ενέργεια θα διανέμεται άμεσα εκεί που υπάρχει ζήτηση. Για παράδειγμα αν έχει παραχθεί περισσότερη ενέργεια από αυτή που χρειάζεται στη βόρεια Ευρώπη και παράλληλα υπάρχει ζήτηση στη νότια, μέσω του ενιαίου δικτύου η μεταφορά της θα είναι εφικτή. Στον ακόλουθο χάρτη φαίνεται το supergrid όπως αναμένεται να είναι το 2050 που θα έχει ολοκληρωθεί.



Εικόνα 23-EWEA

1.4 Ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η παρούσα ενεργειακή κατάσταση της Ελλάδας, αλλά και οι στόχοι που έχουν τεθεί για τη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και οι απαιτούμενες αλλαγές του συστήματος για την επίτευξη των στόχων αυτών. Το ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας για τα έτη 2009-2010 φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Εικόνα 24-Επιτροπή Ενέργειας

Η Ελλάδα εισάγει φυσικό αέριο από τη Ρωσία, την Αλγερία και την Τουρκία, πετρέλαιο από το Ιράν, τη Σαουδική Αραβία και τη Λιβύη και λιθάνθρακα για παράλληλη καύση με το λιγνίτη προς βελτίωση της απόδοσης του καυσίμου από τη Νότιο Αφρική, τη Βενεζουέλα, την Κολομβία και

τη Ρωσία. Επιπλέον η Ελλάδα είναι διασυνδεδεμένη με τα ηλεκτρικά δίκτυα της Ιταλίας, της Αλβανίας, της Π.Γ.Δ.Μ., της Βουλγαρίας και της Τουρκίας.

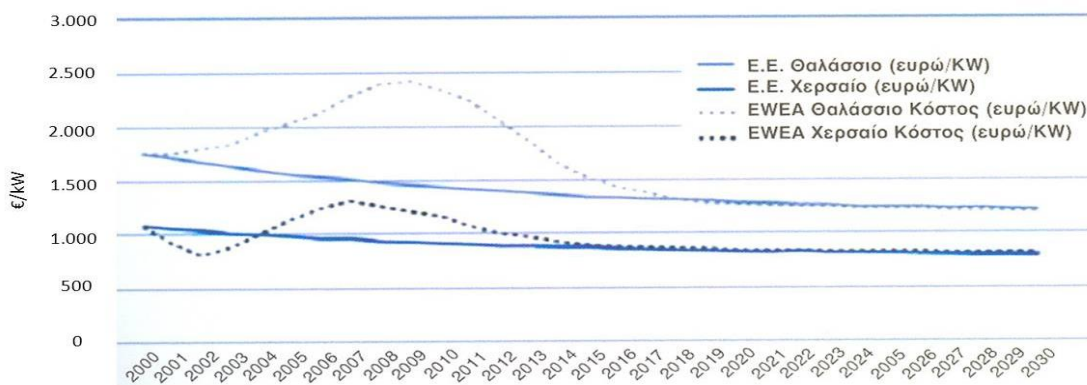
Η αυξημένη αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει το μέλλον της Ελληνικής Οικονομίας κάνει αναγκαία τη μεταβολή των βασικών αξόνων και προσδιοριστικών παραγόντων που διαμορφώνουν την εθνική ενεργειακή στρατηγική και οι οποίοι πρέπει να περιλαμβάνουν την προσέλκυση επενδυτών, τη σταθερή και αξιόπιστη νομοθεσία, την αξιοποίηση του διαθέσιμου Ελληνικού δυναμικού και την αποφυγή διαρροής αξιών επιστημόνων στο εξωτερικό. Παράλληλα απαραίτητη είναι η ενημέρωση των πολιτών για όλες τις μορφές ηλεκτροπαραγωγής, ώστε αυτές να τύχουν ευρύτερης κοινωνικής αποδοχής. Ενδείκνυται επίσης η προσφορά κινήτρων στις τοπικές κοινωνίες. Το ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας αναμένεται να διαφοροποιηθεί σημαντικά εν όψει των Ευρωπαϊκών στόχων του 2020 με σημαντική αύξηση των ΑΠΕ αλλά και του ΦΑ με σύγχρονη μείωση στη χρήση πετρελαίου και λιγνίτη. Για το σύνολο των Κρατών-Μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέχρι το 2020 προβλέπεται: α) 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, β) 20% διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας και γ) 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας. Για την Ελλάδα έχει υιοθετηθεί ο στόχος του 20% για τις ΑΠΕ, που εξειδικεύεται σε 40% στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% στις θερμικές ΑΠΕ και 10% στα βιοκαύσιμα. Για την επίτευξη αυτών των στόχων κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη έργων ενεργειακής υποδομής, η επέκταση των ηλεκτρικών δικτύων μεταφοράς, η διασύνδεση νήσων μεταξύ τους και με το ηπειρωτικό σύστημα και ο εκσυγχρονισμός των δικτύων διανομής. Επιπλέον απαιτείται ο επαναπροσδιορισμός του ενεργειακού μίγματος υπό τις σημερινές οικονομικές συνθήκες λαμβάνοντας υπόψη την ανάπτυξη, την αύξηση θέσεων εργασίας και την ενεργειακή ασφάλεια. (Χριστοφόρου, 2011)

Σύμφωνα με την Έκθεση Μακροχρόνιου Ενεργειακού Σχεδιασμού του Συμβουλίου Εθνικής Ενεργειακής Στρατηγικής για το 2009, το 52,5% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα προερχόταν από το λιγνίτη. Το 2020 το ποσοστό αυτό αναμένεται να είναι 29% ενώ το 2030 λιγότερο από 11%. Η σταδιακή αυτή μείωση οφείλεται στην απόσυρση των παλαιών λιγνιτικών μονάδων μέχρι το 2030 και στη μείωση των κοιτασμάτων του.

Το 2007 η έγχυση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στο διασυνδεδεμένο δίκτυο αντιστοιχούσε σε 2,3% του συνολικού ισοζυγίου ενέργειας, το 2008 αυξήθηκε σε 2,8%, το 2009 σε 3,6% ενώ στις αρχές του 2010 σε 4,7%.

Σύμφωνα με μελέτη του ΔΕΣΜΗΕ που πραγματοποιήθηκε το 2009, οι ΑΠΕ προσφέρουν στο διασυνδεδεμένο σύστημα συνολική ισχύ 3313 MW, εκ των οποίων 2900 MW αφορούν στην εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας. Τα αιολικά πάρκα σε λειτουργία που είναι διασυνδεδεμένα είναι ισχύος 831 MW. Οι συνολικές αιτήσεις ΑΠΕ που εκκρεμούν είναι 960 MW, εκ των οποίων 915 MW είναι για την αιολική ενέργεια. Σύμφωνα με δηλώσεις τις ΔΕΗ η εγκατεστημένη ισχύς από ΑΠΕ θα αυξηθεί μέχρι το 2015 κατά περίπου 1000 MW, ενώ το κόστος της επένδυσης θα ξεπεράσει τα €2 δισεκατομμύρια.

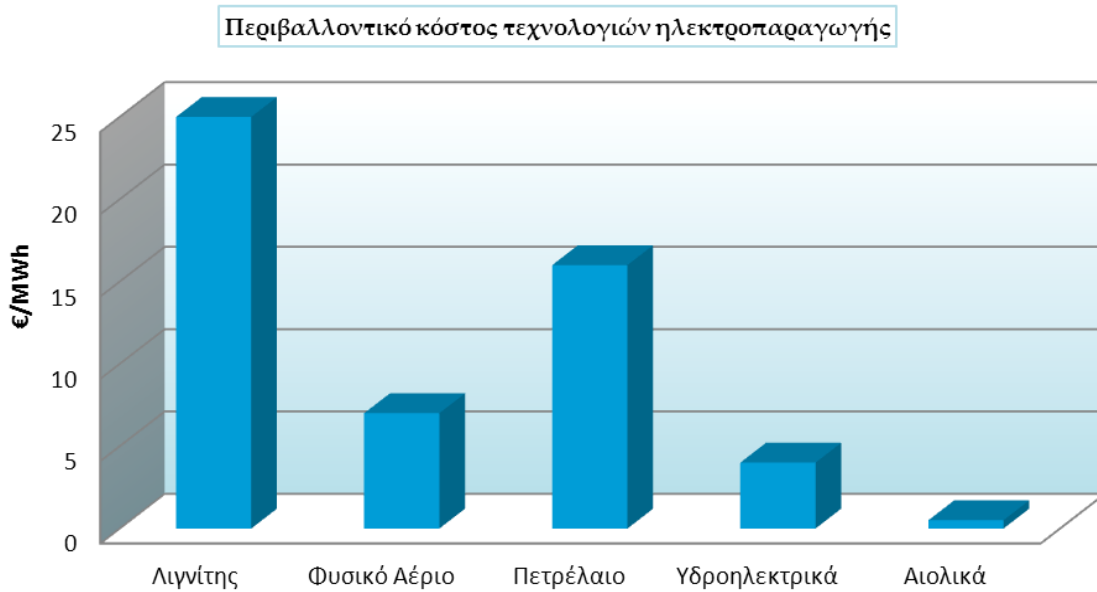
Το πρόβλημα βέβαια είναι το κόστος της ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ, το οποίο όμως αναμένεται να μειωθεί τόσο από την εξέλιξη της τεχνολογίας τους όσο και από τη μαζική παραγωγή τους. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η μείωση του κόστους που αναμένεται για τα αιολικά πάρκα, το οποίο εκτιμάται για τις χερσαίες εφαρμογές να είναι της τάξης του 16%.



Εικόνα 25-Επιτροπή Ενέργειας

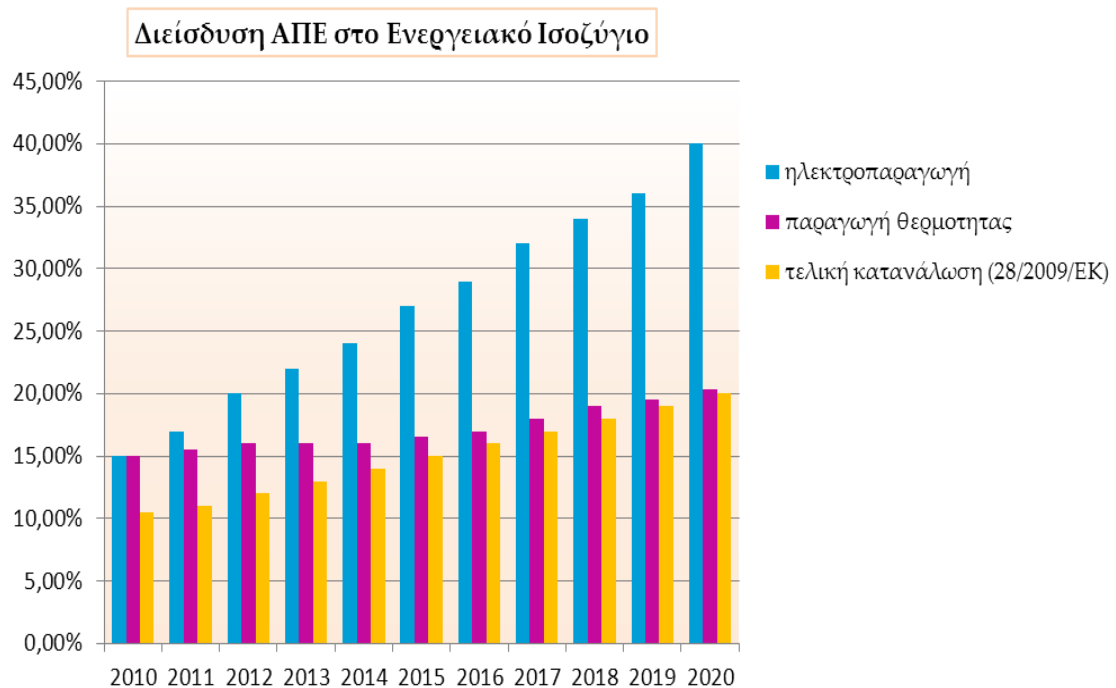
Ο βαθμός διείσδυσης των σταθμών που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το κόστος εγκατάστασής τους. Γι' αυτό το λόγο είναι ιδιαίτερα σημαντικό το κόστος αυτό να διατηρηθεί σε ανταγωνιστικά επίπεδα των σημερινών τιμών πώλησης της παραγόμενης ενέργειας. Η προσπάθεια που έχει γίνει τα τελευταία χρόνια για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ΑΠΕ, είχε ως αποτέλεσμα το εμπορικό μέγεθος των αιολικών πάρκων να δεκαπλασιασθεί και το κόστος τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών να μειωθεί κατά 30-40% ανεξάρτητα από την τιμή της πρώτης ύλης.

Εκτός όμως από το κόστος της εγκατάστασης και της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα σημαντικό είναι και το περιβαλλοντικό κόστος. Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται το περιβαλλοντικό κόστος τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα.



Εικόνα 26-Επιτροπή Ενέργειας

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία των πέντε τελευταίων ετών η παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ αυξάνεται με ρυθμό 15% έως 43% ετησίως. Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει την αναμενόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο για επίτευξη των στόχων του 2020.



Εικόνα 27-Επιτροπή Ενέργειας

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται τα απολογιστικά στοιχεία του 2009, για το Ελληνικό ηπειρωτικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) και μια αντίστοιχη εκτίμηση για το 2020, με την παραδοχή ότι έως τότε θα έχουν ολοκληρωθεί οι διασυνδέσεις όλων των νησιών του Αιγαίου. Σημειώνεται ότι η ετήσια κατανάλωση των μη διασυνδεδεμένων στο ηπειρωτικό ΣΗΕ νησιών ανέρχεται στο 10% περίπου του ηπειρωτικού ΣΗΕ, αναλογία η οποία θεωρείται ότι θα διατηρηθεί και στο μέλλον. Οι εκτιμήσεις για το 2020 γίνονται με την παραδοχή ότι το 40% της ετήσιας ζήτησης σε ενέργεια θα καλύπτεται από ΑΠΕ. Η παραγωγή των μεγάλων υδροηλεκτρικών αυξάνεται μόνο κατά 6% περίπου έναντι του 2009, ενώ το μεγαλύτερο μέρος του στόχου επιτυγχάνεται με την αιολική παραγωγή, για την οποία θα απαιτηθεί η εγκατάσταση Α/Γ ισχύος 9.000 MW, η οποία θεωρείται ως η μέγιστη πιθανή. Οποιαδήποτε διαφοροποίηση υπέρ των λοιπών ΑΠΕ είναι προς την ασφαλή πλευρά για την ασφάλεια του ΣΗΕ. Στο τέλος του πίνακα έχουν υπολογισθεί και οι δείκτες διείσδυσης των αιολικών, από τους οποίους ο πιο κρίσιμος μπορεί να θεωρηθεί το ποσοστό της διείσδυσης αιολικών ως προς το ελάχιστο φορτίο συν το φορτίο άντλησης. Για τον περιορισμό αυτού του δείκτη απαιτείται να υπάρχει η δυνατότητα πρόσθετου φορτίου (διασυνδέσεων και άντλησης) της τάξης των 3.000 MW. Οι παραπάνω εκτιμήσεις επηρεάζονται σε μικρό βαθμό σε περίπτωση που η ζήτηση του 2020 είναι διαφορετική από την εκτιμώμενη. (Παπαδόπουλος, 2008)

	Αποτελέσματα (2009)	Εκτιμήσεις (2020)
Συνολική Παραγωγή	53.876 GWh	70.000 GWh
<u>Παραγωγή ΑΠΕ</u>	7.892 (14,6%)	28.000 (40,0%)
Μεγάλοι ΥΗΣ	4.955 (9,2%)	5.250 (7,5%)
Αιολικά	1.908 (3,5%)	20.000 (28,6%)
Λοιπά	1.028 (1,9%)	2.750 (3,9%)
Εγκατεστημένη ισχύς Α/Γ	917 MW	9.000 MW
Μέγιστη ζήτηση ΣΗΕ	9.762 MW	15.000 MW
Ελάχιστη ζήτηση ΣΗΕ	3.473 MW	4.500 MW
<u>Δείκτες διείσδυσης αιολικών</u>		
Στην ενέργεια	1.908/53.876=3,5%	20.000/70.000=28%
Στην αιχμή	917/9.762=9,4%	9.000/15.000=60%
Στο ελάχιστο	917/3.473=26,4%	9.000/4.500=200%
Με αύξηση (*) 500 MW	917/3.973=23,1%	9.000/5.000=190%
1.000 MW	917/4.473=20,5%	9.000/5.500=160%
2.000 MW		9.000/6.500=138%
3.000 MW		9.000/7.500=120%
(*) Λόγω άντλησης η διασυνδέσεων		

Όπως αναφέρθηκε οι παραπάνω εκτιμήσεις βασίζονται στο ότι μέχρι το 2020 θα έχει πραγματοποιηθεί η διασύνδεση των νησιών τόσο μεταξύ τους όσο και με την ηπειρωτική Ελλάδα. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η προτεινόμενη διασύνδεση.



Εικόνα 28-Επιτροπή Ενέργειας

Παρατηρούμε τη δημιουργία τεσσάρων ομάδων διασυνδεδεμένων νησιών:

1. Κυκλάδες
2. Β.Α. Νησιά του Αιγαίου
3. Κρήτη
4. Δωδεκάνησα

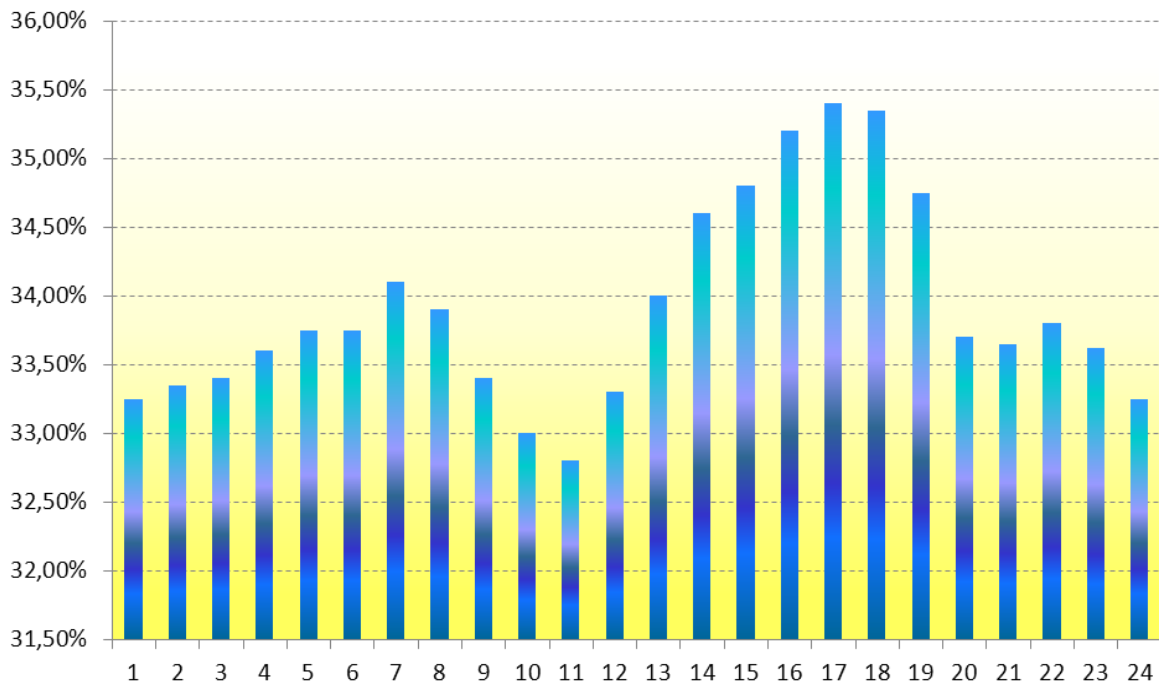
Τα αίτια της καθυστέρησης της διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας είναι οι ακόλουθοι:

- Βραδύτητα εξέλιξης της συνολικής διαδικασίας αδειοδότησης
- Οι αντιδράσεις των τοπικών κοινωνιών
- Η έλλειψη χαρακτηρισμού της γης (χρήση γης)
- Η μη ανάπτυξη των υποδομών των δικτύων για τη διείσδυση των ΑΠΕ

Το άμεσο αποτέλεσμα της καθυστέρησης αυτής είναι η απογοήτευση των επενδυτών λόγω της αβεβαιότητας της επένδυσης και η μη επίτευξη των εθνικών μας στόχων για διείσδυση των ΑΠΕ.

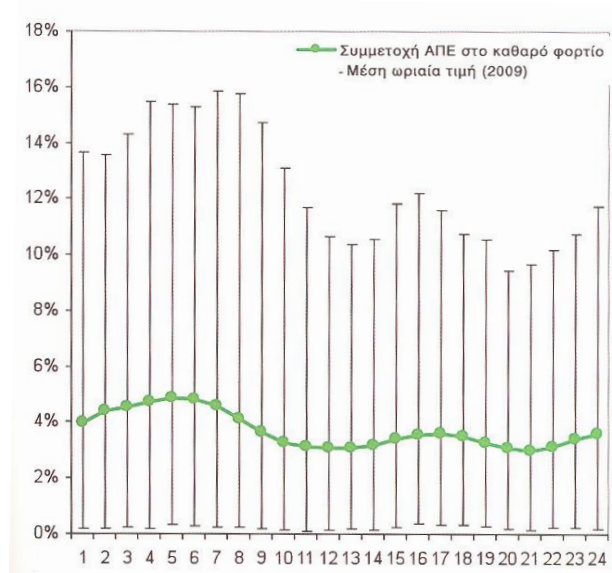
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέση ωριαία τιμή ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ σαν ποσοστό της μέγιστης ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ το 2009. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ καλύπτει κατά μέσο όρο το 33% της μέγιστης τιμής τους έτους.

Λόγος μέσης ετήσιας ωριαίας ισχύος ΑΠΕ/
Μέγιστη ετήσια ωριαία ισχύ ΑΠΕ (2009)



Εικόνα 29-Επιτροπή Ενέργειας

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η εγχυόμενη στο σύστημα ισχύς από ΑΠΕ ως ποσοστό της αντίστοιχης συνολικής καθαρής ωριαίας ηλεκτροπαραγωγής και τη στοχαστική διακύμανσή της.



Εικόνα 30-Επιτροπή Ενέργειας

Παρατηρείται ότι η εγχυόμενη στο σύστημα ισχύς ΑΠΕ αποτελεί το 4% της συνολικής ισχύος, παρουσιάζει όμως ιδιαίτερα μεγάλες διακυμάνσεις από συμμετοχή στην ηλεκτροπαραγωγή μέχρι και 16%, αλλά και με μεγάλη πιθανότητα μηδενικής συμβολής. Άρα είναι προφανές ότι η αξιοπιστία της ηλεκτροπαραγωγής και η αυτονομία δεν είναι δυνατόν να βασίζονται σε ΑΠΕ χωρίς έργα αντλησιοταμίευσης.

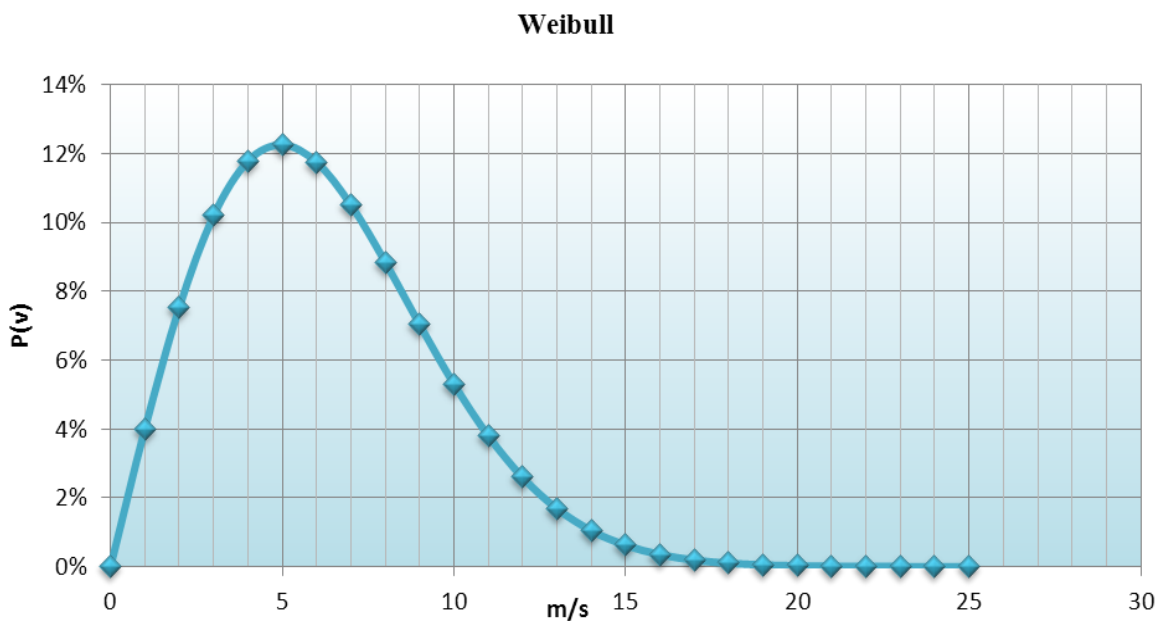
1.5 Θεωρία

Κατανομή Weibull

Για τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού μιας θέσης απαιτείται η γνώση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο. (Μπεργελές, 2005)
Η κατανομή Weibull περιγράφει με ικανοποιητική ακρίβεια την πυκνότητα πιθανότητας κατανομής της ταχύτητας. Είναι μια διπαραμετρική κατανομή με παραμέτρους c και k . Η σχέση που την εκφράζει είναι η ακόλουθη:

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad \text{όπου } V \text{ είναι η ταχύτητα του ανέμου.}$$

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η μορφή της κατανομής Weibull για $k = 2$ και $c = 7$.



Εικόνα 31

Η ενέργεια που μεταφέρεται από τον άνεμο είναι:

$$E_{κιν} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad [N \cdot m]$$

Επειδή όμως η παροχή μάζας ορίζεται : $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V$ όπου ρ η πυκνότητα του αέρα και A η επιφάνεια από την οποία διέρχεται, η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ισχύς:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad [W]$$

Βέβαια αυτή είναι η ισχύς που μεταφέρει ο άνεμος και όχι η ισχύς που δεσμεύει ή παράγει η ανεμογεννήτρια.

Η ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια εξαρτάται από το βαθμό απόδοσης C_p , ο οποίος ονομάζεται και συντελεστής ισχύος και δίνεται από τη σχέση:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3} \quad \text{όπου } P \text{ είναι η ισχύς που αποδίδεται από την ανεμογεννήτρια.}$$

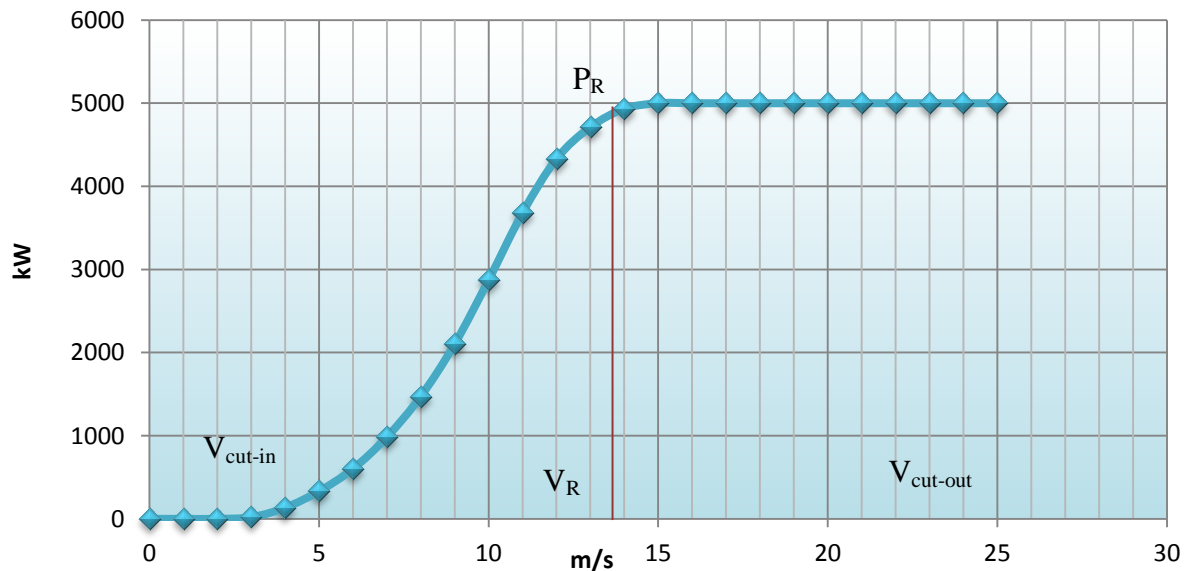
Ο συντελεστής ισχύος εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής και είναι συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad \text{όπου } \omega \text{ είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και } R \text{ η ακτίνα του.}$$

Η μέγιστη τιμή του συντελεστή C_p εμφανίζεται μόνο για μια τιμή του λ .

Η ισχύς που παράγει μια ανεμογεννήτρια εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Η σχέση ανάμεσα στην ισχύ και την ταχύτητα δίνει την καμπύλη ισχύος, η οποία χαρακτηρίζει την κάθε μηχανή και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της και το σχεδιασμό της. Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η τυπική μορφή μιας καμπύλης ισχύος. Η ταχύτητες που εμφανίζονται είναι η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας $V_{\text{cut-in}}$ η οποία έχει τυπική τιμή περίπου 3 m/s, η ονομαστική ταχύτητα V_R με τυπική τιμή 11 m/s και η οποία είναι η μικρότερη ταχύτητα ανέμου για την οποία η ανεμογεννήτρια παράγει την ονομαστική της ισχύ και η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας $V_{\text{cut-out}}$ με τυπική τιμή 25 m/s.

Καμπύλη ισχύος

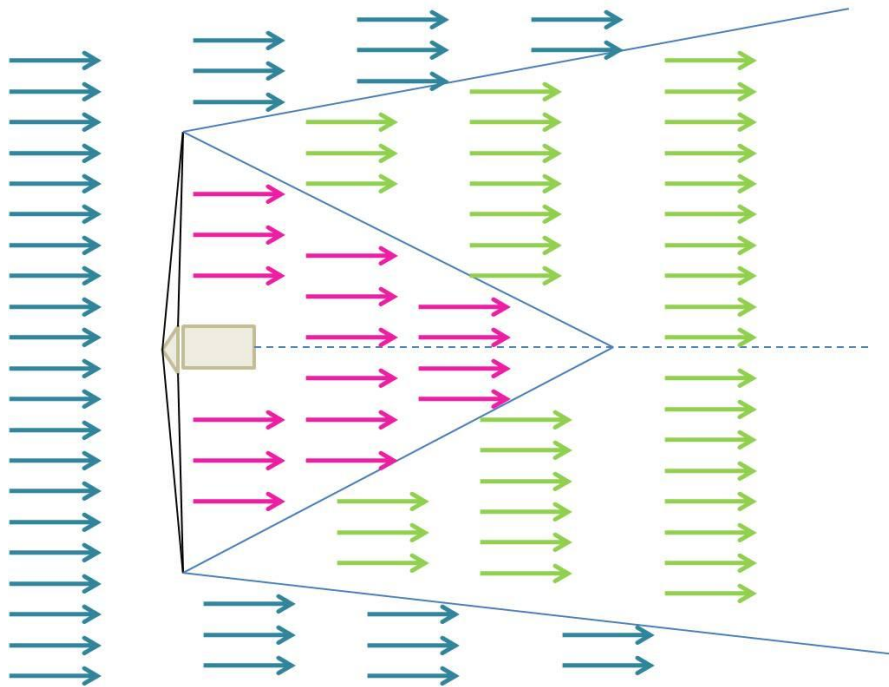


Εικόνα 32

Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια δίνεται από τη σχέση:

$E = 8760 \cdot P_g$ όπου P_g είναι η ισχύς της ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη κάθε ταχύτητα ανέμου μέσω της κατανομής Weibull.

Ένα πολύ σημαντικό ζήτημα κατά την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου είναι η επίδραση του ομόρρου μεταξύ των ανεμογεννητριών. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο κατά την κύρια κατεύθυνση του ανέμου, προκειμένου να μην υπάρχει σημαντική επίδραση του ομόρρου είναι 5 με 6 διαμέτρους. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται το πεδίο του ομόρρου πίσω από μια ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 33

Όπως φαίνεται και από το σχήμα διακρίνονται τρεις περιοχές: εκτός του ομόρρου (μπλε βέλη), εντός του δυναμικού πυρήνα (ροζ βέλη) και εντός του ομόρρου αλλά εκτός του δυναμικού πυρήνα (πράσινα βέλη). Η ταχύτητα σε κάθε μια από τις παραπάνω περιοχές δίνεται από τη σχέση:

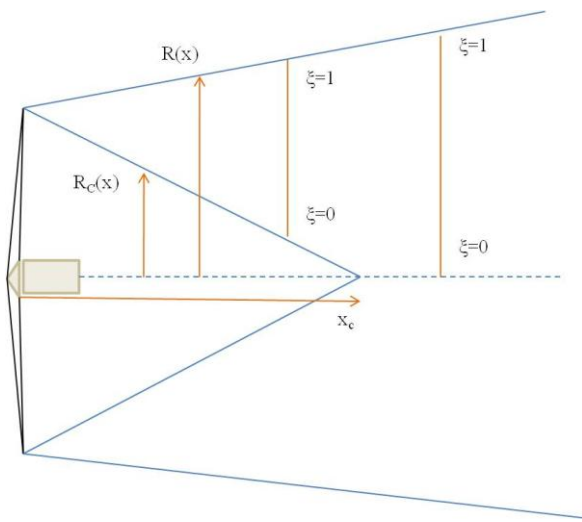
$$u(x, r) = \left\{ \begin{array}{ll} U & , r > R(x) \\ U_T & , 0 < x < x_c, r < R(x) \\ U - \Delta U(x) \cdot [1 - \xi(x)^{1.5}]^2 & , \text{αλλού} \end{array} \right\}$$

Όπου με U συμβολίζεται η ταχύτητα του ανέμου, με U_T η ταχύτητα πίσω από την ανεμογεννήτρια η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$U_T = U \cdot \sqrt{1 - C_T} \quad \text{όπου } C_T \text{ ο συντελεστής ώσης,}$$

Με $\Delta U(x)$ το έλλειμμα ταχύτητας στον άξονα του ομόρρου, το οποίο υπολογίζεται:

$$\Delta U(x) = \left\{ \begin{array}{ll} U - U_T & , x < x_c \\ \frac{35}{9} \cdot (U - U_T) \cdot \left(\frac{R_0}{R(x)} \right)^2 & , x > x_c \end{array} \right\}$$



Εικόνα 34

με $R_c(x)$ η ακτίνα του δυναμικού πυρήνα:

$$R_c(x) = R_0 \cdot \frac{x_c - x}{x_c}, \quad x < x_c$$

και με $R(x)$ την ακτίνα του ομόρρου:

$$R(x) = R_0 + x \cdot \frac{dR(x)}{dx}$$

Για τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες όμως είναι απαραίτητη και η γνώση της ταχύτητας του κύματος και της πίεσης που αυτό ασκεί στον πλωτήρα.

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα γίνει η ανάλυση της μη γραμμικής θεωρίας κατά Stokes για τα κύματα 5ης τάξης για την εύρεση του πεδίου ταχυτήτων και των πιέσεων, καθώς είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε αυτά τα μεγέθη στο επίπεδο στο οποίο κινείται το κύμα. Πριν γίνει όμως αυτό, πρέπει να αναφέρουμε ορισμένα χαρακτηριστικά των απλών αρμονικών κυμάτων, προκειμένου να γίνει πιο εύκολα κατανοητή η μη γραμμική θεωρία στη συνέχεια.

Ένα σύστημα από μάζες και ελατήρια εμφανίζει ιδιοσυχνότητες τόσες όσοι είναι και οι βαθμοί ελευθερίας του. Η επιφάνεια της θάλασσας είναι ένα συνεχές μέσο με άπειρους βαθμούς ελευθερίας και ιδιοσυχνότητες που σχηματίζουν ένα συνεχές φάσμα. Πάνω στην επιφάνεια του νερού μπορούμε κατά συνέπεια να βρούμε κατά συνέπεια να βρούμε κυματισμούς οποιασδήποτε συχνότητας (αν εξαιρέσουμε την περίπτωση όπου το ρευστό δεν είναι απέρατο, οπότε οι οριακές συνθήκες θέτουν περιορισμούς στη μορφή των κυμάτων). Ο κύριος λόγος για τον οποίο βρίσκουμε επιφανειακά κύματα σε ορισμένο εύρος συχνοτήτων οφείλεται στο ότι και οι δυνάμεις που τα προκαλούν βρίσκονται σε ορισμένο εύρος. (Μαυράκος, 1999)

με $\xi(x)$ η αδιάστατη συντεταγμένη, που ορίζεται:

$$\xi(x) = \begin{cases} \frac{r - R_c(x)}{R(x) - R_c(x)}, & 0 < x < x_c, R_c(x) < r < R(x) \\ \frac{r}{R(x)}, & x > x_c, 0 < R(x) \end{cases}$$

με x_c το μήκος του δυναμικού πυρήνα:

$$x_c = R_0 \cdot \frac{\left(\frac{\sqrt{35}}{3} - 1 \right)}{\frac{dR(x)}{dx}}$$

Απλά αρμονικά Κύματα

Για τα απλά αρμονικά κύματα ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και το δυναμικό του πεδίου ροής για πεπερασμένο βάθος νερού.

$$\zeta(x, y) = \frac{H}{2} \cdot \cos[k(x \cos \vartheta + y \sin \vartheta)]$$

και

$$\phi(x, y, z) = \frac{H}{2} \cdot \frac{g}{\omega} \cdot \frac{\cosh[k(z \cdot d)]}{\cosh(k \cdot d)} \sin[k(x \cos \vartheta + y \sin \vartheta)]$$

Όπου:

k: ο αριθμός κύματος που ισούται με $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

λ : το μήκος κύματος

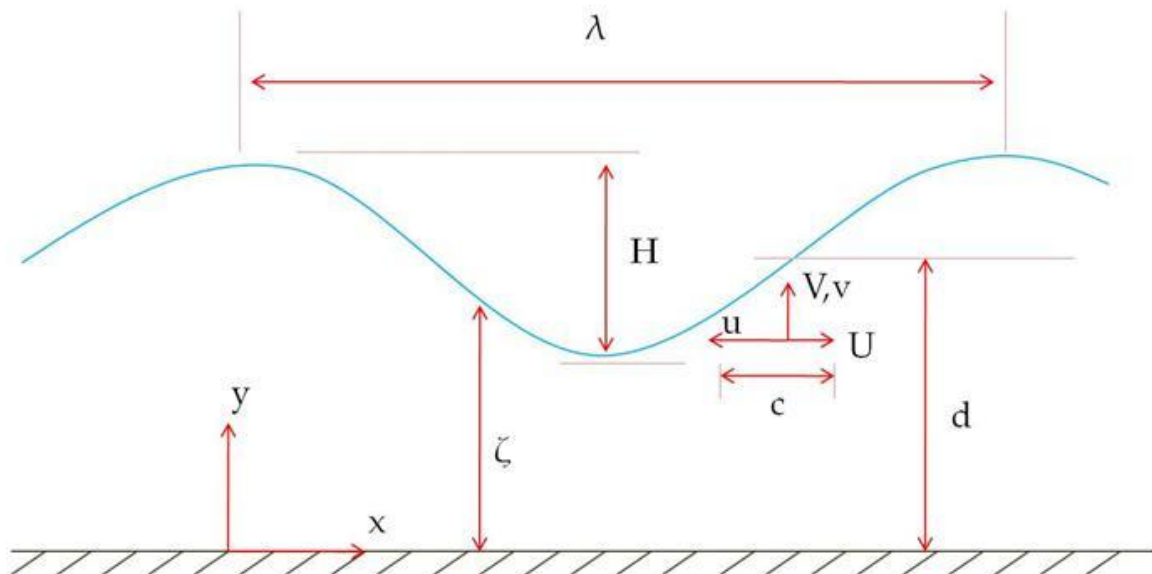
H: το ύψος του κύματος

ω : η κυκλική συχνότητα του κύματος που συνδέεται με τον αριθμό k μέσω της σχέσης $\omega^2 = kg \tanh(kd)$

d: το βάθος του νερού

ϑ : η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση προχώρησης του μετώπου του κυματισμού με τον άξονα των x.

Πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι στην περίπτωση του απλού αρμονικού κύματος οι τροχιές των μορίων του ρευστού είναι κλειστές και άρα δεν έχουμε μεταφορά μάζας.



Εικόνα 35

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται τα φυσικά μεγέθη ενός κύματος.

Μη γραμμικά κύματα 5^{ης} τάξης

Τα κύρια χαρακτηριστικά της θεωρίας Stokes για τα περιοδικά σταθερά κύματα είναι ότι όλες οι μεταβολές στην κατεύθυνση της διάδοσης παρουσιάζονται ως σειρές Fourier, όπου οι συντελεστές γράφονται ως διαταραχές ενός όρου που αυξάνεται με το ύψος του κύματος.

Οι περισσότερες από τις θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση των μη γραμμικών κυμάτων κάνουν την υπόθεση ότι τα κύματα ταξιδεύουν κατά τον πρώτο ορισμό της ταχύτητας σύμφωνα με τον Stokes. Ως αποτέλεσμα, στο επίπεδο ενδιαφέροντος ταξιδεύουν έτσι ώστε η μέση ταχύτητα του ρευστού παντού να είναι μηδέν. Στην πραγματικότητα όμως τα κύματα ταξιδεύουν σε μικρά αλλά πεπερασμένα ρεύματα είτε θετικά είτε αρνητικά και η μετρούμενη περίοδος είναι μια περίοδος Doppler. Οι θεωρίες που εφαρμόζονται δεν υπολογίζουν την ταχύτητα του κύματος. Αυτή προσδιορίζεται από εξωτερικά φυσικά χαρακτηριστικά, όπως το ρεύμα, ή η μάζα και ο όγκος της ροής κάτω από το κύμα.

Γενικά για την εφαρμογή κάθε κυματικής θεωρίας είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε είτε την ταχύτητα του κύματος ή του ρεύματος, είτε τη μάζα της ροής. Για την ανάπτυξη του κώδικα εφαρμόστηκε η θεωρία Stokes για κύματα 5^{ης} τάξης. Εδώ αντί για τον άγνωστο συντελεστή Fourier ak που χρησιμοποιήθηκε σε άλλες μεθόδους, χρησιμοποιήθηκε το αδιάστατο ύψος κύματος στη μορφή $kH/2$. Οι σχέσεις των συντελεστών είναι συναρτήσεις του αδιάστατου βάθους kd , έτσι ώστε ο μόνος άγνωστος να είναι ο κυματαριθμός k , ο οποίος μπορεί να υπολογισθεί με την αριθμητική επίλυση μιας μη-γραμμικής εξίσωσης. (Fenton, 1983)

Για τις εξισώσεις του δυναμικού και της ανύψωσης του μη γραμμικού κύματος 5^{ης} τάξης ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\phi(x, y) = -\bar{u}x + C_0 \left(\frac{g}{k^3} \right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} \cosh(jky) \sin(jky) + O(\varepsilon^6)$$

Όπου με \bar{u} ορίζεται η μέση οριζόντια ταχύτητα του ρευστού και δίνεται από τη σχέση

$$\bar{u} \left(\frac{k}{g} \right)^{1/2} = C_0 + \varepsilon^2 C_2 + \varepsilon^4 C_4 + O(\varepsilon^6)$$

$$\zeta(x) = d + \varepsilon \cdot \cos kx + \varepsilon^2 B_{22} \cos 2kx + \varepsilon^3 B_{31} (\cos kx - \cos 3kx) + \varepsilon^4 (B_{42} \cos 2kx + B_{44} \cos 4kx) + \varepsilon^5 (-(B_{53} + B_{55}) \cos kx + B_{53} \cos 3kx + B_{55} \cos 5kx) + O(\varepsilon^6)$$

Οι συντελεστές A_{ij} , B_{ij} και C_i δίνονται σε πίνακα και εξαρτώνται από το kd . (Fenton, 1983)

Η επίλυση του συστήματος γίνεται με την εύρεση δυο αδιάστατων μεγεθών, του $k = 2\pi/\lambda$ και του $\varepsilon = kH/2 = \pi H/\lambda$. Αν είναι γνωστά το ύψος του κύματος H , το μήκος του κύματος λ και το βάθος της θάλασσας d , τότε και τα δύο αυτά μεγέθη μπορούν να υπολογισθούν και άρα να βρεθεί η λύση. Παρόλα αυτά συνήθως γνωρίζουμε την περίοδο του κυματισμού αντί για το μήκος του, γεγονός που καθιστά την επίλυση πιο δύσκολη. Σε οποιαδήποτε περίπτωση όμως πρέπει να γνωρίζουμε την ταχύτητα του κύματος είτε από μετρήσεις είτε με βάση τη σχέση $c = \lambda/T$.

Για την ανάπτυξη του κώδικα έχουμε πάρει ως δεδομένη την πιο συνηθισμένη περίπτωση, στην οποία είναι γνωστά το ύψος του κύματος H , το βάθος d , η περίοδος T και η μέση ταχύτητα του ρεύματος.

Σε ένα επίπεδο που κινείται με το κύμα, η μέση ταχύτητα του ρευστού u είναι προς τα αρνητικά του άξονα x , έτσι ώστε όταν το κύμα ταξιδεύει με μια ταχύτητα c προς τον θετικό άξονα x , η μέση ταχύτητα του ρευστού κατά Euler είναι:

$$c_E = c - \bar{u}$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ταχύτητα c δίνεται από τη σχέση $c = \lambda/T$ και η μέση ταχύτητα u από την εξίσωση της σελίδας 45.

Για τον υπολογισμό του k και του λ επιλύεται με τη μέθοδο Newton-Raphson ή τη μέθοδο της τέμνουσας (secant) λόγω πολυπλοκότητας εύρεσης της παραγώγου, το ακόλουθο μη γραμμικό σύστημα:

1.
$$\left(\frac{k}{g}\right)^{1/2} c_E - \frac{2\pi}{T(gk)^{1/2}} + C_0(kd) + \left(\frac{kH}{2}\right)^2 C_2(kd) + \left(\frac{kH}{2}\right)^4 C_4(kd) = 0$$
2.
$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

Ως αρχική τιμή του k θεωρείται αυτή που προκύπτει από την επίλυση της σχέσης $\omega^2 = kg \tanh(kd)$ του απλού αρμονικού κύματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1.1 Πλωτές Διατάξεις

Για τη σωστή κατανόηση του συστήματος της πλωτής ανεμογεννήτριας, είναι απαραίτητη η μελέτη της έρευνας που έχει διεξαχθεί μέχρι τώρα. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται στην πορεία οι μελέτες που έχουν γίνει από διάφορους επιστήμονες που ασχολούνται με αυτά τα πλωτά συστήματα, τόσο για την ανάπτυξη μοντέλων που θα προβλέπουν την απόκριση της μηχανής όσο και για την εφαρμογή νέων συστημάτων ελέγχου προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοσή της.

Πρώτα από όλα θεωρήθηκε σημαντικό να γίνει μια γενική περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών διαφόρων πλωτών συστημάτων για ανεμογεννήτριες.

Τα διάφορα πλωτά συστήματα κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες:

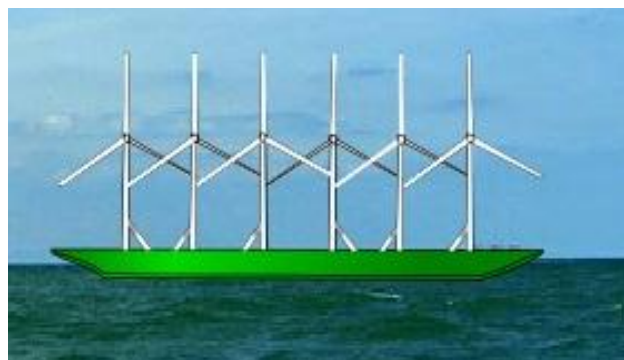
- ✿ Αν είναι πλωτήρες μιας ή περισσότερων ανεμογεννητριών
- ✿ Με βάση το σύστημα αγκυροβόλησης

Για ανεμογεννήτριες σε μεγάλα βάθη το πλωτό σύστημα θα αντικαταστήσει τα υποστυλώματα ή τις συμβατικές σκυρόδετες βάσεις που χρησιμοποιούνται στα ρηχά νερά και στις ανεμογεννήτριες επί εδάφους. Ο πλωτήρας πρέπει να παρέχει άνωση που θα μπορεί να υποστηρίξει το βάρος της ανεμογεννήτριας και να καταστέλλει σε ικανοποιητικό βαθμό τις κινήσεις πρόνευσης (pitch), περιστροφής (roll) και ταλάντωσης πάνω-κάτω (heave). Το κόστος των υπεράκτιων (σε μεγάλα βάθη) ανεμογεννητριών θα καθορίζεται από το επιπλέον κόστος του πλωτήρα και του συστήματος μεταφοράς της ενέργειας. (Musial, Butterfield, & Boone, 2004)

Διαχωρισμός πλωτήρων μιας ή περισσότερων ανεμογεννητριών

Πλωτήρες πολλών ανεμογεννητριών

Αυτού του είδους τα πλωτά συστήματα αποτελούνται από ένα πλωτήρα με πολλές ανεμογεννήτριες επάνω του, προκειμένου να μοιράζεται το κόστος της αγκυροβόλησης και να παρέχεται ευστάθεια.



Εικόνα 36-<http://oedsonline.com>

Επειδή η απόσταση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους πάνω στον κοινό πλωτήρα δεν μπορεί να βελτιωθεί πολύ, είναι απαραίτητο είτε όλη η πλατφόρμα να περιστρέφεται με βάση τις αλλαγές της κατεύθυνσης του ανέμου, είτε να παράγεται λιγότερη

ενέργεια όταν ο αέρας δεν έχει την επικρατούσα κατεύθυνσή του (απώλειες στην παραγωγή ενέργειας λόγω ομόρρου).

Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των πλωτήρων μιας και περισσότερων ανεμογεννητριών.

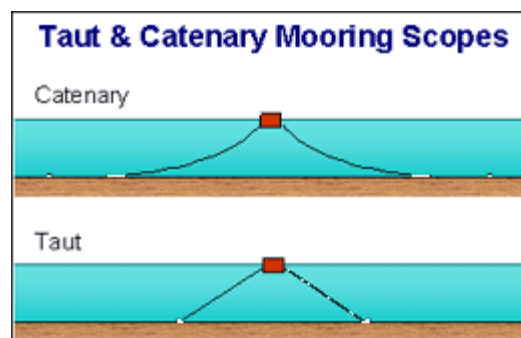
	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<i>Πλωτήρας πολλών ανεμογεννητριών</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ευστάθεια 2. Κοινά αγκυροβόλια 3. Δυνατότητα βελτιστοποίησης ολόκληρου του συστήματος 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Υψηλό κόστος στήριξης της κατασκευής 2. Φορτίο λόγω κυματισμού
<i>Πλωτήρας μιας ανεμογεννήτριας</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Απλότητα σχεδιασμού 2. Τυποποίηση κατασκευής 3. Χαμηλότερες κατασκευαστικές απαιτήσεις 4. Συγκεκριμένος έλεγχος περιστροφικής κίνησης 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ξεχωριστό κόστος για το σύστημα αγκυροβόλησης

Πλωτήρες μιας ανεμογεννήτριας

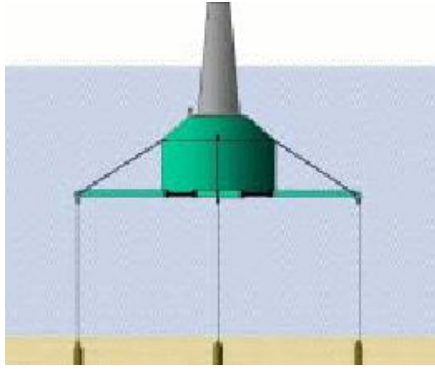
Αυτού του είδους τα πλωτά συστήματα διαχωρίζονται με βάση τον τρόπο αγκυροβόλησης. Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι είναι οι ακόλουθοι:

Με αλυσοειδή καμπύλα συρματόσχοινα (catenary moorings)

Με τεντωμένα συρματόσχοινα (taut-leg moorings)



Εικόνα 37-www.offshoremoorings.org



Κάθετα τεντωμένα συρματόσχοινα
(vertical tension legs)

Εικόνα 38-www.offshoremoorings.org

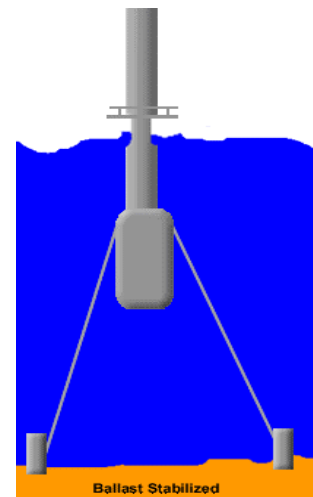
Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των πλωτών πλατφορμών με καμπύλα αλυσοειδή αγκυροβόλια είναι το αρκετά χαμηλό κόστος των αγκυρών και η δυνατότητα εγκατάστασής τους και σε πιο ρηχά νερά. Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι ότι η κάθετη δύναμη στην άγκυρα είναι ανεπαρκής για να εξασφαλίσει ότι η πλατφόρμα δε θα αναποδογυρίσει, κυρίως όταν το βάρος της ανεμογεννήτριας και η οριζόντιες δυνάμεις ασκούνται τόσο μακριά από το κέντρο άνωσης.

Η αγκυροβόληση των πλωτήρων με τεντωμένα συρματόσχοινα παρουσιάζει περισσότερα πλεονεκτήματα καθώς αυξάνει το βάθος της θάλασσας. Συστήματα με κάθετα τεντωμένα συρματόσχοινα έχουν τη δυνατότητα να βυθίζονται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας ένα μεγάλο μέρος της κατασκευής, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο περισσότερη ευστάθεια.

Αγκυροβόληση με αλυσοειδή καμπύλα συρματόσχοινα

Ο πρώτος τρόπος αγκυροβόλησης με αλυσοειδή καμπύλα συρματόσχοινα επιτυγχάνει υδροδυναμική ευστάθεια με τη χρήση έρματος, κατεβάζοντας με αυτό τον τρόπο το κέντρο βάρους όσο το δυνατόν χαμηλότερα (spar-buoy).

Με αυτό το σύστημα επιτυγχάνεται και μείωση της πάνω-κάτω ταλάντωσης (heave) που προκαλείται από τον κυματισμό. Η χρήση έρματος είναι ο πιο απλός τρόπος σε σχέση με τους άλλους πλωτήρες, αλλά απαιτείται μια ογκώδης κατασκευή για τη στήριξη της ανεμογεννήτριας, καθώς το κέντρο βάρους της είναι αρκετά ψηλά.



Εικόνα 39-<http://offshorewind.net>



Εικόνα 40-<http://offshorewind.net>

Ο δεύτερος τρόπος αγκυροβόλησης είναι η ανεμογεννήτρια να στηρίζεται σε ένα τριπλό πλωτήρα (tri-floater), ο οποίος αποτελείται από τρεις κυλινδρικές πλεύσιμες στήλες σε διάθροση τρίποδου με χαλύβδινες δοκούς.

Αγκυροβόληση με κάθετα συρματόσχοινα

Αυτό το είδος αγκυροβόλησης παρέχει τη μέγιστη δυνατή ευστάθεια στον πλωτήρα. Στα βαθιά νερά χρησιμοποιείται πλατφόρμα με τεντωμένα συρματόσχοινα (tension-leg platform TLP). Αυτός ο κάθετος τρόπος αγκυροβόλησης επιτρέπει ένα μεγάλο μέρος της κατασκευής να είναι βυθισμένο κάτω από το νερό, μειώνοντας έτσι το φορτίο του κυματισμού.



Εικόνα 41-<http://offshorewind.net>

Αγκυροβόληση της πλατφόρμας

Το μέγιστο φορτίο κάθε άγκυρας εξαρτάται από την κατάσταση του πυθμένα της θάλασσας. Εάν η δύναμη ασκείται παράλληλα στον πυθμένα, μια άγκυρα μπορεί να είναι αποτελεσματική χωρίς βαθιά εμφύτευση. Αυτό το πλεονέκτημα εκμεταλλεύεται και το σύστημα αγκυροβόλησης με αλυσοειδή καμπύλα συρματόσχοινα. Ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιεί βαριές αλυσίδες, οι οποίες δημιουργούν ένα καμπύλο σχήμα από το σημείο σύνδεσης με την πλατφόρμα μέχρι τον πυθμένα όπου και ασκούνται οι οριζόντιες δυνάμεις. Το γεγονός ότι τα καμπύλα αλυσοειδή αγκυροβόλια δέχονται οριζόντιες δυνάμεις απαιτεί λιγότερη ακρίβεια καθιστώντας την εγκατάσταση λιγότερο ακριβή. Οι πλατφόρμες με αυτού του είδους την αγκυροβόληση κινούνται προς όλες τις κατευθύνσεις σε σχέση με τη χρήση τεντωμένων συρματόσχοινων.

Οι άγκυρες στις οποίες ασκείται κάθετη δύναμη εξαρτώνται από τη βαθιά εμφύτευση τους ώστε να σφηνώνονται στον πυθμένα., γι' αυτό και η εγκατάστασή τους είναι πιο ακριβή. Στα συστήματα TLP χρησιμοποιούνται ράβδοι σπλισμού προεντεταμένου σκυροδέματος που επιτρέπουν την κίνηση μόνο στην επιφάνεια του νερού (κίνηση εμπρός-πίσω (surge) και πλευρική (sway)), απορροφώντας μερικώς το φορτίο του ανέμου και του κυματισμού.

Το κόστος του συστήματος αγκυροβόλησης εξαρτάται από το κόστος του υλικού που είναι κατασκευασμένη η άγκυρα και το κόστος εγκατάστασης.

Τα διάφορα είδη αγκυρών είναι τα ακόλουθα:

- Αγκυρες βασισμένες στη βαρύτητα (gravity-base anchor)
- Αγκυρες που εμφυτεύονται καθώς σύρονται (drag-embedded anchor)
- Αγκυρες οδηγούμενες από στύλο (driven pile anchor)
- Αγκυρες αναρρόφησης (suction anchor)
- Αγκυρες που εμφυτεύονται με τορπίλη (torpedo embedded anchor)
- Αγκυρες οδηγούμενες από στύλο όπου απαιτείται η διάνοιξη οπής (drilled and grouted pile)

Στη συνέχεια της δημοσίευσης γίνεται σύγκριση του κόστους ενός τριπλού πλωτήρα (Dutch tri-floater concept) και ενός με κάθετα συρματόσχοινα (NREL TLP concept) πάνω στους οποίους βρίσκεται εγκατεστημένη μια ανεμογεννήτρια των 5 MW. Η ανάλυση κόστους έδειξε ότι ο τριπλός πλωτήρας κοστίζει 7,1 εκατομμύρια δολάρια (\$), ενώ ο TLP 6,5 εκατομμύρια δολάρια (\$). Βελτιστοποίηση της εγκατάστασης μπορεί να ρίξει το κόστος στα 4,26 εκατομμύρια δολάρια για τον τριπλό πλωτήρα και στα 2,88 για τον TLP.

Βελτιστοποίηση της εγκατάστασης

1. Τα υπεράκτια συστήματα μπορούν να κάνουν χρήση υλικών τα οποία είναι μη εφαρμόσιμα ή έχουν απορριφθεί για τα συστήματα επί εδάφους. Η πλατφόρμα TLP της NREL είναι κατασκευασμένη από χάλυβα. Για την άντληση πετρελαίου έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ελαφριά αδρανή υλικά για να παράγουν ανθεκτικές σκυρόδετες πλατφόρμες. Τέτοιου είδους πλατφόρμες μπορούν να συμβάλλουν σε αξιόλογη μείωση του κόστους, λόγω του χαμηλού κόστους των πρώτων υλών, της καλύτερης αντίστασης σε διάβρωση και του χαμηλότερου κόστους συντήρησης.
2. Η χρήση ελαφρών υλικών μπορεί να μειώσει το βάρος της ανεμογεννήτριας, αφαιρώντας με αυτόν τον τρόπο από το κόστος του συστήματος υποστήριξης και το κόστος της πλατφόρμας.
3. Στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες δε χρειάζεται να υπάρχει περιορισμός στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, όπως συμβαίνει στα συστήματα επί εδάφους για μείωση του θορύβου.
4. Οι προσήνεμες ανεμογεννήτριες επί εδάφους δε χρησιμοποιούνται λόγω του ήχου χαμηλής συχνότητας που προκαλείται από την σκίαση του πύργου. Οι υπεράκτιες δε θα έχουν αυτό τον περιορισμό.
5. Επειδή το ύψος του πύργου είναι ανάλογο με τη ροπή που ασκείται και το μέγεθος της πλατφόρμας, χαμηλότερου ύψους πύργοι θα συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση του κόστους.

2.1.2 Ανάπτυξη Αεροδυναμικών Μοντέλων

Έπειτα από την κατανόηση των διαφόρων πλωτών συστημάτων είναι απαραίτητη η ανάλυση των φορτίων ενός πλήρως συζευγμένου συστήματος πλωτής ανεμογεννήτριας-πλατφόρμας με τη βοήθεια προσομοιωτών. Παρακάτω αναλύεται ο τρόπος ανάπτυξης ενός κώδικα ικανού να μοντελοποιήσει το πλήρως συζευγμένο αεροδυναμικό και υδροδυναμικό πρόβλημα για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Αυτό επιτυγχάνεται με επέκταση των ήδη υπαρχόντων μοντέλων για τις Ανεμογεννήτριες επί εδάφους, στα οποία ενσωματώνονται το υδροδυναμικό φορτίο, η δυναμική σύζευξη ανάμεσα στις κινήσεις της πλατφόρμας και σε αυτές της Ανεμογεννήτριας και ο δυναμικός χαρακτήρας του συστήματος αγκυροβόλησης. Στο πλήρως συζευγμένο μοντέλο πρέπει να γίνει ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (και όχι στο πεδίο συχνοτήτων) προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα μη-γραμμικά δυναμικά χαρακτηριστικά και τα μεταβατικά φαινόμενα που παίζουν σημαντικό ρόλο στις υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες. (Jonkman & Sclavounos, 2006)

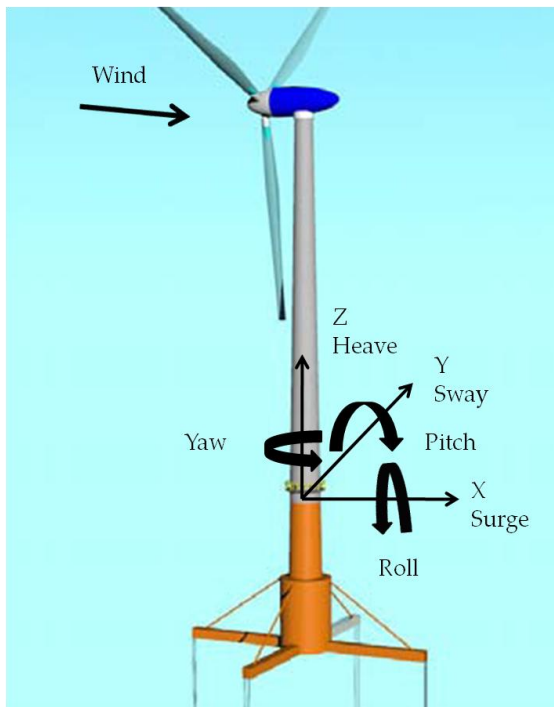
Τα τελευταία χρόνια το NREL (National Renewable Energy Laboratory) έχει αναπτύξει δυο κώδικες για την αεροελαστική προσομοίωση Ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα επί εδάφους τον FAST και τον MSC.ADAMS. Στην πορεία αναλύεται η προσπάθεια που έγινε για αναβάθμιση του FAST ώστε να περιλαμβάνει τα επιπλέον φορτία που εμφανίζονται στις πλωτές υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες.

Στον κώδικα αυτό η ελαστικότητα των πτερυγίων και του πύργου μοντελοποιείται ορίζοντας κατανεμημένη δυσκαμψία και μαζικές ιδιότητες κατά μήκος των τμημάτων αυτών και περιγράφοντας το σχήμα των ιδιομορφών τους με πολυωνυμικούς συντελεστές. Η στρεπτική ελαστικότητα μοντελοποιείται με τη χρήση κατάλληλου γραμμικού ελατηρίου και αποσβεστήρα. Ο άξονας θεωρείται άκαμπτο σώμα χρησιμοποιώντας κατάλληλους μαζικούς και αδρανειακούς όρους. Το χρονικό βήμα της μη-γραμμικής εξίσωσης κίνησης είναι σταθερό. Ο FAST έχει περιορισμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας (DOFs) τα οποία ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται μέσω διακοπών επιτρέποντας στο χρήστη να αυξήσει ή να μειώσει την ακρίβεια του μοντέλου.

Κατά την ανάλυση του κινηματικού και υδροδυναμικού φορτίου της πλατφόρμας και της δυναμικής του συστήματος αγκυροβόλησης έχουν γίνει κάποιες παραδοχές. Η πλατφόρμα θεωρείται άκαμπτο σώμα με 6 βαθμούς ελευθερίας, τρεις αξονικούς (ταλάντωση πάνω-κάτω (heave), ταλάντωση αριστερά-δεξιά (sway), ταλάντωση εμπρός-πίσω (surge)) και τρεις περιστροφικούς (περιστροφή (roll), πρόνευση (pitch), γωνιακή απόκλιση (yaw)) η γωνιακή μετατόπιση των οποίων είναι μικρή.

Η κύρια παραδοχή είναι η γραμμικοποίηση του υδροδυναμικού προβλήματος. Αυτό έχει τις εξής επιπτώσεις.

1. Το πλάτος του κύματος είναι πολύ μικρότερο από το μήκος του.
2. Οι μετατοπίσεις της πλατφόρμας είναι μικρές συγκριτικά με το μέγεθός της. Με αυτόν τον τρόπο το υδροδυναμικό πρόβλημα χωρίζεται σε πρόβλημα ακτινοβολίας, σκέδασης και υδροστατικό πρόβλημα.
3. Μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα της τεχνικής της επίθεσης (superposition).
4. Θεωρούμε ότι δεν υπάρχει θαλάσσιο ρεύμα
5. Αγνοούμε το φορτίο που προκαλείται από τα επιπλέοντα θραύσματα και τον πάγο.



Εικόνα 42-NREL

Στη διπλανή εικόνα φαίνεται το αδρανειακό σύστημα αξόνων (XYZ) όπου απεικονίζονται οι βαθμοί ελευθερίας που αναφέρθηκαν παραπάνω.

- 1 = surge
- 2 = sway
- 3 = heave
- 4 = roll
- 5 = pitch
- 6 = yaw

Ο βαθμός ελευθερίας για τη γωνιακή απόκλιση (yaw) αν και δεν προκαλείται από κάποιο υδροδυναμικό μηχανισμό, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη γιατί προκύπτει από την Ανεμογεννήτρια. Είναι το αποτέλεσμα του αεροδυναμικού φορτίου στο δρομέα, όταν ο δρομέας δεν είναι πλήρως ευθυγραμμισμένος με τον αέρα (yaw error) και της περιστροφικής αδράνειας του ρότορα σε συνδυασμό με την κίνηση πρόνευσης.

Η πλήρης σύζευξη ανάμεσα στην κίνηση της πλατφόρμας και της Ανεμογεννήτριας γίνεται ενσωματώνοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας της πλατφόρμας. Έτσι το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων (XYZ) μετατρέπεται στο κινούμενο σύστημα

(xyz) και οι κινηματικές εξισώσεις της θέσης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης εξαρτώνται από τους βαθμούς ελευθερίας αυτής.

Οι εξισώσεις κίνησης της πλατφόρμας περιλαμβάνουν την επίδραση της αδράνειας, της βαρύτητας, της υδροδυναμικής και του συστήματος αγκυροβόλησης. Η τελική μορφή της μη-γραμμικής εξίσωσης κίνησης του πλήρως συζευγμένου συστήματος είναι της μορφής:

$$M_{ij}(q, u, t)\ddot{q}_j = f_i(q, \dot{q}, u, t)$$

M_{ij} : Μητρώο αδρανειακής μάζας t : χρόνος

q : βαθμοί ελευθερίας f_i : εξίσωση δύναμης

u : δεδομένα εισόδου

Το συνολικό εξωτερικό φορτίο που ασκείται στην πλατφόρμα, εκτός απ' το φορτίο λόγω της Ανεμογεννήτριας και του βάρους της πλατφόρμας είναι:

$$F_i^{platform} = -A_{ij} \cdot \ddot{q}_j + f_i$$

$A_{ij} \cdot \ddot{q}_j$: επιπλέον μάζα που προστίθεται στο M_{ij}

f_i : οποιαδήποτε άλλη εξωτερική δύναμη

Η εξίσωση του γραμμικοποιημένου υδροδυναμικού φορτίου συναρτήσει του χρόνου χωρίζεται σε τρία απλούστερα προβλήματα: σκέδασης (scattering), υδροστατικής (hydrostatics) και ακτινοβολίας (radiation).

$$f_i = F_i^{waves} + F_i^{lines} + \rho g V_0 \delta_{i3} - C_{ij}^{hydrostatic} q_j - \int_0^t K_{ij}(t-\tau) \dot{q}_j(\tau) d\tau$$

F_i^{lines} : το φορτίο από τα συρματόσχοινα του συστήματος αγκυροβόλησης

Πρόβλημα σκέδασης (scattering problem)

Το πρόβλημα σκέδασης ασχολείται με τα φορτία στην πλατφόρμα όταν το σώμα είναι στη θέση ισορροπίας και το προσπίπτων κύμα σκεδάζεται από αυτό.

F_i^{waves} : το συνολικό φορτίο από το προσπίπτων κύμα.

Για να μειωθεί η διέγερση από το κύμα, πρέπει η πλατφόρμα να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο έξω από την επιφάνεια.

Πρόβλημα υδροστατικής (hydrostatics problem)

Ο τρίτος και ο τέταρτος όρος της προηγούμενης εξίσωσης αντιπροσωπεύουν το φορτίο λόγω υδροστατικής.

$\rho g V_0 \delta_{i3}$: αντιπροσωπεύει την άνωση από την αρχή του Αρχιμήδη. Ο όρος είναι μη μηδενικός για την πάνω-κάτω ταλάντωση (heave) (επειδή $\delta_{33} = 1$).

$C_{ij}^{hydrostatic} q_j$: αντιπροσωπεύει την αλλαγή της υδροστατικής δύναμης και ροπής λόγω της επίδρασης της ίσαλου επιφάνειας και του κέντρου άνωσης της κινούμενης πλατφόρμας. Η εξίσωση του όρου $C_{ij}^{hydrostatic}$ μας παρέχει την πληροφορία ότι η υδροστατική μπορεί να επαναφέρει μόνο τις μετατοπίσεις της πάνω-κάτω ταλάντωσης (heave), της περιστροφής (roll) και της πρόνευσης (pitch). Ελαχιστοποίηση της κίνησης στους άλλους βαθμούς ελευθερίας επιτυγχάνεται μέσω του συστήματος αγκυροβόλησης.

Πρόβλημα ακτινοβολίας (radiation problem)

Ασχολείται με την εύρεση των φορτίων στην πλατφόρμα, όταν το σώμα ταλαντώνεται στις διάφορες ιδιομορφές του χωρίς την ύπαρξη προσπίπτων κύματος. Σε αυτήν την περίπτωση το ίδιο το σώμα παράγει κυματισμό.

$-\int_0^t K_{ij}(t-\tau) \dot{q}_j(\tau) d\tau$: αντιπροσωπεύει το φορτίο της απόσβεσης της ακτινοβολίας

του κύματος και μια επιπλέον μάζα που δεν προσμετρείται στον όρο A_{ij} . Για να μειωθεί το φορτίο από την ακτινοβολία του κύματος, η πλατφόρμα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο μέρος της έξω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Το σύστημα αγκυροβόλησης θεωρείται ότι είναι γραμμικό. Έτσι το συνολικό φορτίο που ασκείται στην πλατφόρμα από αυτό είναι:

$$F_i^{lines} = F_i^{lines,0} - C_{ij}^{lines} q_j$$

$F_i^{lines,0}$: είναι το συνολικό φορτίο από το σύστημα αγκυροβόλησης στην πλατφόρμα, όταν αυτή βρίσκεται εκτός σημείου ισορροπίας.

C_{ij}^{lines} : στοιχείο του γραμμικού μητρώου για την επαναφορά της κίνησης της πλατφόρμας στους διάφορους βαθμούς ελευθερίας.

Στη συνέχεια της δημοσίευσης γίνεται μια σύγκριση των πραγματικών γραμμικών υδροδυναμικών εξισώσεων που εξετάστηκαν παραπάνω με αυτές που χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάλυση των φορτίων στις πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου. Έτσι έχουμε:

- Ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων
- Ανάλυση Morison



Η ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων δεν μπορεί να εφαρμοσθεί στις πλωτές Ανεμογεννήτριες, όπου εμφανίζονται μη γραμμικά φαινόμενα και μεταβατική συμπεριφορά. Παρόλα αυτά η λύση της μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της πραγματικής γραμμικής υδροδυναμικής εξίσωσης. Η ανάλυση Morison χρησιμοποιείται για τις σταθερές υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες, καθώς και για τον υπολογισμό του γραμμικού φορτίου του κυματισμού και της μη γραμμικής αντίστασης λόγω ιξώδους. Αυτός ο όρος συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση του \dot{f}_i και μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να αποτελέσει σημαντικό φορτίο.

Τέλος αναφέρουμε τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας των 5 MW που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις αναφορές που ακολουθούν.

Κατεύθυνση δρομέα	Προσήνεμος	Ύψος πλήμνης	90 m
Σύστημα ελέγχου	Μεταβλητών στροφών, μεταβλητού βήματος	Διάμετρος δρομέα/ διάμετρος άξονα	126 m / 3 m
Μέγιστη ταχύτητα δρομέα/ γεννήτριας	12,1 rpm/ 1.173,7 rpm	Μάζα δρομέα	110.000 kg
Μέγιστη ταχύτητα ακροπτερυγίου	80 m/s	Μάζα κλωβού	240.000 kg
		Μάζα πύργου	347.460 kg

Αφού αναλύθηκε ο τρόπος μοντελοποίησης του συνολικού συστήματος και των εξωτερικών επιδράσεων, τώρα πρέπει να υπολογισθεί η επίδραση της σύζευξης ανεμογεννήτριας-πλωτής πλατφόρμας, του βάθους της θάλασσας και της ταχύτητας του ανέμου στην απόδοση του συστήματος, αλλά να γίνει και μια οικονομική ανάλυση αυτού. Για το σκοπό αυτό εξετάζεται μια ανεμογεννήτρια των 5 MW η οποία είναι εγκατεστημένη πάνω σε δυο διαφορετικά είδη πλατφορμών, την MIT/NREL πλατφόρμα για ρηχά νερά (shallow drafted barge SDB) και την MIT/NREL πλατφόρμα με κάθετα συρματόσχοινα (tension leg platform TLP). Μια σημαντική προσπάθεια που γίνεται είναι η εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας πάνω στην πλατφόρμα πριν αυτή τοποθετηθεί στη θάλασσα. Η πλατφόρμα θεωρείται άκαμπτο σώμα με 6 βαθμούς ελευθερίας (surge, sway, heave, roll, pitch, yaw). Σε όλη την ανάλυση που πραγματοποιείται ο αέρας και τα κύματα κινούνται προς την θετική κατεύθυνση του άξονα x. (Wayman, Sclavounos, Butterfield, Jonkman, & Musial, 2006)

Η πορεία της ανάλυσης είναι η ακόλουθη:

Εξέταση των μηχανισμών επαναφοράς και σχέδιο για τη στατική του συστήματος 
Στατική Ανάλυση  Δυναμική Ανάλυση όπου υπολογίζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος όπως οι φορείς απόκρισης του πλάτους (response amplitude operators RAOs), η φυσική συχνότητα και η πρότυπη απόκλιση της κίνησης.

Σχεδιαστική Προσέγγιση

Η θέση του συστήματος στην κατάσταση ισορροπίας προσδιορίζεται από τις δυνάμεις ισορροπίας που ασκούνται σε αυτό και τους μηχανισμούς επαναφοράς.

Σχέδιο για τη στατική της MIT/NREL SDB

Η MIT/NREL πλατφόρμα για ρηγά νερά (SDB) επιτυγχάνει την επαναφορά της μέσω της ίσαλου επιφάνειας. Επαναφορά από το σύστημα αγκυροβόλησης υπάρχει μόνο κατά την εμπρός-πίσω ταλάντωση (surge) και γι' αυτό η πλατφόρμα απαιτείται να επιδείξει στατική και δυναμική συμπεριφορά σε όλες τις άλλες ιδιομορφές της κίνησης κατά την πλήρη λειτουργία χωρίς επιπλέον επαναφορά από την αγκυροβόληση. Το σύστημα πρέπει να διατηρεί μια αποδεκτή γωνία πρόνευσης ακόμα και σε μέγιστα φορτία ανέμου. Εικάζεται ότι για γωνία πρόνευσης πάνω από 10° η αποδοτικότητα της ανεμογεννήτριας θα μειωθεί σημαντικά.

Σχέδιο για τη στατική της MIT/NREL TLP

Η MIT/NREL πλατφόρμα με κάθετα συρματόσχοινα (TLP) επιτυγχάνει επαναφορά μέσω των τεντωμένων συρματόσχοινων του συστήματος αγκυροβόλησης. Η δυσκαμψία τους δεν επιτρέπει την εμφάνιση πρόνευσης (pitch), περιστροφής (roll) και πάνω-κάτω ταλάντωσης (heave) και έτσι η κίνηση της πλατφόρμας περιορίζεται στην εμπρός-πίσω ταλάντωση (surge), στην πλευρική (sway) και στην γωνιακή απόκλιση (yaw). Το σύστημα αγκυροβόλησης πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μειώνει την κίνηση αυτών των ιδιομορφών. Το μειονέκτημα της TLP είναι ότι δεν μπορεί να προσφέρει επαναφορά χωρίς το σύστημα αγκυροβόλησης, γεγονός που καθιστά αδύνατη την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας στην πλατφόρμα πριν αυτή τοποθετηθεί στη θάλασσα. Για την αποφυγή αυτού πρέπει να επιλέγεται κατάλληλη γεωμετρία και μέγεθος για την πλατφόρμα ώστε να παρέχει επαναφορά κατά την τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας στην πλατφόρμα (towing) και την εγκατάσταση όλου του συστήματος στη θάλασσα, ενώ συχνή είναι και η χρήση έρματος νερού για επιπλέον στήριξη κατά τη διαδικασία αυτή.

Στατική και Δυναμική ανάλυση

Σημείο λειτουργίας στην κατάσταση ισορροπίας

Η στατική ανάλυση διεξάγεται στην αρχή για να προσδιορίσει την κατάσταση ισορροπίας του συζευγμένου συστήματος ανεμογεννήτριας-πλωτής πλατφόρμας.

➤ Φορείς απόκρισης του πλάτους

Ο υπολογισμός τους γίνεται στη δυναμική ανάλυση. Αν και είναι ανεξάρτητοι από την κατάσταση της θάλασσας, η απόσβεση και οι ιδιότητες δυσκαμψίας της ανεμογεννήτριας εξαρτώνται από την ταχύτητα του αέρα, γεγονός που προκαλεί και την εξάρτηση των RAOs από την ταχύτητα του ανέμου.

➤ Φυσικές Συχνότητες

Οι φυσικές συχνότητες του συζευγμένου συστήματος μπορούν να υπολογισθούν με βάση τις ιδιότητες επαναφοράς και αδράνειας αυτού. Σε συστήματα με αδύναμους μηχανισμούς επαναφοράς η φυσική συχνότητα μπορεί να θεωρηθεί 0.

➤ Πρότυπη απόκλιση των κινήσεων

Μετά τον υπολογισμό των RAOs, η πρότυπη απόκλιση των κινήσεων του συστήματος μπορεί να εξακριβωθεί.

Στατική και Δυναμική ανάλυση για την MIT/NREL SDB

Στην στατική ανάλυση η εξίσωση κίνησης για την κατάσταση ισορροπίας έχει λυθεί σε τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου για να καλύπτονται όλες οι περιοχές της καμπύλης ισχύος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

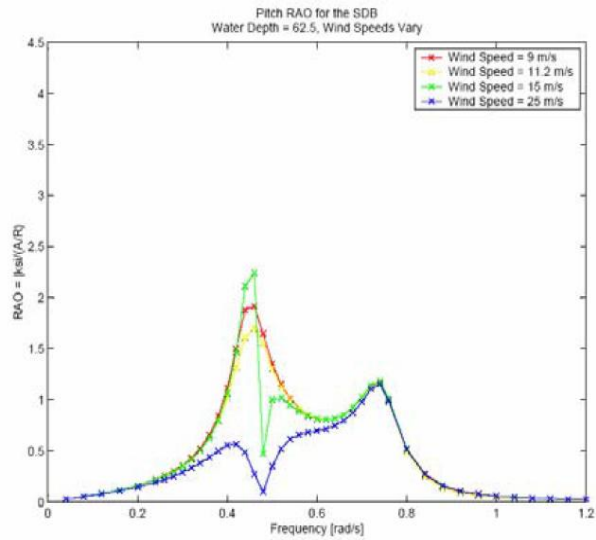
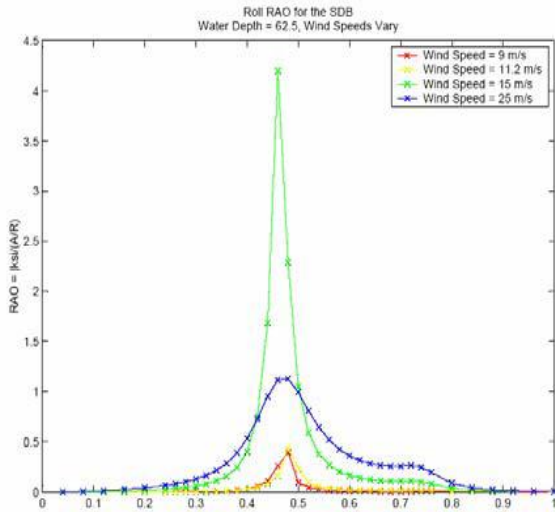
Wind Speed (m/s)	Thrust (kN)	Restoring (N-m)	Pitch (deg)
9	600	4,84E+08	6,499
11,3	800	4,84E+08	8,665
15	500	4,84E+08	5,416
25	400	4,84E+08	4,333

Τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης περιλαμβάνουν τους RAOs, τις φυσικές συχνότητες και την πρότυπη απόκλιση των κινήσεων.

Επίδραση της σύζευξης του συστήματος

Αν και το σύστημα διεγείρεται από τον αέρα και τα κύματα στις ιδιομορφές της εμπρός-πίσω ταλάντωσης (surge), της πάνω-κάτω ταλάντωσης (heave) και της πρόνευσης (pitch), εμφανίζει κίνηση και στις άλλες τρεις ιδιομορφές (sway, roll, yaw). Η ανάλυση έχει γίνει για αέρα ταχύτητας 11,2 m/s και βάθος θάλασσας 62,5 m. Αν και οι ιδιομορφές της πλευρικής ταλάντωσης (sway) και της γωνιακής απόκλισης (yaw) δεν έχουν επαναφορά, η φυσική τους συχνότητα προσδιορίζεται γραφικά από τα διαγράμματα των RAOs εκεί όπου εμφανίζουν μέγιστο λόγω της σύζευξης του συστήματος. Η πρότυπη απόκλιση των κινήσεων αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα της θάλασσας.

Επίδραση της ταχύτητας του ανέμου

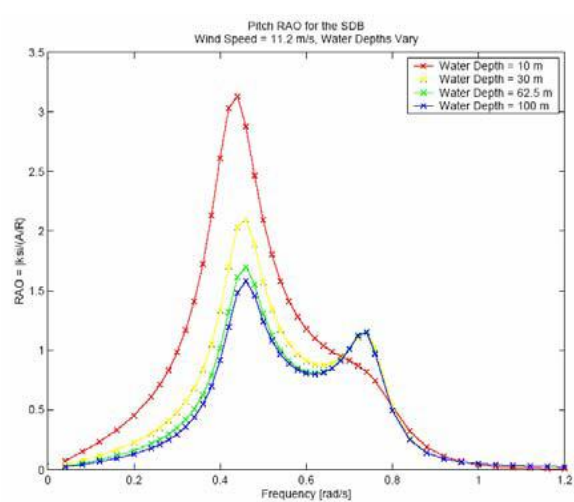
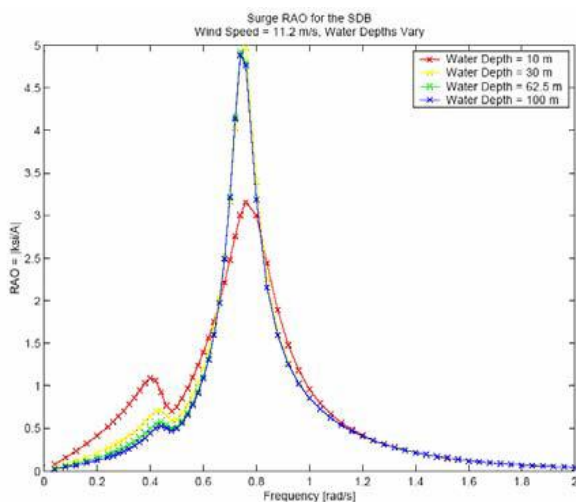


Εικόνα 43-NREL

Οι RAOs στην πρόνευση (pitch) και την γωνιακή περιστροφή (roll) δείχνουν ότι η σύζευξη των ιδιομορφών της κίνησης αποδυναμώνεται στην περιοχή 2 της καμπύλης ισχύος (η περιοχή ανάμεσα στην V_{cut-in} και V_R) και εμφανίζεται πιο έντονη μετά την ονομαστική ισχύ. Οι φυσικές συχνότητες του συστήματος παραμένουν σταθερές στις διάφορες ταχύτητες του αέρα. Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα των RAOs, οι πρότυπες αποκλίσεις μειώνονται με τον αέρα στην περιοχή 2 της καμπύλης ισχύος, όπου η απόσβεση της ανεμογεννήτριας παίζει σημαντικό ρόλο και αυξάνονται και πάλι στην περιοχή 3. Η ανάλυση έχει γίνει σε βάθος 62,5 m.

Επίδραση του βάθους της θάλασσας

Η μελέτη έγινε για ταχύτητα ανέμου 11,2 m/s και σε βάθη 10, 30, 62,5 και 100 m. Τα διαγράμματα και πάλι δείχνουν τη σύζευξη ανάμεσα στις ιδιομορφές της κίνησης, από τα οποία ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν το διάγραμμα της εμπρός-πίσω ταλάντωσης (surge) η οποία αυξάνεται με το βάθος της θάλασσας και της πρόνευσης (pitch) η οποία μειώνεται με το βάθος.



Εικόνα 44-NREL

Οι φυσικές συχνότητες του συστήματος παραμένουν σχεδόν σταθερές και αυξάνονται ελάχιστα με την αύξηση του βάθους της θάλασσας. Αν και η σύζευξη του συστήματος διεγείρει κίνηση σε ιδιομορφές που δεν διεγείρονται απευθείας από τον άνεμο και τα κύματα, οι κινήσεις σε αυτές τις ιδιομορφές είναι συντονισμένες σε μια συγκεκριμένη συχνότητα και έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλές πρότυπες αποκλίσεις στην κίνηση. Γενικά φαίνεται ότι αυτές μειώνονται με την αύξηση του βάθους, γεγονός που οφείλεται στην ελαττωμένη πρόσθετη μάζα που εμφανίζεται στα μεγαλύτερα βάθη.

Στατική και Δυναμική ανάλυση για την MIT/NREL TLP

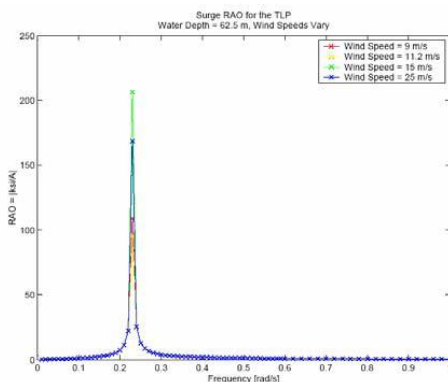
Η ανάλυση έχει γίνει και πάλι για τέσσερις ταχύτητες ανέμου, αλλά τα βάθη που επιλέχθηκαν είναι μεγαλύτερα γιατί η συγκεκριμένη πλατφόρμα προορίζεται για εγκατάσταση σε μεγαλύτερα βάθη. Η κίνηση λόγω πρόνευσης εμποδίζεται εξαιτίας της άπειρης δυσκαμψίας των συρματόσχοινων και έτσι η κύρια ιδιομορφή της κίνησης είναι η εμπρός-πίσω ταλάντωση (surge). Παίρνουμε τον ακόλουθο πίνακα:

Wind Speed (m/s)		9	11,2	15	25
Thrust (N)		600000	800000	500000	400000
Water Depth	Restoring (N)	Surge	Surge (m)	Surge (m)	Surge (m)
62,5	588235,29	1,02	1,36	0,85	0,68
100	312500	1,92	2,56	1,6	1,28
200	138888,89	4,32	5,76	3,6	2,88

Επίδραση της σύζευξης του συστήματος

Τα διαγράμματα των RAOs εμφανίζουν αποτελέσματα μόνο για τρεις ιδιομορφές (surge, sway, yaw). Η πάνω-κάτω ταλάντωση (heave) και η πρόνευση (pitch) εμποδίζονται από το σύστημα αγκυροβόλησης, ενώ η πλευρική ταλάντωση (sway) και η γωνιακή απόκλιση (yaw) διεγείρονται από τη σύζευξη του συστήματος.

Επίδραση της ταχύτητας του ανέμου



Εικόνα 45-NREL

Τα διαγράμματα των RAOs δείχνουν ότι οι κινήσεις μειώνονται από την περιοχή 2 στην περιοχή 3 της καμπύλης ισχύος, αυξάνονται από την ονομαστική ισχύ μέχρι τα 15 m/s και μειώνονται και πάλι μέχρι τα 25 m/s. Οι φυσικές συχνότητες μένουν σταθερές για διάφορες ταχύτητες ανέμου, ενώ η υψηλότερη τιμή της πρότυπης απόκλισης της κίνησης για όλες τις ιδιομορφές εμφανίζεται σε ταχύτητα ανέμου 15 m/s.

Επίδραση του βάθους της θάλασσας

Η μελέτη έγινε σε βάθη 62,5, 100 και 200 m και με ταχύτητα ανέμου 11,2 m/s. Το ενδιαφέρον είναι η επίδραση του βάθους της θάλασσας στις φυσικές συχνότητες του συστήματος. Το βάθος επηρεάζει το μήκος των συρματοσχοινων και άρα την επαναφορά της εμπρός-πίσω ταλάντωσης (surge), η οποία μεταθέτει τις φυσικές συχνότητες του συστήματος σε χαμηλότερες συχνότητες αυξανόμενου του βάθους. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει την προοπτική συγχρονισμού της συχνότητας του συστήματος με την επαναφορά. Οι RAOs και η πρότυπη απόκλιση των κινήσεων δείχνουν ότι η κίνηση μειώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η πλατφόρμα TLP είναι κατάλληλη για εγκατάσταση σε μεγάλα βάθη.

Επίδραση της απόσβεσης του ιξώδους

Τα διαγράμματα των RAOs παρουσιάζουν ένα μέγιστο στην περιοχή της φυσικής συχνότητας. Αυτό εξηγείται από την απόσβεση γύρω από αυτή την περιοχή. Σε χαμηλές συχνότητες η απόσβεση είναι σχεδόν μηδενική, και επειδή η φυσική συχνότητα του συστήματος είναι η αρκετά μικρή η απόσβεση είναι σχεδόν ανύπαρκτη, γεγονός που προκαλεί αυτό το μέγιστο στη απόκριση του συστήματος στην φυσική του συχνότητα. Η φυσική συχνότητα του συστήματος παραμένει ανεπηρέαστη από την απόσβεση, ενώ η πρότυπη απόκλιση των κινήσεων μειώνεται σε μεγαλύτερες τιμές της απόσβεσης.

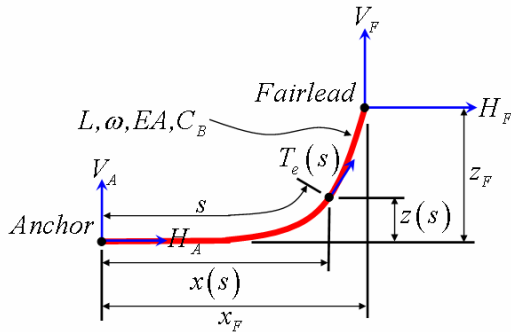
Φορτίο και απόκριση σε ακραία κύματα

Μια πλατφόρμα TLP μπορεί να απορροφήσει την απόκριση και το φορτίο που θα προκληθούν από ένα ακραίο κύμα, χάρη στα δύσκαμπτα συρματοσχοίνα του συστήματος αγκυροβόλησης. Γι' αυτό και η πλατφόρμα TLP είναι κατάλληλη για αυτές τις συνθήκες. Αντίθετα μια πλατφόρμα SDB είναι κατάλληλη για πιο προστατευμένα μέρη, όπου δεν εμφανίζονται ακραία κύματα, καθώς είναι πιο επιρρεπής στην κίνηση λόγω πρόνευσης.

Τώρα ο κώδικας που αναπτύχθηκε πρέπει να επαληθευτεί. Η συζευγμένη διέγερση και απόκριση θα περιλαμβάνουν την επίδραση του ανέμου, της αεροδυναμικής, υδροδυναμικής και δυναμικής του συστήματος, του θαλάσσιου ρεύματος και του συστήματος αγκυροβόλησης (aero-hydro-servo-elastic model).

Στη συνέχεια παρατίθενται συνοπτικά τα αποτελέσματα ερευνών που έχουν γίνει στο παρελθόν. Οι Henderson και Patel μελέτησαν την επίδραση της κίνησης της πλατφόρμας στην φόρτιση μιας ανεμογεννήτριας 700 kW. Απέδειξαν ότι η παραγόμενη ενέργεια και το φορτίο του ρότορα επηρεάζονται ελάχιστα από την κίνηση αυτή καθώς εξαρτώνται από την αεροδυναμική του ρότορα. Έδειξαν επίσης ότι η κίνηση της πλατφόρμας έχει σημαντική επίδραση στα φορτία του κλωβού και του πύργου. Γι' αυτό και ο πύργος πρέπει να ενισχυθεί αν η κίνηση της πλατφόρμας δεν μπορεί να μειωθεί. (Jonkman & Buhl, 2007)

Η μοντελοποίηση του συστήματος αγκυροβόλησης γίνεται μέσω ενός εν μέρει στατικού συστήματος, το οποίο προσομοιώνει μια διάταξη τόσο τεντωμένων όσο και χαλαρών συρματόσχοινων. Αυτή η προσέγγιση αγνοεί την αδράνεια και την απόσβεση του συστήματος αγκυροβόλησης. Κάθε συρματόσχοινο αναλύεται σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων, η αρχή του οποίου βρίσκεται στην άγκυρα, όπως φαίνεται και στο σχήμα.



Εικόνα 46-NREL

Τα μεγέθη x_F , z_F , $x(s)$, $z(s)$ έχουν δύο διαφορετικούς τύπους το καθένα ανάλογα με το αν μέρος του συρματόσχοινου ακουμπάει στο βυθό. Οι άγνωστοι σε αυτές τις εξισώσεις είναι η οριζόντια H_F και κάθετη V_F συνιστώσα της τάσης των συρματόσχοινων στο φρένο (fairlead).

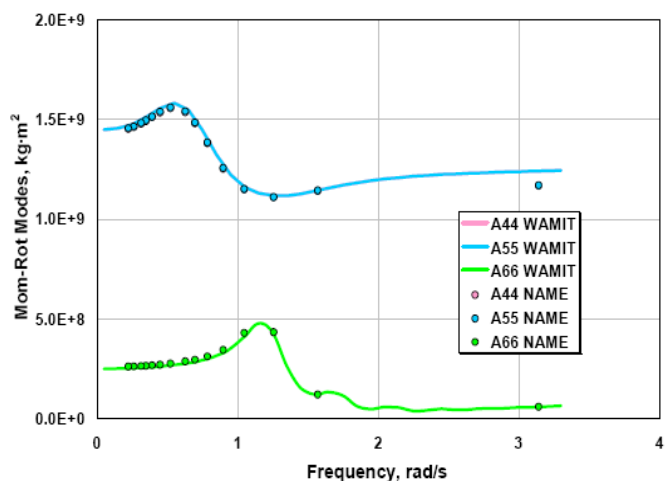
Η ανάλυση που έγινε για την αξιοπιστία του καινούριου μοντέλου αφορά σε μια ανεμογεννήτρια των 5 MW, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω στην MIT/NREL πλατφόρμα για ρηγά νερά (SDB). Η σύγκριση έγινε με μια πλωτή πλατφόρμα με αλυσοειδή καμπύλα συρματόσχοινα (catenary moorings) που κατασκευάστηκε από το NAME (Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Glasgow). Πραγματοποιήθηκε έλεγχος για την αξιοπιστία των νέων δεδομένων όσον αφορά στο υδροδυναμικό μοντέλο, στο μοντέλο του συστήματος αγκυροβόλησης και στο πλήρες συζευγμένο σύστημα.

Αξιολόγηση υδροδυναμικού μοντέλου

Στην συγκεκριμένη ενότητα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξάγει ο κώδικας WAMIT και τα οποία είναι δεδομένα εισόδου για το υδροδυναμικό μοντέλο, με τον αντίστοιχο του NAME.

Ενδεικτικά ακολουθεί ένα διάγραμμα που δείχνει τη σύγκριση αυτή και επαληθεύει τον κώδικα.

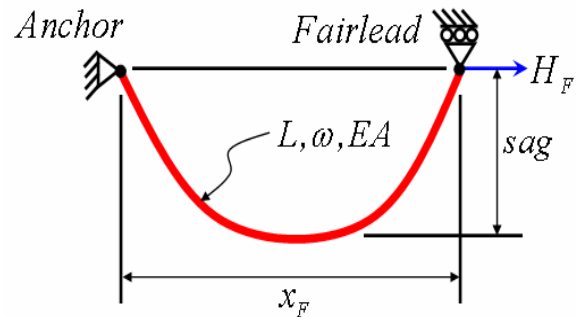
Η ισότητα των μητρώων A44 (περιστροφική κίνηση, roll) και A55 (κίνηση πρόνευσης, pitch) οφείλονται στη γεωμετρική συμμετρία της πλατφόρμας.



Εικόνα 47-NREL

Αξιολόγηση του μοντέλου του συστήματος αγκυροβόλησης

Μια κλασική δοκιμή για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του συστήματος αγκυροβόλησης είναι ένα οριζόντιο συρματόσχοινο πακτωμένο από τη μια άκρη (άγκυρα) και ελεύθερο να κινηθεί από την άλλη, όπως φαίνεται στο σχήμα. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε έδωσε τα ίδια αποτελέσματα για το οριζόντιο άνοιγμα τόξου (span) και για την κατακόρυφη 'κοιλιά' (sag), με την αναλυτική λύση. Πραγματοποιήθηκε επίσης έλεγχος για να εξασφαλισθεί ότι το μοντέλο αυτό υπολογίζει σωστά τη μη-γραμμική συμπεριφορά της σχέσης δύναμης-μετατόπισης.

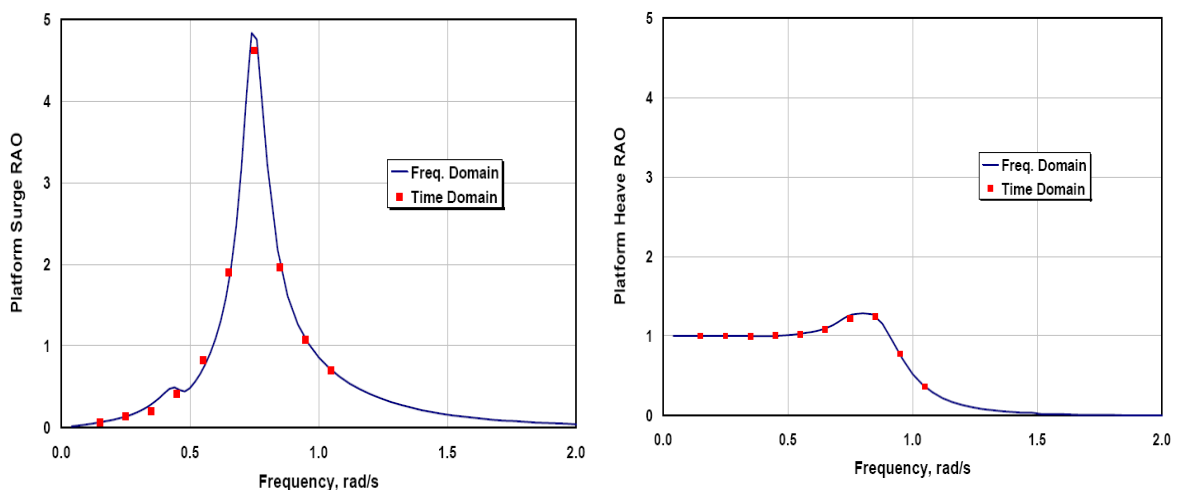


Εικόνα 48-NREL

Πλήρως συζευγμένο σύστημα

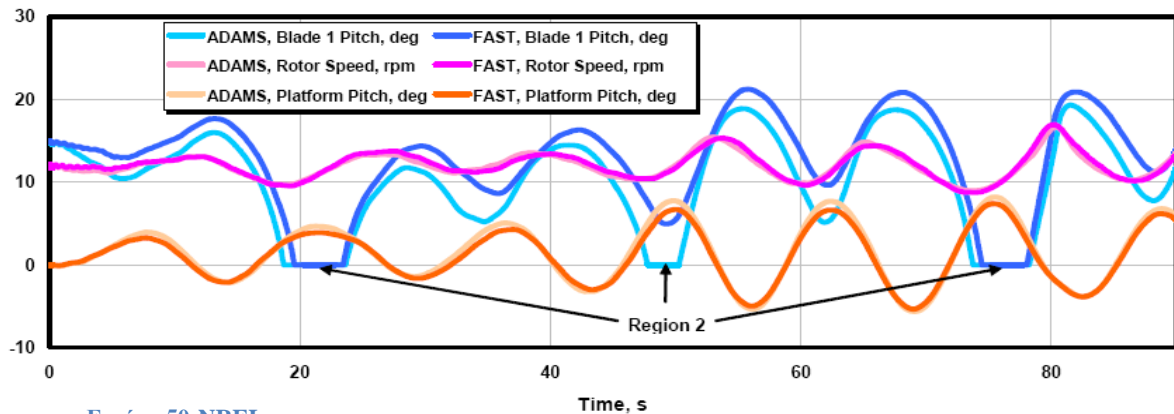
Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας όλου του συζευγμένου μοντέλου είναι απαραίτητο να γίνει επαλήθευση της ανάλυσης που εφαρμόστηκε στο πεδίο του χρόνου (time domain model). Για να γίνει αυτό χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα ανάλυσης στο πεδίο συχνοτήτων (frequency domain analysis). Αυτού του είδους η ανάλυση περιγράφει την ημιτονοειδή απόκριση σε κατάσταση ισορροπίας της πλατφόρμας, η οποία προκύπτει από την αλληλεπίδραση του σώματος με το προσπίπτον κύμα το οποίο διαδίδεται με συγκεκριμένο πλάτος, συχνότητα και σε συγκεκριμένη κατεύθυνση. Για την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου η ίδια καμπύλη προκύπτει εισάγοντας ως εξίσωση δύναμης περιοδικά κύματα, και εκτελώντας τον κώδικα σε τέτοιο χρονικό διάστημα ώστε να έχουν εξαφανισθεί όλα τα μεταβατικά φαινόμενα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποδεικνύουν ότι η εφαρμογή της ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου για την υδροδυναμική της πλατφόρμας είναι σωστή. Ενδεικτικά παρουσιάζονται δυο διαγράμματα.



Εικόνα 49-NREL

Στη συνέχεια παρατίθεται ένα διάγραμμα που προκύπτει κατά την εκτέλεση ολόκληρου του κώδικα για το συζευγμένο μοντέλο.

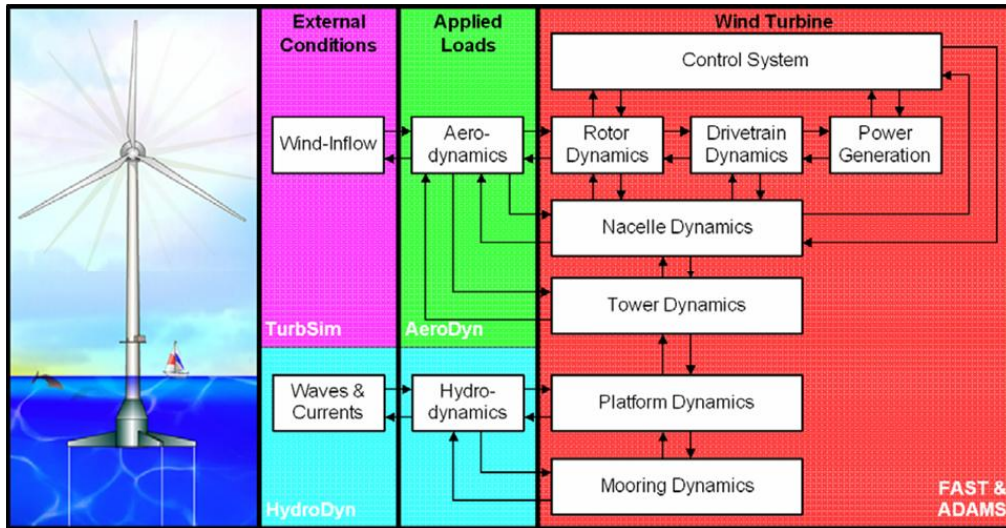


Εικόνα 50-NREL

Το συγκεκριμένο διάγραμμα προκύπτει για κανονική λειτουργία, με στοχαστικό αέρα 18 m/s, ακανόνιστα κύματα με ύψος 3,3 m και περίοδο 11,3 s. Τα κύματα έχουν απόκλιση 20° από τη διεύθυνση του ανέμου και τη γωνία του άξονα (nacelle yaw). Φαίνεται ότι ο κυματισμός προκαλεί στην πλατφόρμα μια κίνηση πρόνευσης, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες μετατοπίσεις του δρομέα. Καθώς η πλατφόρμα ταλαντώνεται προσήνεμα (θετική κλίση), η σχετική ταχύτητα του δρομέα μειώνεται, το οποίο προκαλεί πτώση και στην αεροδυναμική ροπή, αναγκάζοντας το σύστημα ελέγχου να μειώνει το βήμα του πτερυγίου σχεδόν μέχρι το μηδέν. Έτσι αν και ο άνεμος έχει τιμή πολύ πάνω από την ονομαστική, υπάρχουν κομμάτια του διαγράμματος που δείχνουν ότι η ανεμογεννήτρια λειτουργεί στην περιοχή 2 της καμπύλης της ισχύος (δηλαδή κάτω από την ονομαστική της ισχύ). Η ταχύτητα του δρομέα έχει διαφορά φάσης 90° με την πρόνευση της πλατφόρμας και εμφανίζει πολύ μεγαλύτερες μεταβολές από μια ανεμογεννήτρια επί εδάφους.

Τώρα που ο κώδικας επαληθεύτηκε, θα χρησιμοποιηθεί το πλήρως συζευγμένο αεροhydro-servo-elastic σύστημα για τον υπολογισμό τη απόκρισης του συστήματος. Η προσομοίωση έγινε για μια Ανεμογεννήτρια των 5 MW η οποία είναι εγκατεστημένη τόσο στην στεριά, όσο και πάνω σε μια πλωτή πλατφόρμα με καμπύλα αλυσοειδή αγκυροβόλια. Και στις δυο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σύστημα ελέγχου και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο συστημάτων ώστε να φανεί η επίδραση της σύζευξης Ανεμογεννήτριας-πλατφόρμας κατά τη φόρτιση τόσο από τον άνεμο όσο και από τον κυματισμό της θάλασσας. Η δημοσίευση αυτή αποτελεί τη συνέχεια των προηγούμενων δημοσιεύσεων που παρουσιάστηκαν. (Jonkman & Buhl, 2007)

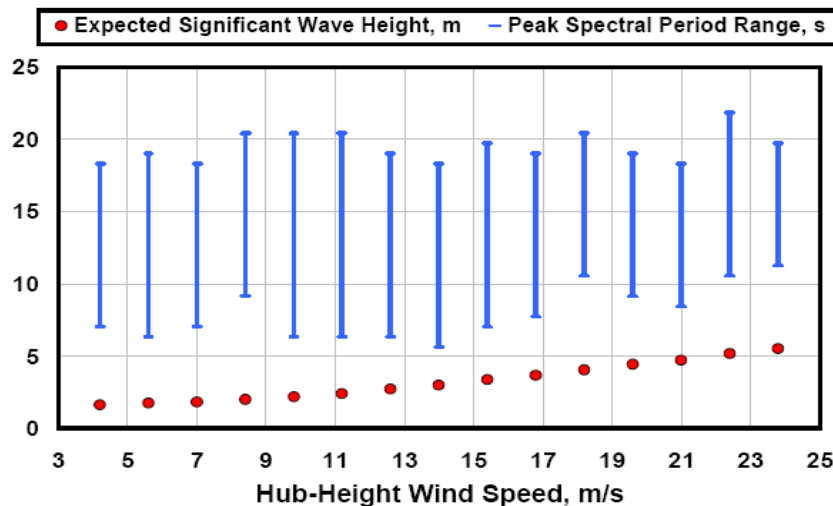
Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση του συστήματος.



Εικόνα 51-NREL

Έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (time domain hydrodynamics), στην οποία το μη γραμμικό φορτίο επαναφοράς λόγω του συστήματος αγκυροβόλησης δίνεται από ένα σχεδόν-στατικό μοντέλο (quasi-static module). Επίσης στην προσομοίωση περιλαμβάνονται η γραμμική επαναφορά λόγω υδροστατικής, η μη γραμμική απόσβεση λόγω ιξώδους από το προσπίπτον κύμα, το θαλάσσιο ρεύμα, η κίνηση της πλατφόρμας, η πρόσθετη μάζα, η απόσβεση λόγω της γραμμικής ακτινοβολίας κύματος και η διέγερση από τη γραμμική σκέδαση του προσπίπτοντος κύματος.

Ως περιοχή αναφοράς επιλέχθηκε η τοποθεσία όπου βρίσκονταν ο μετεωρολογικός σταθμός Stevenson βορειοανατολικά της Σκωτίας. Η τοποθεσία αυτή είναι κατάλληλη λόγω των ακραίων ανέμων και κυμάτων που αναπτύσσονται. Μετεωρολογικά και ωκεανογραφικά φαινόμενα έγιναν γνωστά από διάφορες πηγές. Με βάση αυτά έχουμε το ακόλουθο σχήμα το οποίο δείχνει την εξάρτηση του ύψους κύματος και του εύρους της περιόδου από την ταχύτητα του αέρα. Η ανάλυση έγινε για βάθος θάλασσας 150m και για ανεμογεννήτρια των 5MW.



Εικόνα 52-NREL

Οι παραδοχές που έγιναν είναι οι ακόλουθες: δε λαμβάνεται υπόψη το πιθανό φορτίο λόγω πάγου, διάβρωσης, ανάπτυξη θαλάσσιας ζώης, ομόρους γειτονικών ανεμογεννητριών, μεταβολές στην ατμοσφαιρική πίεση, σεισμούς, μεταβολές στο βάθος της θάλασσας και θαλάσσια ρεύματα τα οποία οφείλονται σε παλίρροιας και η κατάσταση του πυθμένα. Η πυκνότητα του αέρα θεωρείται σταθερή και ίση με $1,225 \text{ kg/m}^3$ και πυκνότητα του νερού $1,025 \text{ kg/m}^3$.

Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι ο προσδιορισμός των ακραίων φορτίων (extreme) αλλά και των φορτίων κόπωσης (fatigue) που εμφανίζονται σε μια ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια της ζωής της για διάφορες περιπτώσεις κόπωσης (design load cases DLCs). Οι περιπτώσεις αυτές περιλαμβάνουν λειτουργία σε κανονικές συνθήκες, ξεκίνημα και κλείσιμο της μηχανής, σταθμευμένη λειτουργία σε κανονικές ή ακραίες εξωτερικές συνθήκες και με πιθανά σφάλματα. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι DLCs που εφαρμόστηκαν. Κάθε περίπτωση φόρτισης συνοδεύεται από την κατάσταση του ανέμου, την κατάσταση της θάλασσας, τη συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου και πιθανά σφάλματα.

DLC	Winds		Waves			Controls / Events	Load Factor
	Model	Speed	Model	Height	Direction		
1) Power Production							
1.1	NTM	$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS	$H_s = E[H_s V_{hub}]$	$\beta = 0^\circ$	Normal operation	1.25*1.2
1.3	ETM	$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS	$H_s = E[H_s V_{hub}]$	$\beta = 0^\circ$	Normal operation	1.35
1.4	ECD	$V_{hub} = V_r, V_r \pm 2 \text{ m/s}$	NSS	$H_s = E[H_s V_{hub}]$	$\beta = 0^\circ$	Normal operation; $\pm \Delta$ wind dir'n.	1.35
1.5	EWS	$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS	$H_s = E[H_s V_{hub}]$	$\beta = 0^\circ$	Normal operation; $\pm \Delta$ ver. & hor. shr.	1.35
1.6a	NTM	$V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	ESS	$H_s = 1.09 * H_{s50}$	$\beta = 0^\circ$	Normal operation	1.35
2) Power Production Plus Occurrence of Fault							
2.1	NTM	$V_{hub} = V_r, V_{out}$	NSS	$H_s = E[H_s V_{hub}]$	$\beta = 0^\circ$	Pitch runaway → Shutdown	1.35
2.3	EOG	$V_{hub} = V_r, V_r \pm 2 \text{ m/s}, V_{out}$	NSS	$H_s = E[H_s V_{hub}]$	$\beta = 0^\circ$	Loss of load → Shutdown	1.10
6) Parked (Idling)							
6.1a	EWM	$V_{hub} = 0.95 * V_{50}$	ESS	$H_s = 1.09 * H_{s50}$	$\beta = 0^\circ, \pm 30^\circ$	Yaw = $0^\circ, \pm 8^\circ$	1.35
6.2a	EWM	$V_{hub} = 0.95 * V_{50}$	ESS	$H_s = 1.09 * H_{s50}$	$\beta = 0^\circ, \pm 30^\circ$	Loss of grid → $-180^\circ < \text{Yaw} < 180^\circ$	1.10
6.3a	EWM	$V_{hub} = 0.95 * V_1$	ESS	$H_s = 1.09 * H_{s1}$	$\beta = 0^\circ, \pm 30^\circ$	Yaw = $0^\circ, \pm 20^\circ$	1.35
7) Parked (Idling) and Fault							
7.1a	EWM	$V_{hub} = 0.95 * V_1$	ESS	$H_s = 1.09 * H_{s1}$	$\beta = 0^\circ, \pm 30^\circ$	Seized blade; Yaw = $0^\circ, \pm 8^\circ$	1.10

Τα μοντέλα του αέρα και του κυματισμού είναι τα ακόλουθα:

Κύμα: ESS (Extreme Sea State) = Ακραία κατάσταση θάλασσας

NSS (Normal Sea State) = Κανονική κατάσταση θάλασσας

Αέρας: ECD (Extreme Coherent Gust with Direction Change) = Συνεχής ριπή ανέμου με αλλαγή διεύθυνσης

EOG (Extreme Operating Gust) = Ακραία ριπή ανέμου

ETM (Extreme Turbulence Model) = Ακραίο τυρβώδες μοντέλο

EWM (Turbulent Extreme Wind Model) = Τυρβώδες ακραίο μοντέλο ανέμου

EWS (*Extreme Wind Shear*) = Πλήρως τυρβώδης ροή

NTM (*Normal Turbulence Model*) = Κανονικό τυρβώδες μοντέλο.

Οι βαθμοί ελευθερίας που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση είναι: δυο πλευρικές (edgewise) και δυο εμπρός-πίσω (flapwise) ιδιομορφές για κάθε πτερούγιο, στρέψη στον άξονα, μεταβλητή ταχύτητα στη γεννήτρια, γωνιακή απόκλιση στον άξονα (yaw), δυο εμπρός-πίσω (fore-aft) και δυο πλευρικές (side-to-side) ιδιομορφές για τον πύργο και τρεις περιστροφικές (pitch, roll, yaw) και τρεις αξονικές (heave, sway, surge) για το πλωτό σύστημα.

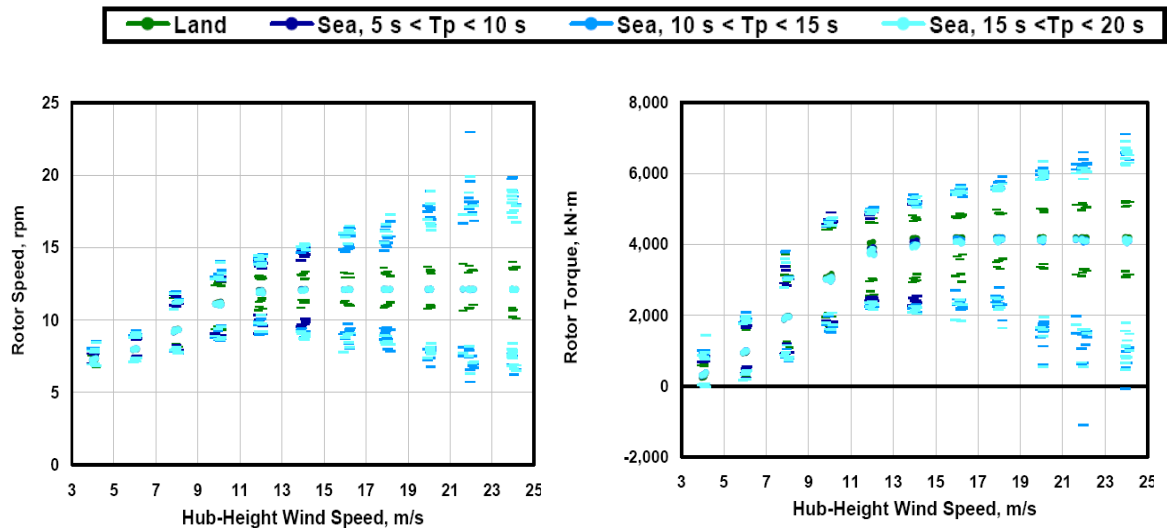
Στις περιπτώσεις φόρτισης που έχουμε παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο BEM (blade/element momentum) για τα πτερούγια. Το ίδιο μοντέλο δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοσθεί στην περίπτωση σταθμευμένης λειτουργίας, κατά την οποία απενεργοποιούνται το σύστημα ελέγχου και η ροπή στη γεννήτρια.

Όσον αφορά στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν σφάλματα στη λειτουργία (2.x , 7.x) επιλέχθηκαν αυτές με τις δυσμενέστερες συνέπειες. Για παράδειγμα στη 2.1 εισάγεται ένα σφάλμα στο σύστημα ελέγχου του βήματος του ενός πτερυγίου, το οποίο αγνοεί την εντολή και προσανατολίζεται με $\beta = 0^\circ$. Σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα προστασίας θα κλείσει την ανεμογεννήτρια με μια καθυστέρηση 0,2s (μέχρι να αντιληφθεί το σφάλμα και να δράσει), δίνοντας στα άλλα δυο πτερούγια $\beta = 90^\circ$.

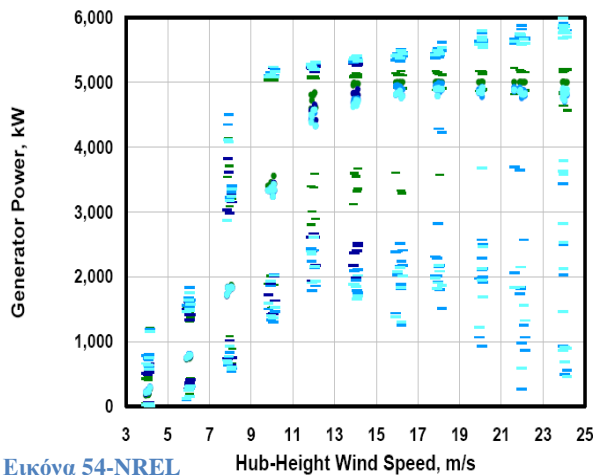
Θεωρούμε ότι ο δρομέας είναι πλήρως ευθυγραμμισμένος με τη διεύθυνση του ανέμου, όταν η πλατφόρμα και ο άξονας είναι στη θέση ισορροπίας. Τα κύματα διαδίδονται προς την ίδια κατεύθυνση με τον άνεμο, εκτός από την περίπτωση 1.4 όπου αλλάζει η διεύθυνση του ανέμου και τις περιπτώσεις 6.x και 7.1α όπου λαμβάνονται υπόψη δυο ακόμα κατευθύνσεις διάδοσης του κυματισμού με απόκλιση $\pm 30^\circ$ από τον άνεμο.

Αποτελέσματα

Τα πρώτα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι για κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας και για τις εξωτερικές συνθήκες ανέμου και θάλασσας της περίπτωσης 1.1. Αν και οι μέσες τιμές όλων των παραμέτρων είναι σχεδόν ίδιες για την ανεμογεννήτρια στη στεριά και στη θάλασσα, η διαφορά της ελάχιστης από τη μέγιστη τιμή είναι πολύ μεγαλύτερη για τις πλωτές ανεμογεννήτριες. Όπως ήταν αναμενόμενο η μέση τιμή της ταχύτητας του δρομέα αυξάνεται γραμμικά με την ταχύτητα του ανέμου όταν αυτή είναι μικρότερη της ονομαστικής για να επιτυγχάνεται βέλτιστη ισχύς. Επίσης η μέση ισχύς αυξάνεται με τον κύβο της ταχύτητας και η ροπή του δρομέα με το τετράγωνο.



Εικόνα 53-NREL



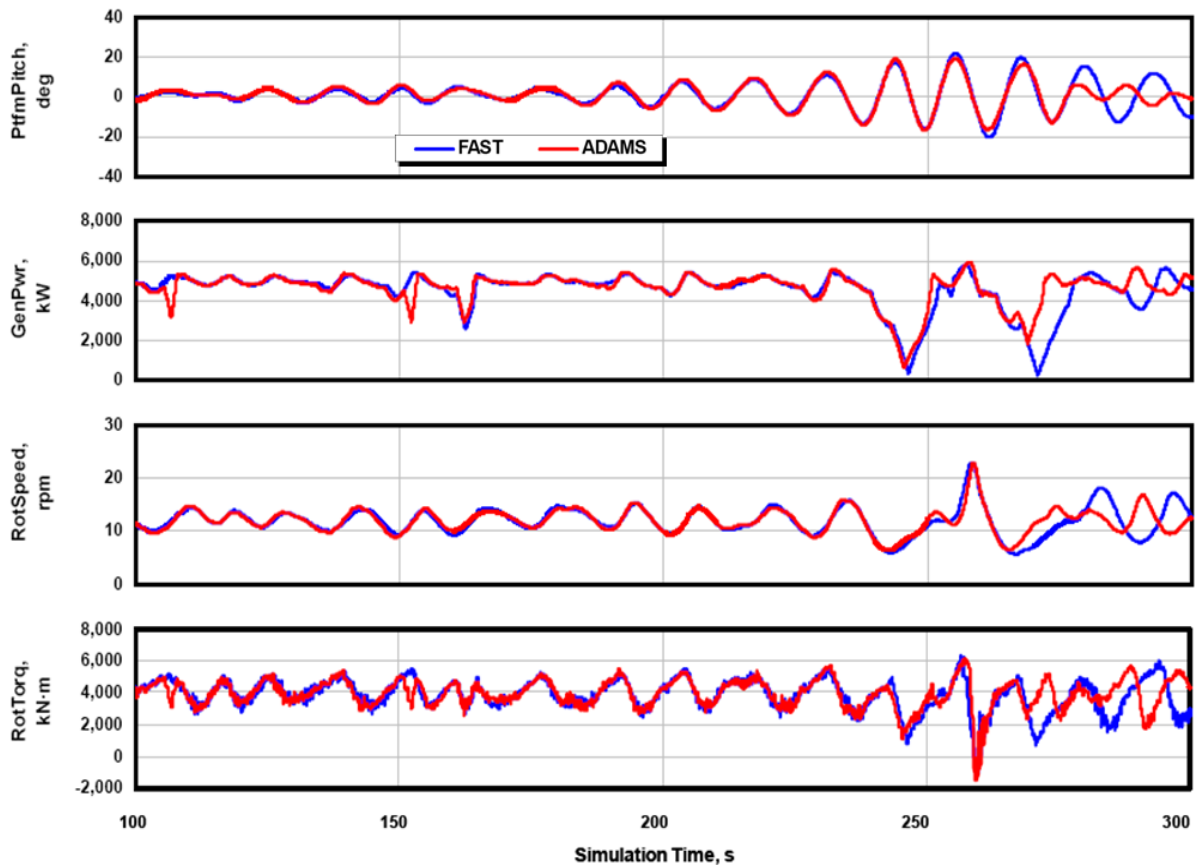
Εικόνα 54-NREL

Οι μέσες τιμές της απόκλισης λόγω της εμπρός-πίσω ταλάντωσης του πτερυγίου (out-of plane) και της ροπής στη βάση για το πτερύγιο αναφοράς (blade 1) φτάνουν μια μέγιστη τιμή στην V_T και μειώνονται ξανά. Αυτό είναι αναμενόμενο σε ανεμογεννήτρια μεταβλητών

στροφών και μεταβλητού βήματος λόγω της αλλαγής που συμβαίνει στο σύστημα ελέγχου από τη μεταβολή της ροπής στη γεννήτρια στη μεταβολή βήματος των πτερυγίων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα διαγράμματα διαφόρων παραμέτρων συναρτήσει του χρόνου για την περίπτωση 1.1. Στο πρώτο μισό του χρόνου η απόκριση του συστήματος είναι αναμενόμενη. Το προσπίπτων κύμα προκαλεί κίνηση πρόνευσης (pitch) στην πλατφόρμα. Η συνεχής αυτή κίνηση έχει ως αποτέλεσμα και οι άλλες παράμετροι να εμφανίζουν τις ίδιες ταλαντώσεις στην απόκρισή τους. Επιπλέον η πρόνευση προκαλεί μετατοπίσεις στον άξονα της ανεμογεννήτριας, γεγονός που κάνει το δρομέα να αντιλαμβάνεται μια ταλαντευτική συμπεριφορά της ροής του ανέμου. Καθώς η πλατφόρμα κινείται προσήνεμα (downwind, θετική κλίση της καμπύλης), η σχετική ταχύτητα του δρομέα μειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η αεροδυναμική ροπή ενώ το σύστημα ελέγχου μηδενίζει τη γωνία βήματος των πτερυγίων. Καθώς η αεροδυναμική ροπή πέφτει, υπάρχει μια διαφορά με τη ροπή της γεννήτριας και έτσι μειώνεται και η ταχύτητα του δρομέα. Η ταχύτητα αυτή παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερες τιμές από αυτές που εμφανίζονται στις ανεμογεννήτριες επί εδάφους.

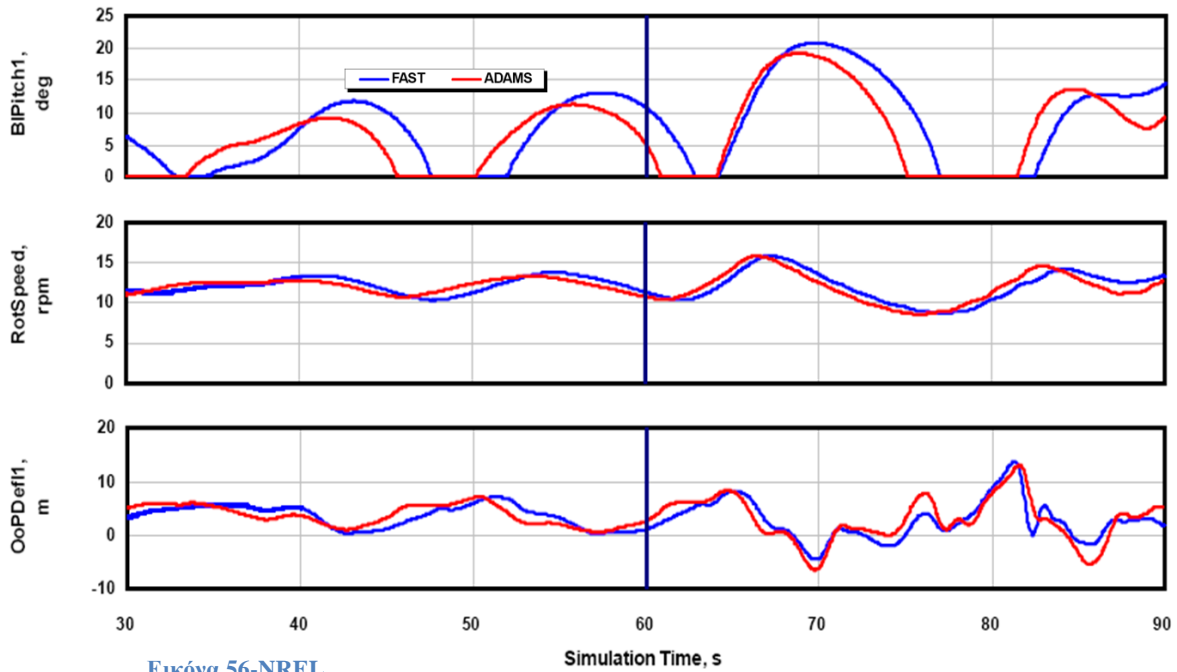
Στο δεύτερο μισό του χρόνου η απόκριση του πλωτού συστήματος αλλάζει σημαντικά. Ένας μεγάλος αριθμός κυμάτων με ύψος 7m και συχνότητα διάδοσης κοντά στη φυσική συχνότητα πρόνευσης της πλατφόρμας (0,086Hz) προσκρούουν σε αυτήν. Ταυτόχρονα με αυτά η ροή ανέμου ταχύτητας περίπου 25m/s ακολουθείται από μια ριπή ταχύτητας 30m/s. Αυτές οι συνθήκες προκαλούν έντονη κίνηση πρόνευσης της πλατφόρμας, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλα φορτία στα πτερύγια και στον πύργο, μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα του δρομέα και στην ισχύ, καθώς και ιδιαίτερα μεγάλες τιμές της ώσης του δρομέα.



Εικόνα 55-NREL

Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα παραμέτρων συναρτήσει του χρόνου για την περίπτωση 1.4 στην οποία σε χρόνο $t = 60s$ εμφανίζεται ένα γεγονός ECD. Πριν την εμφάνιση αυτή η κίνηση της πλατφόρμας και οι μεταβολές στη γωνία βήματος των πτερυγίων είναι όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Έτσι αν και η ταχύτητα του ανέμου είναι σταθερή και πάνω από την ονομαστική, υπάρχουν μικρές περιόδους λειτουργίας κάτω της ονομαστικής όπου έχουμε απώλεια ισχύος. Το φαινόμενο ECD όπως αναφέρθηκε εμφανίζεται τη χρονική στιγμή 60s και χρειάζεται 10s για να εμφανισθεί η κατά 15m/s αυξημένη ταχύτητα ανέμου και η ταυτόχρονη μεταβολή της διεύθυνσης αυτού κατά 54° . Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου λόγω της ριπής (gust) προκαλεί αρχικά αύξηση της ταχύτητας του δρομέα και της γωνίας βήματος των πτερυγίων καθώς το σύστημα ελέγχου προσπαθεί να προσαρμοσθεί. Αλλά η αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης του ανέμου προκαλεί μεγάλη γωνιακή απόκλιση στον άξονα (nacelle yaw error), που έχει ως αποτέλεσμα η σχετική ταχύτητα του

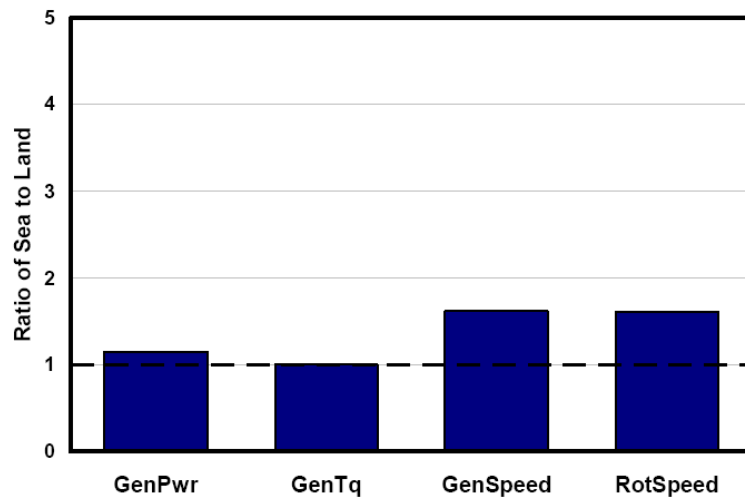
δρομέα να μειώνεται και τελικά και η ταχύτητα του δρομέα αλλά και η γωνία βήματος των πτερυγίων να αποκτούν μικρότερες τιμές. Η μέγιστη απόκλιση λόγω εμπρός-πίσω ταλάντωσης (out-of plane) (σχεδόν 14m) εμφανίζεται μετά από αυτά τα γεγονότα όταν το πτερύγιο είναι οριζόντιο στον άνεμο αφού η γωνία βήματος γίνει 0°.



Εικόνα 56-NREL

Αποδείχθηκε τελικά ότι η ανεμογεννήτρια που βρισκόταν εγκατεστημένη πάνω στην πλωτή πλατφόρμα επηρεάζονταν περισσότερο από τα κύματα, ενώ τα φορτία στο σύστημα αγκυροβόλησης είναι τα μόνα που οδηγούνται κυρίως από τον άνεμο.

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προήλθαν από τις μετρήσεις στη στεριά και στη θάλασσα δημιουργήθηκαν οι αδιάστατοι λόγοι στον αριθμητή των οποίων βρίσκεται το μέγιστο των απολύτων τιμών των παραμέτρων από την ανάλυση στη θάλασσα και στον παρονομαστή οι αντίστοιχες από την ανάλυση στη στεριά. Με αυτόν τον τρόπο εξετάζεται η επίδραση της πλωτής πλατφόρμας στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει ορισμένους από αυτούς τους λόγους. Η διαφορά στη ταχύτητα του δρομέα οφείλεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην πρόνευση (pitch) της πλατφόρμας.



Εικόνα 57-NREL

Τελικά αυτό που αποδείχθηκε είναι ότι ο πύργος δέχεται μεγαλύτερα φορτία από τα πτερύγια, εξαιτίας της αδράνειας που παρουσιάζει στην πρόνευση της πλατφόρμας. Για να αποφευχθεί αυτό υπάρχουν δυο διαφορετικοί τρόποι σχεδιασμού. Πρώτον να ενισχυθεί ο πύργος για να αντιστέκεται στη φόρτιση της πλατφόρμας, κάτι το οποίο μπορεί να μην είναι οικονομικά αποτελεσματικό. Η δεύτερη λύση είναι να βελτιώσουμε την απόκριση της πλατφόρμας μειώνοντας έτσι το φορτίο. Αυτό επιτυγχάνεται είτε αυξάνοντας τις αποσβέσεις, είτε μεταβάλλοντας τη γεωμετρία της πλατφόρμας και τη διάταξη του συστήματος αγκυροβόλησης, με σκοπό πάντα να μειωθεί η πρόνευση.

Κατά την ανάλυση των διαφόρων περιπτώσεων εμφανίσθηκαν ορισμένες αστάθειες σε διάφορες ιδιομορφές του συστήματος. Η πρώτη αφορά στην πλευρική ταλάντωση του πύργου (side-to-side) όταν η ανεμογεννήτρια είναι εγκατεστημένη στη στεριά. Εμφανίζεται όταν το σύστημα είναι σταθμευμένο, τα πτερύγια έχουν γωνία βήματος 90° και ο δρομέας έχει απόκλιση από τη διεύθυνση διάδοσης του ανέμου $\pm 20 \div 40^\circ$.

Η δεύτερη αφορά στη γωνιακή απόκλιση της πλατφόρμας (yaw), η οποία εμφανίζεται όταν η ανεμογεννήτρια είναι σταθμευμένη και ταυτόχρονα παρουσιάζεται σφάλμα στα πτερύγια, δηλαδή ένα από αυτά έχει μηδενική γωνία βήματος ενώ τα άλλα δύο έχουν τη μέγιστη (90°). Η αστάθεια αυτή οφείλεται σε μια σύζευξη που υπάρχει ανάμεσα στη γωνιακή απόκλιση της πλατφόρμας και στην αζιμουθιακή κίνηση του πτερυγίου που παρουσιάζει το σφάλμα, οδηγώντας έτσι την πλατφόρμα σε διαρκή ταλάντωση σε αυτήν την ιδιομορφή. Μια πιθανή λύση για την αποφυγή του προβλήματος είναι να αυξήσουμε την ήδη υπάρχουσα απόσβεση που παρουσιάζει η πλατφόρμα στην πλευρική απόκλιση (yaw).

Το τελευταίο πρόβλημα που παρουσιάστηκε είναι ότι η πλατφόρμα είναι ευαίσθητη σε μεγάλες μετατοπίσεις όταν το προσπίπτον κύμα είναι μεγάλο ή απότομο. Η πλατφόρμα εμφανίζει πρόνευση λόγω των κυμάτων της επιφάνειας. Η κίνηση αυτή προκαλεί υπέρμετρη εκτροπή στα πτερύγια και στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Όταν τα πτερύγια εκτρέπονται ασύμμετρα, εξαιτίας των μεταβολών στη γωνία αζιμούθιου του δρομέα, της τύρβης του ανέμου και της μη ευθυγράμμισης των

κυμάτων με τον άξονα συμμετρίας της πλατφόρμας, αυτή διεγείρεται και σε άλλες ιδιομορφές κίνησης όπως η περιστροφή (roll) και η γωνιακή απόκλιση (yaw). Το αποτέλεσμα είναι εξαιρετικά έντονες εκτροπές και φόρτιση ολόκληρου του συστήματος. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι τόσο έντονο ώστε ενώ στη θέση ισορροπίας τα ακροπερύγια βρίσκονται 30m πάνω από την επιφάνεια της ήρεμης θάλασσας, σε ορισμένες περιπτώσεις ακραίων κυμάτων περνούν κάτω από αυτή.

Μια αντίστοιχη ανάλυση πραγματοποιήθηκε συνδυάζοντας τα φορτία της ανεμογεννήτριας με υπορουτίνες για το σύστημα ελέγχου και την υδροδυναμική φόρτιση από τον πλωτήρα, στο πεδίο του χρόνου. Οι προσομοιώσεις έγιναν για διάφορες συνθήκες ανέμου και κυματισμού καθώς και για ακραίες περιπτώσεις. Η απόκριση του συστήματος βοήθησε στην αξιολόγηση αυτού προκειμένου να προσδιορισθεί η δυνατότητα υλοποίησης των διαφόρων τρόπων στήριξης της πλωτής ανεμογεννήτριας. (Withee & Sclavounos, 2004)

Το σύστημα στήριξης που χρησιμοποιήθηκε συνδυάζει τα χαρακτηριστικά της άνωσης μέσω έρματος και της τάσης των τεντωμένων συρματόσχοινων (tension leg spar buoy).



Εικόνα 58-NREL

Ο πλωτήρας θεωρείται άκαμπτο σώμα που στηρίζεται στον πυθμένα μέσω εύκαμπτων συρματόσχοινων. Τα σχοινιά αυτά παρουσιάζουν ακαμψία στην περιστροφή όταν παραμένουν τεντωμένα. Γι' αυτό το λόγο η άνωση είναι μια σημαντική σχεδιαστική παράμετρος, η οποία πρέπει να είναι αρκετά υψηλή προκειμένου τα συρματόσχοινα να είναι πάντα υπό τάση ώστε να εμποδίζουν τις μεγάλες μετατοπίσεις στην πρόνευση (pitch) και στην περιστροφή (roll). Το σύστημα παρουσιάζει ευαισθησία στην εμπρός-πίσω ταλάντωση (surge).

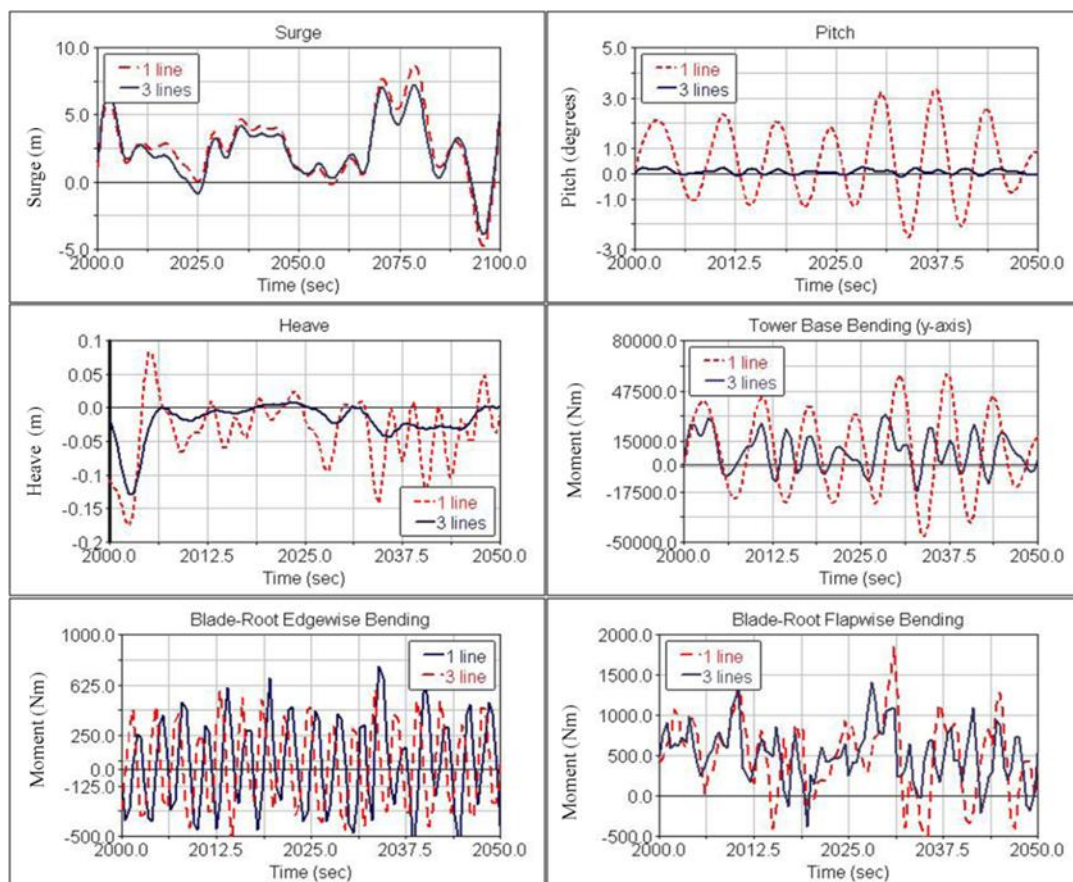
Το ένα μέρος της ανάλυσης ασχολείται με την επίδραση που έχει η κίνηση του πλωτήρα στην απόδοση της πλατφόρμας και στην κόπωσή της. Το άλλο μέρος έχει να κάνει με τη φόρτιση των συρματόσχοινων που στηρίζουν τον πλωτήρα στον πυθμένα της θάλασσας.

Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση είναι ο FAST και ο ADAMS. Τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας, για την οποία έγινε η ανάλυση φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα. Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε άνεμο 20 m/s.

Όνομαστική Ισχύς	1,5 MW	V_{cut-in}	5 m/s
Ύψος άξονα	84,29 m	$V_{cut-out}$	25 m/s
Διάμετρος δρομέα	70 m	Μάζα κλωβού	51.200 kg
Αριθμός πτερυγίων	3	Μάζα δρομέα	15.100 kg
Ταχύτητα περιστροφής	20 rpm	Μάζα πύργου	123.003 kg

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων απέδειξαν ότι η ακαμψία στην πρόνευση (pitch) και η σχετική ευκαμψία στην εμπρός-πίσω ταλάντωση (surge) οδηγούν σε μείωση της φόρτισης του πάνω μέρους του πύργου. Το σύστημα μπορεί να απορροφήσει ορισμένη από τη φόρτιση που προκαλείται από τον άνεμο όταν ταλαντώνεται εμπρός-πίσω (surge) παρουσιάζοντας αρκετή αεροδυναμική απόσβεση. Η ακαμψία στην πρόνευση αποτρέπει την εμφάνιση μεγάλων φορτίων στον κλωβό λόγω κυματισμού. Η ροπή στη βάση του πύργου αποδείχθηκε ότι έχει πάντα μεγαλύτερες τιμές για τις πλωτές ανεμογεννήτριες σε σύγκριση με αυτές στη στεριά.

Ενδεικτικά αποτελέσματα της απόσβεσης του συστήματος για ταχύτητα ανέμου 15 m/s και για δυο διαφορετικές στηρίξεις (με ένα και με τρία συρματόσχοινα σε κάθε άξονα) φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα.

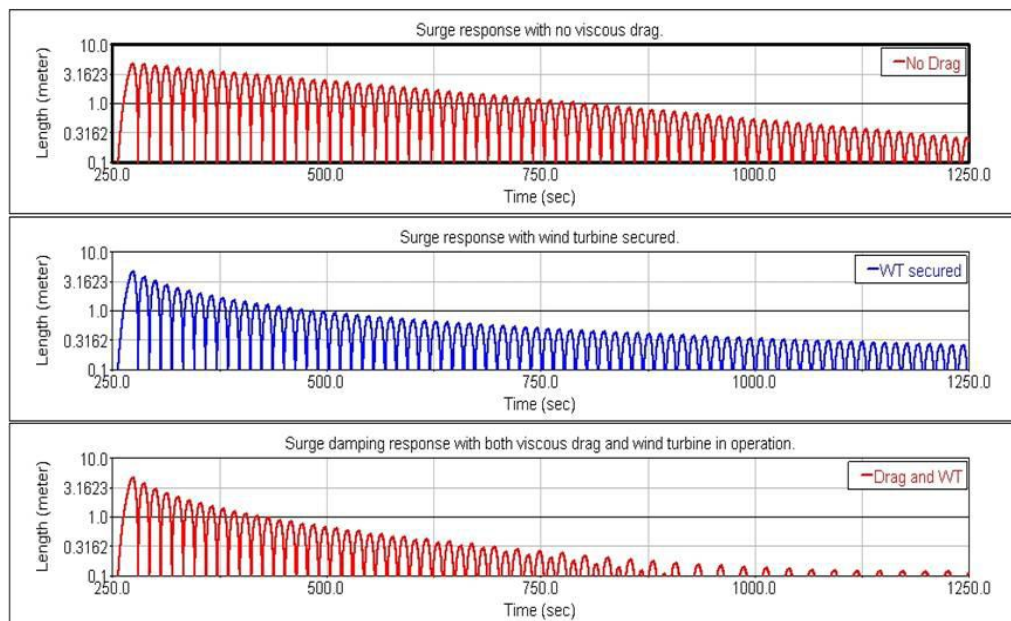


Εικόνα 59-NREL

Πλήρως συζευγμένο σύστημα στο πεδίο του χρόνου: Πλωτό σύστημα με κάθετα τεντωμένα συρματόσχοινα (Tension Leg Platform TLP)

Η απόκριση του συζευγμένου συστήματος υπολογίστηκε με τη χρήση των προγραμμάτων προσομοίωσης FAST και MSC Adams που αναπτύχθηκαν στο NREL, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

Το σύστημα που εξετάστηκε είναι αυτό που φαίνεται στην εικόνα 35. Η ανεμογεννήτρια έχει ισχύ 1,5 MW, το ύψος του δρομέα από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας είναι 84 m, η ακτίνα των πτερυγίων είναι 35 m, η ταχύτητα περιστροφής είναι 20 rpm, η διάμετρος του πλωτήρα είναι 10 m, το μήκος των αξόνων που στηρίζουν τα συρματόσχοινα είναι 20 m και η μελέτη έγινε σε βάθη 100 και 200 m. Η ακόλουθη εικόνα δείχνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την εμπρός-πίσω ταλάντωση (surge), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της απόσβεσης που προκαλείται από το δρομέα της ανεμογεννήτριας και την απόσβεση λόγω ιξώδους που προκαλείται από τον πλωτήρα. (Lee, Sclavounos, & Wayman, 2005)



Εικόνα 60-NREL

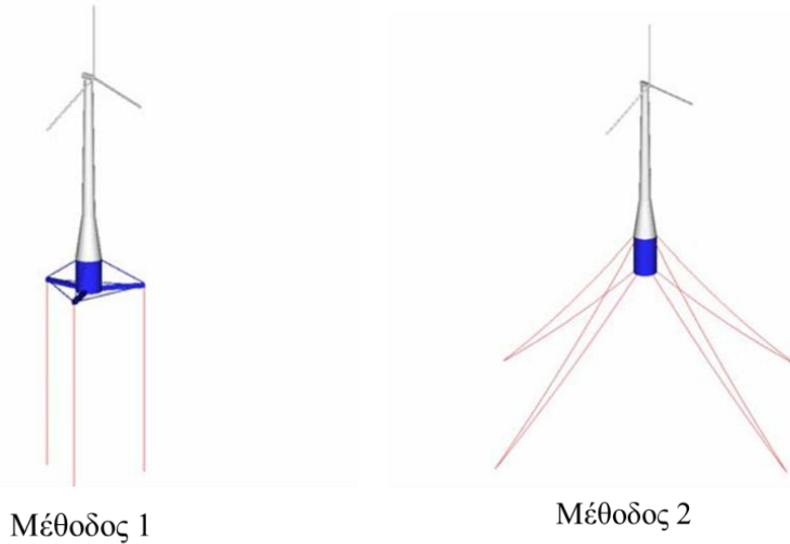
Οι δυο μηχανισμοί απόσβεσης αποδείχθηκε ότι είχαν αντίστοιχο μέγεθος, αλλά η απόσβεση λόγω του δρομέα φάνηκε να ακολουθεί κάποια γραμμικότητα.

Ανάλυση απόκρισης στο πεδίο συχνοτήτων για 2 πλωτήρες: TLP, στήριξη με έρμα (spar buoy)

Σε αυτή τη φάση έγινε μια συγκριτική ανάλυση δυο διαφορετικών μεθόδων στήριξης της πλωτής ανεμογεννήτριας όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα. Διεξήχθη μια γραμμική δυναμική ανάλυση για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του πύργου, της νασέλλας και του δρομέα καθώς και την γραμμική απόσβεση του τελευταίου. Αποδείχθηκε ότι η μέθοδος 1 είναι πιο επιρρεπής σε εμπρός-πίσω (sway) και πλευρικές (surge) ταλαντώσεις, αλλά εξαιρετικά δύσκαμπτη στις περιστροφικές

ιδιομορφές. Το αντίθετο αποδείχθηκε ότι ισχύει για τη μέθοδο 2. Επιπλέον η φυσική συχνότητα της μεθόδου 1 είτε στις πολύ χαμηλές (0,2~0,3 rad/s) είτε στις πολύ υψηλές (~4 rad/s) περιοχές οι οποίες εμφανίζονται σπάνια στο φάσμα των θαλασσών.

Αντίθετα οι φυσικές συχνότητες της μεθόδου 2 είναι στην ίδια περιοχή με αυτές του φάσματος της θάλασσας. Τελικά όμως και τα δυο συστήματα είναι ικανά να στηρίξουν μια πλωτή ανεμογεννήτρια σε δύσκολα καιρικά φαινόμενα.



Εικόνα 61-NREL

2.1.3 Αστάθειες και συστήματα ελέγχου

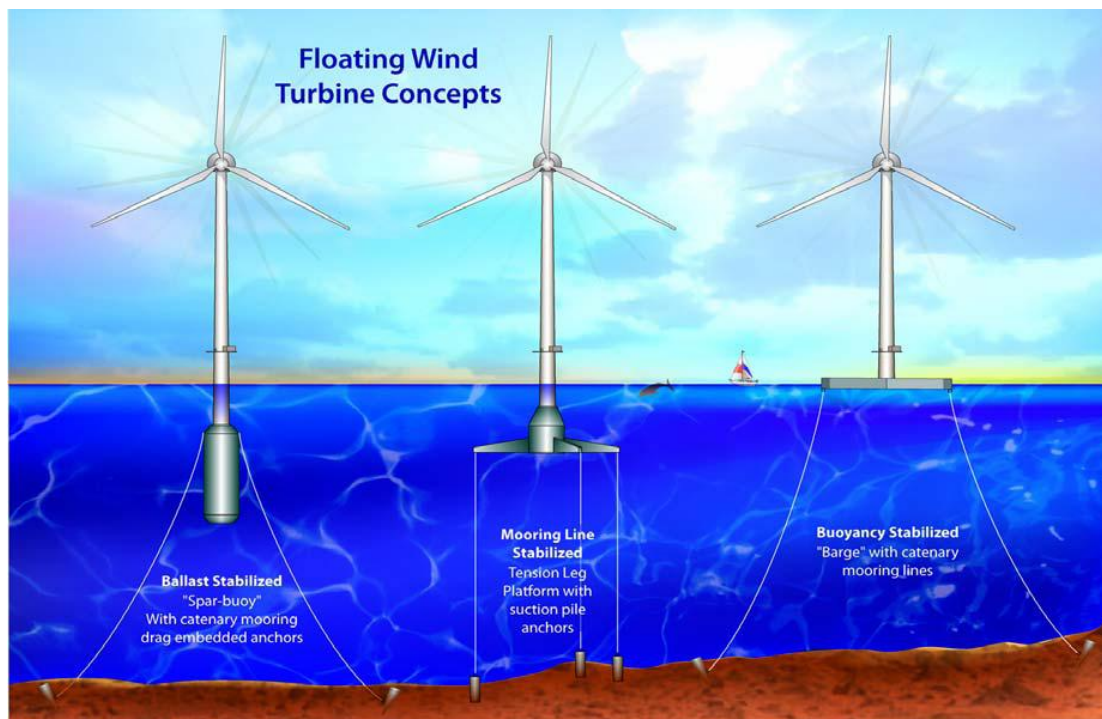
Έχει γίνει μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης των συστημάτων στήριξης μιας πλωτής Ανεμογεννήτριας με κριτήριο τη στατική ευστάθεια. Η συγκεκριμένη δουλειά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρακτική μέθοδος για την οικονομική ανάλυση ενός μεγάλου εύρους πλατφορμών.

Στα βαθιά νερά μια πλωτή κατασκευή για τη στήριξη μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να αποδειχθεί πιο οικονομική λύση από τις μέχρι τώρα πακτωμένες στον πυθμένα βάσεις. Η πλωτή αυτή κατασκευή πρέπει να παρέχει αρκετή άνωση για να μπορεί να στηρίξει το βάρος της ανεμογεννήτριας και να περιορίζει όσο το δυνατόν περισσότερο την πρόνευση (pitch), την περιστροφική κίνηση (roll) και την πάνω-κάτω ταλάντωση (heave). Το ύψος της επένδυσης στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αυξάνεται λόγω του κόστους της πλατφόρμας, γεγονός που αντισταθμίζεται από το κέρδος λόγω των αυξημένων ταχυτήτων του ανέμου και της μεγαλύτερης αποδοχής από τους κατοίκους των περιοχών λόγω της μη ύπαρξης οπτικής επαφής και των μειωμένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Σκοπός είναι η βελτιστοποίηση της πλωτής πλατφόρμας ώστε να έχει το μικρότερο δυνατό κόστος και σε αυτό σημαντικό ρόλο παίζει το βάθος της θάλασσας στην εκάστοτε περιοχή που προορίζεται για

εγκατάσταση πλωτών ανεμογεννητριών. (Butterfield, Musial, Jonkman, & Sclavounos, 2005)

Οι τρεις κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα πλωτά συστήματα με βάση το μηχανισμό για επίτευξη στατικής ευστάθειας είναι αυτές που φαίνονται και στην ακόλουθη εικόνα:

- Χρήση έρματος (ballast)
- Χρήση τεντωμένων συρματόσχοινων (mooring lines)
- Βασιζόμενοι στην άνωση (buoyancy)



Εικόνα 62-NREL

Ο πρώτος τρόπος στήριξης (spar-buoy configuration) χρησιμοποιεί έρμα για να χαμηλώσει το κέντρο βάρους κάτω από το κέντρο άνωσης, και αγκυροβολείται είτε με αλυσοειδή καμπυλωτά σχοινιά (όπως φαίνεται στην εικόνα), είτε με τεντωμένα συρματόσχοινα. Ο δεύτερος τρόπος στήριξης (tension leg platform TLP) χρησιμοποιεί ως αγκυροβόλιο ρύματα, τα οποία μένουν τεντωμένα λόγω της πρόσθετης πλευστότητας που δημιουργείται από το κοίλωμα στην πλατφόρμα. Ο τρίτος τρόπος στήριξης (barge configuration) επιτυγχάνει ευστάθεια μέσω της άνωσης μιας πλατφόρμας που βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας και η οποία αγκυροβολείται με καμπυλωτά συρματόσχοινα. Στην πραγματικότητα χρησιμοποιείται συνδυασμός των παραπάνω συστημάτων για την επίτευξη ευστάθειας (υβριδικά συστήματα).

Ένα σύστημα TLP παρέχει περισσότερη ευστάθεια και γι' αυτό έχει τη μικρότερη επίδραση στη δυναμική της ανεμογεννήτριας. Ένα σύστημα που βασίζεται στο έρμα είναι πιο βαρύ και άρα πιο ακριβό στην κατασκευή. Η πλατφόρμα είναι ευαίσθητη στο

φορτίο λόγω κυματισμού, γεγονός που αυξάνει την απόκριση (κίνηση) του συστήματος. Γι' αυτό είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός μιας ανεμογεννήτριας που είναι ανθεκτική σε μεγάλες κινήσεις του πύργου, κάτι που είναι εφικτό αλλά με μεγαλύτερο κόστος.

Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι μηχανικοί κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός πλωτού συστήματος είναι οι ακόλουθες.

- *Σχεδιαστικά μοντέλα:* Η πολυπλοκότητα των απαιτούμενων μοντέλων που πρέπει να αναπτυχθούν αυξάνεται με βάση την ευκαμψία και τη σύζευξη ανεμογεννήτριας-πλατφόρμας.
- *Κόστος και πολυπλοκότητα για επίτευξη άνωσης:* Όλες οι πλωτές στηρίξεις χρειάζονται ένα σύστημα για να επιτυγχάνουν άνωση. Η πλωτή πλατφόρμα έχει το μικρότερο κόστος εκτοπίσματος λόγω της απλής γεωμετρίας.
- *Κόστος και πολυπλοκότητα συστήματος αγκυροβόλησης:* Το κόστος τους εξαρτάται από το βάθος της θάλασσας.
- *Κόστος και πολυπλοκότητα άγκυρας:* Άγκυρες που εμφυτεύονται καθώς σύρονται (drag embedded) και έχουν οριζόντια φόρτιση έχουν χαμηλότερο κόστος υλικών και λιγότερη πολυπλοκότητα από αυτές με κάθετη φόρτιση.
- *Κόστος και πολυπλοκότητα εγκατάστασης και ανεκτικότητα στον καιρό:* Το κόστος ειδικών πλοίων που θα μεταφέρουν και θα τοποθετήσουν την ανεμογεννήτρια πάνω στην πλατφόρμα θα αποφευχθεί για κάθε πλωτήρα που έχει ευστάθεια κατά τη μεταφορά του στο σημείο εγκατάστασης με την ανεμογεννήτρια ήδη τοποθετημένη επάνω του. Επιπλέον πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα εγκατάστασης του συστήματος σε διάφορες καιρικές συνθήκες.
- *Απλότητα εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας στην πλατφόρμα ενώ είναι ακόμα στη στεριά:* Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται το κόστος του πληρώματος και του ειδικού εξοπλισμού το οποίο πολλαπλασιάζεται με την πολυπλοκότητα της κατασκευής και τη μη ανεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες.
- *Διάβρωση και αντίσταση στον πάγο:* Πλωτήρες με μεγάλο μέρος κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια είναι πιο ευαίσθητοι στη διάβρωση και στον πάγο. Το πρόβλημα αποφεύγεται με χρήση ειδικών υλικών που όμως αυξάνουν το κόστος.
- *Εξάρτηση από το βάθος της θάλασσας:* Η ικανότητα ενός πλωτήρα να εγκατασταθεί σε διάφορα βάθη αυξάνει τον αριθμό των περιοχών που είναι κατάλληλες γι' αυτόν. Πλατφόρμες που εξαρτώνται από την ίσαλο επιφάνεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε ρηχά και σε βαθιά νερά. TLPs και συστήματα που βασίζονται στο έρμα απαιτούν βάθος τουλάχιστον 50m.

- *Εναισθησία στην κατάσταση του πυθμένα:* Συστήματα αγκυροβόλησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικούς πυθμένες απαιτούν λιγότερη γεωτεχνική δουλειά και λιγότερο ακριβή σχεδιασμό του συστήματος. Άγκυρες που εμφυτεύονται καθώς σύρονται (drag embedded) είναι κατάλληλες για μεγαλύτερο εύρος πυθμένων από τις άγκυρες αναρρόφησης (suction pile).
- *Ελάχιστο ίχνος:* Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις έχουν σημαντική επίδραση στο κόστος.
- *Εναισθησία στον κυματισμό:* Τα ακραία κύματα είναι πολλές φορές ο κύριος οδηγός για τη σχεδίαση υπεράκτιων συστημάτων. Πλωτήρες που είναι μερικώς βυθισμένοι μπορούν πιο εύκολα να αποφύγουν τα ακραία κύματα από αυτούς που βρίσκονται στην επιφάνεια της θάλασσας.

Αν και δίνεται μεγάλη προσοχή από τους σχεδιαστές στο σύστημα στήριξης, η επιπλέον κίνηση λόγω του πλωτήρα επιδρά σημαντικά και στο σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας.

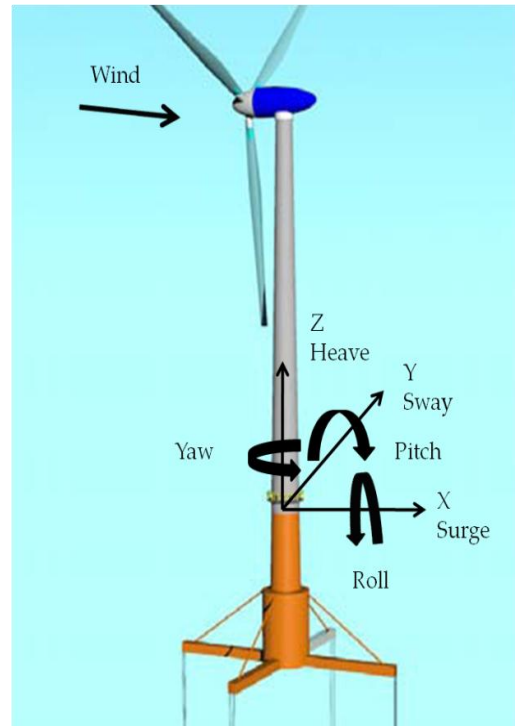
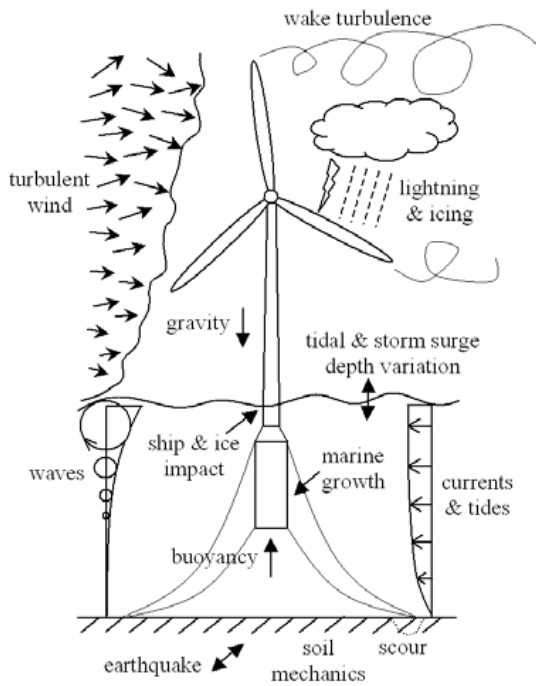
- *Βάρος Ανεμογεννήτριας:* Το βάρος του άξονα και του δρομέα έχει άμεση επίδραση στο κόστος της πλατφόρμας στήριξης που απαιτείται. Κάθε μείωση στο βάρος του πάνω μέρους του πύργου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση στο βάρος όλου του συστήματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που είχαν απορριφθεί για τις ανεμογεννήτριες στη στεριά λόγω ακουστικής όχλησης ή αισθητικής. Για παράδειγμα χαμηλότερη φόρτιση λόγω ώσης και ελαφρύτερα υλικά μπορούν να συμβάλλουν στη συνολική μείωση του βάρους.
- *Κίνηση του πάνω μέρους του πύργου:* Η κίνηση της πλατφόρμας έχει σημαντική επίδραση στο σχεδιασμό του άξονα και του δρομέα και άρα στο κόστος αυτών. Η ανεμογεννήτρια πρέπει να είναι πιο στιβαρή για να αντιστέκεται στις μετατοπίσεις του άξονα, στην πάνω-κάτω ταλάντωση (heave) και στις γωνιακές επιταχύνσεις λόγω πρόνευσης (pitch) και περιστροφής (roll). Σημαντική μείωση του κόστους μπορεί να επιτευχθεί με την κατασκευή εύκαμπτων συστημάτων.
- *Πολυπλοκότητα συστήματος ελέγχου:* Το σύστημα ελέγχου παίζει σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια της ανεμογεννήτριας. Στις πλωτές πλατφόρμες το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιείται για να περιορίσει την απόκριση ολόκληρου του συστήματος στη στοχαστική φόρτιση λόγω κυματισμού.

Στη συνέχεια παρατίθεται ένας πίνακας με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεθόδων στήριξης.

	Αξιολόγηση κάθε συστήματος		
	Κατηγοριοποίηση πλωτών συστημάτων		
<u>Σχεδιαστικές Προκλήσεις Πλατφόρμας</u>	Άνωση (barge)	TLP	Έρμα (spar)
Σχεδιαστικά μοντέλα	-	+	-
Κόστος και πολυπλοκότητα για επίτευξη άνωσης	-	+	-
Κόστος και πολυπλοκότητα συστήματος αγκυροβολήσης	-	+	-
Κόστος και πολυπλοκότητα άγκυρας	+	-	+
Κόστος και πολυπλοκότητα εγκατάστασης και ανεκτικότητα στον καιρό	+	-	
Απλότητα εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας στην πλατφόρμα ενώ είναι ακόμα στη στεριά	+	-	+
Διάβρωση και αντίσταση στον πάγο	-	+	+
Εξάρτηση από το βάθος της θάλασσας	+	-	-
Ευαισθησία στην κατάσταση του πυθμένα	+	-	+
Ελάχιστο ίχνος	-	+	-
Ευαισθησία στον κυματισμό	-	+	+
<u>Επίδραση στο σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας</u>			
Βάρος Ανεμογεννήτριας	+	-	-
Κίνηση του πάνω μέρους του πύργου	-	+	-
Πολυπλοκότητα συστήματος ελέγχου	-	+	-

(+ = πλεονέκτημα
 - = μειονέκτημα
 κενό = ουδέτερο)

Μια από τις πιο σημαντικές προκλήσεις κατά το σχεδιασμό του συστήματος στήριξης είναι η ικανότητα πρόβλεψης της φόρτισης και η δυναμική απόκριση του συζευγμένου συστήματος στα στοχαστικά κύματα και στη φόρτιση του ανέμου. Οι επόμενες εικόνες δείχνουν τα επιπλέον φορτία που ασκούνται σε μια πλωτή ανεμογεννήτρια και οι απαραίτητοι βαθμοί ελευθερίας για τη μοντελοποίηση της πλατφόρμας.



Εικόνα 63-NREL

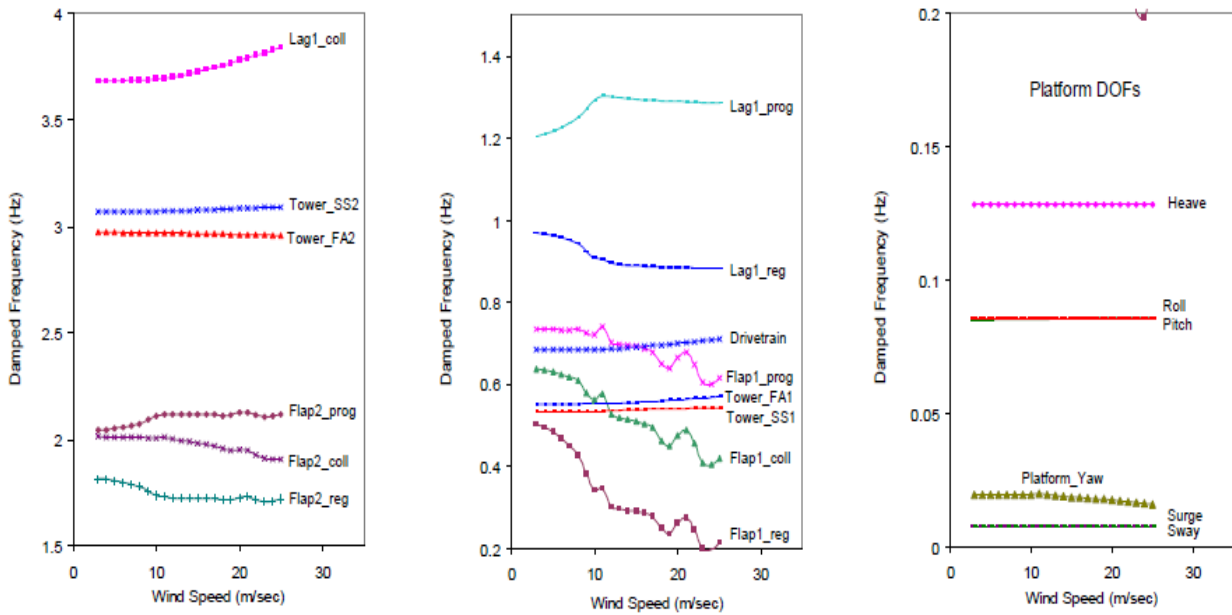
Τα σχεδιαστικά μοντέλα καθορίζουν τις περιπτώσεις φόρτισης που πρέπει να εξεταστούν, αλλά επαφίεται και στην ικανότητα του αναλυτή να προσομοιώσει όλες τις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας της ανεμογεννήτριας σε συνδυασμό με όλες τις πιθανές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στην πορεία εξετάζεται η αεροελαστική ευστάθεια μιας ανεμογεννήτριας 5MW με τρία πτερύγια που είναι τοποθετημένη πάνω σε μια πλωτή πλατφόρμα με αλυσοειδή αγκυροβόλια. Οι πλωτές πλατφόρμες με Ανεμογεννήτριες επάνω τους έχουν αποδειχθεί ότι είναι οι πιο οικονομικές για τα μεγάλα βάθη, προσφέρουν απλότητα στο σχεδιασμό και εύκολη εγκατάσταση.

Οι περισσότερες αστάθειες που εμφανίζονται σε μια ανεμογεννήτρια είναι δυναμικές, και οι πιο συνηθισμένες είναι οι αστάθειες των συζευγμένων ιδιομορφών (modes-coupled instabilities). Αυτού του είδους οι αστάθειες απαιτούν δυο ή περισσότερες ιδιομορφές. Δυνάμεις σχετικές με τη μια ιδιομορφή δίνουν ενέργεια στην άλλη κυρίως λόγω της διαφοράς φάσης που εμφανίζεται ανάμεσά τους. Η αυξανόμενη κίνηση της δεύτερης ιδιομορφής ενισχύει τις δυνάμεις στην πρώτη, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο έναν ασταθή κύκλο. (Bir & Jonkman, 2007)

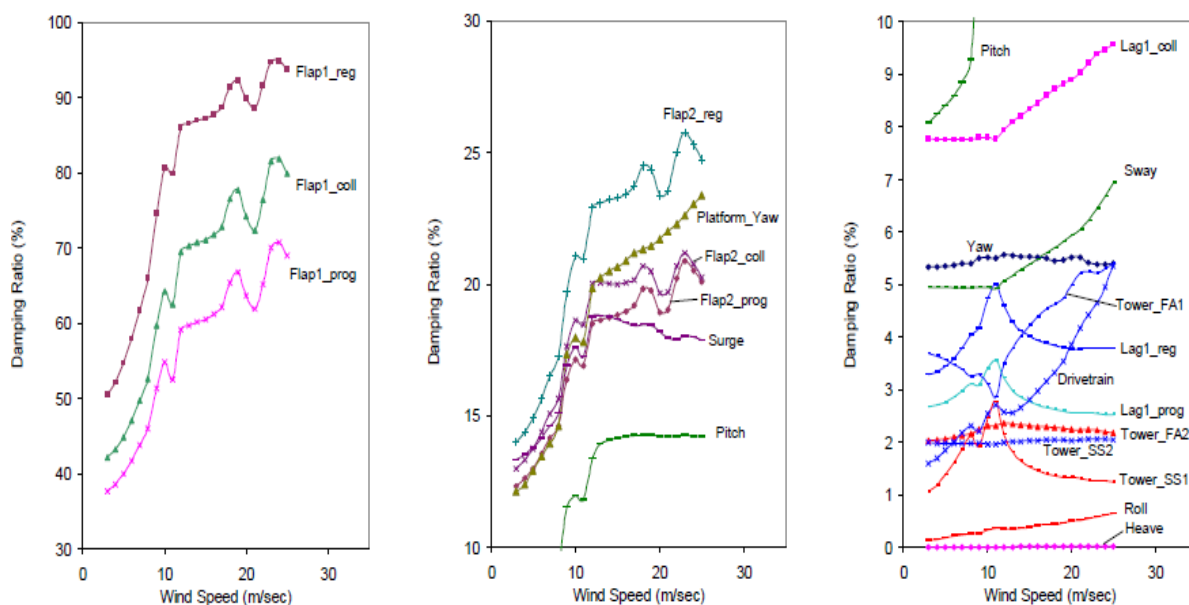
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη γραμμικοποιημένη ανάλυση για τις συγκεκριμένες αστάθειες, είναι τα ακόλουθα:

Κανονική λειτουργία της Α/Γ (ταχύτητα ανέμου 3m/s έως 25m/s)



Εικόνα 64-NREL

Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν τη μεταβολή των φυσικών συχνοτήτων συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Η πρώτη συχνότητα του πύργου για εμπρός-πίσω ταλάντωση (tower 1st fore-aft) και η πρώτη για πλευρική ταλάντωση (tower 1st side-to-side) επηρεάζονται από την ύπαρξη της πλατφόρμας. Για τις ανεμογεννήτριες επί εδάφους η τιμή τους είναι περίπου 0,3Hz ενώ για τις υπεράκτιες είναι 0,55Hz. Οι χαμηλότερες συχνότητες αντιπροσωπεύουν τις ιδιομορφές της πλατφόρμας. Πιο συγκεκριμένα αυτές είναι η ιδιομορφή ταλάντωσης πάνω-κάτω (heave) που εμφανίζει και την υψηλότερη συχνότητα περίπου 0,13H, οι ιδιομορφές περιστροφής (roll), πρόνευσης (pitch) και γωνίας απόκλισης (platform yaw), καθώς και αυτές της πλευρικής (sway) και εμπρός-πίσω ταλάντωσης (surge) που εμφανίζουν την χαμηλότερη συχνότητα 0,008Hz. Οι φυσικές συχνότητες της πλατφόρμας εξαρτώνται από την άνωσή της, από τα συρματόσχοινα που χρησιμοποιούνται ως αγκυροβόλια και την αδράνεια του συστήματος, ενώ μένουν ανεπηρέαστες από την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα.



Εικόνα 65-NREL

Αυτά τα διαγράμματα παρουσιάζουν το λόγο απόσβεσης συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου. Η απόσβεση των ιδιομορφών του ρότορα επηρεάζεται ελάχιστα από την ύπαρξη της πλατφόρμας, ενώ η απόσβεση της πρώτης συχνότητας του πύργου για εμπρός-πίσω ταλάντωση (tower 1st fore-aft) και της πρώτης για πλευρική ταλάντωση (tower 1st side-to-side) επηρεάζεται αισθητά από τη δυναμική αλληλεπίδραση με την πλατφόρμα. Η απόσβεση της πλευρικής ταλάντωσης (tower 1st side-to-side) εμφανίζει υψηλότερα ποσοστά από αυτά για τις ανεμογεννήτριες επί εδάφους, ενώ η απόσβεση της εμπρός-πίσω ταλάντωσης αρκετά χαμηλότερα. Αν και αυτές οι ιδιομορφές είναι ευσταθείς, μειωμένη απόσβεση μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερους κραδασμούς στον πύργο. Όλες οι ιδιομορφές της πλατφόρμας είναι ευσταθείς. Οι ιδιομορφές της περιστροφικής (roll) και της πάνω-κάτω (heave) ταλάντωσης όμως παρουσιάζουν οριακή απόσβεση και γι' αυτό είναι πιο ευαίσθητες σε υψηλούς κραδασμούς. Οι ιδιομορφές της πλευρικής απόκλισης (yaw), της εμπρός-πίσω ταλάντωσης (surge) και της πρόνευσης (pitch) παρουσιάζουν την πιο υψηλή απόσβεση, προφανώς λόγω της σχέσης τους με την ιδιομορφή της εμπρός-πίσω (flap) ταλάντωσης του ρότορα.

Λειτουργία σταθμευμένης ανεμογεννήτριας μη συνδεδεμένης με τη γεννήτρια (ταχύτητα ανέμου 50m/s)

Η ιδιομορφή της πρώτης συχνότητας του πύργου για πλευρική ταλάντωση (tower 1st side-to-side) είναι οριακά ευσταθής και η ιδιομορφή για πλευρική ταλάντωση (roll) της πλατφόρμας ασταθής όταν η γωνία απόκλισης του άξονα είναι 0. Σε αντίθεση με την κανονική λειτουργία η γωνία απόκλισης της πλατφόρμας (platform yaw) παρουσιάζει αστάθεια σε όλες τις γωνίες του άξονα, χωρίς όμως να λαμβάνουμε υπόψη μας την επίδραση των συρματόσχοινων και της κίνησης εκτροπής.

Συμπεράσματα

Το συμπέρασμα είναι ότι κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας το σύστημα της ανεμογεννήτριας και της πλατφόρμας παρουσιάζουν ευστάθεια. Όμως για σταθμευμένη λειτουργία τόσο οι ιδιομορφές της ανεμογεννήτριας όσο και της πλατφόρμας και συγκεκριμένα η γωνία απόκλισης (γ) εμφανίζουν αστάθειες. Αυτές οι αστάθειες εξαρτώνται από το αζιμούθιο του ρότορα και τη γωνιακή θέση του άξονα.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται στις πλωτές ανεμογεννήτριες είναι ότι οι κινήσεις που προκαλούνται από τις καιρικές συνθήκες (άνεμος, κυματισμός θάλασσας) είναι αδύνατο να αποφευχθούν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό οι επιπλέον βαθμοί ελευθερίας λόγω της κίνησης της πλατφόρμας. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται η ώση μειώνεται με αποτέλεσμα να προκαλείται αρνητική απόσβεση στην πρόνευση (pitch) της πλατφόρμας στην περιοχή ταχυτήτων άνω της ονομαστικής. Γι' αυτό και έχει προταθεί η ανάπτυξη ενός περιοδικού συστήματος ελέγχου εσωτερική κατάσταση (state space, SS), το οποίο αξιοποιεί το μεμονωμένο έλεγχο βήματος των πτερυγίων για να βελτιώσει την ισχύ της ανεμογεννήτριας και να μειώσει την κίνηση της πλατφόρμας σε αυτές τις περιοχές ταχυτήτων του ανέμου. Εξετάζονται τρία συστήματα ελέγχου: ένα κλασικό σύστημα ως βάση (collective blade pitch CBP), ένα με έλεγχο εσωτερικής κατάστασης (CBP SS) και ένα σύστημα ελέγχου με ξεχωριστό έλεγχο του βήματος κάθε πτερυγίου (individual blade pitch IBP). Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση είναι ο κώδικας FAST και το MATLAB/Simulink. Η ανεμογεννήτρια η οποία εξετάζεται είναι η γνωστή που έχει αναφερθεί και στις υπόλοιπες δημοσιεύσεις, αυτή των 5 MW.

Η μελέτη εστιάζεται σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής (περιοχή 3), όπου πρέπει να γίνεται ρύθμιση του βήματος των πτερυγίων ώστε να έχουμε πάντα την ονομαστική ισχύ (στην προκειμένη περίπτωση 5 MW). Πρώτος στόχος είναι η μείωση της διακύμανσης της ισχύος λόγω της κίνησης της ανεμογεννήτριας και της πλατφόρμας, που προκαλείται από τα προσπίπτοντα κύματα και τον άνεμο. Δεύτερος στόχος είναι η μείωση της κίνησης της πλατφόρμας και της φόρτισης της ανεμογεννήτριας ώστε να αυξηθεί η διάρκεια ζωής της.

Στην συνέχεια αναλύονται τα τρία συστήματα ελέγχου:

✓ Κλασικό σύστημα ελέγχου (CBP)

Αποτελείται από δυο ανεξάρτητα συστήματα ελέγχου: το σύστημα ελέγχου της ροπής της γεννήτριας και το σύστημα ελέγχου του βήματος των πτερυγίων. Η σχέση της ροπής της γεννήτριας και της ταχύτητας της εξαρτάται από την περιοχή λειτουργίας. Στην περιοχή 2 (ταχύτητα ανέμου μικρότερη της ονομαστικής) η ροπή της γεννήτριας μεταβάλλεται ώστε να έχουμε για κάθε ταχύτητα ανέμου τη μέγιστη δυνατή ισχύ.

Στην περιοχή τρία, όπου το ζητούμενο είναι η διατήρηση της ισχύος στην ονομαστική της τιμή, η σχέση δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T_{Gen} = \frac{P_{Rated}}{n_{Gen} \cdot \omega_{Gen}}$$

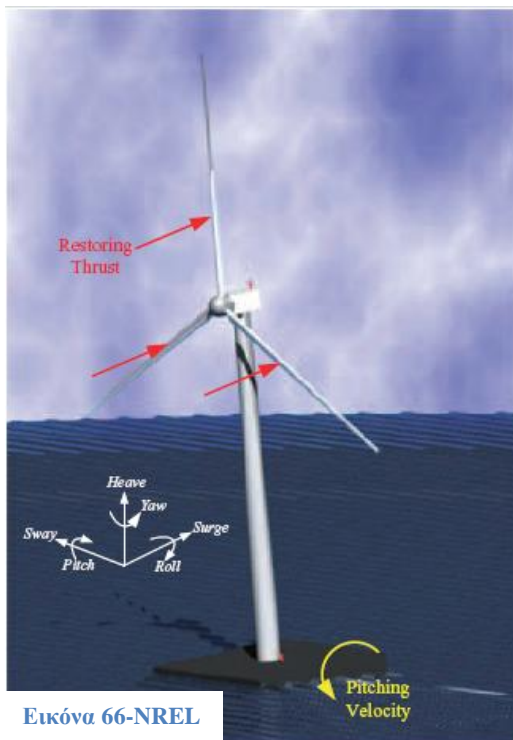
όπου T_{Gen} είναι η ροπή που ασκείται στη γεννήτρια, P_{Rated} η ονομαστική ισχύς, n_{Gen} ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας και ω_{Gen} η ταχύτητα της ανεμογεννήτριας.

✓ Σύστημα με έλεγχο εσωτερικής κατάστασης CBP SS

Αποδείχθηκε ότι επιβάλλοντας σταθερή ροπή στην περιοχή τρία μειώνεται το φορτίο στην ανεμογεννήτρια, βελτιώνεται η ρύθμιση της ταχύτητας αλλά αυξάνεται η διακύμανση της ισχύος. Το αντίθετο συμβαίνει όταν εφαρμόζεται αλγόριθμος για σταθερή ισχύ. Τελικά η χρήση του τελευταίου αλγορίθμου μπορεί να βελτιώσει τη ρύθμιση της ισχύος, ενώ η φόρτιση της ανεμογεννήτριας μπορεί να μειωθεί προσθέτοντας και άλλα συστήματα ελέγχου.

Και τα δυο προηγούμενα συστήματα χρησιμοποιούν συγκεντρωτικό έλεγχο βήματος πτερυγίων.

Όσον αφορά στον έλεγχο της ταχύτητας του δρομέα, θεωρούμε ότι η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε ισορροπία και δέχεται την επίδραση μιας ξαφνικής αύξησης της ταχύτητας του ανέμου. Εξαιτίας αυτής της αύξησης η αεροδυναμική ροπή και η ώση από κάθε πτερυγίο αυξάνεται, γεγονός που προκαλεί και την επιτάχυνση του δρομέα. Γι' αυτό το λόγο το σύστημα ελέγχου πρέπει να αυξήσει το βήμα των πτερυγίων για να μειώσει την αεροδυναμική ροπή και να ρυθμίσει την ταχύτητα του δρομέα.



Εικόνα 66-NREL

Όσον αφορά στην επαναφορά της πρόνευσης (*pitch*) της πλατφόρμας, αυτή επηρεάζεται από την ώση του δρομέα. Θεωρούμε μια ταχύτητα πρόνευσης όπως φαίνεται στην εικόνα (αρνητική σύμφωνα με το σύστημα αξόνων).

Για να διατηρηθεί η ανεμογεννήτρια στη θέση ισορροπίας της, το σύστημα ελέγχου πρέπει να επιβάλλει μια θετική ροπή επαναφοράς στην πρόνευση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας την αεροδυναμική ώση κάθε πτερυγίου. Άρα το βήμα τους πρέπει να μειωθεί.

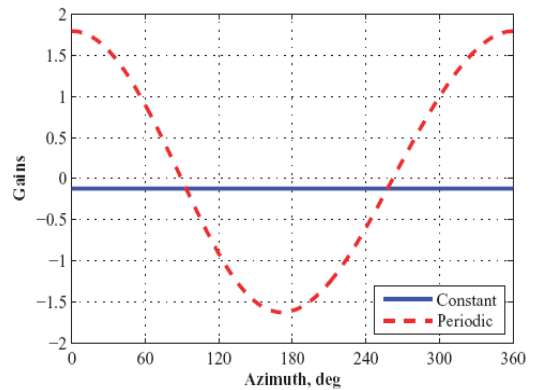
Καθώς το σύστημα ελέγχου μειώνει το βήμα των πτερυγίων, επιταχύνει παράλληλα το δρομέα επιβάλλοντας επιπλέον αεροδυναμική ώση. Αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι καθώς στην ανεμογεννήτρια προκαλείται

αυτή η θετική κίνηση πρόνευσης, η σχετική ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται, επιταχύνοντας ακόμα περισσότερο το δρομέα. Άρα οι δυο στόχοι της ρύθμισης της

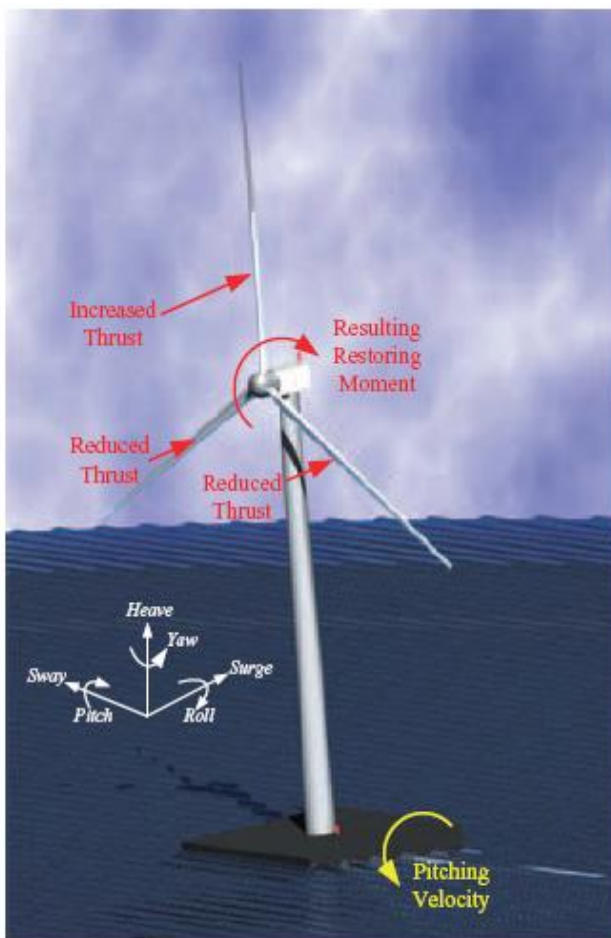
ταχύτητας και της πρόνευσης της πλατφόρμας ανταγωνίζονται για το βήμα των πτερυγίων.

✓ Σύστημα ελέγχου με ξεχωριστό έλεγχο βήματος κάθε πτερυγίου (IBP SS)

Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί περιοδικό έλεγχο. Ο περιοδικός έλεγχος επιτρέπει στο σύστημα ελέγχου να αλλάζει ανάλογα με το αζιμούθιο του δρομέα και το στόχο την εκάστοτε χρονική στιγμή. Επιλέχθηκε ο περιοδικός έλεγχος καθώς αντιλαμβάνεται όλες τις περιοδικότητες του συστήματος της πλωτής ανεμογεννήτριας. Στην εικόνα φαίνεται η διαφορά ανάμεσα στο σύστημα ελέγχου CBP SS και IBP.



Εικόνα 67-NREL



Εικόνα 68-NREL

Το σύστημα IBP δημιουργεί ασύμμετρη αεροδυναμική φόρτιση παράλληλα με τη συμμετρική που προκαλείται, βελτιώνοντας έτσι τη ροπή επαναφοράς της πλατφόρμας. Ο μηχανισμός του μπορεί να εξηγηθεί με τη βοήθεια της διπλανής εικόνας. Το κέρδος είναι αρνητικό για γωνίες αζιμούθιου μεταξύ 90° και 270° (το πτερύγιο δηλαδή βρίσκεται στο κάτω μέρος του δρομέα). Άρα με δεδομένη την αρνητική ταχύτητα πρόνευσης της πλατφόρμας, όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα τα πτερύγια που βρίσκονται στην κορυφή με θετικό κέρδος θα μειώσουν το βήμα τους, αυξάνοντας την ώση. Τα πτερύγια που βρίσκονται στο κάτω μέρος με αρνητικό κέρδος θα αυξήσουν τη γωνία βήματος, μειώνοντας έτσι την ώση. Αυτή η ασύμμετρη αεροδυναμική φόρτιση θα προκαλέσει θετική ροπή επαναφοράς της

Αποτελέσματα

Λόγω των στοχαστικών δεδομένων εισόδου, σε κάθε σύστημα ελέγχου έχει γίνει προσομοίωση με δυο διαφορετικές καταστάσεις ανέμου και κυματισμού.

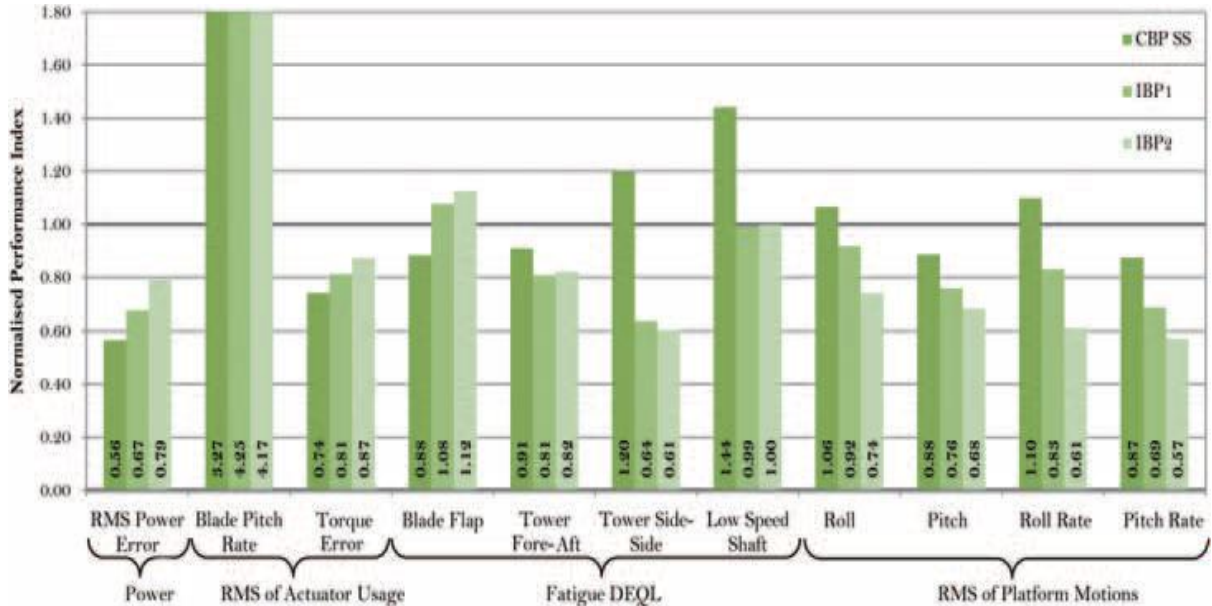
Κατάσταση 1: 18 m/s στοχαστικός άνεμος, 3,25 m ύψος κύματος, 9,7 s περίοδος φάσματος

Κατάσταση 2: 20 m/s στοχαστικός άνεμος, 3,67 m ύψος κύματος, 13,4 s περίοδος φάσματος

Επειδή το σύστημα IBP αυξάνει την περιστροφή της πλατφόρμας (roll) λόγω μια περιοδικής σύζευξης ανάμεσα στη ροπή επαναφοράς της πρόνευσης και σε μια ροπή περιστροφής που προκαλείται από τον περιοδικό έλεγχο των πτερυγίων, προσομοιάζεται με πέντε βαθμούς ελευθερίας, ανάμεσα στους οποίους είναι και η περιστροφή της πλατφόρμας και η πλευρική ταλάντωση του πύργου (side-side).

Αναλύονται και συγκρίνονται δυο συστήματα ελέγχου IBP. Το πρώτο (IBP 1) επικεντρώνεται στη ρύθμιση της ισχύος και το δεύτερο (IBP 2) στη μείωση της κίνησης της πλατφόρμας.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (στον κατακόρυφο άξονα είναι η μέση τιμή από τις δύο καταστάσεις που εξετάστηκαν). Τα συστήματα ελέγχου CBP SS και IBP 1,2 συγκρίνονται με το κλασικό σύστημα ελέγχου που αντιστοιχεί στην τιμή 1.



Εικόνα 69-NREL

✓ CBP SS

Αποδείχθηκε ότι αυτό το σύστημα ελέγχου βελτιώνει τη ρύθμιση της ταχύτητας κατά 35% (δεν παρουσιάζεται στο διάγραμμα). Άμεσο αποτέλεσμα είναι η διακύμανση της ισχύος να μειωθεί κατά 44%. Επίσης η πρόνευση της πλατφόρμας (pitch) και η ταχύτητα πρόνευσης μειώνονται κατά περίπου 12%, γεγονός που εξηγεί τη μείωση στη φόρτιση της εμπρός-πίσω ταλάντωσης του πύργου (fore-aft). Αυτό συμβαίνει γιατί

το σύστημα ελέγχου μεταβάλλει τη γωνία βήματος των πτερυγίων, για να προκαλέσει ροπή επαναφοράς στην πρόνευση της πλατφόρμας. Έτσι εξηγείται και η εμφανής αύξηση του βήματος των πτερυγίων (blade pitching rate). Άμεσο αποτέλεσμα αυτού είναι και της φόρτισης του άξονα χαμηλής ταχύτητας κατά 44%.

Λόγω των πολλών αλλαγών στη γωνία βήματος των πτερυγίων προκαλείται έντονη κίνηση περιστροφής της πλατφόρμας (roll), γεγονός που αυξάνει την φόρτιση στην πλευρική ταλάντωση του πύργου (side-side) κατά 20%. Φαίνεται ότι τα πτερύγια επηρεάζουν την περιστροφή της πλατφόρμας με τον ίδιο τρόπο που επηρεάζουν και την πρόνευση αυτής και το αποτέλεσμα είναι σχεδόν σε φάση. Αυτό σημαίνει ότι όταν το σύστημα ελέγχου προκαλεί ροπή επαναφοράς στην πρόνευση αυξάνοντας την ώση του δρομέα, προκαλεί και ροπή περιστροφής εξαιτίας της ασύμμετρης φόρτισης της ροπής.

Λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω υπόψη είναι εμφανές ότι το σύστημα ελέγχου CBP SS βελτιώνει την απόδοση της ανεμογεννήτριας ειδικά τη ρύθμιση ισχύος και της ταχύτητας του δρομέα, αλλά αυξάνει επίσης και τη φόρτιση σε ορισμένα μέρη του συστήματος.

✓ IBP

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το σύστημα IBP 1 ρυθμίζει καλύτερα την ταχύτητα του δρομέα και άρα την ισχύ, ενώ το IBP 2 μειώνει αισθητά την κίνηση της πλατφόρμας. Τα συστήματα αυτά μπορούν να μειώσουν τη διακύμανση της ισχύος μέχρι 33%. Η περιστροφή της πλατφόρμας (roll) μειώνεται κατά 39% και η πρόνευση (pitch) κατά 43%. Αυτή η εμφανής βελτίωση οφείλεται στον ξεχωριστό έλεγχο βήματος του κάθε πτερυγίου που προκαλεί ασύμμετρες δυνάμεις επαναφοράς. Αυτό εξηγεί και την ακόμα μεγαλύτερη αύξηση στις αλλαγές βήματος των πτερυγίων. Τα συστήματα ελέγχου IBP μειώνουν την φόρτιση στην πλευρική ταλάντωση του πύργου (side-side) κατά 39%. Η φόρτιση στον άξονα χαμηλής ταχύτητας παραμένει σχεδόν ίδια με αυτή του κλασικού συστήματος ελέγχου. Η μείωση της φόρτισης σε αυτά τα μέρη οφείλεται στο ότι ο αντίστοιχος βαθμός ελευθερίας που τα χαρακτηρίζει συμπεριλαμβάνεται στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου.

Τελικά καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το σύστημα IBP με τους πέντε βαθμούς ελευθερίας βελτιώνει αισθητά την απόδοση της ανεμογεννήτριας συγκριτικά με το κλασικό σύστημα ελέγχου και το CBP SS, χωρίς να επηρεάζει άλλα τμήματα της.

Στη συνέχεια ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας των παραπάνω αποτελεσμάτων που δείχνει τη σύγκριση των συστημάτων CBP SS και IBP.

	IBP	CBP SS
Ρύθμιση ισχύος	-33% της διακύμανσης της ισχύος	-44% της διακύμανσης της ισχύος
Κίνηση Πλατφόρμας	-39% της ταχύτητας περιστροφής	+10% της ταχύτητας περιστροφής
	-43% της ταχύτητας πρόνευσης	-13% της ταχύτητας πρόνευσης
Φόρτιση Ανεμογεννήτριας	-39% το φορτίο της πλευρικής (side-side) ταλάντωσης του πύργου	+20% το φορτίο της πλευρικής (side-side) ταλάντωσης του πύργου
	Ίδια φόρτιση άξονα	+44% το φορτίο του άξονα

Ο έλεγχος βήματος των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας, που είναι εγκατεστημένη πάνω σε μια πλωτή πλατφόρμα η οποία στηρίζεται με καμπύλα αλυσοειδή αγκυροβόλια, έχει επίδραση στην πρόνευση (pitch). Εικάζεται ότι η μείωση στην ώση του δρομέα για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής θα οδηγήσει σε αρνητική απόσβεση της πρόνευσης της πλατφόρμας και άρα έντονες κινήσεις όλου του συστήματος.

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως για την προσομοίωση έχει χρησιμοποιηθεί ένα πλήρως συζευγμένο μοντέλο στο πεδίο του χρόνου για να υπολογίζει την απόκριση υπεράκτιων πλωτών ανεμογεννητριών (aero-hydro-servo-elastic response). Η ανάλυση έδειξε ότι η κίνηση πρόνευσης της πλατφόρμας προκαλεί σημαντικά φορτία στην πλωτή ανεμογεννήτρια, μεγαλύτερα από αυτά που εμφανίζονται στις ανεμογεννήτριες επί εδάφους. Τα φορτία που εμφανίζονται είναι χειρότερα στον πύργο από ότι στα πτερύγια εξαιτίας της επίδρασης της αδράνειας στην πρόνευση της πλατφόρμας. Για να αποφευχθεί αυτό υπάρχουν δυο πιθανοί τρόποι σχεδιασμού. Πρώτον μπορεί να ενισχυθεί ο πύργος για να αντέξει αυτή την επιπλέον φόρτιση, κάτι το οποίο μπορεί να μην είναι οικονομικά αποδεκτό. Δεύτερον τροποποιήσεις στο σχεδιασμό μπορούν να βελτιώσουν την απόκριση του πλωτού συστήματος ώστε να μειωθεί η φόρτιση. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι η αύξηση της απόσβεσης προκειμένου να μειωθεί η κίνηση της πρόνευσης. Η απόσβεση μπορεί να εφαρμοσθεί μέσω παθητικών συστημάτων ή ενεργών συστημάτων ελέγχου. (Jonkman J., 2008)

Η ανεμογεννήτρια που έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση είναι η γνωστή NREL 5 MW, η οποία έχει σύστημα ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας (variable-speed) και μεταβλητού βήματος πτερυγίων για μείωση αυτού (blade-pitch-to-feather). Η απόκριση της γεννήτριας χωρίζεται σε πέντε περιοχές: 1 (εκκίνηση), $1^{1/2}$ (μεταβατική περιοχή), 2 (απόδοση βέλτιστης ισχύος), $2^{1/2}$ (μεταβατική περιοχή), 3 (σταθερή ισχύς).

Η πρόνευση της πλατφόρμας μπορεί να θεωρηθεί ως ένας βαθμός ελευθερίας. Η εξίσωση που διέπει την κίνηση αυτή είναι:

$$(I_{Mass} + A_{Radiation}) \cdot \ddot{\xi} + (B_{Radiation} + B_{Viscous}) \cdot \dot{\xi} + (C_{Hydrostatic} + C_{Lines}) \cdot \xi = L_{HH} \cdot T$$

όπου

ξ	η γωνία πρόνευσης	$\dot{\xi}$	η ταχύτητα πρόνευσης
$\ddot{\xi}$	η επιτάχυνση πρόνευσης	T	η αεροδυναμική ώση του δρομέα
B_{Viscous}	η γραμμικοποιημένη απόσβεση που οφείλεται στην τριβή κατά την πρόνευση	A_{Radiation}	προστιθέμενη αδράνεια που οφείλεται στην υδροδυναμική ακτινοβολία στην πρόνευση
I_{Mass}	η αδράνεια πρόνευσης που συνδέεται με τη μάζα της ανεμογεννήτριας και της πλατφόρμας	C_{Lines}	η γραμμικοποιημένη υδροστατική επαναφορά στην πρόνευση που οφείλεται στο σύστημα αγκυροβόλησης
C_{Hydrostatic}	η υδροστατική επαναφορά στην πρόνευση	L_{HH}	το ύψος του πτερυγίου
B_{Radiation}	η απόσβεση που συνδέεται με την υδροδυναμική ακτινοβολία στην πρόνευση		

Αν στην παραπάνω εξίσωση αντικαταστήσουμε την γωνία πρόνευσης ξ με την μετατόπιση του πτερυγίου x έχουμε:

$$\underbrace{\left(\frac{I_{Mass} + A_{Radiation}}{L_{HH}^2} \right)}_{M_x} \cdot \ddot{x} + \underbrace{\left(\frac{B_{Radiation} + B_{Viscous}}{L_{HH}^2} + \frac{\partial T}{\partial V} \right)}_{C_x} \cdot \dot{x} + \underbrace{\left(\frac{C_{Hydrostatic} + C_{Lines}}{L_{HH}^2} \right)}_{K_x} \cdot x = T_0$$

Για τη βελτίωση της απόσβεσης της πρόνευσης της πλατφόρμας έχουν γίνει τρεις διαφορετικές αλλαγές στο σύστημα ελέγχου: α) η πρόσθεση ενός δευτέρου συστήματος ελέγχου βήματος που θα λειτουργεί μέσω ανάδρασης της επιτάχυνσης του πάνω μέρους του πύργου, β) σύστημα ελέγχου για αύξηση της γωνίας βήματος των πτερυγίων (blade-pitch-to-stall), γ) διαφορετικός συντονισμός του κέρδους στο σύστημα ελέγχου για μείωση της γωνίας βήματος (blade-pitch-to-feather).

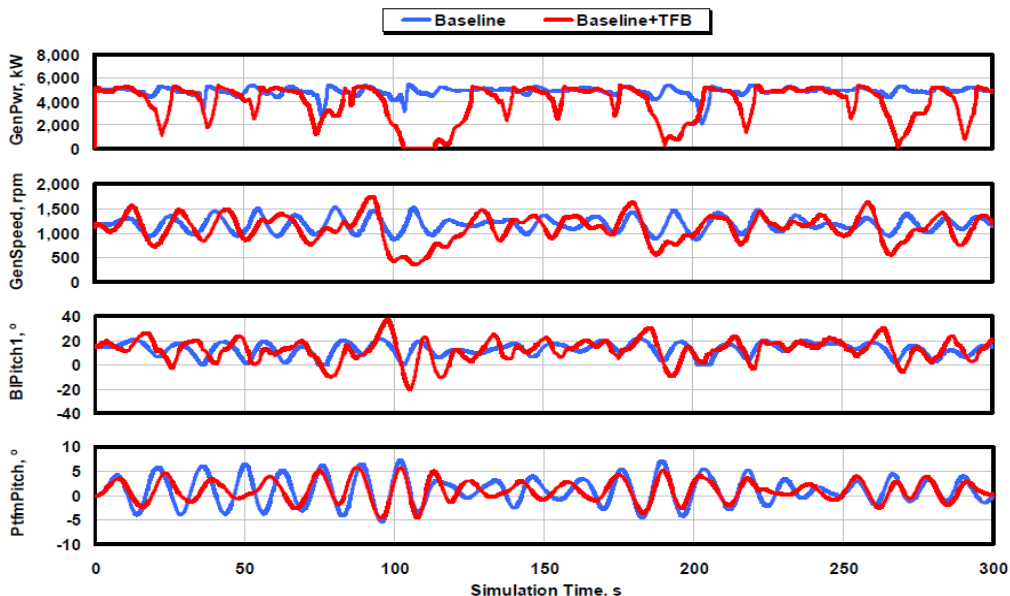
Ανάδραση της επιτάχυνσης του πάνω μέρους του πύργου (feedback of tower-top acceleration)

Σκοπός αυτού του καινούριου συστήματος ελέγχου TFB είναι η αύξηση της αεροδυναμικής ώσης του δρομέα με προσαρμογή του βήματος των πτερυγίων με βάση την επιτάχυνση του πύργου. Σε μια ανεμογεννήτρια με σύστημα ελέγχου για μείωση της γωνίας βήματος (blade-pitch-to-feather), η παράγωγος της ώσης ως προς το βήμα των πτερυγίων, $\partial T/\partial \theta$, είναι αρνητική από την V_{cut-in} έως την $V_{cut-out}$. Άρα η απόσβεση αυξάνεται με ένα θετικό κέρδος. Όταν η παράγωγος αυτή είναι θετική και το κέρδος έχει επιλεχθεί, η αύξηση του λόγου απόσβεσης της πρόνευσης (pitch) της πλατφόρμας δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta \zeta_x = -\frac{K_{Px}}{2\sqrt{K_x M_x}} \left(\frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \quad \text{όπου } K_{Px} \text{ το κέρδος}$$

Στην περιοχή 3 της καμπύλης ισχύος μια μικρή αύξηση του λόγου απόσβεσης $\Delta \zeta_x$ της τάξης του 0,05 απαιτεί κέρδος $K_{Px} = 0,007556 \text{ rad}/(\text{m}/\text{s})$, ενώ μια μεγαλύτερη της τάξης του 0,5 χρειάζεται $K_{Px} = 0,07556 \text{ rad}/(\text{m}/\text{s})$. Μια τόσο μεγάλη αύξηση απαιτεί ρυθμό μεταβολής του βήματος των πτερυγίων της τάξης των $10^\circ - 20^\circ /\text{s}$. Καθώς όμως υπάρχει περιορισμός για το μέγιστο ρυθμό αύξησης του βήματος ίσος με $8^\circ /\text{s}$, μόνο μικρότερες αυξήσεις του λόγου απόσβεσης είναι εφικτές.

Η ακόλουθη εικόνα δείχνει την απόκριση του συστήματος με κέρδος $K_{Px} = 0,07556 \text{ rad}/(\text{m}/\text{s})$, ταχύτητα ανέμου 18 m/s, ύψος κύματος 3,673 m και περίοδο 13,376 s.



Εικόνα 70NREL

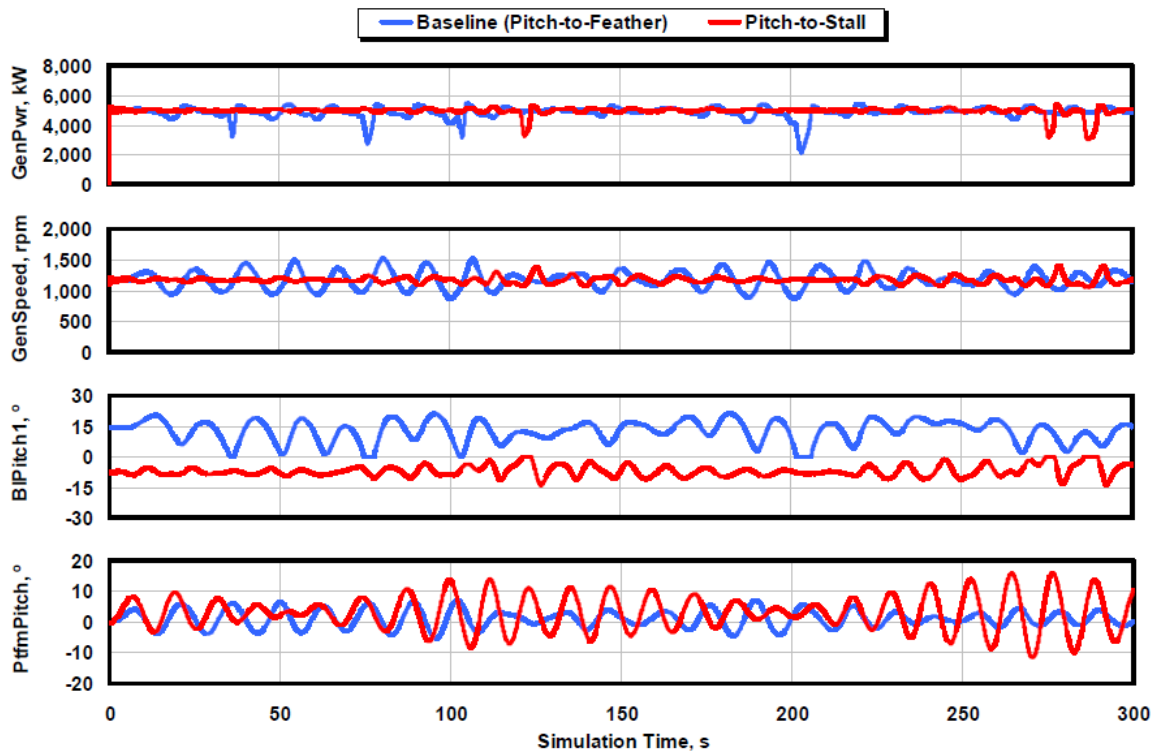
Από το διάγραμμα φαίνεται ότι δεν υπάρχει σημαντική βελτίωση στην απόσβεση της πρόνευσης της πλατφόρμας. Πιο εμφανής είναι η επιδείνωση της διακύμανσης της ταχύτητας της γεννήτριας και της ισχύος. Η σχετική ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη όταν το σύστημα κινείται προς τον άνεμο (από τις μέγιστες στις ελάχιστες γωνίες πρόνευσης). Τότε το σύστημα ελέγχου της ταχύτητας του δρομέα αλλάζει τη γωνία βήματος των πτερυγίων σε πιο θετικές τιμές (feather) για να μειώσει την ισχύ και να ρυθμίσει την ταχύτητα, ενώ το σύστημα TFB αλλάζει τη γωνία των πτερυγίων σε πιο αρνητικές τιμές (stall) για να αυξήσει την ώση και να προκαλέσει απόσβεση. Το αντίθετο συμβαίνει όταν η ανεμογεννήτρια κινείται προσήνεμα. Άρα τα δύο συστήματα ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το βήμα των πτερυγίων. Αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα της γωνίας βήματος (BIPitch), όπου σε πολλές περιπτώσεις το βασικό σύστημα ελέγχου κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση από το TFB.

Σύστημα Ελέγχου για αύξηση της γωνίας βήματος των πτερυγίων(Active Pitch-to-Stall Speed-Control Regulation)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το σύστημα ελέγχου για μείωση της γωνίας βήματος των πτερυγίων (blade-pitch-to-feather) σύστημα ελέγχου μειώνει την ώση του δρομέα αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η απόσβεση της πρόνευσης της πλατφόρμας. Αυτό σημαίνει ότι ένα σύστημα ελέγχου για αύξηση της γωνίας βήματος των πτερυγίων (blade-pitch-to-stall) μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη απόσβεση στην κίνηση πρόνευσης, καθώς η οπισθέλκουσα και άρα και η ώση αυξάνονται με τη μείωση της ισχύος (προκειμένου να ρυθμισθεί η ταχύτητα) κατά την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.

Η παρακάτω εικόνα συγκρίνει αυτά τα δύο συστήματα. Η προσομοίωση έγινε με τα ίδια δεδομένα όπως στην προηγούμενη περίπτωση.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα το σύστημα ελέγχου για αύξηση της γωνίας βήματος των πτερυγίων (blade-pitch-to-stall) ρυθμίζει την ταχύτητα της γεννήτριας και άρα την ηλεκτρική ισχύ πολύ καλά. Παρόλα αυτά δεν προκαλεί την αναμενόμενη απόσβεση στην πρόνευση της πλατφόρμας, αντίθετα την αυξάνει κιόλας. Ένας τρόπος για να αυξηθεί η απόσβεση με τη χρήση αυτού του συστήματος είναι η προσαρμογή των συντελεστών της αεροτομής έτσι ώστε να αυξάνεται η ώση του δρομέα με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου στη περιοχή 3.



Εικόνα 71-NREL

Μια πρόταση θα ήταν το σύστημα TFB και αυτό που μόλις εξετάσθηκε να συνδυαστούν ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόσβεση στην πρόνευση της πλατφόρμας. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι εφικτό γιατί τα δυο αυτά συστήματα δεν μπορούν να λειτουργήσουν μαζί για δυο λόγους. Πρώτον η παράγωγος της ώσης ως προς το βήμα του πτερυγίου αλλάζει πρόσημο στο ενδιαμέσο της περιοχής 3, γεγονός που σημαίνει ότι και το κέρδος του συστήματος TFB πρέπει να αλλάξει πρόσημο στην ίδια περιοχή. Διαφορετικά το σύστημα TFB θα μειώνει την απόσβεση της πρόνευσης σε συγκεκριμένες περιοχές λειτουργίας. Δεύτερον το μέγεθος της παραγωγού της ώσης ως προς το βήμα είναι αρκετά μικρότερο για το σύστημα που αυξάνει τη γωνία βήματος των πτερυγίων (blade-pitch-to-stall) από ότι για αυτό που τη μειώνει (blade-pitch-to-feather). Αυτό σημαίνει ότι το ένα δε θα μπορεί να προσφέρει σημαντική απόσβεση στην πρόνευση χωρίς μεγάλα κέρδη με αποτέλεσμα να αντικρούεται με τους περιορισμούς για το ρυθμό μεταβολής της γωνίας βήματος των πτερυγίων.

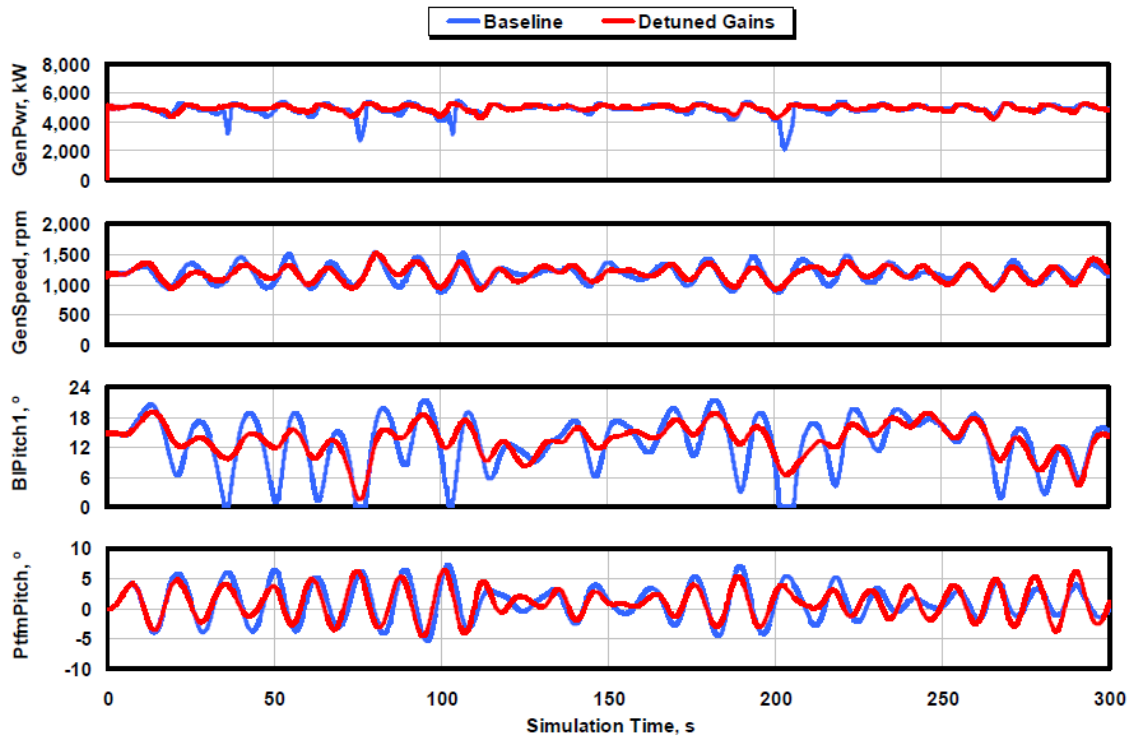
Αλλαγή στο συντονισμό του κέρδους του συστήματος ελέγχου (Detuning the Gains in the Pitch-to-Feather Controller)

Αυτή ήταν η πιο απλή τροποποίηση που έγινε στο σύστημα ελέγχου που αυξάνει τη γωνία βήματος των πτερυγίων (blade-pitch-to-stall) με απλή μείωση του κέρδους. Για την προσομοίωση θεωρήθηκε φυσική συχνότητα του συστήματος ελέγχου $\omega_{\phi n} = 0,4$ rad/s και λόγος απόσβεσης $\zeta_{\phi} = 0,7$.

Προτεινόμενη τιμή για τη συχνότητα ήταν $\omega_{\phi n} = 0,6$ rad/s η οποία είναι λίγο μεγαλύτερη από τη φυσική συχνότητα πρόνευσης της πλατφόρμας $\omega_{xn} = 0,5420$ rad/s. Αυτή η σχέση ανάμεσα στις συχνότητες μπορεί να προκαλέσει αρνητική απόσβεση

στην πρόνευση. Οι Larsen και Hanson ότι η μικρότερη φυσική συχνότητα του συστήματος ελέγχου πρέπει να είναι χαμηλότερη από τη μικρότερη κρίσιμη φυσική συχνότητα της κατασκευής ώστε να υπάρχει πάντα θετική απόσβεση στις κινήσεις της υπεράκτιας πλατής ανεμογεννήτριας.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει την απόκριση του συστήματος.



Εικόνα 72-NREL

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα αυτό το σύστημα ελέγχου μειώνει σε ένα βαθμό την πρόνευση (pitch) της πλατφόρμας. Αυτό το επιτυγχάνει χωρίς να επιδρά αρνητικά στην ισχύ και την ταχύτητα του δρομέα. Στην πραγματικότητα μειώνει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις διακυμάνσεις τους. Έχει αποδειχθεί όμως ότι υπάρχει ανώτερο όριο στην βελτίωση της απόσβεσης της πρόνευσης της πλατφόρμας μέσω αλλαγής του κέρδους του συστήματος ελέγχου της τάξης του 13%. Με περαιτέρω μείωση του κέρδους επηρεάζεται αρνητικά η διακύμανση της ισχύος και της ταχύτητας του δρομέα.

Τελικά αποδείχθηκε ότι ούτε με ρύθμιση μέσω της ανάδρασης της επιτάχυνσης του πάνω μέρους του πύργου, ούτε με την μετατροπή του συστήματος ελέγχου για αύξηση της γωνίας βήματος των πτερυγίων (blade-pitch-to-stall) υπάρχει ικανοποιητική βελτίωση στην κίνηση πρόνευσης της πλατφόρμας. Τέλος η μείωση του κέρδους στο σύστημα ελέγχου για μείωση της γωνίας βήματος των πτερυγίων (blade-pitch-to-feather) βελτιώνει αρκετά αλλά δεν επιλύει πλήρως το πρόβλημα.

Υπάρχει η δυνατότητα βελτίωσης της ταχύτητας του δρομέα και της πρόνευσης της πλατφόρμας μέσω ενός ενιαίου συστήματος ελέγχου της ροπής της γεννήτριας και του βήματος των πτερυγίων. Επειδή η ρύθμιση της ταχύτητας του δρομέα απαιτεί αλλαγή του βήματος των πτερυγίων αντίθετη από αυτή που απαιτεί η απόσβεση της

πρόνευσης της πλατφόρμας, μπορεί να είναι δυνατή η δημιουργία ενός συνδυασμένου συστήματος ελέγχου ροπής της γεννήτριας και βήματος των πτερυγίων προκειμένου να επιτευχθούν και οι δύο στόχοι ταυτόχρονα. Ο έλεγχος της ροπής της γεννήτριας μπορεί να αμβλύνει τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του δρομέα, ενώ ο έλεγχος βήματος θα αυξήσει την αεροδυναμική ώση του δρομέα και θα προκαλέσει απόσβεση της κίνησης. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα ο έλεγχος του βήματος των πτερυγίων να συμβάλλει και στην απόσβεση της περιστροφής (roll) της πλατφόρμας.

Άλλες μέθοδοι βελτίωσης της απόσβεσης της πρόνευσης

Έχουν προταθεί κι άλλες μη συμβατικές μέθοδοι βελτίωσης της απόκρισης του συστήματος, ορισμένες από τις οποίες είναι οι ακόλουθες:

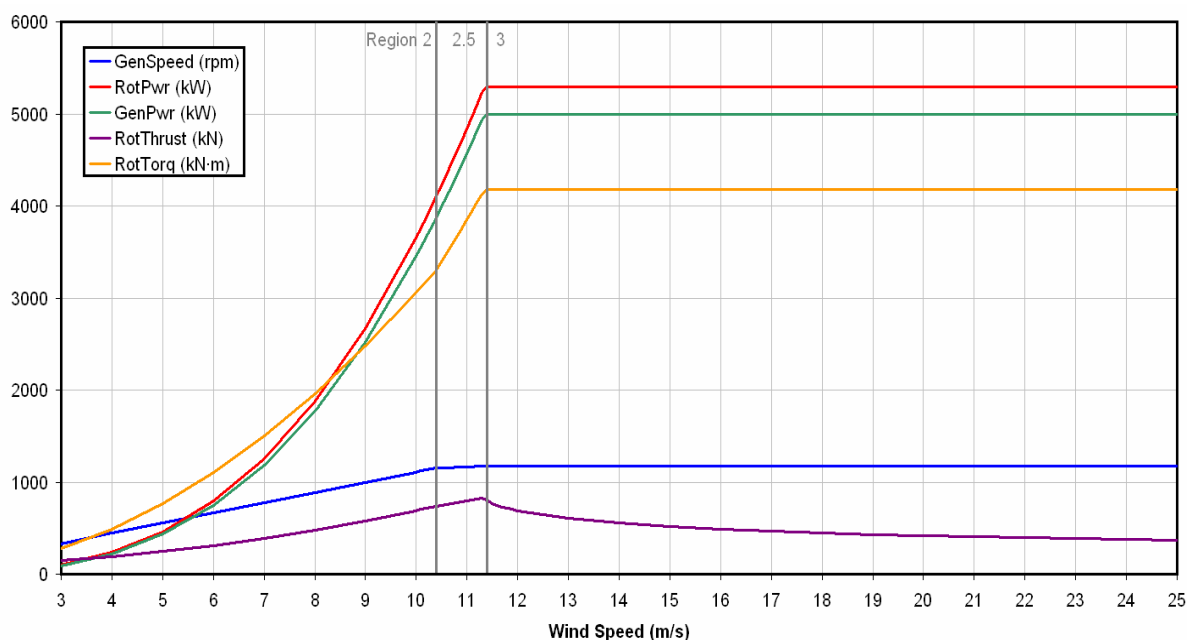
- Στην περιοχή 3 της καμπύλης ισχύος, όπου η ανεμογεννήτρια λειτουργεί στην ονομαστική της ισχύ, δεν υπάρχει δυνατότητα απορρόφησης κι άλλης ενέργειας. Αν όμως ρυθμισθεί η ισχύς σε μια τιμή κάτω της ονομαστικής θα μπορεί η ανεμογεννήτρια να απορροφά ενέργεια όχι μόνο από τον αέρα αλλά και από τον κυματισμό.
- Η ενεργοποίηση της γωνιακής απόκλισης (nacelle-yaw) αντί για τον έλεγχο βήματος για τη ρύθμιση της ταχύτητας του δρομέα μπορεί να μειώσει το πρόβλημα που προκαλείται από τη πτώση της ώσης του δρομέα. Πρέπει όμως να μελετηθεί αν η γυροσκοπική ροπή που προκαλείται έχει ανεπιθύμητες συνέπειες.
- Μια άλλη μέθοδος θα ήταν η μετατροπή της περιοχής 3 από σταθερής ισχύος σε σταθερής ροπής. Έχει αποδειχθεί όμως ότι αυτό μειώνει μόνο τη διακύμανση της ταχύτητας του δρομέα και όχι και την κίνηση πρόνευσης της πλατφόρμας.

Στην πορεία παρουσιάζεται μια πλήρως συζευγμένη δυναμική ανάλυση μιας πλωτής ανεμογεννήτριας, μέσω παραμετρικής σχεδίασης αυτής και του συστήματος αγκυροβόλησης. Πρόκειται για μια ανεμογεννήτρια των 5 MW αγκυροβολημένη στον πυθμένα της θάλασσας είτε με κάθετα τεντωμένα είτε με καμπύλα αλυσοειδή συρματόσχοινα. Σύμφωνα με τα μέτωπα Pareto οι βέλτιστες κατασκευές είναι η χρήση έρματος ώστε να κατέβει χαμηλότερα το κέντρο βάρους και η χρήση πλατφόρμας. Η επιλογή αυτών των συστημάτων βασίζεται στο ότι παρουσιάζουν βέλτιστο συνδυασμό επιτάχυνσης της νασέλλας, τάσης στα σχοινιά του συστήματος αγκυροβόλησης και εκτοπίσματος της πλατφόρμας. Σημαντικοί παράγοντες για το σχεδιασμό του πλωτήρα της ανεμογεννήτριας είναι ο βέλτιστος συνδυασμός σχήματος και μεγέθους, η ποσότητα έρματος και οι ιδιότητες του συστήματος αγκυροβόλησης ώστε να διατηρούνται οι αποκρίσεις του πλωτήρα και η επιτάχυνση του κλωβού εντός αποδεκτών ορίων και το κόστος εγκατάστασης χαμηλό.

Ο παραμετρικός σχεδιασμός του πλωτήρα μπορεί να περιγραφεί ως ένας σκυρόδετος κύλινδρος. Αποτελείται από ένα χαλύβδινο κύλινδρο ο οποίος προσφέρει άνωση στη ανεμογεννήτρια. Επιπλέον έρμα τοποθετείται στο κάτω μέρος του κυλίνδρου για να επιτευχθεί ευστάθεια στην πλευστότητα κατά την πρόνευση (pitch) και την περιστροφή (roll) με την ανεμογεννήτρια εγκατεστημένη επάνω του πριν τη σύνδεση με το σύστημα αγκυροβόλησης. Αυτού του είδους ο παραμετρικός σχεδιασμός καλύπτει ένα μεγάλο εύρος πλωτήρων από αυτούς που βασίζονται στην ίσαλο επιφάνεια, αυτούς που βασίζονται στο έρμα, μέχρι αυτούς που η επαναφορά παρέχεται από κάθετα τεντωμένα συρματόσχοινα (TLP). (Sclavounos, Tracy, & Lee, 2007)

Η γεωμετρία του πλωτήρα ορίζεται από την ακτίνα του κυλίνδρου και το 'βύθισμα'. Το σύστημα αγκυροβόλησης ορίζεται από το βάθος του νερού, την τάση στα συρματόσχοινα και τη γωνία ανάμεσα στη ελεύθερη επιφάνεια και την καμπύλη που σχηματίζουν τα συρματόσχοινα. Σταθερά της ανάλυσης είναι η ταχύτητα του ανέμου στα 11 m/s, η οποία παράγει τη μέγιστη ώση και ροπή στο σύστημα της ανεμογεννήτριας.

Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει τη χαρακτηριστική διαφόρων μεγεθών σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 73-NREL

Η ανάλυση του πλωτού συστήματος χωρίζεται σε τρία τμήματα. Στο σύστημα αγκυροβόλησης, στο οποίο οι τάσεις και τα μητρώα επαναφοράς υπολογίζονται με τη βοήθεια του προγράμματος LINES. Στον πλωτήρα, όπου οι υδροδυναμικοί συντελεστές και οι δυνάμεις διέγερσης υπολογίζονται από τον πρόγραμμα WAMIT. Και τέλος στην ανεμογεννήτρια των 5 MW της οποίας την δυναμική απόκριση υπολογίζουμε με τον FAST. Η γραμμική δυναμική ανάλυση του πλήρως συζευγμένου συστήματος έχει γίνει στο πεδίο των συχνοτήτων.

Ένα σημαντικό μέγεθος για την αξιολόγηση της ανεμογεννήτριας είναι η κίνηση της νασέλλας. Μεγάλες κινήσεις αυτής μπορούν να προκαλέσουν υποβάθμιση της απόδοσης της ανεμογεννήτριας και φθορά στα υπόλοιπα μέρη του συστήματος σε περιπτώσεις ακραίων κυμάτων. Γι' αυτό είναι άκρως απαραίτητο να διατηρηθεί η επιτάχυνση της νασέλλας σε όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές. Κατά τον υπολογισμό της τάσης στο σύστημα αγκυροβόλησης είναι σημαντικό να γνωρίζουμε κάθε στιγμή την απόκλιση της από τη μέση τιμή. Ένα επίσης σημαντικό μέγεθος είναι η διαφορά ανάμεσα στο βύθισμα της προσήνεμης πλευράς της πλωτής κατασκευής και της τοπικής ελεύθερης επιφάνειας του κύματος για να αποφευχθεί χτύπημα της κατασκευής στον πυθμένα.

Ορισμένοι περιορισμοί που επιβλήθηκαν είναι οι ακόλουθοι:

- Γωνία πρόνευσης μικρότερη από 10°
- Για κλίση της κατασκευής λιγότερη από 10° κατά τη λειτουργία, ο συντελεστής επαναφοράς της πρόνευσης πρέπει να είναι τουλάχιστον $4,2 \cdot 10^8 \text{ Nm/rad}$
- Η στατική και δυναμική τάση που ασκείται στο σύστημα αγκυροβόλησης δεν πρέπει να ξεπερνά το σημείο θραύσης των συρματόσχοινων, με ένα συντελεστή ασφαλείας 2.
- Τα συρματόσχοινα δεν πρέπει να χάνουν την τάση τους καθώς μπορεί να αστοχήσουν σε περιπτώσεις μειωμένου φορτίου
- Η ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας δεν πρέπει να πέφτει σε επίπεδο χαμηλότερο από το κάτω μέρος της κατασκευής κατά τη λειτουργία της.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα συστήματα αγκυροβόλησης που εξετάζονται είναι δύο, με κάθετα τεντωμένα συρματόσχοινα (tension leg platforms TLPs) τα οποία προσφέρουν σταθερότητα κατά την πρόνευση (pitch) και την περιστροφή (roll), και με καμπύλα συρματόσχοινα (slack catenaries) τα οποία προσφέρουν μικρή επαναφορά στην εμπρός-πίσω ταλάντωση (surge), στην πρόνευση και στην περιστροφή.

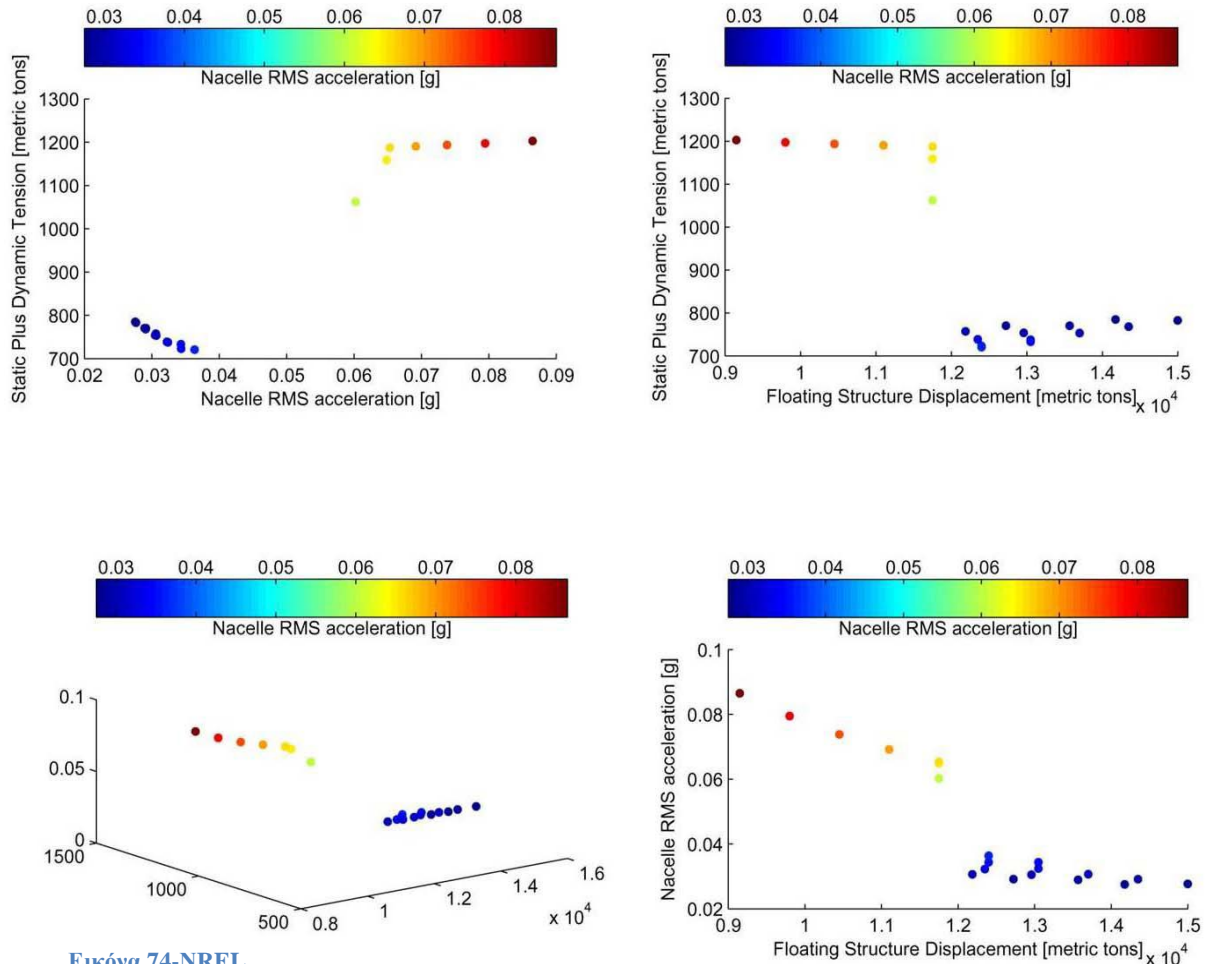
Το βύθισμα της πλωτής κατασκευής βρίσκεται ανάμεσα σε δύο και πενήντα μέτρα. Η ακτίνα του κυλίνδρου κυμαίνεται μεταξύ τέσσερα και είκοσι-δυο μέτρα. Ο όγκος της κατασκευής έχει περιοριστεί ανάμεσα σε 2.000 και 15.000 κυβικά μέτρα. Για κάθε τύπο αγκυροβόλησης εξετάστηκαν 777 τύποι κυλίνδρων.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα μέτωπα Pareto για ορισμένες από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Σχεδιασμός TLP: βάθος 200 m

Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα, αυξανόμενου του εκτοπίσματος της κατασκευής μειώνεται η επιτάχυνση του κλωβού. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο καθώς μια μεγαλύτερη κατασκευή έχει χαμηλότερη φυσική συχνότητα. Στην εμπρός-πίσω ταλάντωση (surge) η φυσική συχνότητα της TLP είναι γενικά χαμηλότερη από τα peaks που παρουσιάζονται στο φάσμα της κατάστασης της θάλασσας. Επομένως

μειώνοντας τη φυσική συχνότητα της εμπρός-πίσω ταλάντωσης μειώνεται και η επικάλυψη των δυο αυτών συχνοτήτων με αποτέλεσμα να μειώνεται και η επιτάχυνση της νασέλλας. Αυτό συμβαίνει καθώς αυξάνεται το βάθος της θάλασσας. Επίσης παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές στην επιτάχυνση της νασέλλας εμφανίζονται για υψηλότερες τιμές στην τάση.



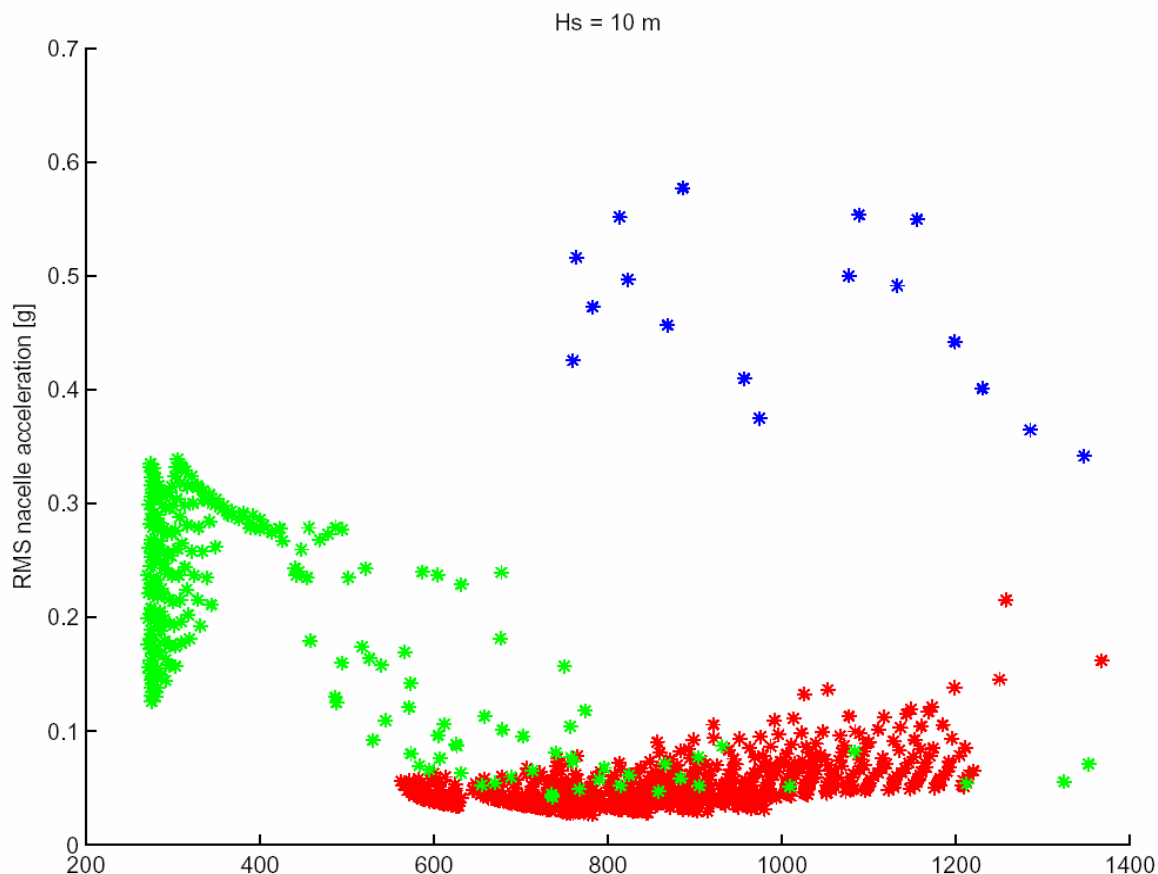
Εικόνα 74-NREL

Με βάση τους διάφορους τύπους κυλίνδρων που εξετάστηκαν διαπιστώθηκε ότι οι τιμές της τάσης είναι υψηλότερες για τις πλατφόρμες μεγάλο μέρος των οποίων βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια (shallow draft barge) από ότι για τα συστήματα που βασίζονται στο έρμα (spar).

Σχεδιασμός με καμπύλα συρματόσχοινα: βάθος 200 m

Αντίστοιχα είναι και τα διαγράμματα για αυτό το σύστημα αγκυροβόλησης. Μια σημαντική διαφορά είναι ότι εδώ οι υψηλότερες τιμές της τάσης στα συρματόσχοινα εμφανίζονται για το σύστημα που βασίζεται στο έρμα. Αυτό συμβαίνει επειδή αυτού του είδους τα συστήματα όταν αγκυροβολούνται με καμπύλα συρματόσχοινα παρουσιάζουν αυξημένη πάνω-κάτω ταλάντωση συγκριτικά με την πλατφόρμα η οποία αυξάνει και το φορτίο σε αυτά.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα των μετώπων Pareto για ύψος κύματος 10 m.



Κόκκινο: TLP, Πράσινο: Καμπύλα Συρματόσχοινα, Μπλε: Τεντωμένα Συρματόσχοινα

Εικόνα 75-NREL

Όπως φαίνεται από το σχήμα το σύστημα TLP οδηγεί σε χαμηλότερες επιταχύνσεις της νασέλλας, καθώς η φυσική συχνότητα της εμπρός-πίσω ταλάντωσης (surge) είναι χαμηλότερη από τη συχνότητα της θάλασσας. Ορισμένα από τα συστήματα με καμπύλα συρματόσχοινα παρουσιάζουν και χαμηλή επιτάχυνση της νασέλλας και χαμηλή τάση. Αυτού του είδους οι πλωτήρες επιτυγχάνουν ευστάθεια μέσω της ίσαλου επιφάνειας, άρα το σύστημα αγκυροβόλησης συμβάλλει λιγότερο στην ακαμψία. Αξιοσημείωτο είναι ότι υπάρχει μια επικάλυψη ανάμεσα στα TLP και στα καμπύλα συρματόσχοινα, γεγονός που καθιστά την επιλογή του συστήματος αγκυροβόλησης να εξαρτάται από άλλους παράγοντες όπως το κόστος.

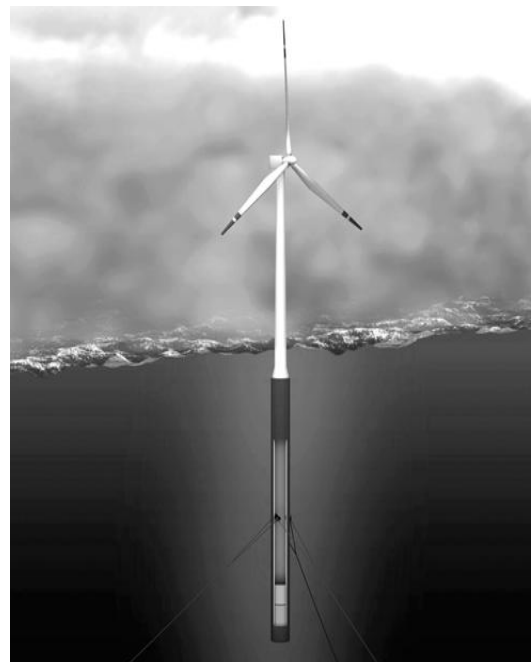
Το κόστος είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τη βιωσιμότητα ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Υπάρχει σημαντικό οικονομικό όφελος κατά την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας στον πλωτήρα, ενώ βρίσκεται ακόμη στη στεριά συγκριτικά με την εγκατάσταση της κατευθείαν στη θάλασσα. Σημαντικοί παράγοντες για το κόστος είναι το βάρος του πλωτήρα και η τάση που ασκείται στις άγκυρες.

2.1.4 Το HYWIND project

Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες έχουν εγκατασταθεί σε ρηχά νερά με πυλώνες πακτωμένους στον πυθμένα ή με συστήματα βασιζόμενα στη βαρύτητα. Τέτοιου είδους εγκαταστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βάθη έως 20 m. Σε μεγαλύτερα βάθη μπορεί να προκύψουν προβλήματα με τις φυσικές συχνότητες του συστήματος. Η μεγαλύτερη πρόκληση είναι ο συνδυασμός της ευστάθειας, της κίνησης σε αποδεκτά όρια, του συστήματος αγκυροβόλησης και του χαμηλού κόστους. (Skaare, και συν., 2007)

Το HYWIND project είναι η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια σε φυσικό μέγεθος που έχει εγκατασταθεί πειραματικά για να υπολογισθεί η απόκριση ενός τέτοιου συστήματος.

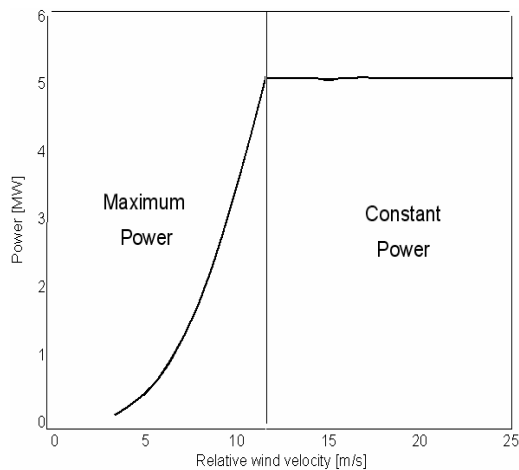
Στη διπλανή εικόνα φαίνεται το HYWIND, το οποίο είναι μια λύση για την εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε μεγάλα βάθη. Το βυθισμένο τμήμα της κατασκευής (hull) είναι κατασκευασμένο από σκυρόδεμα ή χάλυβα. Στην κορυφή του είναι τοποθετημένος ένας χαλύβδινος πύργος. Το σύστημα αγκυροβολείται με τρία συρματόσχοινα από χαλύβδινο σύρμα. Η ανεμογεννήτρια έχει ισχύ 5 MW και τα χαρακτηριστικά της είναι ίδια με αυτά που έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες δημοσιεύσεις. Το HYWIND έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε όλες οι ιδιομορφές της κίνησης που προκαλούνται από τον κυματισμό να έχουν φυσική συχνότητα έξω από τη συχνότητα των κυμάτων.



Εικόνα 76-HYWIND

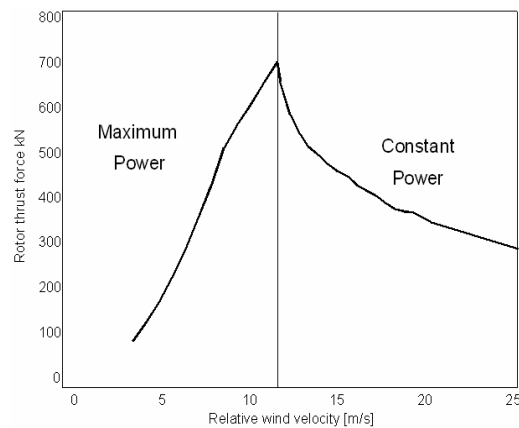
Παράλληλα η επαναφορά από την πρόνευση είναι τέτοια ώστε η εμπρός-πίσω ταλάντωση (tilt) να είναι αρκετά μικρή. Επιπλέον ο λόγος ανάμεσα στις φυσικές συχνότητες της πάνω-κάτω ταλάντωσης (heave) και της πρόνευσης (pitch) είναι τέτοιος ώστε να αποφεύγονται οι αστάθειες που σχετίζονται με το Mathieu. Το σύστημα αγκυροβόλησης είναι έτσι κατασκευασμένο ώστε να επιτυγχάνει την απαιτούμενη ακαμψία στην πλευρική απόκλιση (yaw).

Τα συστήματα ελέγχου των ανεμογεννητριών μπορούν να ενισχύσουν ή να αποσβέσουν την κίνηση της πλωτής ανεμογεννήτριας που προκαλείται από τον κυματισμό της θάλασσας. Η ενίσχυση είναι αποτέλεσμα της μεταβλητής γωνίας βήματος των πτερυγίων για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής και μπορεί να μειώσει αισθητά τη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας. Η απόσβεση συνεπάγεται αφαίρεση ενέργειας από το κύμα.



Εικόνα 77-HYWIND

Ο λόγος της ασταθούς δυναμικής συμπεριφοράς μιας πλωτής ανεμογεννήτριας με το κλασικό σύστημα ελέγχου φαίνεται στα δυο ακόλουθα διαγράμματα. Το διπλανό δείχνει την ισχύ συναρτήσει της σχετικής ταχύτητας του ανέμου, όπου το φορτίο διατηρείται σταθερό για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής (11,7 m/s) με αλλαγή του βήματος πτερυγίων.



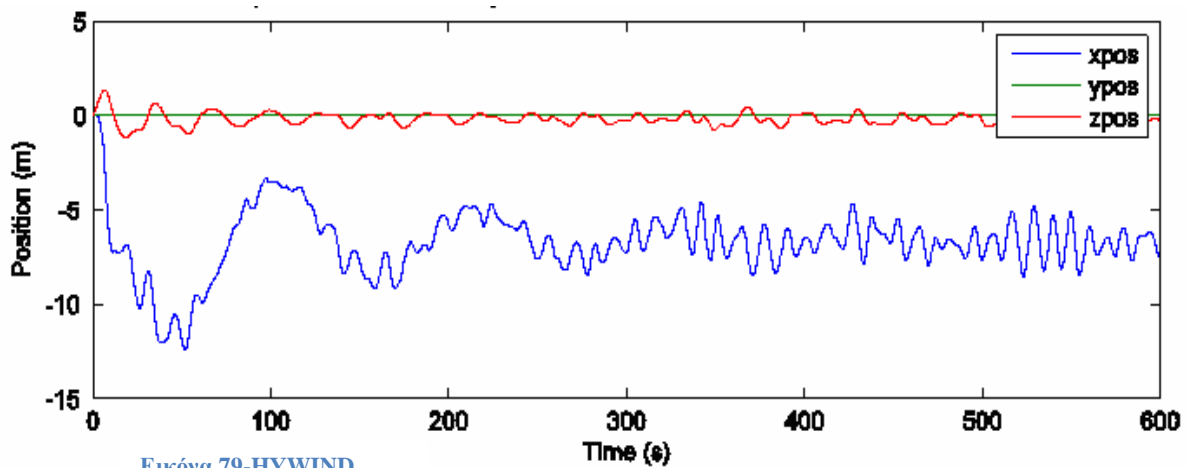
Εικόνα 78-HYWIND

Το διπλανό διάγραμμα, που δείχνει την ώση στο δρομέα, αποδεικνύει ότι η αλλαγή του βήματος των πτερυγίων προκαλεί αρνητική απόσβεση για ταχύτητες ανέμου άνω της ονομαστικής.

Για την προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε σε αυτή τη δημοσίευση χρησιμοποιήθηκαν σε συνεργασία οι κώδικες SIMO/RIFLEX/HAWC2. Τα προγράμματα αυτά μοντελοποιούν ξεχωριστά μέρη της πλωτής ανεμογεννήτριας. Ο δρομέας και ο κλωβός μοντελοποιούνται από το HAWC2 ενώ το σύστημα αγκυροβόλησης και το βυθισμένο τμήμα της κατασκευής (hull) από το SIMO/RIFLEX. Και τα δυο πρέπει να έχουν ένα κοινό σημείο αναφοράς, το οποίο πρέπει να είναι μέρος του συστήματος, και το οποίο εξαρτάται από το χρήστη αν θα το τοποθετήσει στην επιφάνεια της θάλασσας ή σε κάποιο άλλο μέρος.

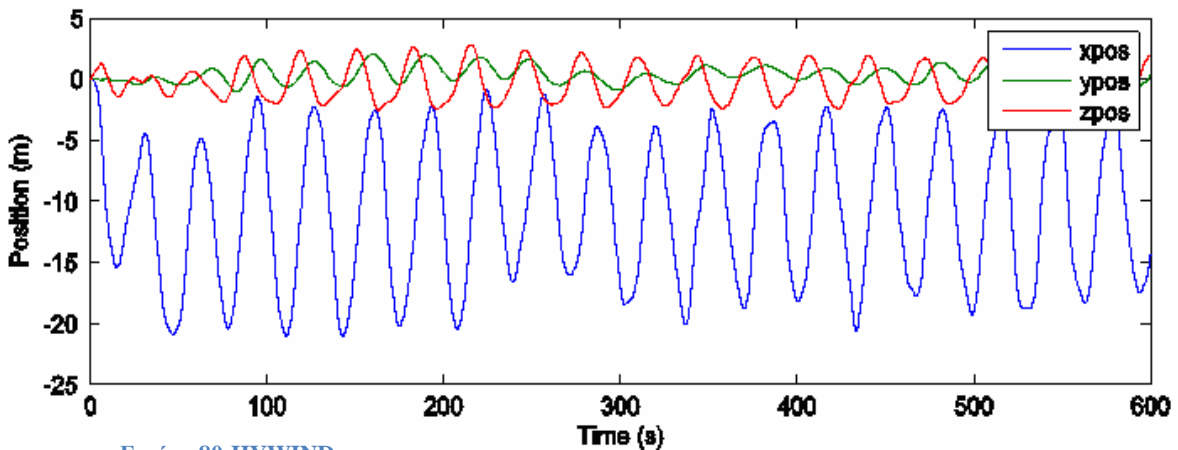
Στη συνέχεια έγιναν ορισμένες δοκιμές προκειμένου να ελεγχθεί η συνεργασία των δυο προγραμμάτων και να επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

Η απόκριση της κίνησης για το πλήρως συζευγμένο σύστημα με τη συνδυασμένη λειτουργία των δυο προγραμμάτων φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα.



Εικόνα 79-HYWIND

Το παραπάνω διάγραμμα είναι για λειτουργία με ταχύτητα ανέμου μικρότερη της ονομαστικής (6 m/s), ύψος κύματος 5 m και περίοδο 12 s.



Εικόνα 80-HYWIND

Αυτό το διάγραμμα είναι για λειτουργία με ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής (18 m/s), ένταση τύρβης 20%, ύψος κύματος 5 m και περίοδο 12 s. Είναι εμφανής η διαφορά στην απόκριση των δυο περιπτώσεων, εξαιτίας της αρνητικής απόσβεσης που δημιουργεί η ανεμογεννήτρια. Στο πρώτο διάγραμμα παρατηρούμε πλήρη απόσβεση της εμπρός-πίσω ταλάντωσης (surge). Στο δεύτερο διάγραμμα βλέπουμε μια οριζόντια κίνηση στην φυσική συχνότητα της πρόνευσης.

Έγιναν πειράματα υπό κλίμακα για να αξιολογηθούν τα χαρακτηριστικά της κίνησης του HYWIND όταν υπόκειται στα συζευγμένα φορτία του ανέμου και του κυματισμού.

Τα πειράματα του υπό κλίμακα μοντέλου επικεντρώνονται στα ακόλουθα:

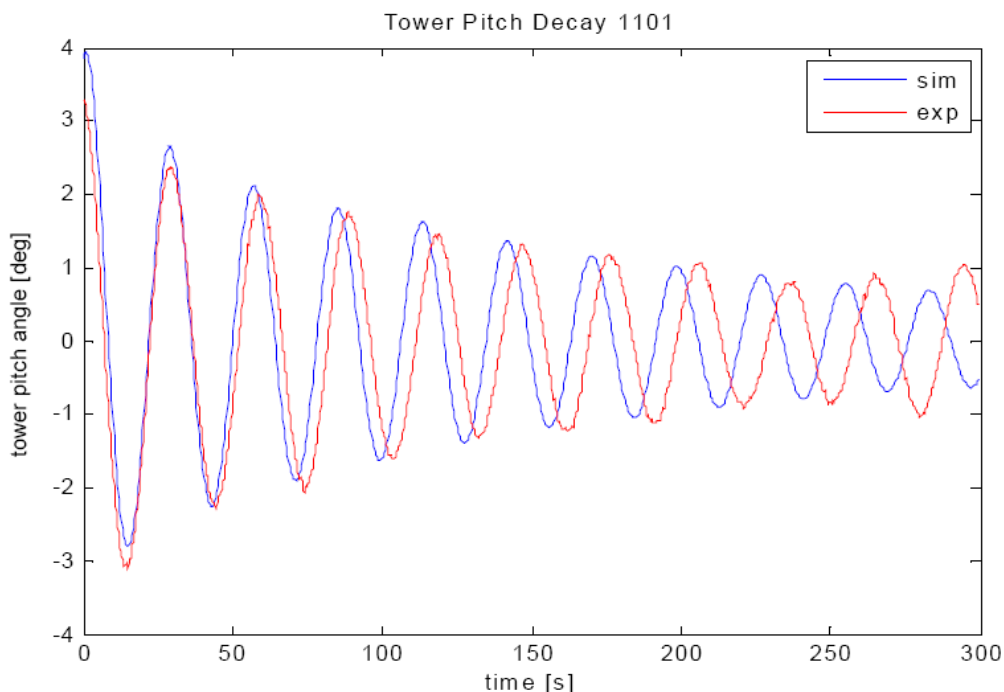
- Συμπεριφορά κατά τη διάρκεια συνθηκών κυματισμού εκατονταετίας
- Συμπεριφορά για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής
- Συμπεριφορά με μέσες συνθήκες κυματισμού και ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής

Το σύστημα ελέγχου που εφαρμόστηκε είχε τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μέγιστη δυνατή ισχύ για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής. Σταθερό βήμα πτερυγίων, μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής
- Σταθερή ισχύς για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής. Σταθερή ταχύτητα περιστροφής, μεταβλητή γωνία βήματος των πτερυγίων
- Σταθερή ισχύς για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής με ενεργή απόσβεση της κίνησης. Και πάλι σταθερή ταχύτητα περιστροφής και μεταβλητή γωνία βήματος των πτερυγίων αλλά και ένας επιπλέον αλγόριθμος που θα ελέγχει την απόσβεση.

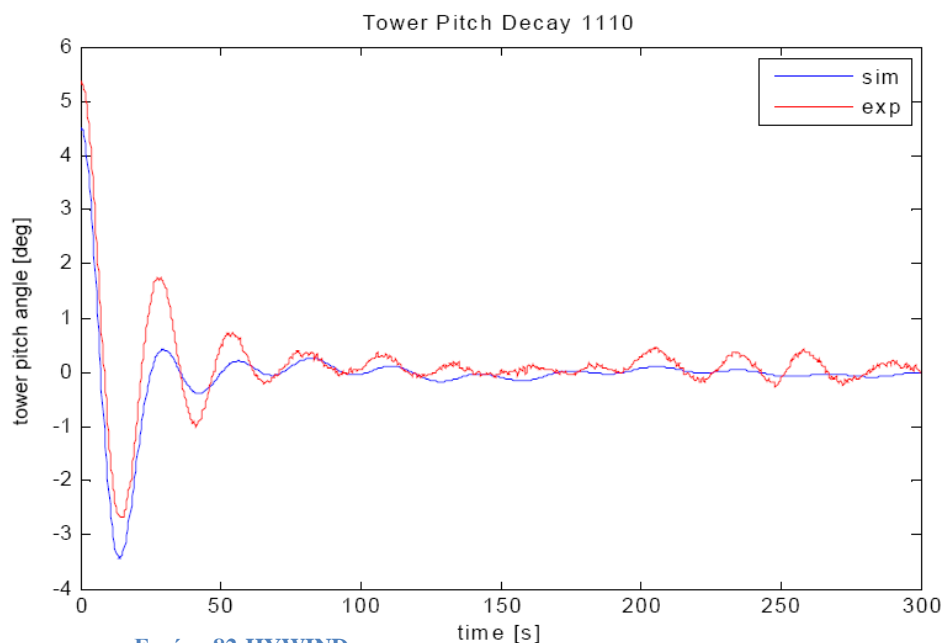
Τέλος έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων από τους κώδικες με αυτά από τα πειράματα. Έμφαση δόθηκε στη λειτουργία για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής και στη σύγκριση ανάμεσα στη χρήση του κλασικού συστήματος ελέγχου με μεταβολή του βήματος των πτερυγίων και του συστήματος που περιλαμβάνει και επιπλέον απόσβεση.

Η σημασία του συστήματος ελέγχου με μεταβολή του βήματος πτερυγίων στην απόσβεση της κίνησης του πύργου φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα, τα οποία αναφέρονται σε λειτουργία με σταθερό αέρα ταχύτητας μεγαλύτερης της ονομαστικής, χωρίς κυματισμό και με τη χρήση και των δυο συστημάτων ελέγχου. Είναι εμφανής η αύξηση της απόσβεσης στην κίνηση του πύργου όταν χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος για τον έλεγχο αυτό.



Εικόνα 81-HYWIND

Με χρήση του κλασικού συστήματος ελέγχου με μεταβολή του βήματος πτερυγίων



Εικόνα 82-HYWIND

Με χρήση του συστήματος ελέγχου με μεταβολή του βήματος πτερυγίων και επιπλέον απόσβεση

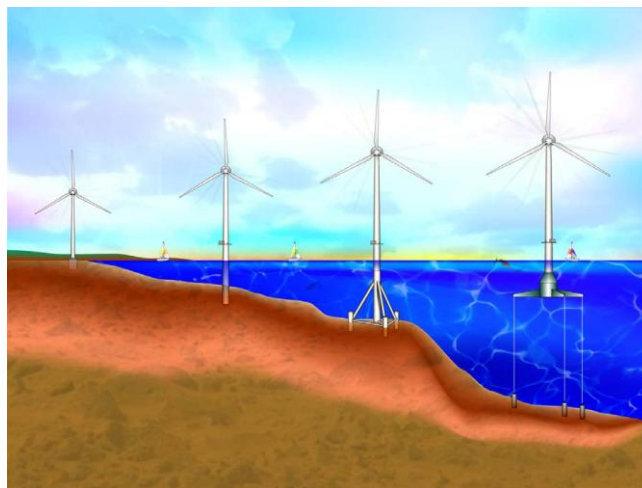
2.1.5 OC3–Σύγκριση Αεροελαστικών Κωδικών υπεράκτιων Ανεμογεννητριών

Στην πορεία παρουσιάζεται η πρώτη σύγκριση και αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε από την OC3 (Offshore Code Comparison Collaboration) για τους αεροελαστικούς κώδικες των υπεράκτιων Ανεμογεννητριών. Εξετάζεται η πιθανότητα, οι διαφορές σε κάποια αποτελέσματα να οφείλονται στην εφαρμογή διαφορετικής θεωρίας ενώ παράλληλα προτείνονται βελτιώσεις.

Σκοπός αυτή της προσπάθειας είναι:

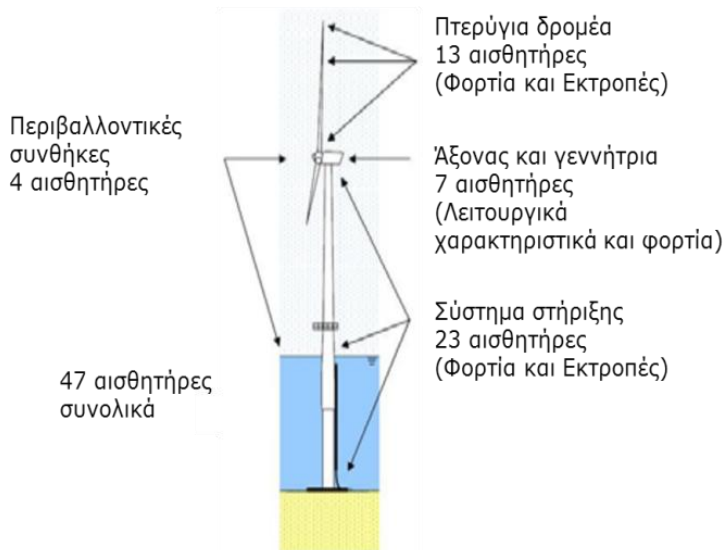
- Καθιέρωση ενός προσομοιωτή ως μέτρο σύγκρισης για τον έλεγχο των νέων κωδικών και την εκπαίδευση καινούριων αναλυτών
- Εξακρίβωση και επαλήθευση των δυνατοτήτων των κωδικών και περιορισμός των εφαρμοσμένων θεωριών
- Διερεύνηση και βελτίωση της μεθοδολογίας της ανάλυσης
- Διερεύνηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων
- Εξακρίβωση της μελλοντικής έρευνας και των απαραίτητων βελτιώσεων

Η σύγκριση έγινε ανάμεσα σε όλους σχεδόν τους υπάρχοντες κώδικες, όπως ο FAST και ο ADAMS που συναντήσαμε παραπάνω, και αποτελείται από τέσσερις φάσεις.



Εικόνα 83-NREL

Στην πρώτη φάση χρησιμοποιείται ανεμογεννήτρια πακτωμένη στον πυθμένα με άκαμπτη στήριξη σε βάθος 20m, ώστε να γίνει επιδιόρθωση του κώδικα, των διαφόρων παραμέτρων και του συστήματος ελέγχου, καθώς τα ίδια στοιχεία χρησιμοποιούνται σε όλες τις φάσεις. Στη δεύτερη φάση εξετάζεται μια εύκαμπτη στήριξη ενώ έχουμε τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Στην τρίτη σε βάθος 45m η στήριξη επιτυγχάνεται με τη διάταξη ενός τρίποδα και στην τέταρτη με μια πλωτή πλατφόρμα. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν 47 αισθητήρες



Εικόνα 84-NREL

Αποδείχθηκε όμως ότι η τύρβη είναι πιο ομαλή στις πολικές συντεταγμένες εξαιτίας της παρεμβολής, επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο τις συνθήκες της αεροδυναμικής ροής στα πτερύγια.

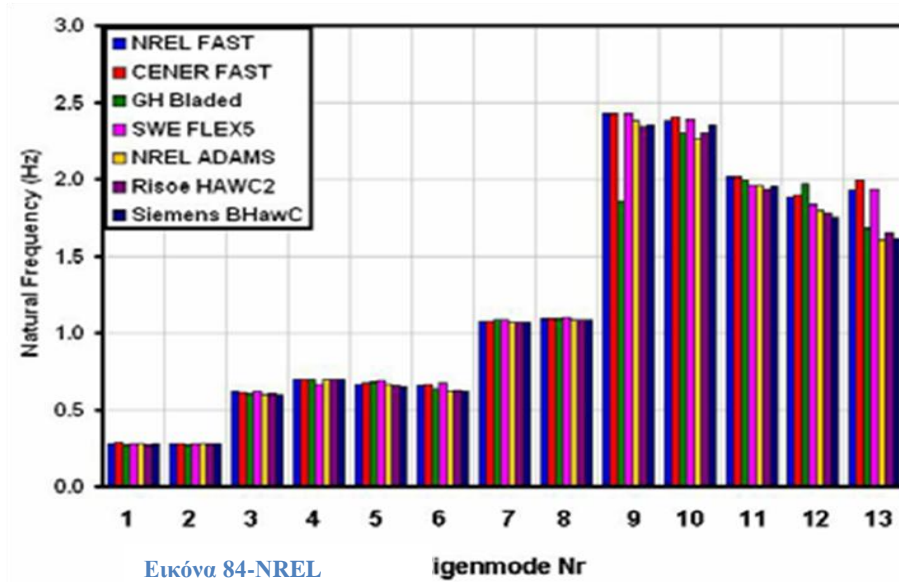
Τα αποτελέσματα που έδωσαν οι διάφοροι κώδικες είναι αντίστοιχα και μπορούν να συγκριθούν πολύ καλά μεταξύ τους. Αυτό βέβαια επιτεύχθηκε μετά από ορισμένες τροποποιήσεις στους κώδικες και στο σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιούν.

Το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει τις συζευγμένες ιδιοσυχνότητες των κύριων συστημάτων της ανεμογεννήτριας, όπως υπολογίσθηκαν από τους διάφορους κώδικες στη φάση 1.

όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα. Η ανάλυση έγινε τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο συχνοτήτων, για διάφορα φορτία και για ντετερμινιστικές ή στοχαστικές εξωτερικές συνθήκες.

Τα μοντέλα τύρβης που εφαρμόστηκαν αναλύθηκαν και σε ορθογωνικές και σε πολικές συντεταγμένες.

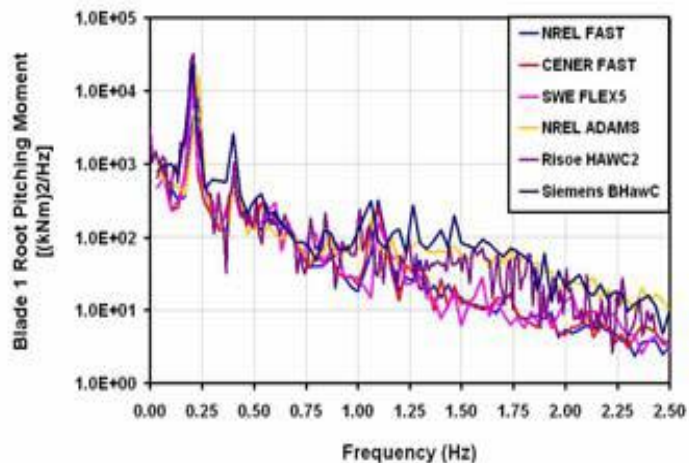
Φαίνεται ότι οι πρώτες ιδιοσυχνότητες έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Σημαντικές διαφορές εμφανίζονται στη 2^η ιδιοσυχνότητα της εμπρός-πίσω ταλάντωσης των πτερυγίων (flapwise) στην ασύμμετρη ιδιομορφή και στη 2^η ιδιοσυχνότητα της εμπρός-πίσω ταλάντωσης του πύργου (fore-aft). Αυτό συμβαίνει γιατί αυτή η ιδιοσυχνότητα του πύργου είναι συζευγμένη με την ιδιομορφή της εμπρός-πίσω ταλάντωσης των πτερυγίων (flapwise).



Nr	Full system eigenmode	Nr	Full system eigenmode
1	1 st tower fore-aft	8	1 st blade asymmetric edge 2
2	1 st tower side-to-side	9	2 nd tower fore-aft
3	1st drivetrain torsion	10	2 nd tower side-to-side
4	1 st blade collective flap	11	2 nd blade collective flap
5	1 st blade asymmetric flap 1	12	2 nd blade asymmetric flapwise 1
6	1 st blade asymmetric flap 2	13	2 nd blade asymmetric flapwise 2
7	1 st blade asymmetric edge 1		

Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα κάποιων παραμέτρων του συστήματος συναρτήσεως του χρόνου και της συχνότητας για διάφορες συνθήκες φόρτισης. Ενδεικτικά παρατίθενται κάποια αποτελέσματα από τις τελευταίες δοκιμές της φάσης 1 όπου λαμβάνεται υπόψη το πλήρως συζευγμένο, εύκαμπτο σύστημα.

Το διπλανό διάγραμμα δείχνει τη ροπή στη βάση του πτερυγίου λόγω αλλαγής βήματος συναρτήσει της συχνότητας. Βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα κυρίως για συχνότητες έως 1,5Hz. Οι διαφορές στις μεγαλύτερες συχνότητες οφείλονται στο πως παρουσιάζει κάθε κώδικας τις μεγαλύτερες ιδιομορφές.



Εικόνα 86-NREL

Γενικά παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα από τους διάφορους κώδικες συμφωνούν αρκετά μεταξύ τους. Κάποιες διαφορές που εμφανίζονται στην πλευρική ταλάντωση των πτερυγίων και στα φορτία μπορεί να οφείλονται στα διαφορετικά αεροδυναμικά μοντέλα και στην ανάλυση της δομής των πτερυγίων από τους διάφορους κώδικες. Τέλος ορισμένες διαφορές παρουσιάστηκαν και στις μεγαλύτερες ιδιομορφές των συζευγμένων μερών της ανεμογεννήτριας και άρα και στις δυναμικές αποκρίσεις που επηρεάζονται από αυτές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Αιολικό Δυναμικό Ελλάδος

Ο άνεμος είναι η κίνηση των αέριων μαζών που προκαλείται από τη διαφορά της πυκνότητας στις διάφορες ζώνες. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην άνιση κατανομή της θερμοκρασίας στις γειτονικές αέριες μάζες. Ο θερμός αέρας είναι ελαφρύτερος και έχει μικρότερη πυκνότητα από τον ψυχρό. Έτσι αυτή η θερμή αέρια μάζα εκτονώνεται, γίνεται ελαφρύτερη και κινείται προς τα πάνω. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει σε διάφορους χρόνους και χώρους και η άνιση θερμοκρασιακή κατανομή των αέριων μαζών μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικούς λόγους, όπως η διαφορετική ηλιοφάνεια, η διαφορετική αντανάκλαση του εδάφους ή ακόμα και η διαφορετική θερμοχωρητικότητα του. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η θάλασσα αύρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, εξαιτίας της μικρότερης θερμοχωρητικότητας της ξηράς από τη θάλασσα, θερμαίνει πιο γρήγορα την ξηρά από τη θάλασσα με αποτέλεσμα ψυχρότερες αέριες μάζες να κινούνται από τη θάλασσα προς την ξηρά. Κατά τη διάρκεια της νύχτας συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο καθώς η στεριά ψύχεται πιο γρήγορα. Αυτά τα θερμικά φαινόμενα εμφανίζονται και σε πλανητικό επίπεδο ανάμεσα στις ηπείρους και στους ωκεανούς ή ανάμεσα σε περιοχές με διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος και μήκος. Στην περίπτωση που αναφερόμαστε σε παγκόσμια κλίμακα παίζει σημαντικό ρόλο και η περιστροφή της Γής. Η ροή του ανέμου δεν ακολουθεί τη διεύθυνση από τις υψηλές βαρομετρικές στις χαμηλές βαρομετρικές πιέσεις, αλλά παρεκκλίνει λόγω της επιτάχυνσης Coriolis. Αυτό το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο όσο πλησιάζει κανείς στον ισημερινό, όπου η απόσταση από τον άξονα περιστροφής της Γής γίνεται μέγιστη και προκαλούνται στροβιλισμοί του ανέμου που κινούνται ωρολογιακά στο βόρειο ημισφαίριο (αντίθετα από την περιστροφή της Γής) και αντί-ωρολογιακά στο νότιο (παράλληλα με την περιστροφή της Γής). Τα φαινόμενα που περιγράφηκαν παρουσιάζουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος, καθώς παίζουν ρόλο κι άλλες μεταβλητές όπως τα μετεωρολογικά φαινόμενα. Η πολυπλοκότητα των ανεμολογικών φαινομένων μας κάνει να κατανοήσουμε ότι κάθε λεπτομερής πρόβλεψη της κατάστασης του ανέμου και άρα του ενεργητικού δυναμικού μιας περιοχής για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου πρέπει να βασίζεται στις παρατηρήσεις τουλάχιστον ενός χρόνου. (Caffarelli, de Simone, Stizza, D'Amato, & Vergelli, 2009)

Μια αξιολόγηση της έντασης του ανέμου μπορεί να βασιστεί στην κλίμακα Beaufort που αναπτύχθηκε από τον βρετανό ναύαρχο Francis Beaufort (1774-1857), για να χαρακτηρίσει την κατάσταση του ανέμου στην ανοιχτή θάλασσα.

Κλίμακα Beaufort				
Βαθμίδες Κλίμακας	Χαρακτηρισμός Ανέμου	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Κατάσταση της θάλασσας	Ύψος Κύματος (m)
0	Άπνοια	0,0-0,2	Θάλασσα σαν καθρέφτης	
1	Σχεδόν Άπνοια	0,3-1,5	Σχηματίζονται ρυτίδες σα λέπια χωρίς κορυφές με αφρό.	0,1
2	Πολύ Ασθενής	1,6-3,3	Μικρά κυματίδια χαμηλά αλλά αρκετά σχηματισμένα με λείες κορυφές που δεν σπάζουν.	0,2
3	Ασθενής	3,4-5,4	Μεγάλα κυματίδια. Οι κορυφές τους αρχίζουν να σπάζουν. Πιθανός λευκός αφρός αραιά.	0,6
4	Σχεδόν Μέτριος	5,5-7,9	Μικρά κύματα που γίνονται μακρύτερα. Μάλλον συχνοί αφροί.	1
5	Μέτριος	8,0-10,7	Μέτρια κύματα με σαφή επιμήκη μορφή. Όψη πολλών λευκών προβάτων.	2
6	Ισχυρός	10,8-13,8	Αρχίζουν να σχηματίζονται μεγάλα κύματα. Οι κορυφές με λευκό αφρό εξαπλώνονται παντού.	3
7	Σχεδόν Θυελλώδης	13,9-17,1	Η θάλασσα φουσκώνει και λευκός αφρός από κύματα που σπάζουν εμφανίζονται και να σχηματίζονται ραβδώσεις κατά τη διεύθυνση του ανέμου.	4
8	Θυελλώδης	17,2-20,7	Μετρίως υψηλά κύματα περισσότερο επιμήκη, τα άκρα των κορυφών τους θραύονται. Ο αφρός παρασύρεται και σχηματίζει καλά σχηματισμένες ραβδώσεις κατά τη διεύθυνση του ανέμου.	5,5
9	Πολύ Θυελλώδης	20,8-24,4	Υψηλά κύματα. Πυκνές ραβδώσεις αφρού κατά τη διεύθυνση του ανέμου. Οι κορυφές των κυμάτων αρχίζουν να γέρνουν, να πέφτουν και να κυλίνουν.	7

10	Θύελλα	24,5-28,4	Πολύ υψηλά κύματα με μακριές λοφώδεις ράχες. Ο αφρός που είναι περισσότερος παρασύρεται σε πυκνές λευκές ραβδώσεις κατά τη διεύθυνση του ανέμου. Η επιφάνεια της θάλασσας στο σύνολό της γίνεται λευκή. Το σπάσιμο και κύλισμα των κορυφών των κυμάτων γίνεται έντονο και βίαιο.	9
11	Ισχυρή Θύελλα	28,5-32,6	Εξαιρετικά υψηλά κύματα. Η θάλασσα καλύπτεται τελείως από λευκούς αφρούς που επιμηκύνονται κατά τη διεύθυνση του ανέμου. Παντού τα άκρα των κορυφών των κυμάτων βρίσκονται σε αφρώδη κατάσταση.	11,5
12	Τυφώνας	32,7 και πάνω	Τα κύματα είναι τεράστια. Ο αέρας είναι γεμάτος με αφρό. Η θάλασσα είναι εντελώς λευκή.	14

Για τη σωστή προετοιμασία και μελέτη ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου είναι απαραίτητη η γνώση της κατάστασης του ανεμολογικού και κυματικού κλίματος του ελληνικού θαλάσσιου χώρου. Πιο συγκεκριμένα είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε την ταχύτητα του ανέμου και την κατεύθυνσή του για τον ορθό σχεδιασμό του αιολικού πάρκου αλλά και το σημαντικό ύψος κύματος και την περίοδο κορυφής του φάσματος αυτού για την αποδοτική λειτουργία του πλωτήρα.

Για τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας και τη χάραξη της καμπύλης ισχύος (προσδιορισμός ταχύτητας έναρξης λειτουργίας V_{cut-in} , ονομαστικής ταχύτητας V_R , ταχύτητας διακοπής λειτουργίας $V_{cut-out}$) είναι σημαντική η γνώση της ταχύτητας του ανέμου. Για τη σωστή τοποθέτηση των ανεμογεννητριών ενός αιολικού πάρκου, έτσι ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες επιδράσεις λόγω ομόρρους μεταξύ τους, σημαντική πληροφορία αποτελεί η συχνότητα εμφάνισης κάθε κατεύθυνσης του ανέμου. Σ' ένα υπεράκτιο πλωτό αιολικό πάρκο όμως ιδιαίτερη σημασία παίζει η επίδραση του κυματισμού καθώς υπάρχει δυναμική σύζευξη ανάμεσα στην κίνηση του πλωτήρα και στα φορτία που εμφανίζονται στην ανεμογεννήτρια.

Ιδανικό θα ήταν τα υπεράκτια αιολικά πάρκα να εγκαθίστανται σε περιοχές με άνεμο διαρκώς υψηλής ταχύτητας. Οι χάρτες που ακολουθούν υποδεικνύουν τέτοιες περιοχές.

Οι χάρτες αυτοί παρουσιάζουν την επικρατούσα κατάσταση ανέμου και κύματος στις ελληνικές θάλασσες. Οι αιολικοί αυτοί χάρτες προέρχονται από μια μελέτη του

ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. (Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών) σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Επιταχυντικών Συστημάτων και Εφαρμογών (ΙΕΣΕ) και την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ). Η συνεργασία αυτή έδωσε τον 'Ατλαντα Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών', (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., ΙΕΣΕ, & ΕΜΥ, 2007).

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται όλοι οι χάρτες που συμπεριλαμβάνονται σε αυτή τη μελέτη.

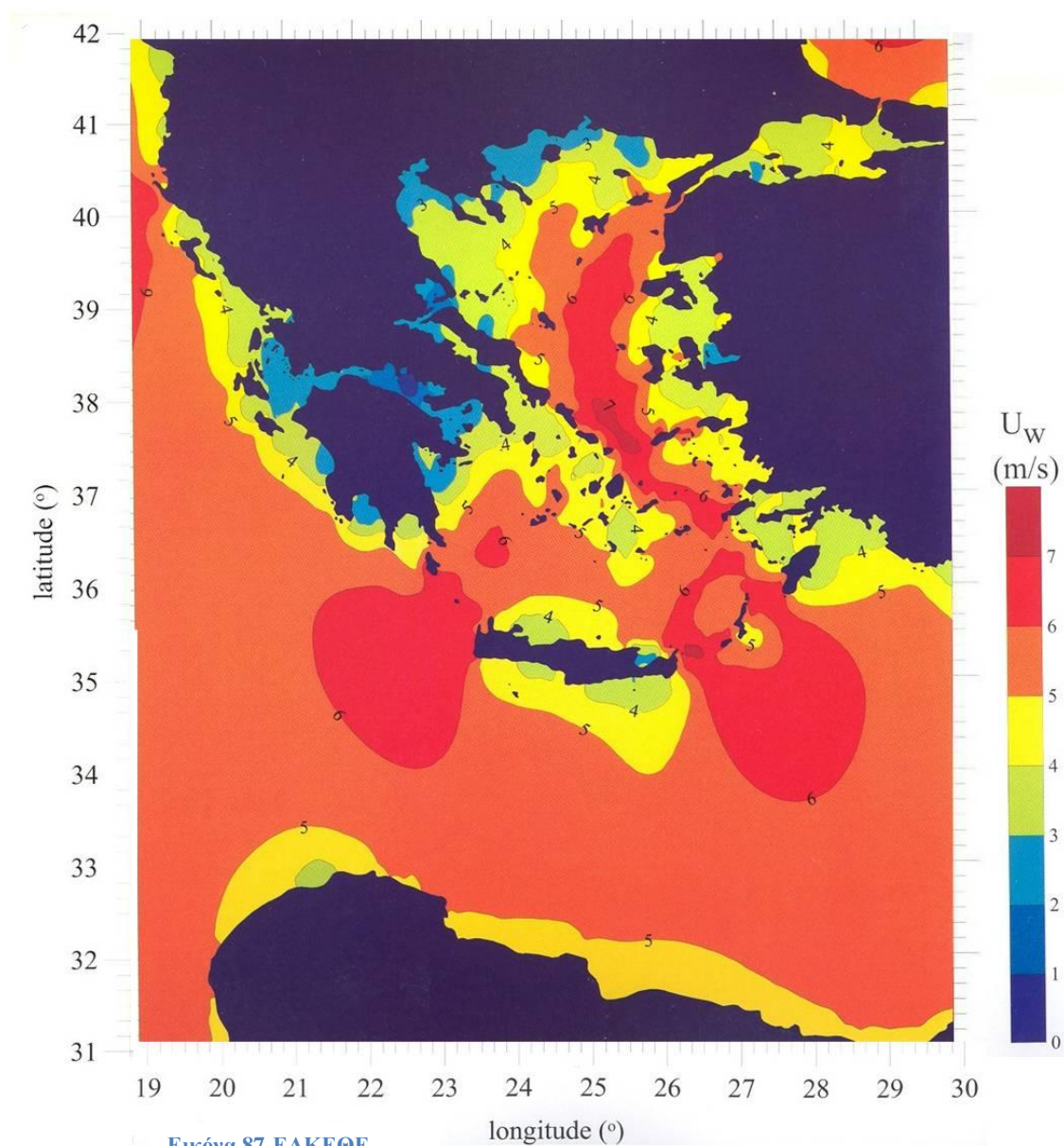
Φθινόπωρο Autumn	Χειμώνας Winter	Άνοιξη Spring	Καλοκαίρι Summer	Επίσιο Annual
B-4	B-5	B-6	B-7	B-8
B-10	B-11	B-12	B-13	B-14
B-16	B-17	B-18	B-19	B-20
B-22	B-23	B-24	B-25	B-26
B-28	B-29	B-30	B-31	B-32
B-34	B-35	B-36	B-37	B-38
B-40	B-41	B-42	B-43	B-44
B-45	B-46	B-47	B-48	B-49
B-50	B-51	B-52	B-53	B-54
B-55	B-56	B-57	B-58	B-59
B-62	B-63	B-64	B-65	B-66
B-67	B-68	B-69	B-70	B-71
B-72	B-73	B-74	B-75	B-76
B-77	B-78	B-79	B-80	B-81
				B-84
				B-85
				B-88
				B-89
B-92	B-96	B-100	B-104	B-108
B-114	B-118	B-122	B-126	B-130
B-136	B-140	B-144	B-148	B-152
B-158	B-162	B-166	B-170	B-174
B-180	B-182	B-184	B-186	B-188
B-192	B-194	B-196	B-198	B-200
B-204	B-206	B-208	B-210	B-212
B-216	B-218	B-220	B-222	B-224

Χάρτες Μέσων Ταχυτήτων Ανέμου

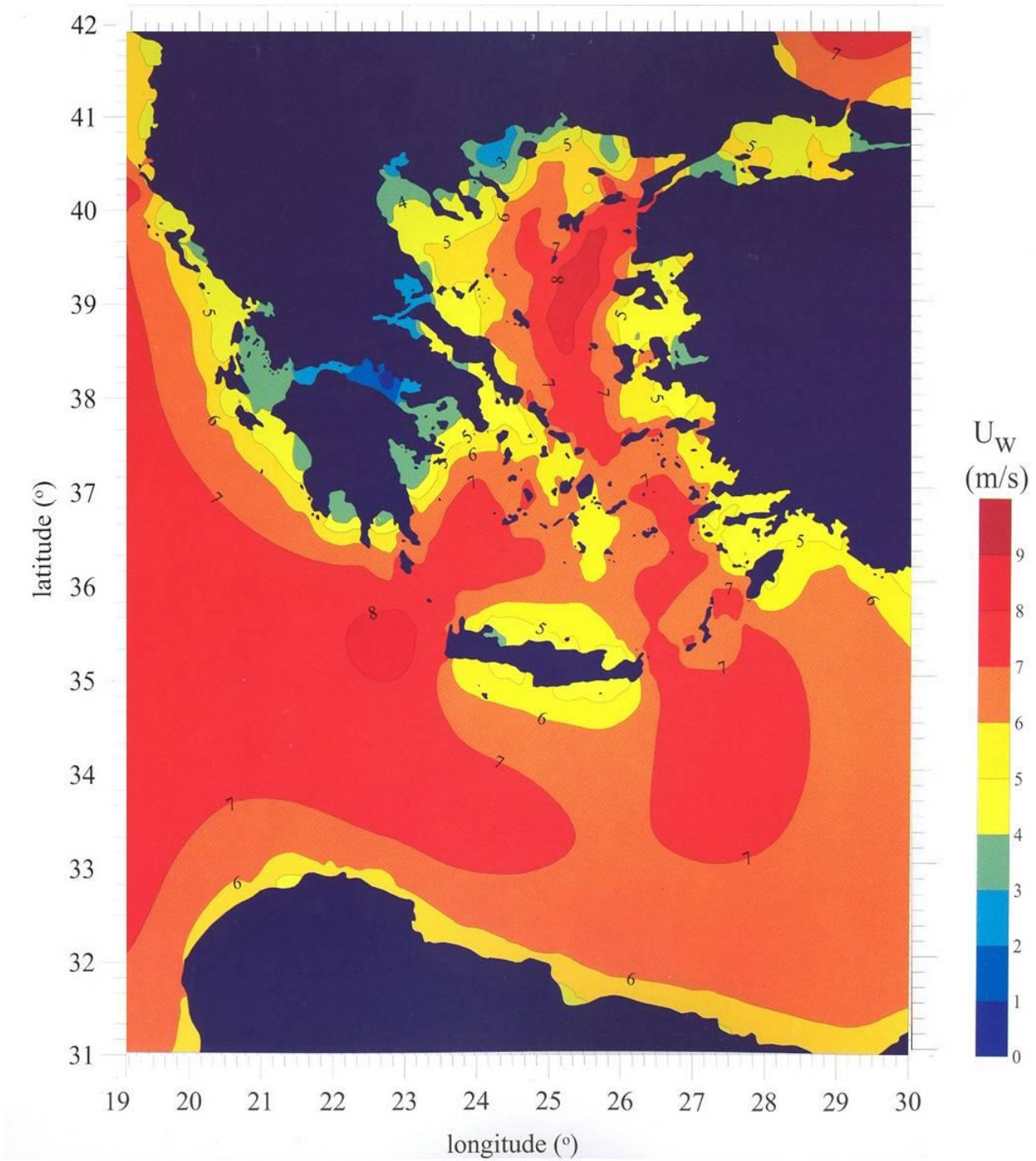
Σε αυτούς τους χάρτες εξετάζεται η ταχύτητα του ανέμου U_w στα 10 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι ισοσταθμικές καμπύλες των μέσων ταχυτήτων ανέμου που φαίνονται είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου η εποχιακή μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου είναι σταθερή. Έχει πραγματοποιηθεί μια εποχιακή ανάλυση:

- Φθινόπωρο: Σεπτέμβριος, Οκτώβριος, Νοέμβριος
- Χειμώνας: Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος
- Άνοιξη: Μάρτιος, Απρίλιος, Μάιος
- Καλοκαίρι: Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος
- Ετήσιο: Όλοι οι μήνες

Μέση Ταχύτητα Ανέμου, Φθινόπωρο

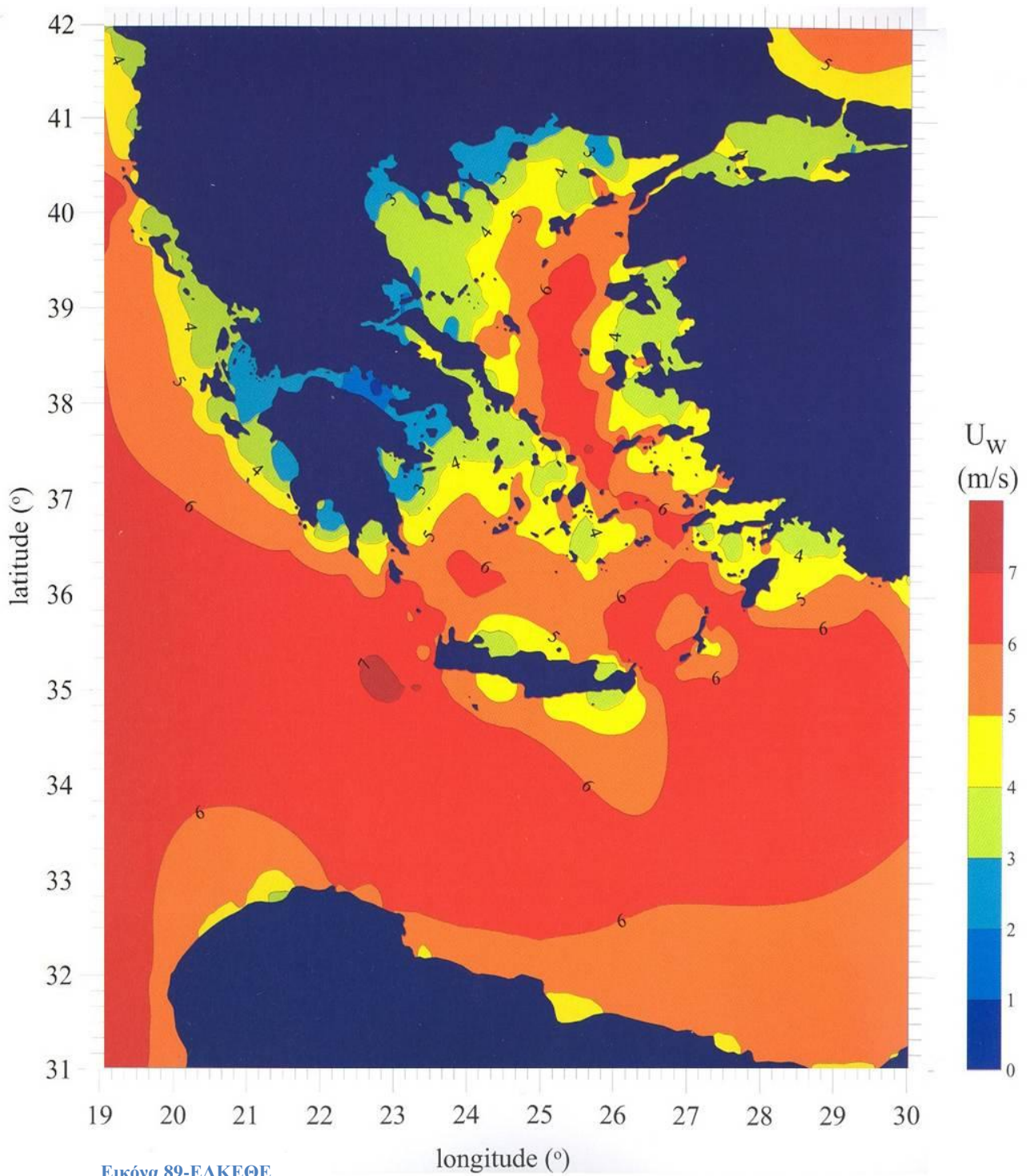


Μέση Ταχύτητα Ανέμου, Χειμώνας

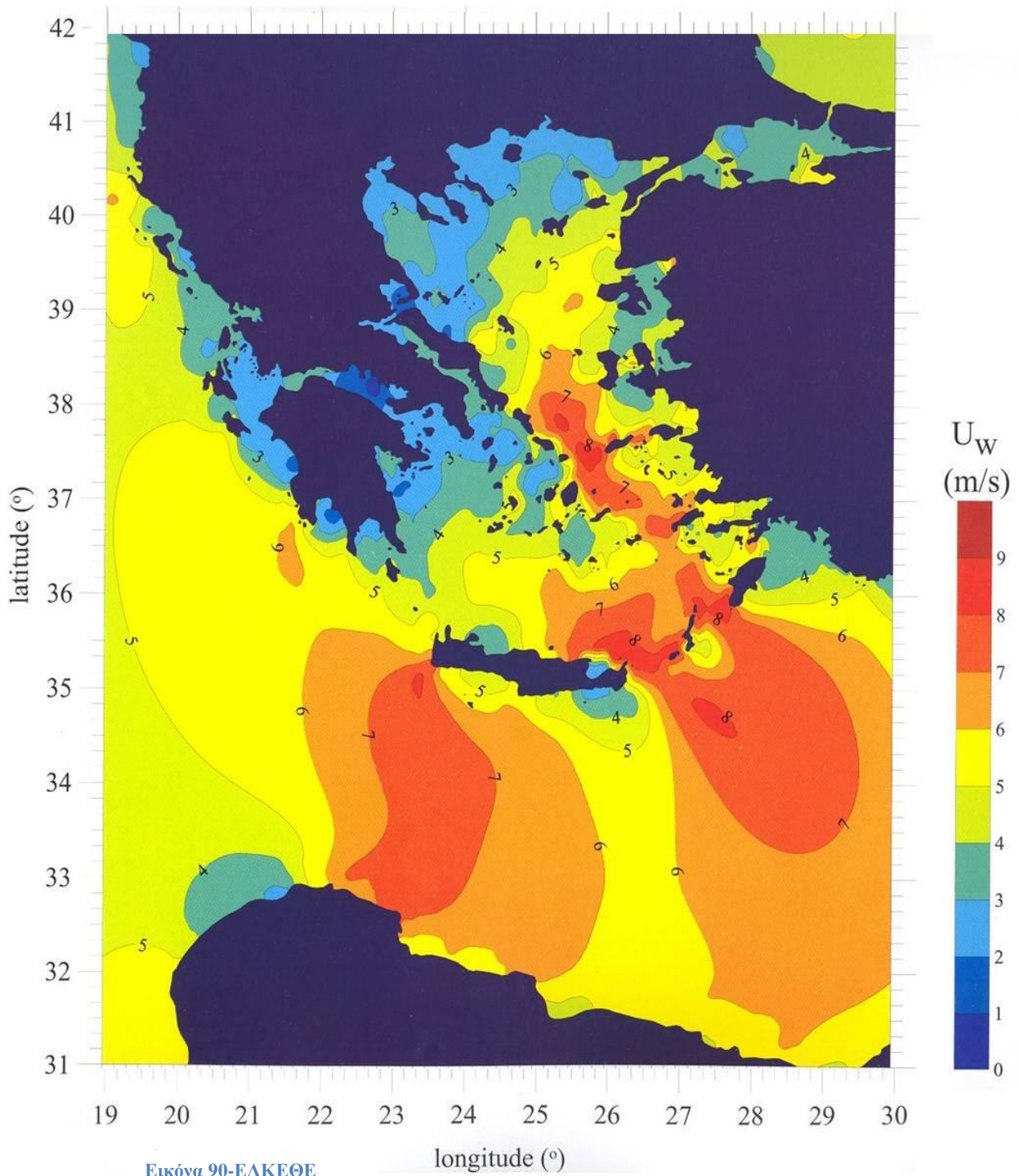


Εικόνα 88-ΕΛΚΕΘΕ

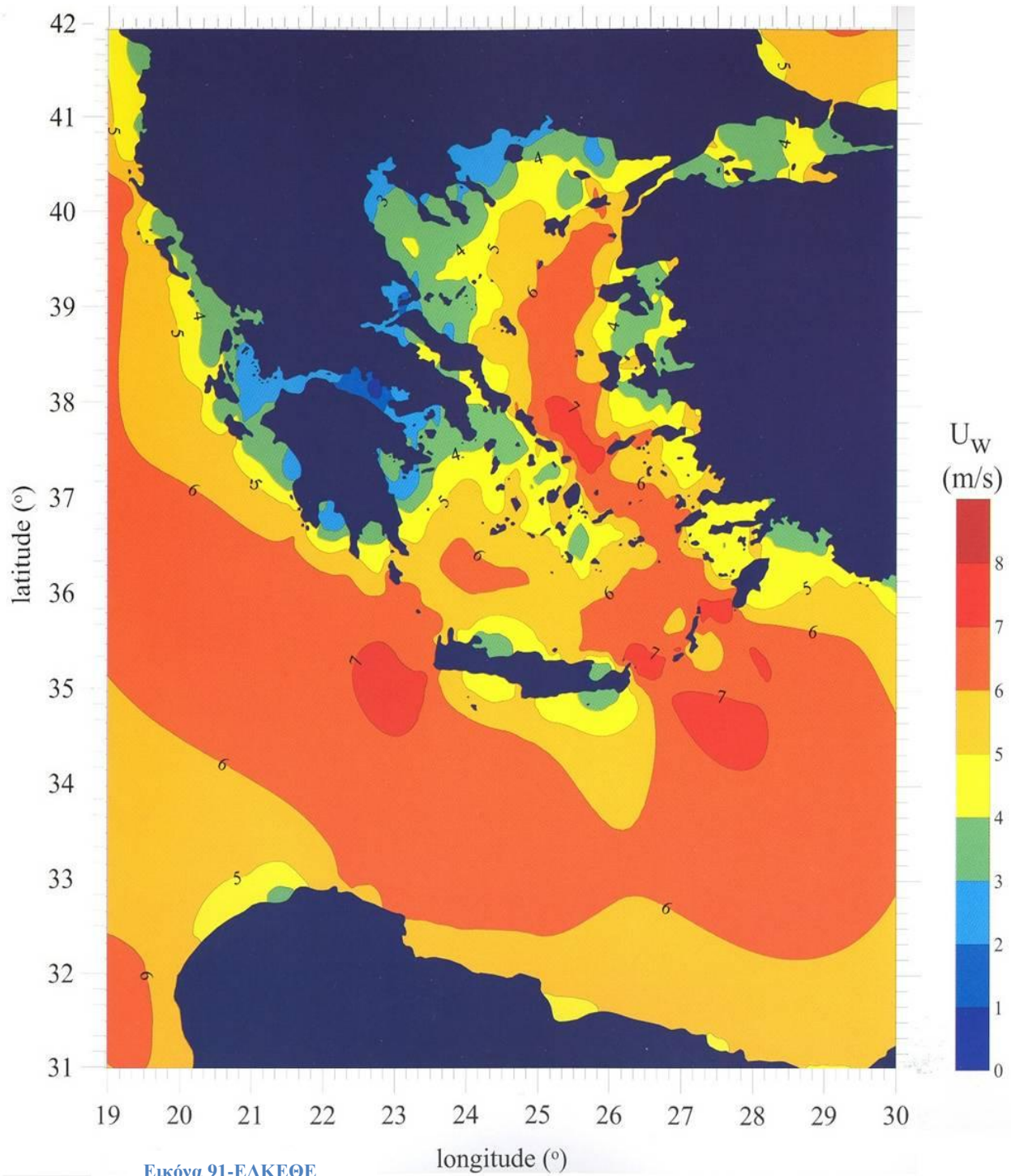
Μέση Ταχύτητα Ανέμου, Άνοιξη



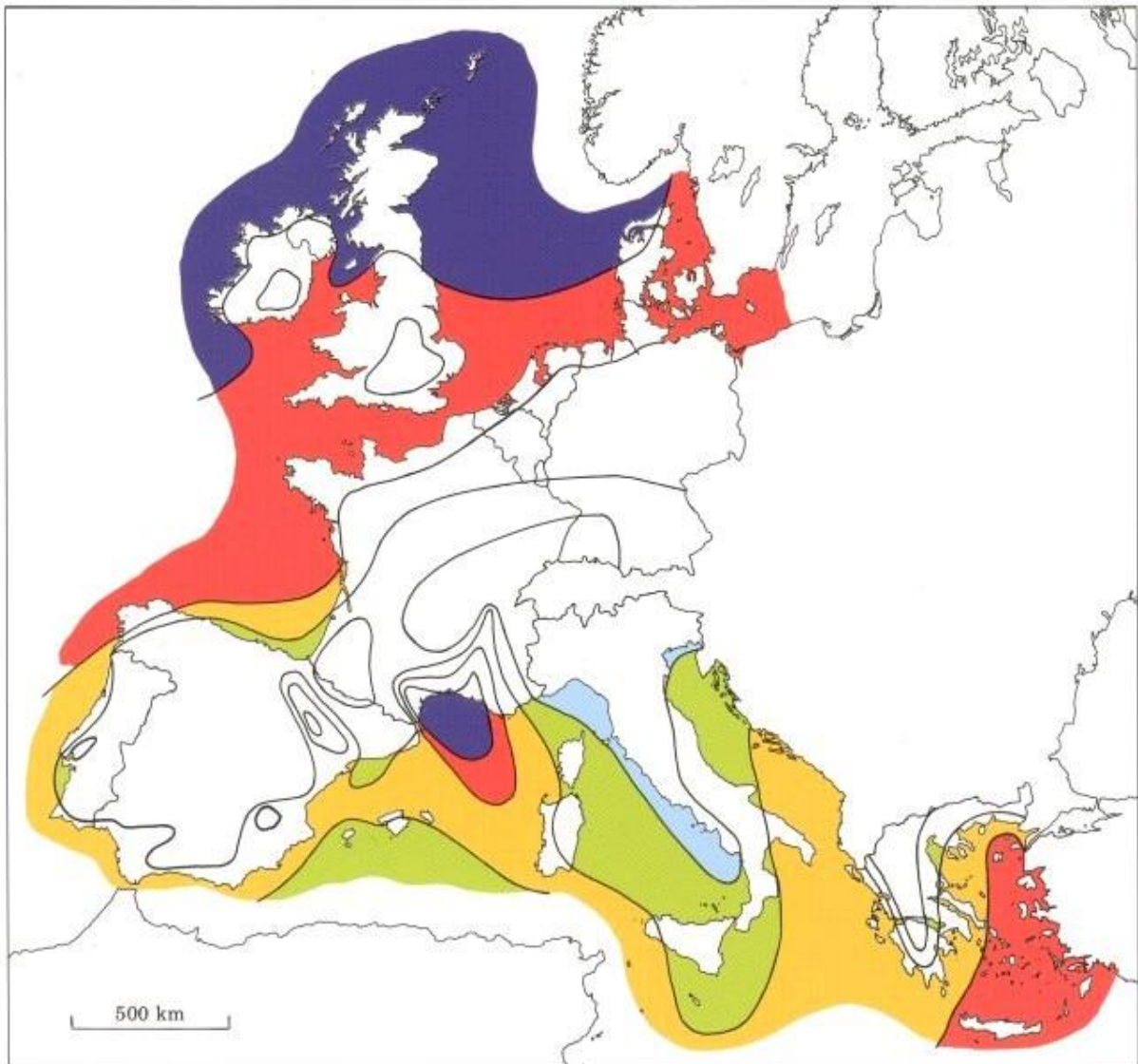
Μέση Ταχύτητα Ανέμου, Καλοκαίρι



Μέση Ετήσια Ταχύτητα Ανέμου



Ο αντίστοιχος χάρτης για το αιολικό δυναμικό των ευρωπαϊκών θαλασσών είναι αυτός που φαίνεται παρακάτω. Είναι εμφανές ότι η Ελλάδα ανήκει στις περιοχές με το υψηλότερο αιολικό δυναμικό.



Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights										
	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}
Dark Blue	> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
Red	7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
Yellow	6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
Light Green	4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
Light Blue	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

Εικόνα 92-RISO DTU

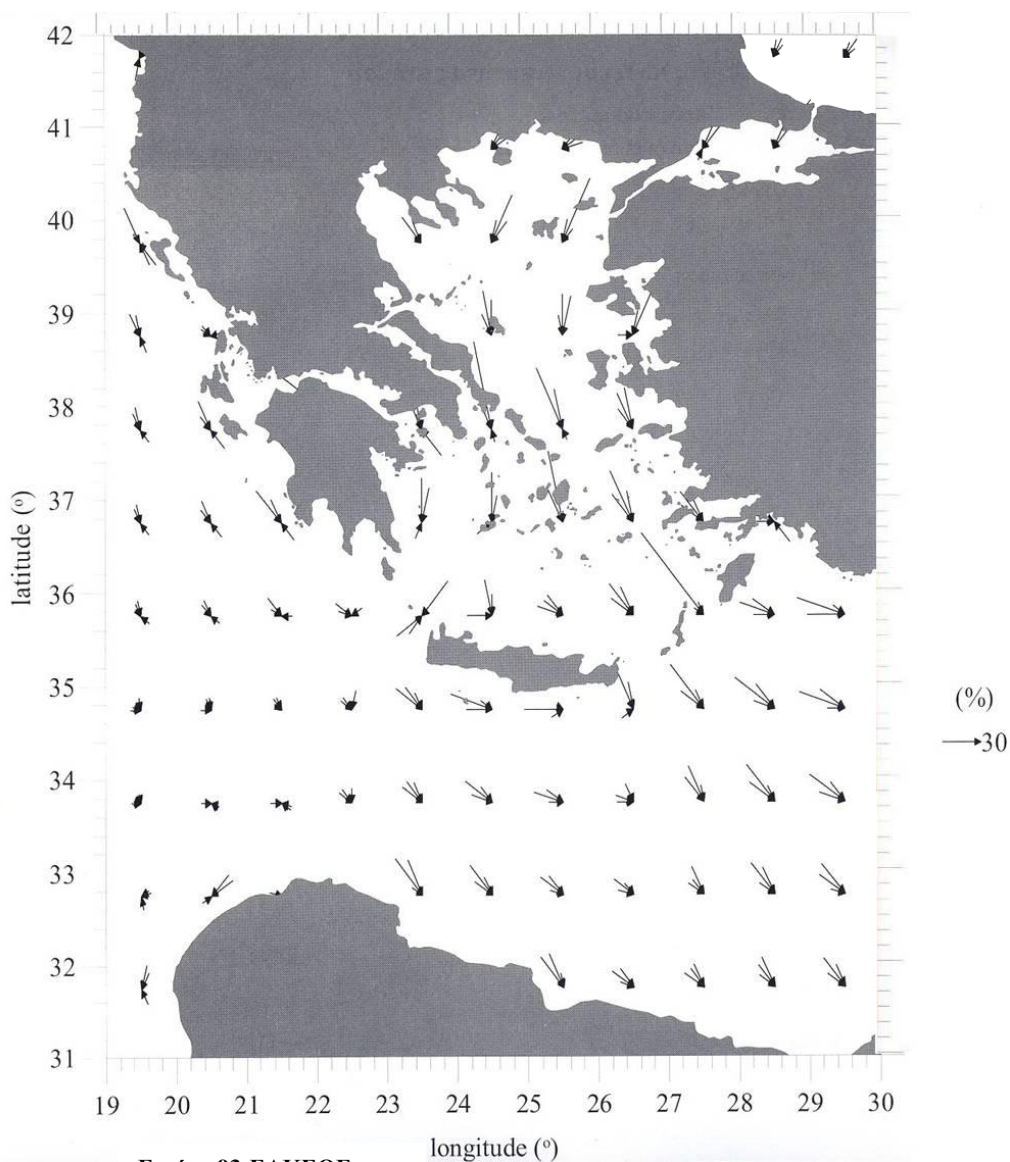
Χάρτες Κατεύθυνσης Ανέμου

Σε αυτούς τους χάρτες εξετάζεται η κατεύθυνση του ανέμου Θ_{wind} στα 10 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση από την οποία πνέει ο άνεμος. Το μήκος τους αντιστοιχεί στη συχνότητα εμφάνισης ανέμων (%) που πνέουν από την αντίστοιχη κατεύθυνση. Έχουν ληφθεί υπόψη ταχύτητες ανέμου άνω των 6 m/s. Και σε αυτούς τους χάρτες έχει γίνει εποχιακή ανάλυση.

Συνολικά εξετάζονται 24 κατευθύνσεις ανέμου.

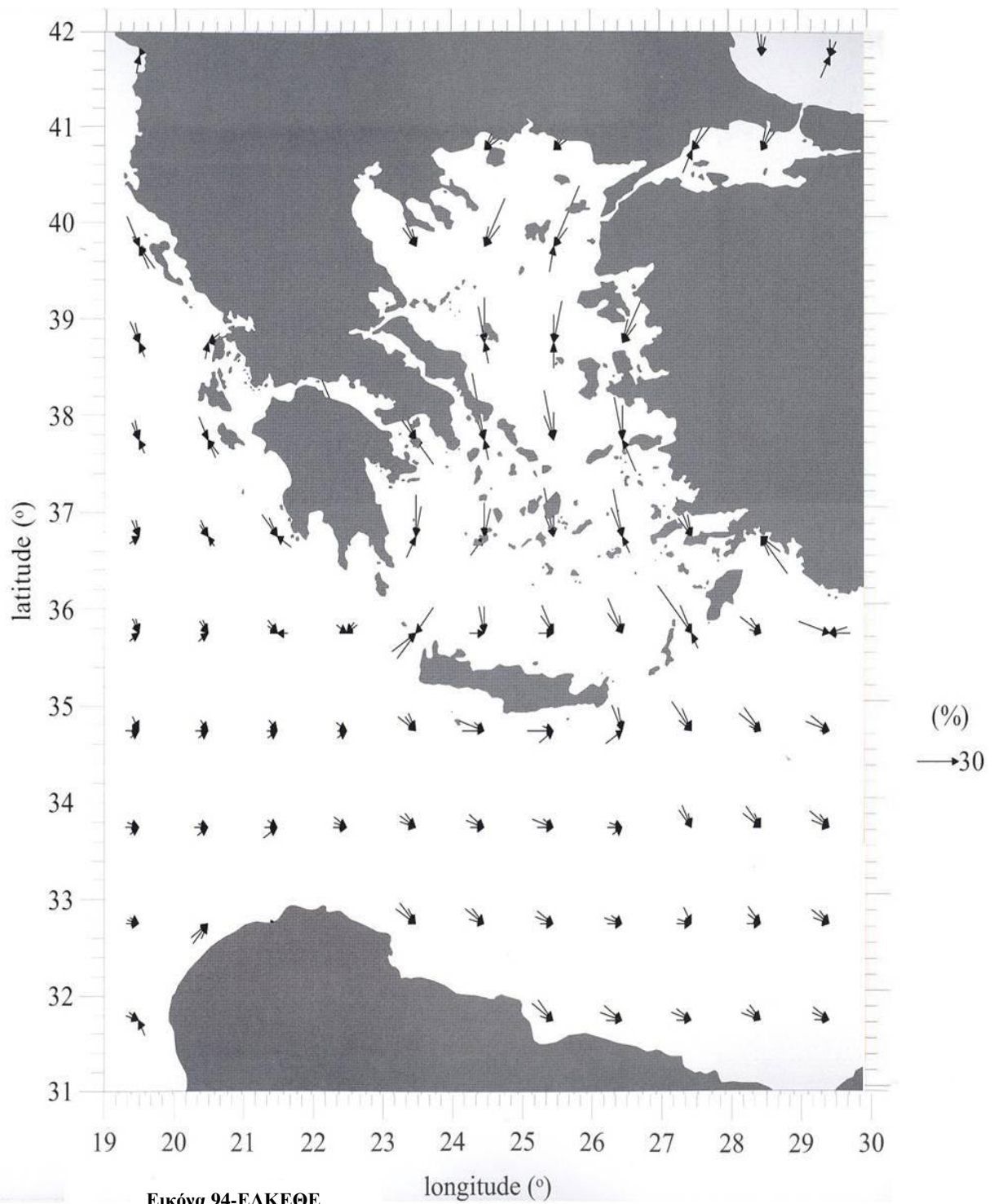
0° (N)	15°	30°	45° (NE)	60°	75°
90° (E)	105°	120°	135° (SE)	150°	165°
180° (S)	195°	210°	225° (SW)	240°	255°
270° (W)	285°	300°	315° (NW)	330°	345°

Κατευθυντικότητα Ανέμου, Φθινόπωρο

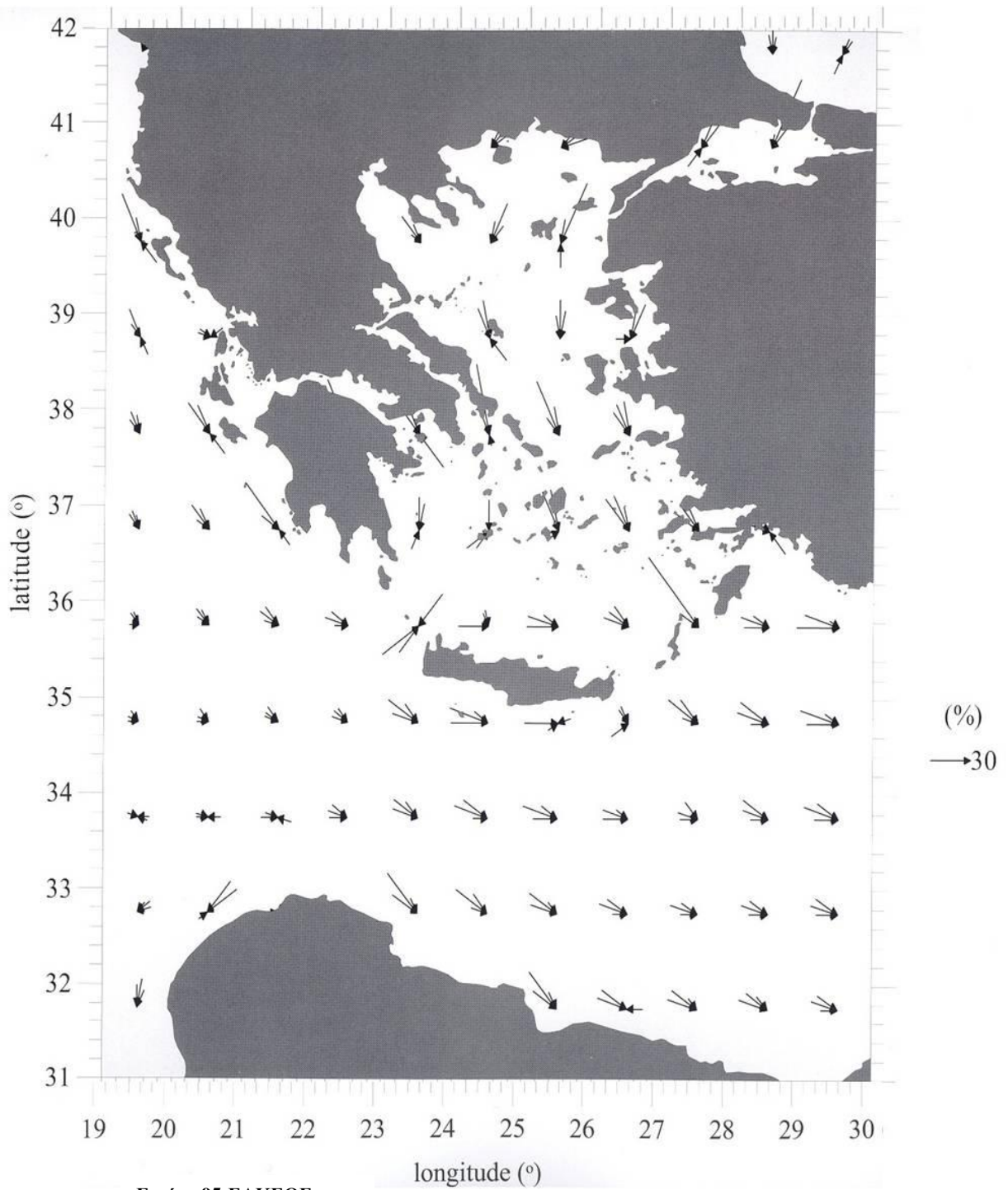


Εικόνα 93-ΕΑΚΕΘΕ

Κατευθυντικότητα Ανέμου, Χειμώνας

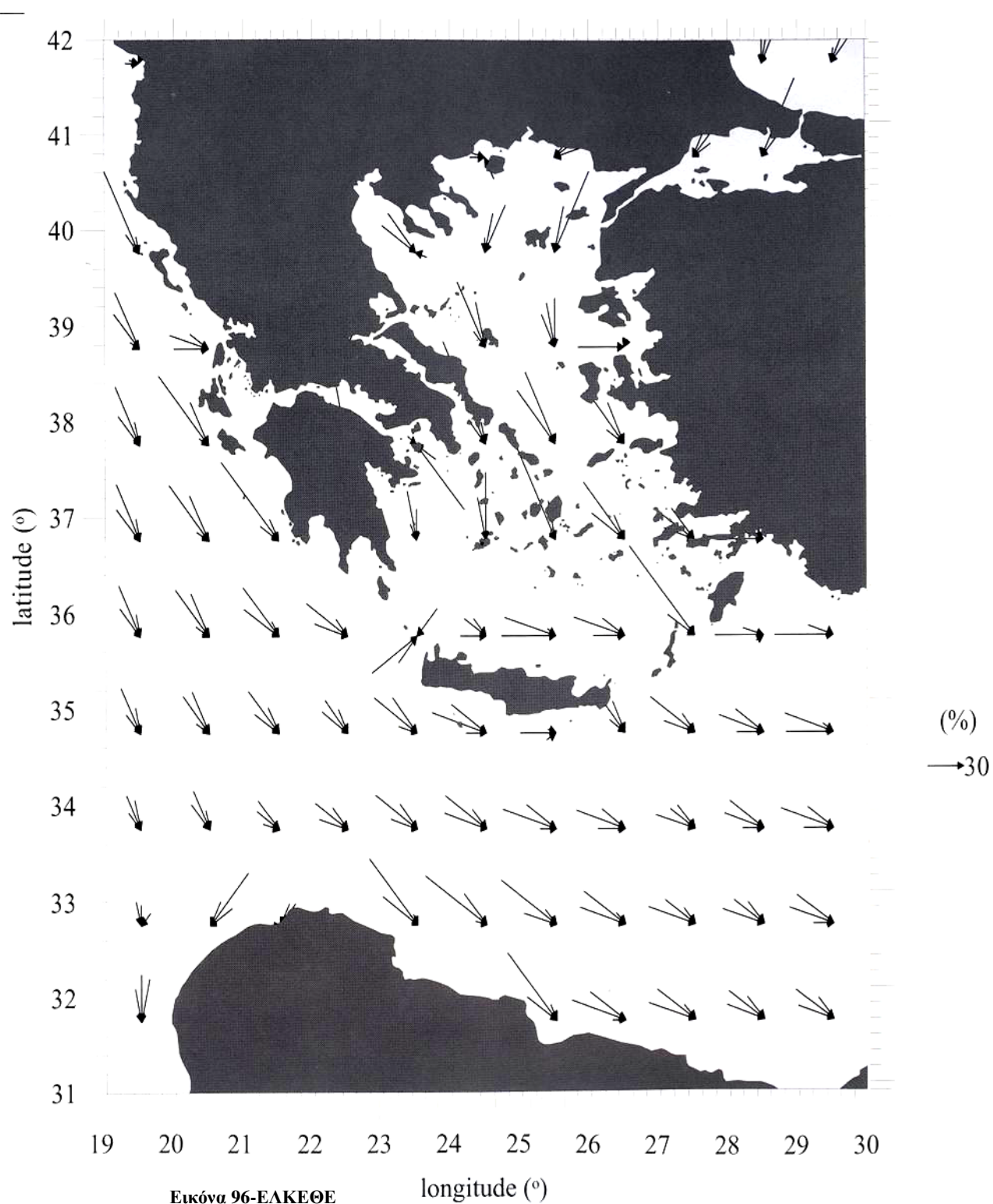


Κατευθυντικότητα Ανέμου, Άνοιξη

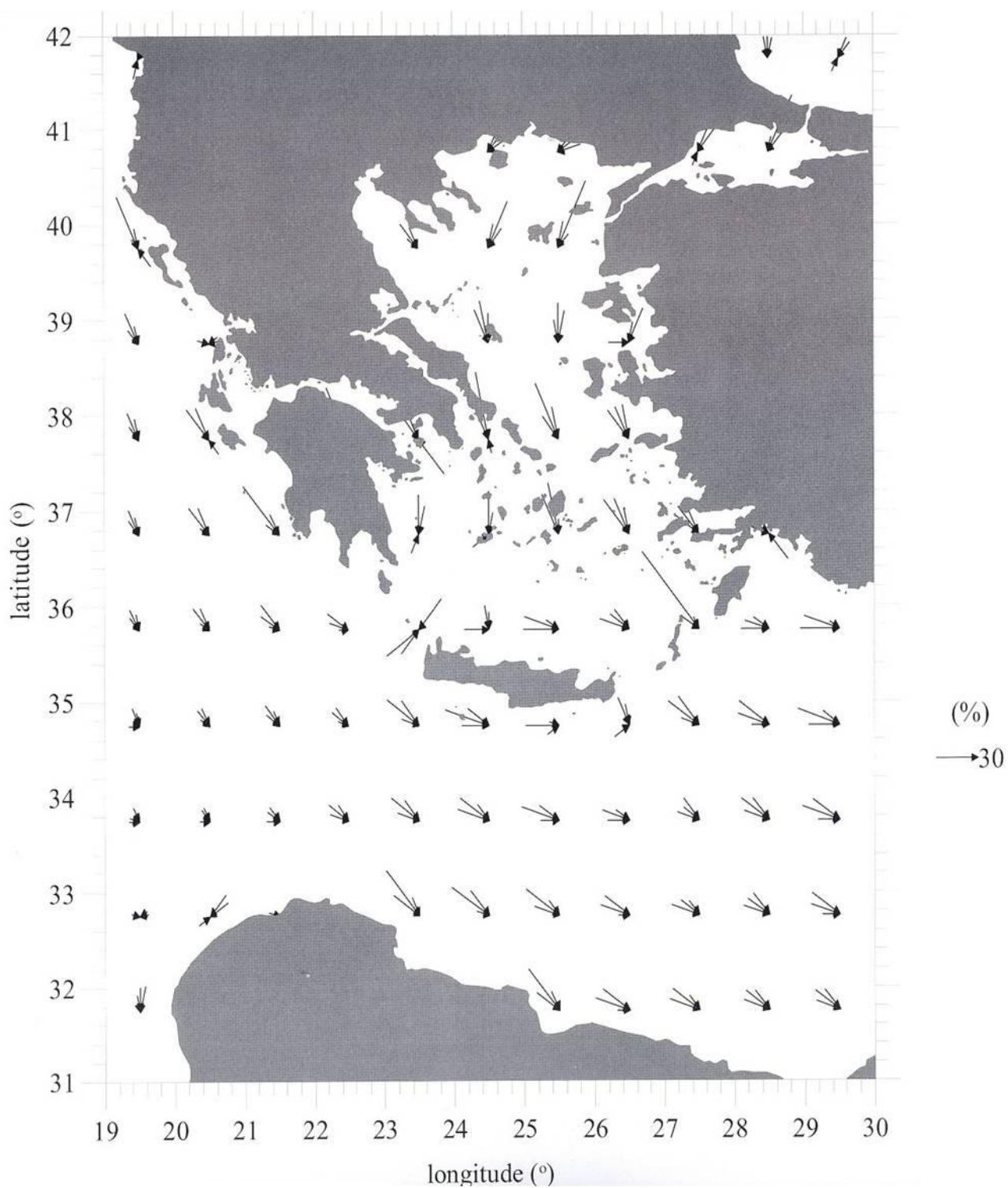


Εικόνα 95-ΕΛΚΕΘΕ

Κατευθυντικότητα Ανέμου, Καλοκαίρι



Κατευθυντικότητα Ανέμου Ετησίως



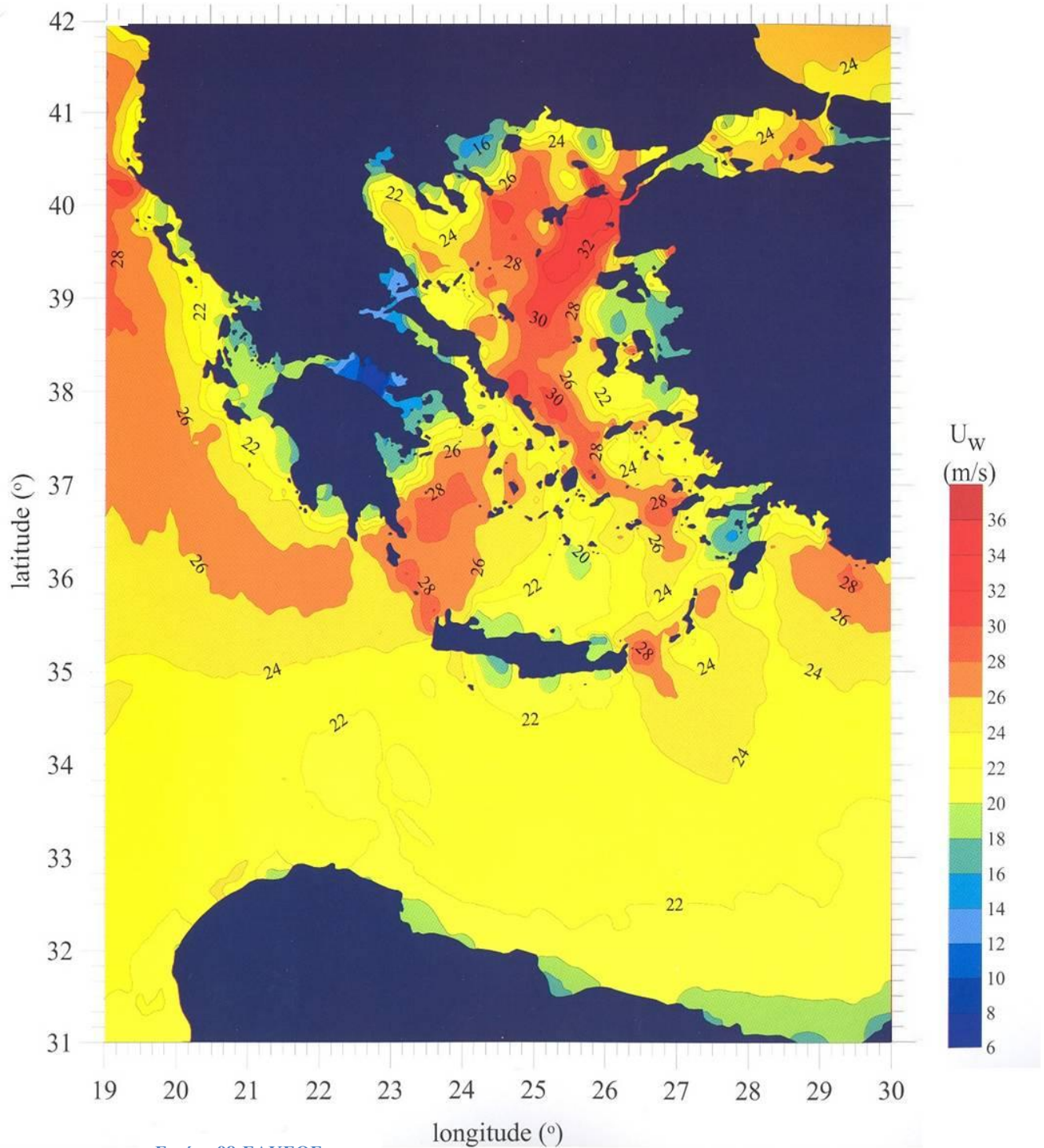
Εικόνα 97-ΕΑΚΕΘΕ

Χάρτες τιμών σχεδίασης 50 και 100 ετών ταχύτητας ανέμου

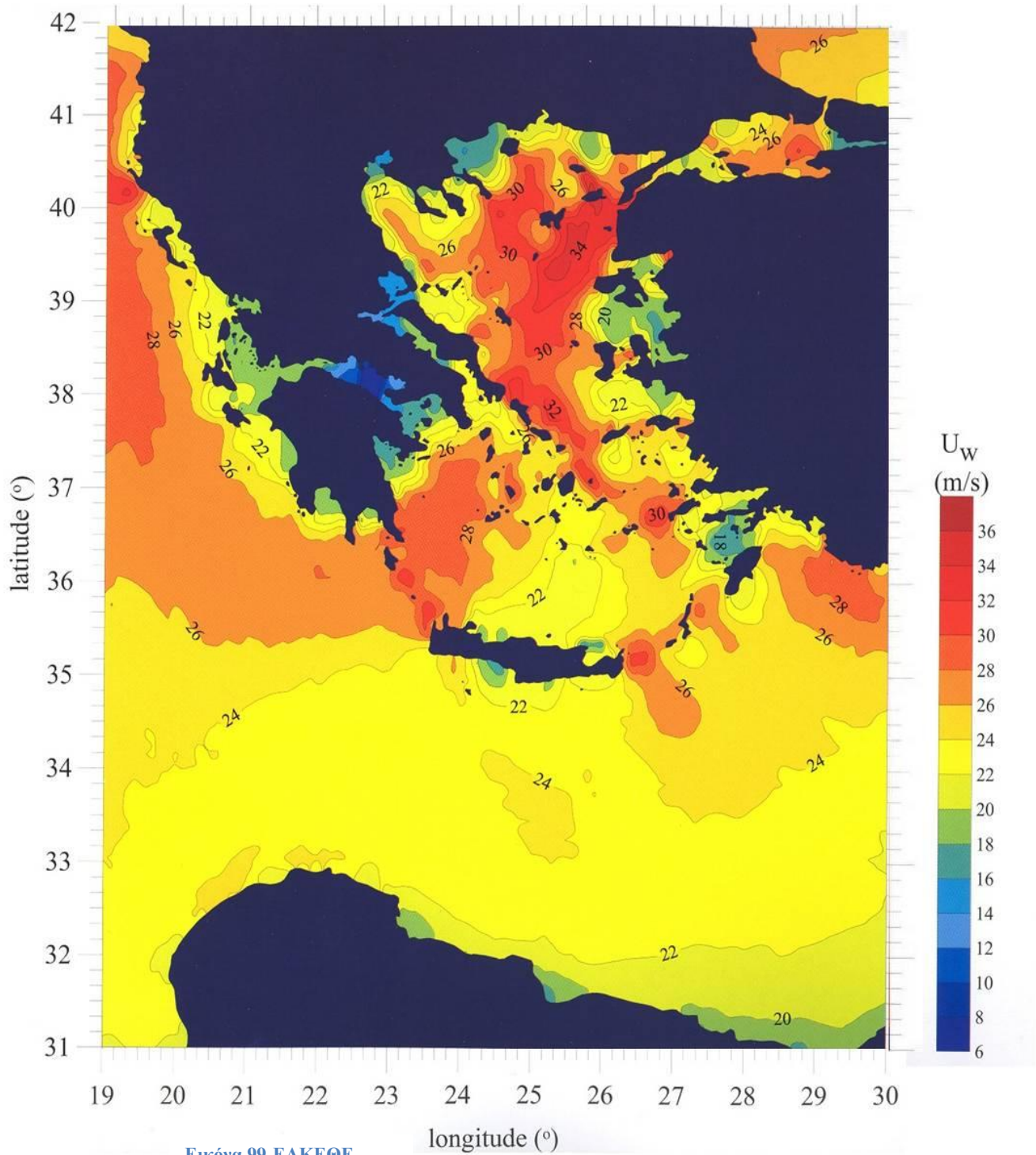
Για τη σωστή σχεδίαση μιας ανεμογεννήτριας είναι απαραίτητη η γνώση της μέγιστης ταχύτητας ανέμου που εμφανίζεται στην κάθε περιοχή, στην περίπτωση μας σε διάρκειας 50 και 100 ετών. (Ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα μελέτης στην αργή κλίμακα χρόνου (μακροχρόνια θεώρηση) αποτελεί ο πιθανοθεωρητικός χαρακτηρισμός ακραίων (μεγίστων τιμών) των ανεμολογικών χαρακτηριστικών. Αυτό που ενδιαφέρει ιδιαίτερα σε εφαρμογές είναι η εύρεση ακραίων (μεγίστων) τιμών της παραμέτρου X (εδώ ταχύτητα ανέμου), έστω x^* , οι οποίες αναμένεται να ξεπεραστούν κατά μέσο όρο μια φορά στη διάρκεια των επόμενων n ετών. Η τιμή x^* ονομάζεται τιμή σχεδίασεως n ετών (n -year design value) και αποτελεί βασική παράμετρο για τη σχεδίαση πλοίων, πλωτών και παράκτιων κατασκευών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., ΙΕΣΕ, & ΕΜΥ, 2007)).

Έτσι στους δύο χάρτες που ακολουθούν φαίνονται οι τιμές σχεδίασης 50 και 100 ετών ταχύτητας ανέμου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Και εδώ η ταχύτητα του ανέμου U_w υπολογίζεται στα 10 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι ισοσταθμικές καμπύλες των τιμών σχεδίασεως ταχύτητας ανέμου είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου η τιμή σχεδίασεως είναι σταθερή.

Χάρτης τιμής σχεδίασης 50 ετών ταχύτητας ανέμου



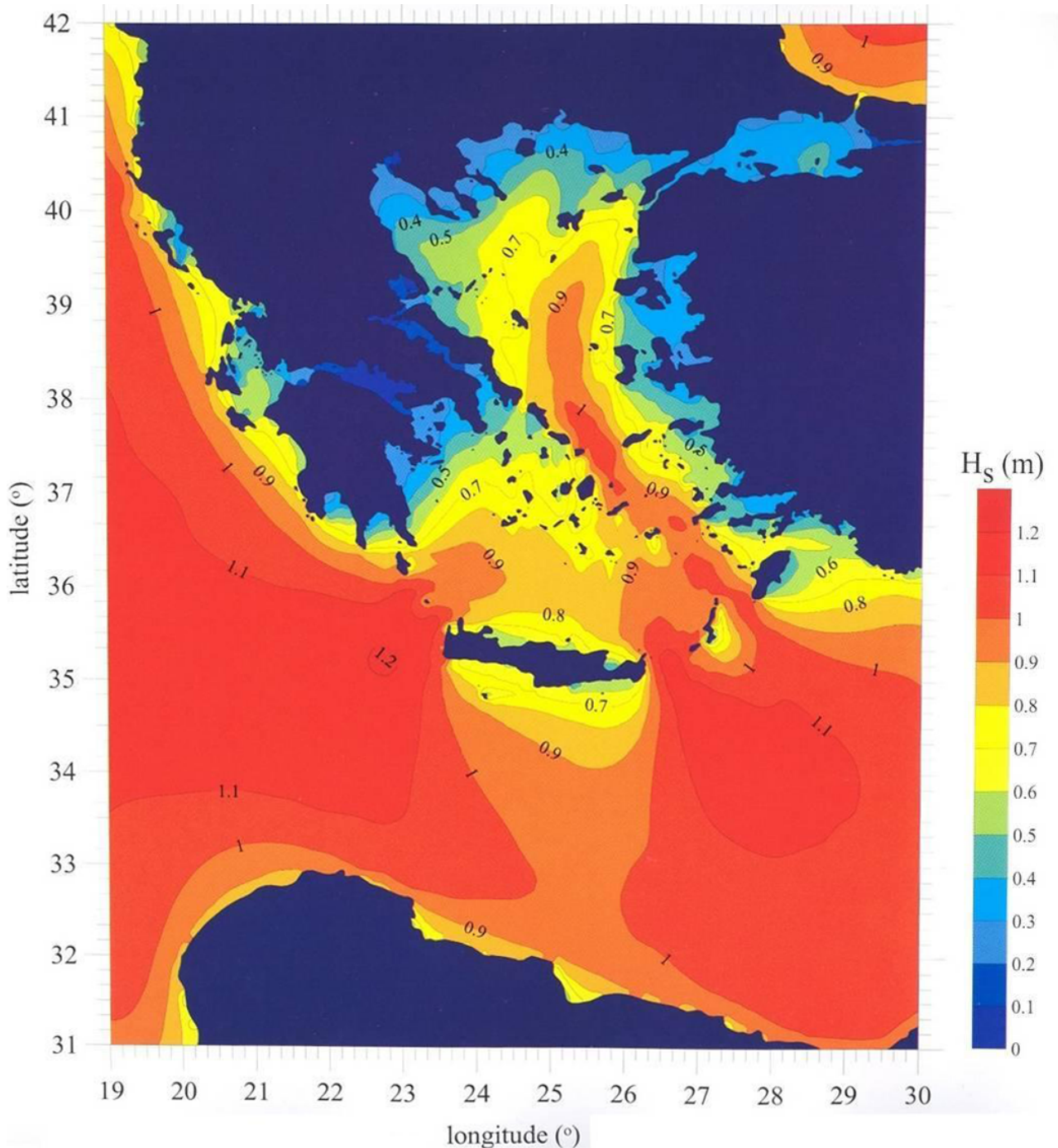
Χάρτης τιμής σχεδίασης 100 ετών ταχύτητας ανέμου



Χάρτες Μέσου Σημαντικού Ύψους Κύματος

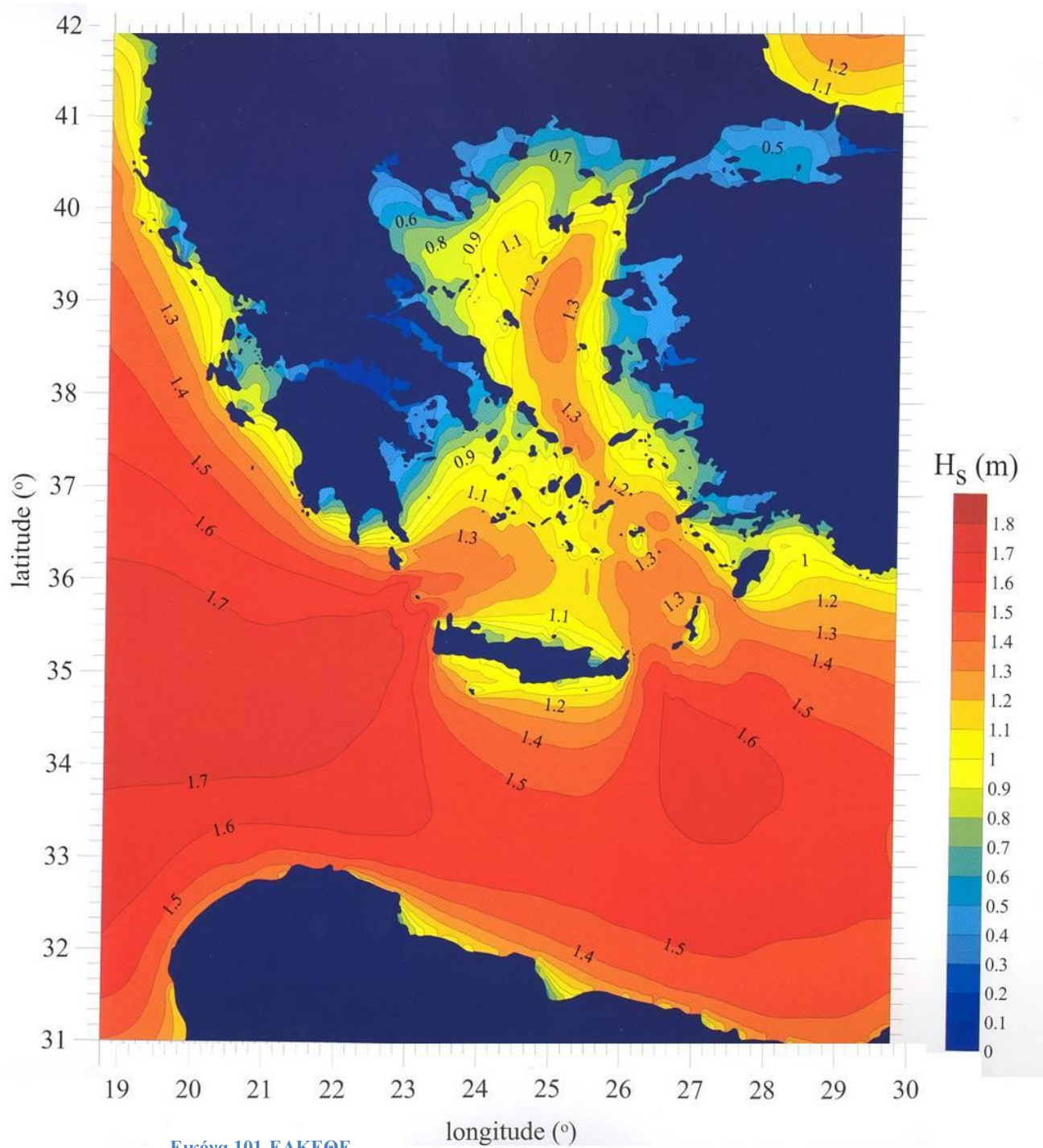
Στους επόμενους χάρτες παρουσιάζεται το ετήσιο σημαντικό ύψος κύματος H_s . Και εδώ οι ισοσταθμικές καμπύλες αποτελούν το γεωμετρικό τόπο των σημείων όπου η μέση τιμή του σημαντικού ύψους είναι σταθερή.

Σημαντικό Ύψος Κύματος, Φθινόπωρο

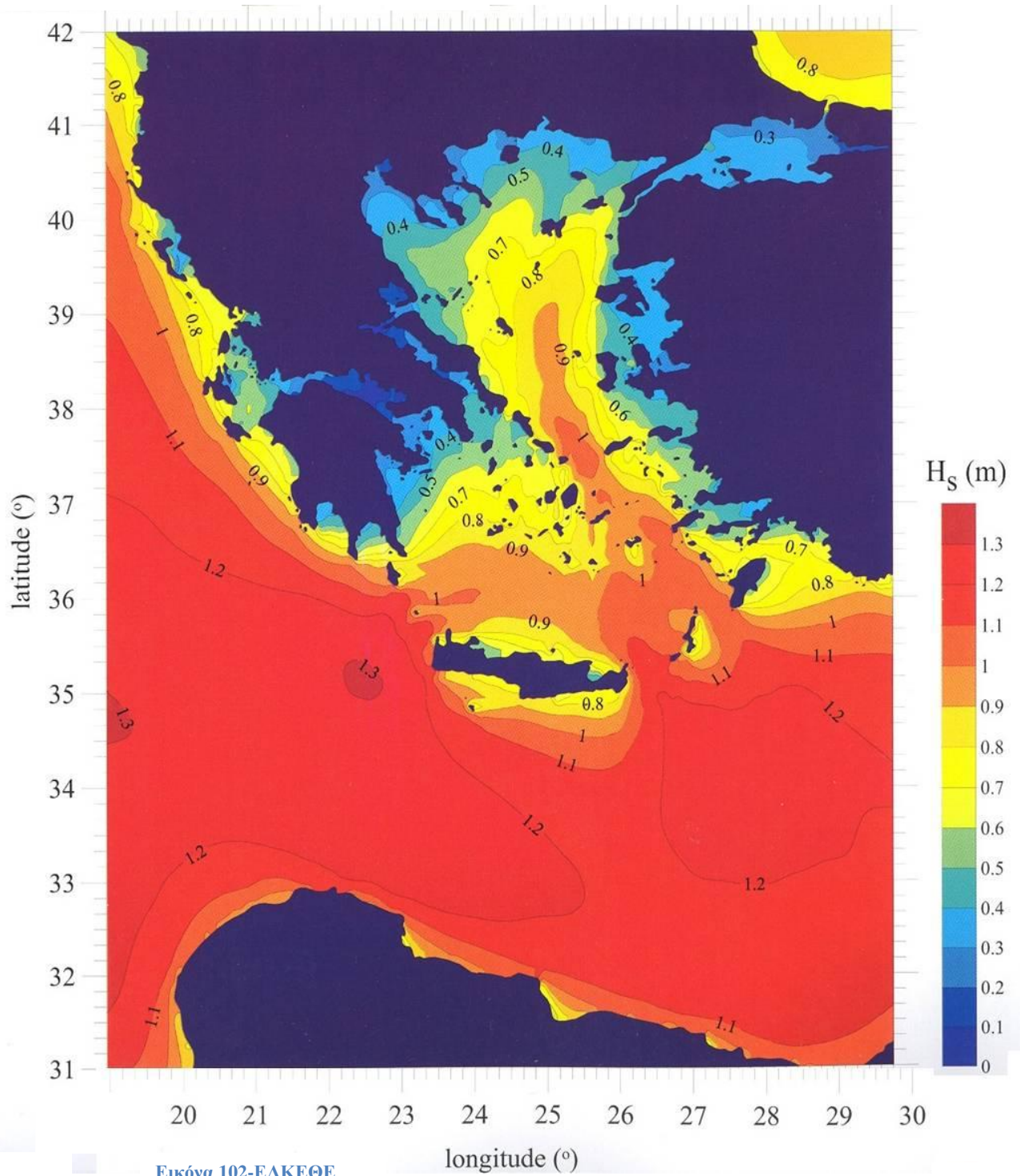


Εικόνα 100-ΕΛΚΕΘΕ

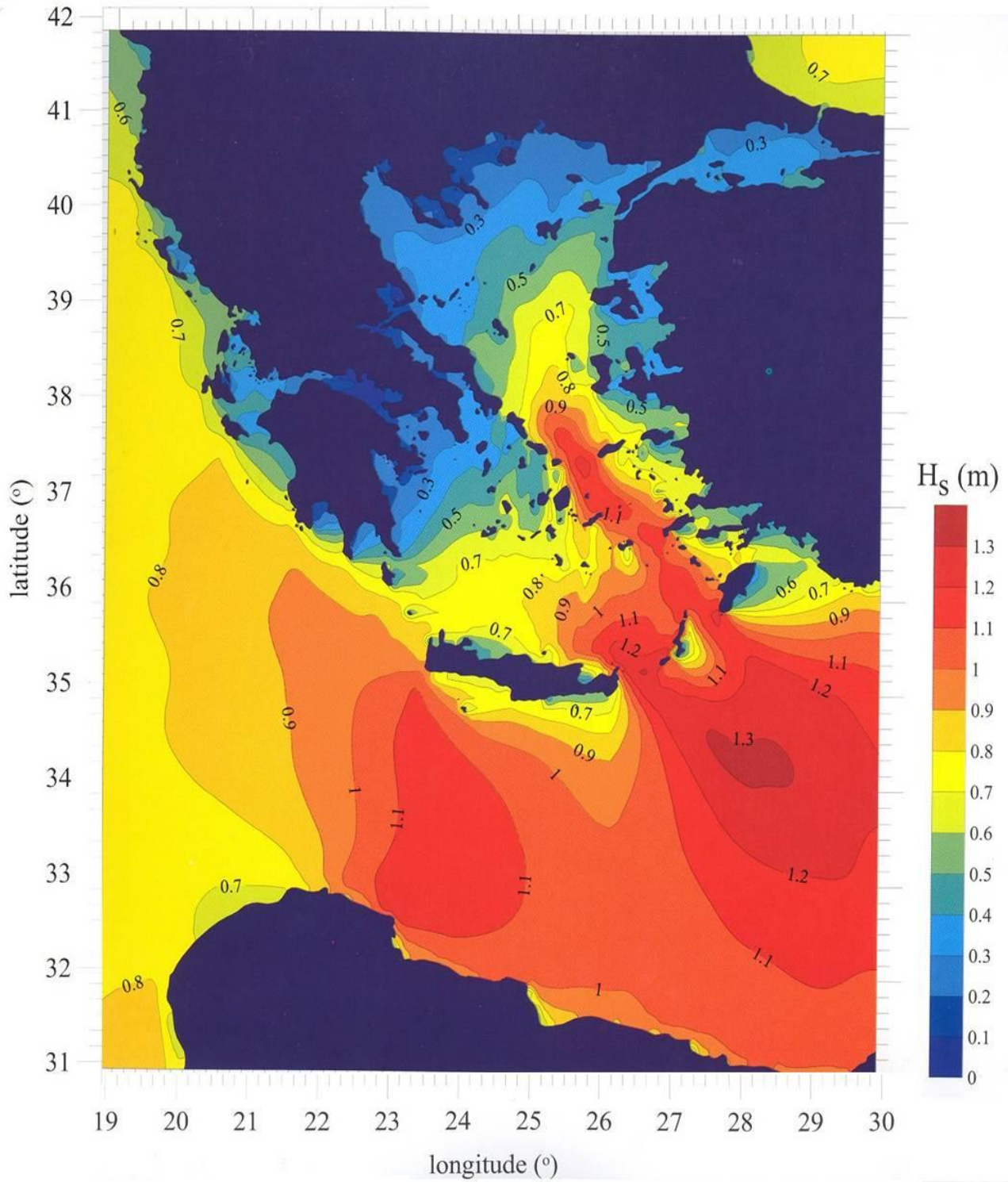
Σημαντικό Ύψος Κύματος, Χειμώνας



Σημαντικό Υψος Κύματος, Άνοιξη

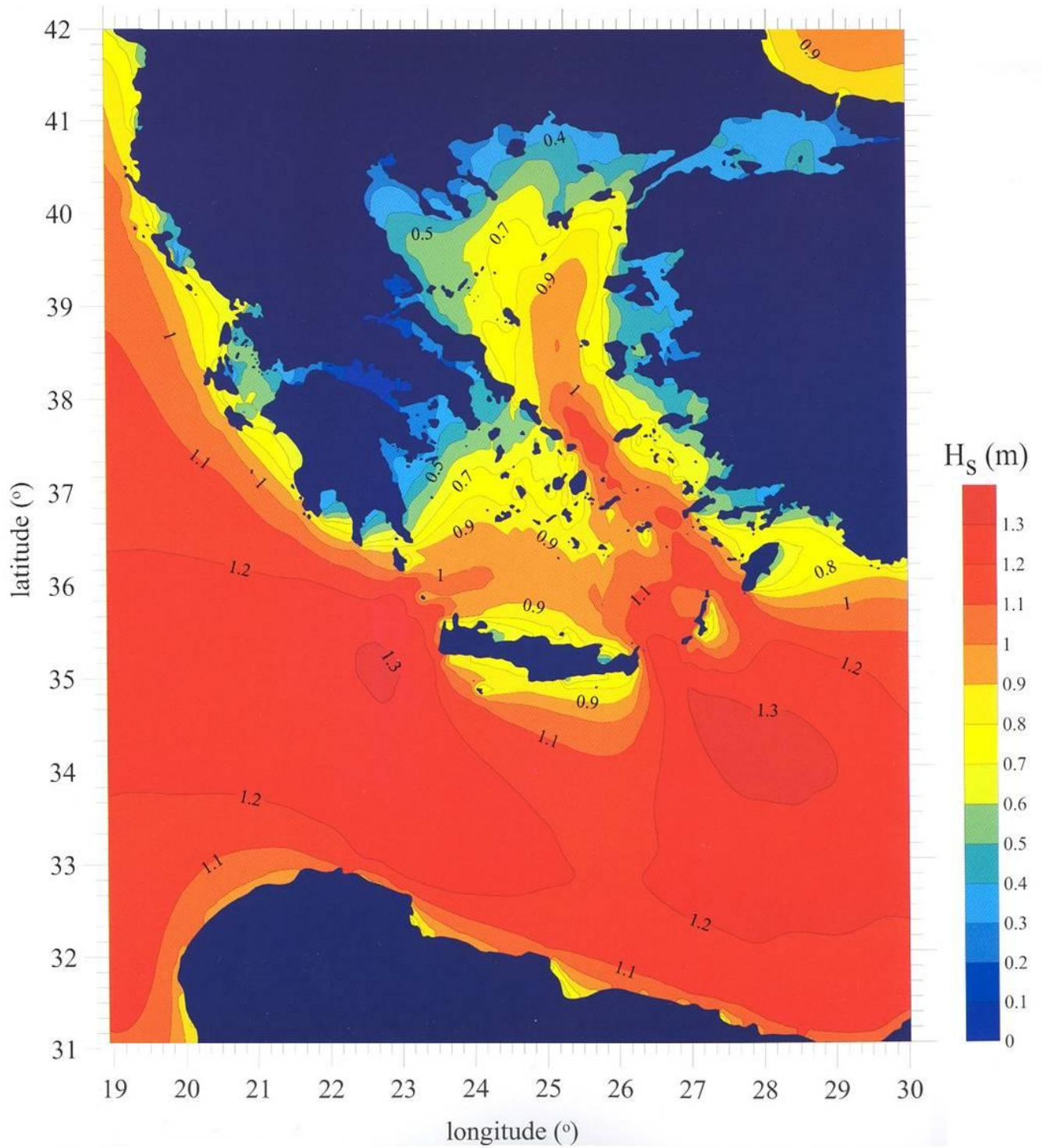


Σημαντικό Ύψος Κύματος, Καλοκαίρι



Εικόνα 103-ΕΑΚΕΘΕ

Μέσο Ετήσιο σημαντικό Ύψος Κύματος



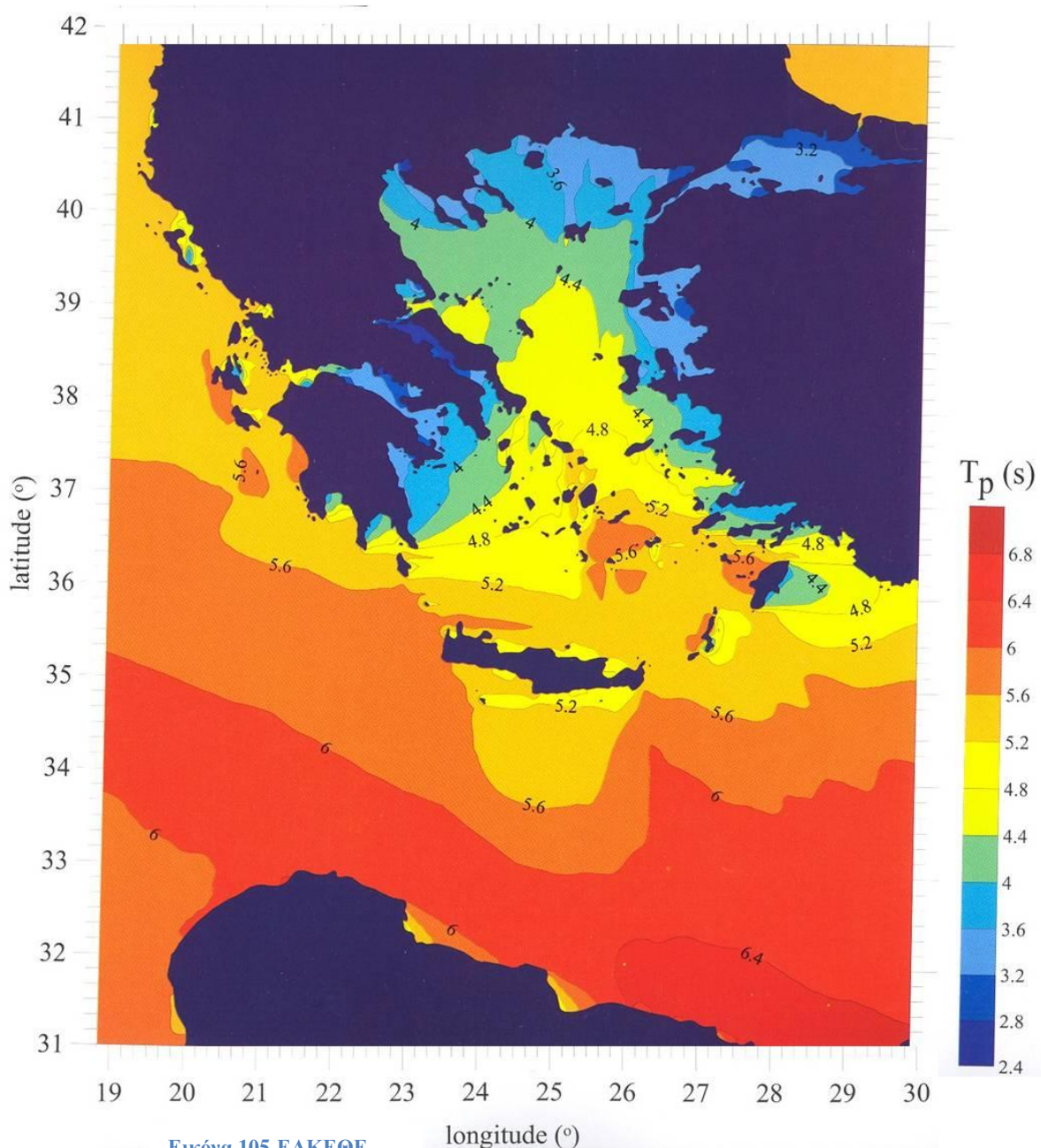
Εικόνα 104-ΕΑΚΕΘΕ

Χάρτες μέσης περιόδου Κορυφής Φάσματος

Ο χάρτης που ακολουθεί παρουσιάζει την ετήσια περίοδο κορυφής φάσματος T_p . Οι ισοσταθμικές καμπύλες είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου η εποχιακή μέση τιμή της περιόδου κορυφής φάσματος είναι σταθερή.

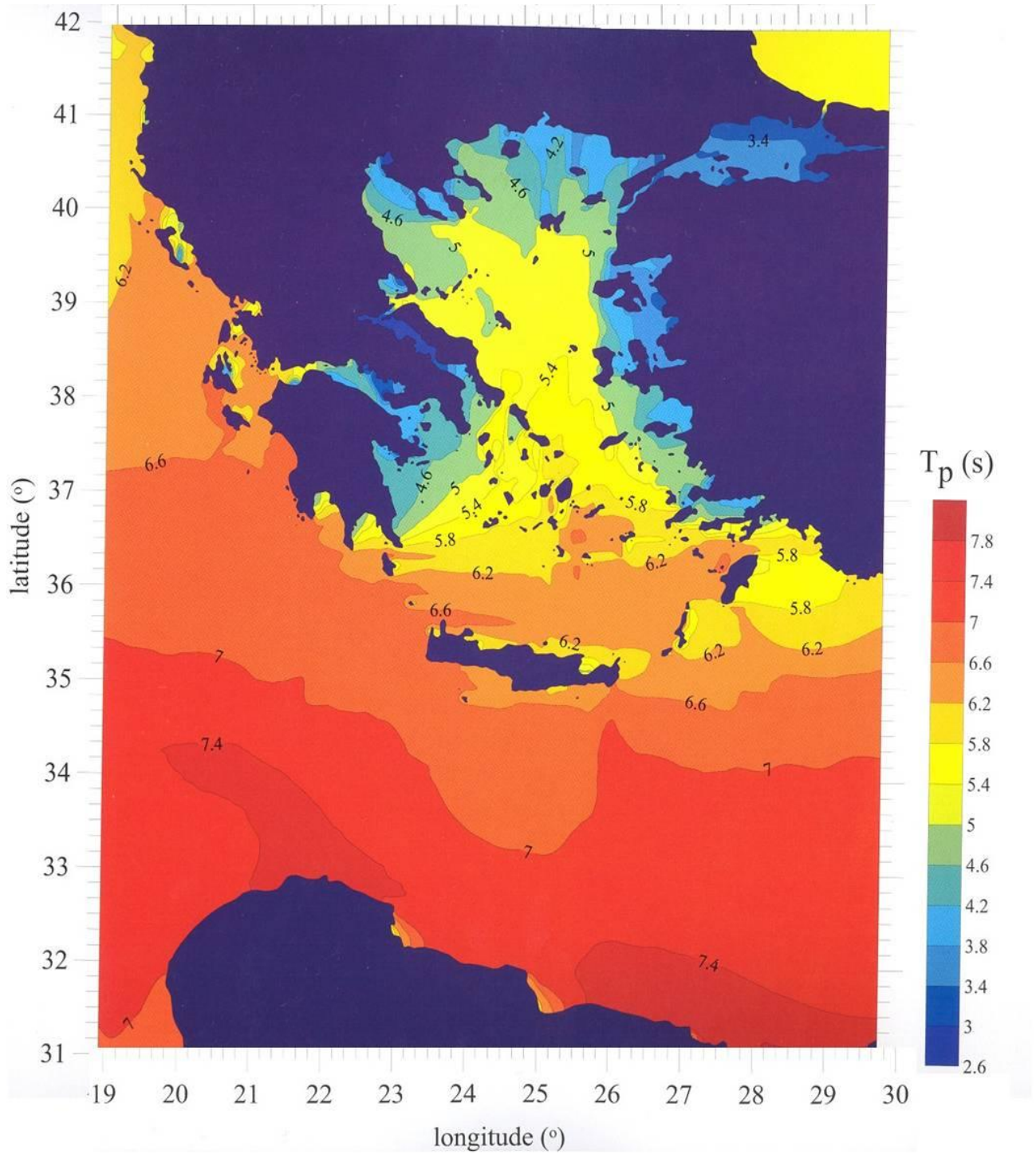
Από τους χάρτες παρατηρούμε ότι τόσο στο χώρο του Αιγαίου όσο και του Ιονίου η μέση περίοδος του κύματος κυμαίνεται από 3,6 έως 6 s. Στους υπολογισμούς που ακολουθούν χρησιμοποιούνται αυτές οι τιμές (σημαντικό ύψος κύματος, περίοδος κορυφής φάσματος) για την παραμετρική ανάλυση της εξάρτησης των φορτίων που εμφανίζονται στην ανεμογεννήτρια από την κίνηση του πλωτήρα.

Μέση Περίοδος Κύματος, Φθινόπωρο



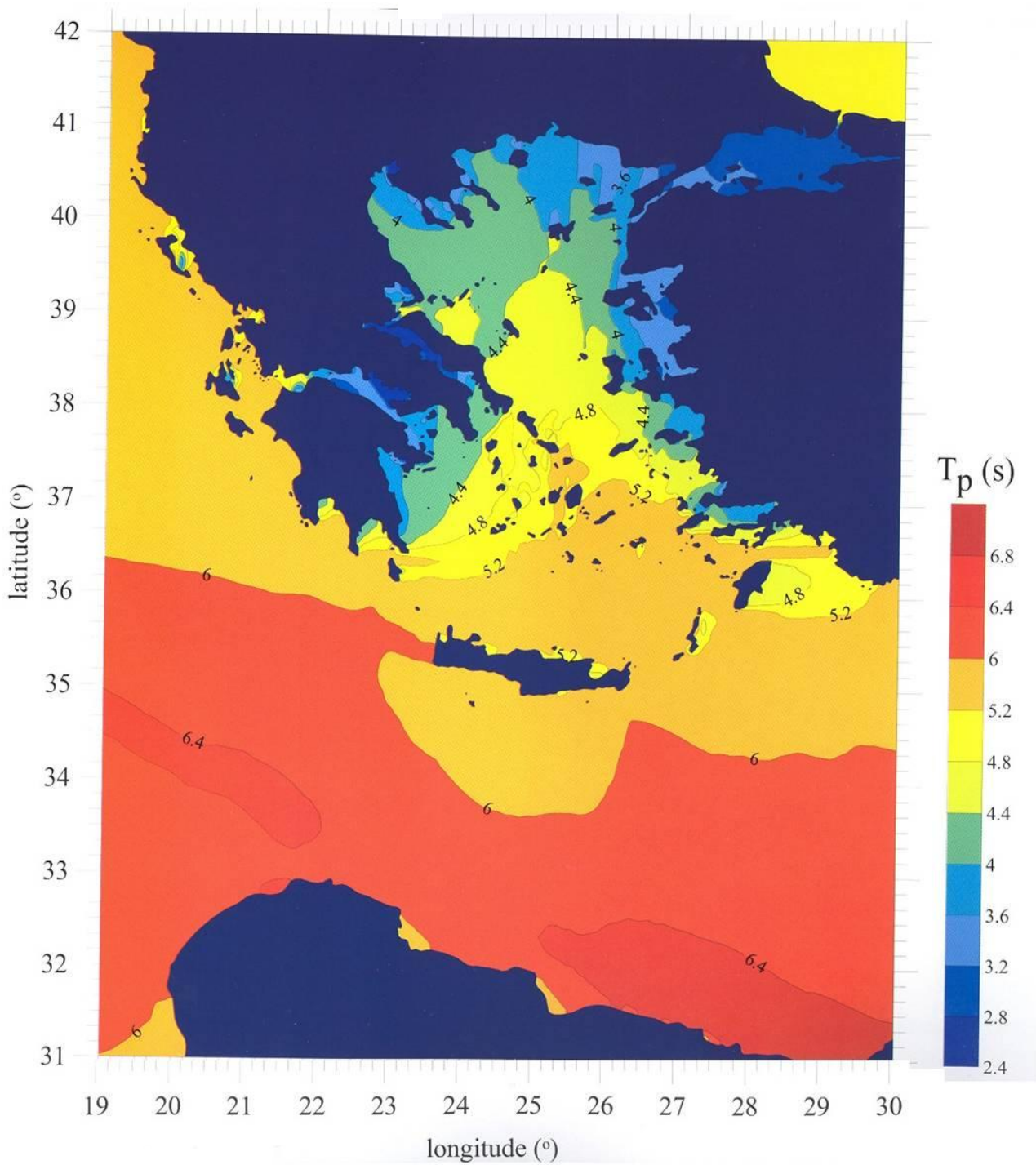
Εικόνα 105-ΕΑΚΕΘΕ

Μέση Περίοδος Κύματος, Χειμώνας



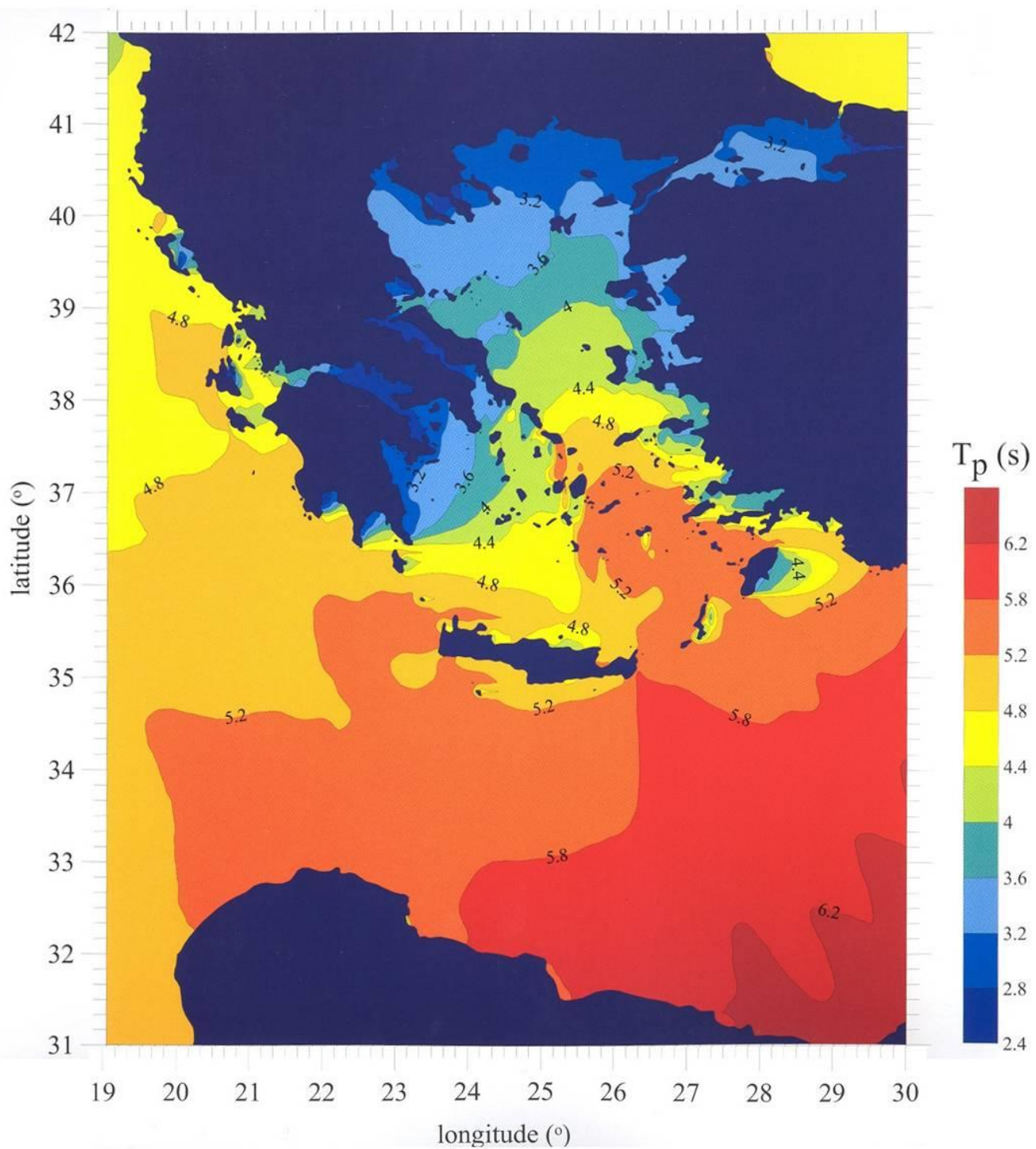
Εικόνα 106-ΕΑΚΕΘΕ

Μέση Περίοδος Κύματος, Άνοιξη



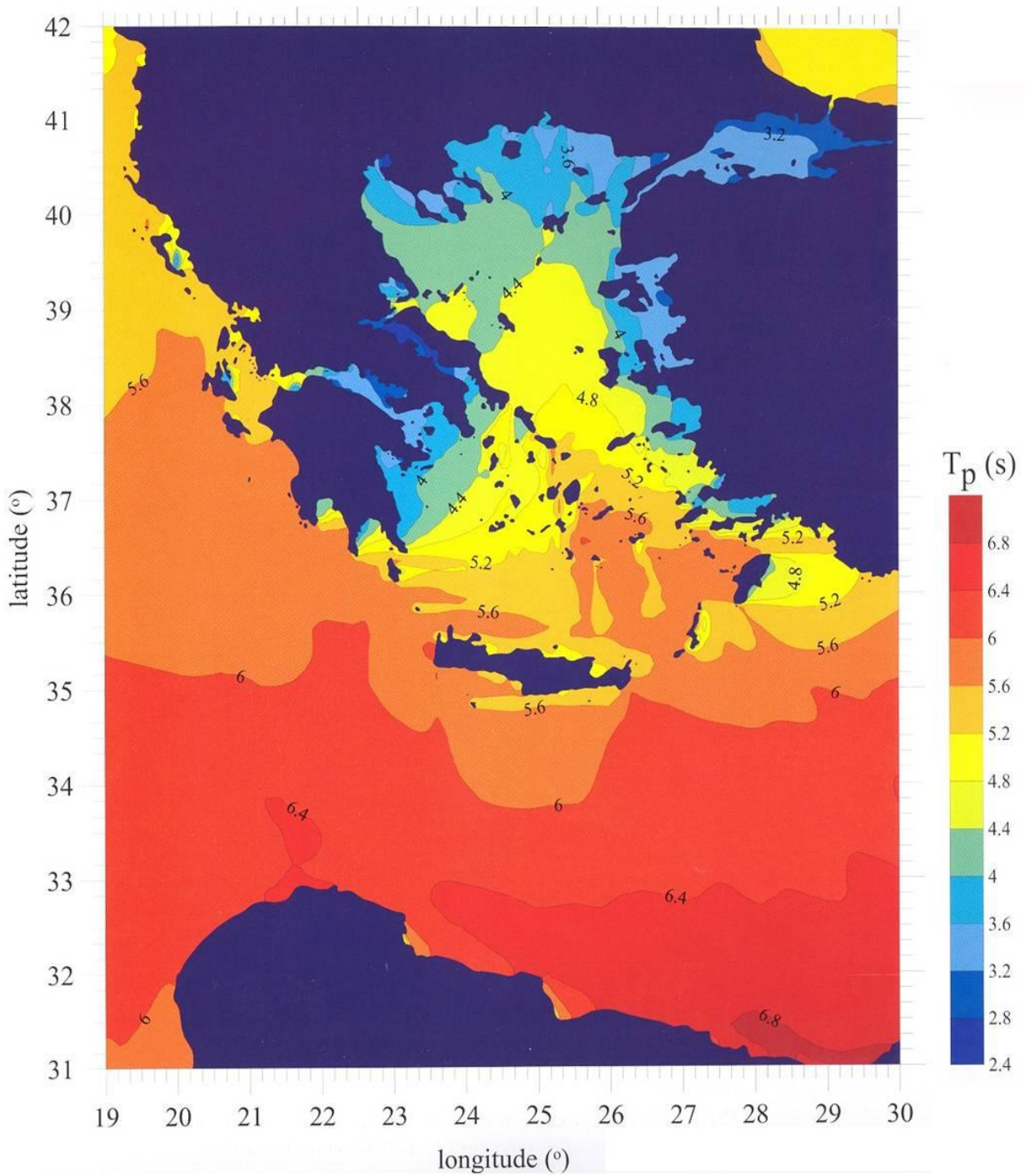
Εικόνα 107ΕΑΚΕΘΕ

Μέση Περίοδος Κύματος, Καλοκαίρι



Εικόνα 108-ΕΛΚΕΘΕ

Μέση Ετήσια Περίοδος Κύματος



Εικόνα 109-ΕΑΚΕΘΕ

Ισοπληθείς Καμπύλες ταχύτητας ανέμου

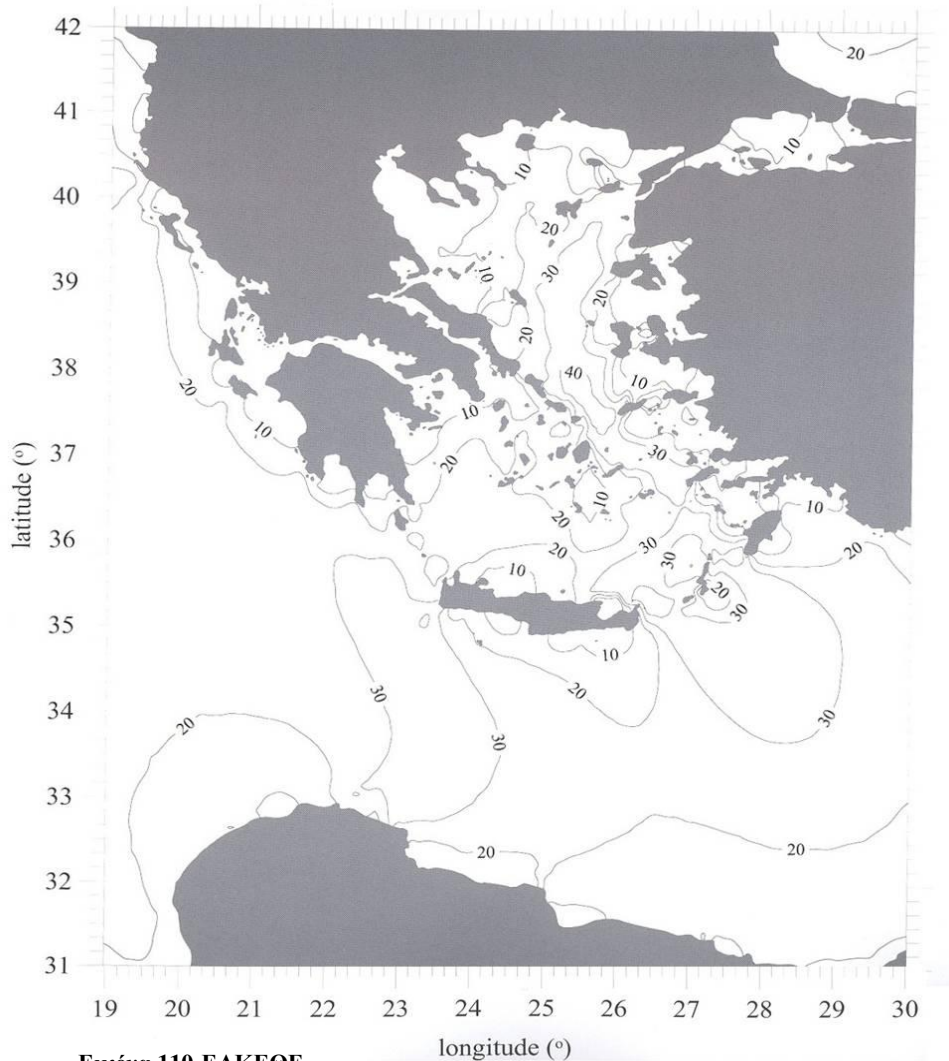
Καθώς μια ανεμογεννήτρια παράγει την ονομαστική της ισχύ για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες των 11 m/s είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε την πιθανότητα εμφάνισης αυτών των ταχυτήτων. Τα επόμενα δυο διαγράμματα παρουσιάζουν την πιθανότητα εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου μεγαλύτερων των 8 m/s και 11 m/s στα 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Στα 90 m που βρίσκεται η πλήμνη οι ταχύτητες αυτές είναι για τις τιμές 8 και 11 αντίστοιχα:

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^a \Rightarrow U = 8 \cdot \left(\frac{90}{10}\right)^{0,2} \Rightarrow U = 12,41 \text{ m/s}$$

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^a \Rightarrow U = 11 \cdot \left(\frac{90}{10}\right)^{0,2} \Rightarrow U = 17,07 \text{ m/s}$$

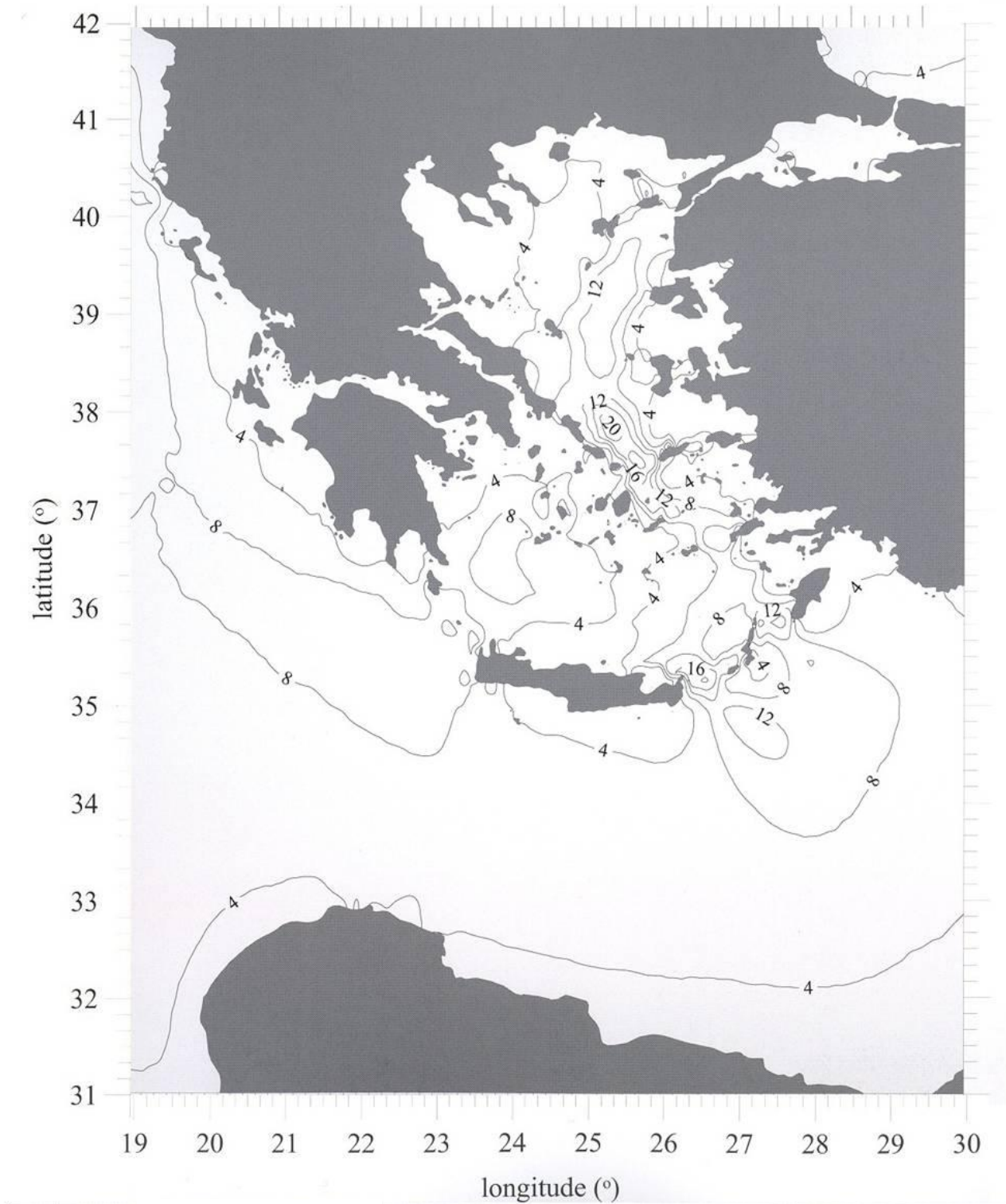
Οι ισοπληθείς καμπύλες της ταχύτητας ανέμου είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου η συχνότητα εμφάνισης P ταχυτήτων ($U_w > 8\text{m/s}$, $U_w > 11\text{m/s}$ αντίστοιχα) έχει σταθερή τιμή. Η τιμή αυτή εμφανίζεται στους χάρτες ως ποσοστό.

Ισοπληθείς Ταχύτητες Ανέμου ετησίως για $U_w > 8\text{m/s}$



Εικόνα 110-ΕΛΚΕΘΕ

Ισοπληθείς Ταχύτητες Ανέμου ετησίως για $U_w > 11\text{m/s}$



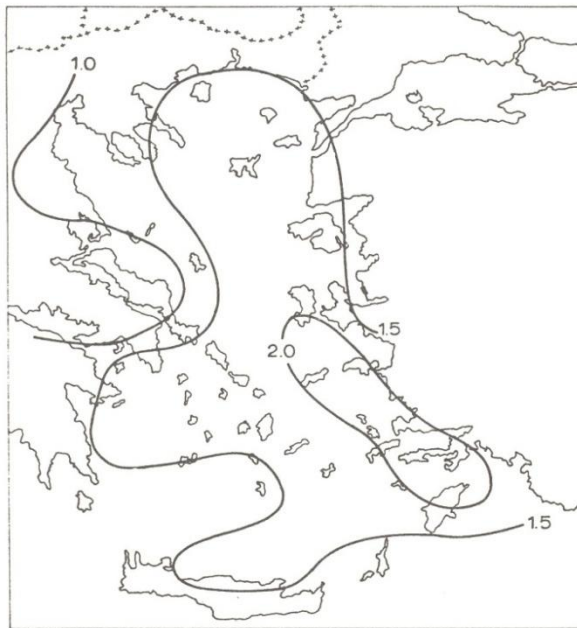
Εικόνα 111-ΕΛΚΕΘΕ

3.2 Ετήσια παραγωγή ενέργειας

Για τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού στο ύψος της πλήμνης (90 m) θα χρησιμοποιήσουμε τον εκθετικό νόμο, λόγω της απλότητάς του. Ο εκθέτης a αποτελεί μια ένδειξη της μορφής της επιφάνειας του εδάφους, όπου για τη θάλασσα τυπική τιμή θεωρείται $a = 0,2$ (σύμφωνα με τους κανονισμούς του OC3).

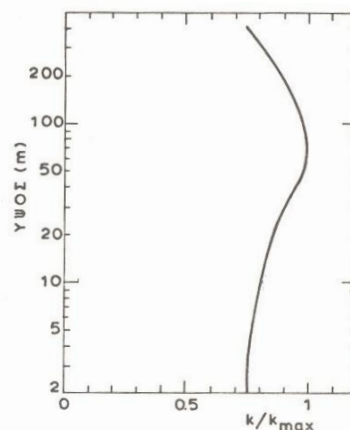
$$\frac{U(z)}{U(z_0)} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^a \quad \text{Όπου } z_0 = 10 \text{ m}$$

Για τον υπολογισμό της ισχύος που παράγει η μια ανεμογεννήτρια των 5 MW ετησίως χρησιμοποιούμε την κατανομή Weibull. Ο συντελεστής k της καμπύλης υπολογίζεται με βάση το ακόλουθο διάγραμμα σε ύψος 10 m.



Εικόνα 112-Αιολική Ενέργεια & Βιομηχανική Ρευστομηχανική

Παρατηρούμε ότι στην περιοχή των Δωδεκανήσων το k έχει τη μέγιστη τιμή του, δηλαδή ίσο με 2. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην περιοχή αυτή η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου ως προς τη μέση τιμή να είναι η ελάχιστη. Σε ύψος 90 m όμως που βρίσκεται η πλήμνη η τιμή της παραμέτρου k αλλάζει σύμφωνα με το ακόλουθο διάγραμμα.



Εικόνα 113-Αιολική Ενέργεια & Βιομηχανική Ρευστομηχανική

Έτσι για τον ελλαδικό χώρο θα έχουμε δύο τιμές της παραμέτρου k , μία για τα Δωδεκάνησα και μια για τις άλλες περιοχές. Τελικά προκύπτει:

$$k(\text{Δωδεκάνησα}, 90 \text{ m}) = 2,44$$

$$k(\text{Υπόλοιπη Ελλάδα}, 90 \text{ m}) = 1,82$$

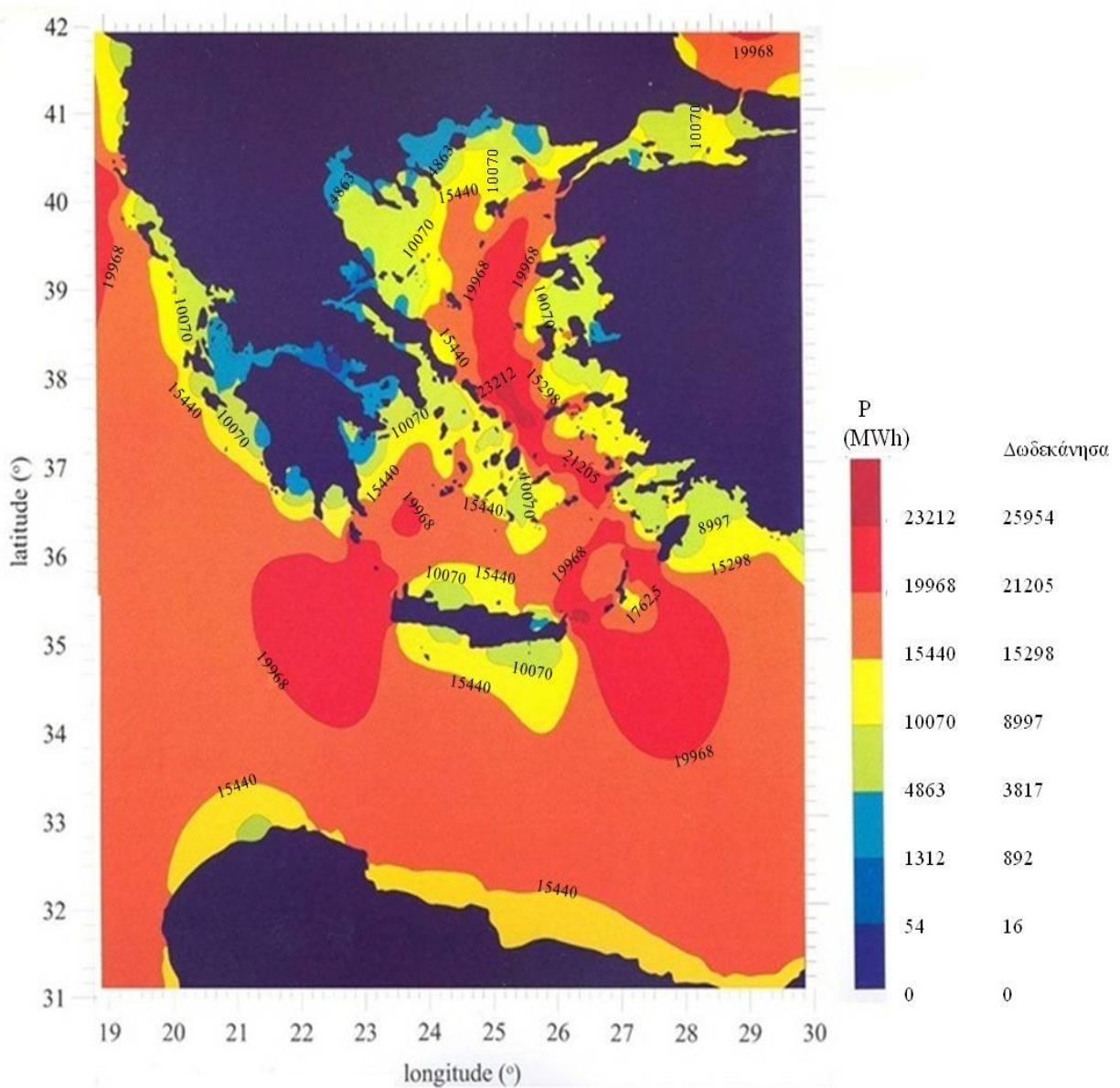
Για τον υπολογισμό της παραμέτρου c , δεδομένου ότι είναι γνωστή η μέση ταχύτητα σε κάθε περιοχή χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$\bar{V} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

Όπου Γ η συνάρτηση Γάμα.

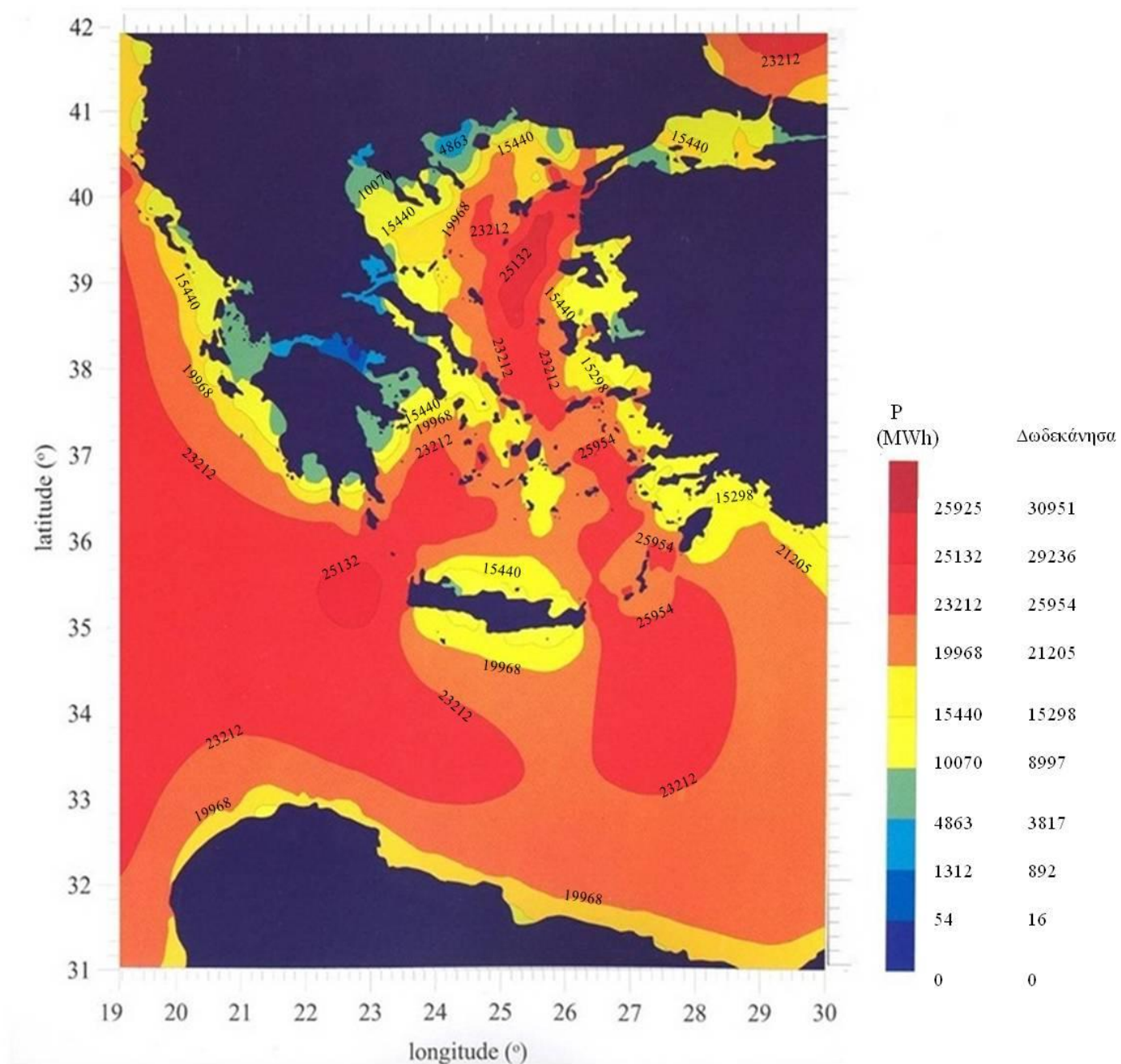
Έτσι οι χάρτες αιολικού δυναμικού γίνονται χάρτες ισχύος.

Παραγωγή Ισχύος, Φθινόπωρο



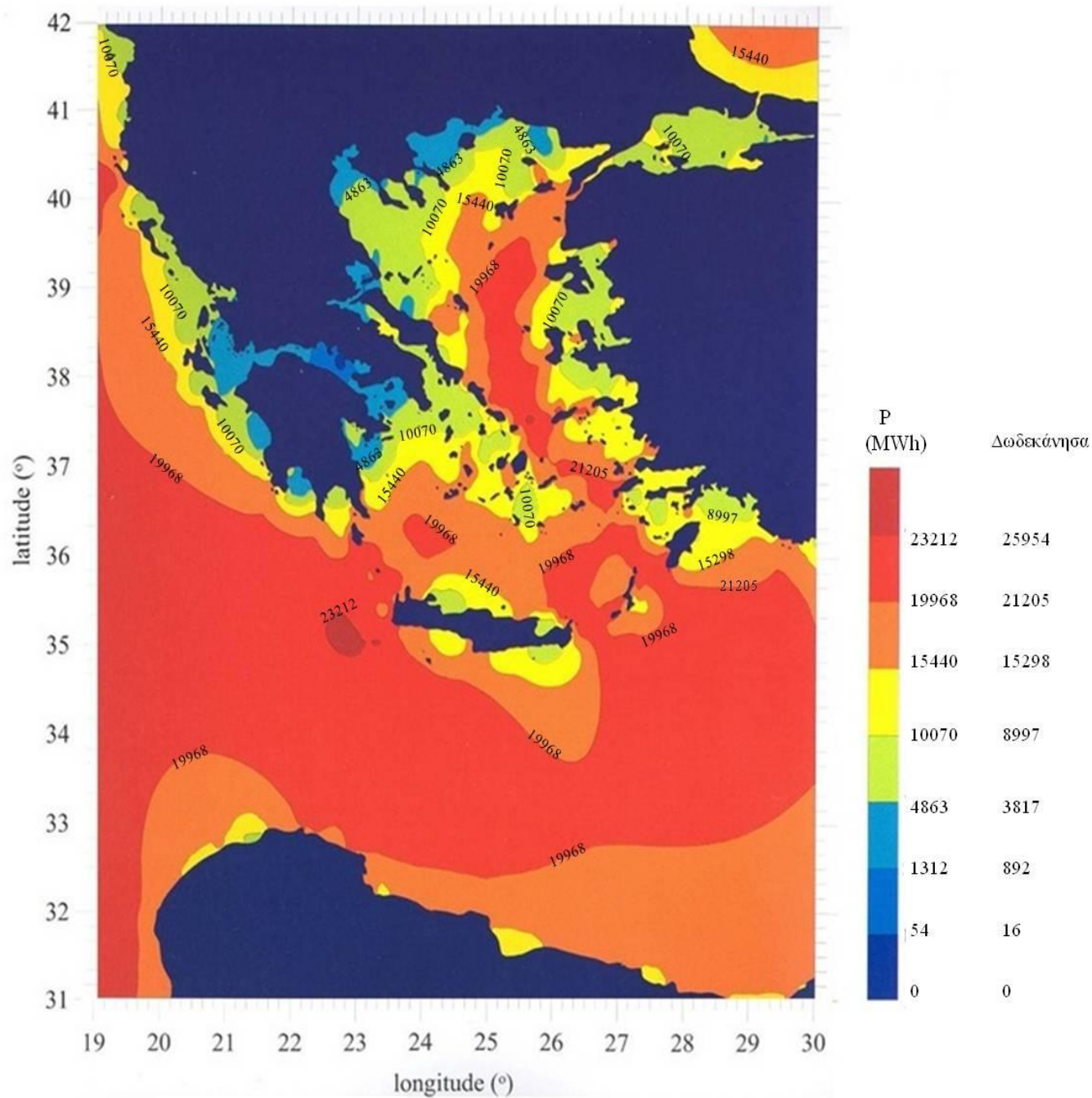
Εικόνα 114

Παράγωγή Ισχύος, Χειμώνας



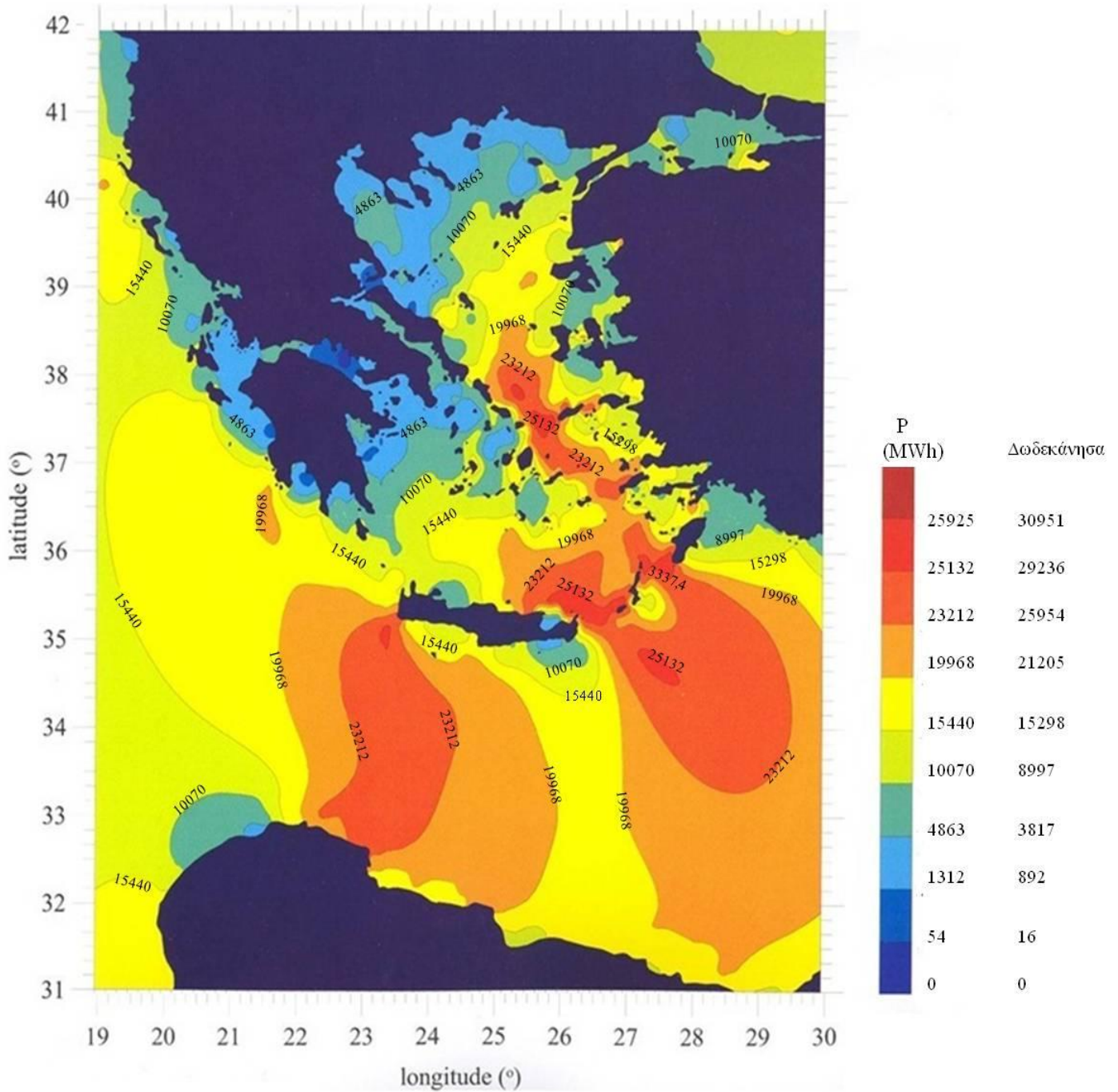
Εικόνα 115

Παρογωγή Ισχύος, Ανοιξη



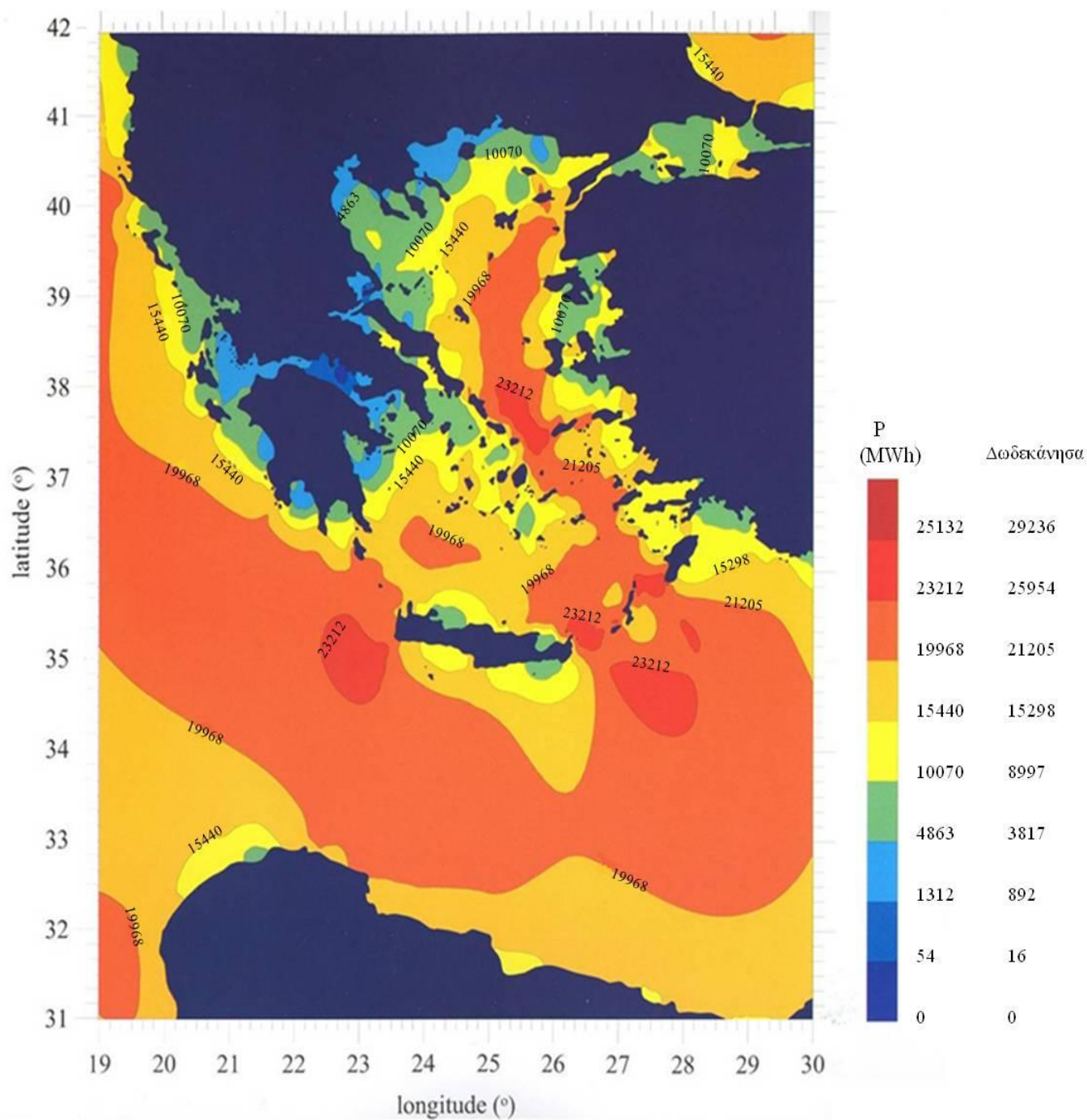
Εικόνα 116

Παραγωγή Ισχύος, Καλοκαίρι



Εικόνα 117

Ετήσια Παραγωγή Ισχύος

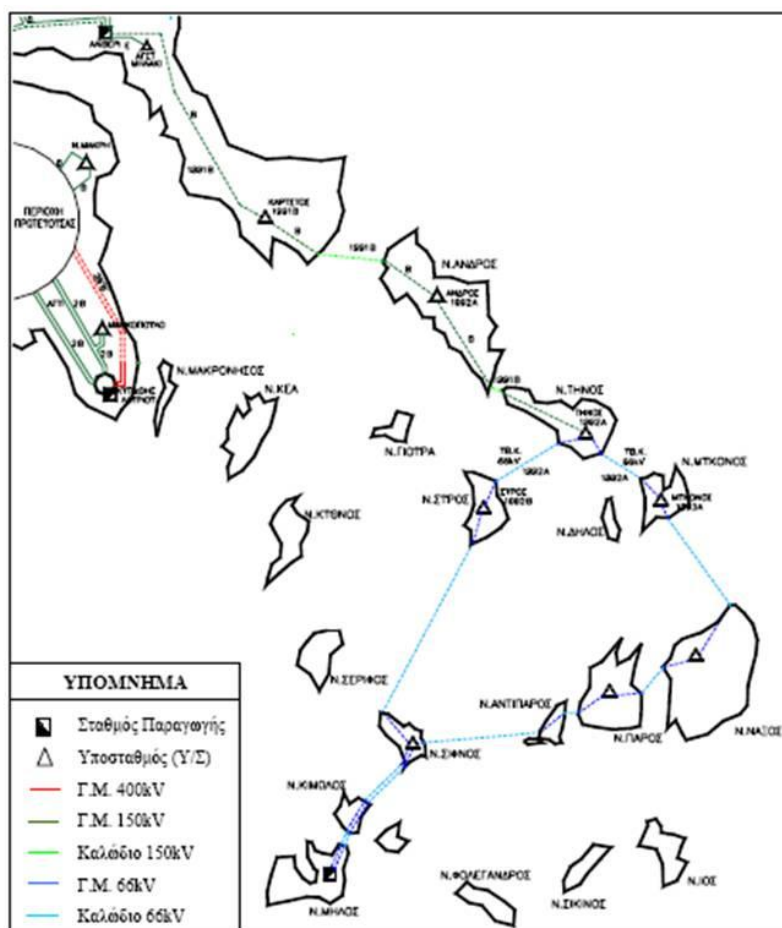


Εικόνα 118

3.3 Υπεράκτια αιολικά πάρκα στις Κυκλάδες

Το εξαιρετικό αιολικό δυναμικό του Αιγαίου και η μη δυνατότητα διασύνδεσης των περισσότερων νησιών με την ηπειρωτική Ελλάδα, καθιστούν απαραίτητη την εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων στις ελληνικές θάλασσες για την κάλυψη ενός μέρους των ενεργειακών αναγκών τόσο της ηπειρωτικής Ελλάδας όσο και των νησιών. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η μελέτη γύρω από τις Κυκλάδες, καθώς σύμφωνα και με δηλώσεις του υπουργείου περιβάλλοντος οι Κυκλάδες αποτελούν άμεση προτεραιότητα για την προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Για την επιλογή της κατάλληλης περιοχής όπου θα γίνει η εγκατάσταση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, απαραίτητη είναι η γνώση όχι μόνο του αιολικού δυναμικού αλλά και του βάθους της θάλασσας καθώς και της υποδομής, δηλαδή της διασύνδεσης των νησιών μεταξύ τους και με την ηπειρωτική Ελλάδα. Οι ναυτικοί χάρτες που απεικονίζουν το βάθος της θάλασσας γύρω από τις Κυκλάδες βρίσκονται στο Παράρτημα Ι. Ο ακόλουθος χάρτης δείχνει τη διασύνδεση των Κυκλάδων όπως έχει προγραμματισθεί μέχρι σήμερα.



Εικόνα 119

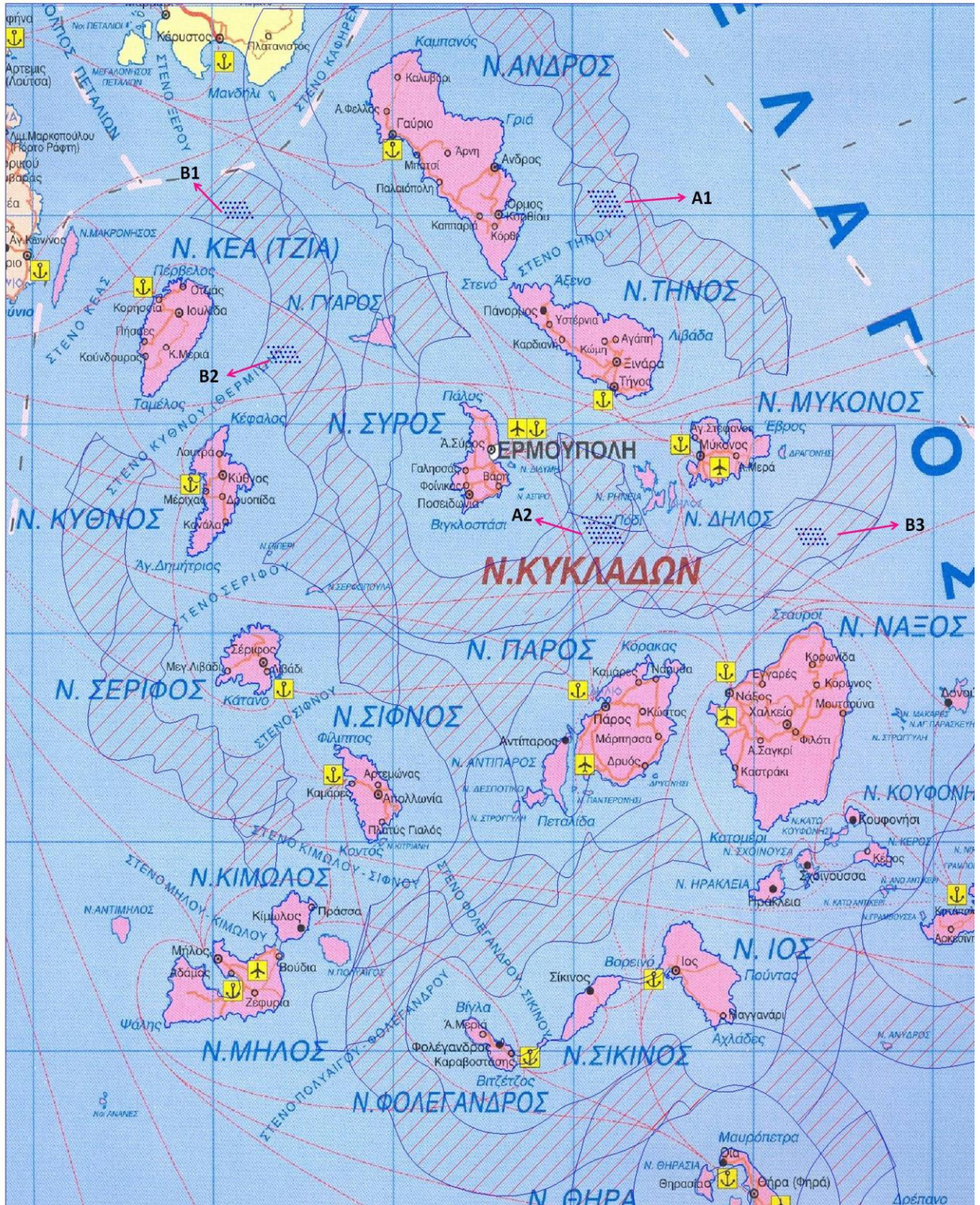
Όπως φαίνεται η πλειοψηφία των νησιών των Κυκλάδων είναι αυτόνομα αν και έχουν γίνει πολλές προτάσεις για την επέκταση της διασύνδεσης τους. Η κατασκευή θαλάσσιων αιολικών πάρκων απαιτεί την αναβάθμιση του υποθαλάσσιου δικτύου για τη μεταφορά της ενέργειας.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία γίνεται η επιλογή των κατάλληλων σημείων για τοποθέτηση των αιολικών πάρκων, καθώς και η ονομαστική τους ισχύ. Η ονομαστική ισχύς των πάρκων που θα συνδεθούν απευθείας σε καλώδια 150 kV είναι μεγαλύτερη από αυτών που θα συνδεθούν στα καλώδια των 66 kV. Στην πορεία υπολογίζεται με τη βοήθεια της καμπύλης Weibull η ενέργεια που αναμένεται να παράγουν ετησίως.

Για την αποφυγή οπτικής όχλησης τα πάρκα εγκαθίστανται σε απόσταση ανάμεσα στα 10 και 20 km από την ακτή. Η απόσταση από τις ακτοπλοϊκές γραμμές είναι 1 km εκατέρωθεν. Στο χάρτη που ακολουθεί φαίνονται με διαγράμμιση όλες οι περιοχές που μπορούν να εγκατασταθούν αιολικά πάρκα και τα προτεινόμενα αιολικά πάρκα λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση από την ακτή. Το εμβαδό που καλύπτεται είναι 6.364 km². Αν λάβουμε υπόψη μας ότι κάθε ανεμογεννήτρια των 5 MW καλύπτει χώρο έκτασης 0,112 km² (θεωρείται ότι κάθε μηχανή χρειάζεται μια περιοχή σχήματος κύκλου με ακτίνα 3D, προκειμένου να αποφεύγεται όσο το δυνατόν περισσότερο το φαινόμενο του ομόρρου), τότε το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό της θαλάσσιας περιοχής των Κυκλάδων ανέρχεται σε 284 GW, δηλαδή σε μια ετήσια ηλεκτρική παραγωγή της τάξης περίπου των 2.000.000 TWh.

Προτείνεται η εγκατάσταση δύο μεγάλων αιολικών πάρκων ονομαστικής ισχύος 180 MW, τα οποία θα αποτελούνται από 36 ανεμογεννήτριες των 5 MW το καθένα. Το ένα θα εγκατασταθεί ανατολικά της Άνδρου και της Τήνου (A1) και το άλλο ανάμεσα στη Σύρο και στη Μύκονο (A2). Στη συνέχεια προτείνεται η εγκατάσταση τριών μικρότερων αιολικών πάρκων, ονομαστικής ισχύος 120 MW, τα οποία θα αποτελούνται από 24 ανεμογεννήτριες των 5 MW το καθένα. Το πρώτο από αυτά θα τοποθετηθεί βορειο-ανατολικά της Κέας (B1), το δεύτερο ανατολικά της Κέας (B2) και το τρίτο νοτιο-ανατολικά της Μυκόνου.

Η παραγωγή ισχύος ετησίως προκύπτει από το χάρτη του προηγούμενου κεφαλαίου. Έτσι τα πάρκα A1 και B3 παράγουν ετησίως 1.198 GWh, το πάρκο A2 παράγει 556 GWh και τα B1 και B2 483 GWh. Άρα συνολικά τα προτεινόμενα υπεράκτια αιολικά πάρκα παράγουν ετησίως 2.237 GWh. Η κατανάλωση της χώρας μας ετησίως ανέρχεται περίπου σε 60 TWh. Άρα τα υπεράκτια αιολικά πάρκα γύρω από τη νησιωτική περιοχή των Κυκλάδων θα καλύπτουν το 3,7% της ετήσιας ζήτησης σε ενέργεια.



Πιθανές εκτάσεις εγκατάστασης υπεράκτιων αιολικών πάρκων γύρω από τη θαλάσσια περιοχή των Κυκλάδων
 Ενδεικτική εγκατάσταση πέντε αιολικών πάρκων συνολικής ισχύος 300 MW
 Εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό: 284 GW

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Περιγραφή Κώδικα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του in-house κώδικα GAST (General Aerodynamic and Structural Tool), που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της απόκρισης μιας ανεμογεννήτριας. Μπορεί να εφαρμοσθεί σε:

- ✿ Ανάλυση ιδιοτιμών σε μεταβατικές και σε συνθήκες ισορροπίας
- ✿ Ανάλυση ευστάθειας για χρονικά σταθερές και χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες
- ✿ Αεροελαστικές προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου

Αρχικά ο κώδικας γράφτηκε για υπολογισμό φορτίων ανεμογεννητριών επί εδάφους. Με ορισμένες τροποποιήσεις μετατράπηκε σε κώδικα για υπεράκτιες, στον οποίο όμως δε λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του συστήματος αγκυροβόλησης ενώ η ύπαρξη της πλατφόρμας εισάγεται ως ένα σύστημα έξι βαθμών ελευθερίας στη βάση του πύργου το οποίο πραγματοποιεί ημιτονοειδή κίνηση σε όλους τους βαθμούς.

Αεροδυναμική Ανάλυση Ανεμογεννητριών Οριζοντίου Άξονα

Η αεροδυναμική ανάλυση του δρομέα της ανεμογεννήτριας έχει γίνει σύμφωνα με τη θεωρία δίσκου ορμής και τη μέθοδο των στοιχείων πτερύγωσης. Οι μεθοδολογίες αυτές συνδυάζουν το θεώρημα διατήρησης της ορμής και το θεώρημα διατήρησης της ροπής της ορμής, εκφρασμένων κατά μήκος του άξονα ενός δρομέα, με τη θεωρία των στοιχείων πτερύγωσης. (Ριζιώτης, 2003) Ο μη μόνιμος χαρακτήρας της εισερχόμενης ροής, λόγω στοχαστικότητας του ανέμου λαμβάνεται υπόψη μέσω της πρόσθεσης ενός αδρανειακού όρου στην εξίσωση αξονικής επαγωγής. Ο όρος αυτός προέρχεται από την ολοκλήρωση των μη μόνιμων όρων της εξίσωσης της ορμής.

Η εισερχόμενη ροή επηρεάζει το πώς αντιλαμβάνεται ο δρομέας της ανεμογεννήτριας τη φαινόμενη ταχύτητα W , καθώς και το λόγο των ταχυτήτων. Έτσι έχουμε:

Κάθετη ροή

Σε αυτήν την περίπτωση ο λόγος ταχυτήτων δίνεται από τη σχέση:

$$x_L = \frac{\Omega \cdot r}{V}$$

Και η συνολική φαινόμενη ταχύτητα από τη σχέση:

$$W = \sqrt{(V \cdot (1-a) \cdot \cos\phi_c)^2 + (\Omega \cdot r \cdot (1+a))^2}$$

Ροή με απόκλιση

Σε αυτήν την περίπτωση ανάλογα με τη γωνία αζιμουθίου ϕ_{az} του πτερυγίου προσθαφαιρείται μια ακόμα συνιστώσα της ταχύτητας. Μηδενική γωνία αζιμουθίου θεωρείται αυτή στην οποία το πτερύγιο βρίσκεται σε οριζόντια θέση με ανοδική πορεία.

Έτσι ο λόγος ταχυτήτων δίνεται από τη σχέση:

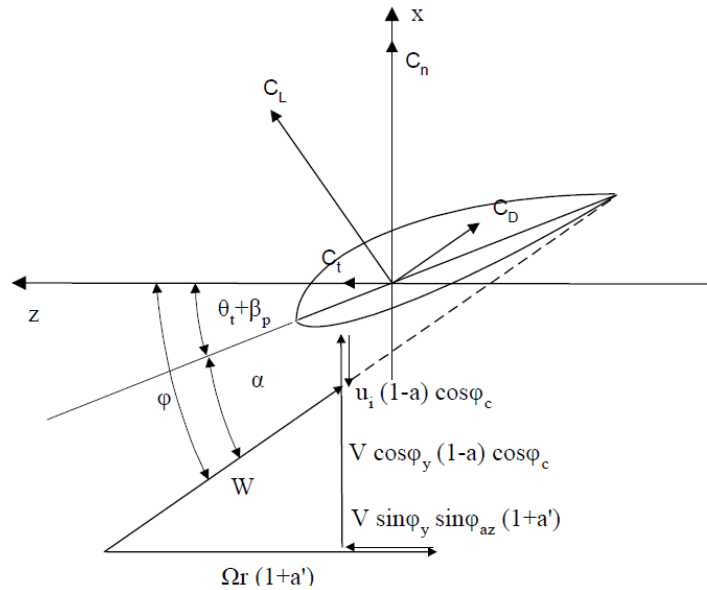
$$x_L = \frac{\Omega \cdot r - V \sin \phi_y \cdot \sin \phi_{az}}{V \cos \phi_y - u_i}$$

όπου u_i είναι μια συνιστώσα της αξονικής ταχύτητας η οποία μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με τη γωνία αζιμουθίου και οφείλεται στην κλίση του ομόρρου.

Η συνολική φαινόμενη ταχύτητα δίνεται από τη σχέση:

$$W = \sqrt{((V \cdot \cos \phi_y - u_i) \cdot (1-a) \cdot \cos \phi_c)^2 + ((\Omega r - V \sin \phi_y \cdot \sin \phi_{az}) \cdot (1+a'))^2}$$

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το τρίγωνο ταχυτήτων ενός στοιχείου πετερύγωσης του πτερυγίου ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.



Εικόνα 121-Ριζιότητα

Ροή με απόκλιση και επίδραση ελαστικότητας

Η ελαστική παραμόρφωση στα αεροδυναμικά φορτία του δρομέα εμφανίζεται μέσω δυο ταχυτήτων \dot{u} και \dot{w} οι οποίες αποτελούν τις ταχύτητες μετατόπισης των πετερυγίων κατά την αξονική και περιφερειακή ταχύτητα του δρομέα αντίστοιχα. (Ριζιώτης, 2003)

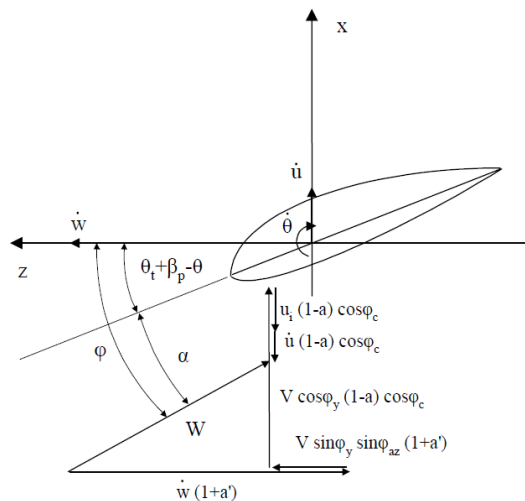
Σε αυτήν την περίπτωση ο λόγος ταχυτήτων δίνεται από τη σχέση:

$$x_L = \frac{\dot{w} - V \sin \phi_y \cdot \sin \phi_{az}}{V \cos \phi_y - u_i - \dot{u}}$$

Και η συνολική φαινόμενη ταχύτητα από τη σχέση:

$$W = \sqrt{((V \cdot \cos \phi_y - u_i - \dot{u}) \cdot (1-a) \cdot \cos \phi_c)^2 + ((\dot{w} - V \sin \phi_y \cdot \sin \phi_{az}) \cdot (1+a'))^2}$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το τρίγωνο ταχυτήτων ενός στοιχείου πετερύγωσης όταν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ελαστικότητας.



Εικόνα 122-Ριζιώτης

Κατά μήκος του πτερυγίου αναπτύσσονται δυνάμεις και ροπές, οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$F_n = \frac{\rho}{2} C_n(a) \cdot W^2 \cdot c \cdot \Delta r = \frac{\rho}{2} (C_L(a) \cdot \cos \phi + C_D(a) \cdot \sin \phi) \cdot W^2 \cdot c \cdot \Delta r$$

$$F_t = \frac{\rho}{2} C_t(a) \cdot W^2 \cdot c \cdot \Delta r = \frac{\rho}{2} (C_L(a) \cdot \sin \phi + C_D(a) \cdot \cos \phi) \cdot W^2 \cdot c \cdot \Delta r$$

$$M = \frac{\rho}{2} C_m(a) \cdot W^2 \cdot c \cdot \Delta r$$

όπου C_n και C_t οι συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής τοπικής δύναμης στο επίπεδο του δρομέα, C_L ο συντελεστής άνωσης, C_D ο συντελεστής αντίστασης.

Καθώς λαμβάνουμε υπόψη την αεροελαστική σύζευξη οι δυνάμεις και η ροπή στρέψης που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι η είσοδος του ελαστοδυναμικού προβλήματος για τον υπολογισμό των ελαστικών μετακινήσεων. Ο αεροδυναμικός και ο ελαστοδυναμικός υπολογισμός εκτελούνται εναλλάξ.

Όσον αφορά στην προσομοίωση του φαινομένου της σκίασης του πύργου, θεωρούμε ότι η ύπαρξή του στο πεδίο ροής του δρομέα προκαλεί διαταραχές στην ταχύτητα όμοιες με αυτές που θα εμφανίζονταν γύρω από ένα κύλινδρο απείρου μήκους.

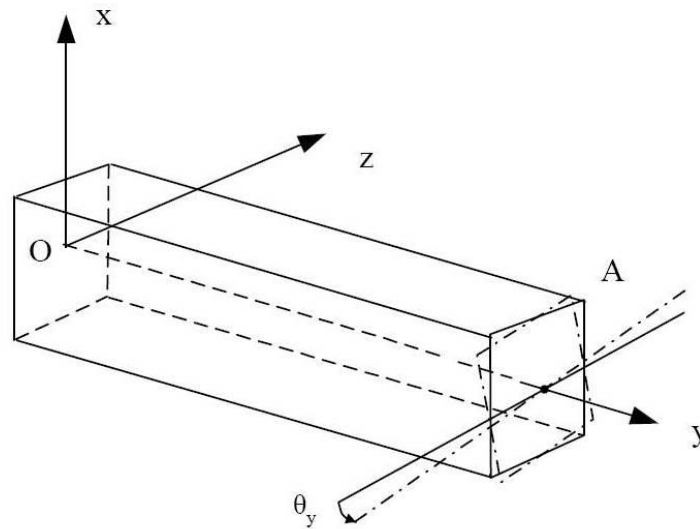
Αεροελαστική Ανάλυση Ανεμογεννητριών Οριζοντίου Άξονα

Η αεροελαστική ανάλυση της ανεμογεννήτριας στο συγκεκριμένο κώδικα έχει βασιστεί στη θεωρία της δοκού, σύμφωνα με την οποία τα επιμέρους τμήματα που την απαρτίζουν προσεγγίζονται μονοδιάστατα. Με άλλα λόγια το μήκος των στοιχείων αυτών θεωρείται πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις των εγκάρσιων διατομών τους, γεγονός που δικαιολογεί και τη χρήση του όρου δοκός. Στη μέθοδο αυτή περιλαμβάνονται οι εξισώσεις και για τους ελαστικούς και για τους κινηματικούς βαθμούς ελευθερίας οι οποίες επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνεται το πλήρες δυναμικό σύστημα της ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα. Επιπλέον κάθε παραμορφώσιμο στοιχείο της μηχανής θεωρείται ελεύθερος φορέας, ο οποίος ικανοποιεί τις συνθήκες κινηματικής

και δυναμικής συμβιβαστότητας σε σχέση με τα γειτονικά στοιχεία με τα οποία συνδέεται.

Η Θεωρία Δοκού βασίζεται σε τρεις βασικές υποθέσεις (Timoshenko (1955), Rivello(1969)).

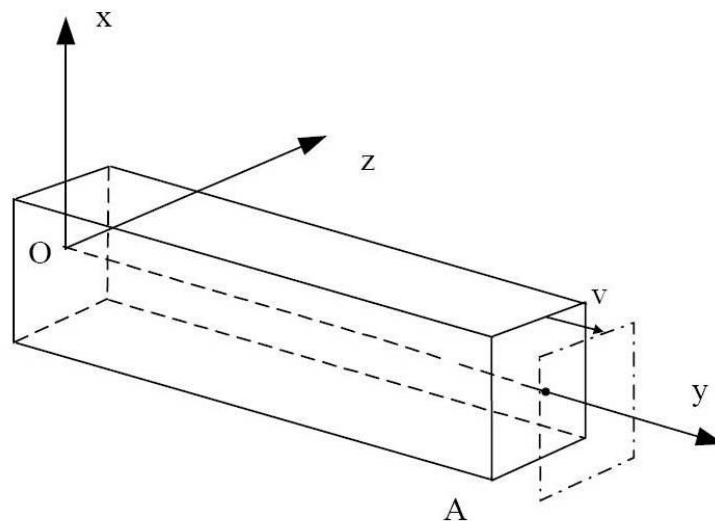
Υπόθεση Στρέψης: Η διατομή ενός γραμμικού φορέα, που εκτείνεται κατά μήκος του άξονα y συστήματος συντεταγμένων Oxy , κατά τη στρέψη του φορέα παραμένει κάθετη στον y , επίπεδη και απαραμόρφωτη και στρέφεται γύρω από αυτόν (Ριζιώτης, 2003).



Υπόθεση Στρέψης

Εικόνα 123-Ριζιώτης

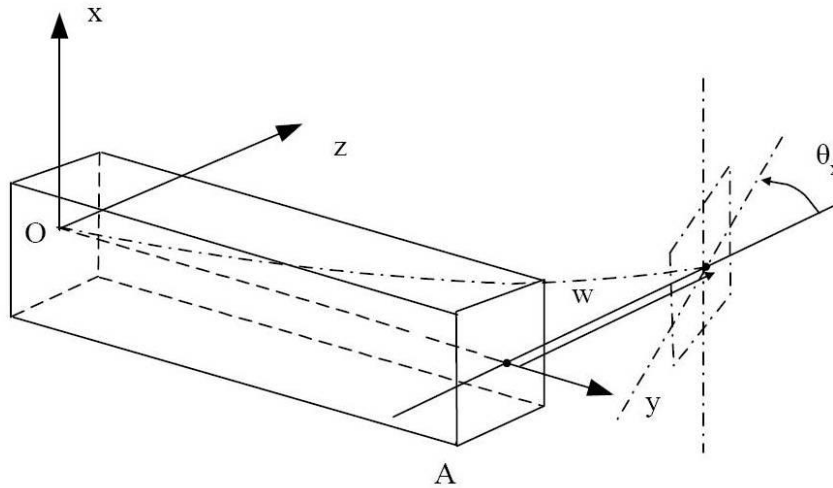
Υπόθεση Εφελκυσμού: Η διατομή ενός γραμμικού φορέα που εκτείνεται κατά μήκος του άξονα y συστήματος συντεταγμένων Oxy , κατά τον εφελκυσμό ή την θλίψη του φορέα παραμένει επίπεδη, απαραμόρφωτη και κάθετη στον y , και μετατοπίζεται κατά την κατεύθυνση του (Ριζιώτης, 2003).



Υπόθεση Εφελκυσμού

Εικόνα 124-Ριζιώτης

Υπόθεση Κάμψης: Κάθε διατομή ενός γραμμικού φορέα που εκτείνεται κατά μήκος του άξονα y συστήματος συντεταγμένων Oxy , κατά την κάμψη του φορέα μετατοπίζεται κάθετα ως προς τον y και στρέφεται έτσι ώστε να είναι πάντα κάθετη ως προς τον καμπτώμενο άξονα y , ενώ ταυτόχρονα παραμένει επίπεδη και απαραμόρφωτη (Υπόθεση Bernoulli), (Ριζιώτης, 2003).



Εικόνα 125-Ριζιώτης Υπόθεση Κάμψης

Το διάνυσμα θέσης r ενός σημείου που είναι στην παραμορφωμένη κατάσταση και βρίσκεται πάνω στη διατομή A δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$r = \xi_0 + E \cdot u$$

Όπου $\xi_0(x,y,z)$ το διάνυσμα θέσης του σημείου στην απαραμόρφωτη κατάσταση, u το διάνυσμα των μετακινήσεων και των στροφών και E το ακόλουθο μητρώο:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -z & 0 & x \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -x & 0 \end{bmatrix}$$

Οι εσωτερικές αντιδράσεις του εκάστοτε τμήματος της κατασκευής δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

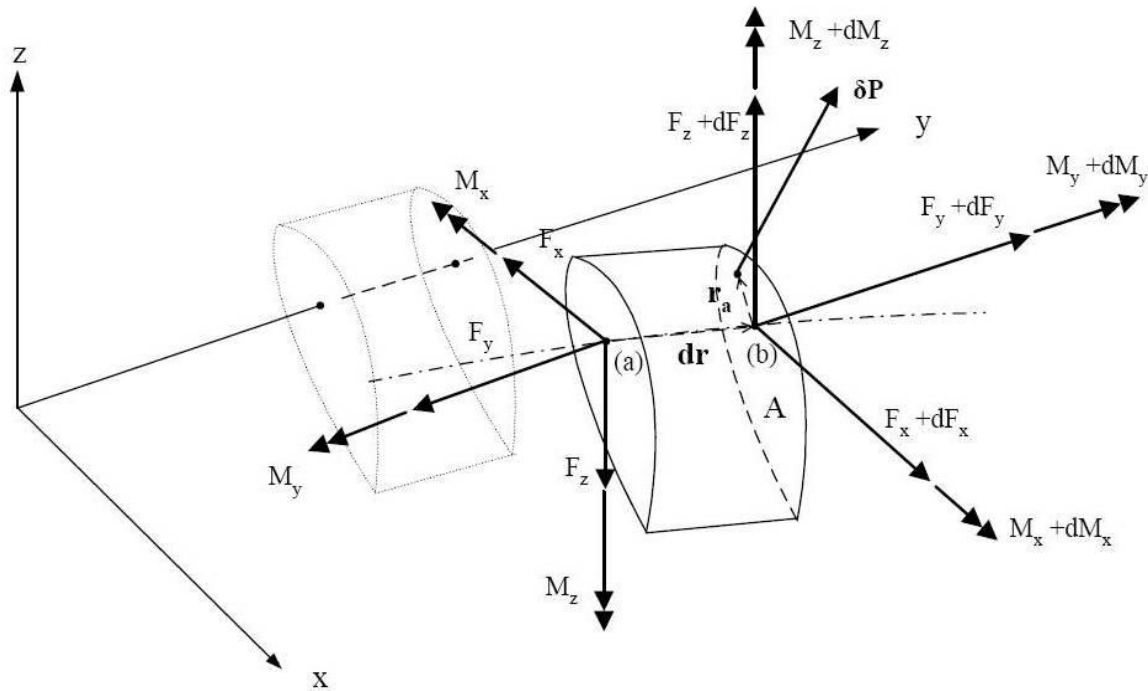
$$F_y = \int_A \sigma_{yy} dA = \int_A E v' dA$$

$$M_x = - \int_A \sigma_{yy} z \cdot dA = - \int_A (-Exzu'' - Ez^2 w'') dA$$

$$M_y = \int_A (\tau_{xy} z - \tau_{yz} x) dA = \int_A G(x^2 + z^2) \theta_y' dA$$

$$M_z = \int_A \sigma_{yy} x \cdot dA = \int_A (-Ex^2 u'' - Exz w'') dA$$

Όπου σ_{yy} , τ_{xy} και τ_{yz} οι ορθές τάσεις λόγω κάμψης και εφελκυσμού και οι διατμητικές τάσεις λόγω στρέψης.



Εσωτερικές αντιδράσεις σε στοιχειώδες τμήμα dy

Εικόνα 126-Ριζιώτης

Τα τμήματα της ανεμογεννήτριας τα οποία υπόκεινται σε ελαστοδυναμική ανάλυση είναι:

- Ο πύργος
- Το αξονικό σύστημα και ο κλωβός
- Τα πτερόγια

Κάθε ένα από αυτά τα τμήματα θεωρείται χωριστή ελαστική δοκό που διέπεται από τις παραπάνω εξισώσεις και καταπονείται σε κάμψη, στρέψη και εφελκυσμό-θλίψη. Στα άκρα τους όπου γίνεται και η σύνδεση μεταξύ τους ικανοποιούνται συγκεκριμένες κινηματικές και δυναμικές συνθήκες.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων των επιμέρους τμημάτων. Αρχικά έχει επιλεγεί ένα γενικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $O_Gx_Gy_Gz_G$ (global σύστημα). Η αρχή του κάθε τοπικού συστήματος συμπίπτει με την αρχή του αντίστοιχου σώματος. Τελικά το διάνυσμα θέσης οποιουδήποτε σημείου πάνω σε μια διατομή A του σώματος k , ως προς το γενικό σύστημα συντεταγμένων θα δίνεται από τη σχέση:

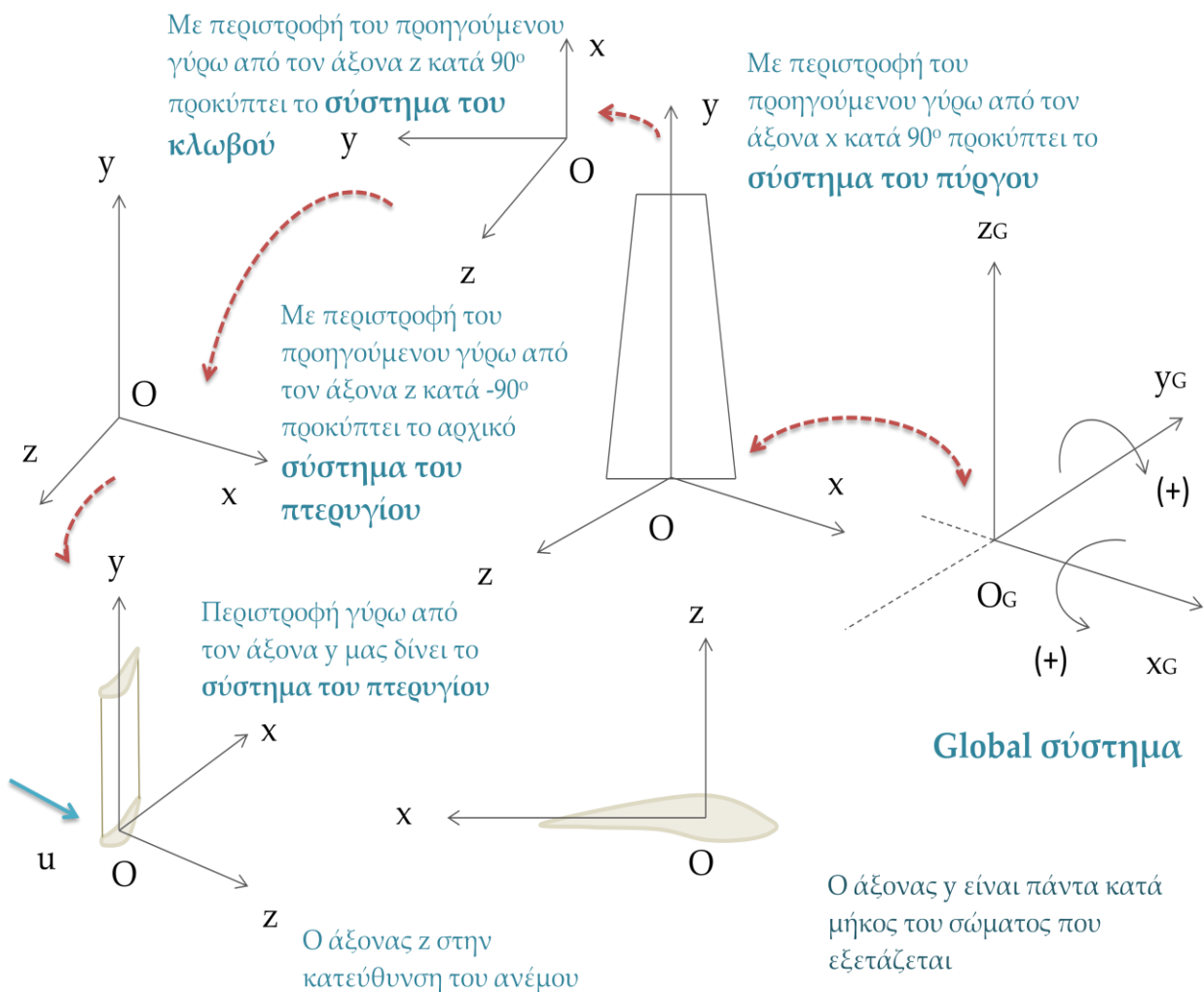
$$r_{Gk} = \rho_k + A_k \cdot r_k = \rho_k + A_k \cdot (\xi_0 + Eu_k), \quad k = 1, N_B$$

όπου με N_B συμβολίζουμε το πλήθος των σωμάτων, με $\rho_k = \rho_k(t)$ το διάνυσμα θέσης της αρχής του τοπικού συστήματος συντεταγμένων του σώματος που εξετάζουμε ως προς το αδρανειακό σύστημα και $A_k = A_k(t)$ το μητρώο στροφής από το τοπικό στο γενικό σύστημα. Τα ρ_k και A_k είναι συνάρτηση του χρόνου και είναι αυτά που καθορίζουν την κινηματική σύζευξη των διαφόρων σωμάτων που απαρτίζουν το πλήρες δυναμικό σύστημα, (Ριζιώτης, 2003).

Αντίστοιχα ορίζονται η ταχύτητα και η επιτάχυνση ενός σημείου πάνω στο k , ως προς το γενικό σύστημα συντεταγμένων:

$$\dot{r}_{Gk} = \dot{\rho}_k + \dot{A}_k \cdot (\xi_0 + Eu_k) + A_k \cdot E \cdot \dot{u}_k$$

$$\ddot{r}_{Gk} = \ddot{\rho}_k + \ddot{A}_k \cdot (\xi_0 + Eu_k) + 2\dot{A}_k \cdot E \cdot \dot{u}_k + A_k \cdot E \cdot \ddot{u}_k$$



Εικόνα 127

Είναι γνωστό ότι στην άκρη κάθε τμήματος εμφανίζονται έξι βαθμοί ελευθερίας q , δηλαδή τρεις μετακινήσεις και τρεις στροφές. Στην συγκεκριμένη ανάλυση θεωρούμε ότι η αρχή του κάθε σώματος είναι πακτωμένη και άρα ακίνητη, ενώ το άκρο κινείται ελεύθερα.

Η αρίθμηση των σωμάτων ξεκινά από τα πτερούγια $k = 1, B$ (B το πλήθος των πτερυγίων), συνεχίζει με τον άξονα $k = B+1$ και ολοκληρώνεται με τον πύργο $k = B+2$. Δηλαδή σε μια ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων η αρίθμηση είναι η ακόλουθη: α) πρώτο πτερούγιο = 1, β) δεύτερο πτερούγιο = 2, γ) τρίτο πτερούγιο = 3, δ) άξονας = 4, ε) πύργος = 5.

Οι εξισώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω αφορούν στις συνθήκες κινηματικής σύζευξης των επιμέρους τμημάτων. Ταυτόχρονα πρέπει να ικανοποιούνται και οι δυναμικές συνθήκες σύζευξης, οι οποίες εμφανίζονται στο τέλος του ενός φορέα (εκεί που κινείται ελεύθερα) και στην αρχή του άλλου (εκεί που είναι πακτωμένος) όπως οι συνθήκες δυνάμεων και ροπών και οι οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι τα διαφορετικά τμήματα της ανεμογεννήτριας εξετάζονται ως ανεξάρτητοι φορείς. Έτσι στο άκρο του κάθε σώματος ασκούνται οι δυνάμεις και οι ροπές που δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

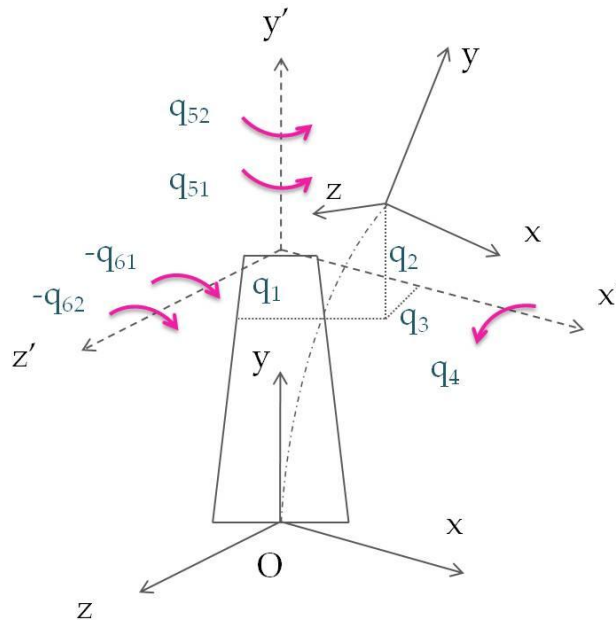
$$(F_{el})_k^i = \sum_m A_m^k \left[\int_{L_m} \left(\int_A (\rho dA \cdot A_m^T g_G) + \delta P_m - \int_A (\rho dA \cdot A_m^T \ddot{r}_{Gm}) \right) dy \right]$$

$$(M_{el})_k^i = \sum_m A_m^k \left[\int_{L_m} \left(\int_A (\rho dA \cdot r_{mk}^{(i)} \times (A_m^T g_G)) + r_{amk}^{(i)} \times \delta P_m - \int_A (\rho dA \cdot r_{mk}^{(i)} \times (A_m^T \ddot{r}_{Gm})) \right) dy \right]$$

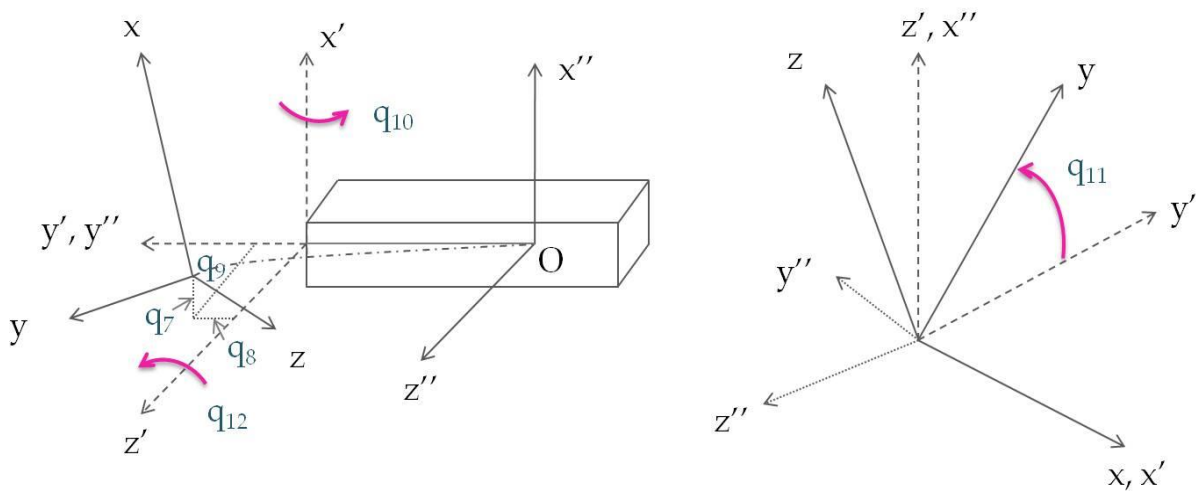
Όπου $(F_{el})_k^i = ((F_{elx})_k^i, (F_{ely})_k^i, (F_{elz})_k^i)^T$ και $(M_{el})_k^i = ((M_{elx})_k^i, (M_{ely})_k^i, (M_{elz})_k^i)^T$.

Στις δυο παραπάνω εξισώσεις με m συμβολίζουμε το κάθε σώμα, το οποίο συνδέεται με το k μέσω του άκρου (i) και μεταφέρει σε αυτό φορτία. Έτσι για παράδειγμα για τον υπολογισμό των αντιδράσεων στο άκρο (2) του αξονικού συστήματος ολοκληρώνουμε τα φορτία κατά μήκος των B πτερυγίων ενώ για τον υπολογισμό των αντιδράσεων στο άκρο (2) του πύργου ολοκληρώνουμε τα φορτία κατά μήκος των πτερυγίων και του αξονικού συστήματος. Με συμβολίζουμε το μητρώο στροφής που A_m^k μας μεταφέρει από το τοπικό σύστημα του σώματος m στο τοπικό σύστημα του σώματος k , με $r_{mk}^{(i)} = (x_{mk}^{(i)}, y_{mk}^{(i)}, z_{mk}^{(i)})^T$ το διάνυσμα θέσης του τυχαίου σημείου πάνω στο σώμα m ως προς το άκρο i του σώματος k , με το διάνυσμα θέσης του σημείου $r_{amk}^{(i)} = (x_{amk}^{(i)}, y_{amk}^{(i)}, z_{amk}^{(i)})^T$ εφαρμογής των δυνάμεων δP_m ως προς το άκρο i του σώματος k και με L_m το μήκος της δοκού m , (Ριζιώτης, 2003).

Στα ακόλουθα σχήματα φαίνονται οι έξι βαθμοί ελευθερίας στο άκρο του κάθε σώματος και στον πίνακα που ακολουθεί περιγράφονται αναλυτικά.

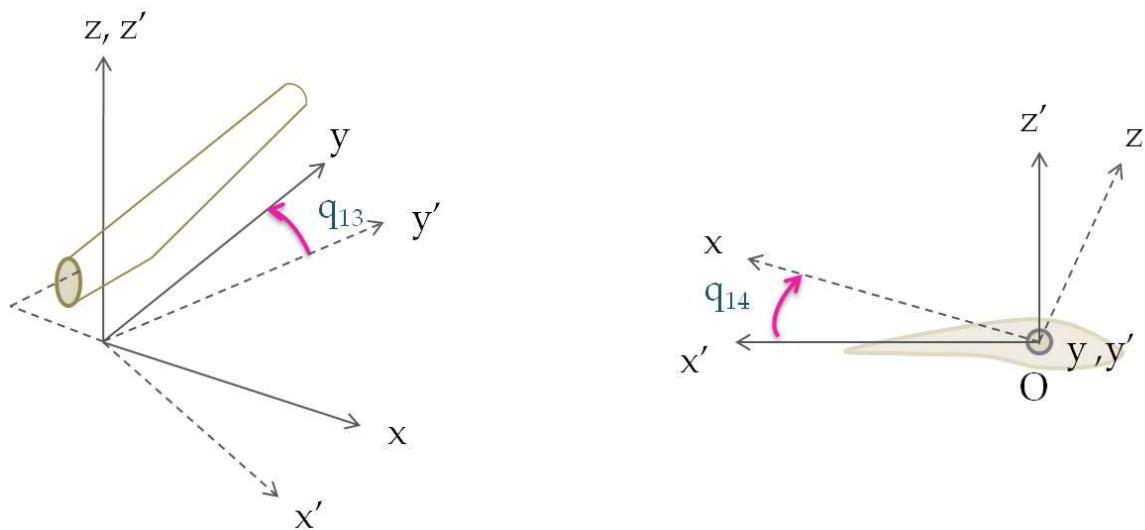


Κινηματικοί βαθμοί ελευθερίας Πύργου



Κινηματικοί βαθμοί ελευθερίας Άξονα

Εικόνα 128



Εικόνα 129

Κινηματικοί βαθμοί ελευθερίας Πτερυγίων

Διάνυσμα των Κινηματικών Βαθμών Ελευθερίας	
q_1	Κατά x ελαστική μετατόπιση του άκρου του πύργου
q_2	Κατά y ελαστική μετατόπιση του άκρου του πύργου
q_3	Κατά z ελαστική μετατόπιση του άκρου του πύργου
q_4	Κατά x ελαστική στροφή του άκρου του πύργου
q_{51}	Κατά y ελαστική στροφή του άκρου του πύργου
q_{61}	Κατά z ελαστική στροφή του άκρου του πύργου
q_{52}	Κατά y στροφή του άκρου του πύργου (yaw)
q_{62}	Κατά z στροφή του άκρου του πύργου (tilt)
q_7	Κατά x ελαστική μετατόπιση του άκρου του άξονα
q_8	Κατά y ελαστική μετατόπιση του άκρου του άξονα
q_9	Κατά z ελαστική μετατόπιση του άκρου του άξονα
q_{10}	Κατά x ελαστική στροφή του άκρου του άξονα
q_{11}	Κατά y ελαστική στροφή του άκρου του άξονα
q_{12}	Κατά z ελαστική στροφή του άκρου του άξονα
q_{13}	Γωνία πτερύγισης του δρομέα (teeter), (μόνο για δίπτερους δρομείς)
q_{14}	Γωνία βήματος του πτερυγίου

Το προηγούμενο σύστημα εξισώσεων που αναφέρεται στις δυνάμεις και στις ροπές που ασκούνται στο ελεύθερο άκρο κάθε σώματος συμπληρώνεται λαμβάνοντας υπόψη μας τις δυναμικές εξισώσεις για τους μη ελαστικούς βαθμούς ελευθερίας (q_{52} , q_{62} , q_{13} , q_{14}) οι οποίοι είναι συνάρτηση του τύπου της ανεμογεννήτριας. Ακόμα προστίθεται μια συνοριακή συνθήκη η οποία αφορά στην στρεπτική αντιρροπή της ηλεκτρογεννήτριας και η οποία εφαρμόζεται στο άκρο του άξονα και εξαρτάται από τον τύπο της γεννήτριας.

Μέσω των συστημάτων ελέγχου ρυθμίζονται η γωνία απόκλισης του δρομέα (q_{52}) για ευθυγράμμιση αυτού στην κύρια κατεύθυνση του ανέμου και η γωνία βήματος (q_{14}) του πτερυγίου για επίτευξη της επιθυμητής ισχύος.

Οι βαθμοί ελευθερίας διέπονται από την ακόλουθη δυναμική εξίσωση:

$$k_q \cdot q + c_q \cdot \dot{q} = (M_{ext} - M_{in}) - M_c$$

όπου με k_q , c_q συμβολίζουμε τις σταθερές ελαστικότητας και απόσβεσης που χαρακτηρίζουν την περιστροφή κατά q , με $(M_{ext} - M_{in})$ τη διαφορά αδρανειακών και εξωτερικών ροπών γύρω από τον άξονα που γίνεται η q περιστροφή και με M_c τη ροπή που επιβάλλεται από το σύστημα ελέγχου και η οποία είναι μηδενική όταν η κίνηση είναι ελεύθερη, (Ριζιώτης, 2003).

Για τη σωστή προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας πρέπει να γίνει η εισαγωγή στοιχείων συγκεντρωμένων ιδιοτήτων, όπως είναι τα στοιχεία αδράνειας, τα στοιχεία απόσβεσης, τα στοιχεία ελαστικότητας και τα στοιχεία εξωτερικών δυνάμεων και ροπών. Η προσομοίωση της μάζας και της ροπής αδράνειας της πλήμνης του δρομέα, του κλωβού, της ηλεκτρογεννήτριας και του κιβωτίου ταχυτήτων γίνεται με συγκεντρωμένα στοιχεία αδράνειας. Η προσομοίωση των εδράσεων και των ελαστικών συνδέσμων σύνδεσης του αξονικού συστήματος και της ελαστικότητας του μηχανισμού προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται με στοιχεία απόσβεσης και ελαστικότητας. Δεν πρέπει όμως να ξεχνάμε την κατασκευαστική πολυπλοκότητα αυτών των τμημάτων της μηχανής η οποία εμποδίζει τον ακριβή προσδιορισμό των ισοδύναμων ελαστικών χαρακτηριστικών δοκού γι' αυτό και είναι απαραίτητη η χρήση συγκεντρωμένων ελαστικών ιδιοτήτων (μάζες-ελατήρια-αποσβεστήρες), λύση η οποία όσο απλή κι αν φαντάζει είναι η πλέον αποδοτική. Γενικότερα για κάποια τυχαία στατική ή δυναμική φόρτιση εφαρμόζονται στοιχεία συγκεντρωμένων δυνάμεων ροπών.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η προσομοίωση της ηλεκτρογεννήτριας. Η ύπαρξη της ηλεκτρογεννήτριας γίνεται αντιληπτή μέσω της αντιρροπής που ασκεί στον άξονα και εξαρτάται από τον τύπο της ανεμογεννήτριας (σύγχρονη, ασύγχρονη,

σταθερών και μεταβλητών στροφών). Έτσι η επαγωγή της δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$M_{GEN} = B(\omega_s - \omega)$$

Όπου B η κλίση της χαρακτηριστικής της γεννήτριας, ω_s οι σύγχρονες στροφές και ω η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας.

Η εξίσωση που τελικά αναλύει την ελαστοδυναμική συμπεριφορά μιας ανεμογεννήτριας είναι η ακόλουθη:

$$M_{total} \ddot{x}^{(n)} + C_{total} \dot{x}^{(n)} + K_{total} x^{(n)} = Q_{total}$$

Όπου M_{total} είναι το μητρώο μάζας, C_{total} είναι το μητρώο απόσβεσης στο οποίο συμπεριλαμβάνεται και η απόσβεση των υλικών της κατασκευής, K_{total} το μητρώο δυσκαμψίας και Q_{total} το μητρώο φορτίων στο οποίο συμπεριλαμβάνονται τα αεροδυναμικά φορτία που αναπτύσσονται στο δρομέα αλλά και τα φορτία λόγω βάρους. Τα αεροδυναμικά φορτία του δρομέα εξαρτώνται από τις ταχύτητες παραμόρφωσης των πτερυγίων.

Για τους υπολογισμούς έχει θεωρηθεί συγκεκριμένος αριθμός πεπερασμένων στοιχείων για κάθε τμήμα της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα για την προσομοίωση του κάθε πτερυγίου χρησιμοποιήθηκαν 13 πεπερασμένα στοιχεία, για τον άξονα 2 (όπου 1 για τον άξονα χαμηλών στροφών και 1 για τον άξονα υψηλών στροφών) και για τον πύργο 11.

Η ανάλυση του πλήρους δυναμικού συστήματος μιας ανεμογεννήτριας δίνει ως αποτελέσματα τις ιδιοσυχνότητες και τα ιδιοδιανύσματα του συστήματος. Οι ιδιοσυχνότητες και οι αντίστοιχες ιδιομορφές τους προκύπτουν από την επίλυση του ακόλουθου προβλήματος ιδιοτιμών:

$$(K_{total} - \Omega^2 \cdot M_{total}) \cdot \Phi = 0$$

Όπου Ω είναι οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος και Φ τα διανύσματα των ιδιομορφών.

Οι υπολογισμοί έγιναν για μια ανεμογεννήτρια ισχύος 5 MW με στοιχεία που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Χαρακτηριστικά Μηχανής	
Ονομαστική Ισχύς	5.000 kW
Θέση Δρομέα	Ανάντι
Σύστημα Ελέγχου	Μεταβλητών Στροφών/Μεταβλητού Βήματος
Ύψος Πλήμνης	90 m
Διάμετρος Δρομέα	126 m
Συχνότητα Περιστροφής	1,2576 rad/s

Οι ιδιοσυχνότητες της μηχανής παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

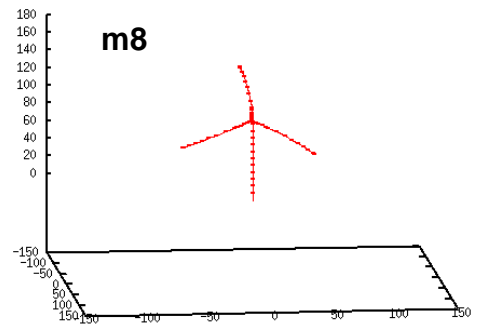
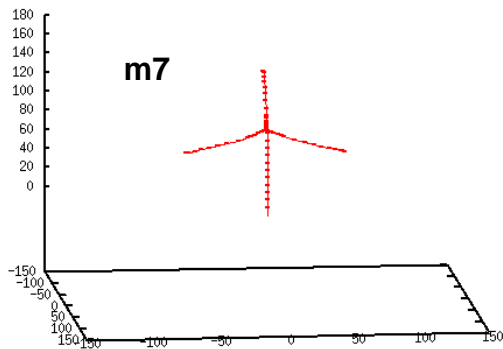
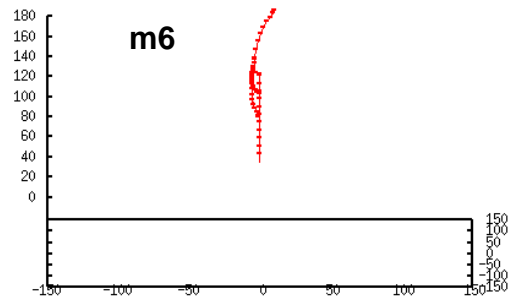
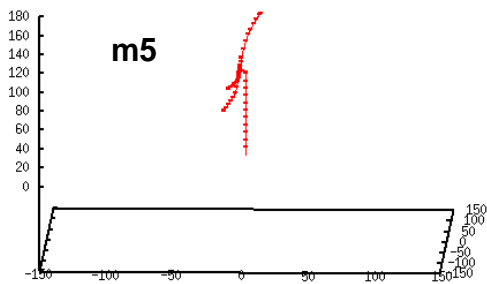
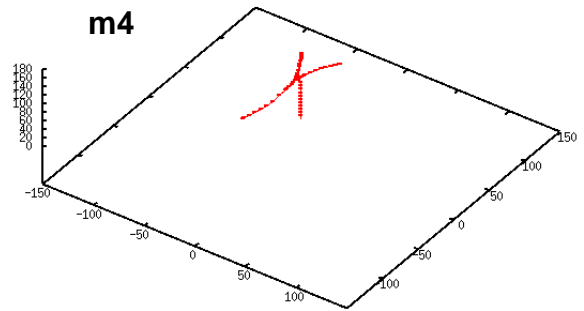
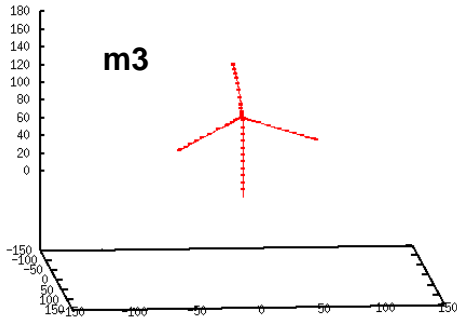
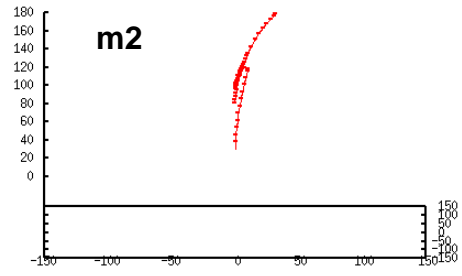
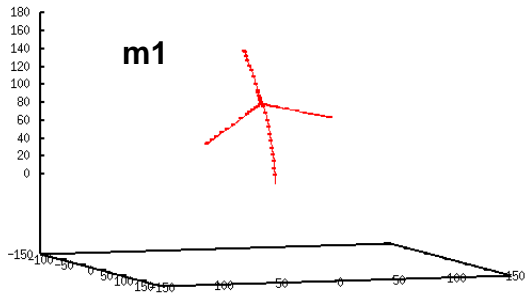
	Ιδιοσυχνότητα (Hz)
1η καμπτική πύργου (πλευρική) (m1)	0,28
1η καμπτική πύργου (εμπρός-πίσω) (m2)	0,29
1η στρεπτική άξονα (m3)	0,60
1η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) /στρέψη πύργου (m4)	0,61
1η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) /κάμψη πύργου (m5)	0,65
1η συμμετρική δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) (m6)	0,70
1η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση περιστροφής) A (m7)	1,09
1η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση περιστροφής) B (m8)	1,11

Οι ιδιομορφές που προκύπτουν είναι συζευγμένες μεταξύ τους, αλλά παίρνουν το όνομά τους από το τμήμα της κατασκευής που διεγείρεται πιο έντονα από αυτές. Έτσι έχουμε:

- 1η καμπτική πύργου (πλευρική) - Στην ιδιομορφή αυτή διεγείρεται πιο έντονα ο πύργος στην καμπτική κατεύθυνση που είναι κάθετη στην κατεύθυνση του ανέμου. Η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα ρυθμίζεται κυρίως από τα ελαστικά χαρακτηριστικά και τη μάζα του πύργου καθώς και από την συνολική μάζα του δρομέα, του κλωβού και της γεννήτριας που όλα μαζί εδράζονται στην κορυφή του πύργου.
- 1η καμπτική πύργου (εμπρός-πίσω) - Στην ιδιομορφή αυτή διεγείρεται πιο έντονα ο πύργος στην καμπτική κατεύθυνση που είναι παράλληλη στην κατεύθυνση του ανέμου. Η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα είναι πολύ κοντά στην πρώτη λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζουν τα ελαστικά χαρακτηριστικά ενός κυλινδρικού πύργου.
- 1η στρεπτική άξονα - Στην ιδιομορφή αυτή διεγείρεται στρεπτικά ο άξονας της μηχανής και τα πτερύγια στην κατεύθυνση περιστροφής τους. Η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα επηρεάζεται από τη στρεπτική δυσκαμψία και αδράνεια του αξονικού συστήματος, τη μάζα και τα ελαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων στην κατεύθυνση περιστροφής.
- 1η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) /στρέψη πύργου - Στην ιδιομορφή αυτή διεγείρονται κυρίως τα πτερύγια στην κατεύθυνση πτερύγισης, με τρόπο μάλιστα μη συμμετρικό. Η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα ρυθμίζεται από τη μάζα και τα χαρακτηριστικά δυσκαμψίας των πτερυγίων στην κατεύθυνση πτερύγισης και από την στρεπτική αδράνεια και δυσκαμψία του πύργου.

- 1η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) / κάμψη πύργου - Στην ιδιομορφή αυτή όπως και στην προηγούμενη διεγείρονται τα πτερύγια στην κατεύθυνση πτερύγισης επίσης μη συμμετρικά. Η ιδιομορφή αυτή που αφορά κυρίως τον δρομέα είναι συζευγμένη με την κάμψη του πύργου. Ως εκ τούτου η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα ρυθμίζεται από τη μάζα και τα χαρακτηριστικά δυσκαμψίας των πτερυγίων στην κατεύθυνση πτερύγισης και από τη μάζα και καμπτική δυσκαμψία του πύργου.
- 1η συμμετρική δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) – Στην ιδιομορφή αυτή τα πτερύγια διεγείρονται με τρόπο συμμετρικό. Η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα είναι πολύ κοντά στην ιδιοσυχνότητα των ίδιων των πτερυγίων στην κατεύθυνση πτερύγισης, αν αυτά εξεταστούν αποκομμένα από την υπόλοιπη κατασκευή.
- 1η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση περιστροφής) A. – Στην ιδιομορφή αυτή διεγείρονται τα πτερύγια στην κατεύθυνση περιστροφής τους μη συμμετρικά. Η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα σχετίζεται με την μάζα των πτερυγίων και την δυσκαμψία στην κατεύθυνση περιστροφής τους.
- 1η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση περιστροφής) B – Η ιδιομορφή αυτή είναι αντίστοιχη προς την προηγούμενη. (Ριζιώτης, 2003)

Τα ακόλουθα σχέδια δείχνουν πως εμφανίζονται οι ιδιομορφές αυτές σε μια ανεμογεννήτρια.



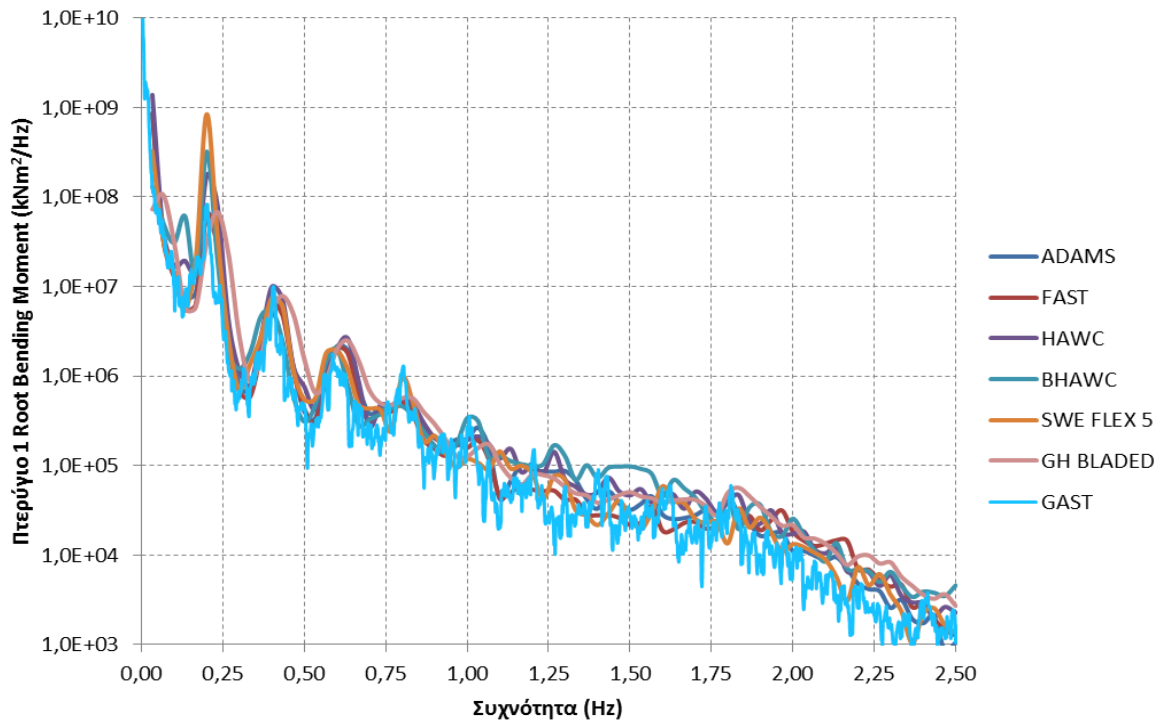
Εικόνα 130

4.2 Αξιολόγηση Κώδικα

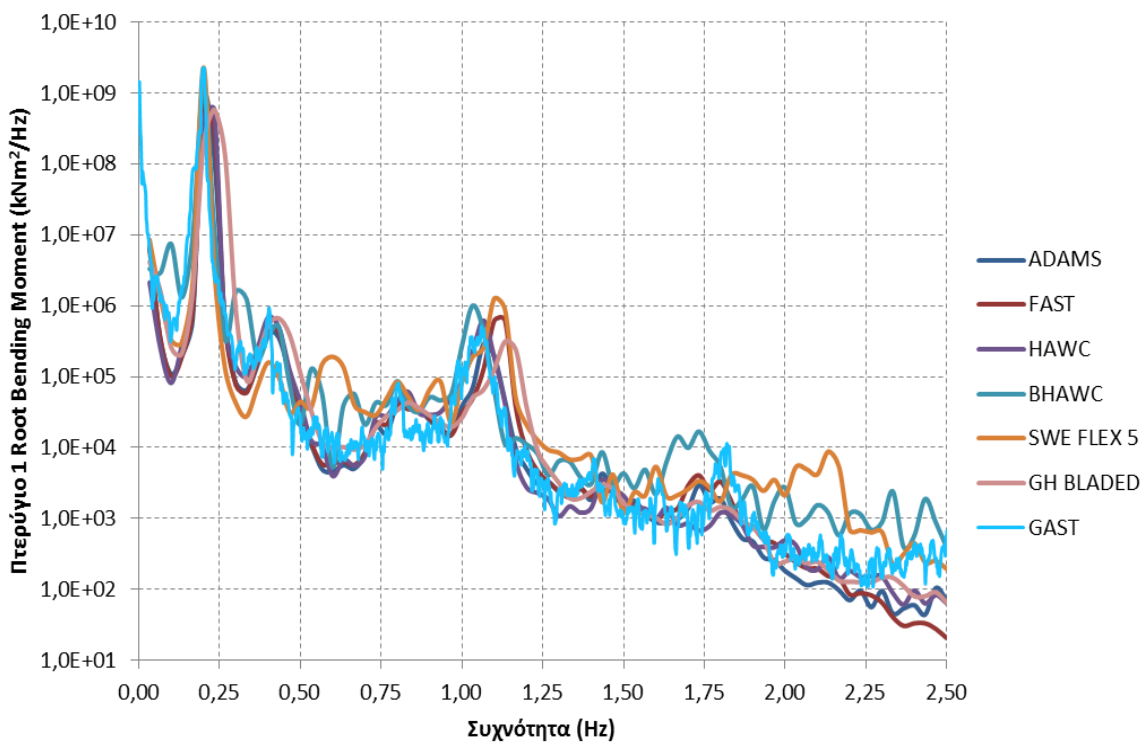
Το αεροελαστικό πρότυπο που παρουσιάστηκε έχει αξιολογηθεί επιτυχώς σε σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει σε διάφορες state-of-the-art ανεμογεννήτριες εγκατεστημένες στη στεριά, στο πλαίσιο πολλών προγραμματών χρηματοδοτημένων από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Από τη στιγμή όμως που έχει υποστεί ορισμένες αλλαγές προκειμένου να υπολογίζει τα φορτία υπεράκτιων ανεμογεννητριών όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι άκρως απαραίτητη η σύγκριση των αποτελεσμάτων του είτε με μετρήσεις είτε με άλλους κώδικες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης case 3.2 ($V_{hub} = 11.4$ m/s, $I_{ref} = 0.14$) του OC3 (Offshore Code Comparison Collaboration) τα οποία παρουσιάζουν ορισμένα από τα φορτία μιας πακτωμένης στον πυθμένα της θάλασσας ανεμογεννήτριας ισχύος 5 MW σαν αυτή που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

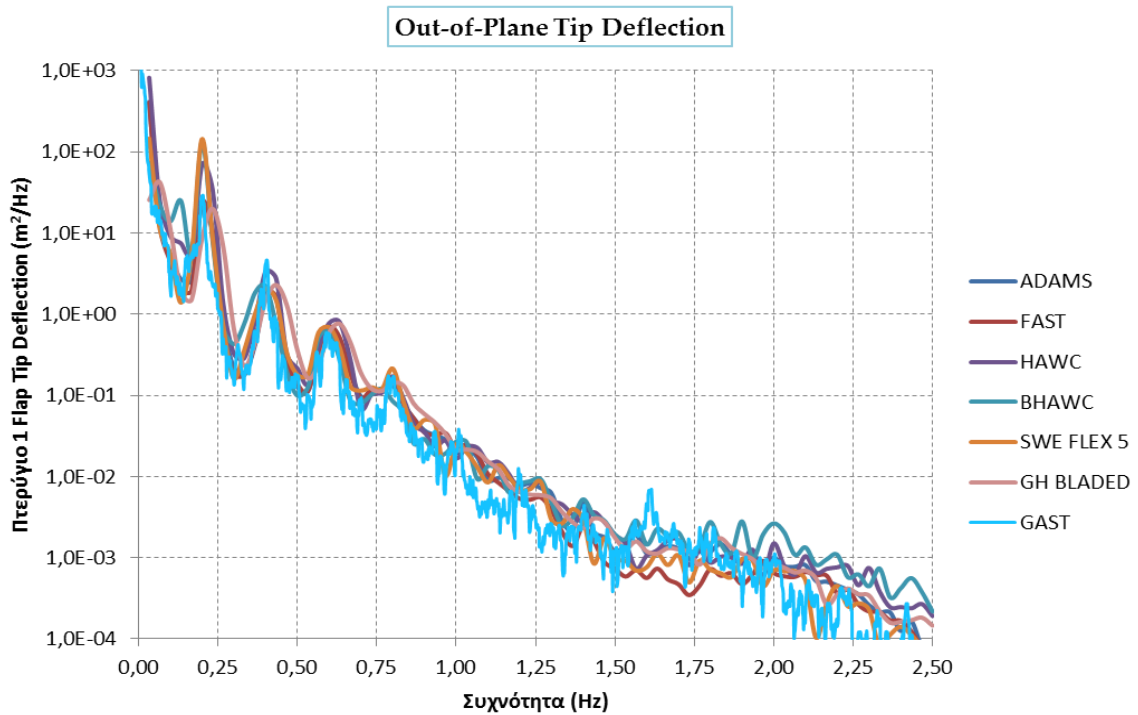
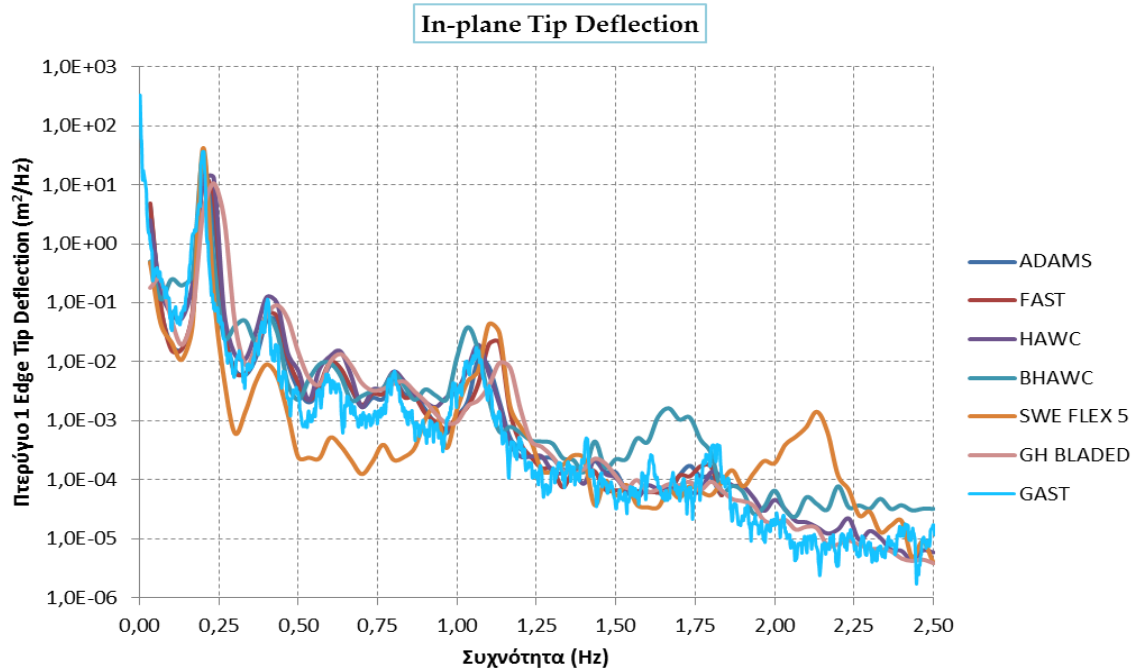
Στα ακόλουθα τέσσερα διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα του GAST σε σύγκριση με αυτά των άλλων αερο-ελαστικών μοντέλων. Τα αποτελέσματα του GAST δίνονται στο πεδίο του χρόνου και άρα με FFT (Fast Fourier Transformation) παίρνουμε τα παρακάτω διαγράμματα (Power Spectral Density PSD) στο πεδίο των συχνοτήτων, τα οποία παρουσιάζουν την ροπή στη βάση του πτερυγίου κατά την διεύθυνση της πλευρικής (edgewise, in-plane) και της εμπρός-πίσω (flapwise, out-of-plane) ταλάντωσης, καθώς και τη μετατόπιση του ακροπτερυγίου στις ίδιες διευθύνσεις. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από δεκάλεπτες προσομοιώσεις με τυρβώδη άνεμο. Στα διαγράμματα της ροπής και της μετατόπισης κατά την διεύθυνση της εμπρός-πίσω ταλάντωσης (flapwise), είναι εμφανής η απόκριση στα πολλαπλάσια της συχνότητας περιστροφής. Η ενέργεια είναι συγκεντρωμένη στο 1P (ένα πολλαπλάσιο της ταχύτητας περιστροφής), ενώ η απόκριση σε μεγαλύτερες συχνότητες είναι πολύ μικρότερη. Η απόκριση του πτερυγίου στη συχνότητα περιστροφής και στα πολλαπλάσια της οφείλεται στο γεγονός ότι το πτερύγιο κατά την περιστροφή του 'κόβει' τη ροή της τύρβης και κατά δεύτερον στη σκίαση του πύργου και στη βαρύτητα. Στην κατεύθυνση της πλευρικής (edgewise) ταλάντωσης η κύρια διέγερση της ροπής και της μετατόπισης είναι στο 1P. Αυτό οφείλεται στα φορτία της βαρύτητας, τα οποία δρουν κυρίως κατά τη διεύθυνση της περιστροφής. Το δεύτερο μέγιστο κοντά στο 1P αντιστοιχεί στη φυσική συχνότητα κατά τη διεύθυνση της πλευρικής ταλάντωσης. Ο λόγος για τον οποίο αυτή η φυσική συχνότητα είναι εμφανής σε αυτά τα διαγράμματα είναι ότι η αεροδυναμική απόσβεση κατά τη διεύθυνση της πλευρικής ταλάντωσης είναι πολύ χαμηλή. Πιθανές διαφορές ανάμεσα στον GAST και στους άλλους κώδικες οφείλονται στις διαφοροποιήσεις που υπάρχουν στην υλοποίηση (seeding) του αέρα, στο μοντέλο του αέρα, στη μηχανή και στον controller.

Out-of-Plane Root bending moment



In-Plane Root bending moment



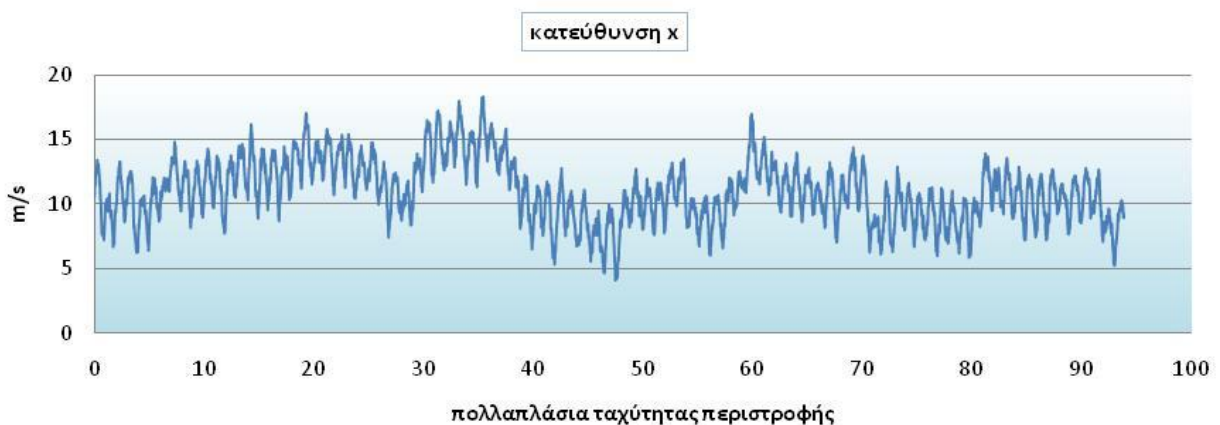


Είναι εμφανές ότι ο κώδικας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Άρα οποιαδήποτε προσομοίωση γίνει μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη. Στη συνέχεια ο GAST χρησιμοποιείται για την παραμετρική ανάλυση της απόκρισης της ανεμογεννήτριας των 5 MW που αναφέρθηκε παραπάνω, ως προς την περίοδο κυματισμού και το σημαντικό ύψος κύματος.

4.3 Αποτελέσματα GAST

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων του κώδικα GAST. Για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης που έχει η κίνηση της πλατφόρμας στην απόδοση της ανεμογεννήτριας των 5 MW, παρουσιάζεται αρχικά η απόκρισή της ως πακτωμένη και στη συνέχεια για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Ο οριζόντιος άξονας των διαγραμμάτων είναι πολλαπλάσια της ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας, η οποία για ταχύτητα ανέμου $u = 11 \text{ m/s}$ είναι $\omega = 1,267 \text{ rad/s}$ (η ταχύτητα ανέμου είναι πάνω από την ονομαστική, οπότε η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα έχει σταθεροποιηθεί και υπάρχει έλεγχος βήματος για ρύθμιση της ισχύος). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η κίνηση του πλωτήρα εισάγεται ως ένα σύστημα έξι βαθμών ελευθερίας που πραγματοποιεί ημιτονοειδή κίνηση. Τα διαγράμματα που παρουσιάζουν τη δύναμη και τη ροπή αφορούν στο hub του πτερυγίου και αυτά που παρουσιάζουν τη μετατόπιση αφορούν στο ακροπτερύγιο (tip).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το φάσμα του ανέμου που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δοκιμές.





Πακτωμένη Ανεμογεννήτρια

Οι συνθήκες λειτουργίας της είναι:

Μήκος άξονα: 5,091 m

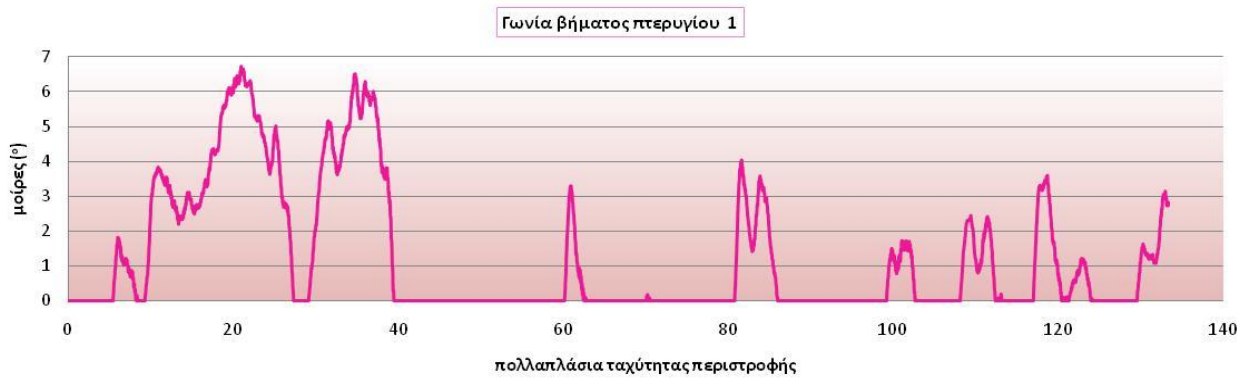
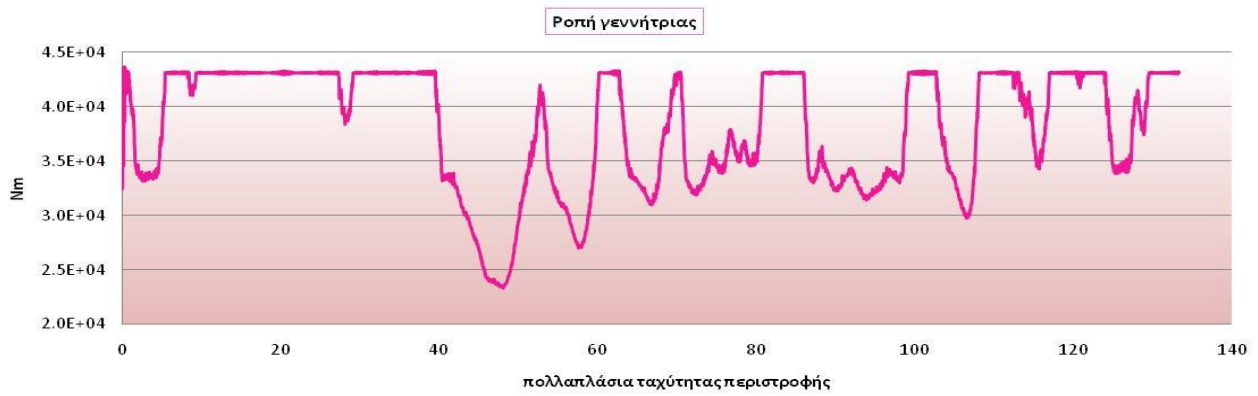
Coning πτερυγίων: 2,5°

Nacelle yaw: 0°

Nacelle tilt: 5°

Το διαγράμματα παρουσιάζονται για σταθεροποιημένη λειτουργία, έχουμε παραλείψει δηλαδή το μεταβατικό φαινόμενο.

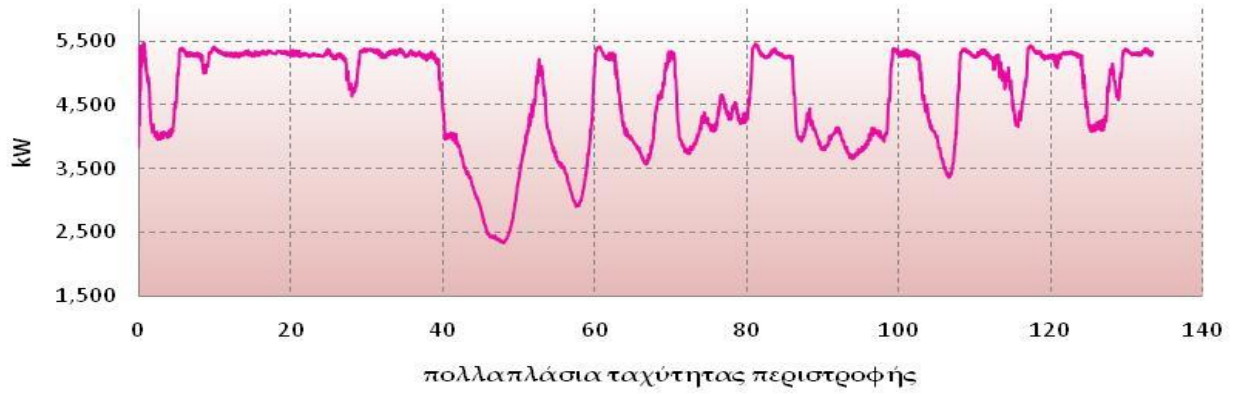




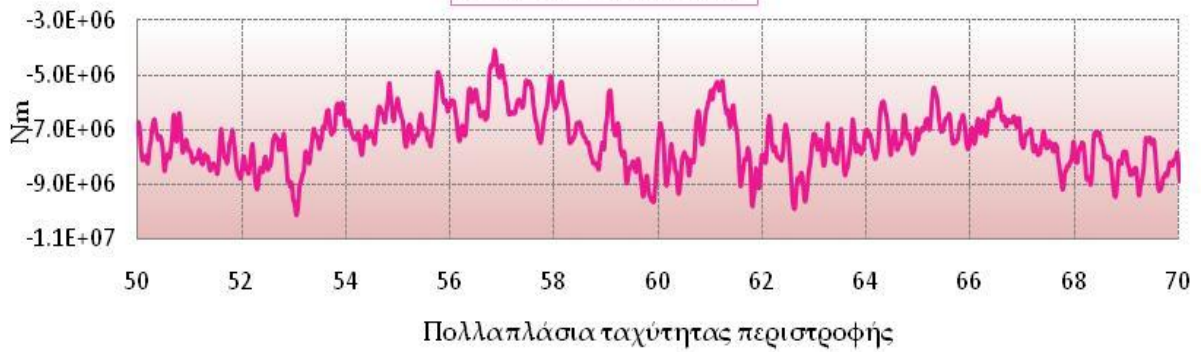
Είναι εμφανές ότι όταν υπάρχει ρύθμιση της γωνίας βήματος, η ροπή της γεννήτριας παραμένει σταθερή και το αντίστροφο.



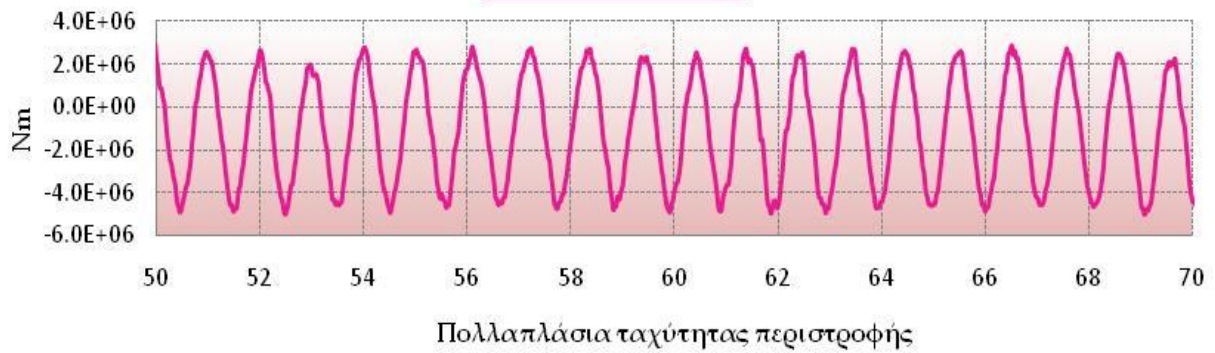
Παραγωγή Ισχύος



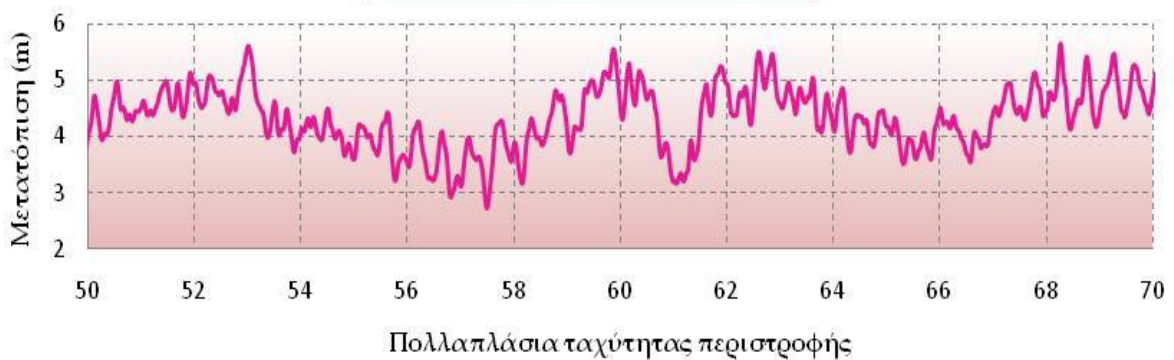
Ροπή out-of-plane (Mx)

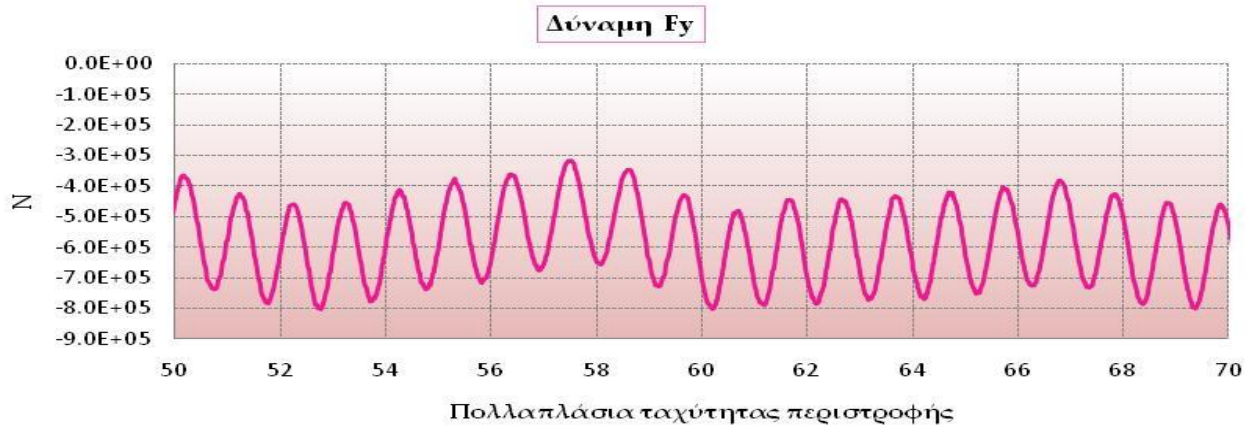
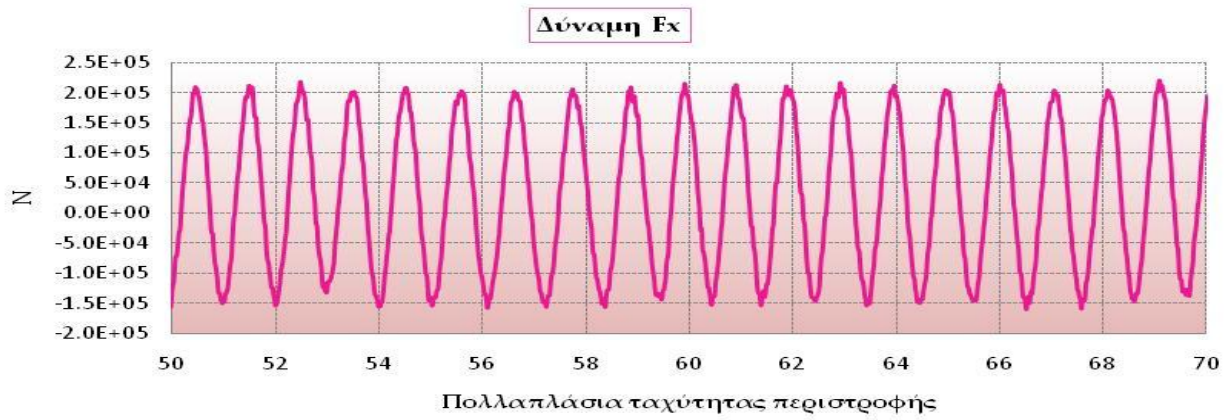
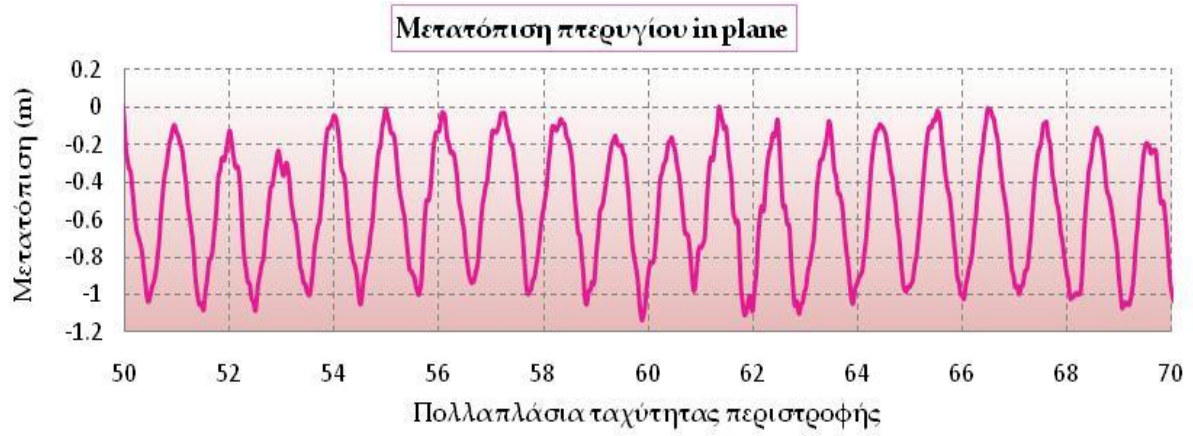


Ροπή in-plane (Mz)

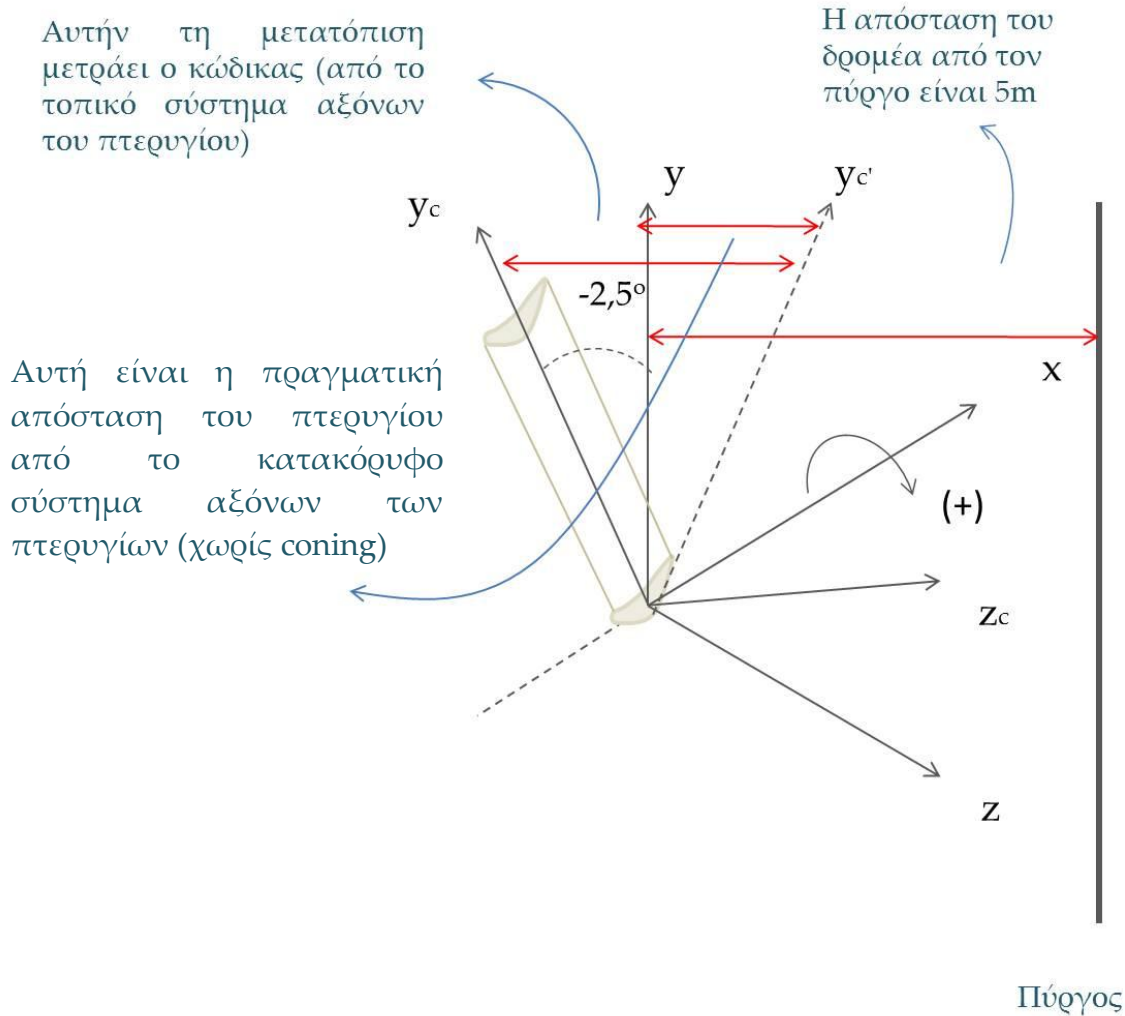


Μετατόπιση περυγίου out-of plane





Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετατοπίσεις που βλέπουμε στα παραπάνω διαγράμματα μετρώνται από το τοπικό σύστημα αξόνων του πτερυγίου, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Πλωτή Ανεμογεννήτρια

Οι συνθήκες λειτουργίας της είναι:

Μήκος άξονα: 5,091 m

Coning πτερυγίων: 2,5°

Nacelle yaw: 0°

Nacelle tilt: 5°

Περίοδος κύματος: 10 s (0,628 rad/s)

Πλάτος surge: 0,4 m

Πλάτος sway: 0,4 m

Πλάτος heave: 0,5 m

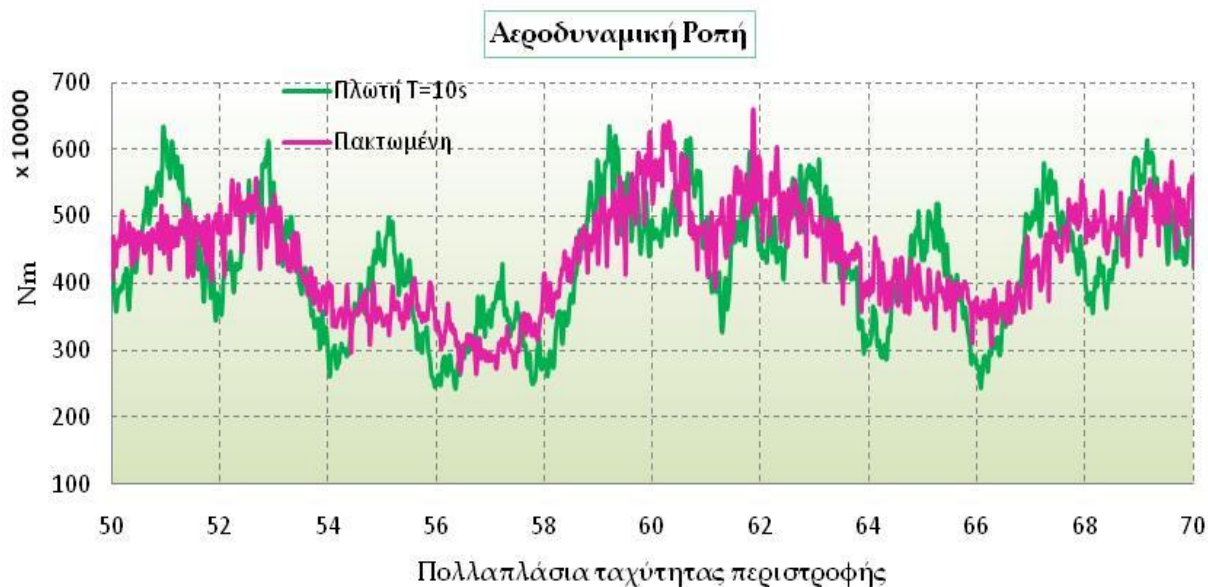
Πλάτος roll: 2° γύρω από 2,5°

Πλάτος pitch: 2° γύρω από 2,5°

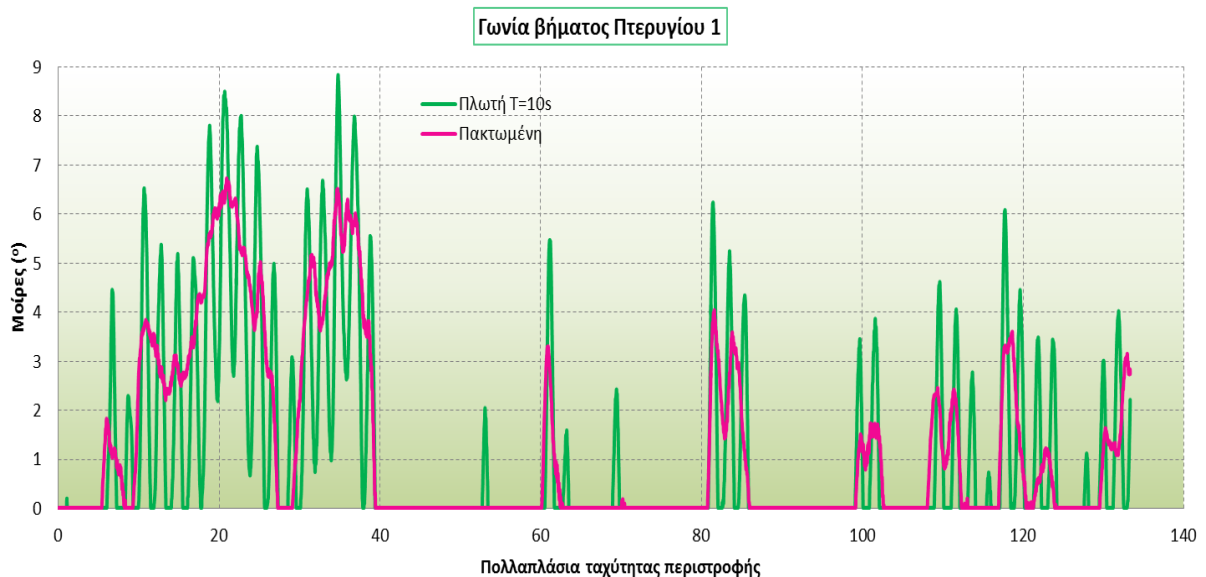
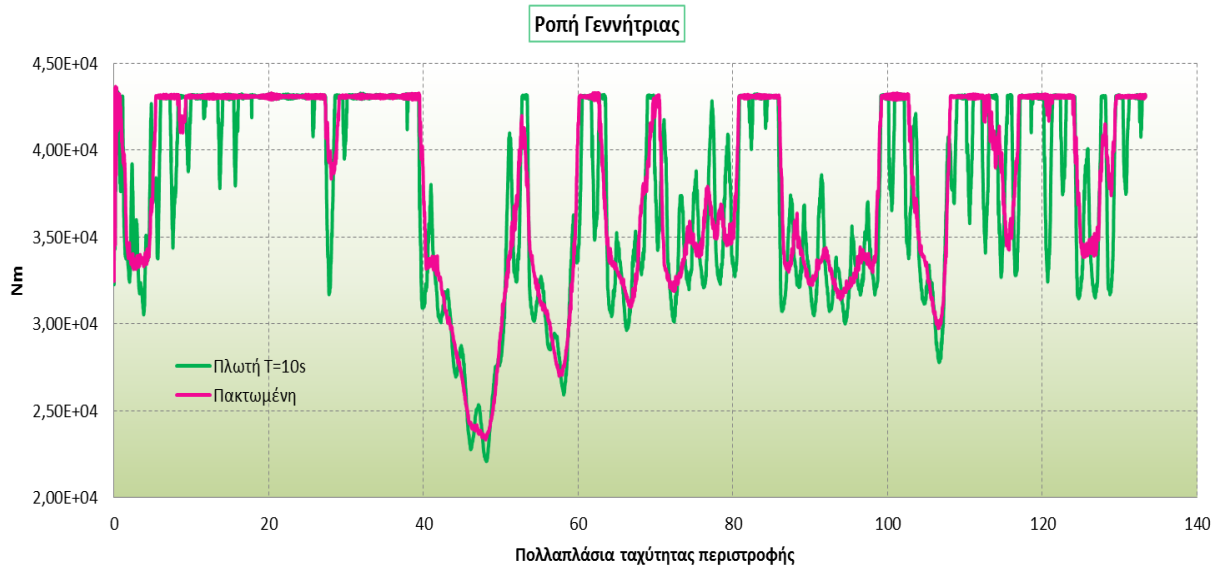
Πλάτος yaw: 2°



Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζονται συγκριτικά τα διαγράμματα της αεροδυναμικής ροπής για πακτωμένη στον πυθμένα ανεμογεννήτρια και για πλωτή με περίοδο κύματος 10 s, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η σύζευξη του πλωτήρα και της ανεμογεννήτριας καθώς και η επίδραση που έχει στην απόκριση της μηχανής η κίνησή του.



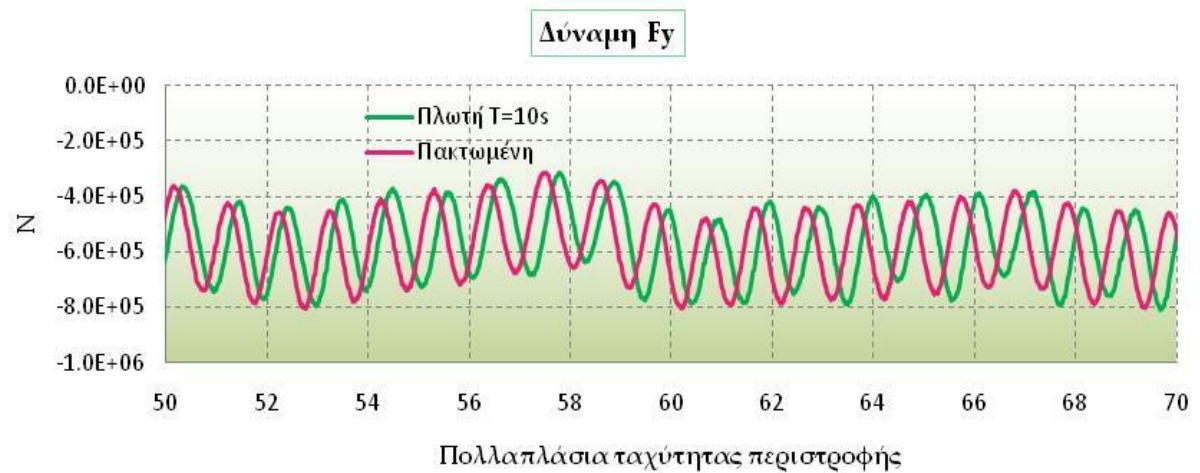
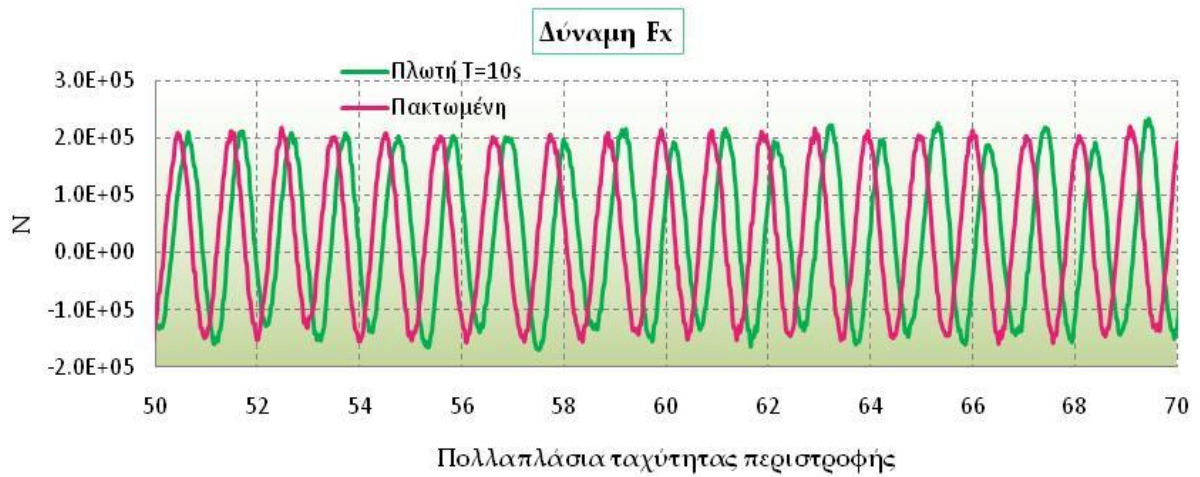
Είναι εμφανής η σύζευξη ανάμεσα στην κίνηση της πλατφόρμας και στην ανεμογεννήτρια. Στην πλωτή ανεμογεννήτρια παρουσιάζεται μια συχνότητα η οποία είναι μισή της ταχύτητας περιστροφής και η οποία αντιπροσωπεύει τους βαθμούς ελευθερίας της πλατφόρμας, αφού $\omega_{ΑΓ} = 1,267 \text{ rad/s}$ και $\omega_{πλωτ.} = 0,628 \text{ rad/s}$. Οι υπόλοιπες ταλαντώσεις που εμφανίζονται αντιστοιχούν στις άλλες ιδιοσυχνότητες της ανεμογεννήτριας.



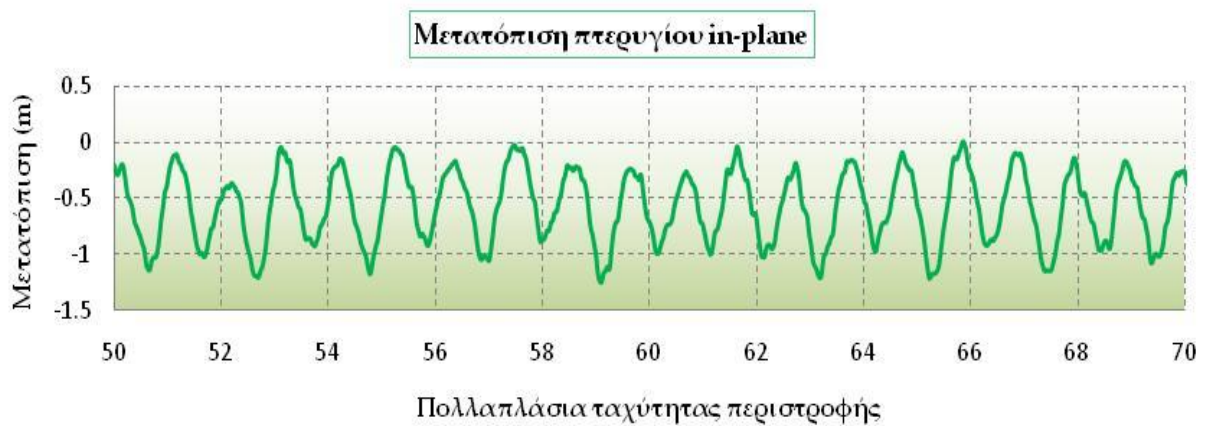
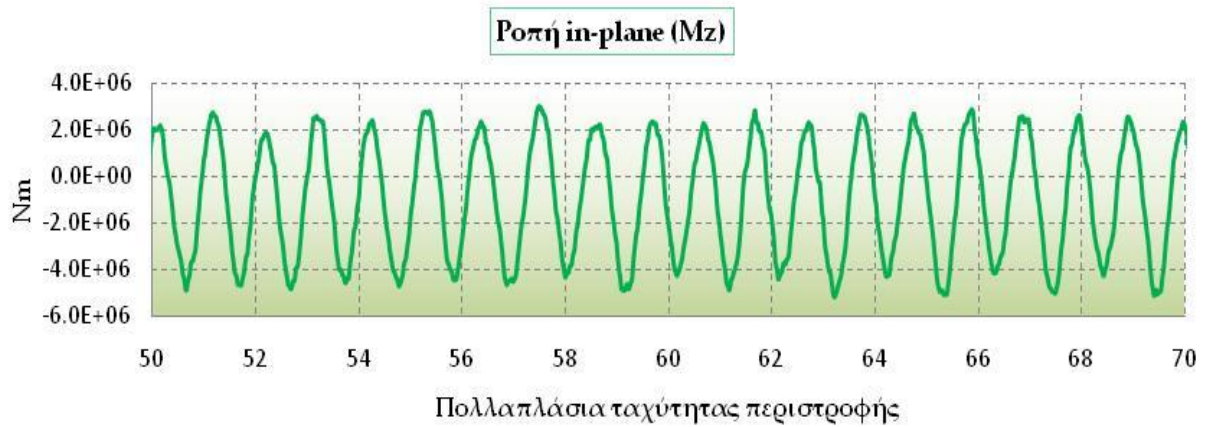
Είναι εμφανές ότι οι διακυμάνσεις της γωνίας βήματος είναι πολύ πιο έντονες στην πλωτή ανεμογεννήτρια. Ως αποτέλεσμα της ημιτονοειδούς κίνησης της πλατφόρμας η φαινόμενη ταχύτητα του δρομέα μεταβάλλεται διαρκώς και για αυτό είναι πιο συχνή και η μετάβαση του συστήματος ελέγχου από μεταβλητών στροφών σε μεταβλητού βήματος.

Στο διάγραμμα που φαίνεται παραπάνω για την παραγωγή ισχύος, φαίνονται οι έντονες διακυμάνσεις στην παραγωγή ισχύος που εμφανίζονται στην πλωτή ανεμογεννήτρια και οι οποίες οφείλονται στην κίνηση της πλατφόρμας και κυρίως στην πρόνευση και τη γωνιακή απόκλιση αλλά και στη σύζευξη αυτής με την ανεμογεννήτρια. Επομένως η ποιότητα της ισχύος και η φόρτιση των πτερυγίων της πλωτής ανεμογεννήτριας επηρεάζονται σημαντικά από την κίνηση του πλωτήρα και για αυτό θα ήταν χρήσιμη η εφαρμογή ξεχωριστού ελέγχου βήματος σε κάθε πτερύγιου, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοσή της.

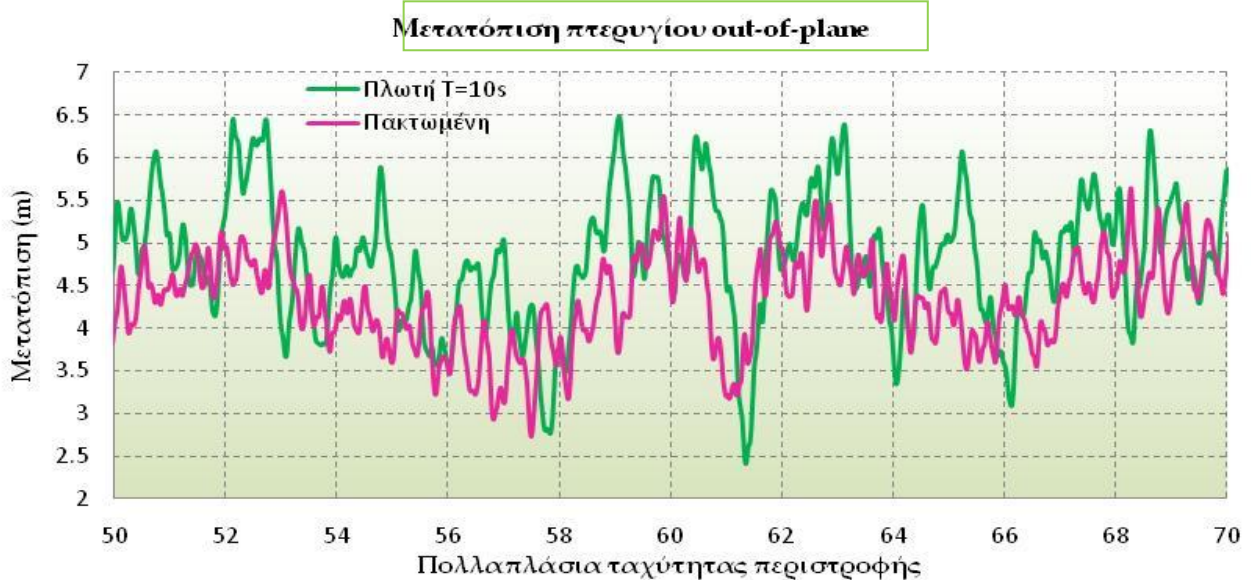
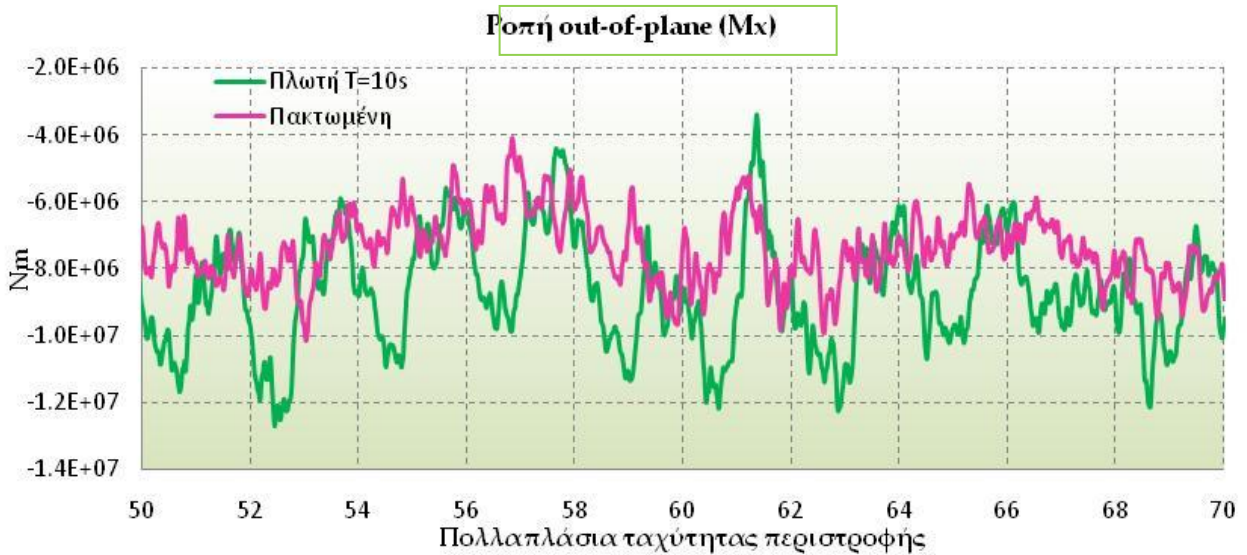




Σύμφωνα με τα τρία παραπάνω διαγράμματα που παρουσιάζουν τις τρεις συνιστώσες της δύναμης που ασκούνται στην πλήμνη του πτερυγίου, παρατηρούμε ότι ενώ η F_x και η F_y ακολουθούν μια αρμονική ταλάντωση, η F_z που είναι στην κατεύθυνση του ανέμου παρουσιάζει περισσότερες διακυμάνσεις.



Τα δυο ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζουν συγκριτικά τη ροπή out-of-plane και τη μετατόπιση out-of-plane του πτερυγίου. Και εδώ είναι εμφανής η επίδραση της κίνησης του πλωτήρα, καθώς φαίνεται η αύξηση τόσο της ροπής που ασκείται όσο και της μετατόπισης του ακροπτερυγίου. Πάλι παρατηρείται μια συχνότητα η οποία είναι η μισή της συχνότητας περιστροφής του δρομέα και αντιστοιχεί στους βαθμούς ελευθερίας του πλωτήρα. Αντίθετα όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τις ανεμογεννήτριες στη στεριά η συχνότητα που επικρατεί στη μετατόπιση και τη ροπή κατά τη διεύθυνση της πλευρικής ταλάντωσης είναι το 1Ρ.

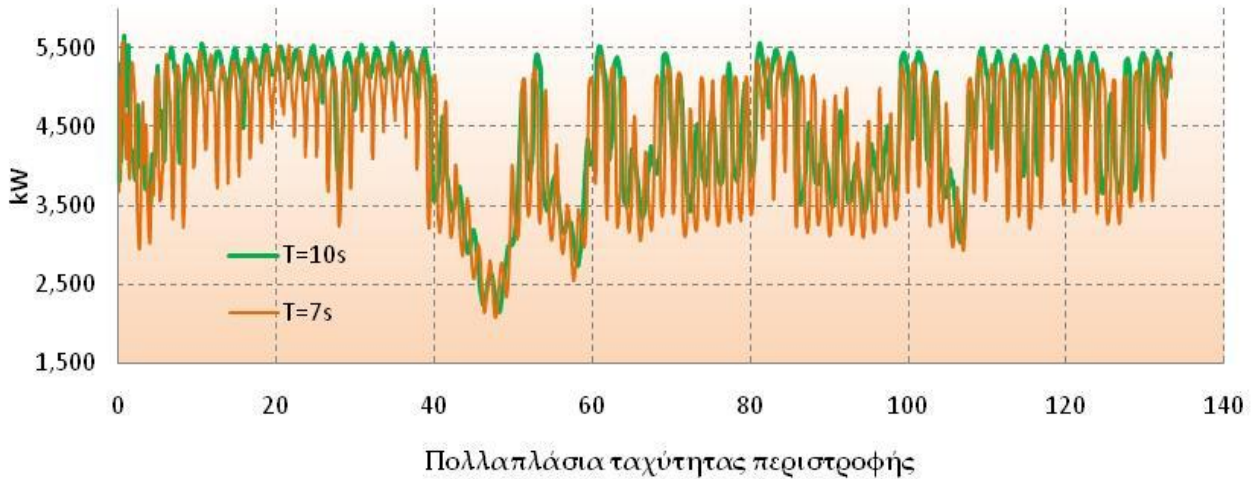


Στη συνέχεια παρουσιάζεται η παραμετρική ανάλυση ως προς την περίοδο κυματισμού και το πλάτος της κίνησης της πλατφόρμας. Σύμφωνα με την ανάλυση του αιολικού δυναμικού της Ελλάδας, η περίοδος του κυματισμού των ελληνικών θαλασσών είναι μικρότερη από 10 s, που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της περίπτωσης αναφοράς. Έτσι παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για περίοδο 7 και 5 s. Επιπλέον γίνεται ανάλυση για μεγαλύτερο ύψος κύματος και μεγαλύτερη κλίση πρόνευσης.

Πλωτή ανεμογεννήτρια T=7s

Οι συνθήκες λειτουργίας είναι ίδιες με την περίπτωση αναφοράς που αναλύθηκε παραπάνω. Η μόνη διαφορά είναι η περίοδος κυματισμού, η οποία εδώ είναι 7s. Στην πορεία παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δυνάμεων, των ροπών και των μετακινήσεων των πτερυγίων συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς (T=10s).

Παραγωγή Ισχύος

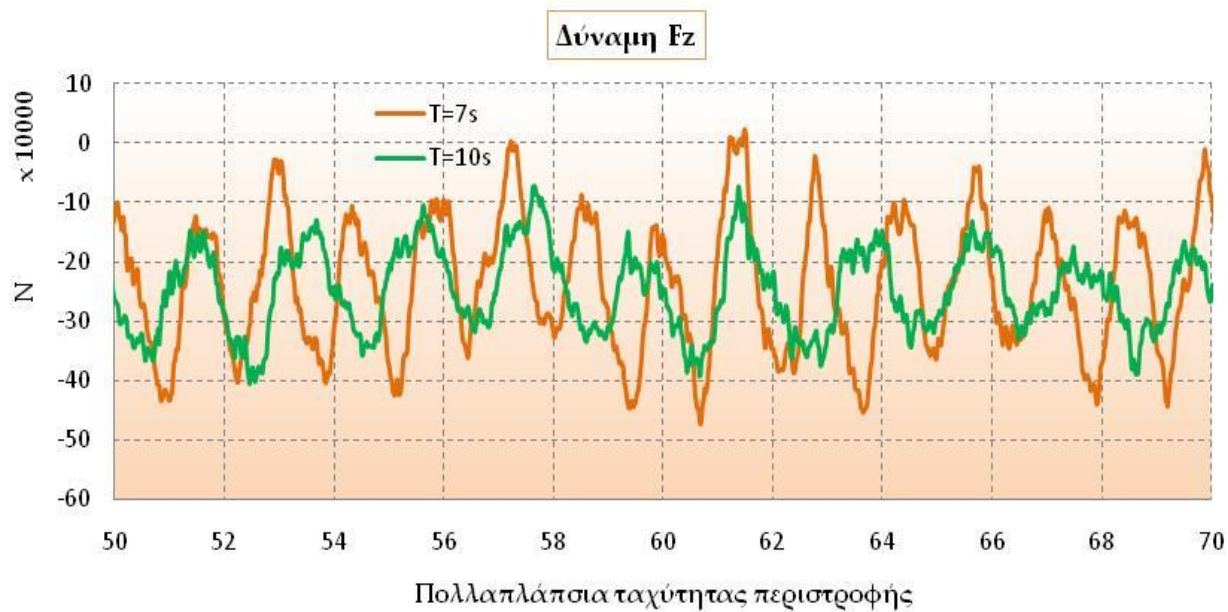
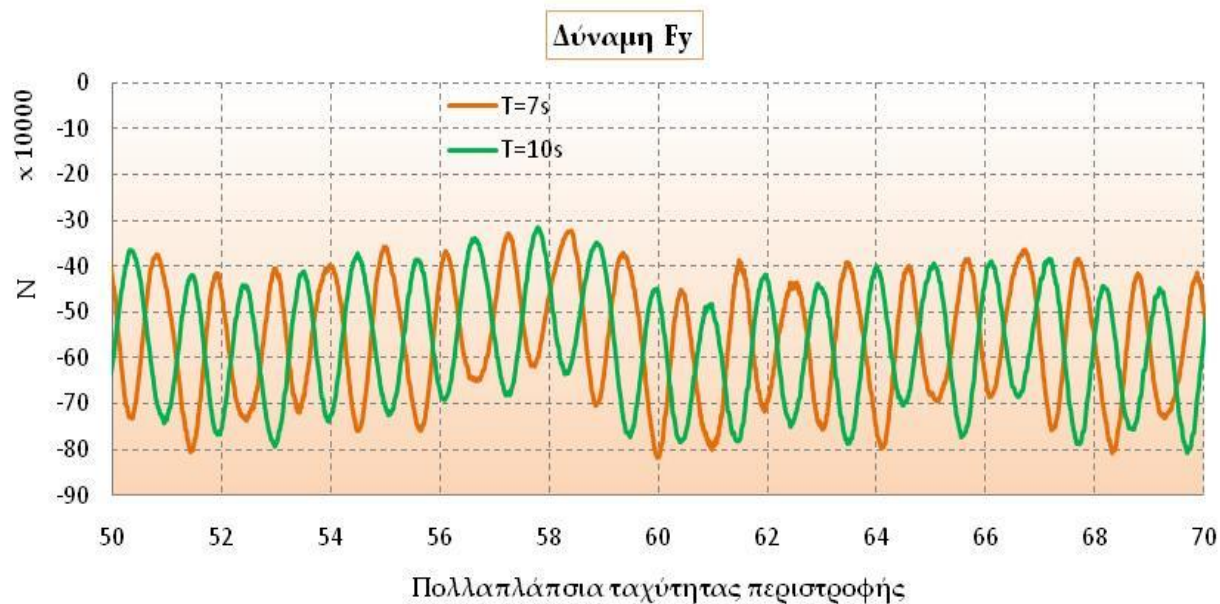
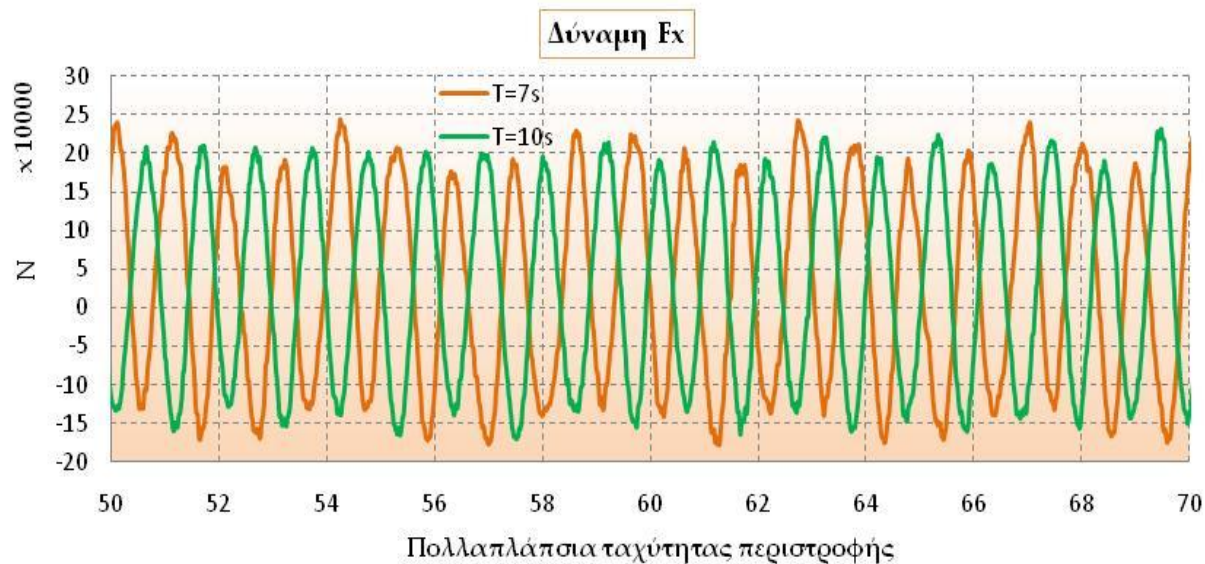


Ροπή out-of-plane (Mx)



Ροπή out-of-plane (Mx)



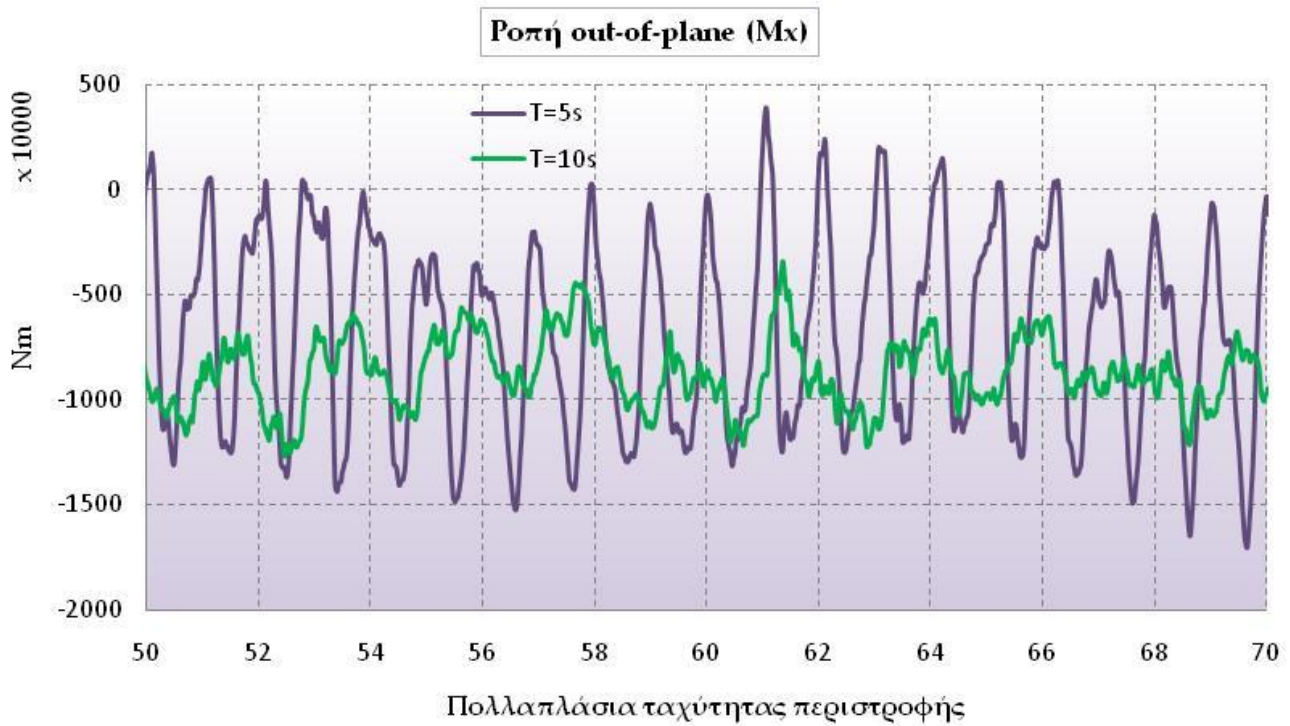
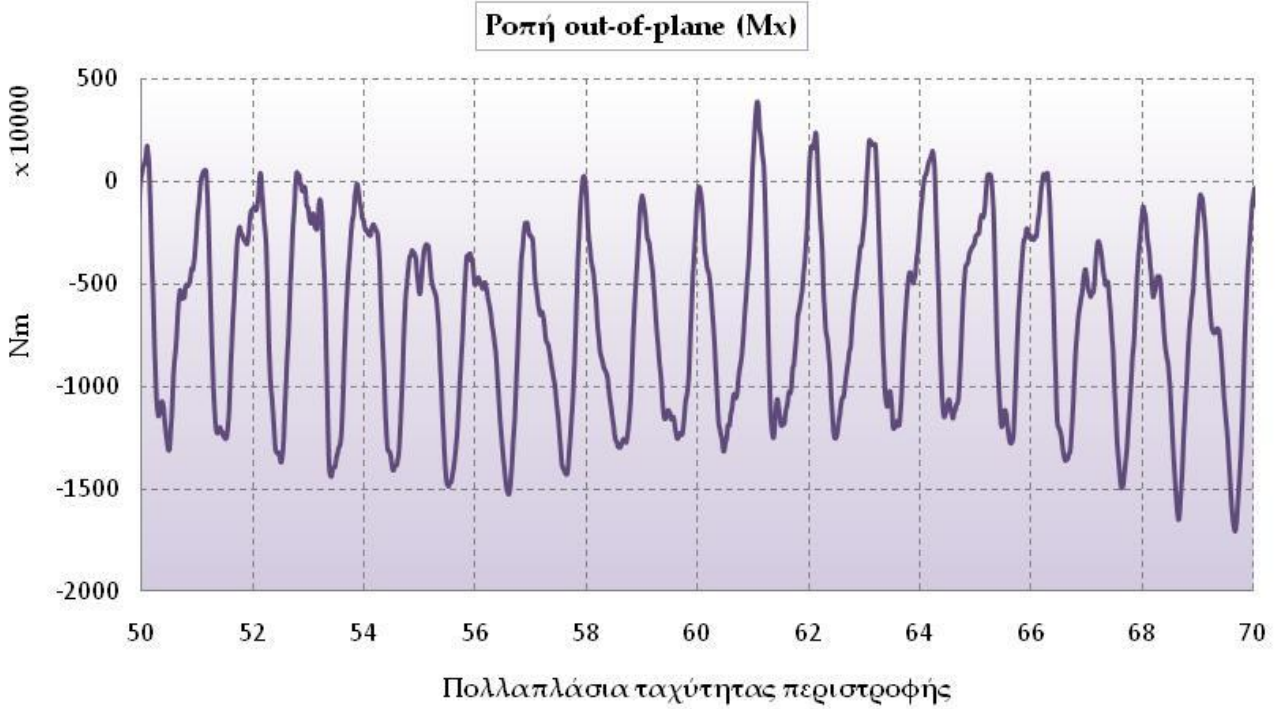


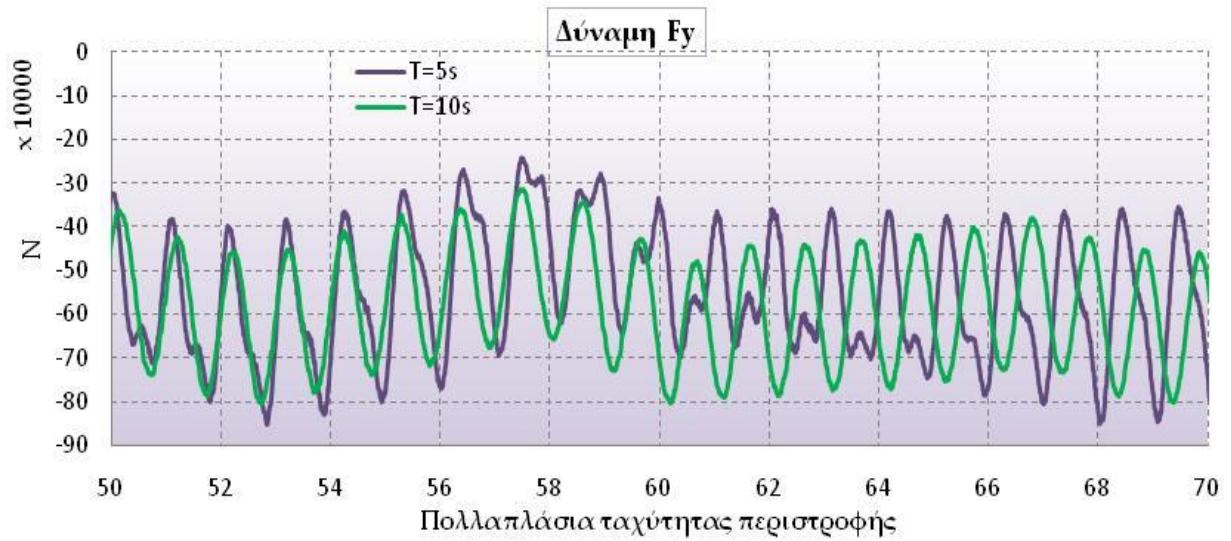
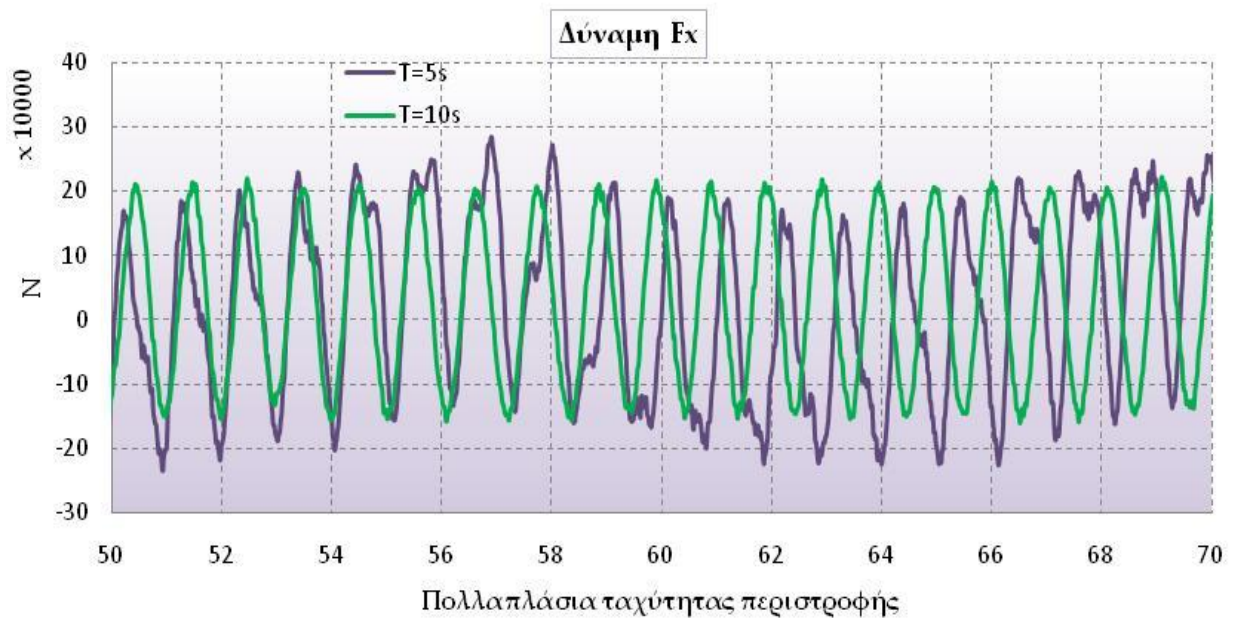


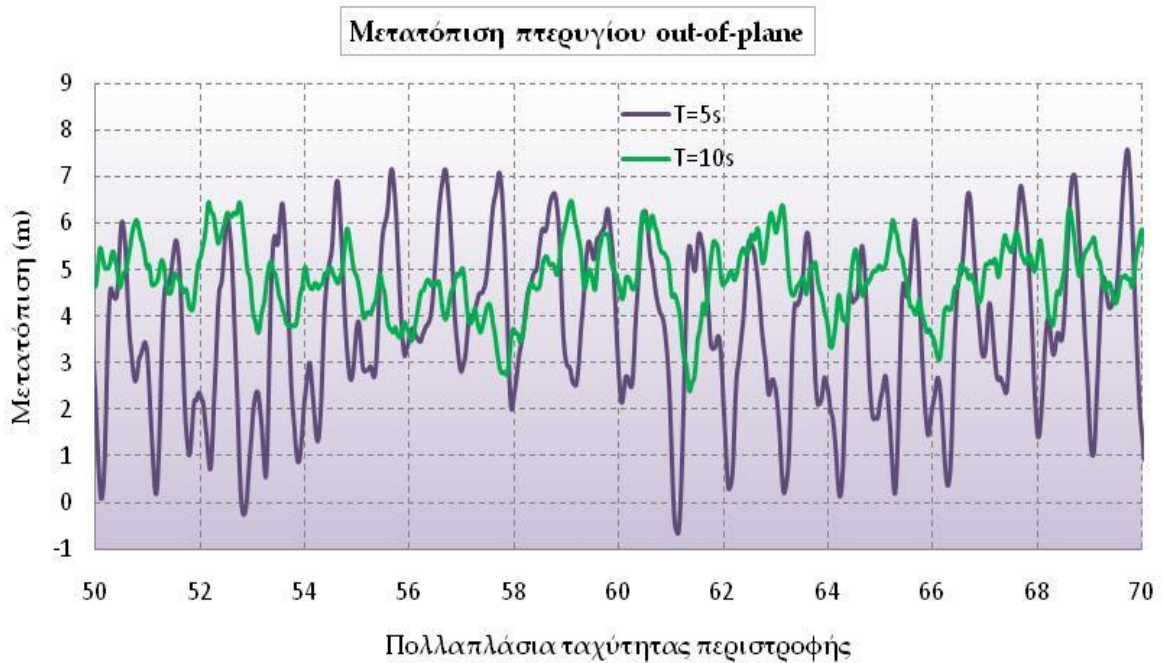
Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται είναι αυτά που εμφανίζουν και τις μεγαλύτερες διαφορές με την περίπτωση αναφοράς. Σε όλα παρατηρούμε μια αύξηση του πλάτους των ταλαντώσεων που πραγματοποιεί το πτερύγιο. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο αφού καθώς μειώνεται η περίοδος του κυματισμού πλησιάζει τη συχνότητα περιστροφής του δρομέα, δηλαδή πλησιάζει στο συντονισμό.

Πλωτή ανεμογεννήτρια T=5s

Και εδώ οι συνθήκες λειτουργίας είναι ίδιες με την περίπτωση αναφοράς με τη μόνη διαφορά στην περίοδο του κυματισμού, η οποία εδώ είναι 5s. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δυνάμεων, των ροπών και των μετακινήσεων των πτερυγίων συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς (T=10s).



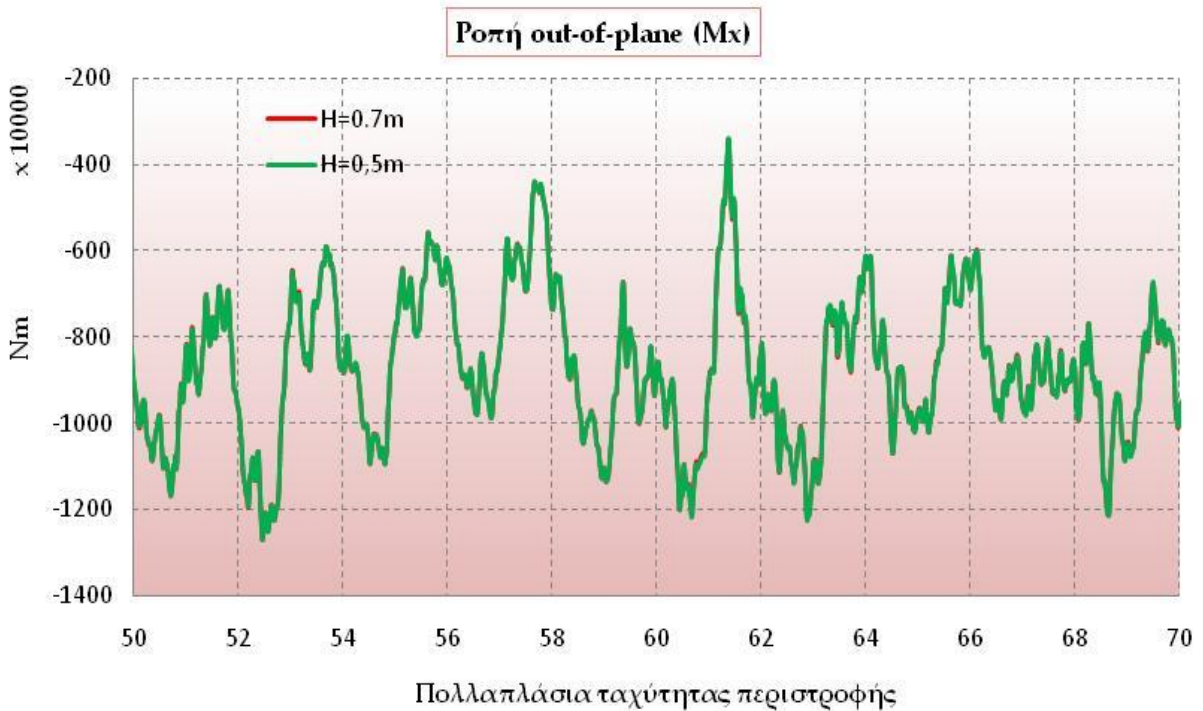


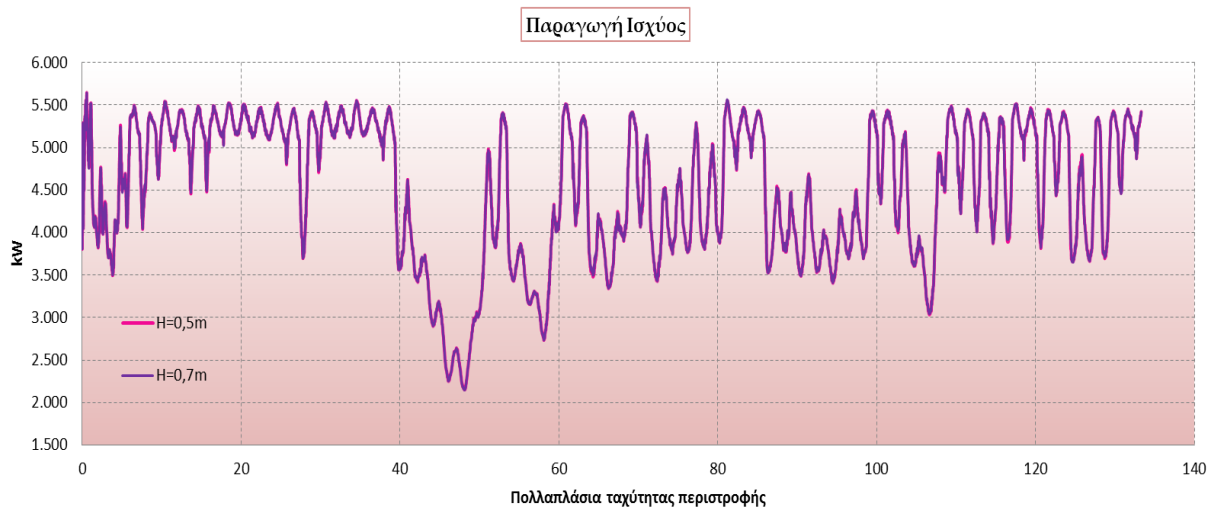


Εδώ οι διαφορές που εμφανίζονται στα πλάτη είναι ακόμα μεγαλύτερες, καθώς τόσο οι μετατοπίσεις όσο και οι ροπές αυξάνονται δραματικά σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αυτό οφείλεται στο ότι η περίοδος του κύματος σχεδόν συντονίζεται με την συχνότητα περιστροφής του δρομέα. Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι η δυναμική σύζευξη ανάμεσα στις κινήσεις της πλατφόρμας και της ανεμογεννήτριας είναι ιδιαίτερα έντονη.

Πλωτή ανεμογεννήτρια, πλάτος επάνω-κάτω ταλάντωσης (heave) = 0.7m

Όπως και προηγουμένως οι συνθήκες λειτουργίας παραμένουν ίδιες με την περίπτωση αναφοράς, με μόνη αλλαγή αυτή τη φορά το ύψος κύματος, το οποίο επηρεάζει το πλάτος της πάνω-κάτω ταλάντωσης (heave). Και εδώ τα διαγράμματα παρουσιάζονται συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς, ώστε να φαίνεται η επίδραση της εκάστοτε αλλαγής των συνθηκών λειτουργίας στην απόκριση της ανεμογεννήτριας.

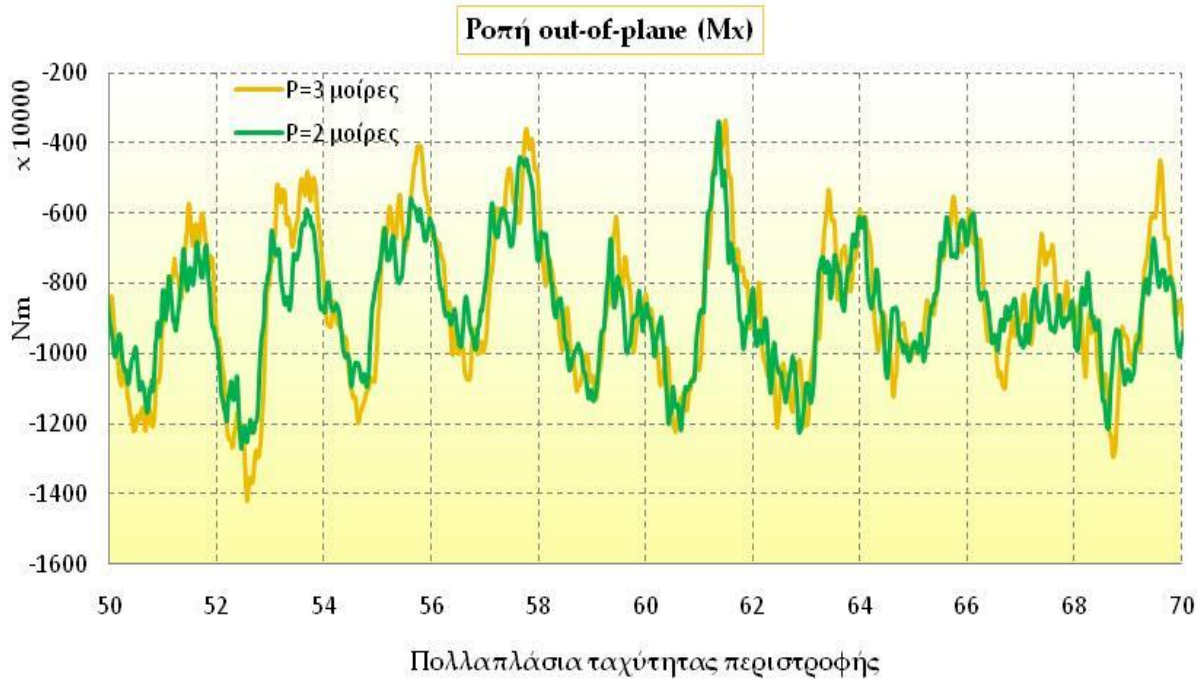
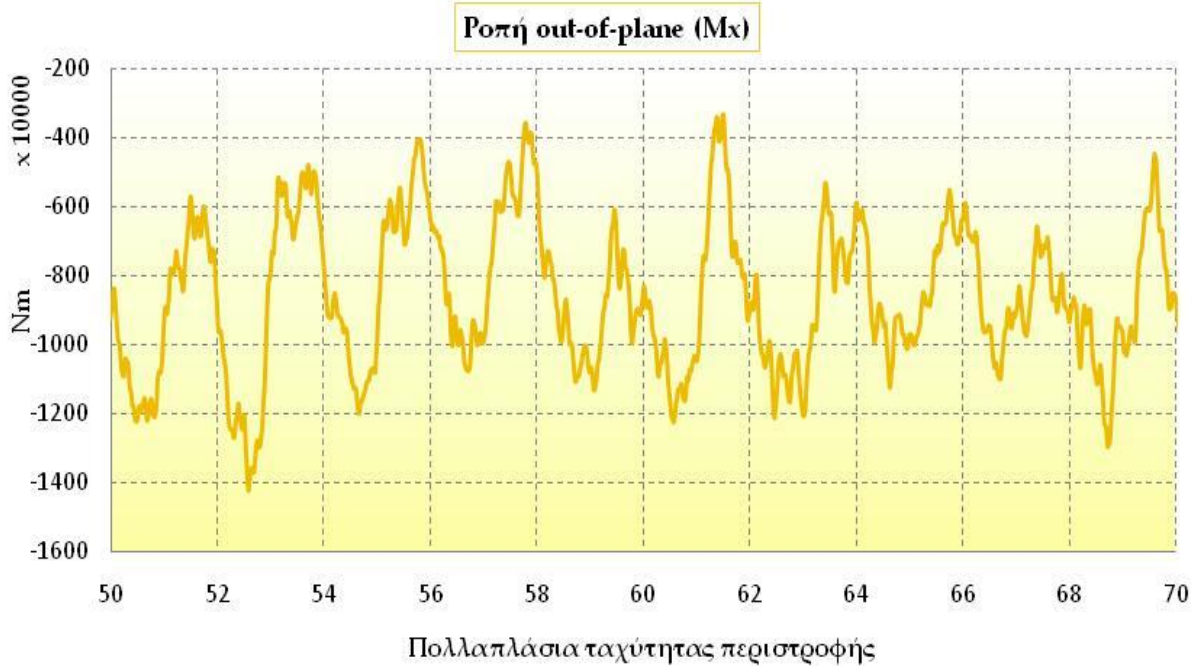


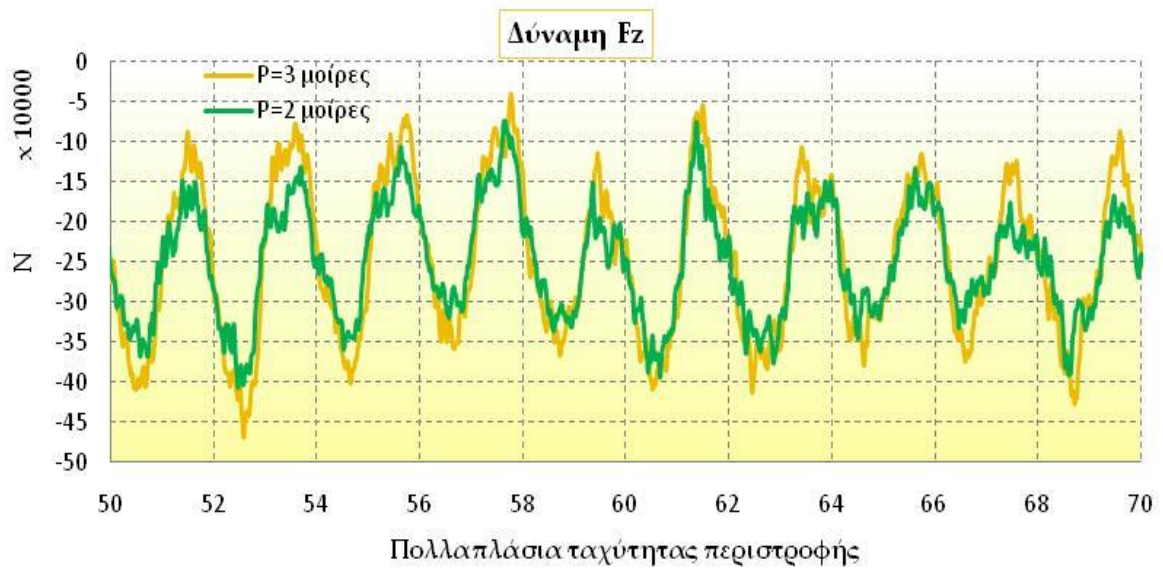
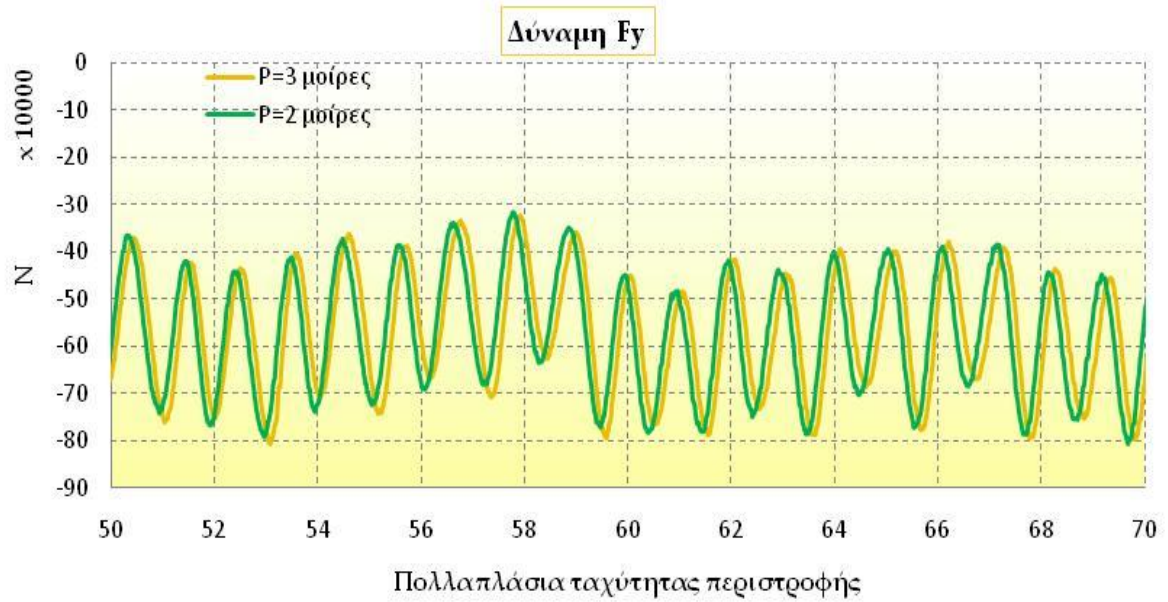
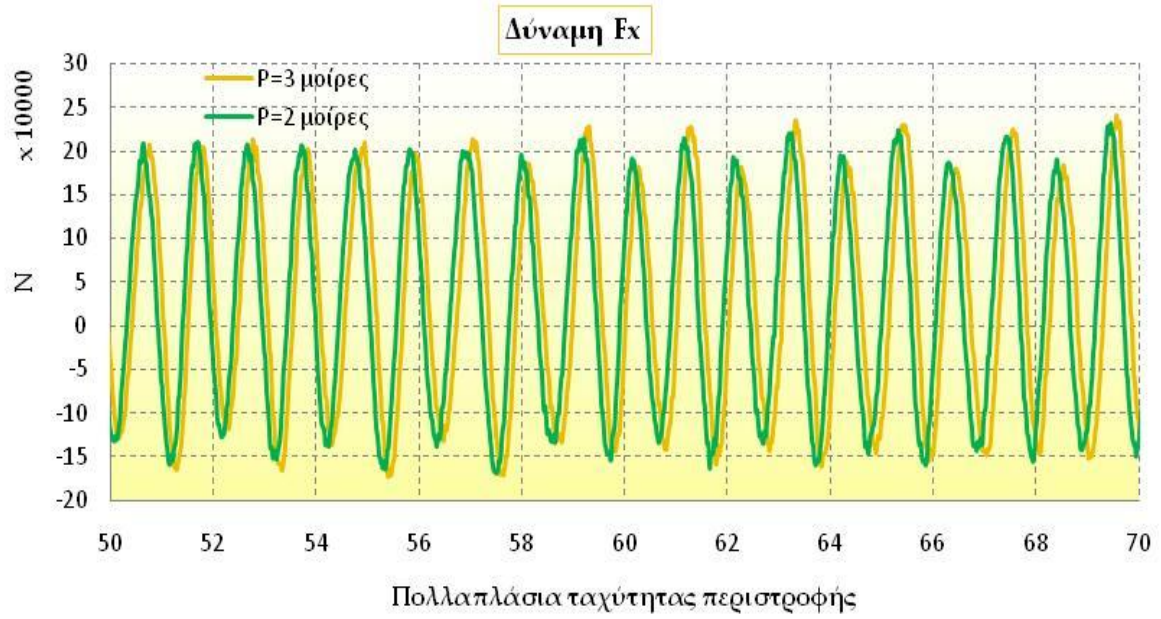


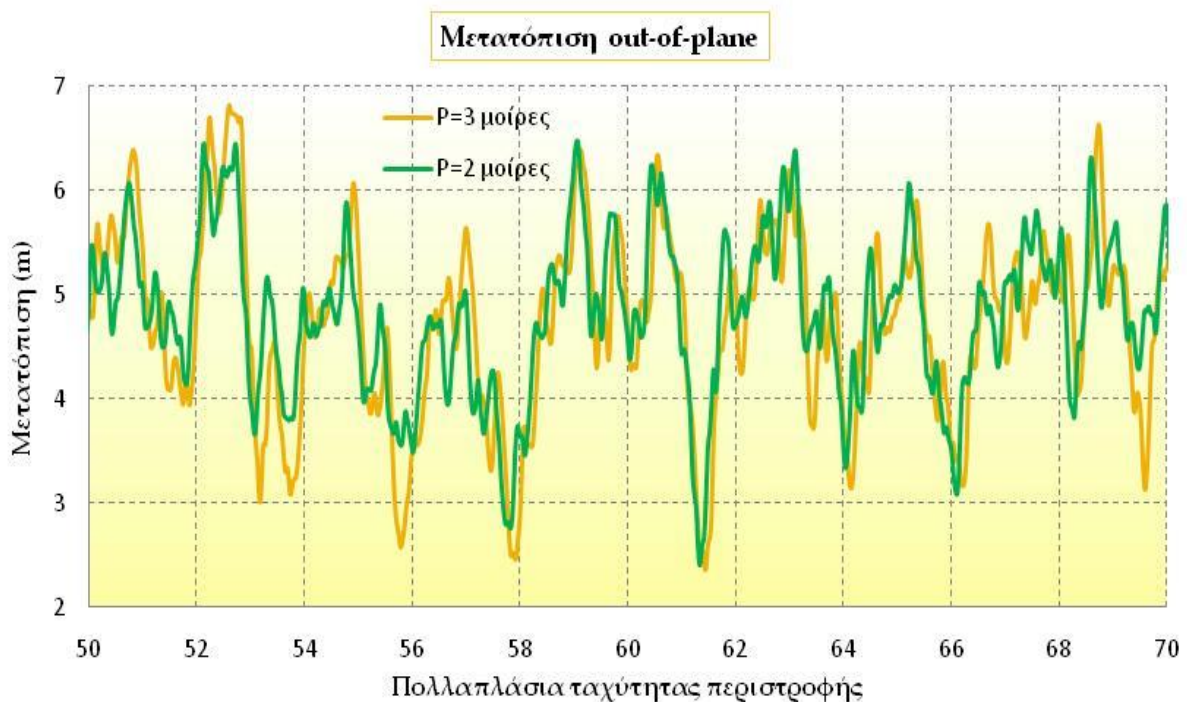
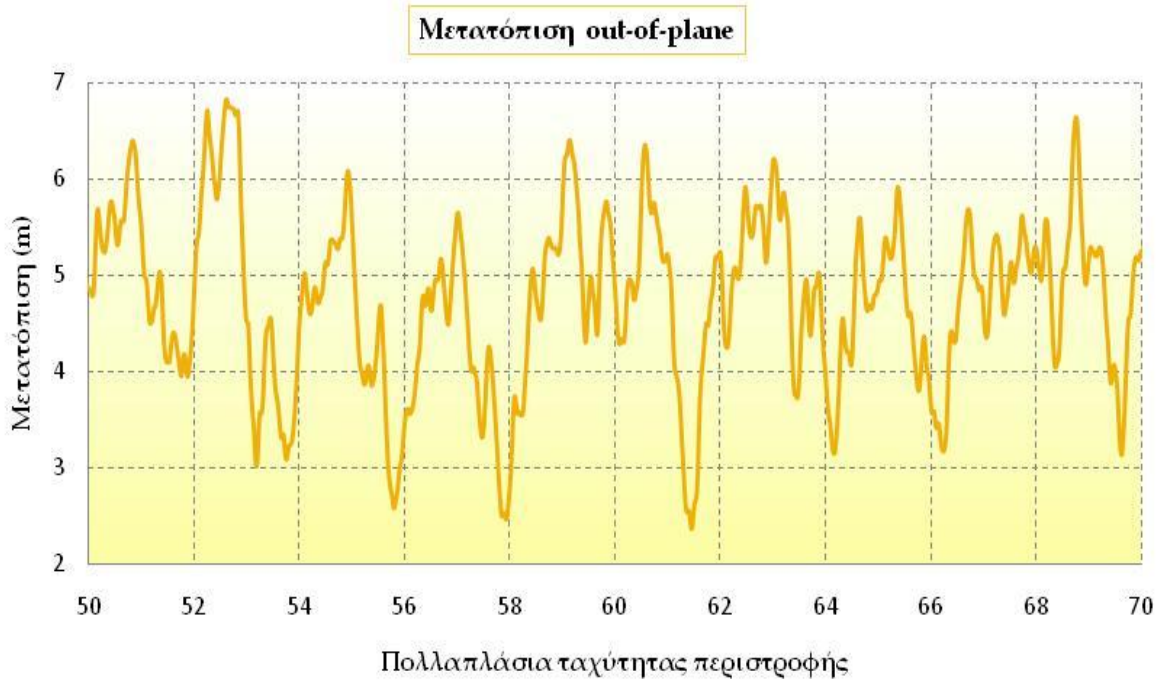
Εδώ παρατηρούμε ότι οι μεταβολές στο ύψος κύματος δεν επηρεάζουν τη ροπή και τη μετατόπιση του πτερυγίου, όπως συμβαίνει με την περίοδο του κυματισμού. Πρέπει να αναφερθεί ότι έχει γίνει η θεώρηση, πως η μεταβολή στο ύψος κύματος επηρεάζει μόνο την πάνω-κάτω ταλάντωση (heave) της πλατφόρμας.

Πλωτή ανεμογεννήτρια, κλίση πρόνευσης 3°

Η αλλαγή στις αρχικές συνθήκες λειτουργίας σε αυτήν την περίπτωση είναι το πλάτος της πρόνευσης της πλατφόρμας. Για μεγαλύτερη ακρίβεια των υπολογισμών έχει θεωρηθεί ότι η πρόνευση πραγματοποιείται γύρω από μια μέση τιμή της τάξης των 2,5°, καθώς ο πλωτήρας δεν μπορεί να πραγματοποιεί ταλάντωση στην διεύθυνση της πρόνευσης με μεγάλο πλάτος, αλλά σταθεροποιείται σε μια συγκεκριμένη κλίση και όχι κατακόρυφα.





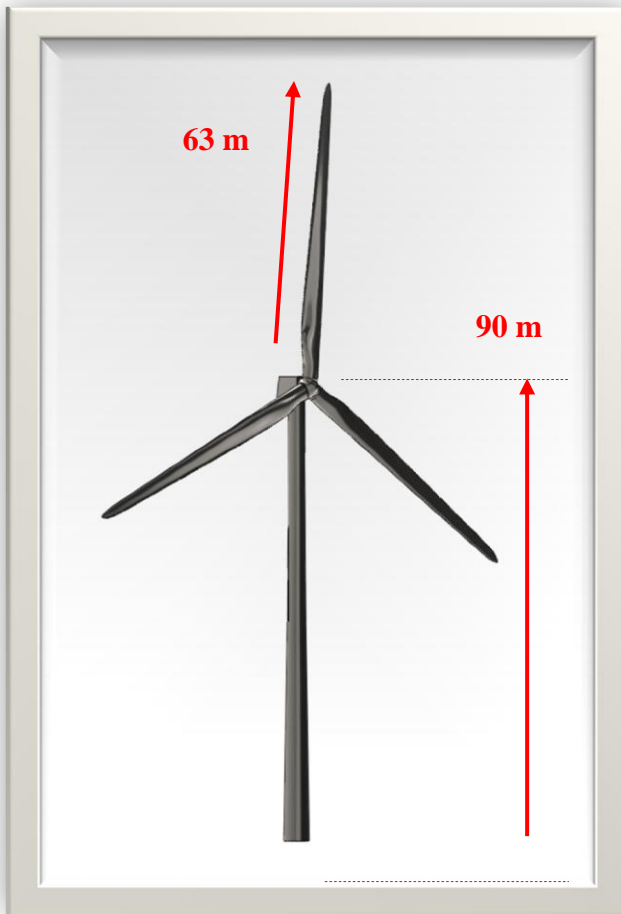


Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται μια μικρή επίδραση της κλίσης της πρόνευσης στην απόκριση της ανεμογεννήτριας, δηλαδή έχει αυξηθεί λίγο το πλάτος της ταλάντωσης της ροπής και της μετατόπισης του πτερυγίου. Η δύναμη που ασκείται όμως στα πτερύγια εμφανίζει πολύ μικρές διαφορές τόσο στη φάση όσο και στο πλάτος.

Τελικά μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο τη δυναμική της ανεμογεννήτριας είναι η περίοδος του κυματισμού. Αυτό συμβαίνει λόγω του κινδύνου συντονισμού ανάμεσα στην περιοδική κίνηση του πλωτήρα και στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 Προσομοίωση SolidWorks

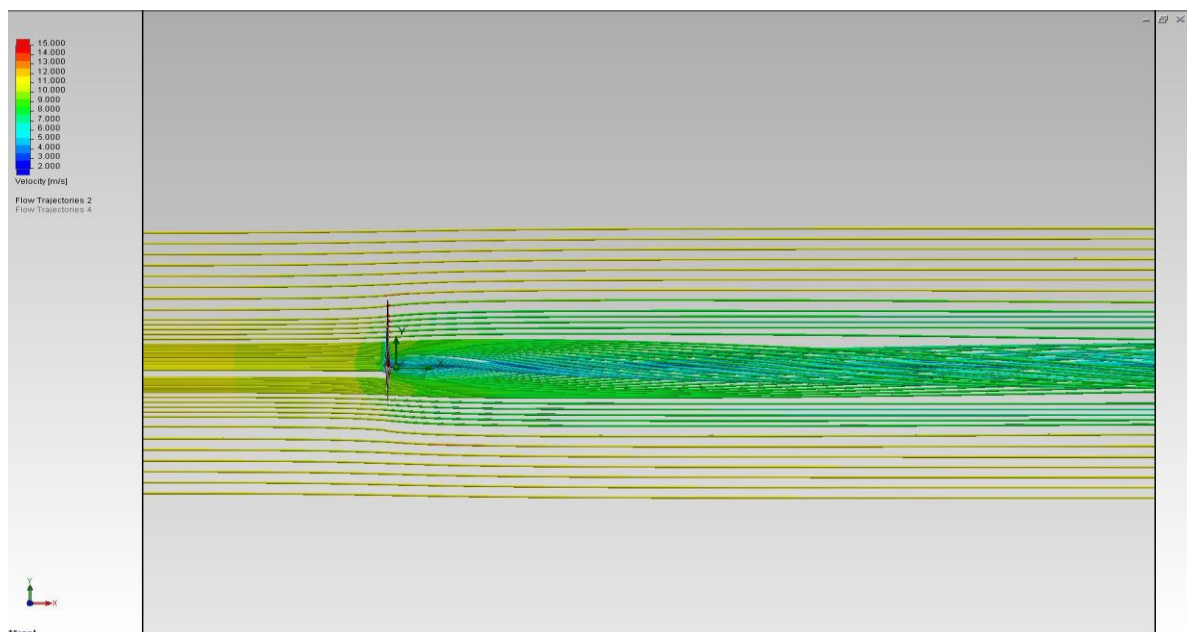


Εικόνα 131- Σχέδιο Ανεμογεννήτριας
κάτω Εικόνα 132-Ομόρρου

βήματος των πτερυγίων 0° . Στην εικόνα είναι εμφανές το ομόρρου που αναπτύσσεται, ο δυναμικός πυρήνας στο κέντρο του, καθώς και η περιστροφή της ροής πίσω από το δρομέα.

Το σχεδιαστικό πακέτο SolidWorks χρησιμοποιήθηκε για προσομοίωση και το σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας, όσο και της ανάλυσης των ιδιοσυχνοτήτων μιας πλωτής ανεμογεννήτριας. Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας που σχεδιάστηκε είναι αυτό που φαίνεται στη διπλανή εικόνα. Τα πτερύγια και ο πύργος είναι όμοια με το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση με τον GAST.

Το πακέτο του SolidWorks παρέχει τη δυνατότητα και για ανάλυση της ροής γύρω από το σώμα. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται το αποτέλεσμα που παίρνουμε από την προσομοίωση της ροής γύρω από το δρομέα, για ταχύτητα ανέμου 11 m/s. Για αυτόν τον άνεμο η συχνότητα περιστροφής του ρότορα είναι 1,267 rad/s και η γωνία



5.2 Ιδιοσυχνότητες πλωτής ανεμογεννήτριας (Frequency Analysis)

Για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων της πλατφόρμας χρησιμοποιήθηκε το SolidWorks simulation frequency analysis. Ο κυματισμός προσομοιώθηκε δίνοντας ελαστική στήριξη στο κάτω μέρος της πλατφόρμας με δυο τάσης, μια ορθή των 15.000 (N/m)/m**2 και μια διατμητική των 1.000 (N/m)/m**2.

Σε αυτού του είδους την προσομοίωση δεν μπορούμε να προσθέσουμε την περιστροφή του δρομέα. Για το λόγο αυτό οι μόνες δυνάμεις που ασκούνται στη μηχανή είναι η ώση στο ρότορα, η δύναμη στον πύργο και η πίεση του κυματισμού στον πλωτήρα. Η ώση έχει υπολογισθεί για $C_T = 0,5$

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \cdot A \cdot C_T \Rightarrow T = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 11^2 \cdot (\pi \cdot 63^2) \cdot 0,5 \Rightarrow T = 452.624N$$

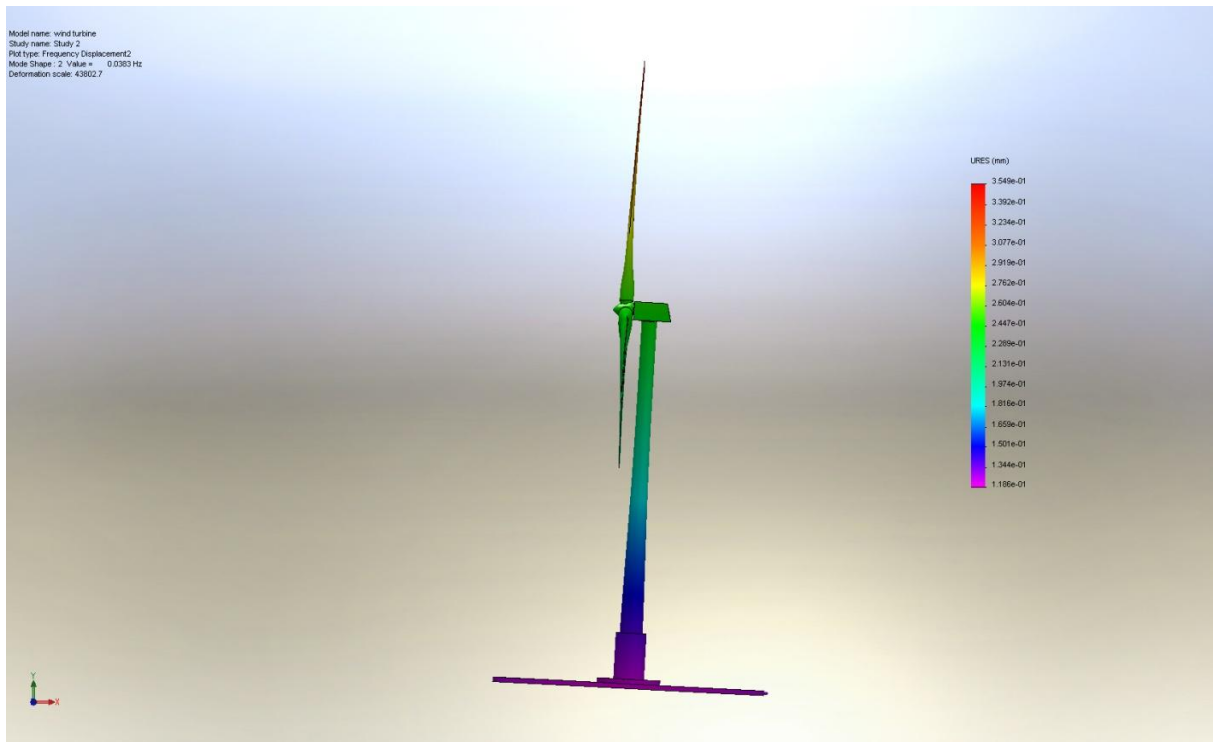
Και η δύναμη στον πύργο για $C_D = 0,6$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \cdot A \cdot C_D \Rightarrow F = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 11^2 \cdot (1,8 \cdot 90) \cdot 0,6 \Rightarrow F = 7.056N$$

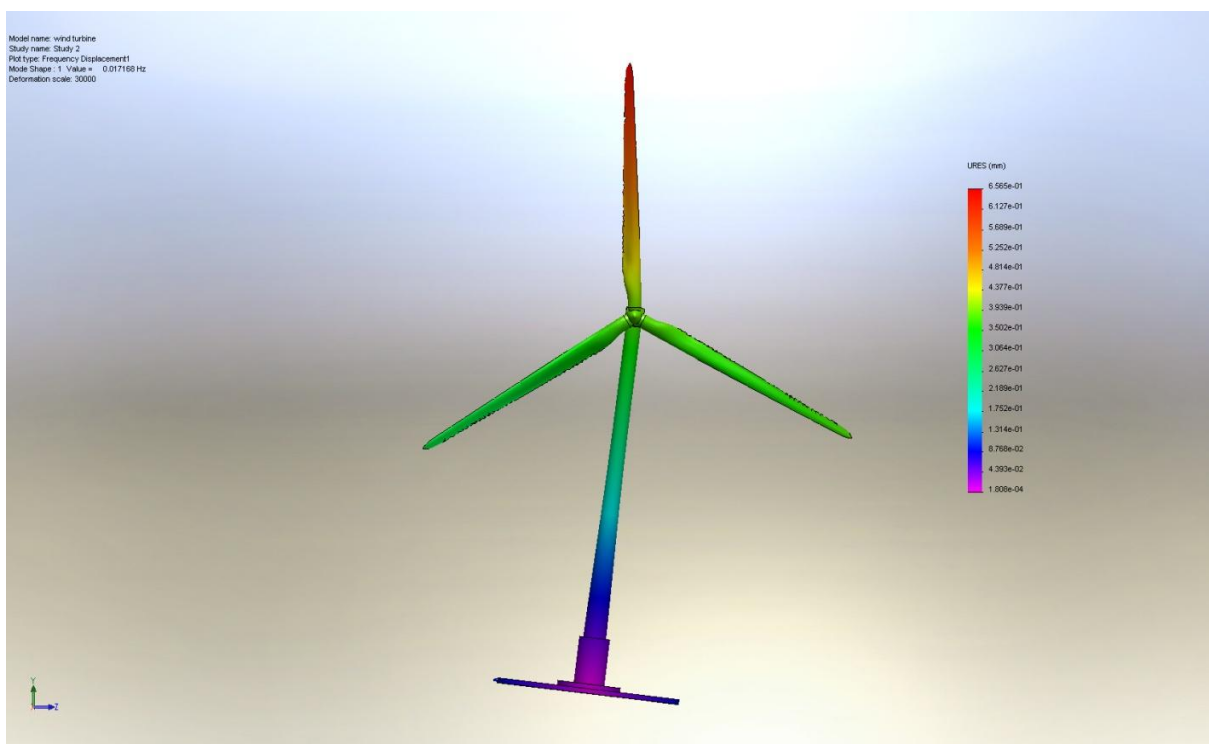
Τελικά οι ιδιοσυχνότητες των έξι βαθμών ελευθερίας της πλατφόρμας που προκύπτουν είναι πολύ κοντά στις τιμές που δίνονται από τους (Bir & Jonkman, 2007). Πιθανές αποκλίσεις οφείλονται στην προσομοίωση που κάνει το πρόγραμμα, αλλά και στις διαφορετικές δυνάμεις που πιθανώς έχουμε υποθέσει ότι ασκούνται στο σύστημα. Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων της πλατφόρμας. Επιπλέον στο παράρτημα 2 δίνεται η αναφορά όπως προκύπτει από το σχεδιαστικό πακέτο του SolidWorks.

Ιδιομορφές	Ιδιοσυχνότητες (Hz)
1. surge	0,0383
2. sway	0,017168
3. heave	0,16221
4. roll	0,047536
5. pitch	0,069882
6. yaw	0,053807

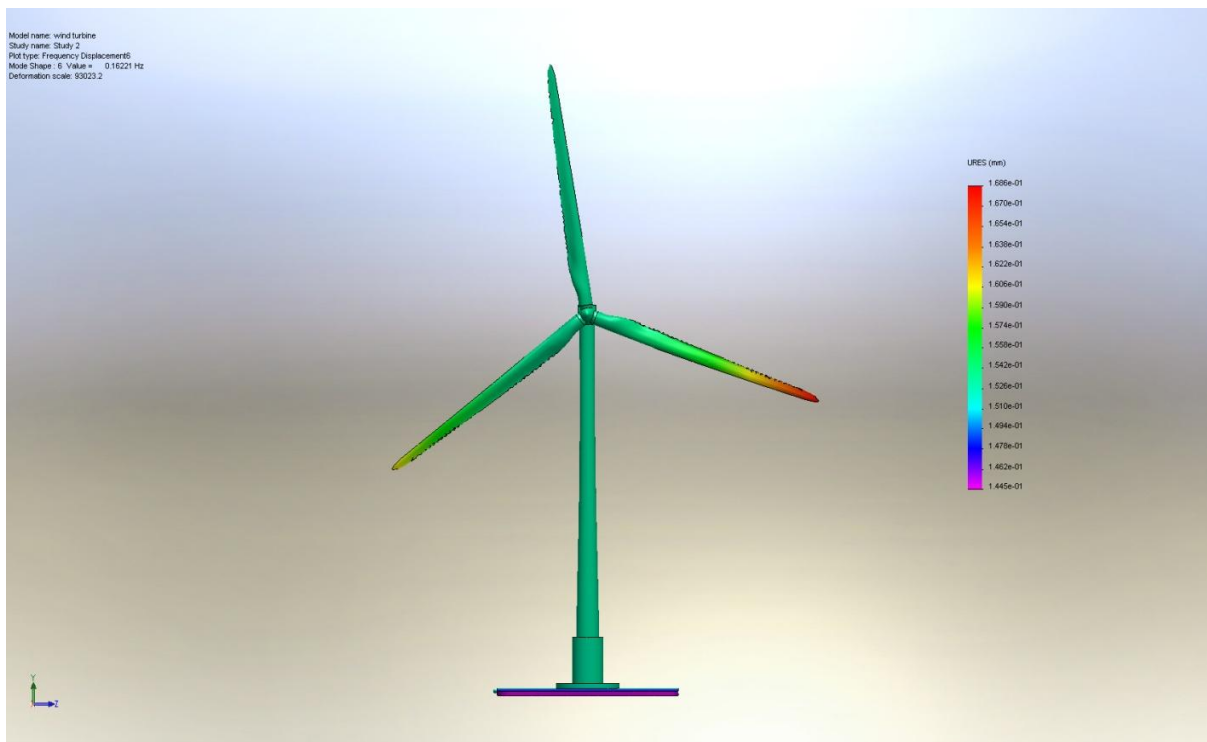
Οι ακόλουθες εικόνες παρουσιάζουν την κίνηση που προκαλεί στη μηχανή ο κάθε βαθμός ελευθερίας. Η διαφοροποίηση στο χρωματισμό αντιστοιχεί στις μετατοπίσεις που προκαλούνται από την κάθε ιδιομορφή στα επιμέρους κομμάτια της ανεμογεννήτριας. Στην πραγματικότητα η τιμή των μετατοπίσεων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που φαίνεται, αλλά όπως προαναφέρθηκε δεν ήταν δυνατή η προσθήκη της περιστροφής του δρομέα. Η περιστροφή και οι ιδιομορφές της flap και edge σε συνδυασμό με την κίνηση του πλωτήρα (δυναμική σύζευξη του συστήματος) είναι αυτά που προκαλούν τις μεγάλες μετατοπίσεις των πτερυγίων.



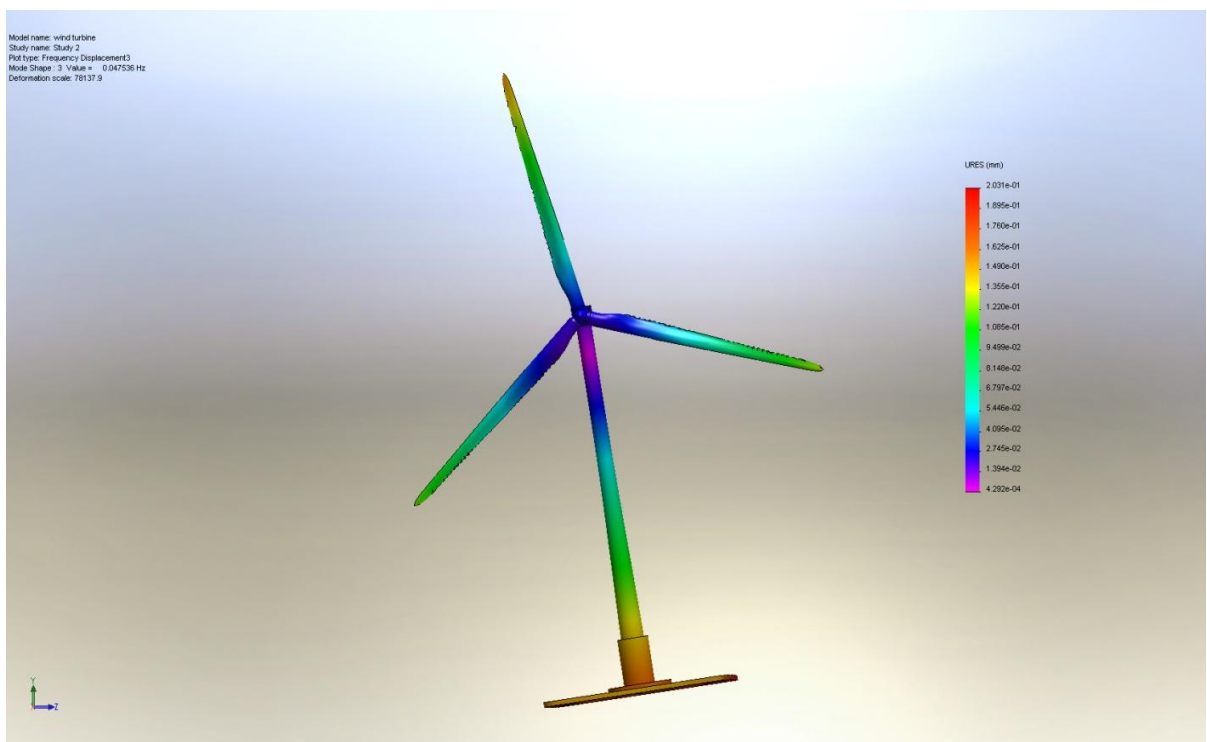
Εικόνα 133-surge



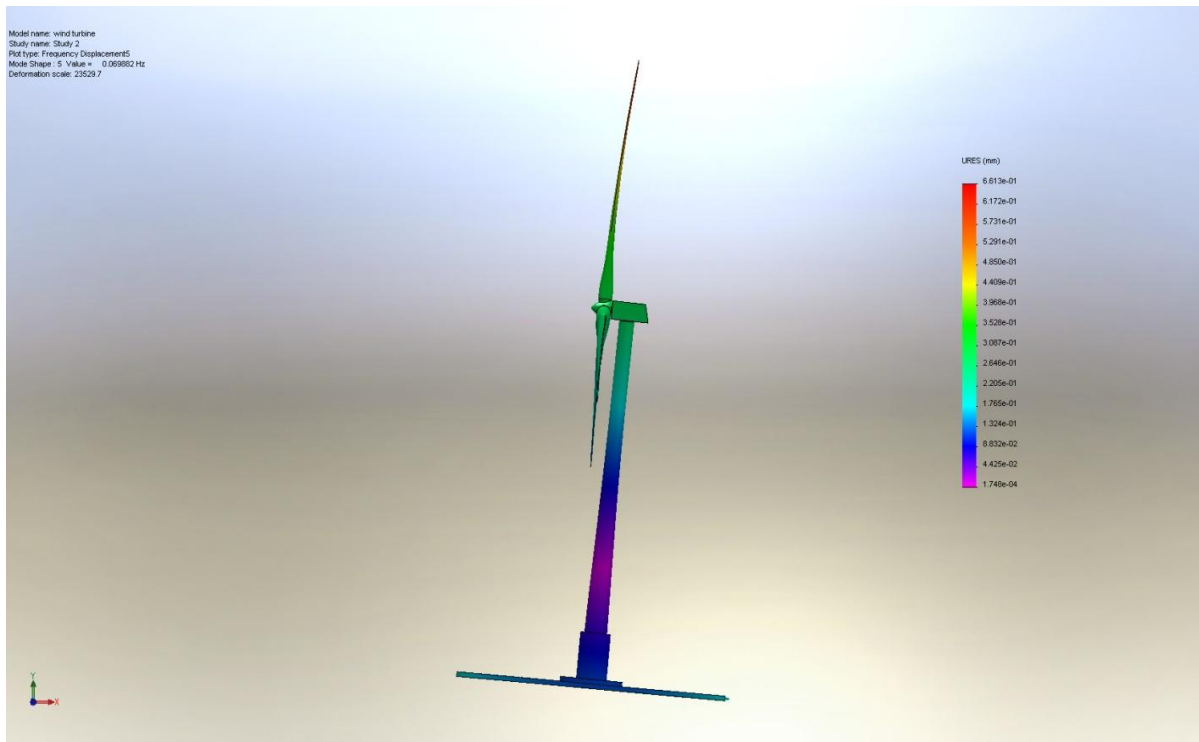
Εικόνα 134-sway



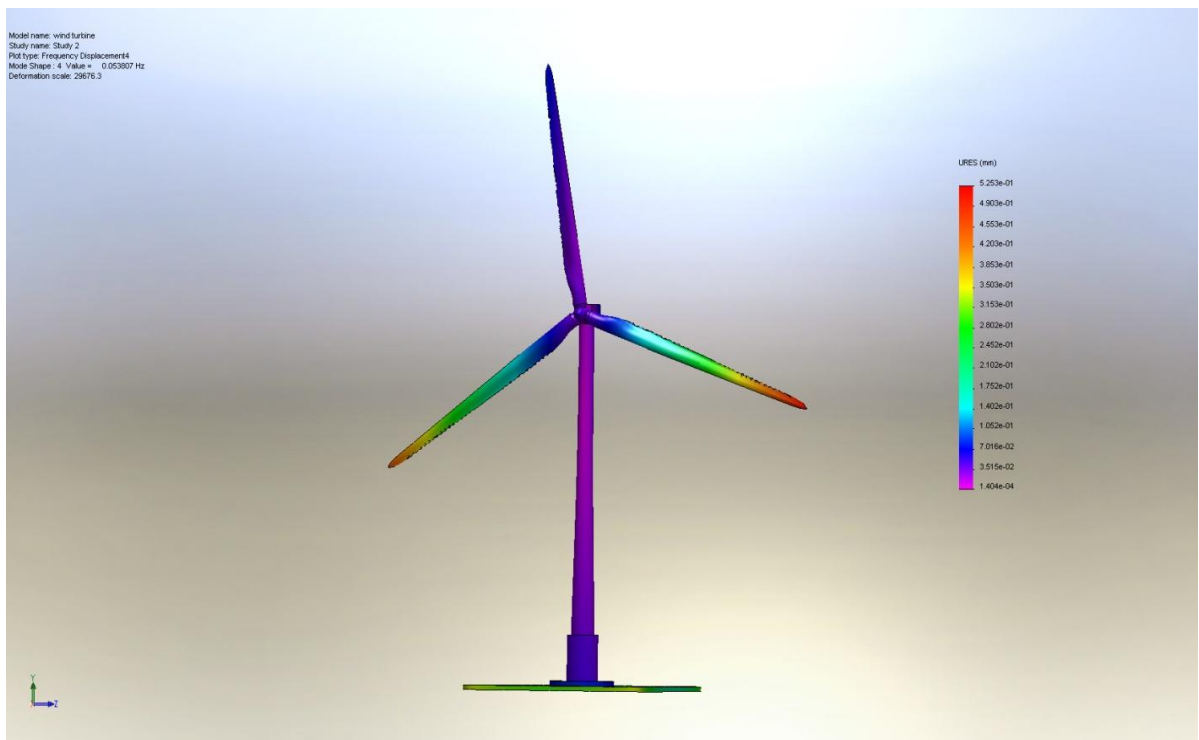
Εικόνα 135-heave



Εικόνα 136-roll



Εικόνα 137-pitch



Εικόνα 138-yaw

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1 Περιγραφή Πειράματος

Σκοπός του πειράματος που διεξήχθη ήταν η μελέτη της απόκρισης της ανεμογεννήτριας, η οποία βρίσκεται τοποθετημένη πάνω σε ένα πλωτήριο. Με άλλα λόγια, προσπαθήσαμε μέσα από πειραματικές μετρήσεις να δούμε την επίδραση της κίνησης του πλωτήρα στην παραγωγή της ισχύος και στα φορτία που ασκούνται στην ανεμογεννήτρια. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο ανεμογεννήτριας τύπου AIR BREEZE 200W, με διάμετρο δρομέα 1,17m. Η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι 12,5 m/s και η ταχύτητα έναρξης (V_{cut-in}) είναι 2,7 m/s. Η προσομοίωση του κυματισμού της θάλασσας έγινε με τον ακόλουθο τρόπο: χρησιμοποιήθηκε μια βάση η οποία στηρίζεται σε τρία ελατήρια και μέσω ενός διωστήρα συνδεδεμένου με έναν κινητήρα διεγείρεται το σύστημα. Όλη η διάταξη έχει εγκατασταθεί μέσα στην αεροδυναμική σήραγγα του εργαστηρίου Αεροδυναμικής. Πιο αναλυτική περιγραφή της διάταξης θα γίνει σε επόμενη παράγραφο.

Η πειραματική διάταξη είναι αυτή που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 139-Πειραματική διάταξη

6.2 Προσομοίωση κυματισμού

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ο κυματισμός της θάλασσας προσομοιώθηκε με τη βοήθεια τριών ελατηρίων. Για την επιλογή τους όμως, ήταν απαραίτητη η γνώση της συχνότητας της εξωτερικής διέγερσης του κινητήρα, προκειμένου να αποφευχθεί ο συντονισμός.

Καθώς η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιούμε στο πείραμα είναι μοντέλο, πρέπει να βρούμε τη σχέση ανάμεσα στα μεγέθη της και σε αυτά της full-scale ανεμογεννήτριας.

Ο γεωμετρικός λόγος ομοιότητας μοντέλου-full scale είναι: $\frac{D}{D_m} = a$ όπου ο δείκτης m χαρακτηρίζει το μοντέλο.

Η συχνότητα ενός συστήματος δίνεται από τη σχέση: $\Omega^2 \approx \frac{EI}{L^3} \cdot \frac{1}{\rho \cdot A \cdot L}$

Όπου:

$$EI = \frac{\pi \cdot r^4}{4} \cdot E$$

$$\rho \cdot A \cdot L = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot L$$

Άρα η αρχική εξίσωση γίνεται: $\Omega^2 \approx \frac{\pi \cdot r^4 \cdot E}{4 \cdot L^3} \cdot \frac{1}{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot L} = \frac{r^2 \cdot E / \rho}{4 \cdot L^4}$

Τελικά έχουμε την εξής αναλογία: $\Omega^2 \sim \left(\frac{E}{\rho}\right) \cdot \frac{r^2}{L^4}$ στην οποία ο πρώτος όρος είναι μια σταθερά k .

Τελικά θα ισχύει: $\frac{\Omega^2}{\Omega_m^2} = \frac{\frac{r^2}{L^4}}{\frac{r_m^2}{L_m^4}} = \left(\frac{r}{r_m}\right)^2 \cdot \left(\frac{L_m}{L}\right)^2 = a^2 \cdot \frac{1}{a^4} = \frac{1}{a^2}$

Άρα $\frac{\Omega}{\Omega_m} = \frac{1}{a} \Rightarrow \Omega_m = a \cdot \Omega$

Δηλαδή η συχνότητα του μοντέλου είναι ίση με τη συχνότητα της πραγματικής full-scale ανεμογεννήτριας πολλαπλασιασμένη επί το λόγο ομοιότητας.

Ο λόγος ομοιότητας είναι μια συνάρτηση της ακόλουθης μορφής:

$$a = f(u, \omega R, h, T) = u^a \cdot (\omega R)^\beta \cdot h^\gamma \cdot T^\delta$$

Η οποία με διαστατική ανάλυση δίνει:

$$a = m^a \cdot m^{-a} \cdot m^\beta \cdot s^{-\beta} \cdot m^\gamma \cdot s^\delta = m^{a+\beta+\gamma} \cdot s^{-a-\beta+\delta}$$

Επειδή όμως ο λόγος ομοιότητας είναι αδιάστατος αριθμός οι εκθέτες πρέπει να είναι ίσοι με μηδέν.

$$\text{Δηλαδή: } \left. \begin{array}{l} a + \beta + \gamma = 0 \\ a + \beta - \delta = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} \gamma = -\delta \\ \delta = a + \beta \end{array}$$

Άρα η σχέση του λόγου ομοιότητας γίνεται:

$$a = u^a \cdot (\omega R)^\beta \cdot h^{-(a+\beta)} \cdot T^{a+\beta} = \left(\frac{u \cdot T}{h} \right)^a \cdot \left(\frac{\omega \cdot R \cdot T}{h} \right)^\beta$$

$$\frac{u \cdot T}{h} = \text{σταθ.}$$

Οι όροι είναι σταθεροί

$$\frac{\omega \cdot R \cdot T}{h} = \text{σταθ.}$$

Καθώς και η αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου $\lambda_m = \frac{\omega \cdot R}{u} = \lambda$

Αφού οι παραπάνω όροι είναι σταθεροί θα ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις ανάμεσα στο μοντέλο και την πραγματική A/Γ:

$$\left(\frac{u \cdot T}{h_m} \right) = \frac{u \cdot T}{h}$$

$$\left(\frac{\omega \cdot R \cdot T}{h} \right)_m = \frac{\omega \cdot R \cdot T}{h}$$

Γνωρίζουμε ότι οι πραγματικές συνθήκες μιας ανεμογεννήτριας και του κυματισμού της θάλασσας είναι οι ακόλουθες:

$$\triangleright u = 10 \text{ m/s} \quad T = 5 \text{ s} \quad h = 1 \text{ m} \quad R = 25 \text{ m}$$

Για το μοντέλο γνωρίζουμε ότι:

$$\triangleright u = 5 \text{ m/s} \quad R = 0,5 \text{ m}$$

Μέσω της διατήρησης των προηγούμενων σχέσεων θα βρούμε τη συχνότητα που θα πρέπει να έχει η κατασκευή, καθώς και τη μέγιστη μετατόπιση για να προσομοιάζεται με ακρίβεια ο κυματισμός της θάλασσας.

$$\left(\frac{T}{h} \right)_m = \left(\frac{T}{h} \right) \cdot \frac{u}{u_m} = \left(\frac{5}{1} \right) \cdot \frac{10}{5} = 10 \Rightarrow \left(\frac{T}{h} \right)_m = 10$$

$$\left(\frac{R}{h}\right)_m = \left(\frac{R}{h}\right) \Rightarrow h_m = R_m \cdot \left(\frac{h}{R}\right) \Rightarrow h_m = 0,5 \cdot \frac{1}{25} \Rightarrow h_m = 0,02m$$

$$\left(\frac{T}{h}\right)_m = 10 \Rightarrow T_m = 0,2s$$

Άρα

↓

$$f_m = 5Hz$$

Δηλαδή το σύστημα πρέπει να έχει συχνότητα

$$f_m = 5Hz$$

και μετατόπιση

$$h_m = 0,02m$$

Οι αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σύστημα είναι:

$$F_a = m \cdot x \cdot \omega^2 = m \cdot x \cdot (2\pi f)^2 = 60 \cdot 0,02 \cdot (2\pi \cdot 5)^2 = 1185N$$

Μια δύναμη της τάξεως των 121kg.

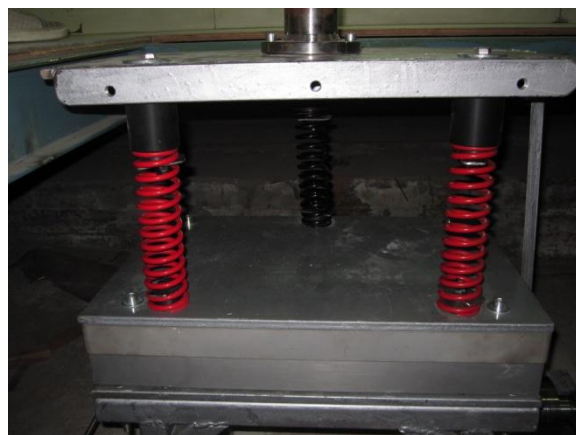
Ο σερβοκινητήρας που επιλέγουμε για να κινεί την κατασκευή πρέπει να είναι ροπής:

$$1185 \cdot 0,02 = 24Nm$$

Στη διπλανή εικόνα φαίνεται ο κινητήρας, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τη διάταξη

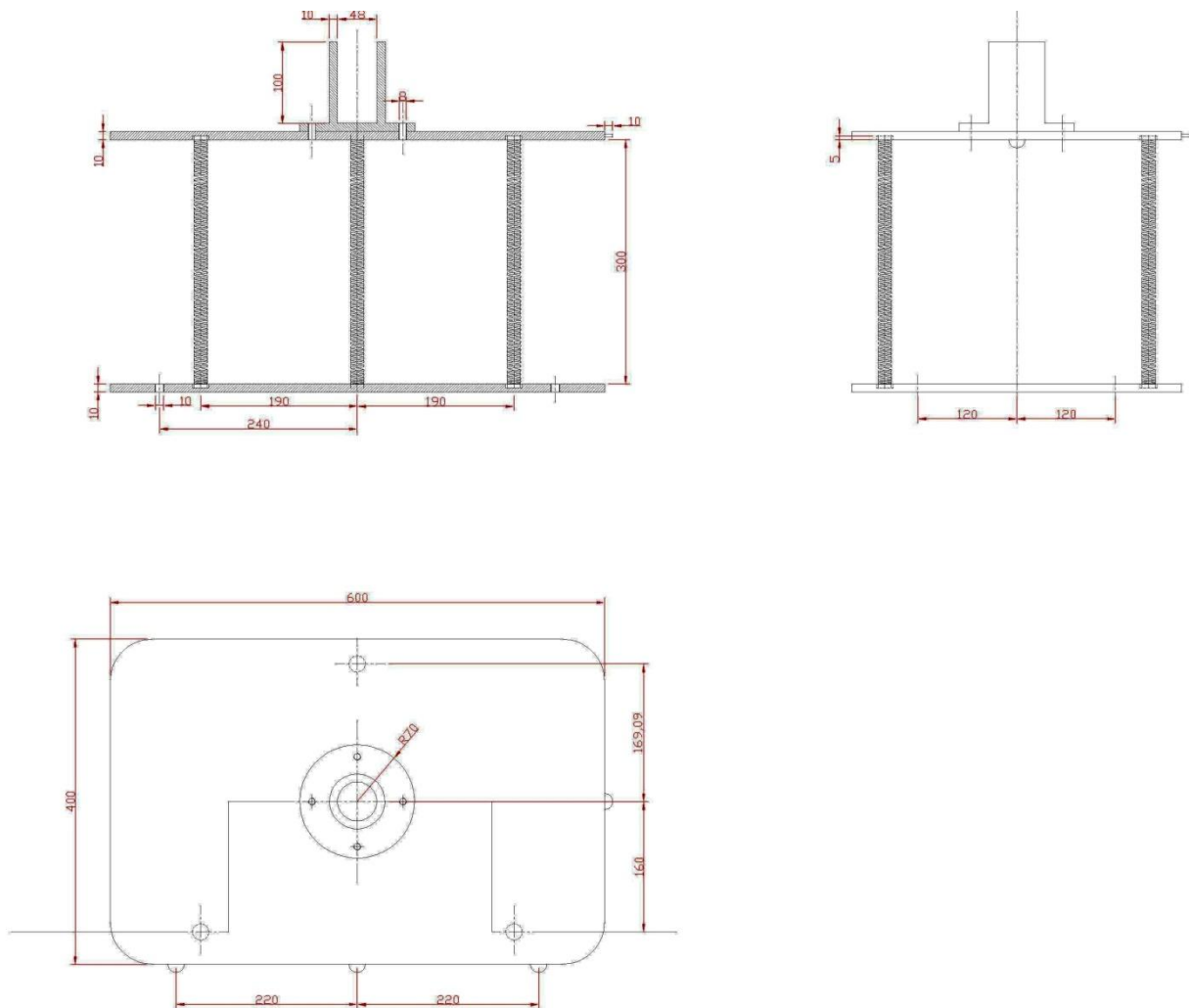


μέσω ενός διωστήρα. Με αυτόν τον τρόπο η περιστροφική κίνηση του μετατρέπεται σε μεταφορική μέσω της σύνδεσης του διωστήρα στις οπές που φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα και μπορεί να κινήσει τη βάση έτσι ώστε να προσομοιάζεται ο βαθμός ελευθερίας της πρόνευσης (pitch) και της περιστροφής (roll). Τα ελατήρια είναι σε διάταξη ισοπλεύρου τριγώνου



Εικόνα 140-Κινητήρας και διωστήρας δίπλα Εικόνα 141-

Το σχέδιο της βάσης όπως δόθηκε στο μηχανουργό είναι αυτό που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 142-Σχέδιο βάσης

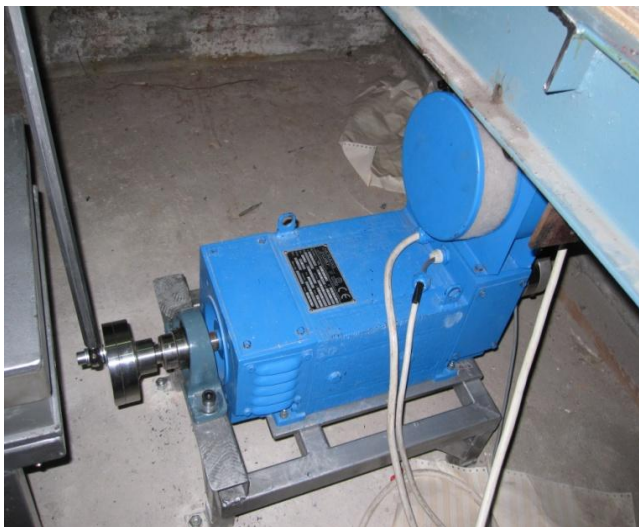
Η κάτω πλάκα έχει τέσσερις οπές, μέσω των οποίων θα συνδεθεί με το ζυγό που θα παίρνει τις δυναμικές μετρήσεις του συστήματος. Στη πάνω πλάκα υπάρχει μια φλάντζα όπου θα μπαίνει ο πύργος της ανεμογεννήτριας. Τα περύγια όπως αναφέρθηκε είναι σε διάταξη ισοπλεύρου τριγώνου. Ο λόγος που επιλέχθηκαν τρία αντί για τέσσερα ελατήρια ήταν η αποφυγή υπερστατικότητας της κατασκευής.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το τρισδιάστατο σχέδιο ολόκληρου του συστήματος.



Εικόνα 143-Σχέδιο πειραματικής διάταξης

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο κινητήρας που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και ο πίνακας από τον οποίο ελέγχονται οι στροφές του. Το πάνω μέρος του είναι ο μηχανισμός ψύξης που διαθέτει.



Εικόνα 145-Κινητήρας



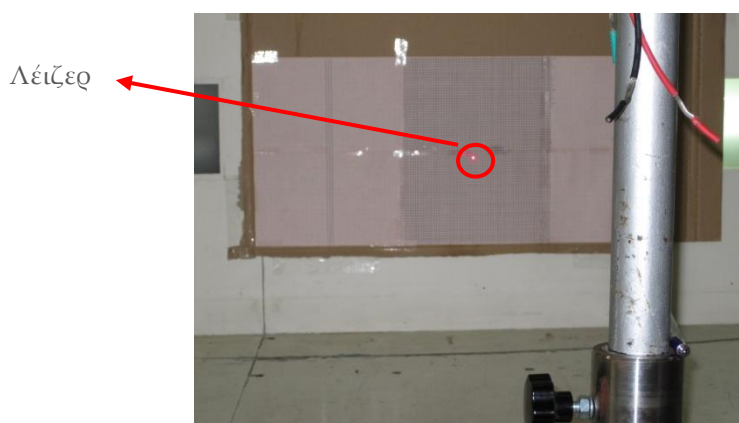
Εικόνα 144-Πίνακας ελέγχου κινητήρα

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα μετρώνται μέσω του ζυγού, ο οποίος βρίσκεται στο κάτω μέρος της κατασκευής και είναι συνδεδεμένος με έναν υπολογιστή, όπως φαίνεται στην εικόνα 139. Μέσω αυτού παίρνουμε τις δυνάμεις F_x , F_y , F_z και τις ροπές M_x , M_y , M_z που ασκούνται σε ολόκληρη της κατασκευή.

Το πείραμα θα διεξαχθεί στα ακόλουθα τέσσερα στάδια:

1. Θα μετρήσουμε τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος δίνοντας του μια εξωτερική διέγερση, ενώ αυτό θα είναι ελεύθερο να κινηθεί (δηλαδή δε θα είναι συνδεδεμένο στον κινητήρα), χωρίς να υπάρχει αέρας από τη σήραγγα. (χωρίς αέρα, χωρίς μοτέρ)
2. Η μηχανή θα συνδεθεί με τον κινητήρα, ο οποίος θα δίνει κίνηση στη βάση, αλλά πάλι δε θα υπάρχει αέρας από τη σήραγγα. (χωρίς αέρα, με μοτέρ)
3. Η διάταξη θα είναι ελεύθερη να κινηθεί, χωρίς σύνδεση στο μοτέρ, με αέρα, προκειμένου να μελετήσουμε την απόκριση της ανεμογεννήτριας χωρίς την ύπαρξη κύματος. (με αέρα, χωρίς μοτέρ)
4. Τέλος θα μελετήσουμε την απόκριση της ανεμογεννήτριας με την ύπαρξη ανέμου και κύματος. (με αέρα, με μοτέρ)

Εκτός από τις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται στο σύστημα, θα υπολογίζονται το ρεύμα και η τάση, καθώς και η παραγωγή ισχύος. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τα λαμβάνουμε μέσω ενός παλμογράφου ο οποίος είναι συνδεδεμένος στον υπολογιστή για να μας δίνει τις χρονοσειρές των ηλεκτρικών σημάτων. Η ανεμογεννήτρια φορτίζει δυο μπαταρίες των 12 V η κάθε μία (24 V συνολικά) με το ρεύμα που παράγει. Παράλληλα θα βρίσκεται και η μετατόπιση της πλατφόρμας σε κάθε χρονική στιγμή, με τη βοήθεια ενός λέιζερ το στίγμα του οποίου θα αποτυπώνεται πάνω σε ένα μιλιμετρέ χαρτί, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα και θα βιντεοσκοπείται η κίνησή του.



Εικόνα 146-Λείζερ για τη μέτρηση της μετατόπισης

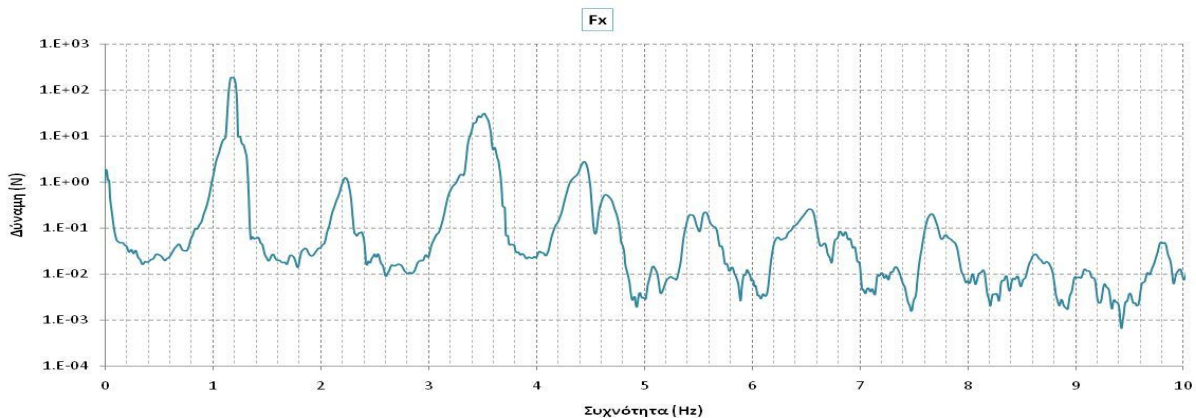
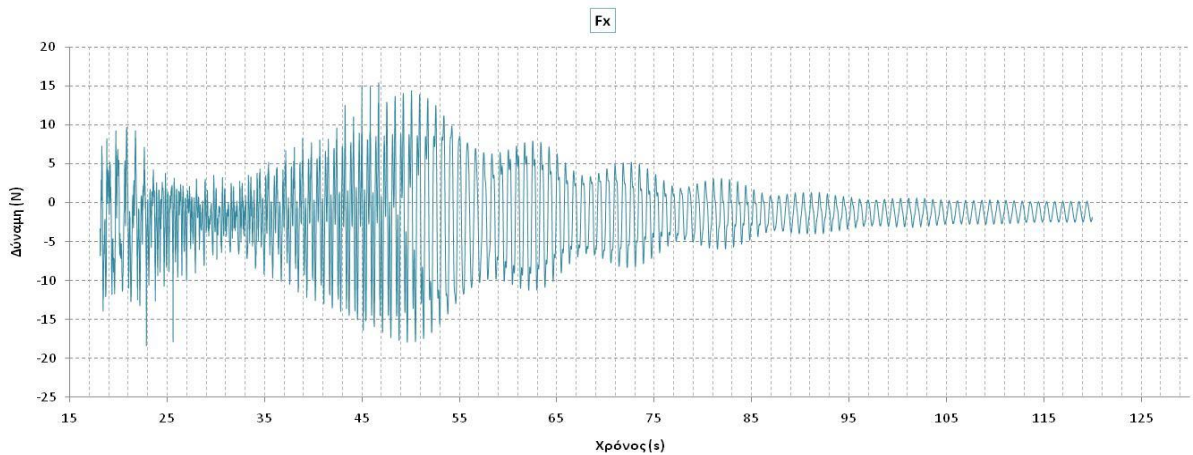
6.3 Πρόνευση (Pitch)

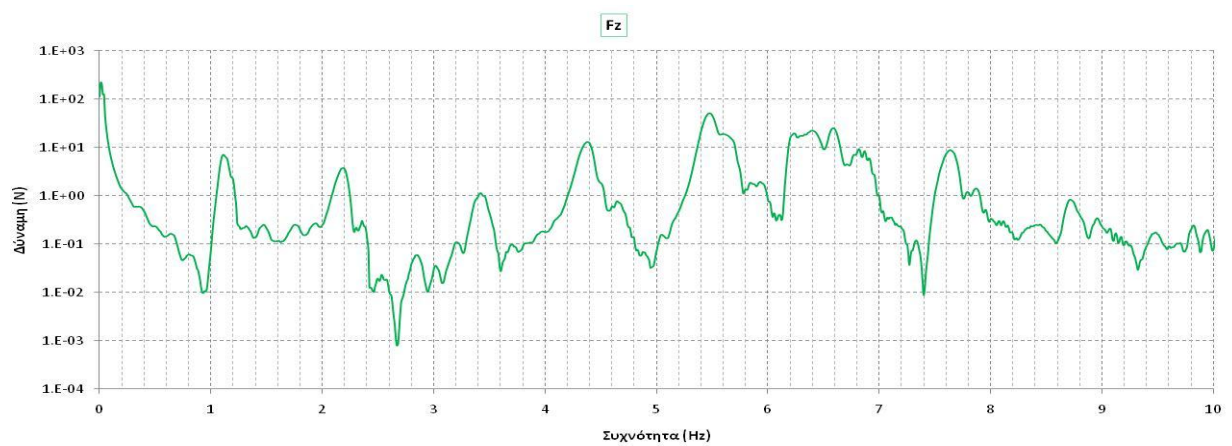
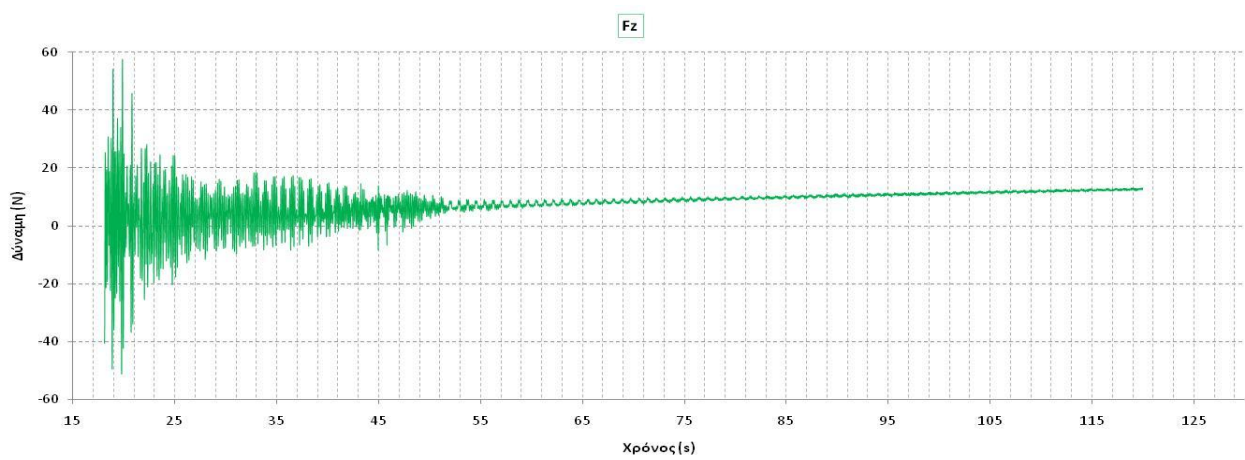
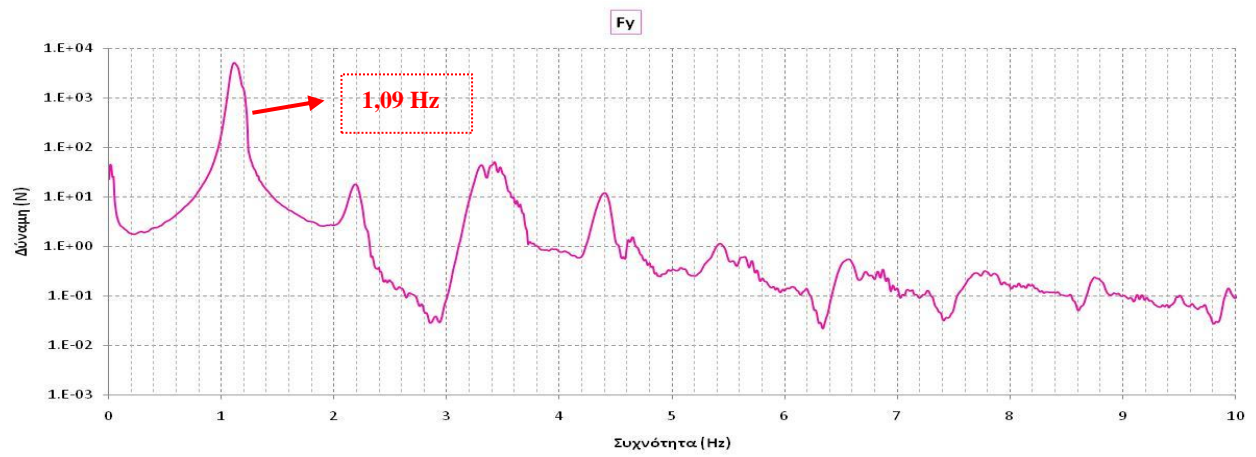
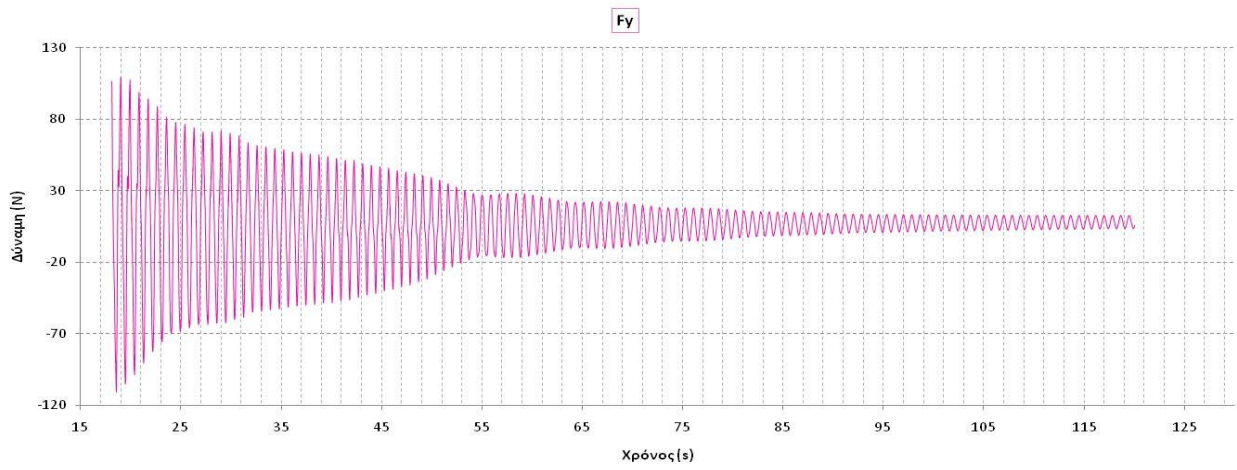
Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα όταν ο κινητήρας διεγείρει την πλατφόρμα κατά τη διεύθυνση της πρόνευσης (θέση του κινητήρα μπροστά όπως φαίνεται στην εικόνα 140)

Χωρίς αέρα, χωρίς μοτέρ

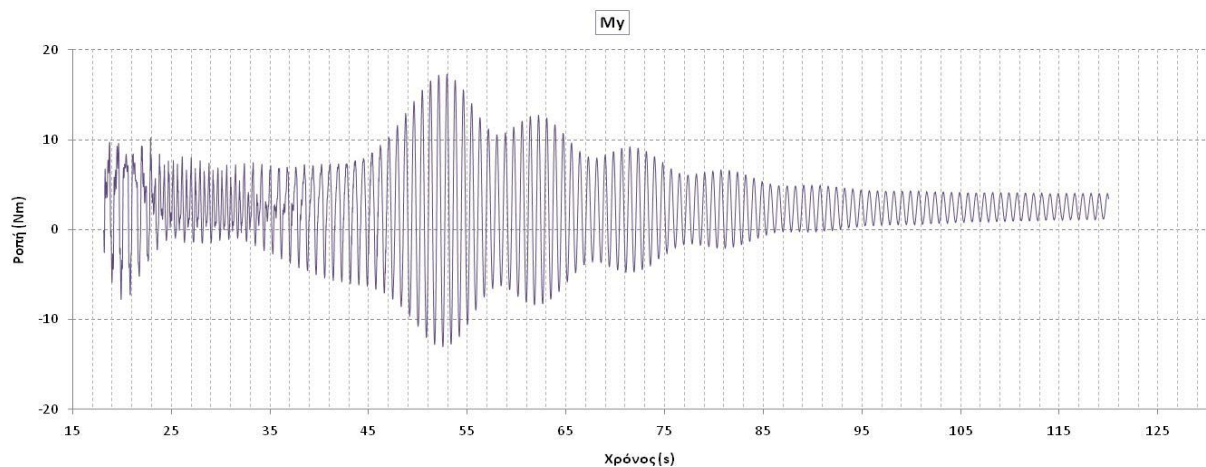
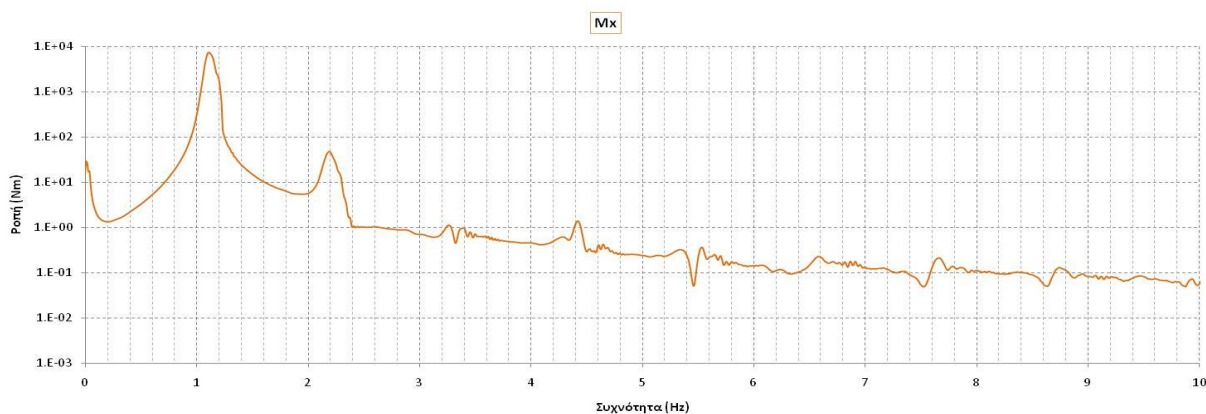
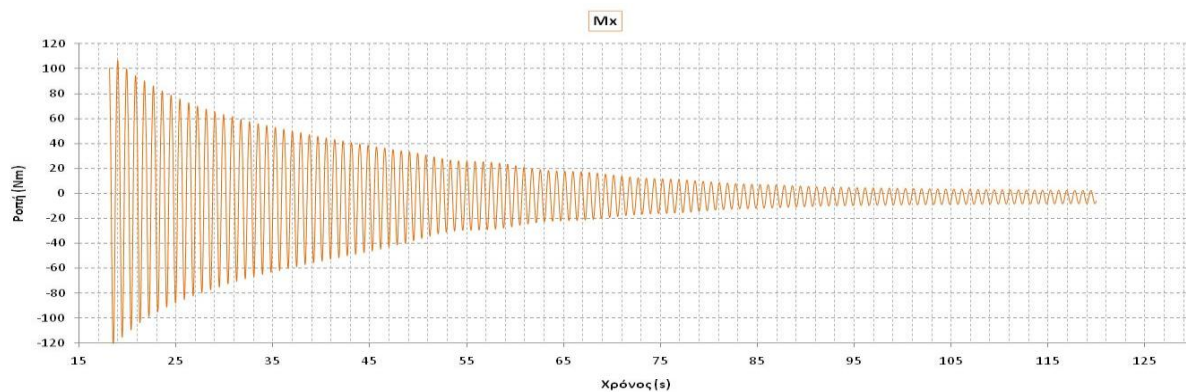
Προκειμένου να υπολογίσουμε τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος και κυρίως των ελατηρίων διεγείρουμε το σύστημα εξωτερικά και το αφήνουμε ελεύθερο να κινηθεί. Η διέγερση εφαρμόζεται κατά τον άξονα των y . Η αποσβενόμενη ταλάντωση φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα. Όπως είναι αναμενόμενο η συνιστώσα της δύναμης F_y και η ροπή M_x είναι αυτές που εμφανίζουν την μεγαλύτερη τιμή. Οι δυνάμεις και οι ροπές που εμφανίζονται στους άλλους άξονες είναι λόγω της ελαστικότητας του συστήματος. Η μέτρηση ήταν διάρκειας δυο λεπτών (120s), αλλά από τα διαγράμματα έχουμε αφαιρέσει το μεταβατικό φαινόμενο.

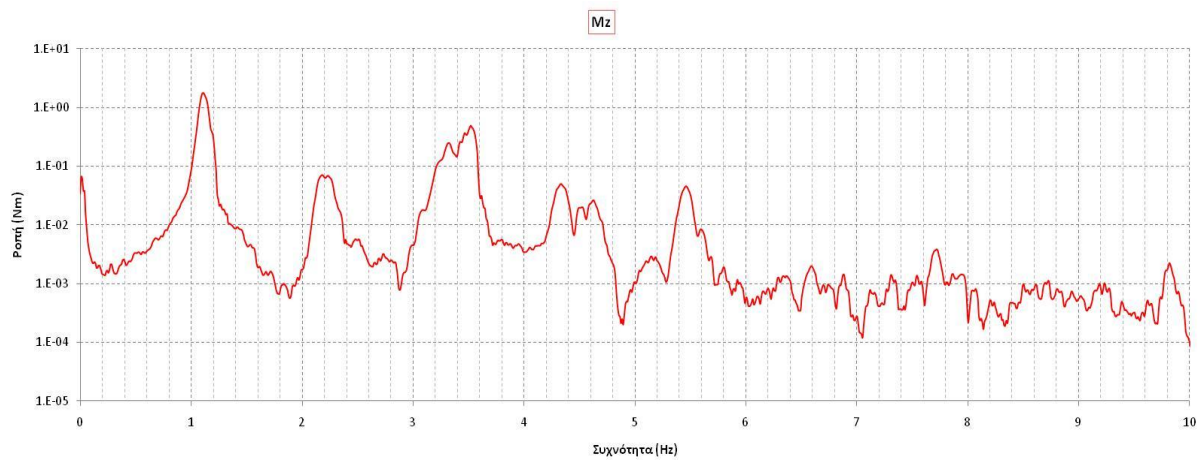
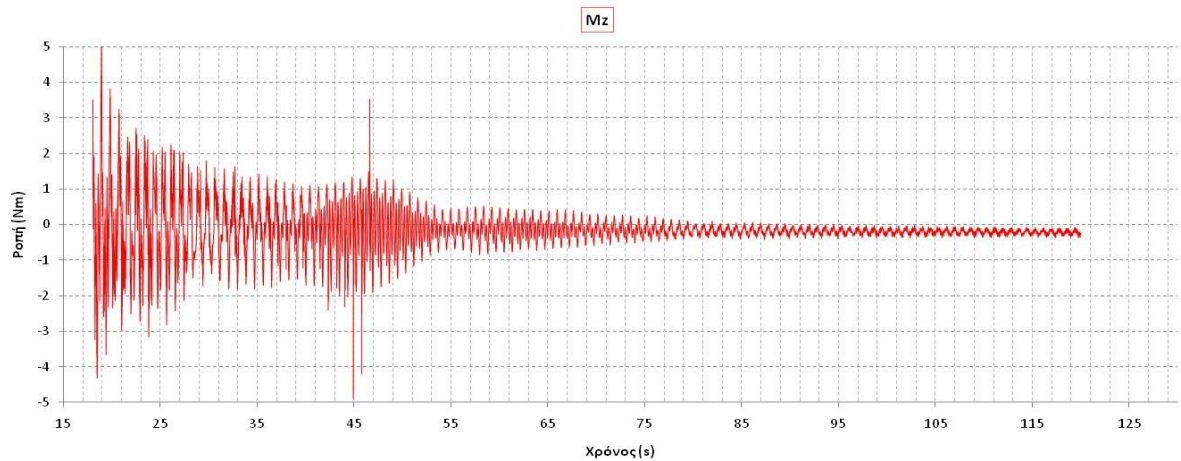
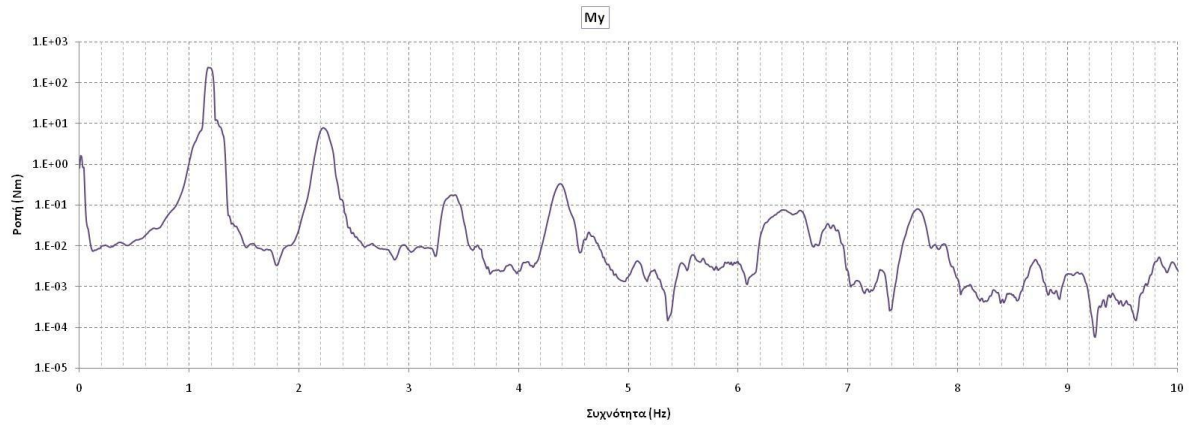
Τα αποτελέσματα δίνονται στο πεδίο του χρόνου. Με Fast Fourier Transformation (FFT) γίνεται μετατροπή στο πεδίο των συχνοτήτων προκειμένου να δούμε ποιες είναι οι κύριες συχνότητες διέγερσης του συστήματος. Στα διαγράμματα των συχνοτήτων ο κάθετος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα.





Όπως φαίνεται στα διαγράμματα των δυνάμεων η κύρια συχνότητα που διεγείρεται είναι περίπου 1,09 Hz. Αυτή είναι και η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης των ελατηρίων. Βέβαια η ενέργεια της συχνότητας που εμφανίζεται στο διάγραμμα της συνιστώσας F_y είναι πολύ μεγαλύτερη συγκριτικά με τις άλλες δυο, γεγονός που οφείλεται στο ότι η κύρια διέγερση είναι σε αυτήν την κατεύθυνση. Οι υπόλοιπες συχνότητες που εμφανίζονται είναι είτε ιδιοσυχνότητες ανώτερης τάξης του πλήρους συστήματος (πλατφόρμα-ελατήρια-ανεμογεννήτρια), για παράδειγμα της ιδιοσυχνότητας του δρομέα λόγω της ελαστικότητας των πτερυγίων και της κίνησης της πλατφόρμας.





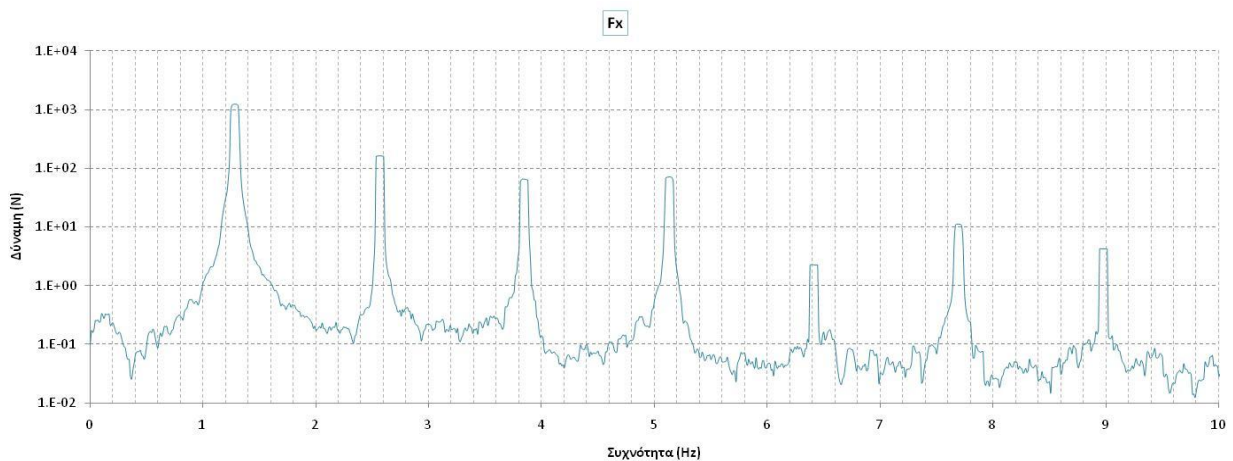
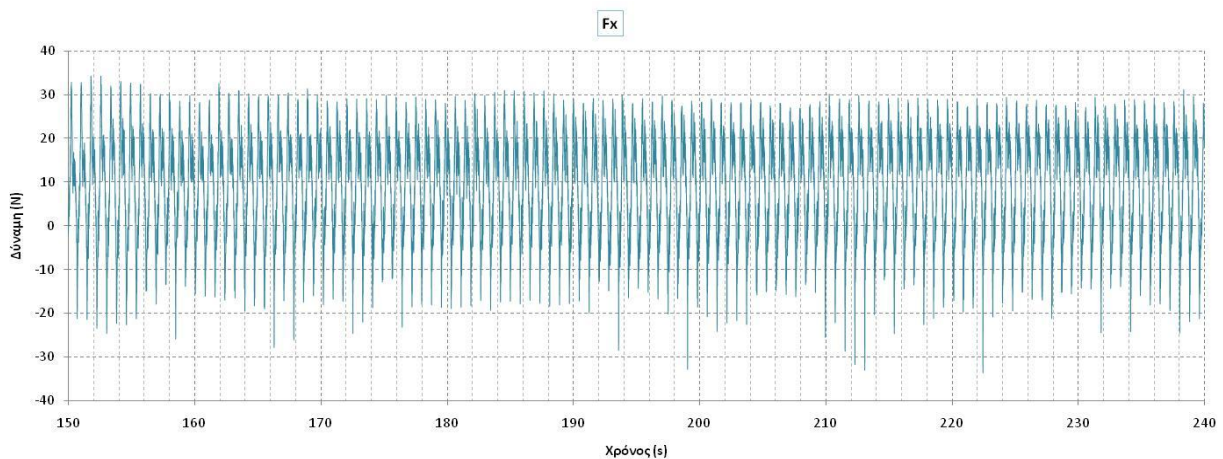
Και στα αντίστοιχα διαγράμματα των ροπών η κύρια ιδιοσυχνότητα είναι 1,09 Hz (η ιδιοσυχνότητα των ελατηρίων). Και πάλι τα υπόλοιπα peaks που εμφανίζονται στα διαγράμματα του πεδίου των συχνοτήτων αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες ιδιοσυχνότητες οι σε σύζευξη των διαφόρων μερών του συστήματος.

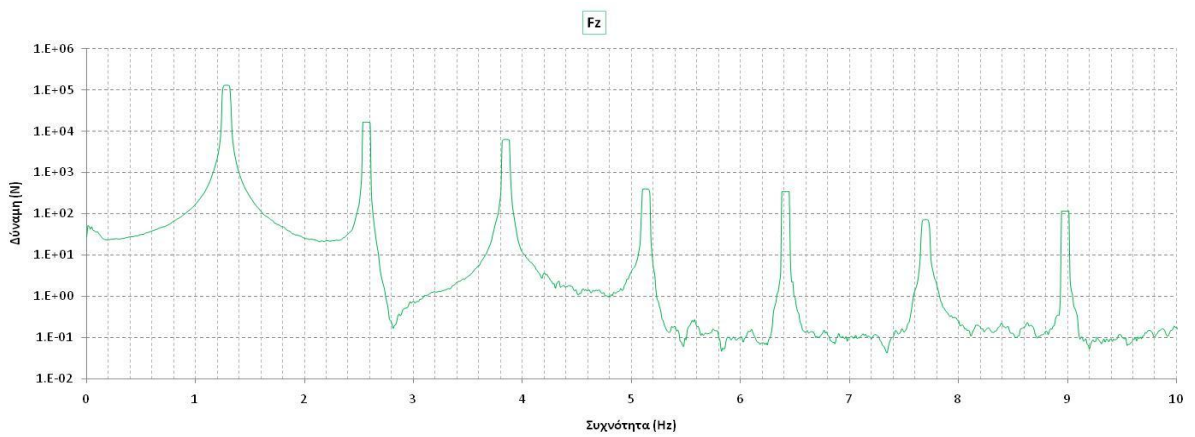
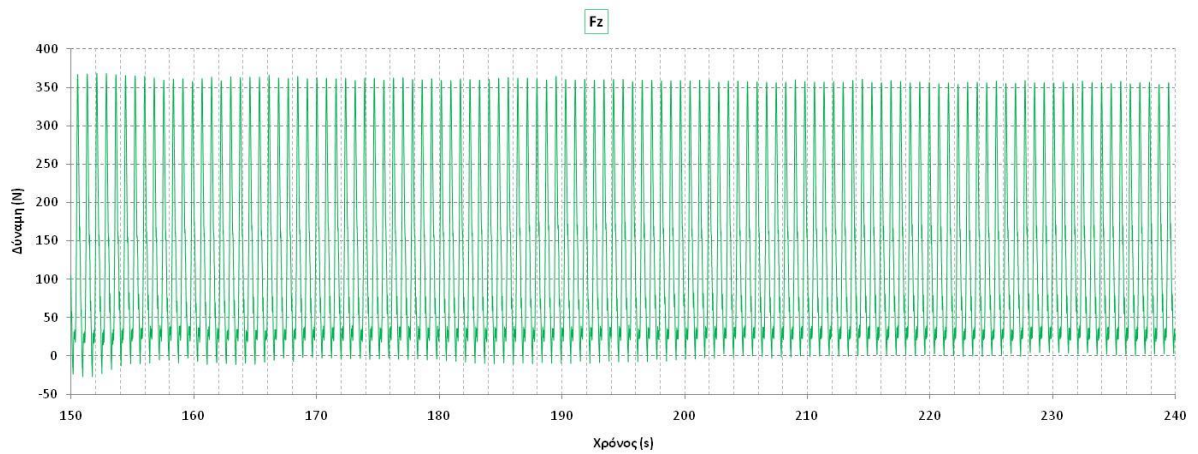
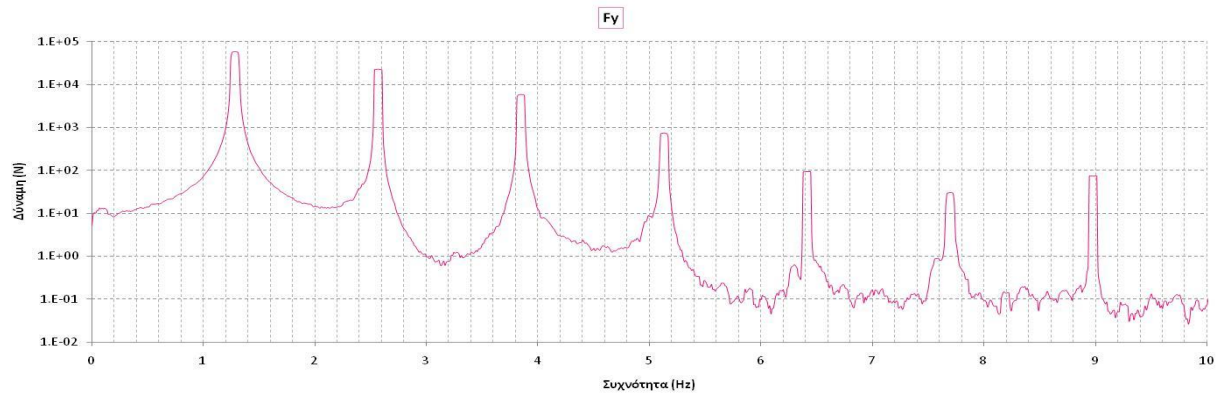
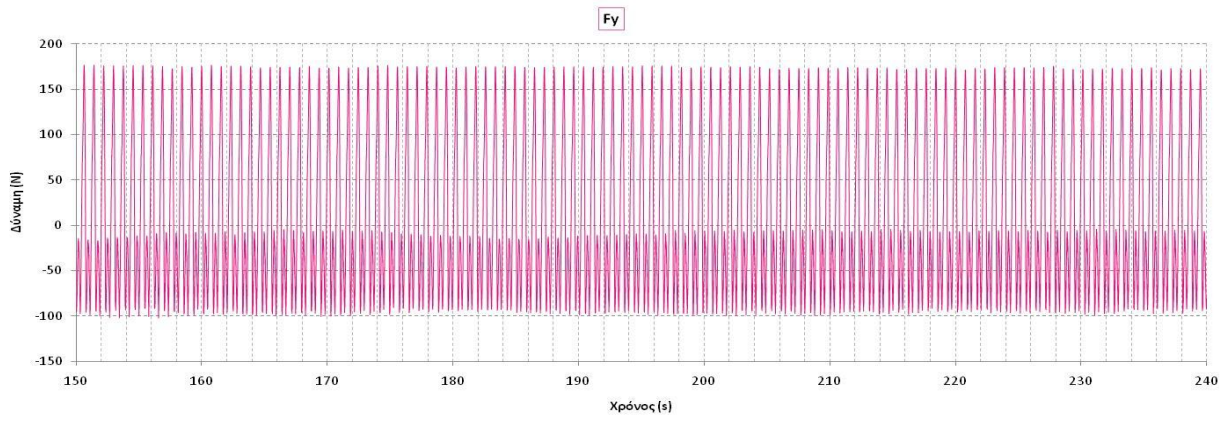
Ο λόγος που τα διαγράμματα των δυνάμεων και των ροπών στο πεδίο των χρόνων δεν είναι συμμετρικά ως προς το μηδέν, είναι ότι η βάση στηρίζεται σε τρία ελατήρια, τα οποία είναι τοποθετημένα στις κορυφές ισοπλεύρου τριγώνου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Άρα η δύναμη που ασκείται δεν είναι συμμετρική ως προς την διεύθυνση της πρόνευσης.

Χωρίς αέρα, με μοτέρ

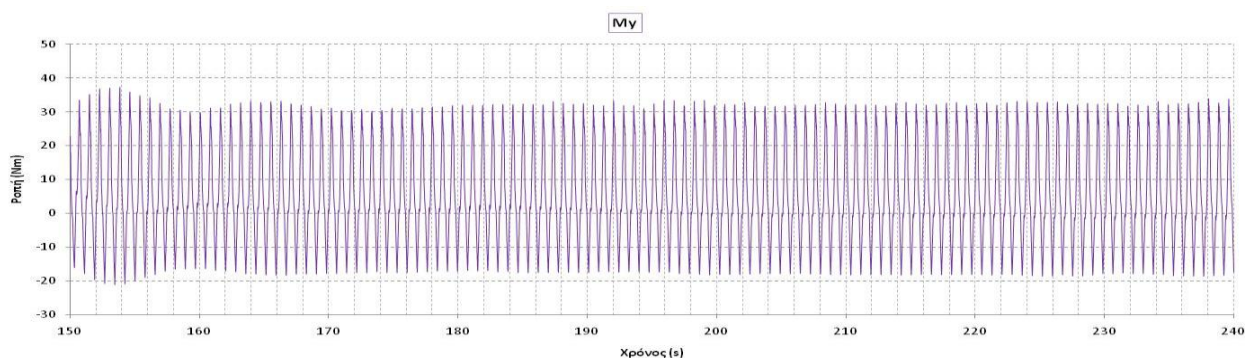
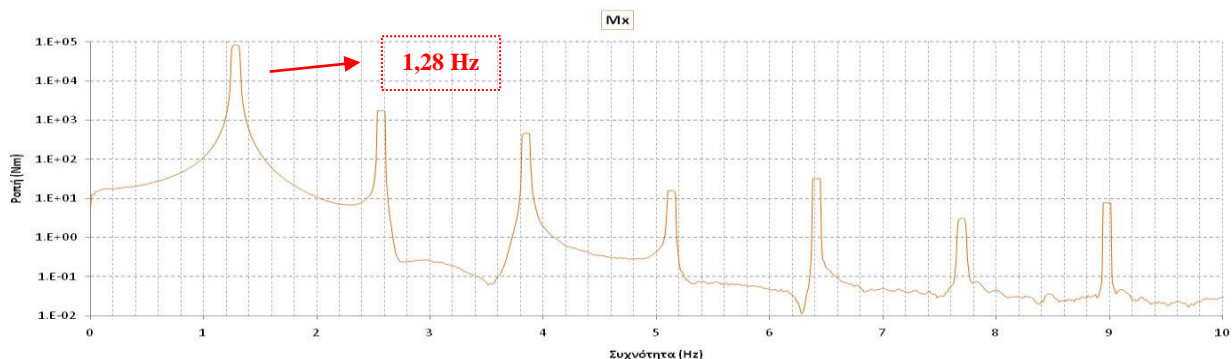
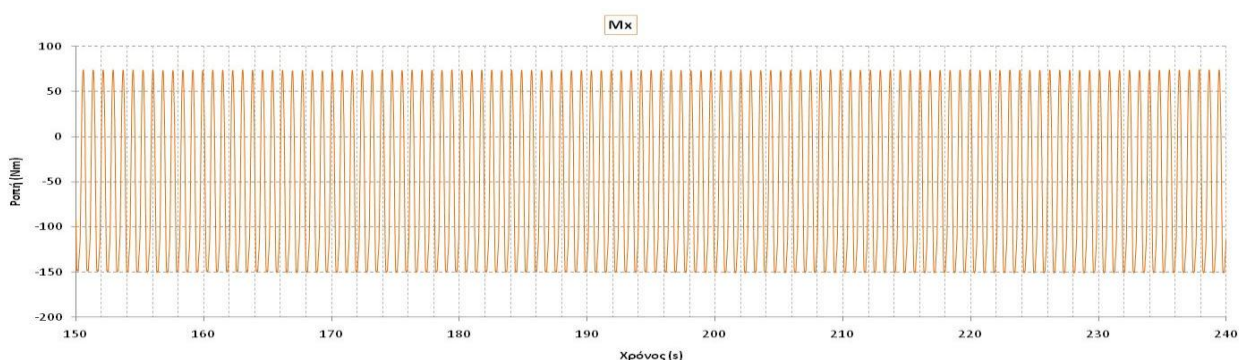
Σε αυτήν την περίπτωση θέλουμε να μελετήσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα σε περίπτωση που η μηχανή δεν παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή δεν υπάρχει άνεμος ικανός να την ξεκινήσει ($V < V_{\text{cut-in}}$), αλλά υπάρχει κίνηση της πλατφόρμας, λόγω κυματισμού της θάλασσας. Ο κινητήρας επιδρά και διεγείρει την κίνηση της πρόνευσης (pitch), δηλαδή σαν το κύμα να προσκρούει μόνο από αυτήν την πλευρά της πλατφόρμας. Παρόλα αυτά, όταν τέθηκε σε λειτουργία, παρατηρήθηκε ότι εμφανίζονται σε μικρότερο βαθμό και οι κινήσεις της εμπρός-πίσω (surge) και της πλευρικής (sway) ταλάντωσης. Αυτό οφείλεται στην ελαστικότητα των ελατηρίων. Άλλωστε στην πραγματικότητα το κύμα δεν είναι ποτέ πλήρως ευθυγραμμισμένο σε μια κατεύθυνση και γι' αυτό διεγείρει όλους τους βαθμούς ελευθερίας του πλωτήρα.

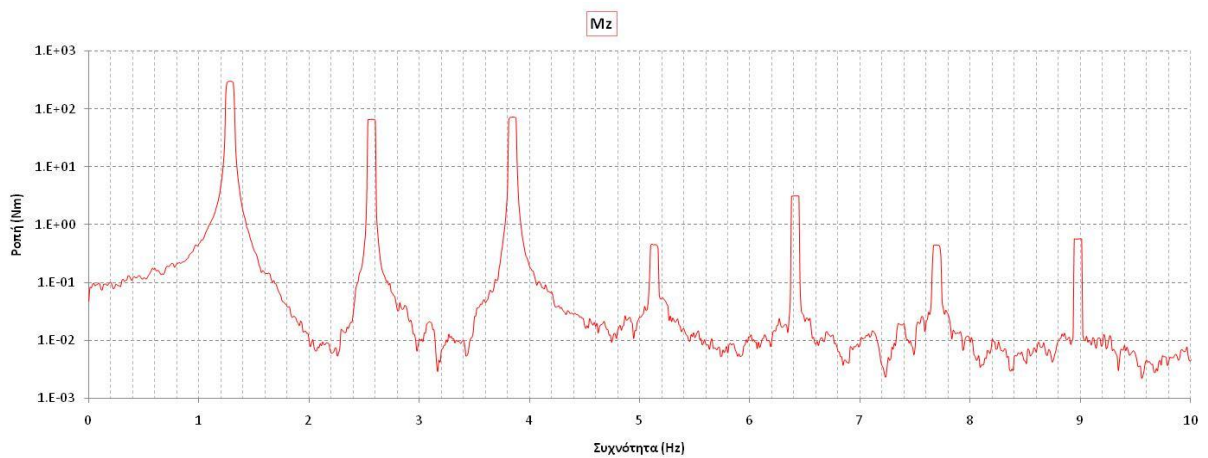
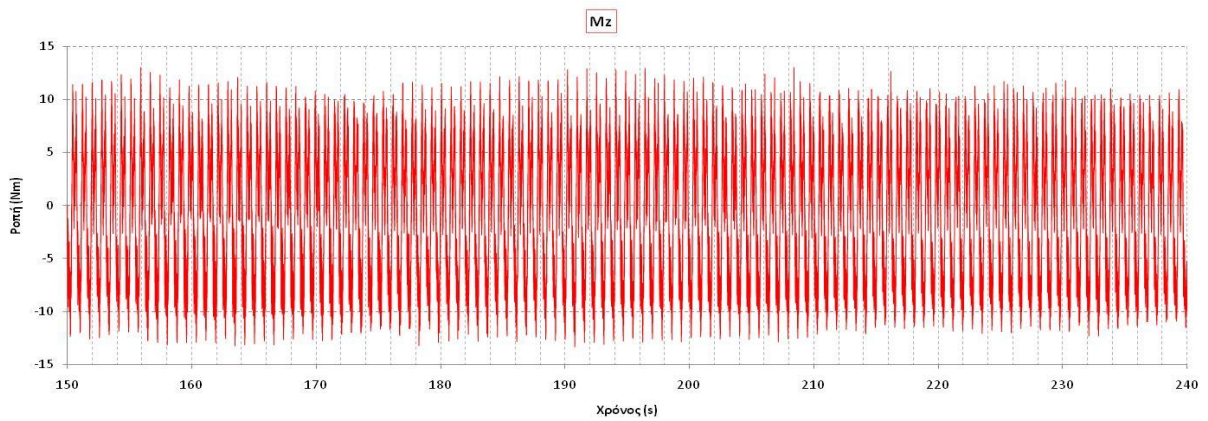
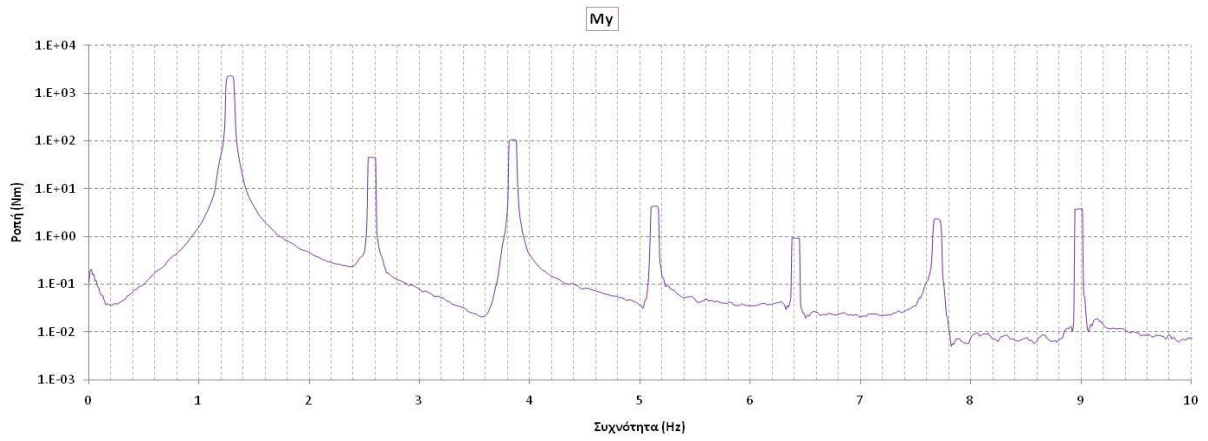
Τα αποτελέσματα και πάλι παρουσιάζονται και στο πεδίο των χρόνων και στο πεδίο των συχνοτήτων. Από τα διαγράμματα στο πεδίο του χρόνου επιβεβαιώνουμε ότι οι στροφές του κινητήρα είναι σταθερές, αφού οι δυνάμεις και οι ροπές παρουσιάζουν σταθερό πλάτος ταλάντωσης. Οι μετρήσεις σε αυτήν την περίπτωση ήταν διάρκειας τεσσάρων λεπτών, προκειμένου να σταθεροποιήσουμε τις στροφές του κινητήρα στις επιθυμητές. Από τα διαγράμματα έχει αφαιρεθεί το μεταβατικό φαινόμενο.





Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε ότι η κύρια συχνότητα διέγερσης είναι 1,28 Hz, η οποία είναι η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα. Αν και αρχικά είχαμε υπολογίσει ότι η συχνότητα του συστήματος μας θα πρέπει να είναι 5 Hz, για λόγους ασφαλείας και αρτιότητας της κατασκευής προτιμήσαμε να μην αυξήσουμε τη συχνότητα περιστροφής του κινητήρα πάνω από αυτή την τιμή. Όπως φαίνεται οι υπόλοιπες κορυφές που εμφανίζονται είναι πολλαπλάσια αυτής της συχνότητας. Κάποιες άλλες ταλαντώσεις οφείλονται κυρίως στη σύζευξη του συστήματος, όπως και προηγουμένως. Αυτό που παρατηρούμε επίσης, είναι ότι δεν εμφανίζεται η ιδιοσυχνότητα των ελατηρίων. Καθώς η συχνότητα του κινητήρα είναι αυτή που διεγείρει το σύστημα και προκαλεί την κίνησή του, τα ελατήρια δε διεγείρονται από αυτήν. Η ιδιοσυχνότητα των ελατηρίων θα ήταν εμφανής σε περίπτωση συντονισμού, κάτι που άλλωστε θέλουμε να αποφύγουμε.





Και στα διαγράμματα των ροπών είναι εμφανής η κύρια συχνότητα διέγερσης του συστήματος, δηλαδή η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα και τα πολλαπλάσιά της. Εδώ παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη συνιστώσα της δύναμης είναι η F_z , καθώς ο κινητήρας “σπρώχνει” το σύστημα σε αυτήν την κατεύθυνση για να προκαλέσει την κίνηση της πρόνευσης. Οι άλλες δυο δυνάμεις F_x και F_y είναι αυτές που προκαλούν τις ταλαντώσεις στους άλλους βαθμούς ελευθερίας (surge, sway). Και πάλι όμως η μεγαλύτερη ροπή είναι η M_x , αναμενόμενο αποτέλεσμα, καθώς από αυτήν τη θέση του μοτέρ προσομοιάζουμε την πρόνευση η οποία πραγματοποιείται γύρω από τον άξονα των y .

Στην πορεία της πειραματικής διαδικασίας θέλουμε να μελετήσουμε την απόκριση της ανεμογεννήτριας (δυνάμεις, ροπές και παραγωγή ισχύος) τόσο σα να ήταν πακτωμένη στη στεριά όσο και πλωτή στη θάλασσα. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μεταξύ τους προκειμένου να δούμε την επίδραση της κίνησης του πλωτήρα στην απόκριση του συστήματος.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι για τρεις διαφορετικούς ανέμους, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

	Μανομετρική Πίεση P (Pa)	Θερμοκρασία T (°C)	Ταχύτητα ανέμου u (m/s)
1	23.5	27	6.337
2	40.7	28	8.339
3	52	31	9.427

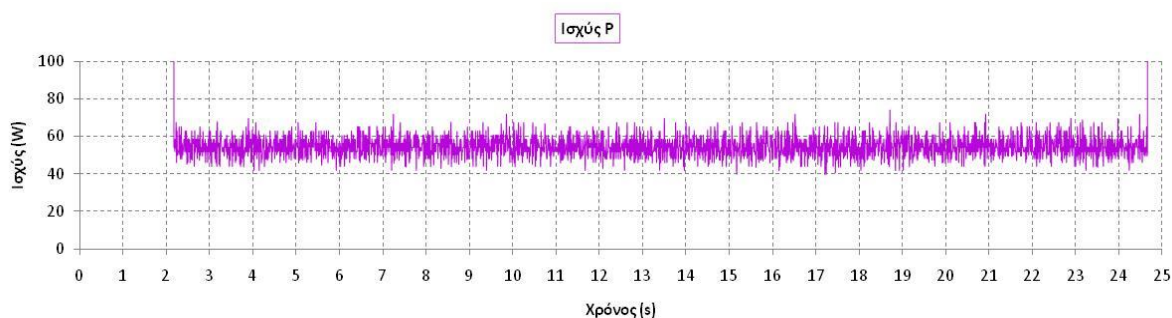
Οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου έχουν υπολογισθεί για μια μέση τιμή της πυκνότητας του αέρα που επικρατούσε μέσα στη σήραγγα, κατά τη διάρκεια του πειράματος, η οποία υπολογίσθηκε ίση με $1,17 \text{ kg/m}^3$ με τη βοήθεια της καταστατικής εξίσωσης: $\rho = \frac{P}{R \cdot T}$

Ταχύτητα ανέμου u = 6,3m/s

➤ Με αέρα, χωρίς μοτέρ

Σε αυτό το στάδιο θα παρουσιάσουμε τις μετρήσεις για την περίπτωση όπου η ανεμογεννήτρια είναι πακτωμένη στη στεριά και υπάρχει άνεμος ταχύτητας 6 m/s.

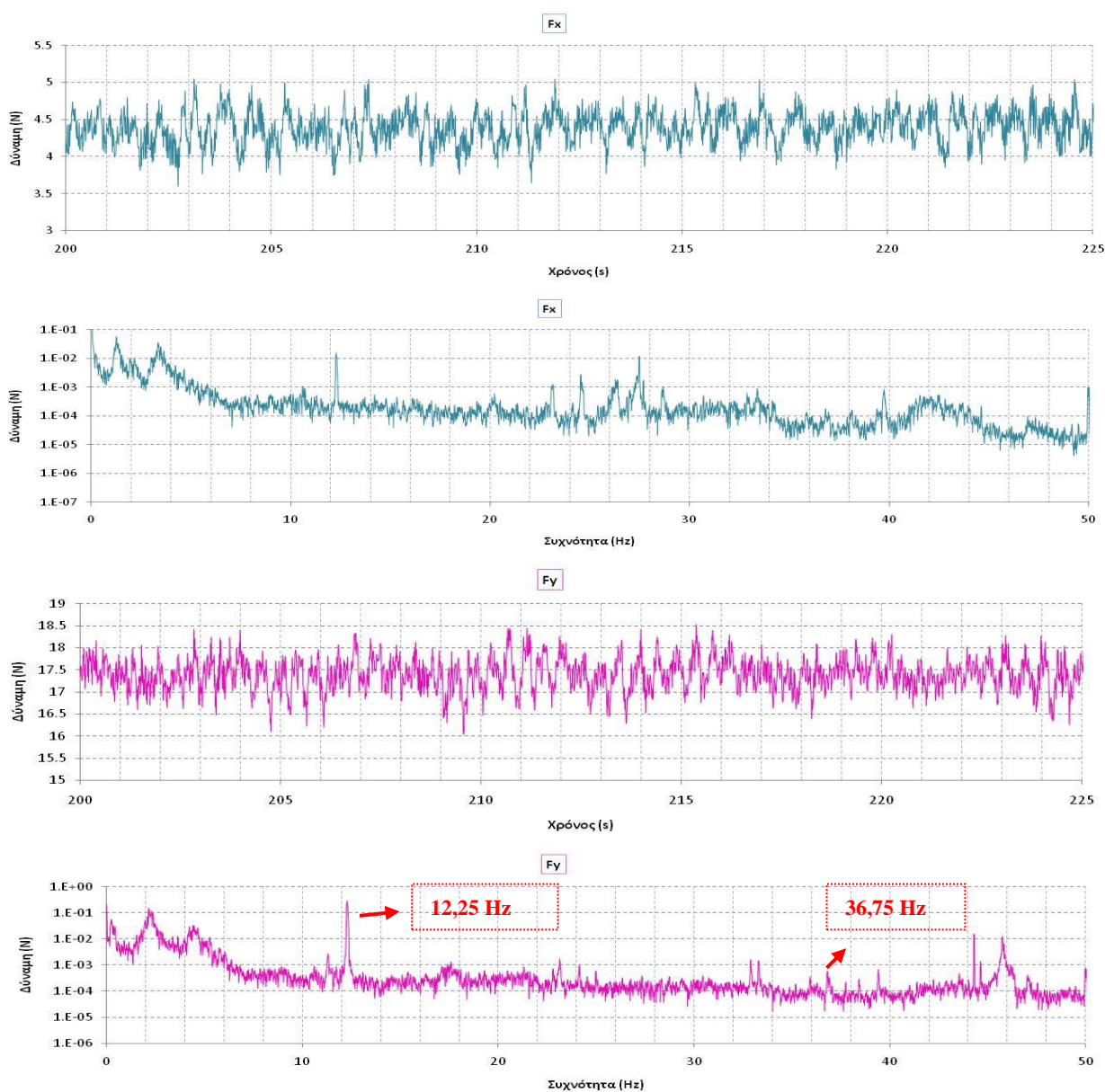
Η παραγωγή ισχύος είναι αυτή που φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα. Η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή λόγω της ύπαρξης των μπαταριών, οι οποίες φιλτράρουν την έξοδο, ενώ το ρεύμα παρουσιάζει πολύ πιο έντονες διακυμάνσεις. Η ισχύς που παρουσιάζεται είναι για χρονικό διάστημα 25 s, όταν η ταχύτητα ανέμου μέσα στη σήραγγα έχει σταθεροποιηθεί πλήρως.



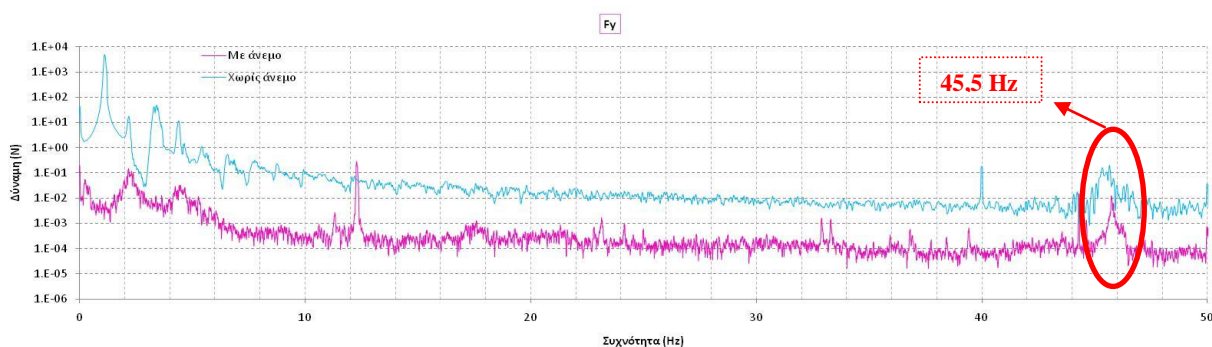
Η μέση τιμή της ισχύος είναι 54 W, καθώς η τάση είναι 27 V (είναι παραπάνω από την ονομαστική 24 V, γιατί οι μπαταρίες βρίσκονται σε κατάσταση φόρτισης) και η μέση τιμή του ρεύματος 2 A. Οι αρχικά και τελικά μεγάλες τιμές οφείλονται στη μέτρηση από τον παλμογράφο και δεν αντιστοιχούν στην πραγματική παραγωγή ισχύος. Επιπλέον οι διακυμάνσεις που εμφανίζονται οφείλονται σε θόρυβο του συστήματος.

Η συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας υπολογίστηκε με χρήση στροφοσκοπείου ίση με 720 rpm.

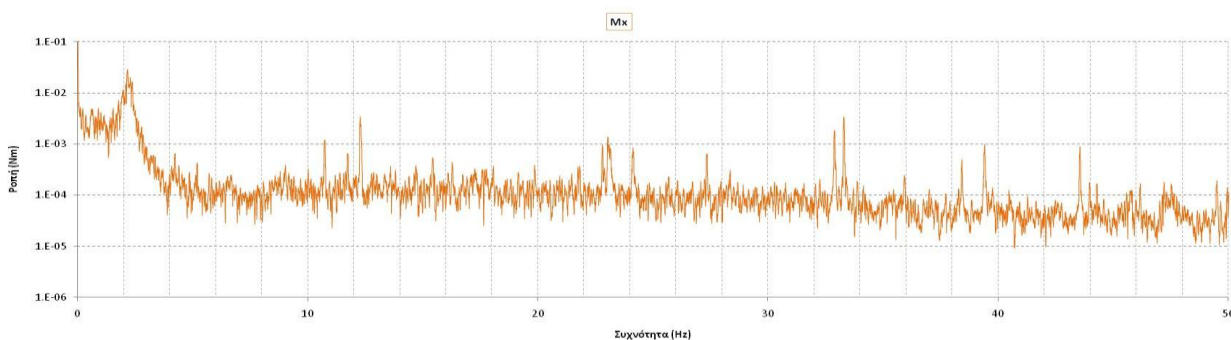
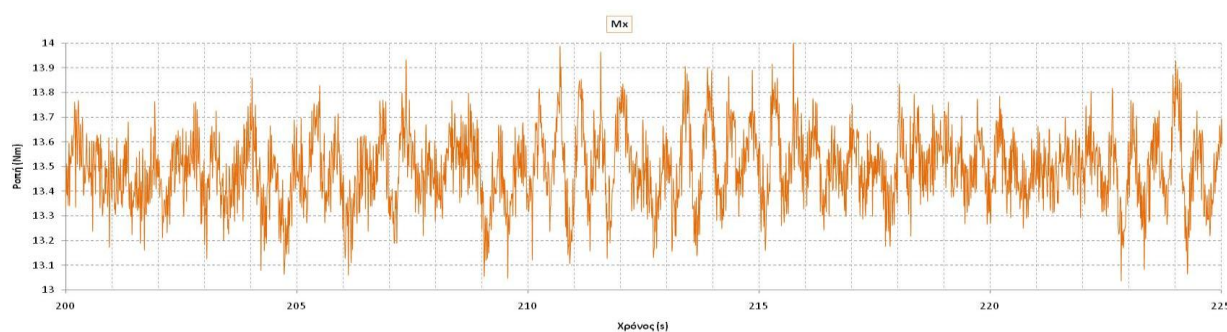
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δυνάμεων και των ροπών που ασκούνται στο σύστημα, τόσο στο πεδίο των χρόνων (χρονικό διάστημα 25 s, όπως και στην παραγωγή ισχύος, αν και η συνολική μέτρηση ήταν 5 λεπτά, ώστε να υπάρχει αντιστοιχία των αποτελεσμάτων και ευκολία στη σύγκριση) όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων προκειμένου να υπολογιστούν οι κύριες συχνότητες διέγερσης/απόκρισης του συστήματος. Δε θεωρήθηκε απαραίτητη η παρουσίαση των δυνάμεων και των ροπών στον άξονα των z καθώς οι δυνάμεις που εμφανίζονται είναι κυρίως λόγω μη συμμετρικότητας του συστήματος και αεροδυναμικής φόρτισης του ζυγού από τη σήραγγα.

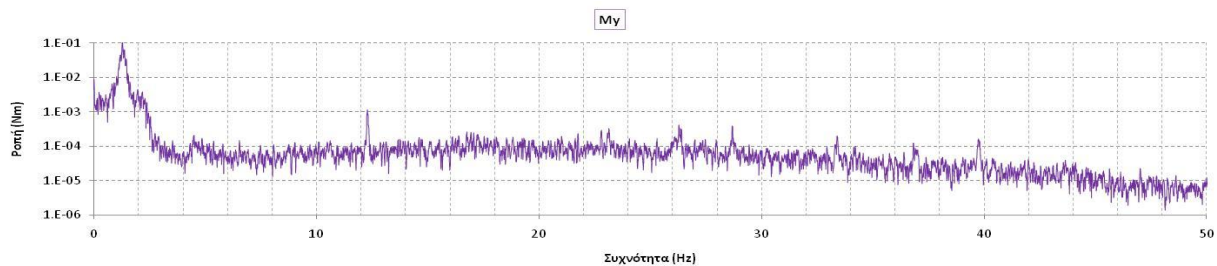
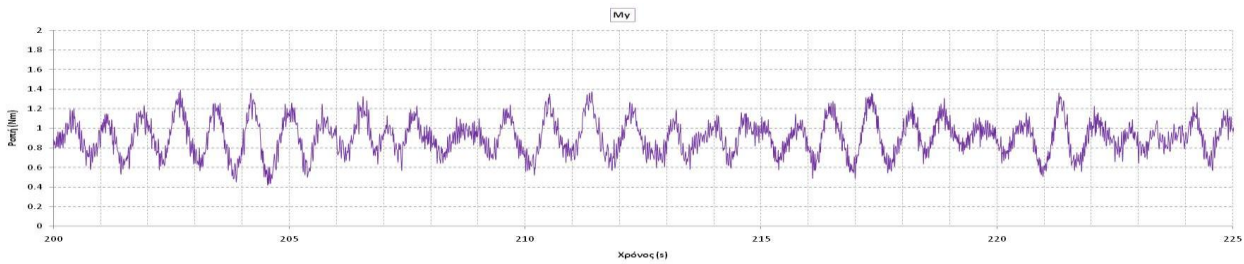


Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα των δυνάμεων, στον άξονα των y η δύναμη που ασκείται είναι μεγαλύτερη, λόγω του ότι ο άνεμος ασκείται σε αυτήν την κατεύθυνση. Και στα δυο διαγράμματα στο πεδίο των συχνοτήτων εμφανίζεται ένα peak στα 12,25 Hz, το οποίο αντιστοιχεί στη συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Στο διάγραμμα της F_y συγκεκριμένα, εμφανίζεται και ένα peak στα 36,75 Hz, δηλαδή τρεις φορές η συχνότητα περιστροφής (3P), το οποίο αντιστοιχεί στη συχνότητα διέγερσης του πύργου, καθώς αυτός έχει τριπλάσια συχνότητα λόγω της ύπαρξης των τριών πτερυγίων. Τα peaks που εμφανίζονται στα 2,2 Hz και 4,4 Hz αντιστοιχούν στην ιδιοσυχνότητα των ελατηρίων, τα οποία λόγω του ότι δεν έχουν αφεθεί ελεύθερα (δεσμεύονται από τον διωστήρα) παρουσιάζουν μια μετατόπιση της ιδιοσυχνότητας τους σε μεγαλύτερες τιμές. Τέλος παρατηρούμε ότι στα 45,5 Hz εμφανίζεται επίσης μια συχνότητα, η οποία είναι κάποια ιδιοσυχνότητα του συστήματος που οφείλεται στη σύζευξη της μηχανής με τη βάση που κινείται, καθώς εμφανίζεται σε όλα τα διαγράμματα των συχνοτήτων, όπως φαίνεται παρακάτω.



Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ροπών.

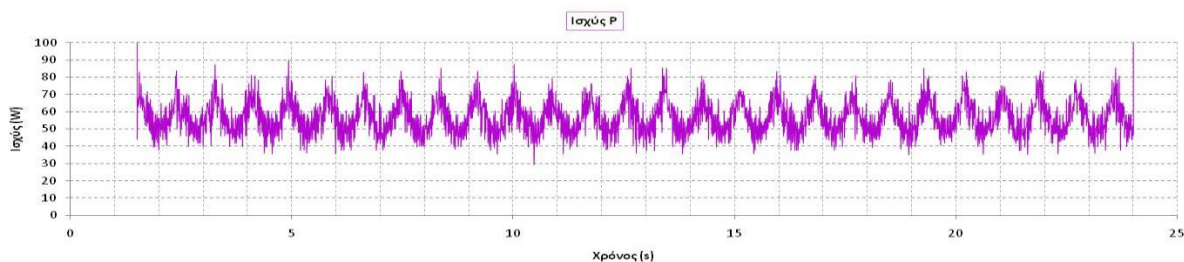




Όπως ήταν αναμενόμενο η μεγαλύτερη ροπή ασκείται γύρω από τον άξονα των x . Επιπλέον η πρώτη ιδιοσυχνότητα που εμφανίζεται στην M_y (κάτω από 2 Hz) φαίνεται να είναι διαφορετική από την αντίστοιχη στην M_x . Αυτό το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο καθώς τα ελατήρια δεν είναι συμμετρικά στις δύο διευθύνσεις. Μια μελλοντική μέτρηση με πλευρική διέγερση (στην διεύθυνση του roll) θα έδειχνε άλλη ιδιοσυχνότητα ελατηρίων. Επίσης ο διωστήρας δε δεσμεύει συμμετρικά το σύστημα. Εκτός από τις συχνότητες που αναλύθηκαν και προηγουμένως, οι υπόλοιπες διακυμάνσεις οφείλονται στη σύζευξη των κινήσεων του συστήματος.

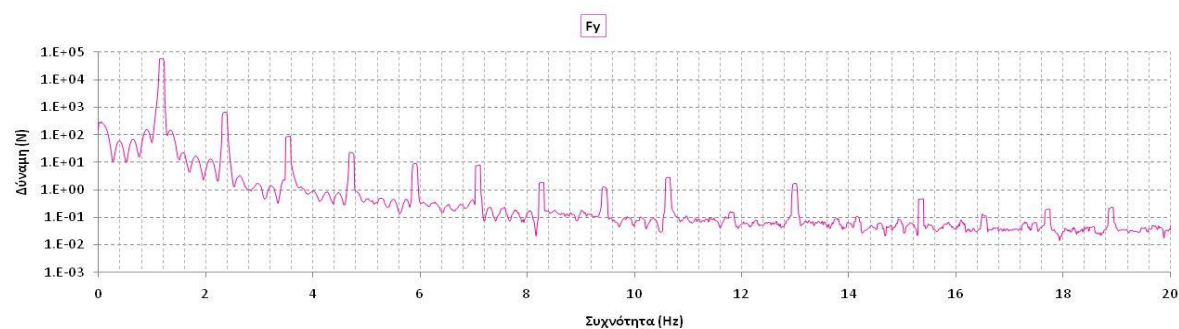
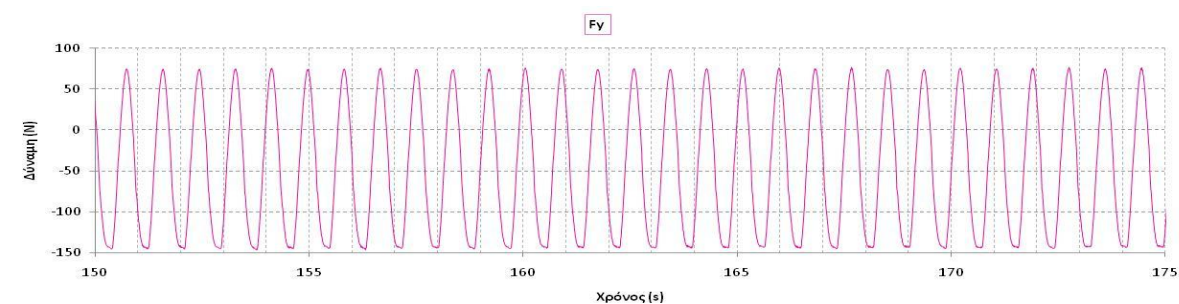
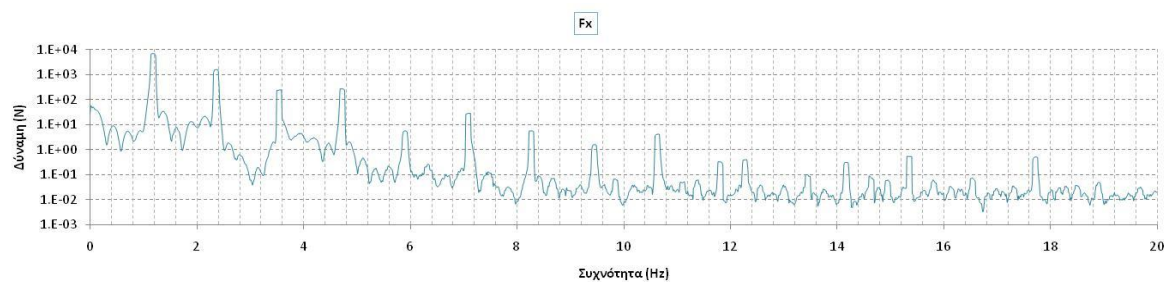
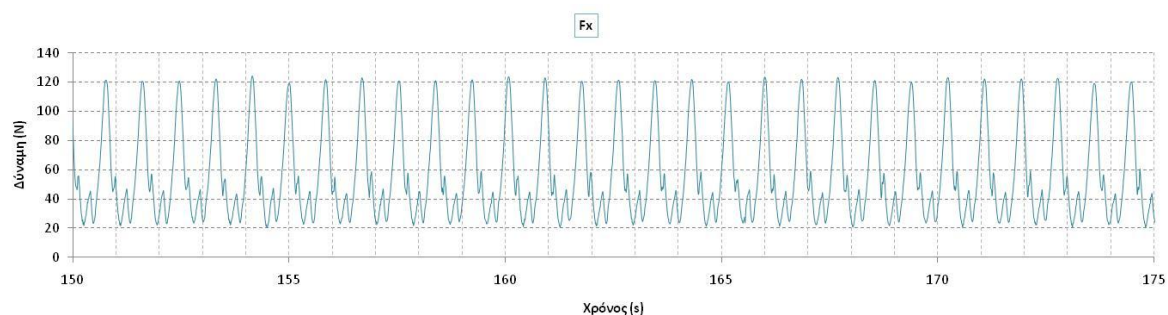
➤ Με αέρα, με μοτέρ

Σε αυτό το στάδιο ταυτόχρονα με τον άνεμο προστέθηκε και κίνηση στην πλατφόρμα. Έτσι στο ακόλουθο διάγραμμα της παραγωγής ισχύος οι διακυμάνσεις είναι πολύ πιο έντονες, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Δηλαδή η κίνηση της βάσης επηρεάζει αισθητά την έξοδο του σήματος και άρα την παραγωγή ισχύος.

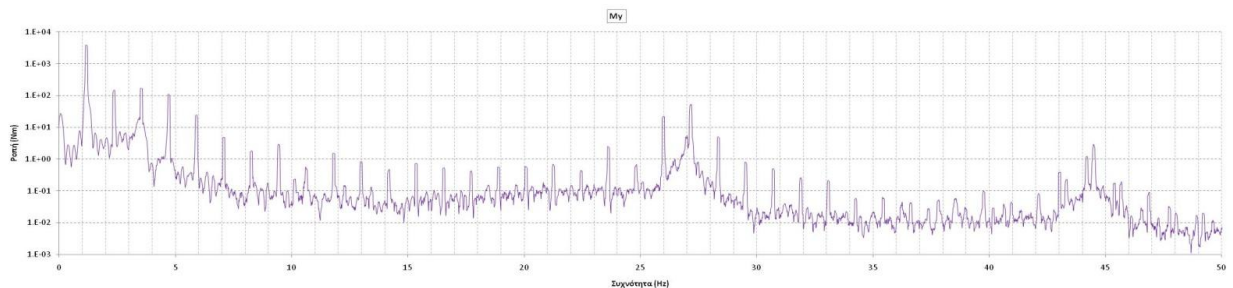
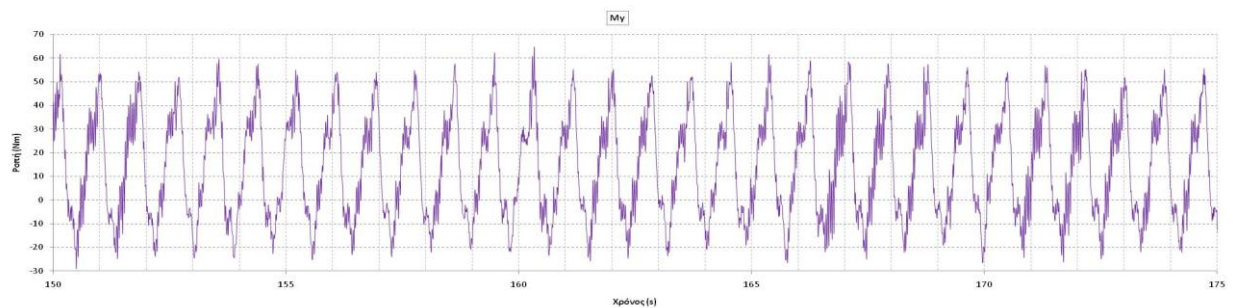
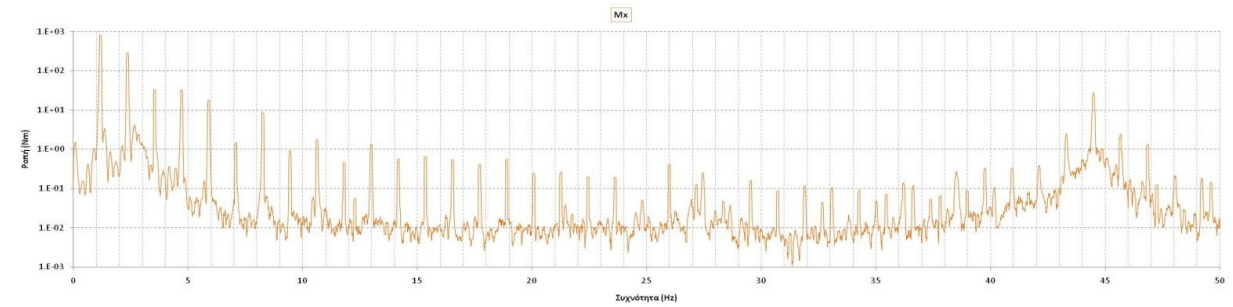
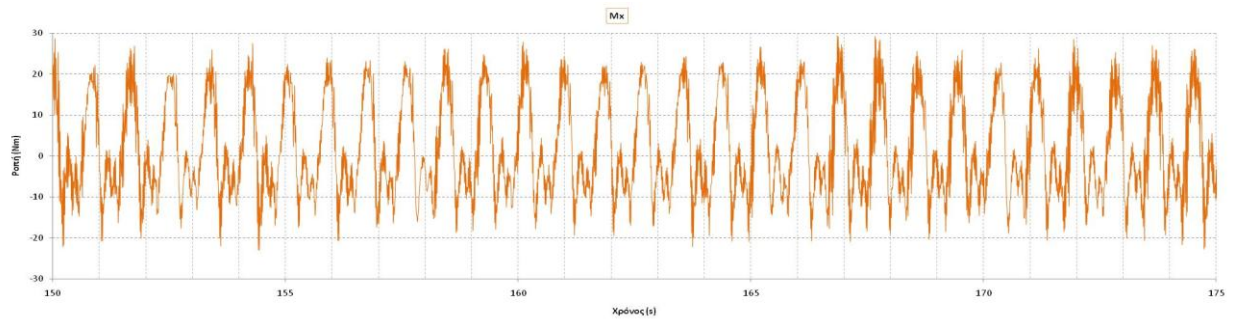


Η μέση τιμή της ισχύος είναι και πάλι 54 W, αλλά εκτός από την πολύ πιο έντονη διακύμανση σε σχέση με πριν, παρουσιάζεται και μια επιπλέον συχνότητα ταλάντωσης, η οποία είναι η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα που δίνει την κίνηση στη βάση. Οι τόσο έντονες μεταβολές στην παραγωγή ισχύος δεν είναι επιθυμητές, αλλά καθώς μια πλωτή ανεμογεννήτρια υπόκειται σε πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις συγκριτικά με μια που βρίσκεται στη στεριά, δεν αυξάνονται μόνο τα φορτία στα πτερύγια και στον πύργο, αλλά επηρεάζεται αρνητικά και η ποιότητα ισχύος.

Η συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας είναι όπως πριν 720 rpm.

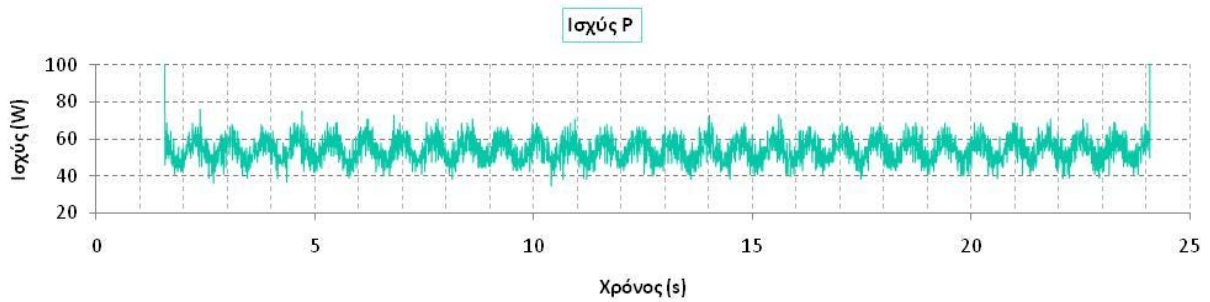


Σε αυτά τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι η κύρια συχνότητα διέγερσης που είναι εμφανής είναι η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα στα 1,28 Hz και τα πολλαπλάσιά της. Όπως και στην αρχική περίπτωση λειτουργίας του κινητήρα χωρίς όμως την ύπαρξη αέρα, η ιδιοσυχνότητα των ελατηρίων δεν είναι ούτε εδώ εμφανής. Πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι ούτε η συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας φαίνεται στα διαγράμματα.



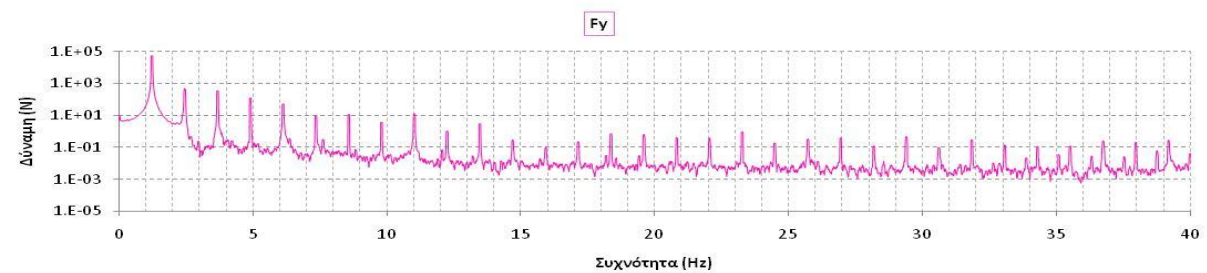
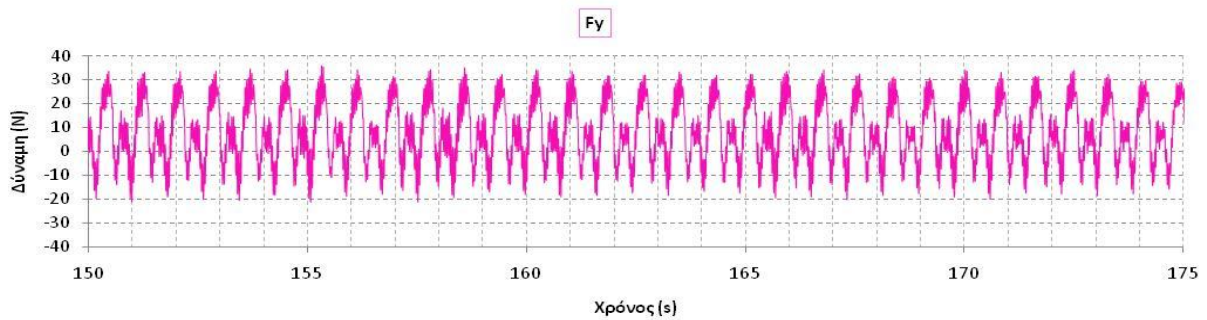
Και πάλι η κύρια συχνότητα που εμφανίζεται είναι η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα, αλλά σε αυτά τα διαγράμματα είναι εμφανής και η συχνότητα περιστροφής τους δρομέα στα 12,25 Hz. Η ασυμμετρία που παρουσιάζει το διάγραμμα της ροπής My ως προς τον άξονα των x οφείλεται στο ότι το σύστημα δεν είναι συμμετρικό λόγω της ύπαρξης των τριών ελατηρίων. Επίσης παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα των συχνοτήτων είναι μετατοπισμένα προς τα πάνω, σε μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Η μετατόπιση αυτή οφείλεται στην ενέργεια των ελατηρίων, τώρα που είναι ελεύθερα να κινηθούν.

Για την ίδια ταχύτητα ανέμου και την ίδια συχνότητα ταλάντωσης της βάσης, αλλάξαμε το πλάτος της μετατόπισης από τα 0,02 m στα 0,01 m. Το διάγραμμα της ισχύος που προκύπτει είναι το ακόλουθο:



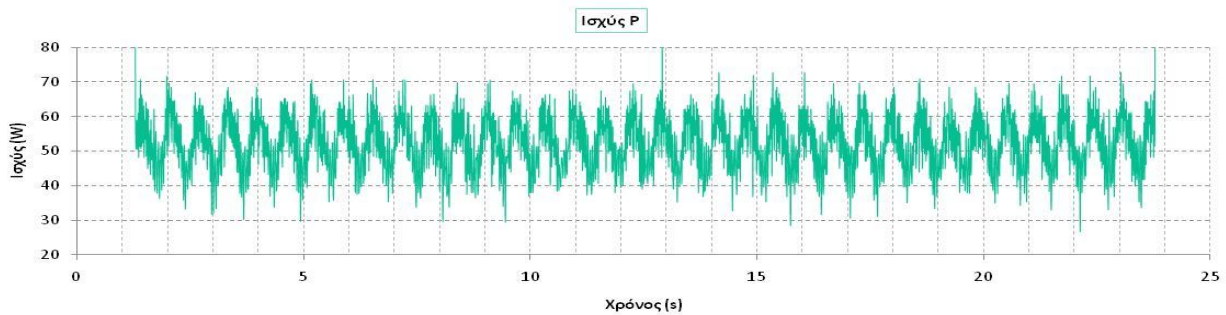
Παρατηρούμε ότι οι διακυμάνσεις είναι λιγότερο έντονες από την προηγούμενη μέτρηση. Δηλαδή η μείωση του ύψους κύματος έχει θετική επίδραση στην παραγωγή ισχύος καθώς μειώνει την απόκλιση από τη μέση τιμή.

Τα διαγράμματα της δύναμης στο πεδίο των χρόνων και στο πεδίο των συχνοτήτων φαίνονται παρακάτω.

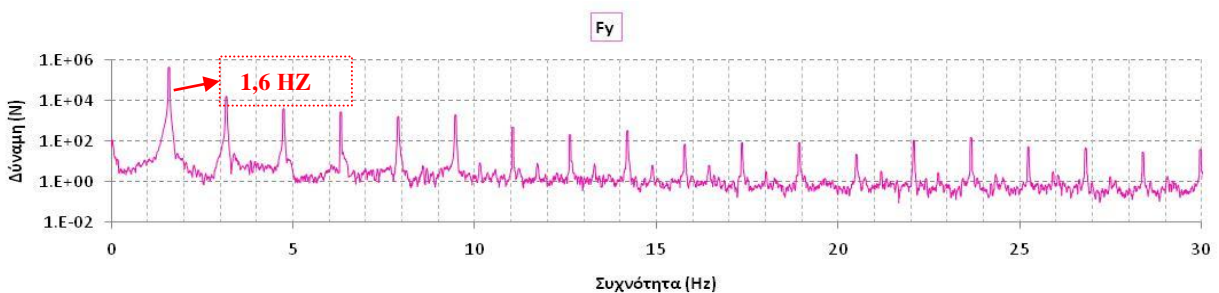
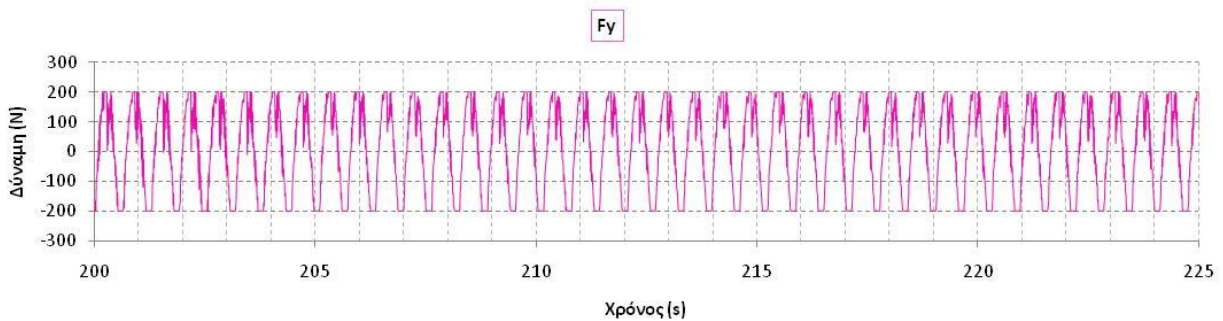


Συγκριτικά με το προηγούμενο στάδιο του πειράματος είναι εμφανής η μείωση της δύναμης που ασκείται, ενώ παρατηρούμε ότι σε αυτή τη συχνότητα περιστροφής του κινητήρα διεγείρονται και άλλες ιδιοσυχνότητες του συστήματος. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι για μικρότερο πλάτος ταλάντωσης (ύψος κύματος), αλλά ίδια συχνότητα κυματισμού οι δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα μειώνονται.

Σε αυτό το στάδιο αλλάξαμε και τη συχνότητα περιστροφής του κινητήρα. Δηλαδή συγκριτικά με την αρχική περίπτωση αναφοράς έχουμε μειώσει το πλάτος της ταλάντωσης που πραγματοποιεί η βάση σε 1 cm και έχουμε αυξήσει τη συχνότητα περιστροφής του κινητήρα. Το διάγραμμα της ισχύος που πήραμε είναι το ακόλουθο:

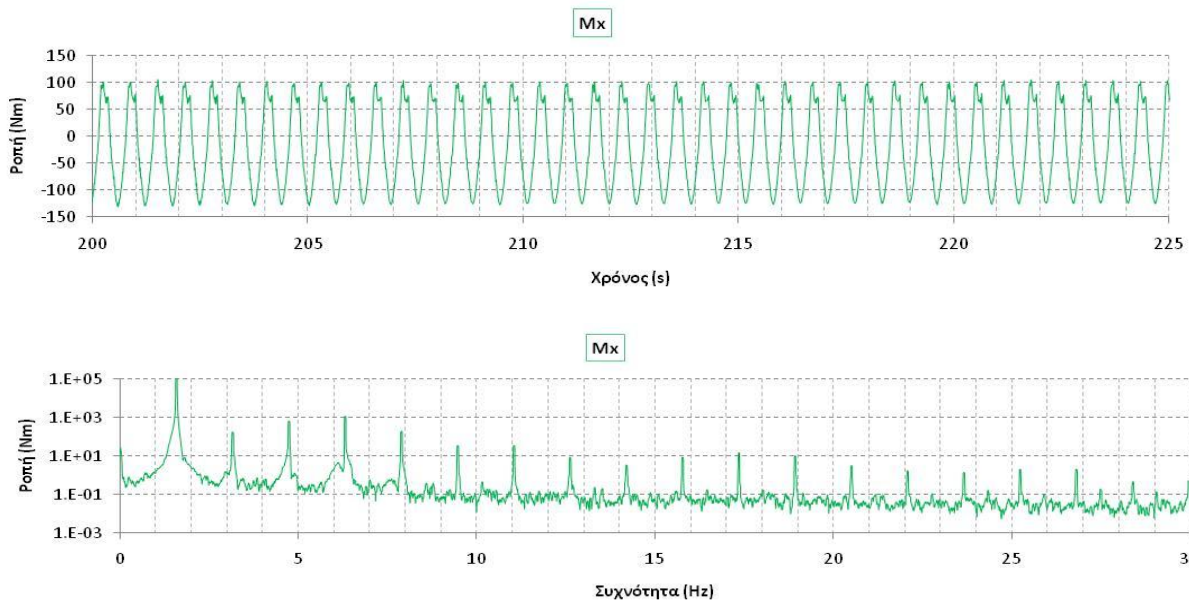


Παρατηρούμε ότι οι διακυμάνσεις είναι πιο έντονες συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση, αλλά πιο ομαλές από την αρχική. Άρα ο συνδυασμός της αύξησης της συχνότητας και της μείωσης του πλάτους ομαλοποιούν το διάγραμμα της ισχύος. Και πάλι είναι εμφανής η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα. Στη πορεία παρουσιάζονται τα διαγράμματα της δύναμης F_y και της ροπής M_x οι οποίες είναι οι δυο κύριες δυνάμεις που διεγείρονται σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας.



Η κύρια συχνότητα που εμφανίζεται είναι η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα στα 1,6 Hz και τα πολλαπλάσιά της. Η δύναμη όμως που ασκείται είναι μεγαλύτερη και από τις δυο προηγούμενες περιπτώσεις, γεγονός που σημαίνει ότι η μεγαλύτερη συχνότητα κυματισμού προκαλεί και μεγαλύτερες δυνάμεις στη μηχανή και γενικά σε όλο το σύστημα. Δηλαδή η περίοδος κύματος επηρεάζει την απόκριση του συστήματος πολύ περισσότερο από το ύψος του, συμπέρασμα στο οποίο καταλήξαμε και με την παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με τον GAST.

Τα διαγράμματα της ροπής M_x είναι:

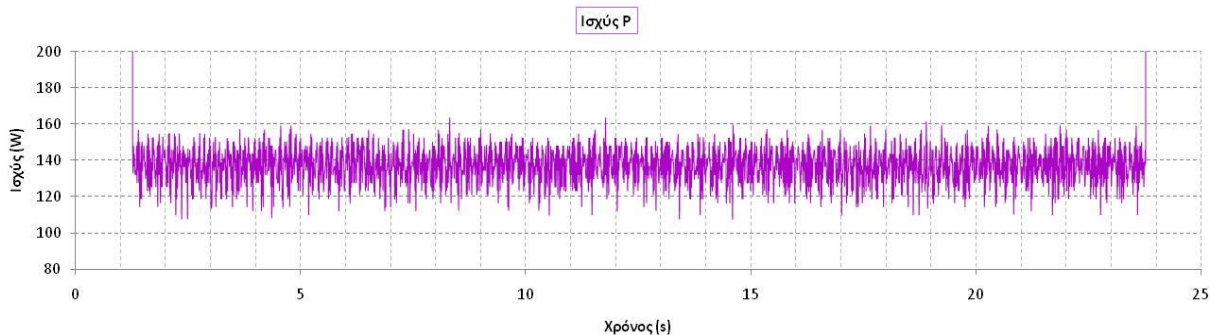


Είναι σαφές ότι η κύρια συχνότητα διέγερσης είναι της περιστροφής του κινητήρα. Οι συχνότητα περιστροφής του δρομέα δεν είναι ούτε εδώ ορατή. Είναι επίσης εμφανές ότι και στα δυο αυτά διαγράμματα στο πεδίο των συχνοτήτων η ενέργεια είναι αυξημένη συγκριτικά με την περίπτωση όπου ο κινητήρας είχε μικρότερη συχνότητα και η βάση ταλαντεύονταν με μεγαλύτερο πλάτος.

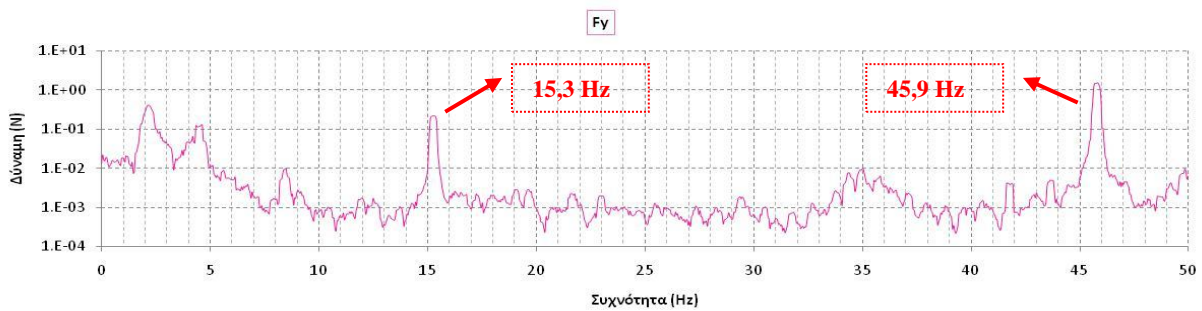
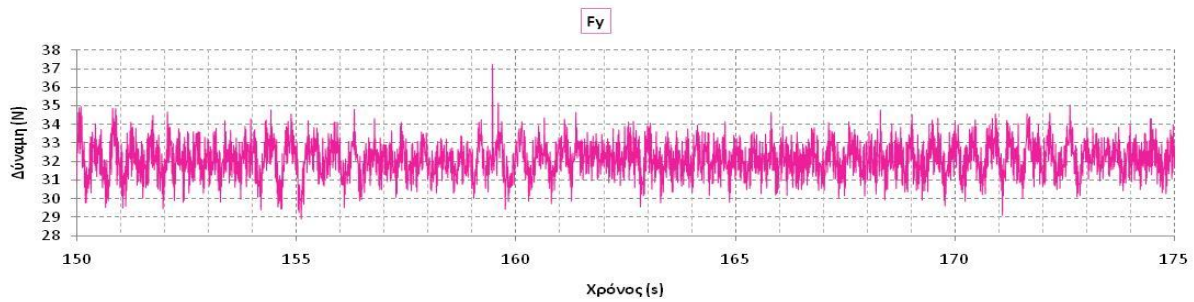
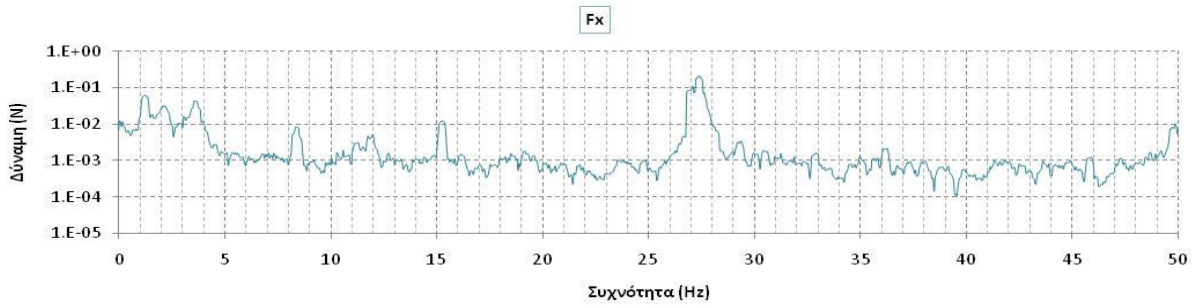
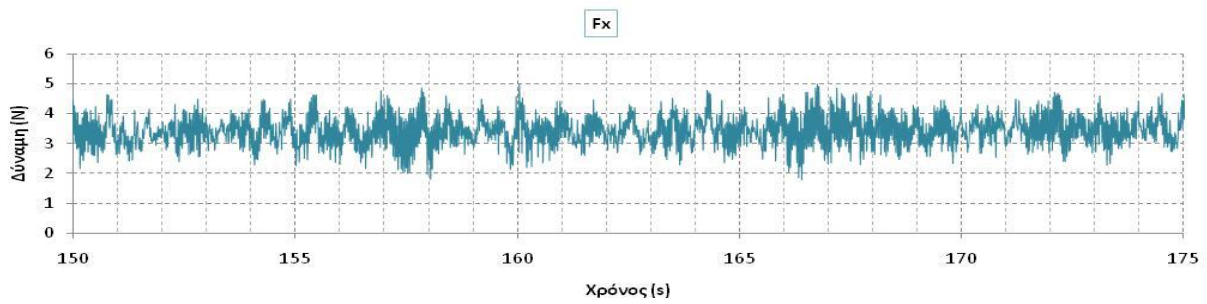
Ταχύτητα ανέμου $u = 8,3\text{m/s}$

➤ Με αέρα, χωρίς μοτέρ

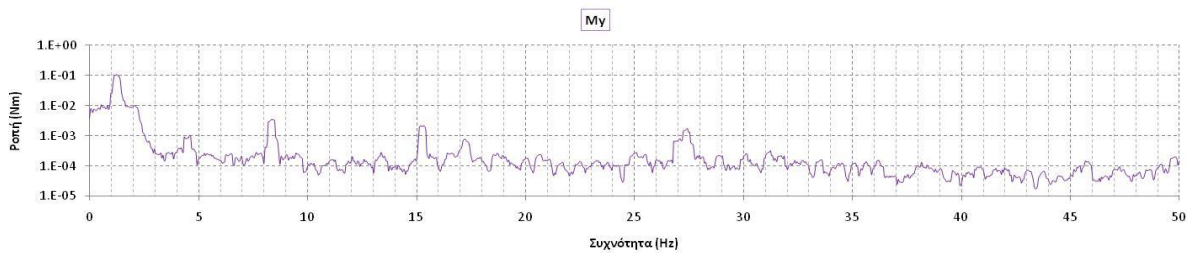
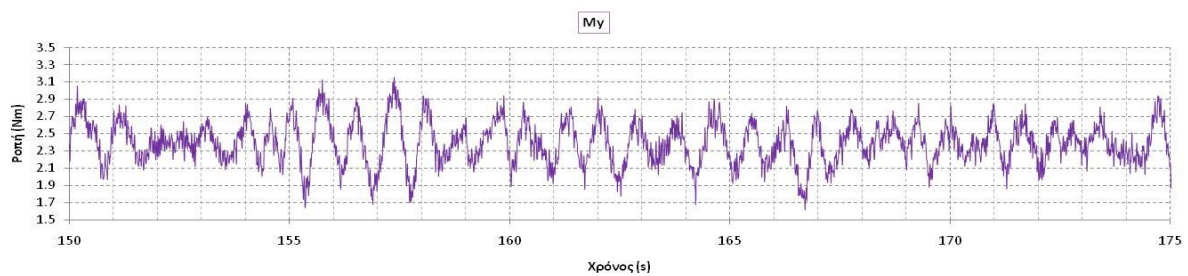
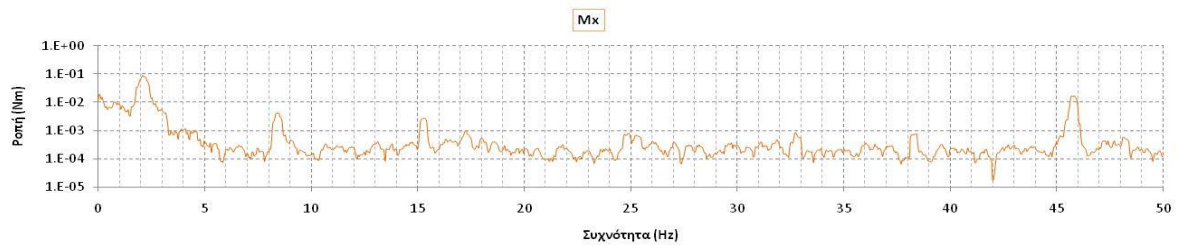
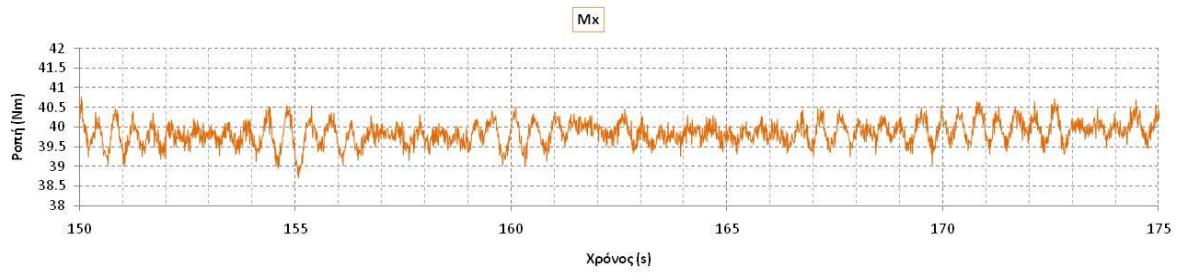
Σε αυτό το στάδιο της πειραματικής διαδικασίας αυξήσαμε την ταχύτητα ανέμου προκειμένου να πάρουμε μεγαλύτερη ισχύ. Έτσι η μέση τιμή του ρεύματος είναι 5 A και το διάγραμμα της ισχύος είναι αυτό που φαίνεται παρακάτω. Η μέση τιμή της είναι 140 W.



Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δυνάμεων και των ροπών. Η συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας είναι: 950 rpm.



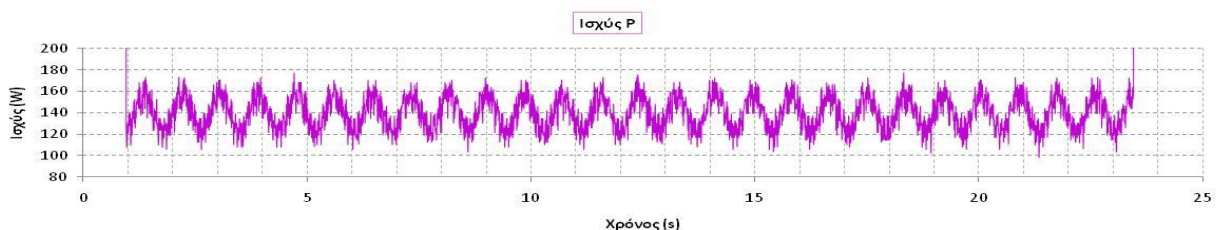
Στα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανής η συχνότητα περιστροφής του δρομέα στα 15,3 Hz καθώς και η τριπλάσια αυτής, δηλαδή η συχνότητα του πύργου στα 45,9 Hz. Και πάλι φαίνονται δυο συχνότητες στα 2,2 Hz και 4,4 Hz που έχουν να κάνουν με την ιδιοσυχνότητα των ελατηρίων τώρα που δεν είναι ελεύθερα να κινηθούν. Ο λόγος που δεν επιτρέπουμε την ελεύθερη κίνηση των ελατηρίων, είναι ώστε τα αποτελέσματα που παίρνουμε να αφορούν στην κατακόρυφη θέση της μηχανής. Αν τα ελατήρια ήταν ελεύθερα, λόγω της δύναμης που ασκείται στο σύστημα, η μηχανή θα έπαιρνε μια κλίση και άρα και η απόκρισή της θα επηρεάζονταν από αυτήν. Οι υπόλοιπες συχνότητες που εμφανίζονται οφείλονται σε ιδιοσυχνότητες του συστήματος κυρίως λόγω της σύζευξης.



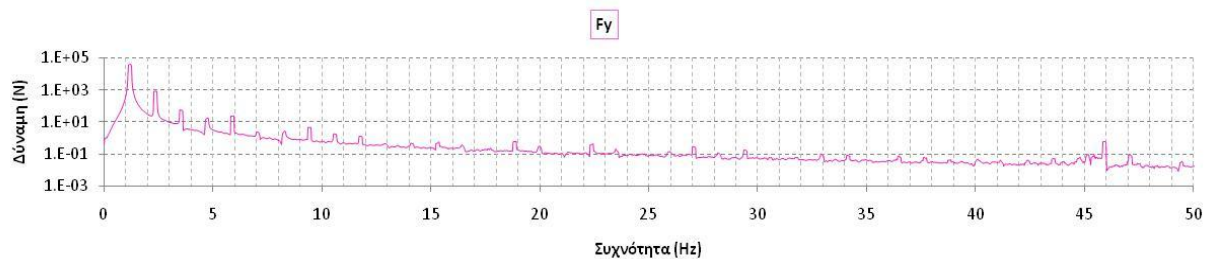
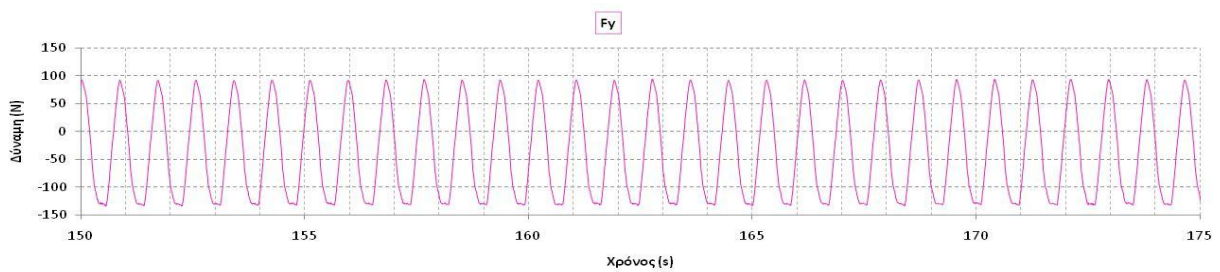
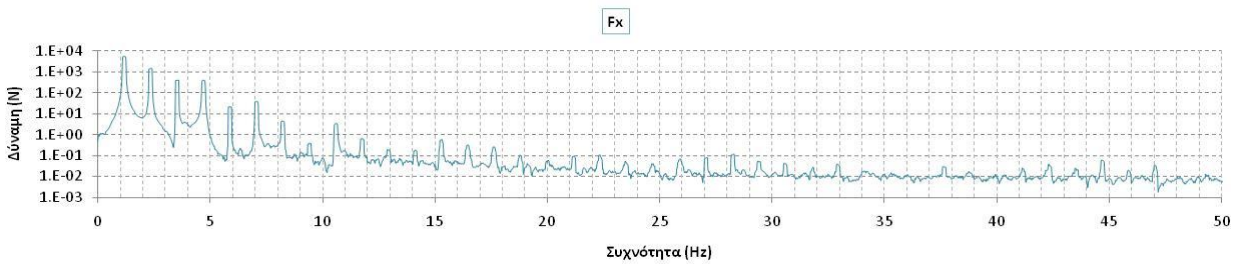
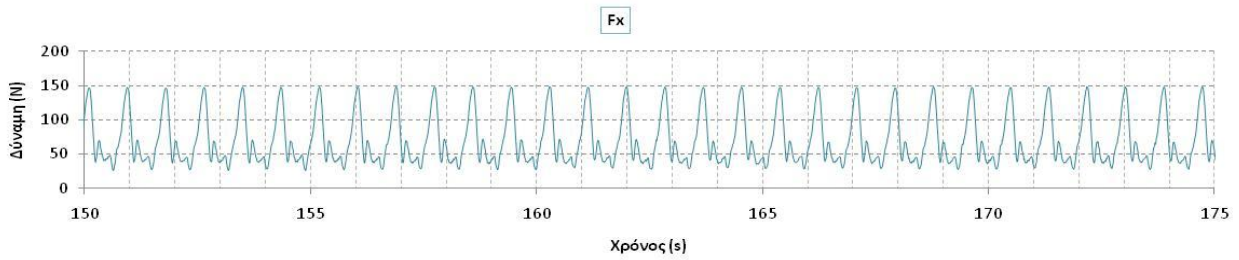
Και στα διαγράμματα των ροπών φαίνεται η συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Συγκριτικά με το προηγούμενο στάδιο ($u = 6,3 \text{ m/s}$) παρατηρούμε ότι οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται είναι πολύ μεγαλύτερες τώρα. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, αφού η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη και άρα η ώση που ασκείται στο δρομέα και σε όλη τη μηχανή εξίσου μεγάλη.

➤ Με αέρα, με μοτέρ

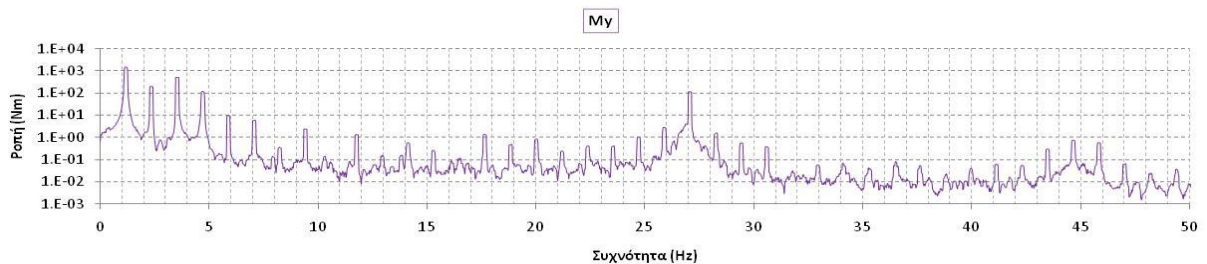
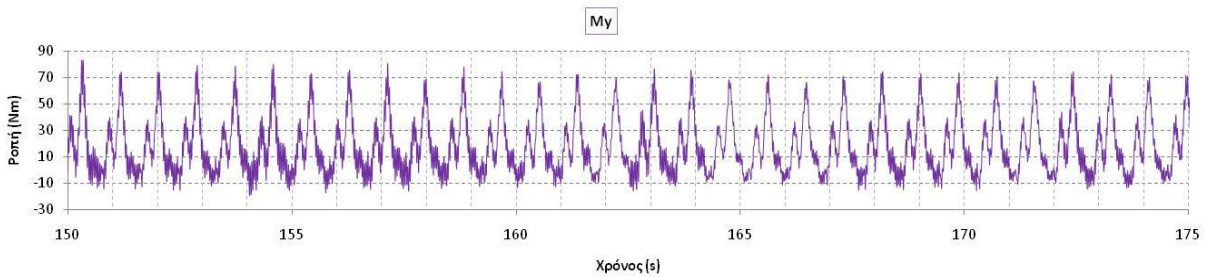
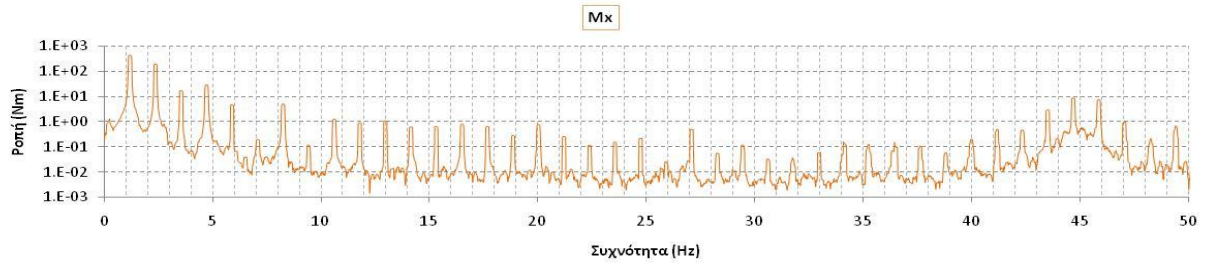
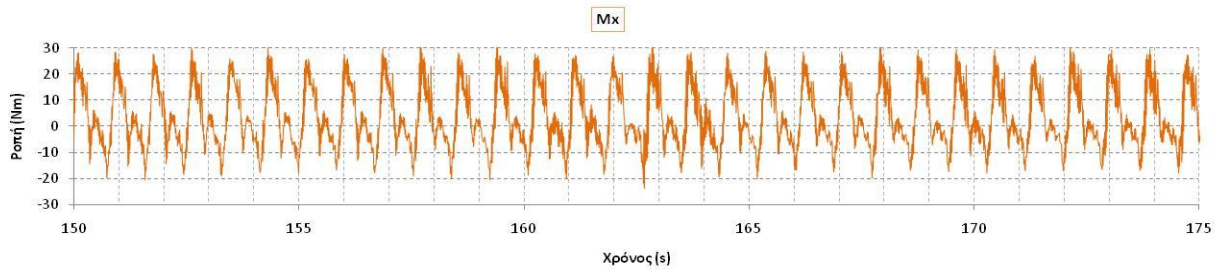
Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε προσθέσει την κίνηση της βάσης με την ίδια ταχύτητα ανέμου $u = 8 \text{ m/s}$. Το διάγραμμα της ισχύος που προκύπτει, είναι το ακόλουθο.



Η μέση τιμή είναι και πάλι 140 W, αλλά οι διακυμάνσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από πριν. Και εδώ είναι εμφανής η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα.

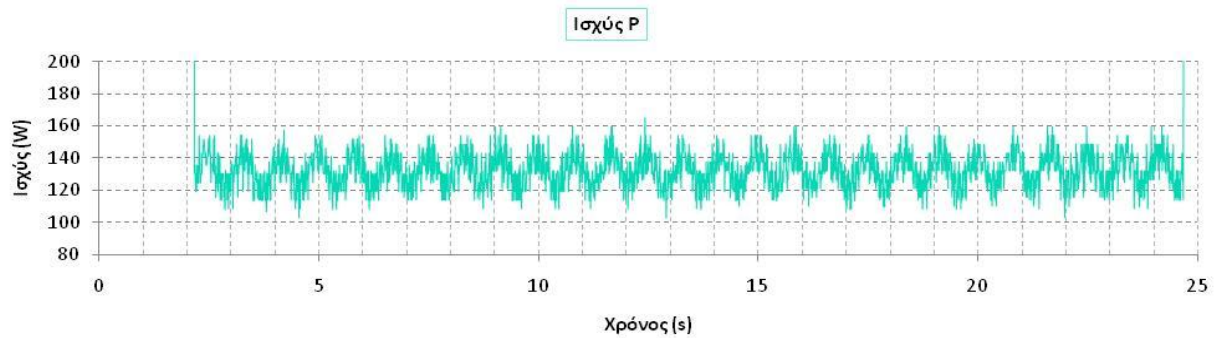


Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα στα 1,28 Hz και τα πολλαπλάσιά της. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση όπου η ταχύτητα του ανέμου ήταν 6 m/s, εδώ η συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας είναι εμφανής στα 15,3 Hz, καθώς και το τριπλάσιο αυτής (δηλαδή η ιδιοσυχνότητα του πύργου στα 45,9 Hz). Παρατηρείται ότι η συχνότητα στα 45,9 Hz έχει μεγαλύτερη ενέργεια από τη συχνότητα περιστροφής του δρομέα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συγκεκριμένη συχνότητα συντονίζεται σχεδόν με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος που αναφέρθηκε παραπάνω στα 45,5 Hz, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ενέργεια που παίρνουμε από το διάγραμμα των συχνοτήτων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί η αύξηση του πλάτους της δύναμης που ασκείται στο σύστημα, συγκριτικά με το προηγούμενο στάδιο. Εδώ η F_y μπορεί να φτάσει τα 100 N, ενώ πριν η μέγιστη τιμή που έπαιρνε ήταν 35 N. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως μια πλωτή ανεμογεννήτρια υπόκειται σε πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις από μια πακτωμένη στη στεριά για την ίδια ταχύτητα ανέμου, λόγω της κίνησης της πλατφόρμας. Η σύζευξη των κινήσεων αυξάνει αισθητά τα φορτία στη μηχανή.



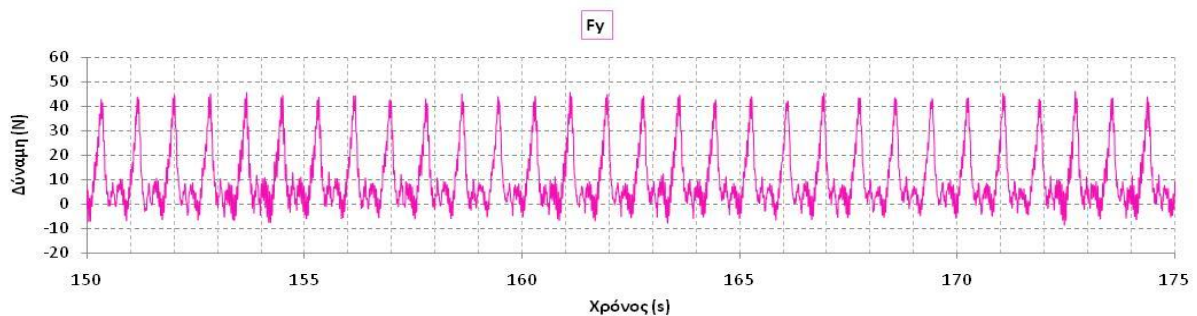
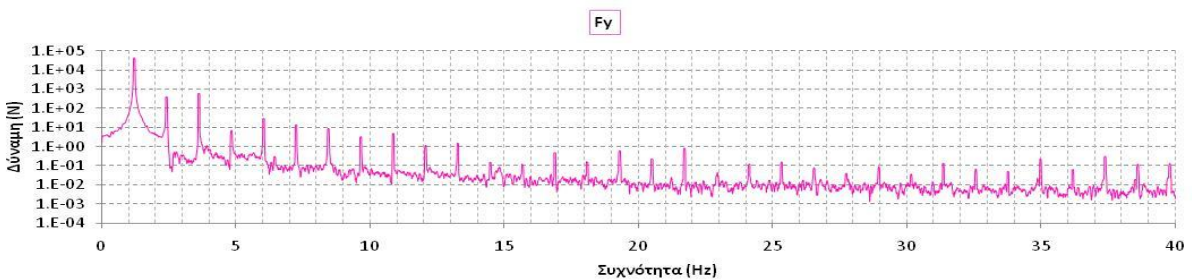
Η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα και τα πολλαπλάσιά του είναι και εδώ εμφανή. Επίσης παρουσιάζεται μια συχνότητα στα 27 Hz, η οποία εμφανίστηκε και στην περίπτωση όπου η ταχύτητα του ανέμου ήταν 6 m/s. Φαίνεται να υπάρχει και στα διαγράμματα όπου η βάση δεν κινείται (χωρίς μοτέρ), αλλά με μικρότερη ενέργεια. Άρα μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι είναι κάποια ιδιοσυχνότητα του συστήματος, η οποία συντονίζεται με κάποιο πολλαπλάσιο της περιστροφής του κινητήρα και γι' αυτό αυξάνεται η ενέργειά του.

Η μείωση του πλάτους ταλάντωσης της βάσης και η διατήρηση της συχνότητας περιστροφής του κινητήρα, δίνει το ακόλουθο διάγραμμα ισχύος.



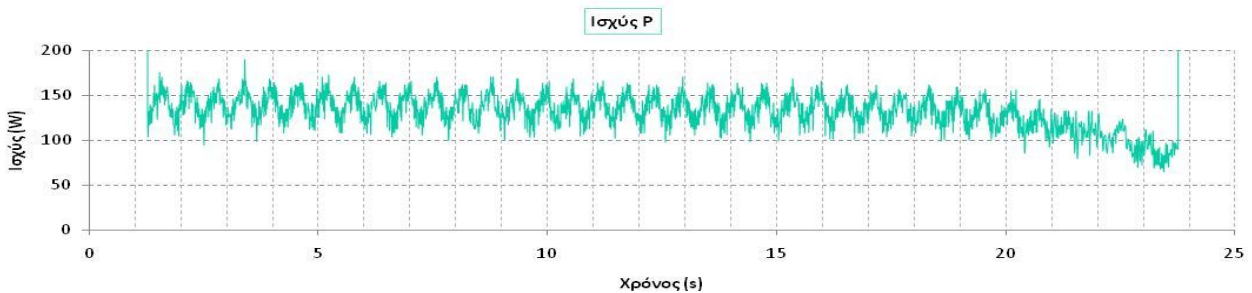
Και πάλι οι διακυμάνσεις που εμφανίζει το διάγραμμα της ισχύος από τη μέση τιμή είναι μικρότερες από πριν. Η ακριβής απόκλιση φαίνεται στον πίνακα 1 του κεφαλαίου 6.4 όπου παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις όλων των περιπτώσεων, για ευκολότερη σύγκριση μεταξύ τους.

Τα δύο διαγράμματα της δύναμης είναι:

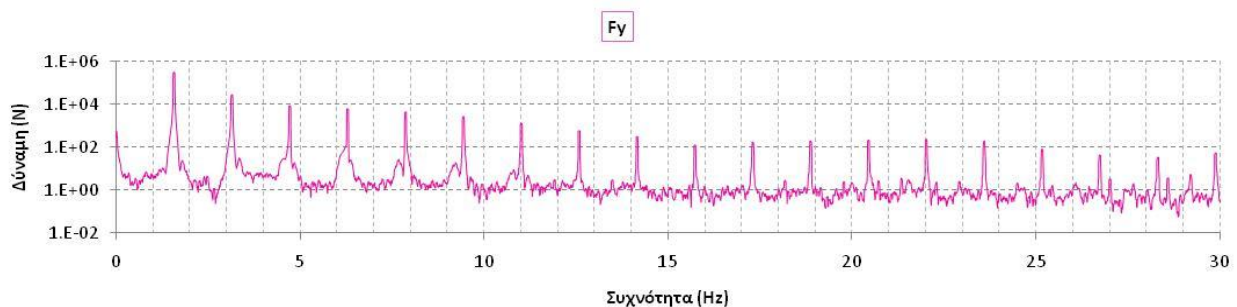
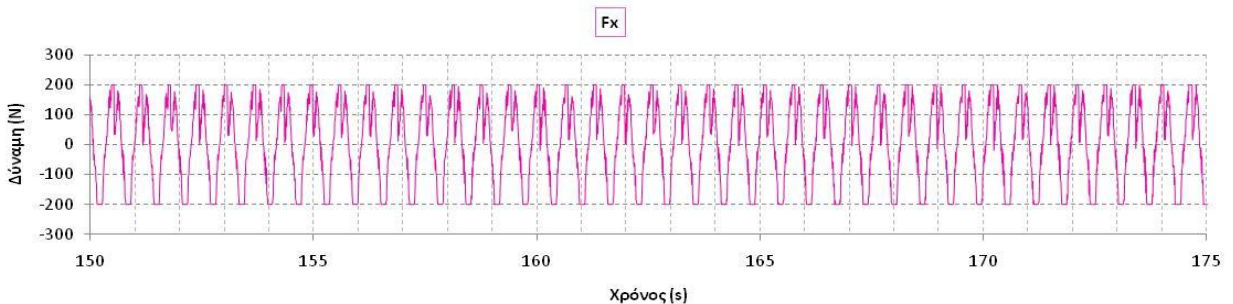


Τα συμπεράσματα που μπορούμε να εξάγουμε είναι τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση για ταχύτητα ανέμου 6 m/s. Η δύναμη που ασκείται στο σύστημα και πάλι μειώνεται λόγω της μείωσης του πλάτους της ταλάντωσης της βάσης. Πάντα όμως η κύρια συχνότητα διέγερσης του συστήματος είναι η περιστροφή του κινητήρα στα 1,28 Hz.

Και πάλι για ταχύτητα ανέμου $u = 8 \text{ m/s}$ αυξήσαμε τη συχνότητα περιστροφής του κινητήρα και μειώσαμε το πλάτος ταλάντωσης της βάσης. Το διάγραμμα της ισχύος είναι:



Σε αυτό το διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι διακυμάνσεις είναι περίπου ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση. Άρα μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι για μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου και άρα μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος, η ανεμογεννήτρια δεν επηρεάζεται τόσο από την κατάσταση της θάλασσας. Στα 5 τελευταία δευτερόλεπτα της μέτρησης παρατηρούμε μια πτώση της ισχύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ανεμογεννήτρια μέσα στη σήραγγα πήρε μια κλίση ως προς την κατεύθυνση του ανέμου, λόγω των μεγάλων δυνάμεων που ασκούνταν στο σύστημα. Το διάγραμμα δηλαδή αποδεικνύει τη σημασία ευθυγράμμισης τα ανεμογεννήτριας με την διεύθυνση του ανέμου, ώστε να έχουμε μέγιστη παραγωγή ισχύος.



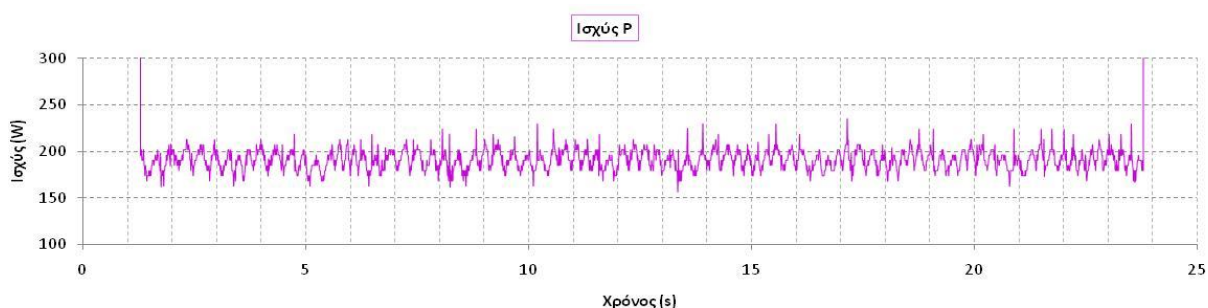
Και σε αυτά τα διαγράμματα υπερισχύει η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα και η δύναμη που ασκείται είναι μεγαλύτερη από πριν. Ομοίως προκύπτει και για τα διαγράμματα της ροπής.

Ταχύτητα ανέμου $u = 9,4\text{m/s}$

➤ Με αέρα, χωρίς μοτέρ

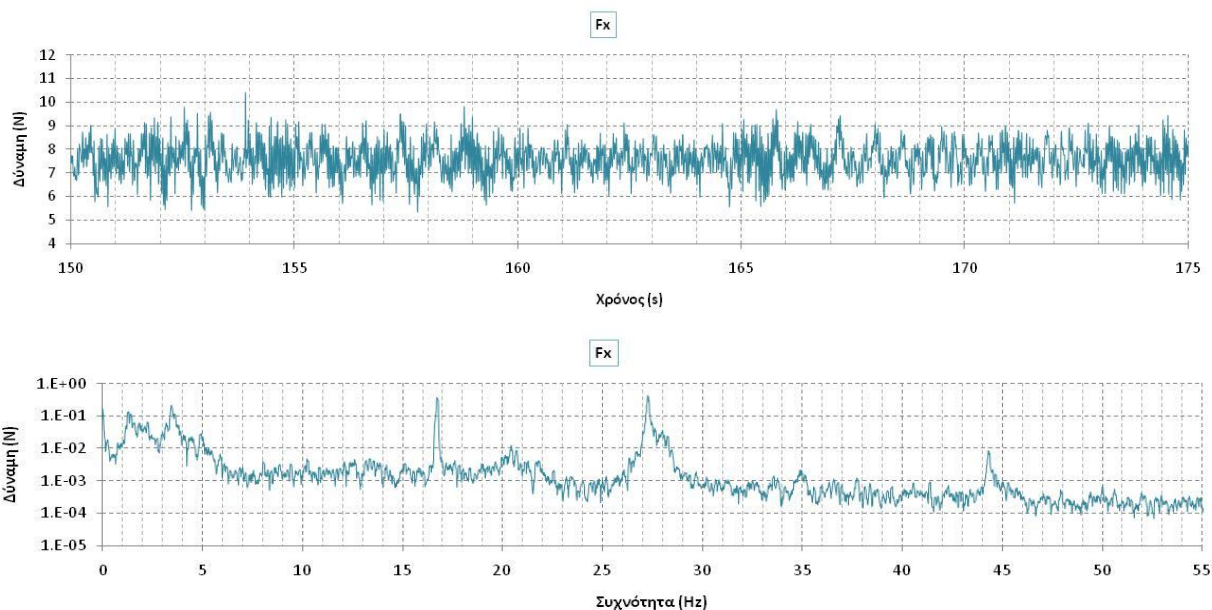
Η τελευταία δοκιμή που πραγματοποιήσαμε ήταν για ταχύτητα ανέμου $9,4\text{ m/s}$. Έτσι πλησιάσαμε την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας. Αν και σύμφωνα με τον κατασκευαστή η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι 12 m/s , στη σήραγγα έχουμε blockage, λόγω περιορισμού της διαμέτρου σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον, με αποτέλεσμα η ταχύτητα που βλέπει η ανεμογεννήτρια να είναι μεγαλύτερη από 9 m/s . Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι η μηχανή φρενάρει για λίγο μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου και κλείνει για να προστατευτεί από τις μεγάλες ταχύτητες.

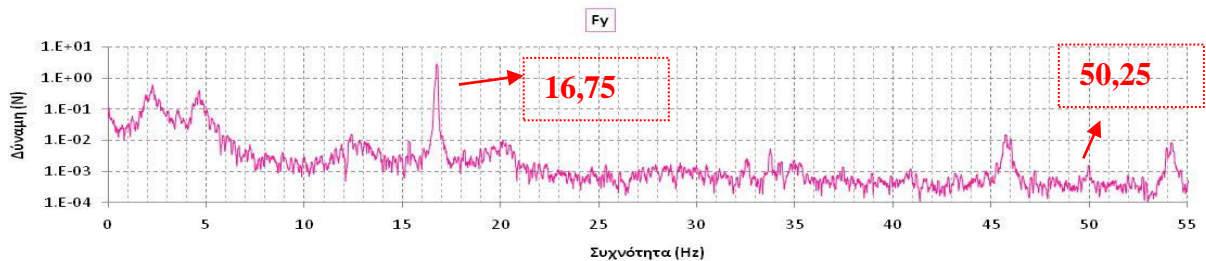
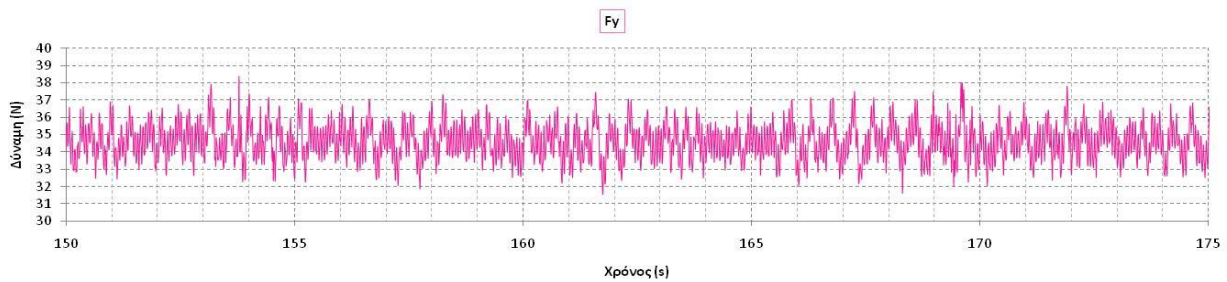
Το διάγραμμα της ισχύος που προκύπτει τώρα, είναι αυτό που φαίνεται παρακάτω.



Η μέση τιμή του ρεύματος είναι 7 A και η μέση τιμή της ισχύος 196 W , αν και υπάρχουν στιγμές που περνάει τα 200 W , δηλαδή την ονομαστική της τιμή. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο θόρυβος είναι αρκετά μειωμένος, γιατί η αυξημένη τιμή του ρεύματος υπερισχύει των άλλων σημάτων.

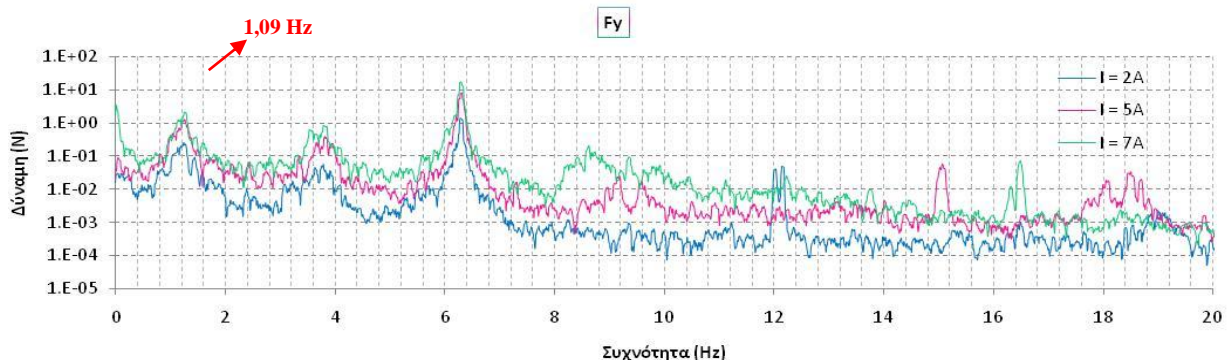
Η συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας είναι 1005 rpm .



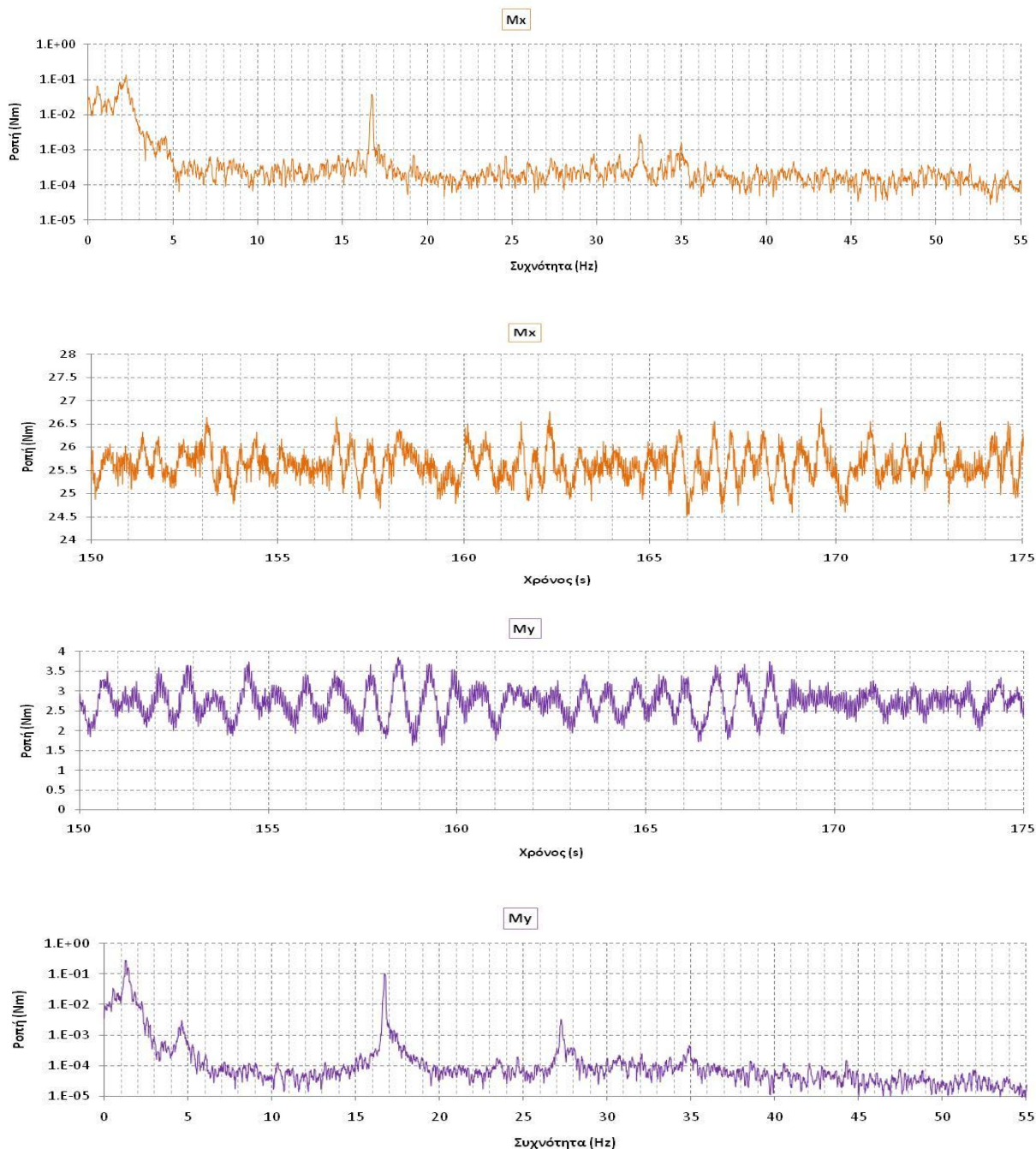


Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας στα 16,75 Hz και η συχνότητα του πύργου στα 50,25 Hz. Τα δυο peaks στα 2,2 Hz και 4,4 Hz είναι πάντα η μετατοπισμένη ιδιοσυχνότητα των ελατηρίων, λόγω του ότι δεν είναι ελεύθερα να κινηθούν. Οι υπόλοιπες έντονες κορυφές που εμφανίζονται αντιστοιχούν σε άλλες ιδιοσυχνότητες του συστήματος όπως έχει ήδη αναφερθεί. Επίσης οι δυνάμεις που εμφανίζονται στον άξονα των x και το γεγονός ότι η μέση τους τιμή δεν είναι 0, οφείλονται στη ασυμμετρία της κατασκευής και στο ότι ο ζυγός δεν είναι πλήρως ευθυγραμμισμένος με την ανεμογεννήτρια.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η δύναμη F_y στο πεδίο των συχνοτήτων, όταν τα ελατήρια είναι ελεύθερα και δεν περιορίζεται η κίνηση τους από τον διωστήρα. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε ότι η πρώτη κορυφή είναι στα 1,09 Hz, ίση δηλαδή με την ιδιοσυχνότητα των ελατηρίων, όπως υπολογίστηκε στο πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας. Άρα επαληθεύεται ότι οι δυο κορυφές που εμφανίζονται στα διαγράμματα των περιπτώσεων με αέρα-χωρίς μοτέρ, αντιστοιχούν στην ιδιοσυχνότητα των ελατηρίων, η οποία είναι μετατοπισμένη, λόγω του περιορισμού που έχει τεθεί στην κίνησή τους.



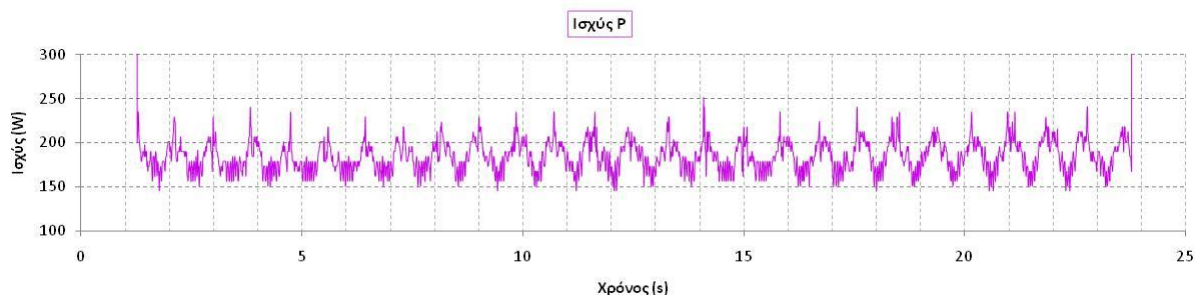
Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα των ροπών.



Εξίσου εμφανής με τα προηγούμενα διαγράμματα είναι η συχνότητα περιστροφής του δρομέα. Η τιμή της M_y είναι αυξημένη συγκριτικά με την περίπτωση όπου ο άνεμος έχει ταχύτητα 8 m/s, αφού η συχνότητα περιστροφής αυξήθηκε. Παρατηρούμε επίσης ότι η τιμή της M_x είναι μικρότερη συγκριτικά με πριν, γεγονός που πιθανών να οφείλεται στο ότι η ανεμογεννήτρια λόγω μεγαλύτερων δυνάμεων στρίβει (tilt) και μειώνεται ο μοχλοβραχίονας.

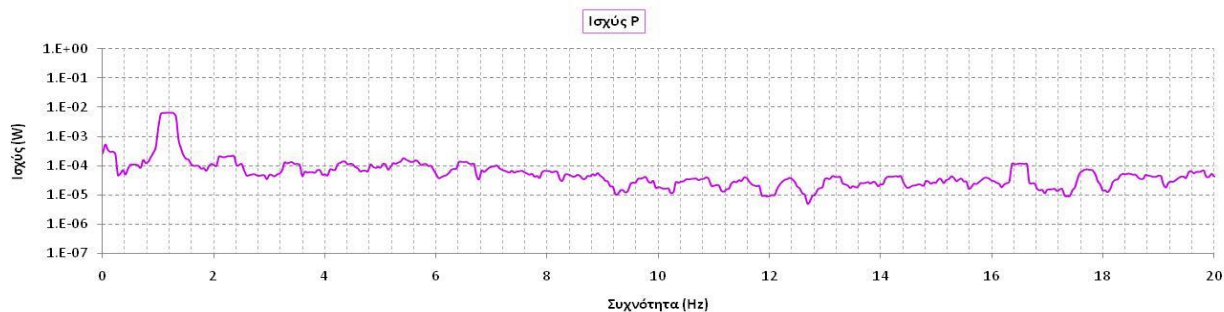
➤ Με αέρα, με μοτέρ

Τέλος προσθέσαμε και την κίνηση του κινητήρα, ώστε να βρούμε τη μέγιστη φόρτιση του συστήματος.

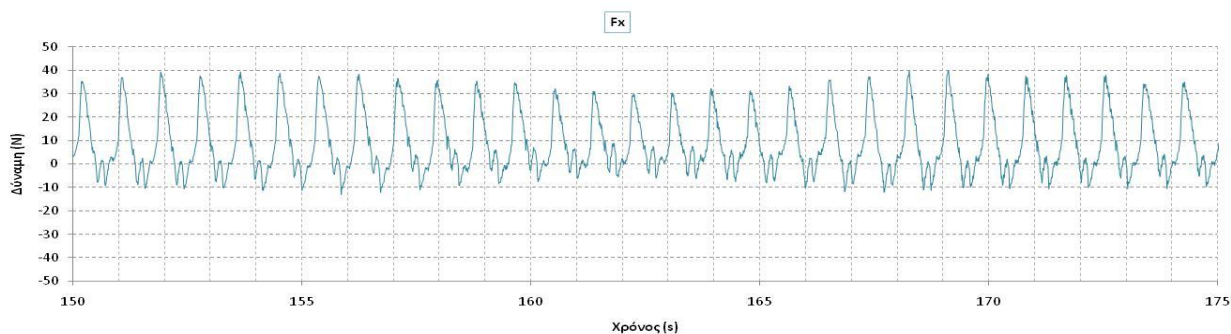


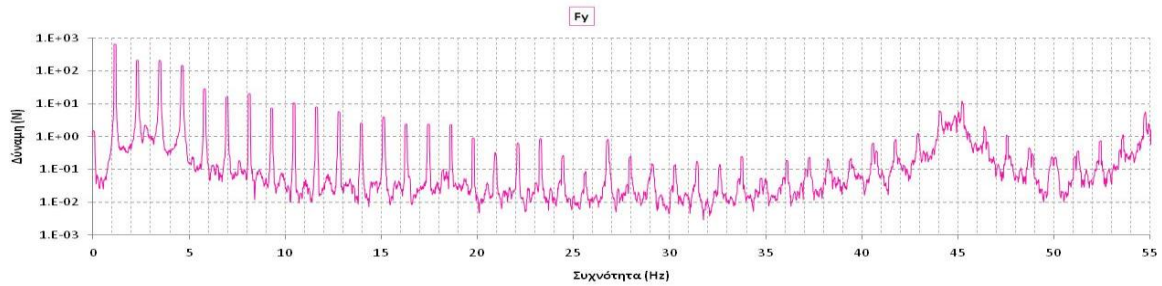
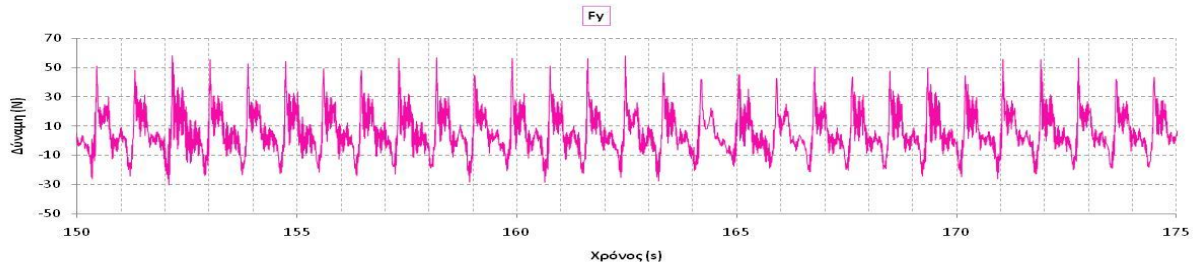
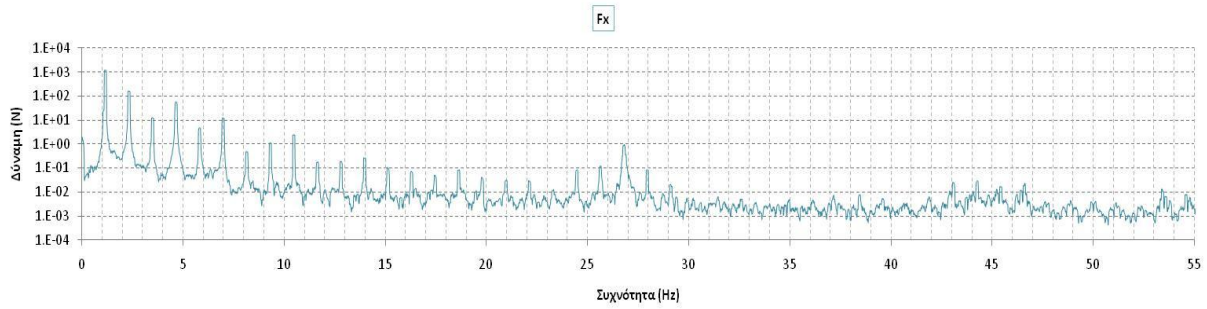
Η μέση ισχύς είναι και πάλι 196 W, αλλά οι διακυμάνσεις είναι πολύ πιο έντονες. Η μέγιστη τιμή ξεπερνάει κατά πολύ την ονομαστική, ενώ είναι και εδώ εμφανής η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα που δίνει την αρμονική κίνηση στη βάση. Το σήμα όπως και προηγουμένως είναι πιο καθαρό και απαλλαγμένο από τους περισσότερους θορύβους.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται το διάγραμμα της ισχύος στο πεδίο των συχνοτήτων. Η πρώτη κορυφή που φαίνεται είναι η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα. Όλες οι άλλες κορυφές αντιστοιχούν στις αρμονικές του ρεύματος.

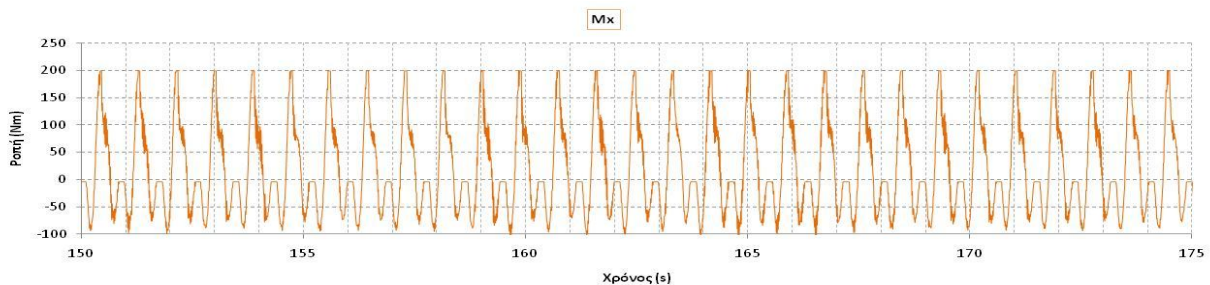


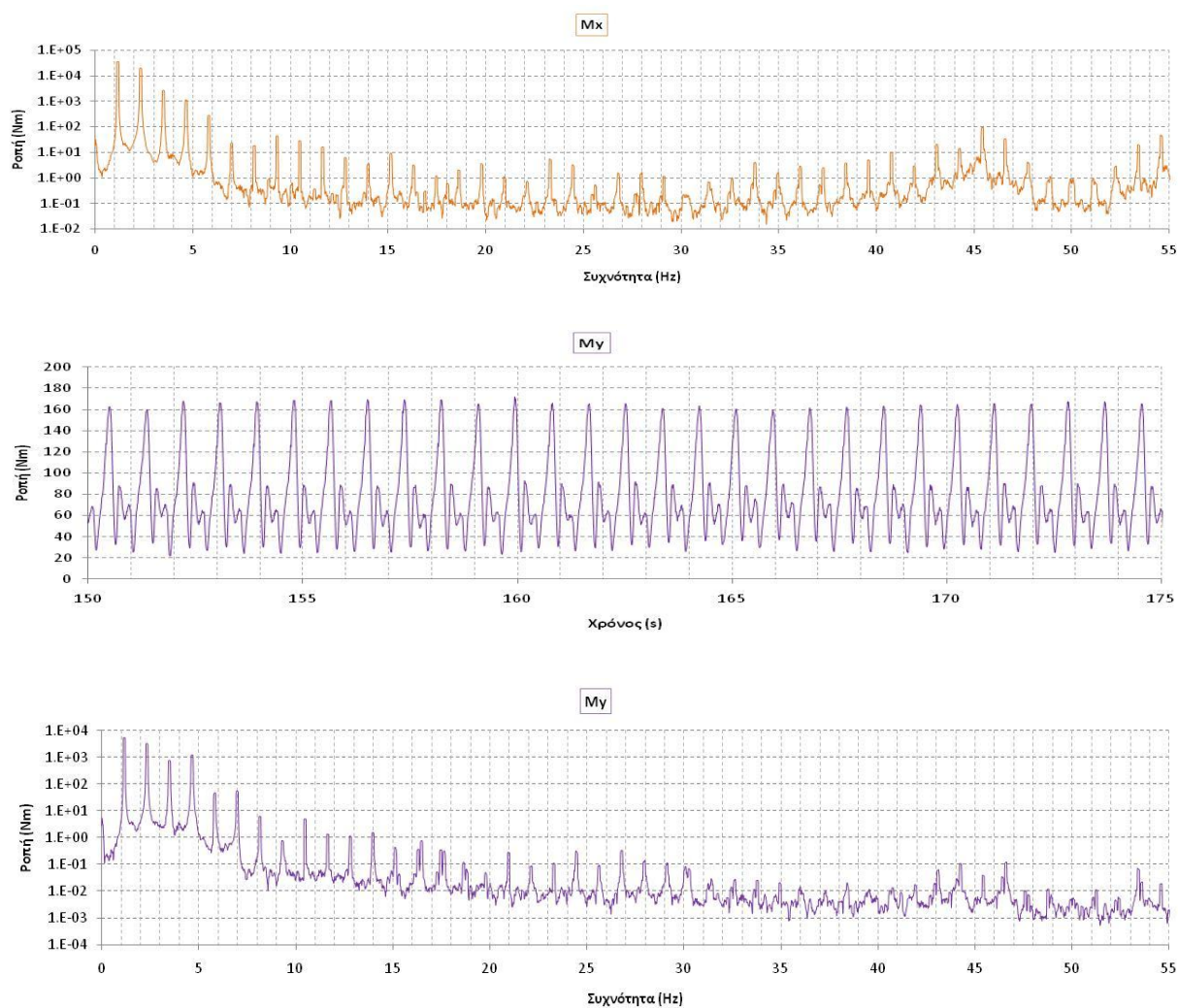
Τα διαγράμματα των δυνάμεων είναι:





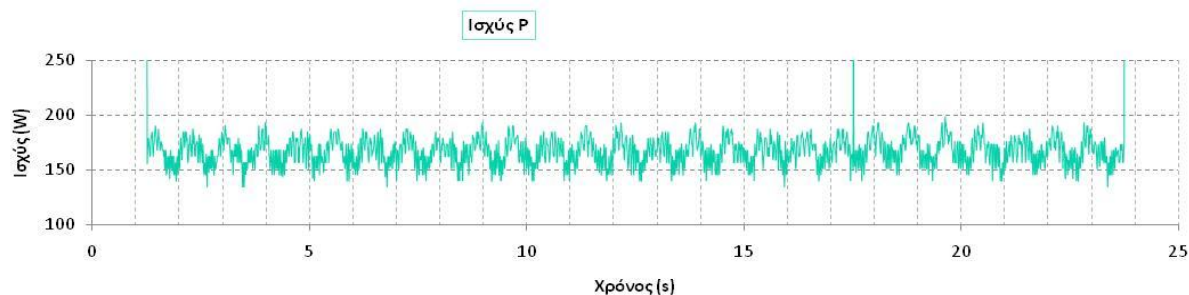
Όπως σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις η συχνότητα που επικρατεί είναι αυτή του κινητήρα και τα πολλαπλάσιά της (1,28 Hz). Ούτε εδώ είναι εμφανής η συχνότητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Παρατηρούμε ότι σε κάθε στάδιο του πειράματος εμφανίζονται κάποιες υψηλές συχνότητες διαφορετικές μεταξύ τους κάθε φορά. Άρα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι είναι ιδιοσυχνότητες του συστήματος οι οποίες επηρεάζονται από τη συχνότητα περιστροφής του δρομέα, καθώς είναι το μόνο δεδομένο που αλλάζει και άρα αυτό που τις διεγείρει.





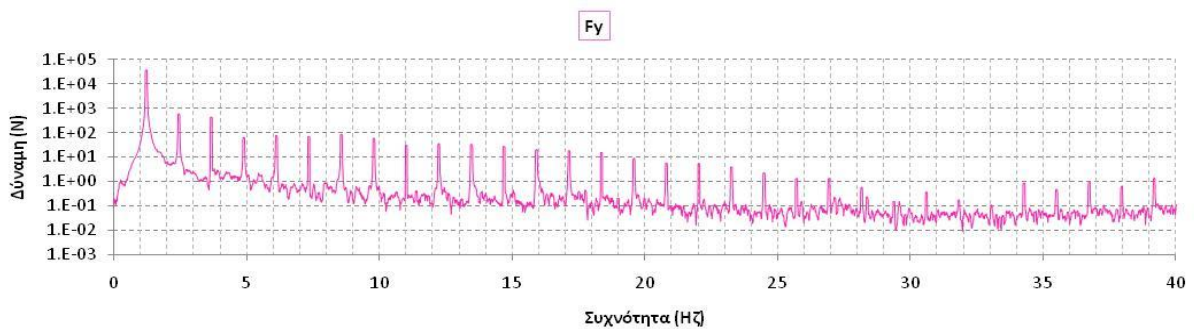
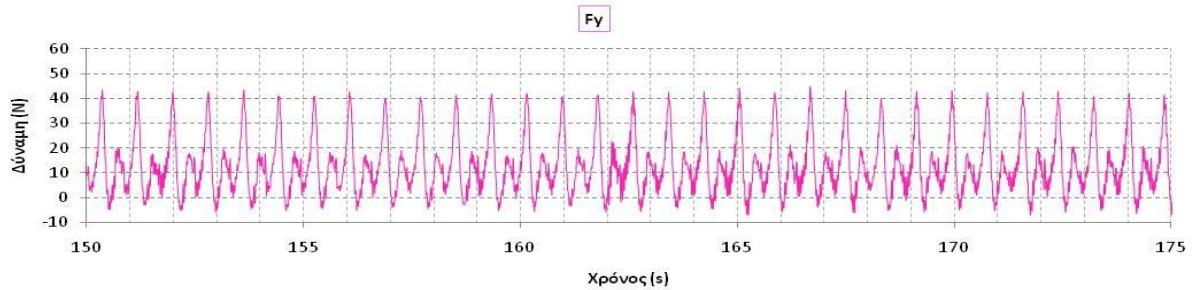
Η κύρια συχνότητα διέγερσης είναι η περιστροφή του κινητήρα, ενώ εδώ φαίνεται και η συχνότητα περιστροφής του δρομέα, αλλά με μικρότερη ενέργεια, συγκριτικά με του κινητήρα. Οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν υπήρχε κίνηση στη βάση. Επιπλέον εδώ παρατηρούμε ότι η Mx είναι μεγαλύτερη της My καθώς αυξάνεται η ώση που ασκείται στο δρομέα.

Μειώνοντας το πλάτος της ταλάντωσης στο 0,01 m για μια ακόμη φορά το διάγραμμα της ισχύος είναι:



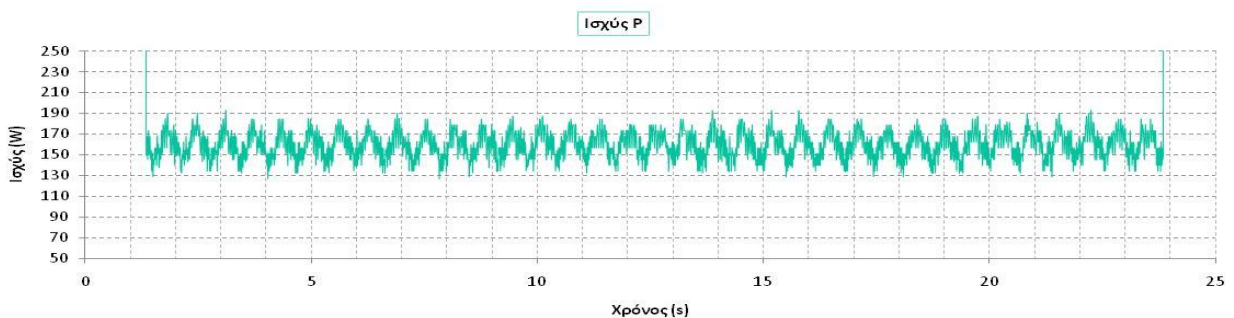
Παρατηρούμε και πάλι ότι οι διακυμάνσεις είναι λιγότερο έντονες από πριν. Η απότομη αύξηση του ρεύματος στα 17,5 s, οφείλεται στο ότι η ανεμογεννήτρια λίγο μετά τη ολοκλήρωση της μέτρησης φρέναρε και έκλεισε.

Τα διαγράμματα της δύναμης είναι:

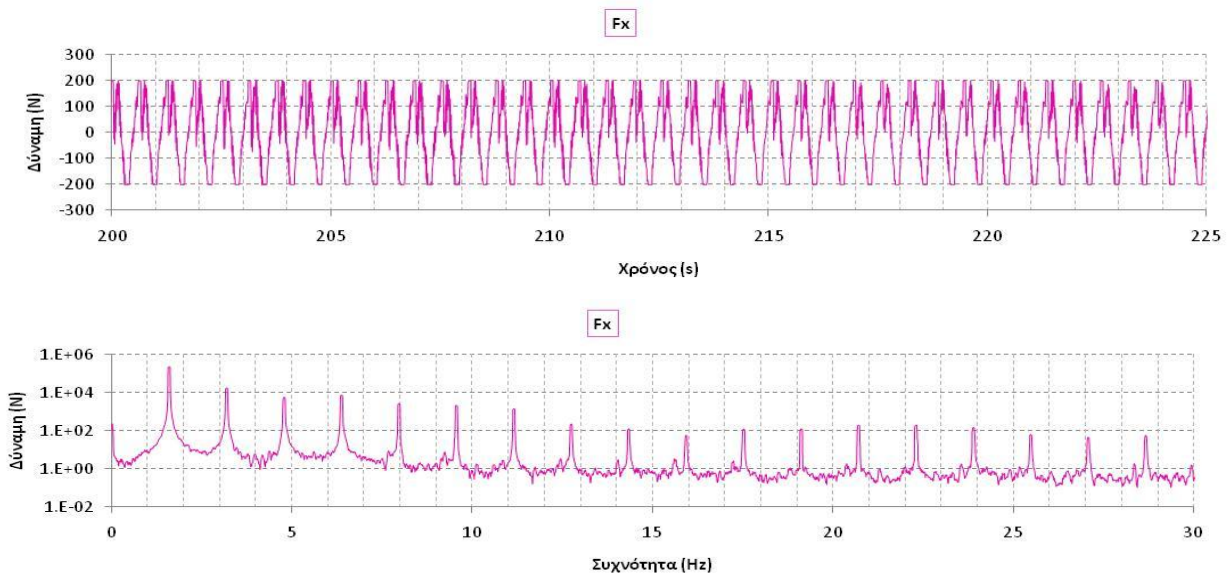


Και εδώ μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει μια μείωση της δύναμης σε σύγκριση με την περίπτωση του μεγαλύτερου πλάτους ταλάντωσης. Επίσης συγκρίνοντας τις περιπτώσεις όλων των ταχυτήτων ανέμου για αυτές τις συνθήκες λειτουργίας της βάσης, παρατηρούμε ότι η δύναμη που ασκείται στο σύστημα δεν αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.

Στο τελικό στάδιο του πειράματος αυξήσαμε και πάλι τη συχνότητα περιστροφής του κινητήρα και διατηρώντας το πλάτος ταλάντωσης της βάσης 0,01 m. Οπότε το διάγραμμα ισχύος που προκύπτει είναι το ακόλουθο:



Οι διακυμάνσεις που εμφανίζει η ισχύς είναι πιο έντονες από της προηγούμενης περίπτωσης, αλλά λιγότερο μεγάλες σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Άρα επαληθεύεται ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα του κυματισμού και μειώνεται το ύψος του, η παραγωγή ισχύος επηρεάζεται θετικά.



Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι το ίδιο με περιπτώσεις όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη. Οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται είναι μεγαλύτερες. Άρα επαληθεύεται το αρχικό συμπέρασμα ότι η συχνότητα κυματισμού επηρεάζει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό την απόκριση της πλωτής ανεμογεννήτριας από το ύψος κύματος.

6.4 Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι μια πλωτή ανεμογεννήτρια υπόκεινται σε πολύ μεγαλύτερα φορτία για την ίδια ταχύτητα ανέμου, σε σχέση με μια που βρίσκεται εγκατεστημένη στη στεριά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην αυξάνονται μόνο οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται στα πτερύγια και στον πύργο, αλλά να επηρεάζεται αισθητά και η παραγωγή ισχύος, η οποία εμφανίζει ιδιαίτερα έντονες διακυμάνσεις και αποκλίσεις από τη μέση τιμή. Επίσης συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με αυτά που πήραμε από τον κώδικα GAST, αν και είναι διαφορετική η μηχανή που εξετάζεται (η μηχανή του πειράματος είναι υπό κλίμακα), τα διαγράμματα είναι αντίστοιχα. Και στις δυο περιπτώσεις εμφανίζεται η κίνηση του πλωτήρα στα διαγράμματα των δυνάμεων και των ροπών, ενώ τα φορτία επαληθεύεται ότι είναι όντως πολύ μεγαλύτερα για μια πλωτή ανεμογεννήτρια.

Παρακάτω παρατίθενται σε πίνακα συγκριτικά οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις της ισχύος, των δυνάμεων F_x , F_y και της ροπής M_x για όλες τις περιπτώσεις, προκειμένου να μπορέσουμε να τα συγκρίνουμε μεταξύ τους και να δούμε την επίδραση της κίνησης του πλωτήρα στην απόκριση της ανεμογεννήτριας.

Πειραματικά Αποτελέσματα

Πίνακας 1 (Ισχύς)

	u = 6 m/s		u = 8 m/s		u = 9 m/s	
Ισχύς P (με αέρα, χωρίς μοτέρ)	Μέση τιμή (W)	Τυπική Απόκλιση	Μέση τιμή (W)	Τυπική Απόκλιση	Μέση τιμή (W)	Τυπική Απόκλιση
Ισχύς P (με αέρα, χωρίς μοτέρ)	54,28	5,728	137	10,377	190,89	10,350
Ισχύς P (με αέρα, με μοτέρ)	56,52	9,987	139,53	15,521	193,06	16,923
f = 1,28 Hz A = 0,01 m	53,95	6,9044	132,76	10,7422	166,99	12,1270
f = 1,6 Hz A = 0,01 m	52,38	8,1297	136,30	14,7703	160,18	13,0631

Πίνακας 2 (Δύναμη Fx)

	u = 6 m/s		u = 8 m/s		u = 9 m/s	
Fx (με αέρα, χωρίς μοτέρ)	Μέση τιμή (N)	Τυπική Απόκλιση	Μέση τιμή (N)	Τυπική Απόκλιση	Μέση τιμή (N)	Τυπική Απόκλιση
Fx (με αέρα, χωρίς μοτέρ)	4,39	0,227	3,43	0,499	7,55	0,706
Fx (με αέρα, με μοτέρ)	56,38	30,817	69,85	36,374	8,52	13,097

Πίνακας 3 (Δύναμη Fy)

	u = 6 m/s		u = 8 m/s		u = 9 m/s	
Fy (με αέρα, χωρίς μοτέρ)	Μέση τιμή (N)	Τυπική Απόκλιση	Μέση τιμή (N)	Τυπική Απόκλιση	Μέση τιμή (N)	Τυπική Απόκλιση
Fy (με αέρα, χωρίς μοτέρ)	17,40	0,367	32,10	1,028	34,62	1,060
Fy (με αέρα, με μοτέρ)	-48,86	79,738	-36,72	81,272	5,57	14,74

Πίνακας 4 (Ροπή Mx)

	u = 6 m/s		u = 8 m/s		u = 9 m/s	
Mx (με αέρα, χωρίς μοτέρ)	Μέση τιμή (Nm)	Τυπική Απόκλιση	Μέση τιμή (Nm)	Τυπική Απόκλιση	Μέση τιμή (Nm)	Τυπική Απόκλιση
Mx (με αέρα, χωρίς μοτέρ)	13,49	0,146	39,84	0,292	25,62	0,354
Mx (με αέρα, με μοτέρ)	1,76	12,056	3,4	11,583	19,28	84,724

Από τους παραπάνω πίνακες καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όταν υπάρχει κίνηση στη βάση (δηλαδή κυματισμός) οι διακυμάνσεις τόσο της ισχύος όσο και των δυνάμεων και των ροπών είναι πιο έντονες. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι διακυμάνσεις που παρουσιάζει η ισχύς όταν η ανεμογεννήτρια είναι ακίνητη οφείλονται στο θόρυβο του συστήματος, βλέπουμε όμως ότι η τυπική απόκλιση αυξάνεται σημαντικά όταν ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία. Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει μια αύξηση της μέσης τιμής της ισχύος όταν η βάση κινείται. Αυτή η αύξηση τείνει να μηδενιστεί όσο αυξάνεται το ρεύμα που παράγεται, γιατί στα μικρότερα ρεύματα μια αλλαγή επηρεάζει πολύ περισσότερο την απόκριση του συστήματος από ότι συμβαίνει στα μεγαλύτερα. Στις δυο τελευταίες δοκιμές με τη φόρτιση των μπαταριών δεν μας επέτρεψε να πάμε σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου καθώς η ανεμογεννήτρια φρέναρε. Γι' αυτό η μέση τιμή της ισχύος σε αυτήν τη δοκιμή αντιστοιχεί σε λίγο χαμηλότερη ταχύτητα ανέμου από τα 9 m/s. Η τυπική απόκλιση των δυνάμεων και των ροπών για την πακτωμένη ανεμογεννήτρια είναι σε αρκετά χαμηλές τιμές, ενώ αυξάνεται αισθητά όταν η βάση κινείται.

Τέλος δεν πρέπει να ξεχάσουμε ότι στις περιπτώσεις κίνησης της πλατφόρμας ο ζυγός μετράει κυρίως τη δύναμη των ελατηρίων. Οπότε τα αποτελέσματα για τα φορτία που ασκούνται στη μηχανή περιλαμβάνουν μέσα και αυτήν την δύναμη. Γι' αυτό στις συγκεκριμένες μετρήσεις είναι πιο σημαντικά τα διαγράμματα ισχύος.

6.5 Διάγραμμα $C_p - \lambda$

Τέλος παρουσιάζεται το διάγραμμα $C_p - \lambda$, όπως αυτό προκύπτει από τις μετρήσεις για τους τρεις διαφορετικούς ανέμους. Η ταχύτητα που έχει χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς είναι η διορθωμένη λόγω του blockage από τη σήραγγα. Ο λόγος του εμβαδού της μετωπικής επιφάνειας του δρομέα προς τη διατομή της σήραγγας είναι:

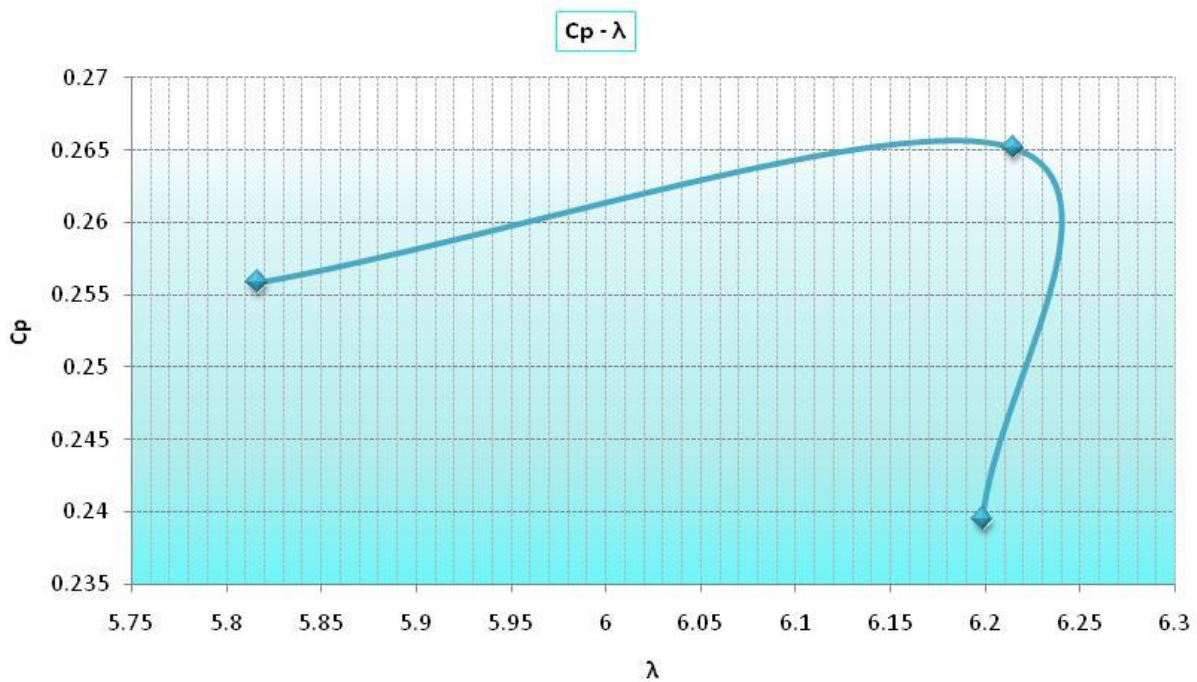
$$\frac{E_{W/T}}{E_{σηραγ}} = \frac{\pi \cdot r^2}{2,5 \times 3,5} = \frac{\pi \cdot 0,585^2}{2,5 \times 3,5} = 0,1228$$

Άρα η ταχύτητα που έχουμε υπολογίσει μέσω της μανομετρικής πίεσης πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή 1,1228, προκειμένου να βρούμε την πραγματική ταχύτητα πριν την ανεμογεννήτρια.

Το C_p δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:
$$C_p = \frac{P_{ανεμογεν}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^3 \cdot A}$$

Και η αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου από τον τύπο:
$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{u}$$

Τελικά το διάγραμμα που προκύπτει



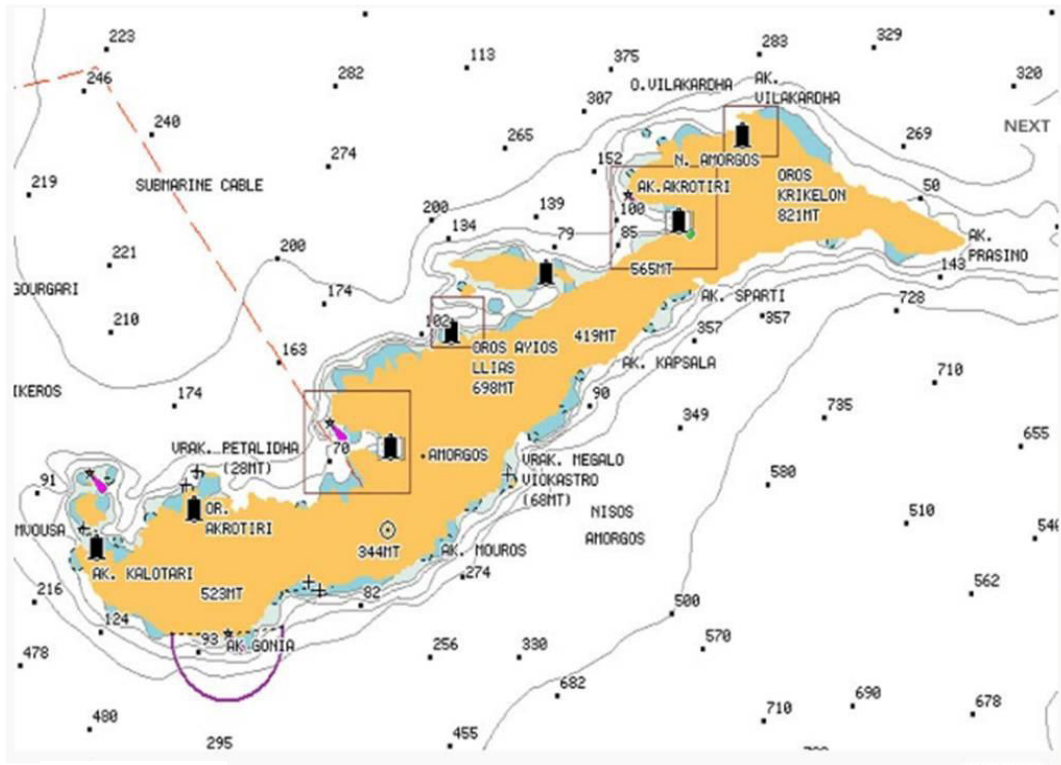
Το διάγραμμα φαίνεται να ότι δεν έχει απόλυτα τη σωστή μορφή, αλλά αυτό οφείλεται στην έλλειψη περισσότερων σημείων. Για την πλήρη χάραξη όλης της καμπύλης απαιτούνται περισσότερες πειραματικές μετρήσεις. Παρόλα αυτά μπορούμε να καταλάβουμε ότι θα παρουσιάζει μέγιστο C_p στην περιοχή όπου $\lambda = 6$. Ένα επιπλέον σφάλμα που προστίθεται στη χάραξη της καμπύλης είναι το φαινόμενο του blockage. Ο συντελεστής διόρθωσης της ταχύτητας δεν είναι σταθερός, καθώς αλλάζει με την ισχύ. Άρα για τη σωστή χάραξη του συγκεκριμένου διαγράμματος απαιτείται περεταίρω μελλοντική επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφία

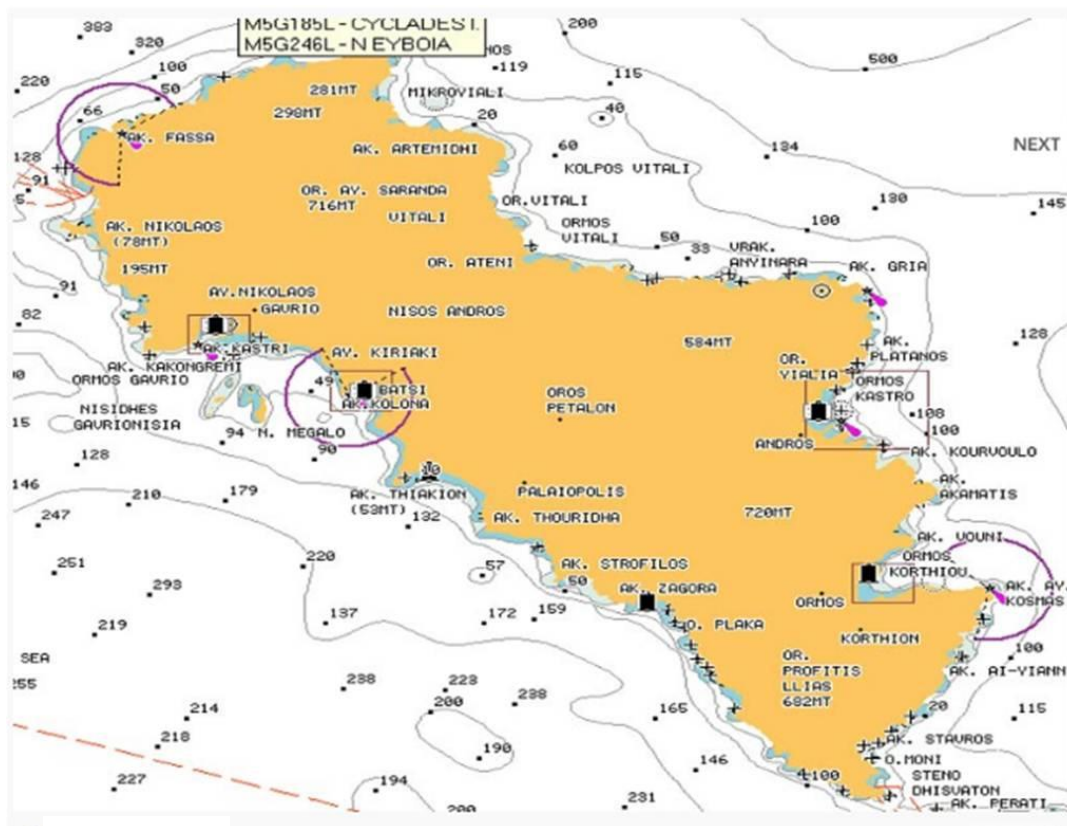
- Bir, G., & Jonkman, J. (2007). *Aeroelastic Instabilities of Large Offshore and Onshore Wind Turbines*. Lyngby, Denmark.
- Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J., & Sclavounos, P. (2005). *Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines*. Copenhagen.
- Caffarelli, A., de Simone, G., Stizza, M., D'Amato, A., & Vergelli, V. (2009). *Sistemi eolici: Progettazione e Valutazione economica*. Maggioli Editore.
- EWEA. (2010). *Factsheets*.
- EWEA. (2009). *Oceans of Opportunity*.
- Fenton, J. D. (1983). *A fifth-order Stokes theory for steady waves*.
- Jonkman, J. (2008). *Influence on Control on the Pitch Damping of a Floating Wind Turbine*. Reno, Nevada: ASME Wind Energy Symposium.
- Jonkman, J. M., & Buhl, M. L. (2007). *Development and Verification of a fully coupled Simulator for Offshore Wind Turbines*. Nevada.
- Jonkman, J., & Buhl, M. (2007). *Loads Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine using Fully Coupled Simulation*. Los Angeles.
- Jonkman, J., & Sclavounos, P. (2006). *Development of Fully Coupled Aeroelastic and Hydrodynamic Models for Offshore Wind Turbines*. Nevada.
- Lee, H. K., Sclavounos, P., & Wayman, E. (2005). *Floating Wind Turbines*. Spitsbergen, Norway: 20th Workshop on Water Waves and floating bodies.
- Musial, W., Butterfield, S., & Boone, A. (2004). *Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines*. Nevada.
- Namik, H., & Stol, K. (2009). *Individual blade pitch control of floating offshore wind turbines*. Published online.
- Passon, P., Kuhn, M., Butterfield, S., Jonkman, J., Camp, T., & Larsen, T. J. (2007). *OC3-Benchmark Exercise of Aero-Elastic Offshore Wind Turbine Codes*. Denmark.
- Sclavounos, P., Tracy, C., & Lee, S. (2007). *Floating Offshore Wind Turbines: Responses in a Seastate Pareto Optimal Designs and Economic Assessment*.

- Skaare, B., Hanson, T. D., Gunnar Nielsen, F., Yttervik, R., Hansen, A. M., Thomsen, K., και συν. (2007). *Integrated Dynamic Analysis of Floating Offshore Wind Turbines*.
- Wayman, E. N., Sclavounos, P. D., Butterfield, S., Jonkman, J., & Musial, W. (2006). *Coupled Dynamic Modeling of Floating Wind Turbine Systems*. Texas.
- Withee, J. E., & Sclavounos, P. D. (2004). *Fully Coupled Dynamic Analysis of a Floating Wind Turbine System*. World Renewable Energy Congress.
- Αθανασιάδης, Ν., & Μπεργελές, Γ. (1980). *Αιολική Ενέργεια & Βιομηχανική Αεροδυναμική*. Αθήνα.
- ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε., ΙΕΣΕ, & ΕΜΥ. (2007). *Άτλαντας Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών*.
- Ζερβός, Α., & Κάραλης, Γ. (2009). *Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας*. Αθήνα.
- Μαυράκος, Σ. Α. (1999). *Μελέτη και Σχεδίαση Πλωτών κατασκευών*. Αθήνα.
- Μπεργελές, Γ. (2005). *Ανεμοκινητήρες*. Αθήνα: Συμεών.
- Παπαδόπουλος, Μ. Π. (2008). *Ανάπτυξη και Λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας*.
- Ριζιώτης, Β. Α. (2003). *Αεροδυναμική και Αεροελαστική Ανάλυση της Απώλειας Στήριξης σε Δρομείς Ανεμογεννητριών. Διδακτορική Διατριβή*.
- Χριστοφόρου, Λ. Γ. (2011). *Ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα: Ορυκτά Κάυσιμα, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Προοπτική Ενεργειακού Εφοδιασμού. Επιτροπή Ενέργειας της Ακαδημίας Αθηνών*. Αθήνα .

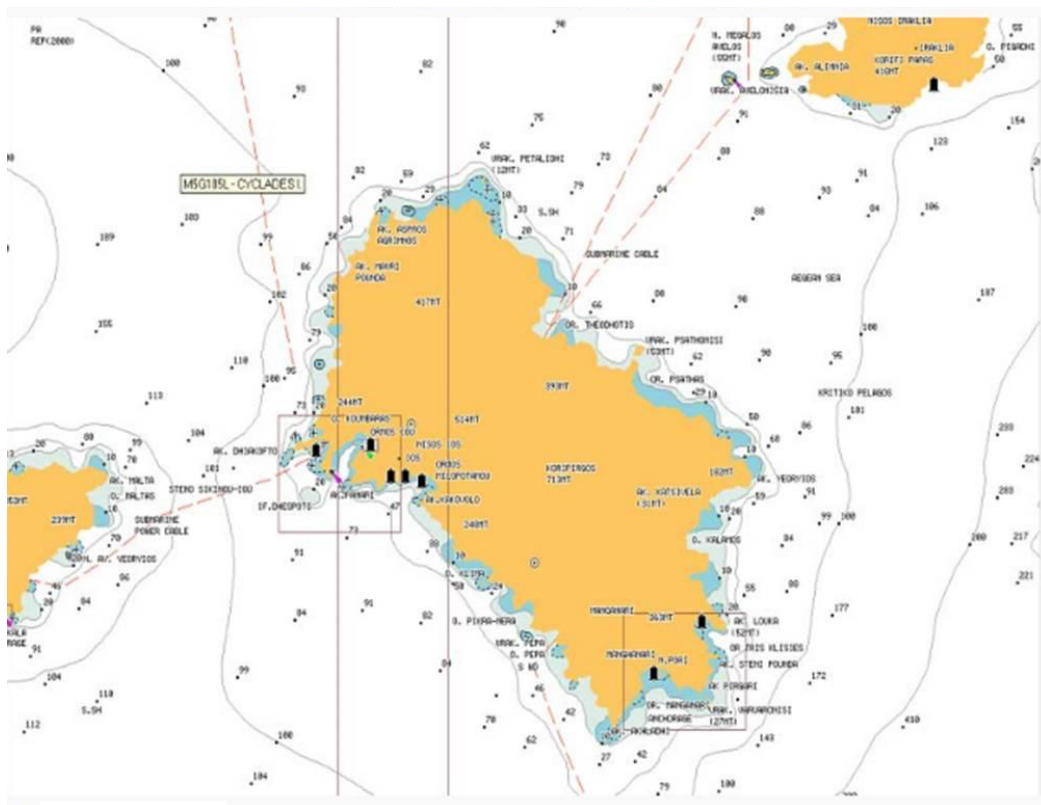
Παράρτημα



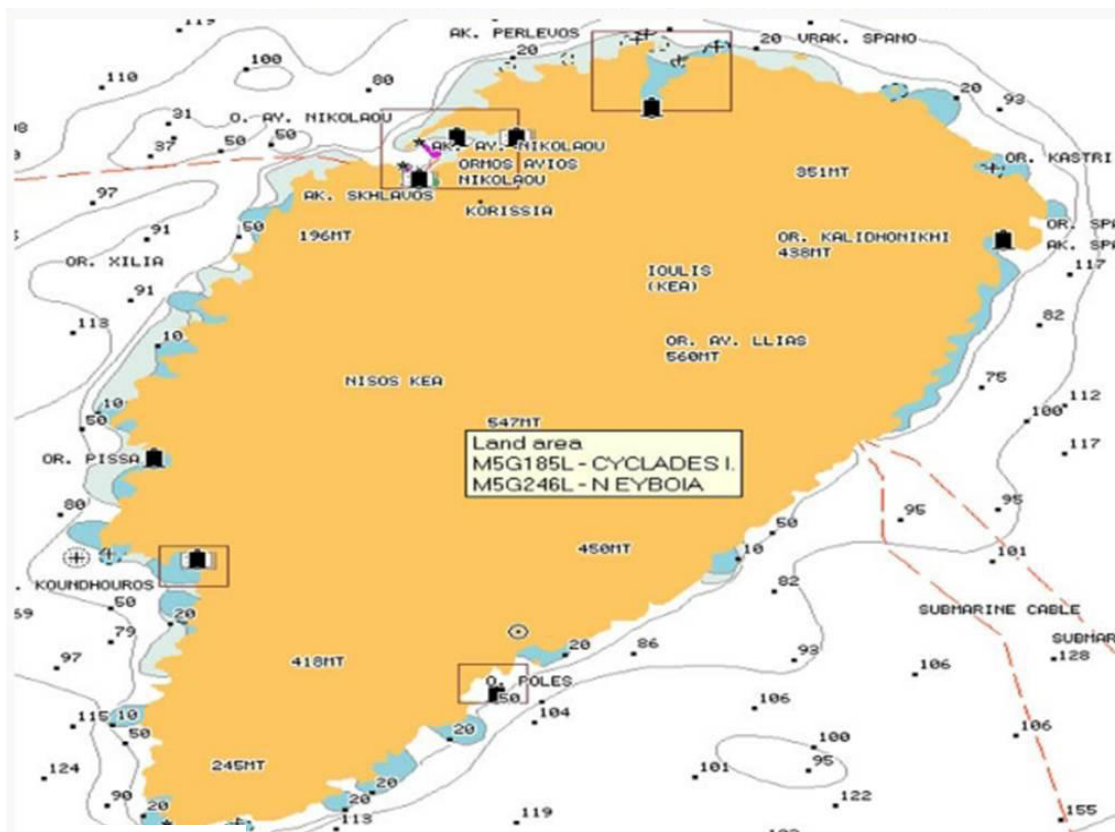
Αμοργός



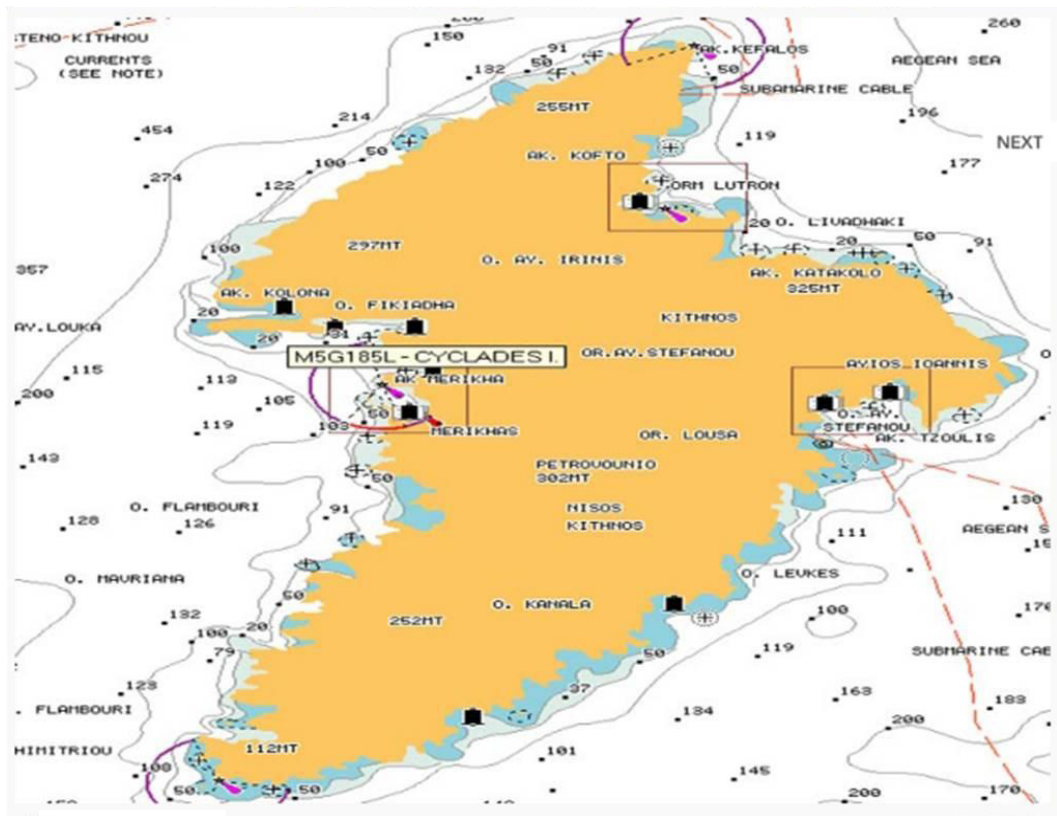
Ανδρός



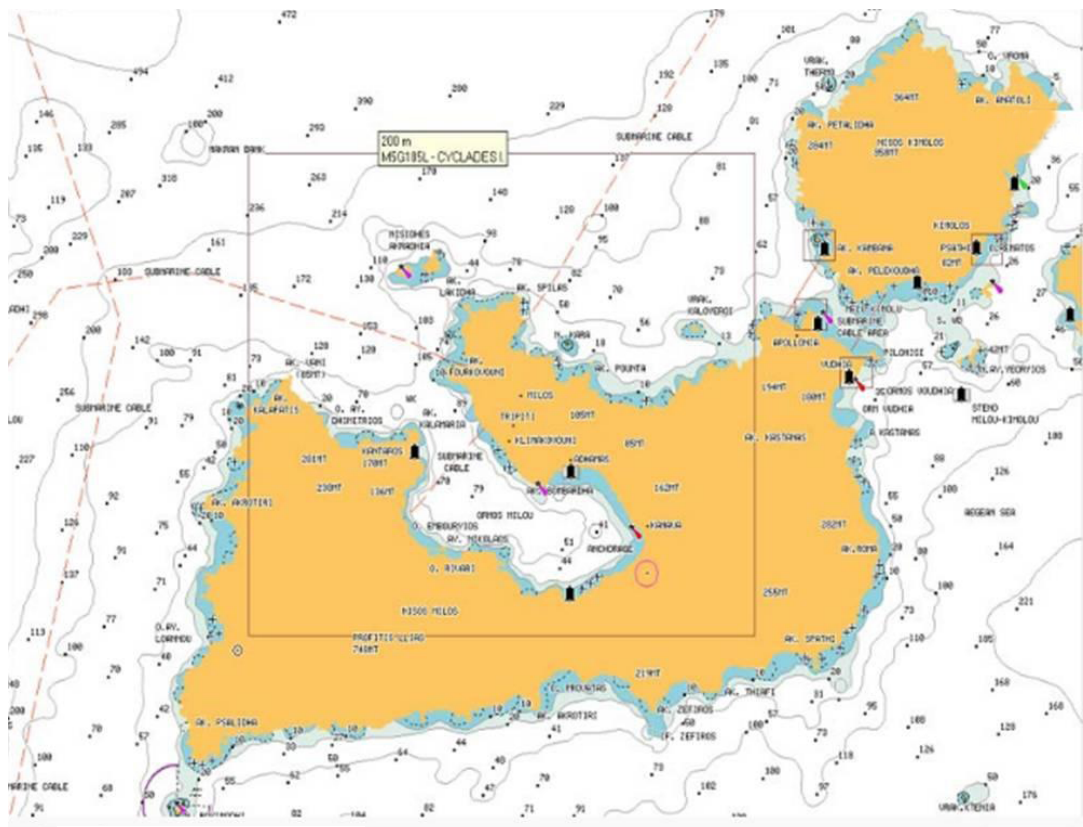
Τος



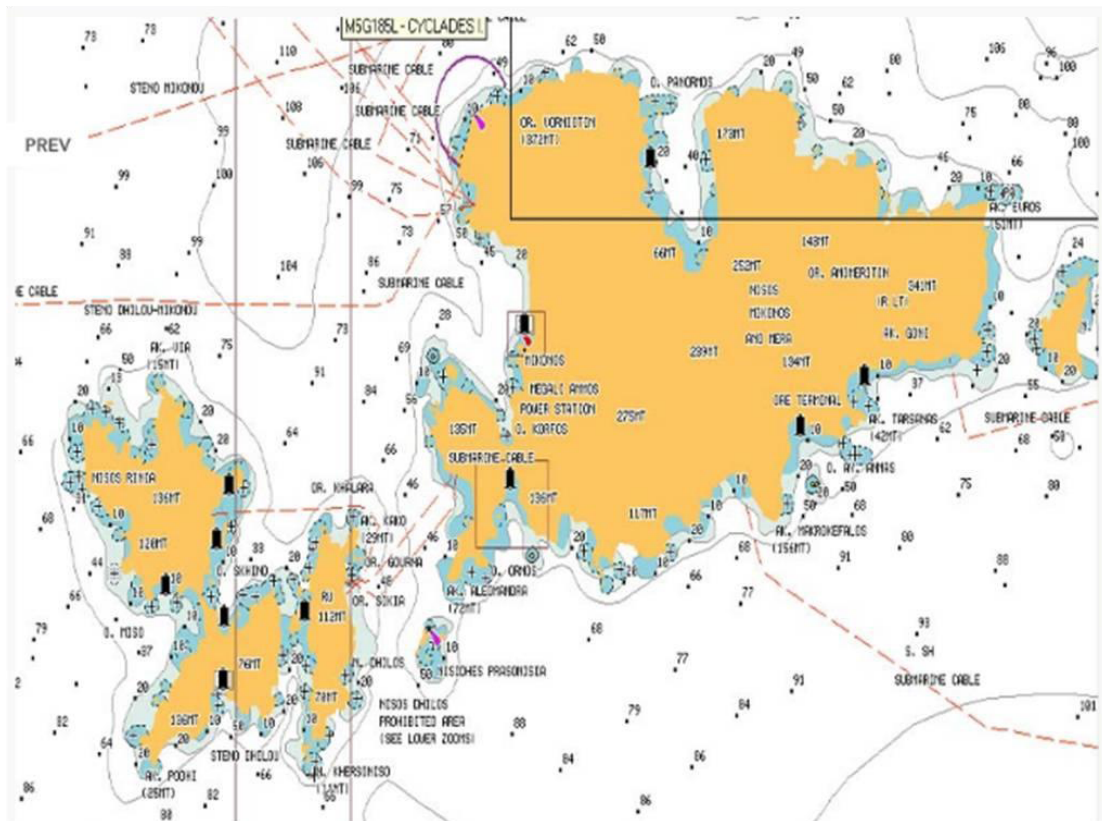
Κέα



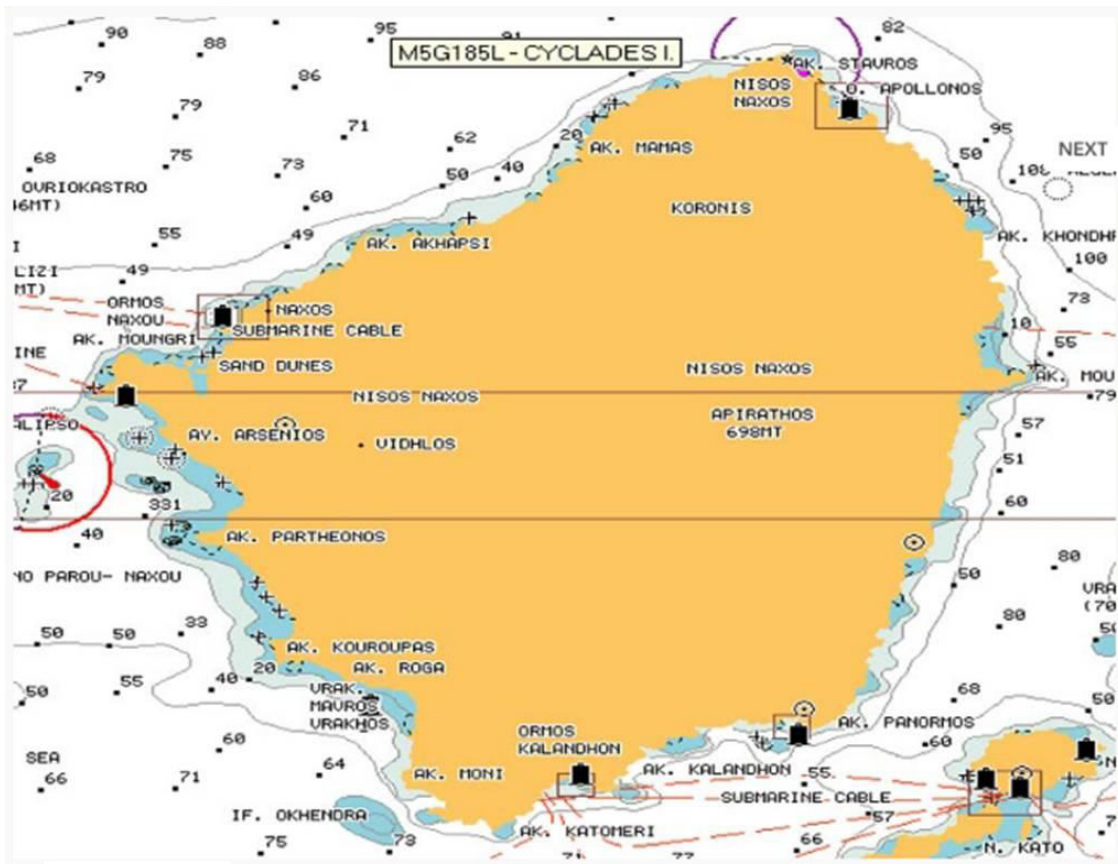
Κύθνος



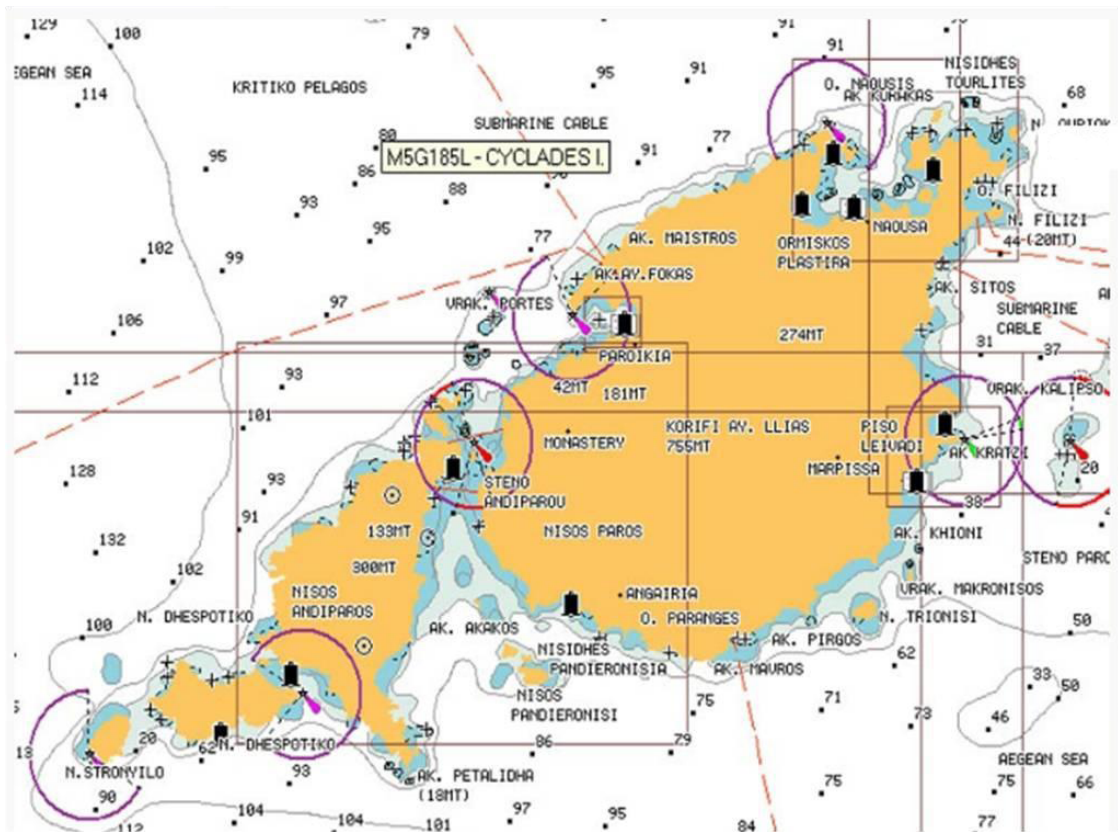
Μήλος-Κίμωλος



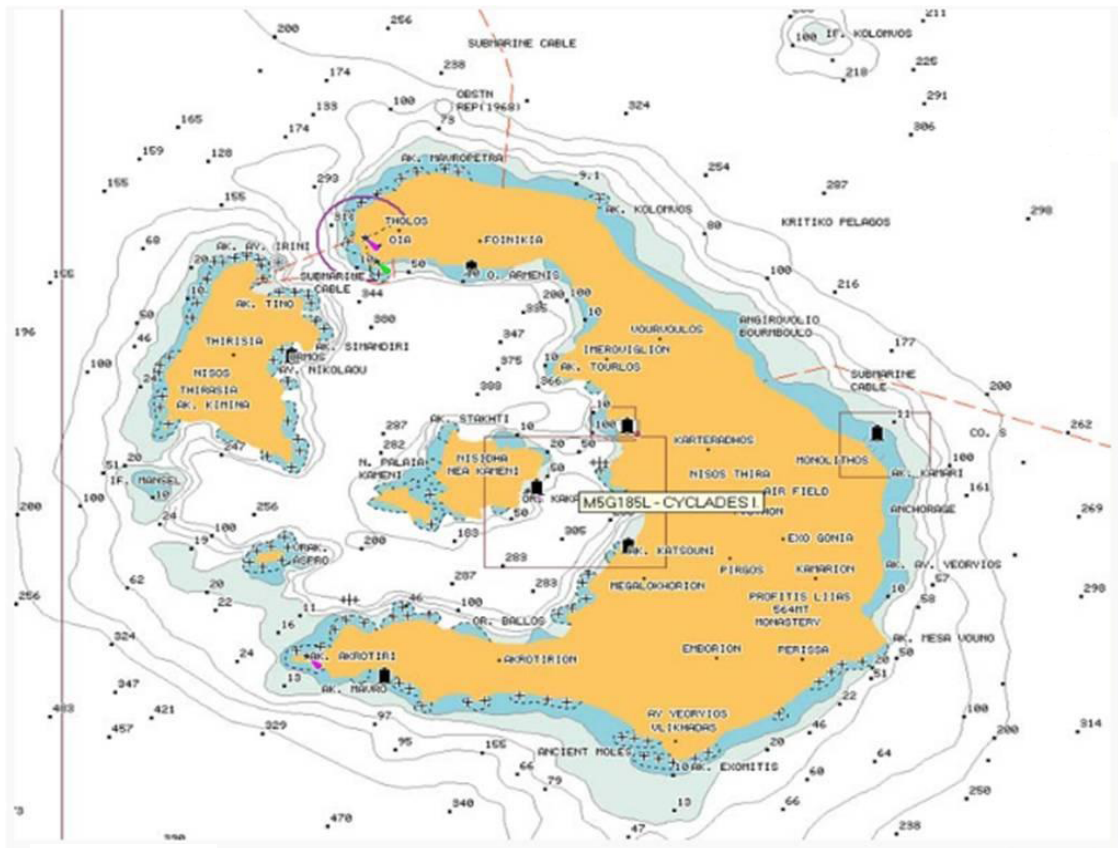
Μύκονος-Δήλος



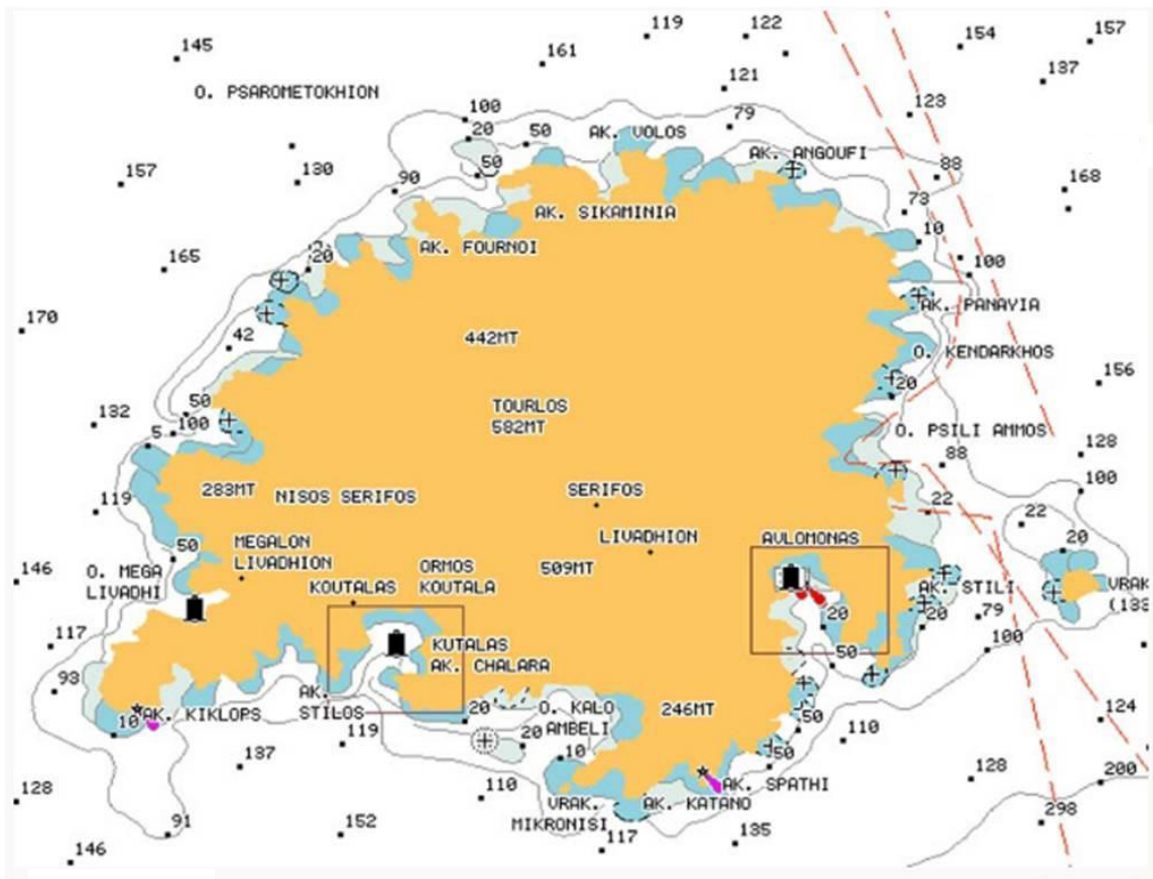
Νάξος



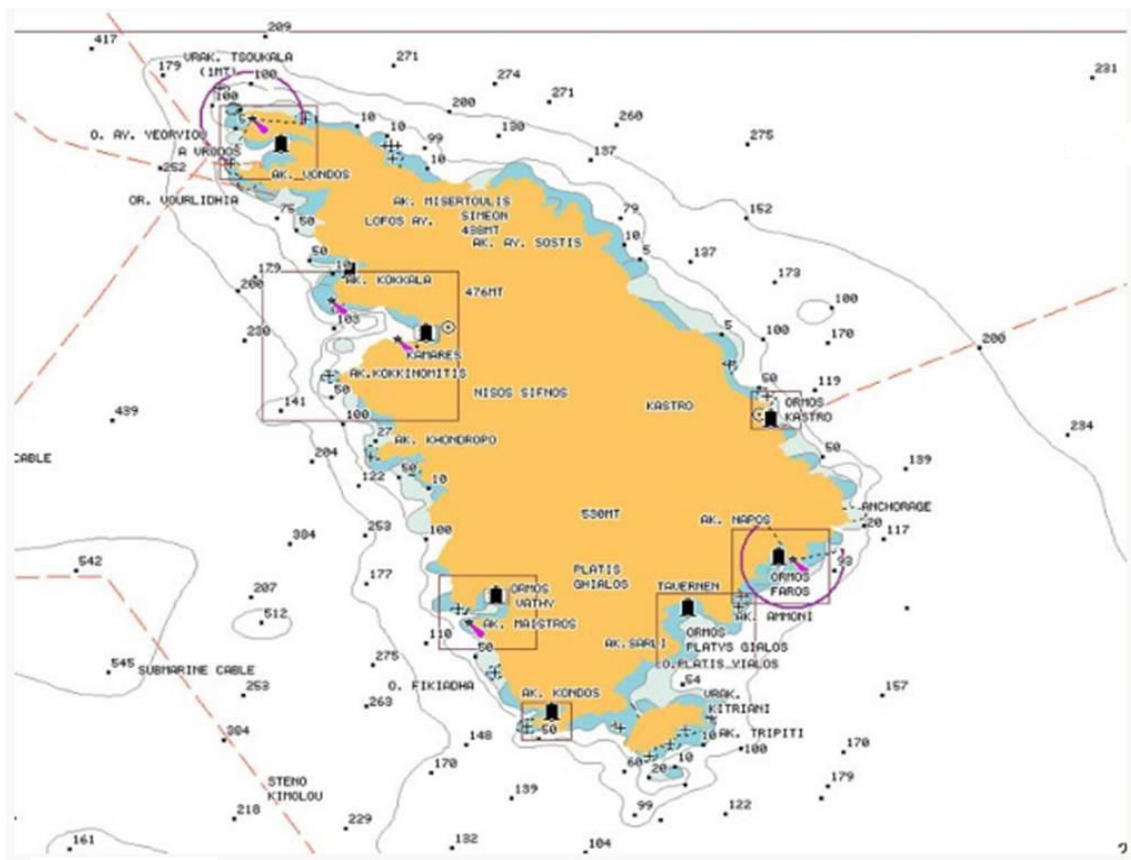
Πάρος



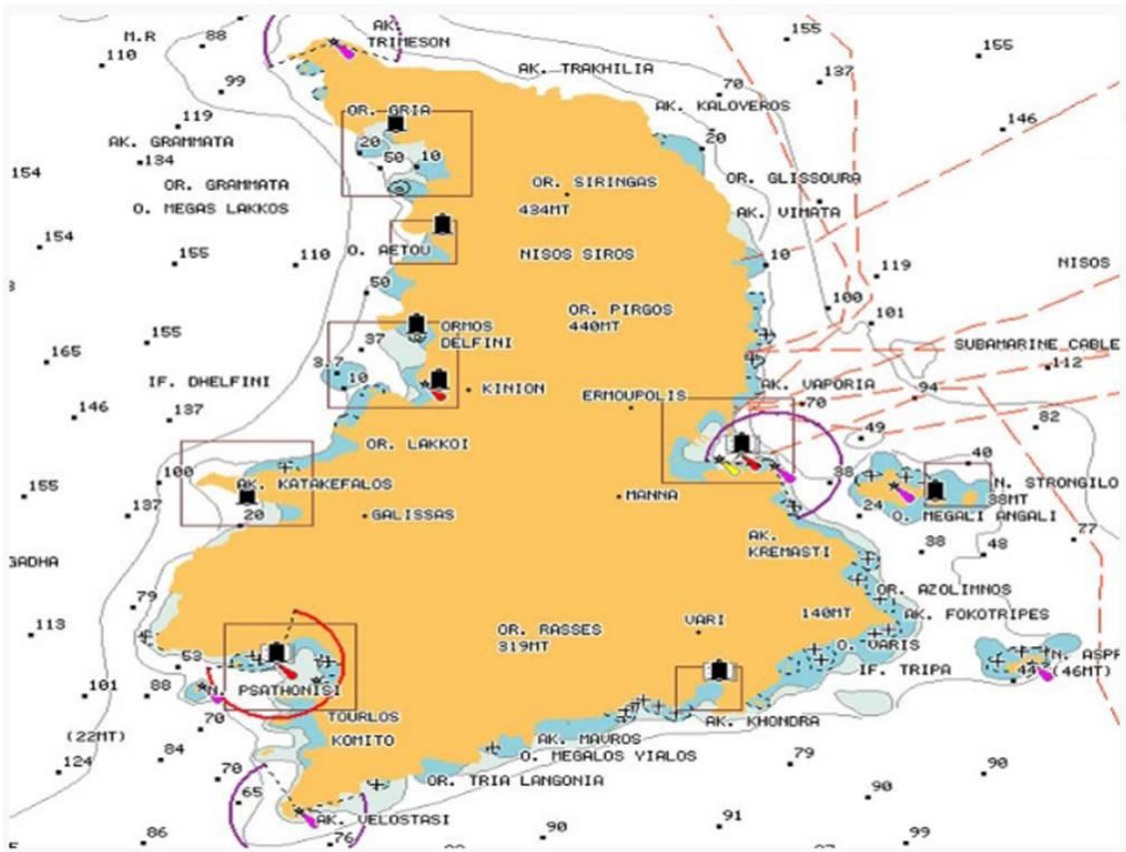
Σαντορίνη



Σέριφος



Σίφος



Σύρος



Τήνος

Παράρτημα 2

Simulation of wind turbine

Date: Τρίτη, 5 Ιουλίου 2011
Designer: Solidworks
Study name: Study 2
Analysis type: Frequency

Table of Contents

Description.....	1
Assumptions	2
Model Information	2
Study Properties	4
Units	4
Material Properties	5
Loads and Fixtures.....	6
Connector Definitions.....	7
Contact Information.....	7
Mesh Information	8
Sensor Details	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης
Study Results	10
Conclusion	16

Description

No Data


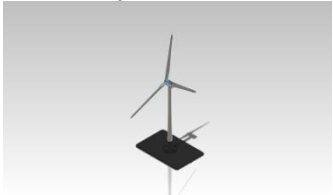
Assumptions

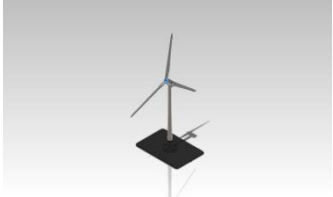
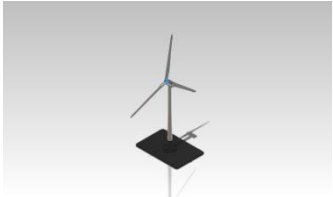
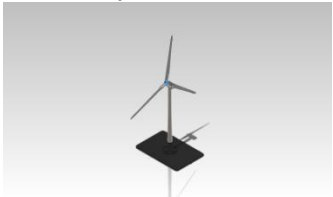
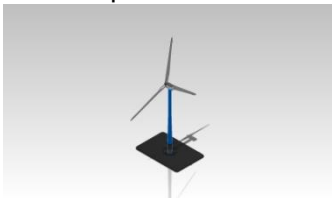
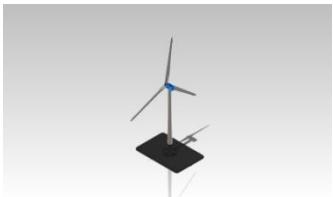
Model Information



Model name: wind turbine
Current Configuration: Default

Solid Bodies

Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Scale1 	Solid Body	Mass:6.161e+07 lb Volume:2.40191e+08 in ³ Density:0.256504 lb/in ³ Weight:6.15682e+07 lbf	C:\Users\user\Desktop\χρηστίνα\frequency\basi - megalos.SLDPRT
Split Line1 	Solid Body	Mass:1.15665e+06 lb Volume:1.15592e+07 in ³ Density:0.100063 lb/in ³ Weight:1.15587e+06 lbf	C:\Users\user\Desktop\χρηστίνα\frequency\Blade2.SLDPRT

Split Line1 	Solid Body	Mass:1.15668e+06 lb Volume:1.15592e+07 in ³ Density:0.100066 lb/in ³ Weight:1.1559e+06 lbf	C:\Users\user\Desktop\χριστινα\frequency\Blade2.SLDPRT
Split Line1 	Solid Body	Mass:1.15663e+06 lb Volume:1.15592e+07 in ³ Density:0.100061 lb/in ³ Weight:1.15585e+06 lbf	C:\Users\user\Desktop\χριστινα\frequency\Blade2.SLDPRT
Split Line1 	Solid Body	Mass:1.21487e+06 lb Volume:4.36719e+06 in ³ Density:0.27818 lb/in ³ Weight:1.21404e+06 lbf	C:\Users\user\Desktop\χριστινα\frequency\Hub - Αντίγραφο.SLDPRT
Split Line15 	Solid Body	Mass:2.66824e+07 lb Volume:9.59175e+07 in ³ Density:0.27818 lb/in ³ Weight:2.66643e+07 lbf	C:\Users\user\Desktop\χριστινα\frequency\Tower2.SLDPRT
Cut-Extrude1 	Solid Body	Mass:2.98754e+06 lb Volume:1.07396e+07 in ³ Density:0.27818 lb/in ³ Weight:2.98551e+06 lbf	C:\Users\user\Desktop\χριστινα\frequency\nacelle.SLDPRT

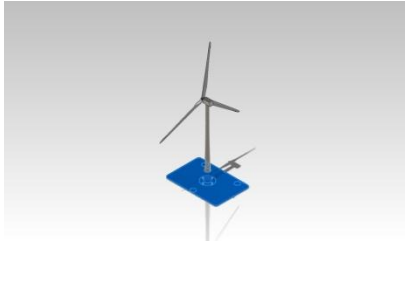
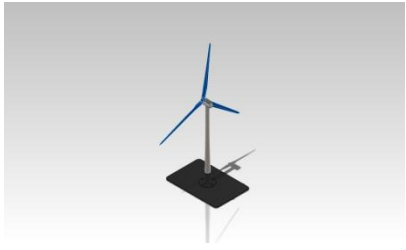
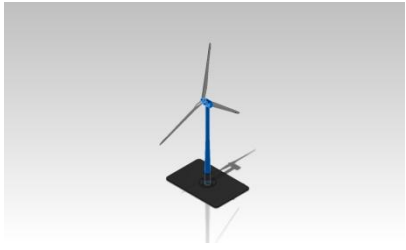
Study Properties

Study name	Study 2
Analysis type	Frequency
Mesh type	Solid Mesh
Number of frequencies	6
Solver type	Direct sparse solver
Soft Spring:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation	Off
Result folder	SolidWorks document (C:\Users\user\Desktop\χριστινα\frequency)



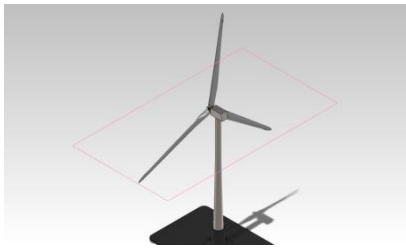

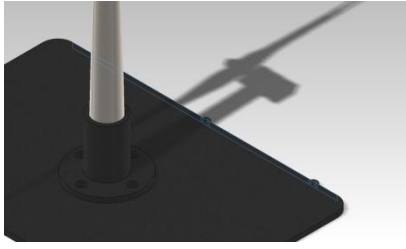
Units

Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/m ²

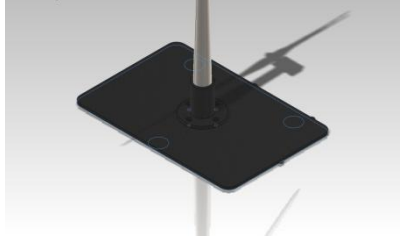
Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	Name: Ductile Iron Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Unknown Yield strength: 5.51485e+08 N/m ² Tensile strength: 8.61695e+08 N/m ² Mass density: 7100 kg/m ³ Elastic modulus: 1.2e+11 N/m ² Poisson's ratio: 0.31 Thermal expansion coefficient: 1.1e-05 /Kelvin	SolidBody 1(Scale1)(basi - megal0-1)
Curve Data:N/A		
	Name: Fiber glass Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Mass density: 2770.01 kg/m ³ Elastic modulus: 1.79264e+10 N/m ² Poisson's ratio: 0.33	SolidBody 1(Split Line1)(hub-blades-1/Blade2-1), SolidBody 1(Split Line1)(hub-blades-1/Blade2-2), SolidBody 1(Split Line1)(hub-blades-1/Blade2-3)
Curve Data:N/A		
	Name: Alloy Steel Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Unknown Yield strength: 6.20422e+08 N/m ² Tensile strength: 7.23826e+08 N/m ² Mass density: 7700 kg/m ³ Elastic modulus: 2.1e+11 N/m ² Poisson's ratio: 0.28 Thermal expansion coefficient: 1.3e-05 /Kelvin	SolidBody 1(Split Line1)(hub-blades-1/Hub - Αντίγραφο-1), SolidBody 1(Split Line15)(tower-nacelle-1/Tower2-1), SolidBody 1(Cut-Extrude1)(tower-nacelle-1/nacelle-1)
Curve Data:N/A		

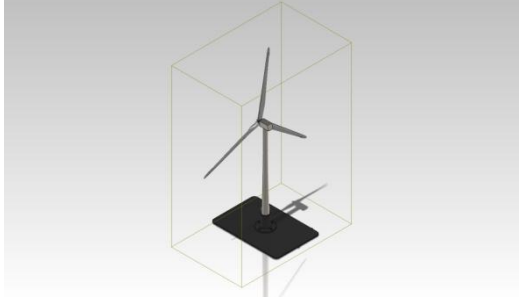
Loads and Fixtures

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 4 face(s) Type: Apply normal force Value: 500000 N
Force-2		Entities: 1 face(s) Type: Apply normal force Value: 180000 N
Gravity-1		Reference: Top Plane Values: 0 0 -9.81 Units: SI
Force-3		Entities: 1 face(s) Type: Apply normal force Value: 100000 N
Force-4		Entities: 1 face(s) Type: Apply normal force Value: 100000 N

Connector Definitions

Connector name	Connector Details	Connector Image
Elastic Support-1	<p>Entities: 1 face(s) Type: Elastic Support Normal stiffness value: 15000 Shear stiffness value: 1000 Units: (N/m)/m²</p>	 <p>Elastic Support-1</p>

Contact Information

Contact	Contact Image	Contact Properties
Global Contact		<p>Type: Bonded Components: 1 component(s) Options: Compatible mesh</p>

Mesh Information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Curvature based mesh
Jacobian points	4 Points
Maximum element size	0 mm
Minimum element size	0 mm
Mesh Quality	High
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off

Mesh Information - Details

Total Nodes	125154
Total Elements	76651
Maximum Aspect Ratio	152.76
% of elements with Aspect Ratio < 3	94
% of elements with Aspect Ratio > 10	1.34
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:25
Computer name:	USER-PC

Model name: wind turbine
 Study name: Study 2
 Mesh type: Solid mesh



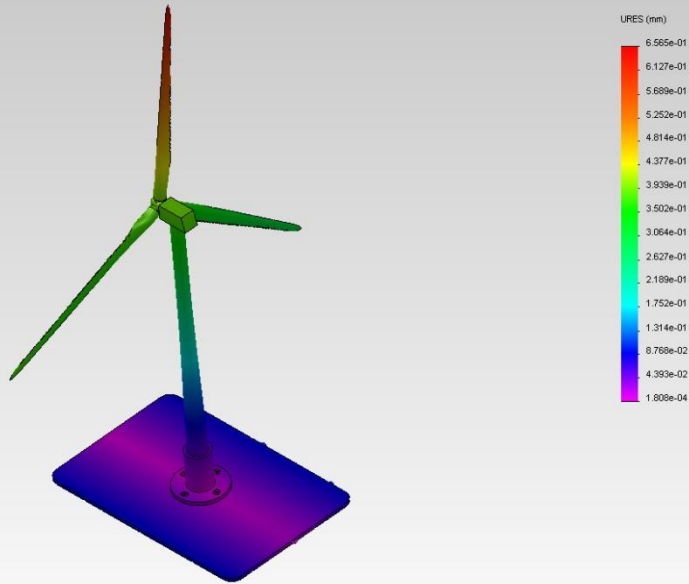
Mesh Control Information:

Mesh Control Name	Mesh Control Image	Mesh Control Details
Control-1		Entities: 5 face(s) Units: mm Size: 254.187 Ratio: 2
Control-2		Entities: 1 component(s) Units: mm Size: 610.052 Ratio: 1.5

Study Results

Name	Type	Min	Max
Displacement1	URES: Resultant Displacement Plot for Mode Shape: 1(Value = 0.0171679 Hz)	0.000180773 mm Node: 227	0.656453 mm Node: 39330

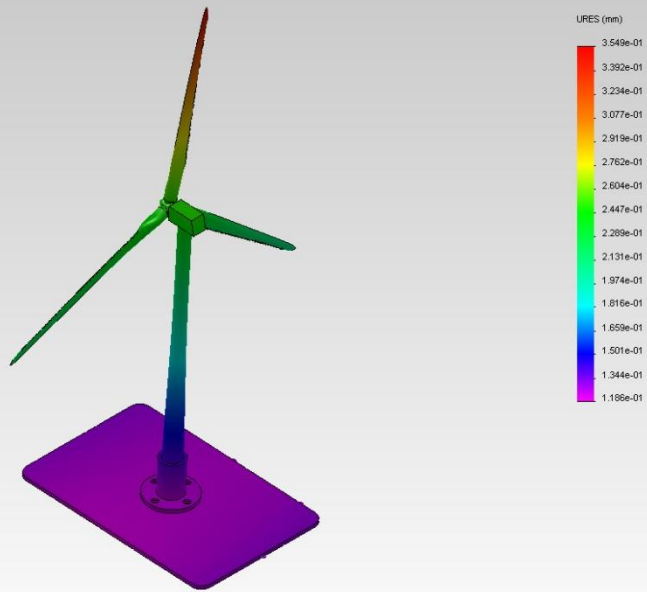
Model name: wind turbine
Study name: Study 2
Plot type: Frequency Displacement1
Mode Shape: 1 Value = 0.017168 Hz
Deformation scale: 23722.3



wind turbine-Study 2-Displacement-Displacement1

Name	Type	Min	Max
Displacement2	URES: Resultant Displacement Plot for Mode Shape: 2(Value = 0.0383002 Hz)	0.118629 mm Node: 2705	0.354922 mm Node: 39330

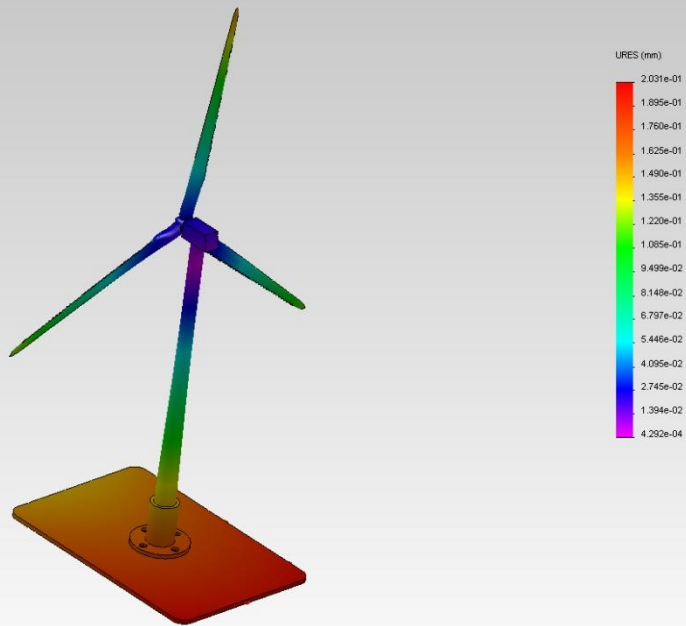
Model name: wind turbine
 Study name: Study 2
 Plot type: Frequency Displacement2
 Mode Shape: 2 Value = 0.0383 Hz
 Deformation scale: 43802.7



wind turbine-Study 2-Displacement-Displacement2

Name	Type	Min	Max
Displacement3	URES: Resultant Displacement Plot for Mode Shape: 3(Value = 0.0475364 Hz)	0.000429154 mm Node: 65245	0.203051 mm Node: 13824

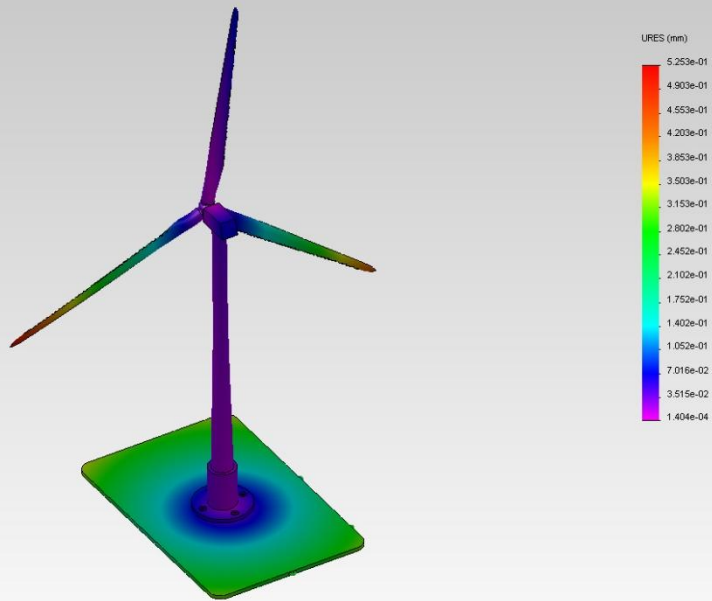
Model name: wind turbine
 Study name: Study 2
 Plot type: Frequency Displacement3
 Mode Shape: 3 Value = 0.047536 Hz
 Deformation scale: 78137.9



wind turbine-Study 2-Displacement-Displacement3

Name	Type	Min	Max
Displacement4	URES: Resultant Displacement Plot for Mode Shape: 4(Value = 0.0538067 Hz)	0.000140379 mm Node: 105990	0.525324 mm Node: 35901

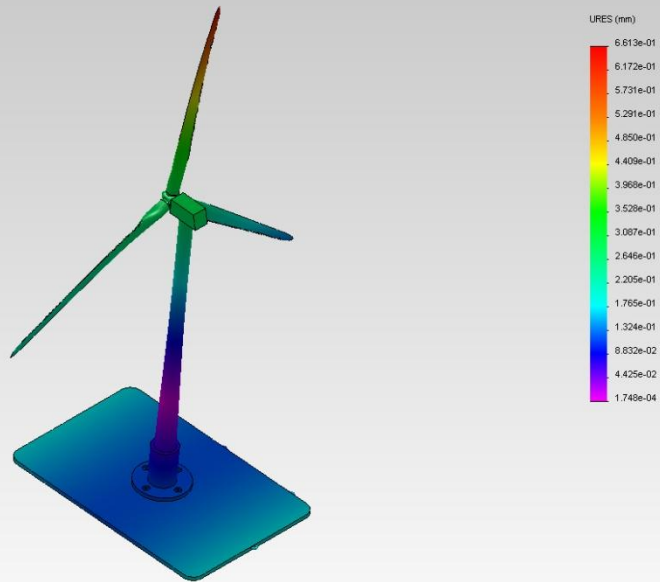
Model name: wind turbine
 Study name: Study 2
 Plot type: Frequency Displacement4
 Mode Shape: 4 Value = 0.053807 Hz
 Deformation scale: 29676.3



wind turbine-Study 2-Displacement-Displacement4

Name	Type	Min	Max
Displacement5	URES: Resultant Displacement Plot for Mode Shape: 5(Value = 0.069882 Hz)	0.000174811 mm Node: 93369	0.661278 mm Node: 39330

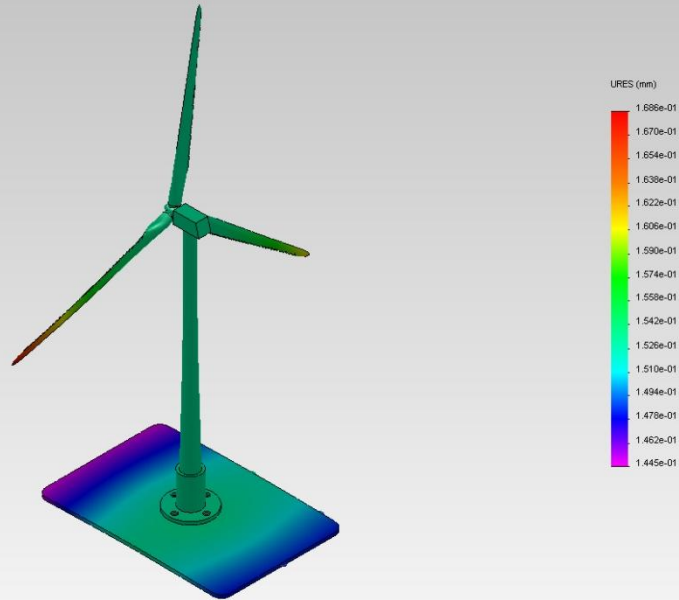
Model name: wind turbine
 Study name: Study 2
 Plot type: Frequency Displacement5
 Mode Shape: 5 Value = 0.069882 Hz
 Deformation scale: 23529.7



wind turbine-Study 2-Displacement-Displacement5

Name	Type	Min	Max
Displacement6	URES: Resultant Displacement Plot for Mode Shape: 6(Value = 0.162214 Hz)	0.144549 mm Node: 26417	0.168594 mm Node: 35901

Model name: wind turbine
 Study name: Study 2
 Plot type: Frequency Displacement6
 Mode Shape: 6 Value = 0.16221 Hz
 Deformation scale: 93023.2



wind turbine-Study 2-Displacement-Displacement6

Mode List

Frequency Number	Rad/sec	Hertz	Seconds
1	0.10787	0.017168	58.248
2	0.24065	0.0383	26.11
3	0.29868	0.047536	21.037
4	0.33808	0.053807	18.585
5	0.43908	0.069882	14.31
6	1.0192	0.16221	6.1647

Mass Participation (Normalized)

Mode Number	Frequency(Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	0.017168	1.5428e-08	1.0921e-05	0.19404
2	0.0383	0.91218	6.3717e-06	2.5042e-07
3	0.047536	9.7501e-07	3.1561e-06	0.80142
4	0.053807	5.3957e-05	1.5631e-07	0.0045392

5	0.069882	0.087768	8.9964e-05	1.3493e-08
6	0.16221	1.6172e-07	0.9997	2.5273e-08
		Sum X = 1	Sum Y = 0.99981	Sum Z = 1

Conclusion