



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ
ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗ
ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥΣ»**



Του Φοιτητή
Ηλιόπουλου Αλέξανδρου

Επιβλέπων
Ριζιώτης Βασίλειος, Λέκτορας Ε.Μ.Π, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών

Αθήνα, Οκτώβριος 2012



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***«ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ
ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ
ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗ
ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥΣ»***

Του Φοιτητή

Ηλιόπουλου Αλέξανδρου

Επιβλέπων

Ριζιώτης Βασίλειος, Λέκτορας Ε.Μ.Π, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, η αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, η διανομή, η αναπαραγωγή, η μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό (φωτοτυπία, εκτύπωση, μικροφίλμ), χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα.

Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Η έγκριση της διπλωματικής αυτής εργασίας από την Ανώτατη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα. Ο συγγραφέας γνωρίζει ότι αυτός είναι ο κύριος υπεύθυνος για ό,τι δηλώνεται στην παρούσα εργασία και καταβάλλει κάθε προσπάθεια για να στηρίξει την ορθότητα τους.

Σε περίπτωση που θέλετε να επικοινωνήσετε με τον συγγραφέα, για θέματα σχετικά με την εργασία, μπορείτε να απευθυνθείτε στη διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου alexili021@hotmail.com.

Εξώφυλλο : Υπεράκτιο αιολικό πάρκο στη βόρεια θάλασσα

*“Μάταια είναι η εκμάθηση χωρίς σκέψη,
επικίνδυνη είναι η σκέψη χωρίς
εκμάθηση”*

Κομφούκιος, 550π.Χ-479π.Χ

Ευχαριστίες

Όλοι μας λίγο έως πολύ έχουμε ακούσει περί Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και ειδικότερα περί αιολικής ενέργειας. Τι συμβαίνει όμως αν, κατά τη διάρκεια των ακαδημαϊκών σπουδών, έχει κανείς την ευκαιρία να παρακολουθήσει τις διαλέξεις άρτια καταρτισμένων καθηγητών στο ευρύ αντικείμενο της αιολικής ενέργειας και της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών; Δημιουργούνται υψηλά κίνητρα και ιδιαίτερη θέρμη για ενασχόληση με το αντικείμενο καθώς επίσης και ισχυρή θέληση για συνεχή ενημέρωση γύρω από θέματα που σχετίζονται με τη βιομηχανική ανάπτυξη, σχεδιασμό και εφαρμογές ανεμογεννητριών.

Στο σημείο αυτό, λοιπόν, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κύριο Ριζιώτη Βασίλειο, ο οποίος μέσα από τα μαθήματα του με ενέπνευσε να επιλέξω τον τομέα ρευστών για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και συγκεκριμένα με ώθησε να ασχοληθώ με το αντικείμενο των πλωτών ανεμογεννητριών. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα, διότι η επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας ήταν καθοριστική για την περάτωση της. Η διάθεση μεγάλου μέρους από τον πολύτιμο χρόνο του, η προθυμία, ο ευδιάθετος χαρακτήρας του, η ευγένεια, η καλοσύνη, η όρεξη για άμεση αντιμετώπιση όλων των προβλημάτων που κατά διαστήματα ανέκυπταν και η σωστή καθοδήγηση του αποτέλεσαν συστατικά για την ομαλή και επιτυχημένη ολοκλήρωση της εργασίας.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή Βουτσινά Σπυρίδωνα, ο οποίος με την εμπειρία που διαθέτει και με τις κατάλληλες συμβουλές έδινε λύση σε διάφορα τεχνολογικά ζητήματα που προσπαθούσαν να σταθούν εμπόδιο στην ομαλή περαίωση της εργασίας μου. Είναι ένα πρόσωπο ιδιαίτερης σημασίας για εμένα, καθότι είναι ο πρώτος που με εισήγαγε στη έννοια της αεροελαστικότητας, θεωρία πολύ σημαντική στην παρούσα εργασία. Πέρα από αυτά είναι και ένα υπόδειγμα ερευνητή στο διεθνή ακαδημαϊκό χώρο, πρότυπο για πολλούς νέους ερευνητές.

Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας δε θα ήταν εφικτή χωρίς την πολύτιμη συμβολή του υποψήφιου διδάκτορα Μανωλά Δημήτρη σε θέματα ανάπτυξης και διόρθωσης κωδίκων, εισαγωγής και επεξεργασίας δεδομένων καθώς επίσης και ζητήματα εξαγωγής και σχολιασμού αποτελεσμάτων. Τον ευχαριστώ ξεχωριστά για τη δυνατότητα που μου παρείχε να επιλύω τα προβλήματα που αντιμετώπιζα τη στιγμή που αυτά εμφανίζονταν διαθέτοντας ανιδιοτελώς μεγάλο μέρος από το χρόνο του.

Αισθάνομαι επίσης την ανάγκη να ευχαριστήσω το διδάκτορα Προσπαθόπουλο Ιωάννη για την επίλυση προβλημάτων δικτύου, αποθηκευτικού χώρου και γενικότερων τεχνικών προβλημάτων που πολλές φορές προέκυπταν κατά τη διάρκεια των εργασιών μου στο εργαστήριο αεροδυναμικής του τομέα ρευστών.

Αξίζει επιπλέον να σημειωθεί ότι το ευχάριστο κλίμα που είχε δημιουργηθεί μεταξύ προπτυχιακών και διδακτορικών φοιτητών στον τομέα των ρευστών, μόνο θετικές επιδράσεις είχε σε εμένα. Ξεχωριστά θέλω να ευχαριστήσω το φίλο και συνάδερφο Βαγγέλη Γιαννόπουλο για τις στιγμές ξεγνοιασιάς και χαλάρωσης που περάσαμε ανάμεσα στα διαλείμματά μας από το απαιτητικό ωράριο της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστάω στην οικογένεια μου για την υπομονή τους, την αμέριστη υποστήριξη τους και την αγάπη τους. Το οικογενειακό περιβάλλον που δημιούργησαν γύρω μου, παρείχε όλα εκείνα τα στοιχεία ηρεμίας και ασφάλειας που ήταν απαραίτητα για την επιτυχημένη πορεία μου ως τώρα.

ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	v
Περιεχόμενα	vii
Σύνοψη	ix
Abstract	x

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή

1.1	Ιστορικά στοιχεία	2
1.2	Γενικά στοιχεία	4
1.3	Βιβλιογραφική επισκόπηση	10
1.4	Σκοπός της εργασίας	12
1.5	Διάρθρωση της εργασίας	13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Περιγραφή του αερο-υδρο-σερβο-ελαστικού μοντέλου HydroGAST

2.1	Αεροδυναμική ανάλυση	16
2.2	Ελαστοδυναμική ανάλυση	26
2.3	Αεροελαστική σύζευξη	35
2.4	Υδροδυναμική ανάλυση	37
2.5	Άνεμος	40
2.6	Κύμα	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Ανάλυση-Σύγκριση φορτίσεων μεταξύ monopile και spar-buoy τύπου A/G

3.1	Ανεμογεννήτρια αναφοράς	46
3.2	Περιπτώσεις φορτίσεων σχεδιασμού (DLC)	50
3.3	Φορτίσεις σε υπεράκτια ανεμογεννήτρια τύπου monopile	55
3.4	Φορτίσεις σε πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου spar-buoy	75
3.5	Προβληματισμοί-Συμπεράσματα από τη σύγκριση των φορτίσεων σε ανεμογεννήτριες τύπου monopile και spar-buoy	98

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Σχεδιασμός εναλλακτικού controller

4.1	Ανάδραση από τη διαμήκη επιτάχυνση της κορυφής του πύργου ...	102
4.2	Εισαγωγή χαμηλοπερατού φίλτρου	107
4.2.1	Συνάρτηση και ορίσματα φίλτρου στη Matlab	109
4.2.2	Κριτήριο επιλογής του κατάλληλου φίλτρου	112
4.3	Κριτήριο επιλογής του κατάλληλου κέρδους ολοκληρωτή	119
4.4	Σύγκριση φορτίσεων σε spar-buoy με χρήση συμβατικού και εναλλακτικού controller	121

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Συμπεράσματα και συστάσεις για περαιτέρω μελέτη

5.1	Συμπεράσματα	140
5.2	Συστάσεις για περαιτέρω μελέτη	141
	Βιβλιογραφία	143

Σύνοψη

Το πλούσιο αιολικό δυναμικό σε θαλάσσιες περιοχές ρηχών και βαθέων υδάτων αποτελεί μια πολύ καλή προοπτική για την αυξανόμενη χρήση υπεράκτιων πλωτών ανεμογεννητριών, που θα παρέχουν ρεύμα με ανανεώσιμο τρόπο σε μεγάλο μέρος του κόσμου. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί ποικίλα ολοκληρωμένα πακέτα προσομοίωσης που λαμβάνουν υπόψη τη συζευγμένη διέγερση και απόκριση του συνολικού συστήματος της πλωτής ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων της ροής του ανέμου, της αεροδυναμικής, της ελαστοδυναμικής, του συστήματος ελέγχου, των κυμάτων και των θαλάσσιων ρευμάτων καθώς επίσης και της υδροδυναμικής. Ένα από αυτά τα αέρο-ύδρο-σέρβο-ελαστικά πακέτα είναι και το HydroGAST (Hydrodynamic, General Aerodynamic and Structural Tool), ανεπτυγμένο στο εργαστήριο Αεροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, το οποίο χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Με τη βοήθεια του HydroGAST αναλύεται η συμπεριφορά Ανεμογεννητριών με υποστηρικτική υποδομή τύπου μονοπασάλου (monopile) και τύπου spar-buoy απέναντι σε διάφορες περιπτώσεις φορτίσεων σχεδιασμού που ορίζονται από τον κανονισμό. Στη συνέχεια γίνεται στατιστική επεξεργασία (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ελάχιστες τιμές, μέγιστες τιμές) και παραμετρική ανάλυση όλων των δυνάμεων και ροπών καθώς επίσης και της παραγόμενης ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου για όλο το πεδίο ταχυτήτων λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Διαπιστώνονται υπερβάλλοντα φορτία στην ονομαστική ταχύτητα και σε μεγαλύτερη από αυτήν για την περίπτωση spar-buoy και καταδεικνύεται η ανάγκη εύρεσης ενός τρόπου για τη μείωση αυτών των υπερβαλλόντων φορτίων. Στην παρούσα εργασία η λύση δίνεται μέσα από την τροποποίηση του συμβατικού συστήματος ελέγχου και το σχεδιασμό ενός εναλλακτικού συστήματος ελέγχου που εισάγει μια πρόσθετη ανάδραση στη ροπή της γεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη τη διαμήκη επιτάχυνση της κορυφής του πύργου, φιλτραρισμένη σε ένα χαμηλοπερατό φίλτρο. Η ύπαρξη του φίλτρου σε συνδυασμό με την επιπλέον ανάδραση στο σύστημα ελέγχου είναι ουσιώδους σημασίας, καθότι επιτυγχάνεται μείωση φορτίσεων έως και 40%.

Abstract

The vast deepwater wind resource represents a potential to use floating offshore wind turbines to power much of the world with renewable energy. For this reason, a lot of comprehensive simulation tools that account for the coupled excitation and response of the complete system, including the influences of wind inflow, aerodynamics, structural dynamics, controls, waves currents and hydrodynamics, are used to design and analyze wind turbines. Such a fully coupled aero-hydro-servo-elastic simulation tool is also HydroGAST (Hydrodynamic, General Aerodynamic and Structural Tool), developed at the laboratory of aerodynamics at the National Technical University of Athens (NTUA). HydroGast tool is used for the purposes of my diploma thesis. In the course of this work first I analyzed the behavior of the monopile and floating spar-buoy design concepts in terms of loads using, as mentioned before, the fully coupled hydro-servo-aeroelastic design tool HydroGast for the modeling of the full wind turbine. The analysis was done for many Design Load Cases (DLC). Then, a statistical post-process including mean values, standard deviations, minimum and maximum values of forces and moments and power production for each wind speed velocity was done and presented through a parametrical analysis in charts. Facing excessive loads by the floating turbine in rated and above rated wind speeds, a way to mitigate loading was sought. This thesis proposes a solution to this problem through my personal modification of the control system. In the new control system an additional generator action taking into account the low pass filtered fore-aft acceleration of the nacelle is introduced. The impact of the low pass filter in cooperation with the additional feedback in the generator torque is of great importance, because with that way a load reduction of 40 percent is achieved.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορικά στοιχεία ^[1]

Από την πετρελαϊκή κρίση του 1973 και έκτοτε, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας γρήγορα αποτέλεσαν μια ζωτική επιλογή για βιώσιμα ενεργειακά συστήματα. Η αιολική ενέργεια ήταν η πρώτη που άσκησε σημαντική επίδραση στο ενεργειακό ισοζύγιο. Μέχρι τα τέλη του 2010 η αιολική ενέργεια κάλυπτε το 5,3 % της Ευρωπαϊκής ζήτησης σε ηλεκτρισμό. Από την αρχή της αναδύμενης δημοφιλίας της αιολικής ενέργειας ειδικοί σε θέματα ενέργειας και νομοθέτες γνώριζαν ότι η υπεράκτια αιολική ενέργεια θα έπαιζε ένα σημαντικό ρόλο στο ανανεώσιμης μορφής μερίδιο του συνολικού συστήματος παροχής ενέργειας. Χωρίς την εκμετάλλευση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού στην πλήρη έκτασή του, θα ήταν αδύνατο να συμβαδίσουμε με τους εθνικούς και ευρωπαϊκούς ενεργειακούς στόχους.

Η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια τέθηκε σε λειτουργία το 1990 κοντά στο Nordersund της Σουηδίας (0.22 MW, 25 m διάμετρος δρομέα) και ακολούθησε το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο το 1991 κοντά στο Vindeby της Δανίας (11 X 0.45 MW) [εικόνα 1.1].



Εικόνα 1.1 : Υπεράκτιο αιολικό πάρκο Vindeby, Denmark

Αυτό το πάρκο, χωρίς υπερβολές, σήμανε την αρχή μιας λαμπρής πορείας για την ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πάρκων, καθώς αποτέλεσε ένα υπόδειγμα εγκατεστημένου πάρκου για την εποχή. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια είχε αρχίσει να ερευνάται ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 από τον Bill Heronemus του Πανεπιστημίου της Μασαχουσέτης (“floating multi rotor concept”). Το 1978, στα πλαίσια του προγράμματος με τίτλο “Ενεργειακά Συστήματα Μετατροπής Αιολικής Ενέργειας Μεγάλης Κλίμακας” (LSWECS-Large Scale Wind Energy Conversion Systems) για λογαριασμό της διεθνούς επιτροπής ενέργειας (IEA-International Energy Agency), επιδιώχθηκε μια συστηματική προσέγγιση για την εκτίμηση της τεχνικής βιωσιμότητας πλωτών ανεμογεννητριών και υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Επισημάνθηκαν όλα τα σχετικά τεχνολογικά ζητήματα, από τους διάφορους τύπους ανεμογεννητριών μέχρι τις θεμελιώσεις και την εφοδιαστική. Τα αποτελέσματα, παρ’ όλα αυτά, παρέμειναν περιορισμένα σε αναφορές. Μόλις μετά το 1990 και το 1991 φάνηκαν τα πρώτα απτά αποτελέσματα. Ωστόσο, οι πρώτες ανεμογεννήτριες που εγκαταστάθηκαν στη θάλασσα δεν ακολούθησαν τις αρχές που είχαν μελετηθεί στο προαναφερθέν πρόγραμμα και αποτέλεσαν περισσότερο παράγωγα των χερσαίων μηχανών. Η εγκατεστημένη ισχύς των πρώτων ανεμογεννητριών ήταν ίση με αυτήν των εμπορικών χερσαίων μηχανών. Οι

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ανεμογεννήτριες Vindeby Bonus είχαν διάμετρο δρομέα 35 m και εγκατεστημένη ισχύ 0,45 MW, η οποία σε όρους σημερινής ισχύος πλωτών μηχανών είναι 8 φορές μικρότερη. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα πρώτης γενιάς εγκαταστάθηκαν κοντά στη στεριά σε ρηχά νερά. Ο **πίνακας 1** δίνει μια γενική εικόνα για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα κατά την περίοδο 1990-2003.

Έτος εγκατάστασης	Τοποθεσία	Αριθμός μηχανών και ισχύς (MW)	Βάθος υδάτων(m) / απόσταση από την ακτή(km)	Τύπος θεμελίωσης
1990	Nogersund (S)	1 x 0.22 = 0.22		Τρίποδο σε στερεό βράχο [έχει εγκαταλειφθεί]
1991	Vindeby (DK)	11 x 0.45 = 4.95	[2.5-5] / [1.5-3]	Βαρύτητας
1994	Lely park, Ijsselmeer (NL)	4 x 0.5 = 2	[2-3] / [1]	Μονοπάσσαλος σε φρέσκο νερό
1995	Tuno Knob (DK)	10 x 0.5 = 5	[4-7] / [5.5]	Βαρύτητας
1996	Dronten, Ijsselmeer (NL)	28 x 0.6 = 16.8	[2-3] / [0.02]	Μονοπάσσαλος σε άμμο
1998	Bockstigen (S)	5 x 0.5 = 2.5	[5.5-6.5] / [4.5]	Μονοπάσσαλος
2000	Blyth, North sea (GB)	2 x 2 = 4	[6 + 5m παλίρροια]	Μονοπάσσαλος
2000	Utgrunden (S)	7 x 1.43 = 10	[7.2-9.8] / [12.5]	Μονοπάσσαλος
2001	Middelgrunden (DK)	20 x 2 = 40	[3-5] / [1.7-3.5]	Βαρύτητας
2001	Yttre Stengrund (S)	5 x 2 = 10	[6-10] / [4]	Βαρύτητας
2002	Horns Rev I (DK)	80 x 2 = 160	[6-14] / [14]	Μονοπάσσαλος
2003	Nysted, Rødsand (DK)	72 x 2.3 = 165.6	[6-10] / [10]	Βαρύτητας
2003	North Hoyle (GB)	30 x 2 = 60	[7-11] / [7.5]	Μονοπάσσαλος
2003	Frederikshavn (DK)	6 x 3.6 = 22.6	[1-4] / [1]	Μονοπάσσαλος
2003	Ronland (DK)	8 x 2.15 = 17.2	[2] / [0.1-0.2]	Βαρύτητας
2003	Samsø (DK)	10 x 2.3 = 23	[10-13] / [3.8]	Μονοπάσσαλος
2003	Arklow Bank (EIR)	7 x 3.6 = 25.2	[4.2-6.4] / [10]	Μονοπάσσαλος

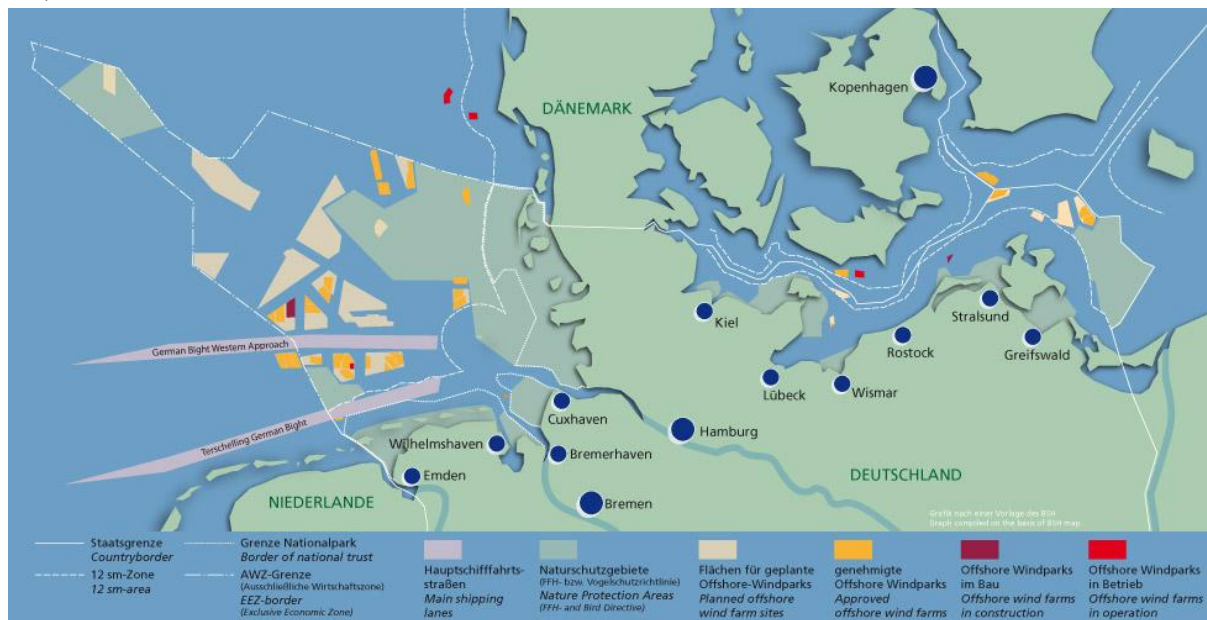
Πίνακας 1 : κατασκευασμένα αιολικά πάρκα στην περίοδο 1990-2003

1.2 Γενικά στοιχεία [2], [3]

Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας, ο λιγνίτης, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και η πυρηνική ενέργεια αποτελούν τις πρωτεύουσες μορφές ενέργειας για πολλά μέρη του κόσμου. Ωστόσο, τα συμβατικά καύσιμα είναι επιβλαβή για το περιβάλλον, εξαντλούνται τα αποθέματα τους και οδηγούν σε αστάθεια της τιμής της ενέργειας. Επιπλέον, η μη ασφαλής αποθήκευση και εναπόθεση ραδιενεργών αποβλήτων καθώς επίσης και η πιθανή διαρροή ραδιενεργών υλικών από πυρηνικά ατυχήματα, είναι ζητήματα που καθιστούν την πυρηνική ενέργεια όχι και τόσο αποδεκτή λύση παραγωγής ενέργειας. Από την άλλη μεριά υπάρχουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική ενέργεια, η οποία αποτελεί μια καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Πρόκειται για μια φθηνή και προσιτή μορφή ενέργειας βαθιά ριζωμένη στο γενετικό κώδικα και της Ελλάδας, καθότι οι Έλληνες ανέκαθεν χρησιμοποιούσαν την αιολική ενέργεια για την κίνηση των πλωτών ανεμομυχανών (ιστιοφόρα πλοία) αλλά και στους ανεμόμυλους.

Η αιολική ενέργεια στη στεριά αποτελεί την ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας σε ποσοστιαία βάση στον κόσμο για περισσότερο από μία δεκαετία. Τα περισσότερα χερσαία αιολικά πάρκα λαμβάνουν χώρα σε περιοχές με δυνατό άνεμο, πολλές φορές αραιοκατοικημένες. Το κύριο πρόβλημα σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η ανεπάρκεια στις γραμμές μεταφοράς προς τα μεγάλα αστικά κέντρα και τις παράκτιες περιοχές.

Για να τροφοδοτηθούν, λοιπόν, οι παράκτιες περιοχές με ρεύμα, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν στη θάλασσα, συνθέτοντας μεγάλα αιολικά πάρκα. Στην Ευρώπη μάλιστα που οι κενές εκτάσεις γης σπανίζουν και από την άλλη οι απέραντες εκτάσεις θαλασσών με ρηγά νερά είναι άφθονες, υπάρχει ήδη εγκατεστημένη ισχύς 900 MW υπεράκτιας αιολικής ενέργειας γύρω από τη Βόρεια και τη Βαλτική θάλασσα [εικόνες 1.2, 1.3, 1.4].



Εικόνα 1.2 : Υπεράκτια αιολικά πάρκα γύρω από τη Βόρεια και τη Βαλτική θάλασσα (κίτρινο- αιολικά πάρκα με άδεια λειτουργίας, σκούρο κόκκινο- αιολικά πάρκα υπό κατασκευή, κόκκινο- αιολικά πάρκα σε λειτουργία)



Εικόνα 1.3 : Πλωτές ανεμογεννήτριες στο αιολικό πάρκο Baltic I στη Βαλτική θάλασσα κοντά στην περιοχή Zingst της Γερμανίας



Εικόνα 1.4 : Πλωτές ανεμογεννήτριες σε υπεράκτιο αιολικό πάρκο στη Βόρεια θάλασσα

Μερικά από τα πλεονεκτήματα για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων στη θάλασσα είναι τα ακόλουθα :

- Ο άνεμος φυσάει δυνατότερα και με μεγαλύτερη σταθερότητα, με μικρότερη ένταση τύρβης και μικρότερη κλίση ταχύτητας λόγω οριακού στρώματος στη θάλασσα από ότι στη στεριά
- Το μέγεθος της ανεμογεννήτριας που πρόκειται να εγκατασταθεί στη θάλασσα δεν υπόκειται στους περιορισμούς που προκύπτουν από την οδική ή σιδηροδρομική μεταφορά, όπως στην περίπτωση της μηχανής προς εγκατάσταση στη στεριά, μιας και σε αυτήν την περίπτωση η μεταφορά της ανεμογεννήτριας γίνεται με εμπορικά πλοία δια θαλάσσης
- Οι οπτικές και ακουστικές ενοχλήσεις από τις πλωτές ανεμογεννήτριες μπορούν εύκολα να αποφευχθούν εάν αυτές τοποθετηθούν σε επαρκή απόσταση από την ακτή
- Απέραντες εκτάσεις αδιατάρακτων ανοιχτών θαλασσών είναι διαθέσιμες, με αποτέλεσμα κατά την εκτέλεση εργασιών εγκατάστασης να μη δεσμεύεται κομμάτι γης εμποδίζοντας τη λειτουργία παραδιπλανών εκτάσεων όπως συμβαίνει στα χερσαία αιολικά πάρκα

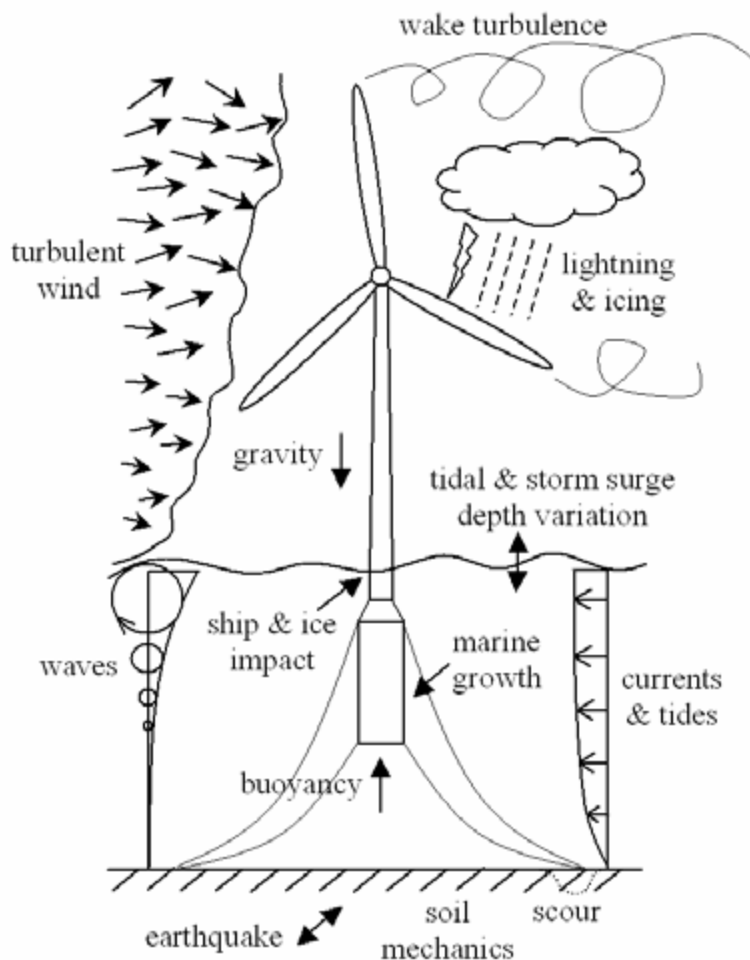
Στον αντίποδα όλων αυτών, εμφανίζονται τα ακόλουθα μειονεκτήματα για την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών στη θάλασσα :

- Απαιτείται υψηλότερο επενδυτικό κεφάλαιο για πλωτές ανεμογεννήτριες, εξαιτίας των δαπανών που σχετίζονται με το θαλάσσιο και υποθαλάσσιο κομμάτι της κατασκευής, με την πρόσθετη συνθετότητα της θεμελίωσης στη θάλασσα, με την υποστηρικτική υποδομή (support structure) και με την εγκατάσταση και αποξήλωση των μηχανών
- Οι εγκαταστάσεις στη θάλασσα είναι λιγότερο προσβάσιμες σε σχέση με αυτές στη στεριά, γεγονός που αυξάνει τα λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης και πιθανότατα μειώνει τη διάρκεια ζωής των μηχανών
- Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες δεν έχουν να αντιμετωπίσουν μόνο φορτία προερχόμενα από τον άνεμο, άλλα έχουν να έρθουν αντιμέτωπες και με άλλες συνθήκες, όπως είναι οι υδροδυναμικές φορτίσεις από τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα [εικόνα 1.5]. Ως αποτέλεσμα αυτού, αυξάνει η συνθετότητα σχεδιασμού των μηχανών.

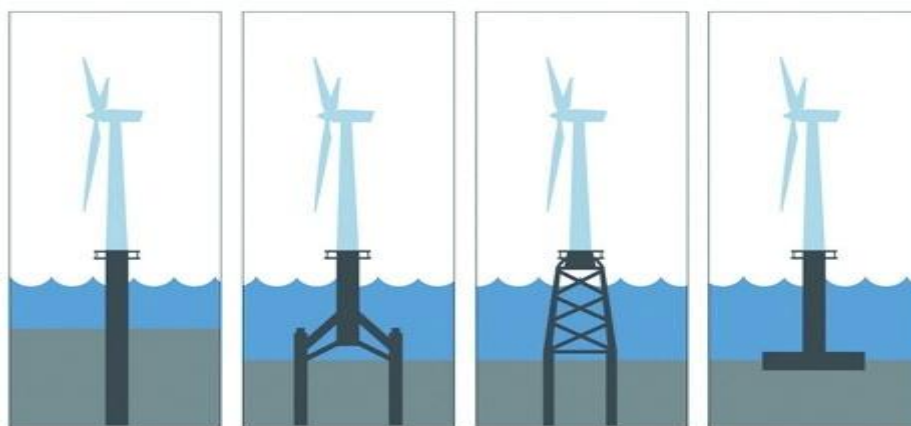
Στις ΗΠΑ, στην Κίνα, στη Ιαπωνία, στη Νορβηγία και σε πολλά άλλα μέρη του κόσμου, το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου θαλάσσιου αιολικού δυναμικού συναντάται σε θάλασσες με βάθος υδάτων μεγαλύτερο από 30 m. Σε αντίθεση με αυτό, οι ως τώρα εγκατεστημένες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες στην Ευρώπη, βρίσκονται ως επί το πλείστον σε ρηγά νερά, βάθους μικρότερου από 20 m. Αυτού του τύπου οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν ως υποστηρικτική υποδομή είτε ένα μονοπάσσαλο (monopile) απευθείας πακτωμένο στον πυθμένα είτε μια βάση βαρύτητας (gravity base) από σκυρόδεμα που επίσης ακουμπάει στον πυθμένα. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές δεν είναι οικονομικά βιώσιμες σε μεγαλύτερα βάθη. Αντί αυτών, λοιπόν, χρησιμοποιούνται υποδομές τύπου χωρικού πλαισίου

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

(space-frame substructures) συμπεριλαμβάνοντας τρίποδα (tripods), τετράποδα (quadpods) και πλαίσια τύπου jacket που πετυχαίνουν την απαιτούμενη αντοχή και στιβαρότητα με το μικρότερο δυνατό κόστος [εικόνα 1.6].

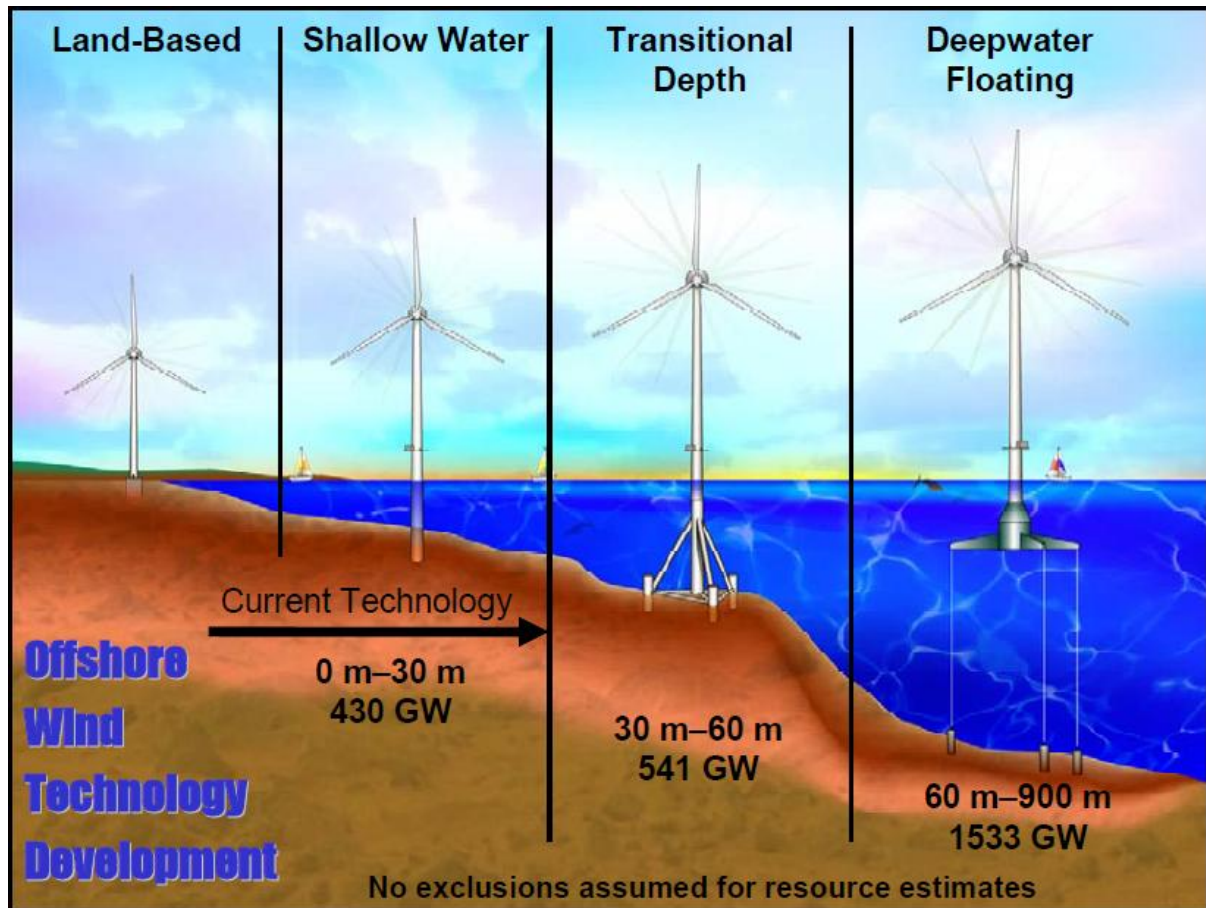


Εικόνα 1.5 : Πηγές φόρτισης πλωτής ανεμογεννήτριας (τουρβώδης άνεμος, ομίρρους, κεραυνός και παγετός, βαρύτητα, θαλάσσια ρεύματα και παλίρροια, άνωση, σεισμός, φορτία αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής)



Εικόνα 1.6 : Από αριστερά προς τα δεξιά : monopile, tripod, jacket, gravity base

Προχωρώντας σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη (>45 m που συναντάται στο Beatrice Wind Farm Demonstrator Project στη Βόρεια θάλασσα κοντά στη Σκωτία με τις 2 ανεμογεννήτριες των 5 MW υποστηριζόμενες σε jacket πλαίσιο) η λύση των πλωτών υποστηρικτικών πλατφόρμων είναι η αποδοτικότερη και η οικονομικά βιωσιμότερη. Έτσι, η φυσική εξέλιξη των διαφόρων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται ως υποδομές των ανεμογεννητριών φαίνεται στην **εικόνα 1.7**

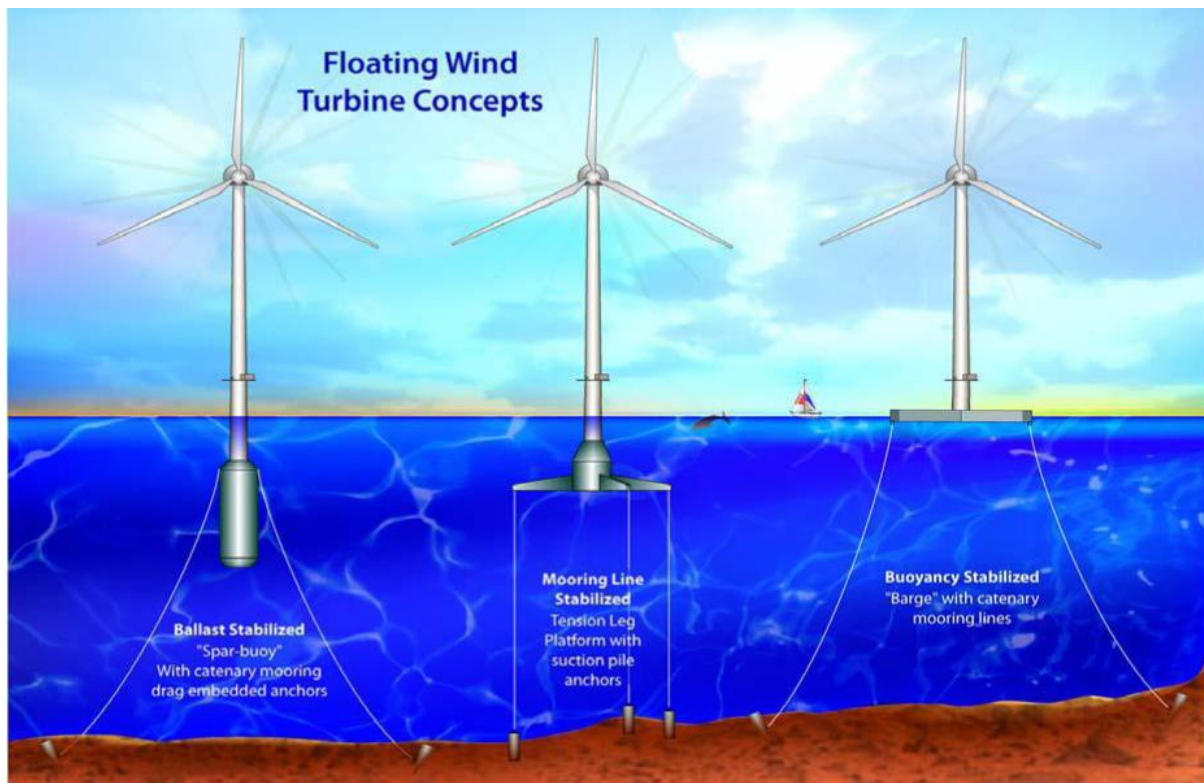


Εικόνα 1.7 : Φυσική εξέλιξη των υποστηρικτικών υποδομών ανάλογα με το βάθος εφαρμογής(ρηχά νερά →μεταβατικά βάθη →βαθιά ύδατα)

Τα οφέλη από την εγκατάσταση πλωτών αιολικών πάρκων σε βαθιά ύδατα έναντι των ρηχών υδάτων είναι τα ακόλουθα ^[3]:

- Μεγαλύτερο εύρος πιθανών τοποθεσιών εγκατάστασης
- Μεγαλύτερη ποικιλία στην επιλογή της κατάλληλης πλωτής διάταξης
- Κόστος περίπου ανάλογο με αυτό των πακτωμένων κατασκευών μεσαίου βάθους
- Τα φορτία αναλαμβάνονται από το νερό αντί να μεταφέρονται εξ ολοκλήρου στη θεμελίωση
- Μεγαλύτερη ευελιξία κατά τη διαδικασία εγκατάστασης λόγω της ανοιχτής θαλάσσης που διευκολύνει την εκτέλεση των εργασιών

Αναφερόμενοι σε βαθιά ύδατα αξίζει να αναφερθούν οι διαφορετικοί τρόποι στήριξης πλωτών ανεμογεννητριών. Οι τρόποι αυτοί διαφέρουν ως προς το μηχανισμό επίτευξης στατικής ευστάθειας [εικόνα 1.8]



Εικόνα 1.8 : Μηχανισμοί επίτευξης στατικής ευστάθειας

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 (TLP- Tension Leg Platform) 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.

1.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα αέρο-σέρβο-ελαστικών πακέτων προσομοίωσης, έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνουν τις πρόσθετες φορτίσεις και αποκρίσεις που είναι αντιπροσωπευτικές των υποστηρικτικών υποδομών απ' ευθείας πακτωμένων στον πυθμένα (fixed-bottom substructures). Για τους υπολογισμούς των υδροδυναμικών φορτίων, όλοι αυτοί οι κώδικες χρησιμοποιούν την εξίσωση του Morison. Στην εξίσωση του Morison η κινηματική των προσπίπτοντων κυμάτων (incident wave kinematics) καθορίζεται χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο κυματικό φάσμα σε συνδυασμό με τη γραμμική κυματική θεωρία του Airy για μη κανονικές θάλασσες (irregular seas) ή με έναν από τους ποικίλους τύπους της μη γραμμικής κυματικής θεωρίας για κανονικές θάλασσες υπό ακραίες συνθήκες (extreme regular seas). Συμπεριλαμβάνονται επίσης οι επιδράσεις των θαλάσσιων ρευμάτων. Επιπλέον, η εξίσωση του Morison, η οποία ισχύει περισσότερο για λεπτότοιχους, επιφανειακά διάτρητους κατακόρυφους κυλίνδρους που επεκτείνονται μέχρι τον πυθμένα της θάλασσας, λαμβάνει υπόψη τη σχετική κινηματική που προκύπτει από τις κινήσεις του ρευστού και της υποδομής συμπεριλαμβάνοντας την προστιθέμενη μάζα (added mass), την αδράνεια των προσπίπτοντων κυμάτων και την αντίσταση ιξώδους. Αγνοεί, όμως, ενδεχόμενες προγενέστερες επιδράσεις της ελεύθερης επιφάνειας και την επαγόμενη από την προστιθέμενη μάζα σύζευξη μεταξύ των μορφών κίνησης στο πρόβλημα ακτινοβολίας (radiation problem) και κάνει χρήση της προσέγγισης μεγάλου μήκους κύματος του G. I Taylor για την απλοποίηση του προβλήματος περίθλασης (diffraction problem). Το γεγονός αυτό, όμως, των απλοποιήσεων και των προσεγγίσεων, καθιστά την θεωρία του Morison περιορισμένη ως προς τις δυνατότητες ανάλυσης πολλών προτεινόμενων υποστηρικτικών πλατφόρμων για υπεράκτιες, πλωτές ανεμογεννήτριες.

Έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες μελέτες για την εκτίμηση του προκαταρκτικού σχεδιασμού πλωτών διατάξεων ανεμογεννητριών. Οι μελέτες αυτές αρχικά αφορούσαν σε γραμμική ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων και παρατίθενται παρακάτω :

- Ο **Bulder** χρησιμοποίησε υδροδυναμικές τεχνικές βασισμένες σε γραμμική ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων για να ορίσει τα RAO's (Response Amplitude Operators) και τις τυπικές αποκλίσεις στο πλάτος κάθε μιας εκ των έξι κινήσεων της πλατφόρμας, που αποτελούν τους 6 βαθμούς ελευθερίας του άκαμπτου υποστηρικτικού σώματος (tri-floater design για μηχανή 5 MW)
- Ο **Lee** ακολούθησε παρόμοια διαδικασία για την ανάλυση μιας TLP (Tension Leg Platform) πλατφόρμας και ενός spar-buoy με τεντωμένα σχοινιά (spar-buoy with taut-leg) για την υποστήριξη μιας ανεμογεννήτριας 1,5 MW
- Οι **Wayman, Sclavounos, Butterfield, Musial και Jonkman** ακολούθησαν παρόμοια διαδικασία για να αναλύσουν TLP (Tension Leg Platform) πλατφόρμες διαφόρων σχεδιασμών καθώς επίσης και μια "σχεδιά" Swallow-Draft Barge (SDB) ως υποστηρικτικές υποδομές για ανεμογεννήτριες ισχύος 5 MW
- Ο **Vijfhuizen** σχεδίασε μια πλωτή πλατφόρμα τύπου barge, η οποία περιείχε και μια ταλαντούμενη στήλη ύδατος για την παραγωγή ενέργειας από τα κύματα (OWC-oscillating water column wave energy device). Πρόκειται για πλατφόρμα υποστήριξης ανεμογεννήτριας 5 MW

Σε όλες τις παραπάνω μελέτες το μητρώο μάζας του πλωτήρα προσαυξανόταν κατά τη μάζα της ανεμογεννήτριας και τα μητρώα υδροδυναμικής απόσβεσης και ελαστικής επαναφοράς προσαυξάνονταν κατά τα αντίστοιχα μητρώα απόσβεσης και επαναφοράς που προέκυπταν από την αεροδυναμική του δρομέα και τα γυροσκοπικά φαινόμενα. Επιπλέον, οι γραμμικοποιημένες ιδιότητες επαναφοράς εξάγονταν θεωρώντας μια μέση μετατόπιση του πλωτήρα προκαλούμενη από την αεροδυναμική ώση στο δρομέα. Η ελαστικότητα, όμως, της ανεμογεννήτριας αγνοούνταν. Οι μελέτες αυτές ήταν ικανοποιητικές, αφού κατάφεραν να αποδείξουν την τεχνική βιωσιμότητα των πλωτών ανεμογεννητριών βεβαιώνοντας ότι με κατάλληλο σχεδιασμό οι φυσικές ιδιοσυχνότητες του πλωτήρα μπορούν να τοποθετηθούν στην περιοχή χαμηλών ενεργειών του κυματικού φάσματος, εξασφαλίζοντας έτσι ότι η συνολική δυναμική απόκριση ελαχιστοποιείται

Ένας περιορισμός, ωστόσο, των γραμμικών αναλύσεων στο πεδίο των συχνοτήτων, που προηγήθηκαν, ήταν ότι δε μπορούσαν να αντιμετωπίσουν μη γραμμικά δυναμικά χαρακτηριστικά καθώς και μεταβατικά φαινόμενα, θεωρήσεις πολύ σημαντικές κατά την ανάλυση της ανεμογεννήτριας. Πολλές μελέτες επεσήμαναν τον παραπάνω περιορισμό. Έτσι, οι **Henderson** και **Patel** χρησιμοποιώντας μια τεχνική που οι ίδιοι αποκάλεσαν “state-domain”, χρησιμοποίησαν τα RAOs για να καθορίσουν τις κινήσεις μιας ανεμογεννήτριας 700 KW, έτσι ώστε να αποφανθούν για τις επιδράσεις που έχουν οι κινήσεις της πλατφόρμας στα κοπωτικά φορτία της μηχανής. Έδειξαν ότι οι κινήσεις της πλατφόρμας έχουν μικρή επίδραση στην ισχύ και στα φορτία πάνω στο δρομέα. Αντίθετα τα μεγέθη αυτά, καθορίζονταν σε μεγάλο βαθμό από την αεροδυναμική του δρομέα. Επίσης έδειξαν ότι οι κινήσεις του πλωτήρα επηρεάζουν σημαντικά τα φορτία του κλωβού και του πύργου της ανεμογεννήτριας, καθώς καθορίζονται από την αδράνεια. Ως αποτέλεσμα αυτού, η αντοχή του πύργου θα έπρεπε να αυξηθεί στην περίπτωση που οι κινήσεις του πλωτήρα δε θα μπορούσαν να μειωθούν. Σε ανάλογα συμπεράσματα κατέληξαν αυτόνομα οι **Fulton**, **Malcolm**, **Moroz** και **Withee**. Καθένας από τους ερευνητές αυτούς χρησιμοποίησε για την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου διαφορετικό αέρο-σέρβο-ελαστικό κώδικα προσαρμοσμένο να δέχεται τις επιδράσεις των κινήσεων της πλατφόρμας καθώς επίσης και τις υδροδυναμικές φορτίσεις TLP πλατφορμών για υποστήριξη ανεμογεννητριών 5 MW και 1,5 MW αντίστοιχα. Σε πιο πρόσφατες αναλύσεις οι **Nielsen**, **Hanson** και **Skaare** και οι **Larsen** και **Hanson** από κοινού, κατέληξαν σε κοινά συμπεράσματα. Αυτοί οι ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα συνδυαστικό πακέτο που περιείχε αέρο-σέρβο-ελαστικά προγράμματα, υδροδυναμικά προγράμματα και προγράμματα που αφορούσαν το σύστημα πρόσδεσης, για να σχεδιάσουν και να αναπτύξουν το σύστημα ελέγχου ενός ιδιώτυπου spar-buoy με όνομα “Hywind” για την υποστήριξη μιας ανεμογεννήτριας 5 MW. Αυτή η μελέτη ήταν ιδιαίτερα σημαντική καθώς τα αποτελέσματα από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις επαληθεύτηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα ενός υπό κλίμακα μοντέλου που εξεταζόταν στη δεξαμενή νερού υπό κυματικές συνθήκες. Έπειτα, οι **Zambrano**, **MacCready**, **Kiceniuk**, **Roddier** και **Cermelli** κατέδειξαν την τεχνική αλλά όχι οικονομική βιωσιμότητα μικρότερων πλωτών ανεμογεννητριών. Χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου για να καθορίσουν τις κινήσεις μιας ημι-επιπλέουσας υποστηρικτικής πλατφόρμας (semi submersible support platform) και μιας TLP πλατφόρμας και τις εντάσεις στο σύστημα πρόσδεσης τους. Η πρώτη πλατφόρμα επρόκειτο να υποστηρίξει 3 ανεμογεννήτριες των 90

kW ή 225 kW η καθεμία, ενώ η δεύτερη επρόκειτο να υποστηρίξει μια απλή ανεμογεννήτρια του 1 kW. Τέλος, ο **Jonkman** μέσα από τη διδακτορική διατριβή του (Jonkman, (2007)), επεδίωξε να εξαλείψει τους περιορισμούς των προγενέστερων ερευνητικών μελετών. Έτσι, (i) ανέπτυξε ένα ολοκληρωμένο εργαλείο προσομοίωσης που μπορεί να μοντελοποιήσει τη συζευγμένη δυναμική απόκριση υπεράκτιας πλωτής ανεμογεννήτριας, (ii) επαλήθευσε τις δυνατότητες προσομοίωσης του εργαλείου του μέσα από συγκρίσεις μοντέλου προς μοντέλο και (iii) εφάρμοσε το εργαλείο του κάνοντας ολοκληρωμένη ανάλυση φορτίσεων μιας υπεράκτιας πλωτής ανεμογεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα το εργαλείο που ανέπτυξε είναι ένα πλήρως συζευγμένο αέρο-ύδρο-σέρβο-ελαστικό μοντέλο βασισμένο στο πεδίο του χρόνου. Πρόκειται για αέρο-σέρβο-ελαστικά μοντέλα και υδροδυναμικά μοντέλα ενσωματωμένα σε ένα κοινό περιβάλλον με τρόπο ώστε να αλληλεπιδρούν το ένα με το άλλο. Η τελευταία συνεισφορά στην αντιμετώπιση του ζητήματος της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας και των σύγχρονων προκλήσεων που αναδύονται από αυτήν, ήρθε από το **Offshore Code Comparison Collaboration (OC3)** υπό την αιγίδα της διεθνούς επιτροπής ενέργειας (IEA). Πρόκειται για τη συνεργασία χωρών και ερευνητικών οργανισμών, με στόχο τη σύγκριση διαφορετικών αέρο-ύδρο-σέρβο-ελαστικών εργαλείων προσομοίωσης διαφόρων διατάξεων πλωτών ανεμογεννητριών με κοινά χαρακτηριστικά για όλα τα εργαλεία. Τα μοντέλα αυτά στην πιο σύγχρονη εκδοχή τους είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνουν τις επιδράσεις των τυχόντων κυμάτων, των θαλάσσιων ρευμάτων, της δυναμικής της θεμελίωσης στην υποστηρικτική υποδομή. Μέσα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων ολοκληρωμένων δυναμικών αναλύσεων, επαληθεύτηκε η ακρίβεια και η ορθότητα των κωδίκων, εντοπίστηκαν ελλείψεις και ανάγκες για βελτιώσεις και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα [2], [9].

1.4 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των πλωτών ανεμογεννητριών και ο σχεδιασμός εναλλακτικού συστήματος ελέγχου για τη μείωση των φορτίσεων της κατασκευής. Για το λόγο αυτό αρχικά χρησιμοποιείται το αέρο-ύδρο-σέρβο-ελαστικό πακέτο HydroGAST (Hydrodynamic, General Aerodynamic and Structural Tool), με το οποίο αναλύεται η δυναμική συμπεριφορά υπεράκτιων ανεμογεννητριών με υποστηρικτική υποδομή τύπου μονοπασάλου (monopile)-{fixed bottom} και τύπου spar-buoy-{floating concept} απέναντι σε διάφορες περιπτώσεις φορτίσεων σχεδιασμού. Η ανάλυση περιλαμβάνει δεκάλεπτες προσομοιώσεις με τις οποίες προβλέπεται η απόκριση των πλωτών μηχανών. Στη συνέχεια, για να διαπιστωθεί η ύπαρξη ή μη ύπαρξη υπερβαλλόντων φορτίων γίνεται στατιστική επεξεργασία (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ελάχιστες τιμές, μέγιστες τιμές) και παραμετρική ανάλυση όλων των δυνάμεων και ροπών καθώς επίσης και της παραγόμενης ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου για όλο το πεδίο ταχυτήτων λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Αφού διαπιστωθούν υπερβάλλοντα φορτία καταδεικνύεται η ανάγκη εύρεσης μιας λύσης για τον περιορισμό τους. Για το σκοπό αυτό, τροποποιείται το υπάρχον σύστημα ελέγχου και σχεδιάζεται ένα νέο, εναλλακτικό σύστημα που πετυχαίνει σημαντική μείωση των φορτίσεων.

1.5 Διάρθρωση της εργασίας

Στο κεφάλαιο 1 που προηγήθηκε, επιχειρήθηκε να γίνει μια εισαγωγή στη σύγχρονη έννοια των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Μέσα από αυτό το κεφάλαιο ο αναγνώστης ενημερώθηκε για την ιστορική εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας και μπόρεσε να αντιληφθεί την αναγκαιότητα και χρησιμότητα εκμετάλλευσης του πλούσιου θαλάσσιου αιολικού δυναμικού μέσα από την εγκατάσταση αιολικών πάρκων για την παραγωγή ενέργειας. Ταυτόχρονα, όμως, αντιλήφθηκε και τις δυσκολίες και τους κινδύνους που εγκυμονεί η υπεράκτια αιολική ενέργεια. Τέλος γνώρισε τις πιθανές διατάξεις για τη στήριξη των ανεμογεννητριών είτε πρόκειται για ρηχά νερά είτε πρόκειται για βαθιά ύδατα.

Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται το αέρο-ύδρο-σέρβο ελαστικό μοντέλο HydroGAST (Hydrodynamic, General Aerodynamic and Structural Tool), το οποίο χρησιμοποιείται για τη δυναμική ανάλυση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Παρουσιάζονται, λοιπόν, οι βασικές συνιστώσες που απαρτίζουν το μοντέλο, όπως είναι : ο άνεμος και τα χαρακτηριστικά του, το κύμα και τα χαρακτηριστικά του, το αεροδυναμικό μέρος (BEM, ONERA) , το ελαστοδυναμικό μέρος (FEM, multi-body approach) , η σύζευξη του αεροδυναμικού με το ελαστοδυναμικό μοντέλο που αποτελούν το αεροελαστικό μέρος και τέλος το υδροδυναμικό μέρος του εργαλείου.

Ακολουθεί στο κεφάλαιο 3 η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς δύο διαφορετικών διατάξεων υπεράκτιων ανεμογεννητριών (monopile και spar-buoy) με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου HydroGAST. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των δυνάμεων και ροπών καθώς επίσης και της ισχύος μέσα από μια παραμετρική ανάλυση για διάφορες περιπτώσεις φορτίσεων σχεδιασμού. Για την ευκολότερη εξαγωγή συμπερασμάτων γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο αυτών διατάξεων

Στο κεφάλαιο 4 προτείνεται ο σχεδιασμός ενός εναλλακτικού συστήματος ελέγχου για τη μείωση των υπερβαλλόντων φορτίων που διαπιστώθηκαν κατά την παραμετρική ανάλυση που προηγήθηκε στο κεφάλαιο 3. Έτσι, εισάγεται η έννοια της πρόσθετης ανάδρασης στο σύστημα από τη διαμήκη επιτάχυνση της κορυφής του πύργου. Επιχειρείται επίσης να δοθεί η έννοια του χαμηλοπερατού φίλτρου καθώς και η βασική σχέση και τα ορίσματα του στη Matlab. Παρουσιάζονται διαγραμματικά τα κριτήρια επιλογής του φίλτρου και της τιμής του κέρδους ολοκληρωτή (integral Gain) στην ανάδραση. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρατίθενται τα συγκριτικά διαγράμματα της παραμετρικής ανάλυσης των φορτίσεων προ και μετά την επιβολή του νέου συστήματος ελέγχου, για την περίπτωση της πλωτής διάταξης (spar-buoy)

Στο κεφάλαιο 5 εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα και γίνονται οι απαραίτητες συστάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση και μελέτη του θέματος των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και των φορτίσεων πάνω σε αυτές.



Φώτο : αιολικό πάρκο *BURBO BANK* στα ανοιχτά της ακτής του *Liverpool*, Αγγλία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2

**ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΕΡΟ-ΥΔΡΟ-
ΣΕΡΒΟΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ**

HydroGAST

Το εργαλείο προσομοίωσης GAST (General Aerodynamic and Structural Tool) είναι ανεπτυγμένο στο εργαστήριο αεροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Χρησιμοποιείται για την ανάλυση της απόκρισης ανεμογεννητριών και πιο συγκεκριμένα ανάμεσα στις δυνατότητες εφαρμογής του συγκαταλέγονται τα εξής :

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

Αποτελείται από ένα πρότυπο για την αεροδυναμική ανάλυση του δρομέα (RAFT-Rotor Analysis Fast Tool) βασισμένο στη μέθοδο στοιχείων πτερύγωσης (BEM-Blade Element Momentum method) και ένα ελαστοδυναμικό πρότυπο βασισμένο στην προσέγγιση πολλαπλών σωμάτων (multi-body approach), όπου όλα τα ελαστικά σώματα θεωρούνται γραμμικές δοκοί, αλλά λαμβάνονται μη γραμμικές συνθήκες κινηματικής και δυναμικής σύνδεσης των σωμάτων. Για τη διακριτοποίηση των δυναμικών εξισώσεων κίνησης εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM-Finite Element Method). Οι ελαστοδυναμικές εξισώσεις της δοκού συμπληρώνονται από τις εξισώσεις του μοντέλου ONERA για τους αεροδυναμικούς βαθμούς ελευθερίας (άνωση-lift, αντίσταση-drag και αεροδυναμική ροπή-momentum). Κατά αυτόν τον τρόπο οι εξισώσεις κάθε στοιχείου της δοκού, πέραν από τους ελαστικούς βαθμούς ελευθερίας (ελαστικές μετακινήσεις και στροφές) περιλαμβάνουν επίσης και τους αεροδυναμικούς βαθμούς ελευθερίας (DOF's-Degrees Of Freedom). Το πλήρες σύστημα των συζευγμένων αεροελαστικών εξισώσεων της δοκού επιλύεται ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων.

Το υπολογιστικό πρότυπο GAST έχει αξιολογηθεί εκτενώς σε σχέση με μετρήσεις σε δρομείς Α/Γ, τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας όσο και για μεταβατικά και ακραία φαινόμενα, στο πλαίσιο διδακτορικών εργασιών και άλλων σχετικών δημοσιεύσεων (Voutsinas, Belessis και Rados (1994), Voutsinas, Riziotis και Chaviaropoulos (1997), Chassapoyiannis et al (1994), Voutsinas 1995, Βουτσινάς κ.α. (1996)). Ως εκ τούτου ο αναγνώστης παραπέμπεται στις εργασίες αυτές για περισσότερες λεπτομέρειες σε σχέση με την επιλογή των αριθμητικών παραμέτρων και την αξιολόγηση των υπολογιστικών τους δυνατοτήτων. Σημειώνεται ότι το πρότυπο GAST βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με τα αντίστοιχα πρότυπα που χρησιμοποιούνται στο χώρο της αιολικής ενέργειας, από άλλους οργανισμούς και ερευνητικά κέντρα για την πραγματοποίηση αεροελαστικών υπολογισμών σε ΑΓΟΑ.

2.1 Αεροδυναμική ανάλυση [4],[5],[6]

Η αεροδυναμική ανάλυση του δρομέα ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα (ΑΓΟΑ) βασίζεται στη θεωρία δίσκου ορμής και τη μέθοδο 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 στοιχείων περύγωσης (Ριζιώτης 2003). Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονται οι συντελεστές αξονικής και περιφερειακής επαγωγής a και a' χωριστά για κάθε στοιχείο περύγωσης μέσα από τις εξισώσεις για την αξονική και περιφερειακή ταχύτητα επαγωγής στο επίπεδο του δρομέα αντίστοιχα. Στις εξισώσεις αυτές εμφανίζονται ως άγνωστοι τα αεροδυναμικά φορτία που αναπτύσσονται κατά μήκος του περυγίου. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιούνται κυρίως δισδιάστατες μετρήσεις των συντελεστών άωσης και αντίστασης των αεροτομών που απαρτίζουν το περύγιο (C_L και C_D), καθώς και η φαινόμενη σε κάθε στοιχείο περύγωσης γωνία πρόσπτωσης και ταχύτητα (α και W αντίστοιχα). Έτσι για την απλοποιημένη θεωρία δίσκου ορμής με δεδομένη γεωμετρία περυγίου (χορδή c), η αεροδυναμική συμπεριφορά ενός στοιχείου περύγωσης καθορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις (σύμφωνα και με το **σχήμα 2.1**):

$$\frac{a}{1-a} = \frac{BcC_L}{8\pi r \tan \varphi \sin \varphi} [1 + \varepsilon \tan \varphi] \quad (2.1)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{BcC_L}{8\pi r \cos \varphi} [1 - \varepsilon \cot \varphi] \quad (2.2)$$

$$\tan \varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a')} \quad (2.3)$$

$$W = \sqrt{(U(1-a))^2 + (\Omega r(1+a'))^2} \quad (2.4)$$

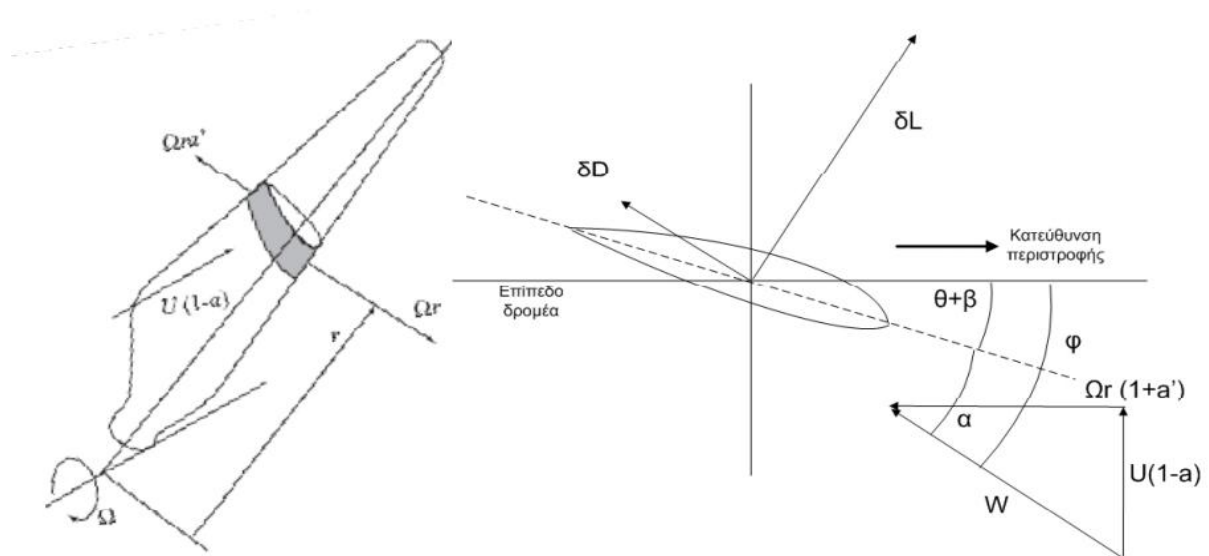
$$a = \varphi - (\theta + \beta) \quad \varepsilon = C_D/C_L \quad (2.5)$$

$$\delta F_n = C_n \frac{\rho}{2} W^2 c \delta r = (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) \frac{\rho}{2} W^2 c \delta r \quad (2.6)$$

$$\delta F_t = C_t \frac{\rho}{2} W^2 c \delta r = (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) \frac{\rho}{2} W^2 c \delta r \quad (2.7)$$

$$T = B \sum_i \delta F_n^i \quad (2.8)$$

$$M = B \sum_i r_i \delta F_n^i \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.1 : στοιχείο περύγωσης και χαρακτηριστικά μεγέθη για την περίπτωση της απλοποιημένης θεωρίας δίσκου ορμής

Για κάθε ένα από τα στοιχεία περύγωσης εφαρμόζουμε την ακόλουθη επαναληπτική διαδικασία :

- **Βήμα 1:** επιλέγουμε αρχικές τιμές για τα a και a' . Τυπικές τιμές εκκίνησης $a/a' = 10/1$ (π.χ. $a = 0,1$ και $a' = 0,01$)
- **Βήμα 2 :** υπολογίζουμε τη γωνία ϕ από την (2.3) και τη γωνία α από τη (2.5). Από πίνακες προσδιορίζουμε τα C_L και C_D
- **Βήμα 3 :** υπολογίζουμε νέες τιμές για τα a και a' από τις (2.1) και (2.2). Επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση των a και a'
- **Βήμα 4 :** υπολογίζουμε τις δυνάμεις του στοιχείου περύγωσης από τις (2.6) και (2.7) (κάθετη και εφαπτομενική συνιστώσα αντίστοιχα)

Στη γενικότερη περίπτωση (**σχήμα 2.2**) οι εξισώσεις που υπολογίζουν τα a και a' είναι δύο μη γραμμικές εξισώσεις που λύνονται επαναληπτικά και ανεξάρτητα για κάθε στοιχείο περύγωσης (Wilson et al (1976)). Στην περίπτωση που το εισερχόμενο στο επίπεδο του δρομέα πεδίο ροής είναι χωρικά ανομοιόμορφο ή μεταβάλλεται στο χρόνο, οι μη γραμμικές εξισώσεις συμπληρώνονται με τους απαραίτητους αδρανειακούς όρους και λύνονται χωριστά σε κάθε γωνία αζιμουθίου $\phi_{az}(t)$. Η παραπάνω μέθοδος η οποία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στην ανάλυση δρομέων, όταν εφαρμόζεται στην περίπτωση ΑΓΟΑ επιδέχεται ορισμένων βελτιώσεων που σχετίζονται με το μη μόνιμο χαρακτήρα της επερχόμενης ροής (**dynamic inflow effects**), κυρίως λόγω του στοχαστικού χαρακτήρα του ανέμου, και διορθώσεων που αφορούν στην προσομοίωση της επίδρασης του ομόρρου όταν αυτός βρίσκεται σε απόκλιση σε σχέση με τον άξονα του δρομέα (**yaw misalignment effects**).

- Για να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις από το **μη μόνιμο χαρακτήρα της εισερχόμενης ροής** (dynamic inflow effects) χρησιμοποιείται η διαδικασία που έχει προταθεί από το ερευνητικό κέντρο ECN (Schepers και Snel (1994)) βάσει της οποίας στην εξίσωση

αξονικής επαγωγής προστίθεται ένας αδρανειακός όρος προερχόμενος από την ολοκλήρωση των μη μόνιμων όρων της εξίσωσης ορμής. Ένας αντίστοιχος όρος μπορεί να προστεθεί και στην εξίσωση ροπής της ορμής, που όμως στην πράξη δεν έχει ιδιαίτερη σημασία λόγω της ήδη μικρής τιμής της περιφερειακής επαγωγής.

Με βάση αυτή τη διόρθωση οι δύο εξισώσεις για τα a και a' γράφονται:

$$4 \frac{R \cdot \cos \varphi_c}{V} \cdot f_a \left(\frac{r}{R} \right) \cdot \dot{a} + C_T = \frac{\sigma_L C_n W^2 \cos^2 \varphi_c}{2V^2} \quad (2.10.a)$$

$$a'(1-a)F = \frac{\sigma_L \cdot C_t \cdot W^2}{8 \cdot \Omega \cdot r \cdot V \cdot \cos \varphi_c} \quad (2.10.β)$$

όπου η f_a δίνεται από τη σχέση:

$$f_a \left(\frac{r}{R} \right) = 2\pi \left[\int_0^{2\pi} \frac{\left(1 - \frac{r}{R} \cdot \cos \varphi_{az} \right) d\varphi_{az}}{\left(1 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 2 \cdot \frac{r}{R} \cdot \cos \varphi_{az} \right)^{3/2}} \right]^{-1} \quad (2.11)$$

και ο συντελεστής διόρθωσης ακροπτερυγίου-Prandtl, F δίνεται από τη σχέση :

$$F(r) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f}), \quad f(r) = \frac{B R - r}{2 r \sin \varphi} \quad (2.12)$$

Διόρθωση Ακροπτερυγίου - Prandtl



Ο τοπικός συντελεστής ώσης του κάθε στοιχείου πτερύγωσης στην περίπτωση αυτή δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} C_T &= 4a \cdot (1-a) \cdot F & a < 0.33 \\ C_T &= (0.425 + 1.39 \cdot a) \cdot F & a > 0.33 \end{aligned} \quad (2.13)$$

από τις οποίες η μεν πρώτη προκύπτει άμεσα από την εφαρμογή του θεωρήματος της ορμής η δε δεύτερη αποτελεί εμπειρική διόρθωση του C_T για μεγάλες τιμές του συντελεστή επαγωγής a . Η εμπειρική αυτή σχέση είναι μία ανάμεσα σε ένα πλήθος σχέσεων διόρθωσης που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Van Groel et al (1991)) και η οποία βρέθηκε να δίνει την καλύτερη δυνατή συσχέτιση με ένα ευρύ φάσμα μετρήσεων καμπυλών ισχύος (Κατώπης (1995)).

Η φαινόμενη γωνία πρόσπτωσης α (βλέπε **σχήμα 2.2**) δίνεται :

$$\alpha = \varphi - \theta_t - \beta_p \quad (2.14)$$

στην οποία με θ_t συμβολίζουμε την τοπική γωνία συστροφής και με β_p την γωνία βήματος του πτερυγίου. Η γωνία φ που χρησιμοποιείται στις σχέσεις προκύπτει από το τοπικό τρίγωνο ταχυτήτων (**σχήμα 2.2**)

$$\tan\varphi = \frac{(1-a) \cdot \cos\varphi_c}{(1+a') \cdot x_L} \quad (2.15)$$

όπου x_L είναι ο τοπικός λόγος ταχυτήτων.

Στις παραπάνω σχέσεις r είναι η εκάστοτε ακτινική θέση του κάθε στοιχείου περύγωσης, R η ακτίνα του δρομέα, Ω η ταχύτητα περιστροφής του, φ_c η γωνία κώνου του δρομέα, $\sigma_L = Bc/\pi r$ η τοπική στερεότητα (όπου B το πλήθος των πτερυγίων και c η τοπική χορδή του στοιχείου περύγωσης), V η ταχύτητα του ανέμου, W η συνολική φαινόμενη ταχύτητα της εκάστοτε τομής του πτερυγίου, φ η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της τοπικής φαινόμενης ταχύτητας με το επίπεδο του δρομέα (**σχήμα 2.2**), F ο συντελεστής απωλειών ακροπτερυγίου-Prandtl, C_T ο τοπικός συντελεστής ώσης του δρομέα, C_n , C_t οι συντελεστές κάθετης και εφαπτομενικής στο επίπεδο του δρομέα τοπικής δύναμης κάθε στοιχείου περύγωσης, T η ώση του δρομέα στο στοιχείο περύγωσης και M η ροπή, ρ η πυκνότητα του αέρα.

Στην περίπτωση που η επερχόμενη ροή είναι κάθετη στο επίπεδο του δρομέα ο λόγος ταχυτήτων δίνεται από την σχέση:

$$x_L = \frac{\Omega r}{V} \quad (2.16)$$

Επιπλέον η συνολική φαινόμενη ταχύτητα W προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$W = \sqrt{(V \cdot (1-a) \cdot \cos\varphi_c)^2 + (\Omega r \cdot (1+a'))^2} \quad (2.17)$$

- Αν όμως η κατεύθυνση του ανέμου βρίσκεται σε απόκλιση ως προς τον άξονα του δρομέα, (γεγονός που αποτελεί τον κανόνα όσον αφορά τη λειτουργία δρομέων Α/Γ-βλέπε **σχήμα 2.2**) τότε προκύπτει μια επιπλέον συνιστώσα ταχύτητας στο επίπεδο του δρομέα, η οποία προστίθεται ή αφαιρείται στην ταχύτητα περιστροφής ανάλογα με την γωνία αζιμουθίου φ_{az} στην οποία βρίσκεται το πτερύγιο. Σημειώνεται ότι ως μηδενική γωνία αζιμουθίου λαμβάνεται αυτή στην οποία το πτερύγιο είναι σε οριζόντια θέση και στη φάση της ανόδου του όπως φαίνεται και στο **σχήμα 2.3.(α)**. Επίσης επειδή ο ομόρρους αποκτά κλίση χ (βλέπε **σχήμα 2.3.(β)**) ως προς τον άξονα περιστροφής, επάγεται μια επιπλέον ισχυρή συνιστώσα αξονικής ταχύτητας u_i στο επίπεδο του δρομέα, η οποία αναμένεται ότι θα μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με την

γωνία αζιμουθίου, έτσι ώστε η συνολικά επαγόμενη ταχύτητα να αυξάνεται στις περιοχές που ο ομόρρους πλησιάζει το δρομέα λόγω της απόκλισης του κατά χ και να μειώνεται στις περιοχές που απομακρύνεται από αυτόν. Εκτός της αξονικής, επάγεται και μια ασθενέστερη περιφερειακή συνιστώσα η οποία όμως μπορεί σε πρώτη προσέγγιση να αμεληθεί.

Σύμφωνα με τα παραπάνω στην περίπτωση απόκλισης της ροής ο λόγος ταχυτήτων γράφεται:

$$x_L = \frac{\Omega r - V \sin \varphi_y \sin \varphi_{az}}{V \cos \varphi_y - u_i} \quad (2.18)$$

η δε φαινόμενη ταχύτητα W :

$$W = \sqrt{((V \cos \varphi_y - u_i) \cdot (1-a) \cdot \cos \varphi_c)^2 + ((\Omega r - V \sin \varphi_y \sin \varphi_{az}) \cdot (1+a'))^2} \quad (2.19)$$

Η αξονική επαγόμενη ταχύτητα προσεγγίζεται από μια εμπειρική σχέση (Κατώπης (1995), Schepers και Snel (1995), Schepers (1999)) οι σταθερές της οποίας έχουν βαθμονομηθεί με βάση πειραματικά δεδομένα και υπολογισμούς που προέρχονται από πιο λεπτομερή πρότυπα ανάλυσης. Η σχέση που δίνει την u_i είναι:

$$u_i = u_{i0} (1 - f_u(r/R) \tan \frac{\chi}{2} \cos \varphi_{az} \dots + O(2\varphi_{az})) \quad (2.20)$$

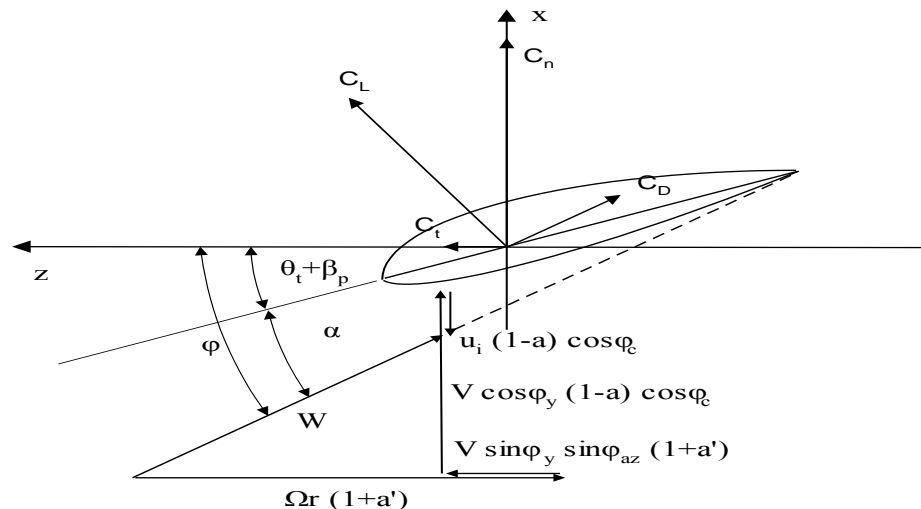
όπου,

$$f_u(r/R) = \frac{r}{R} + 0.3 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^3 + 0.4 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^5 \quad (2.21)$$

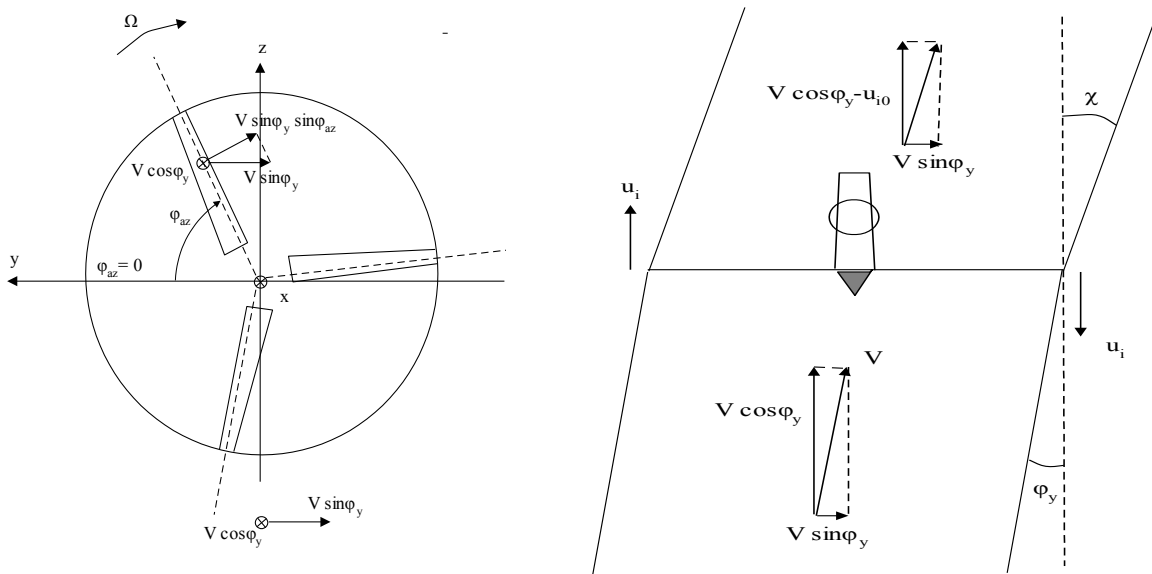
και

$$\tan \chi = \frac{V \sin \varphi_y}{V \cos \varphi_y - u_{i0}} \quad (2.22)$$

όπου στις παραπάνω σχέσεις η u_{i0} συμβολίζει την μέση αξονική επαγόμενη ταχύτητα πάνω στον δίσκο του δρομέα.



Σχήμα 2.2: Το τρίγωνο ταχυτήτων για ένα στοιχείο περύγωσης περυγίου ΑΓΟΑ (βελτιωμένη εκδοχή για την αεροδυναμική ανάλυση δρομέα ΑΓΟΑ που λαμβάνει υπόψη ροή σε απόκλιση και επιδράσεις μη μόνιμου χαρακτήρα της επερχόμενης ροής)



σχήματα 2.3 (α) και (β) : λειτουργία του δρομέα με την επ' άπειρο ροή σε απόκλιση

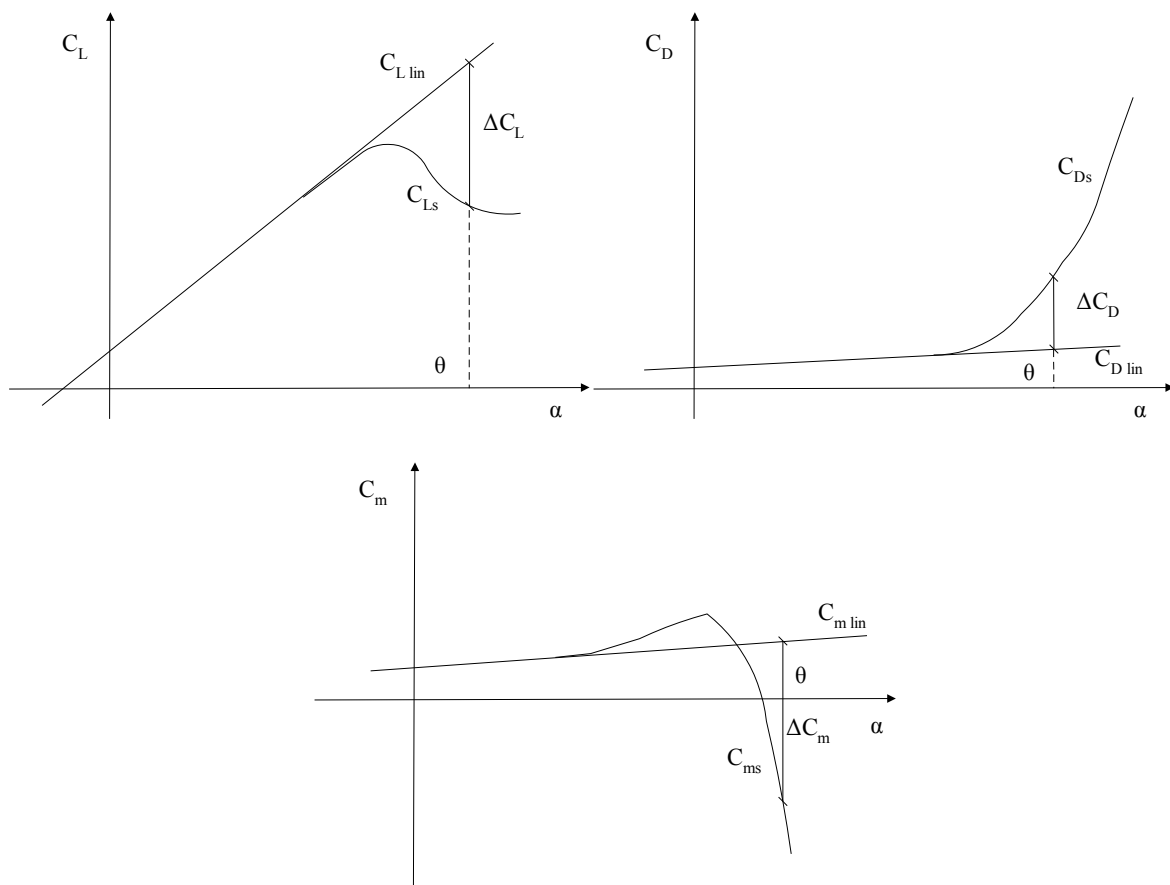
Από την αεροδυναμική απόκριση αεροτομής σε μόνιμες συνθήκες είναι γνωστό ότι καθώς η γωνία πρόσπτωσης αυξάνει η ροή παύει να είναι προσκολλημένη και αποκολλάται οπότε και εμφανίζεται απώλεια στήριξης, δηλαδή απότομη πτώση της άνωσης. Επειδή η συμπεριφορά στις δύο αυτές περιοχές είναι πολύ διαφορετική είναι λογικό να γίνει σαφής διάκριση μεταξύ τους. Για τον προσεγγιστικό υπολογισμό, λοιπόν, της δυναμικής απώλειας στήριξης στις αεροτομές πτερυγίων ανεμογεννητριών, χρησιμοποιείται το πρότυπο ONERA, το οποίο είναι ενσωματωμένο και στον κώδικα GAST που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής.

Το αρχικό πρότυπο ONERA :^[6]

Το αρχικό πρότυπο ONERA αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε για περιπτώσεις αεροτομών που εκτελούν γωνιακή περιστροφή (pitching) γύρω από άξονα περιστροφής με κέντρο το οποίο βρίσκεται κατά μήκος της χορδής τους. Με βάση το συγκεκριμένο πρότυπο ο εκάστοτε αεροδυναμικός συντελεστής Q μιας ταλαντούμενης αεροτομής (συντελεστής άνωσης $Q=C_L$, συντελεστής αντίστασης $Q=C_D$, συντελεστής ροπής $Q=C_m$) δίνεται από την επίλυση του παρακάτω συστήματος διαφορικών εξισώσεων(οι εξισώσεις είναι διαφορικές επειδή γίνεται λόγος για απόκριση, δηλαδή για μεταβολή στο χρόνο) :

$$\begin{aligned}
 & Q = Q_1 + Q_2 \\
 & \left. \begin{aligned}
 Q_1' + \lambda Q_1 &= \lambda Q_{lin} + (\lambda s + \sigma)\theta' + s\theta'' \text{ (άνωση)} \\
 Q_1 &= Q_{lin} + (s + \sigma)\theta' + s\theta'' \text{ (αντίσταση και ροπή)}
 \end{aligned} \right\} \text{ εξίσωση για το } Q_1 \text{ (2.23)} \\
 & Q_2'' + aQ_2' + rQ_2 = -(r\Delta Q + \varepsilon\theta') \quad \left. \right\} \text{ εξίσωση για το } Q_2
 \end{aligned}$$

όπου στις (2.23) με Q_1 συμβολίζεται ο συντελεστής του εκάστοτε φορτίου αν θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει αποκόλληση της ροής (δυναμική ροή) ενώ με Q_2 συμβολίζεται η ποσότητα που πρέπει να προστεθεί στον Q_1 ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση της αποκόλλησης. Επίσης(.) υποδηλώνει παραγωγή ως προς μία παράμετρο αδιάστατου χρόνου $\tau = (2V/c)t$ όπου V η ταχύτητα της σχετικής ως προς την αεροτομή επερχόμενης ροής και c η χορδή της αεροτομής. Από τις (2.23) γίνεται σαφές ότι ο Q_1 για την περίπτωση του συντελεστή άνωσης δίνεται από μία διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης, για δε τους συντελεστές αντίστασης και ροπής από μια αλγεβρική εξίσωση. Επίσης σε κάθε περίπτωση είναι συνάρτηση του Q_{lin} (που εκφράζει τη στατική τιμή του συντελεστή Q σε προσκολλημένη δυναμική ροή, **σχήμα 2.4**) και της πρώτης και της δεύτερης παραγώγου της γωνίας πρόσπτωσης θ . Από την άλλη ο Q_2 δίνεται από την επίλυση μιας διαφορικής εξίσωσης δεύτερης τάξης και εξαρτάται από την παράμετρο $\Delta Q = Q_{lin} - Q_s$ (όπου ο Q_s εκφράζει την πραγματική στατική τιμή του εκάστοτε συντελεστή Q , **σχήμα 2.4**) και την πρώτη παράγωγο της γωνίας θ . Στις (2.23), τέλος, οι συντελεστές $\lambda, \sigma, s, a, r, E$ αποτελούν παραμέτρους του προβλήματος, που είτε λαμβάνουν σταθερές τιμές είτε εκφράζονται συναρτήσει του ΔQ .



Σχήμα 2.4 : Βασικοί συμβολισμοί του προτύπου ONERA

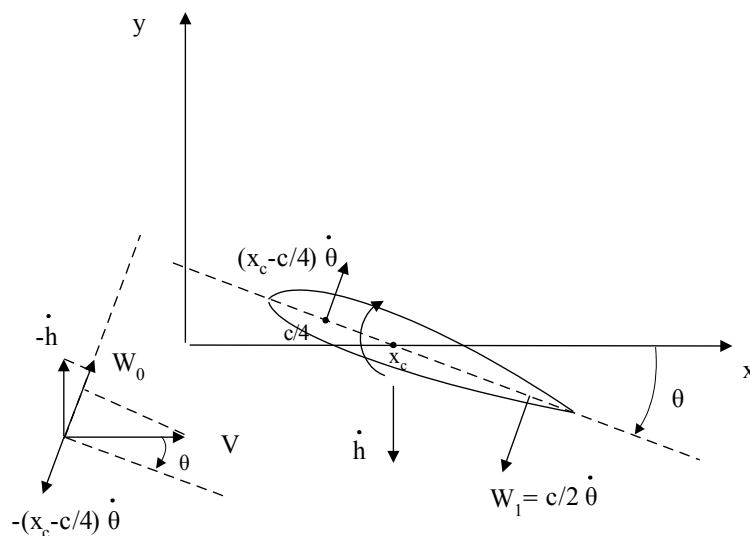
Το γενικευμένο πρότυπο ONERA :^[6]

Το γενικευμένο πρότυπο αναπτύχθηκε σε συνέχεια του αρχικού με σκοπό να συμπεριλάβει και άλλες μορφές κινήσεων εκτός από τη γωνιακή ταλάντωση (π.χ. κατακόρυφη ταλάντωση – heaving) όπως και περιπτώσεις μεταβλητής στο χρόνο επερχόμενης επ’ άπειρο ροής (Petot (1989), Bierbooms (1991)). Αναπτύχθηκε κυρίως για τον υπολογισμό της άνωσης αλλά εν συνεχεία επεκτάθηκε και στον υπολογισμό της αντίστασης και της ροπής. Το γενικευμένο πρότυπο διαφέρει ουσιωδώς σε σχέση με το αρχικό στο ότι η μεταβλητή που υπολογίζεται από την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων του προτύπου δεν είναι πλέον ο συντελεστής άνωσης αλλά η ίδια η κυκλοφορία, η οποία αποτελεί και τη γενεσιουργό αιτία της άνωσης. Επίσης η μεταβλητή ελέγχου δεν είναι η γωνία ταλάντωσης (pitch angle) θ , αλλά δύο ταχύτητες W_0 και W_1 . Από αυτές η W_0 είναι η κάθετη στη χορδή της αεροτομής συνιστώσα της σχετικής ταχύτητας της επερχόμενης ροής, υπολογισμένη στα $c/4$ (σχήμα 2.5). Η W_1 είναι μία γραμμική ταχύτητα που σχετίζεται αποκλειστικά με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της αεροτομής.

$$W_0 = V \sin \theta - \dot{h} \cos \theta + \left(\frac{1}{4} - \frac{x_c}{c} \right) c \dot{\theta} \quad (2.24)$$

$$W_1 = \frac{1}{2} c \dot{\theta} \quad (2.25)$$

Με x_c συμβολίζεται το κέντρο της γωνιακής ταλάντωσης (σχήμα 2.5)



Σχήμα 2.5 : ο ορισμός των W_0 και W_1

Με τον τρόπο αυτό συμπεριλαμβάνεται στον υπολογισμό και η επίδραση της ταχύτητας κατακόρυφης ταλάντωσης \dot{h} . Σημειώνεται ότι οι χρονικές παράγωγοι υπολογίζονται σε σχέση με τον πραγματικό χρόνο σε αντίθεση με το αρχικό πρότυπο. Αυτή η σύμβαση τηρείται συνολικά στο γενικευμένο πρότυπο. Η επιλογή των συγκεκριμένων ταχυτήτων ως μεταβλητών ελέγχου βασίζεται στη γραμμική θεωρία μικρών διαταραχών και λεπτών αεροτομών, σύμφωνα με την οποία η κυκλοφορία γύρω από μια λεπτή πλάκα που εκτελεί ημιτονοειδή γωνιακή και κατακόρυφη ταλάντωση

$$\theta = \theta_0 + \theta_1 \sin(\omega t) \quad (2.26)$$

$$h = h_0 + h_1 \sin(\omega t) \quad (2.27)$$

με συχνότητα ω , δίνεται από τη σχέση, (Katz και Plotkin (1991)) :

$$\widetilde{\Gamma}_1 = \frac{2\Gamma_1}{c} = C(k) \underbrace{[2\pi (V \sin\theta - h \cos\theta + \left(\frac{1}{4} - \frac{x_c}{c}\right) c\dot{\theta})]}_{w_0} + \underbrace{\frac{1}{2} c\dot{\theta}}_{w_1} = C(k) [2\pi(W_0 + W_1)] \quad (2.28)$$

όπου $C(k)$ είναι η συνάρτηση Theodorsen η οποία εκφράζει τη μη γραμμική επίδραση του ομόρρου στην κυκλοφορία της αεροτομής και είναι συνάρτηση της αδιάστατης συχνότητας ταλάντωσης $k = \omega c / 2V$. Με $\widetilde{\Gamma}_1$ στη (2.28) συμβολίζεται η ανηγμένη ως προς τη χορδή της αεροτομής τιμή της κυκλοφορίας, η οποία δεν περιλαμβάνει την επίδραση της αποκόλλησης. Επίσης πάλι με βάση τη γραμμική θεωρία λεπτών αεροτομών η δύναμη της άνωσης δίνεται από τη σχέση :

$$L = L_0 + L^* = \underbrace{\frac{\rho c}{2} V \widetilde{\Gamma}_1}_{L_0} + \underbrace{\frac{\rho c}{2} \left[\frac{\pi c}{2} \dot{W}_0 + \frac{\pi c}{4} \dot{W}_1 \right]}_{L^*} \quad (2.29)$$

όπου στη (2.29) ο πρώτος όρος σύμφωνα με το θεώρημα Joukowski είναι η άνοση σε συνθήκες μόνιμης ροής και ο δεύτερος εκφράζει τη διόρθωση λόγω της μη μονιμότητας της ροής. Η εξίσωση (2.28) σε συνδυασμό με την εξίσωση (2.29) προσδιορίζει τη δύναμη άνωσης, κινούμενης αεροτομής χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της αποκόλλησης. Η διόρθωση στη δύναμη της άνωσης λόγω απώλειας στήριξης γίνεται μέσω μιας κυκλοφορίας $\widetilde{\Gamma}_2$. Τελικά η συνολική άνοση υπολογίζεται από τη (2.29), η οποία τροποποιείται κατάλληλα έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό τόσο η αλλαγή της κυκλοφορίας της αεροτομής λόγω απώλειας στήριξης όσο και η επίδραση της συμπίεστικότητας :

$$L = \frac{\rho c}{2} \left[V(\widetilde{\Gamma}_1 + \widetilde{\Gamma}_2) + \frac{s c}{2} \dot{W}_0 + \frac{\kappa c}{2} \dot{W}_1 \right] \quad (2.30)$$

όπου,

$$\kappa = \frac{\pi}{2} + 1,96\pi \left(\sqrt{1 - M^2} - 1 \right) \quad (2.31)$$

Όπως αναφέρθηκε, το γενικευμένο πρότυπο αναπτύχθηκε αρχικά για τον υπολογισμό της άνωσης. Η επέκτασή του στον υπολογισμό της αντίστασης και της ροπής στηρίχθηκε σε μεγάλο βαθμό στις εξισώσεις του αρχικού προτύπου (ιδιαίτερα όσον αφορά τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών σε συνθήκες δυναμικής απώλειας στήριξης). Ως εκ τούτου οι εξισώσεις του γενικευμένου προτύπου για τα δύο αυτά μεγέθη δεν έχουν βαθμονομηθεί ειδικά για περιπτώσεις που ξεφεύγουν από την απλή γωνιακή ταλάντωση και επομένως δεν αναμένεται ότι θα παρέχουν κάποιο σαφές πλεονέκτημα σε σχέση με το αρχικό πρότυπο. Και στις δύο περιπτώσεις οι σχέσεις που δίνουν τόσο την αντίσταση όσο και τη ροπή έχουν ως παράμετρο όπως και στον υπολογισμό της άνωσης τις τιμές και τις πρώτες παραγώγους των ταχυτήτων

W_0 και W_1 . Επίσης ορίζεται μία παράμετρος “αποκολλημένης” κυκλοφορίας $\tilde{\Gamma}_2$ που ποσοτικά διαφέρει από αυτή που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της άνωσης.

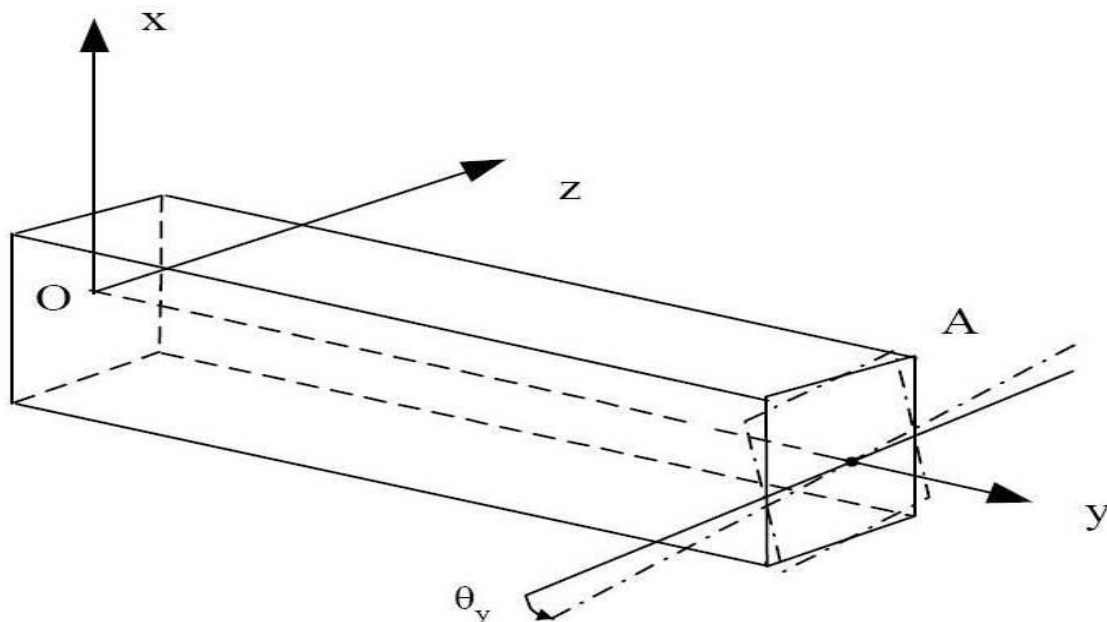
2.2 Ελαστοδυναμική ανάλυση

Τα τμήματα της ανεμογεννήτριας που υπόκεινται σε ελαστοδυναμική ανάλυση είναι :

- ❖ Ο πύργος
- ❖ Το αξονικό σύστημα και ο κλωβός
- ❖ Τα πτερύγια

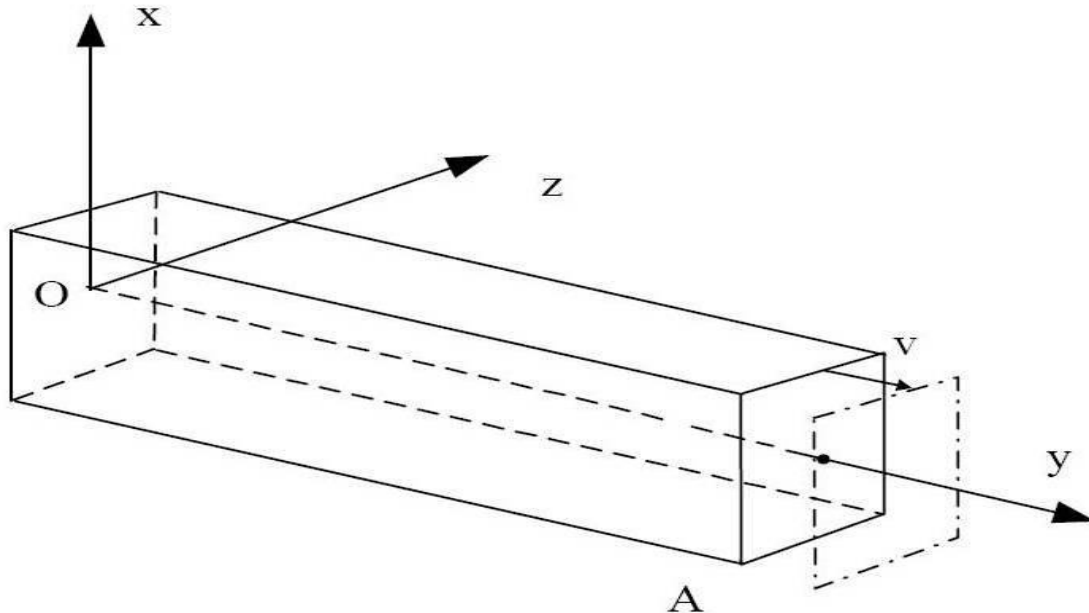
Καθένα από τα τμήματα αυτά θεωρείται χωριστή ελαστική δοκός (μήκος πολύ μεγαλύτερο των διαστάσεων της διατομής) που διέπεται από εξισώσεις για τους ελαστικούς και για τους κινηματικούς βαθμούς ελευθερίας, οι οποίες επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, κάθε παραμορφώσιμο στοιχείο 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 ελαστοδυναμική ανάλυση, λοιπόν, της ανεμογεννήτριας βασίζεται στη θεωρία δοκού, η οποία στηρίζεται 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))



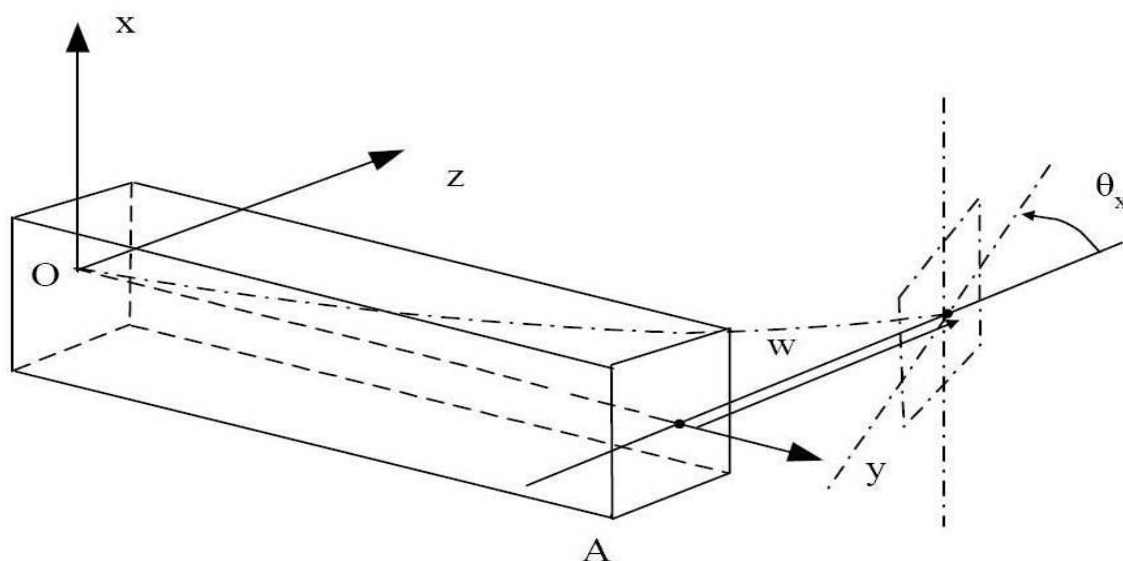
Σχήμα 2.6 : υπόθεση στρέψης

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



Σχήμα 2.7 : υπόθεση εφελκυσμού

Υπόθεση κάμψης ή υπόθεση Bernoulli: η 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 καμπτόμενο άξονα y , ενώ ταυτόχρονα παραμένει επίπεδη και απαραμόρφωτη [Ριζιώτης (2003)].



Σχήμα 2.8 : υπόθεση κάμψης

Το διάνυσμα θέσης \mathbf{r} ενός σημείου στην παραμορφωμένη κατάσταση, ευρισκόμενο σε διατομή A δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\mathbf{r} = \boldsymbol{\xi}_0 + \mathbf{E}\mathbf{u} \quad (2.32)$$

όπου $\boldsymbol{\xi}_0(x,y,z)$ το διάνυσμα θέσης του σημείου στην απαραμόρφωτη κατάσταση, \mathbf{u} το διάνυσμα των μετακινήσεων και των στροφών και \mathbf{E} το ακόλουθο μητρώο :

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -z & 0 & x \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

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

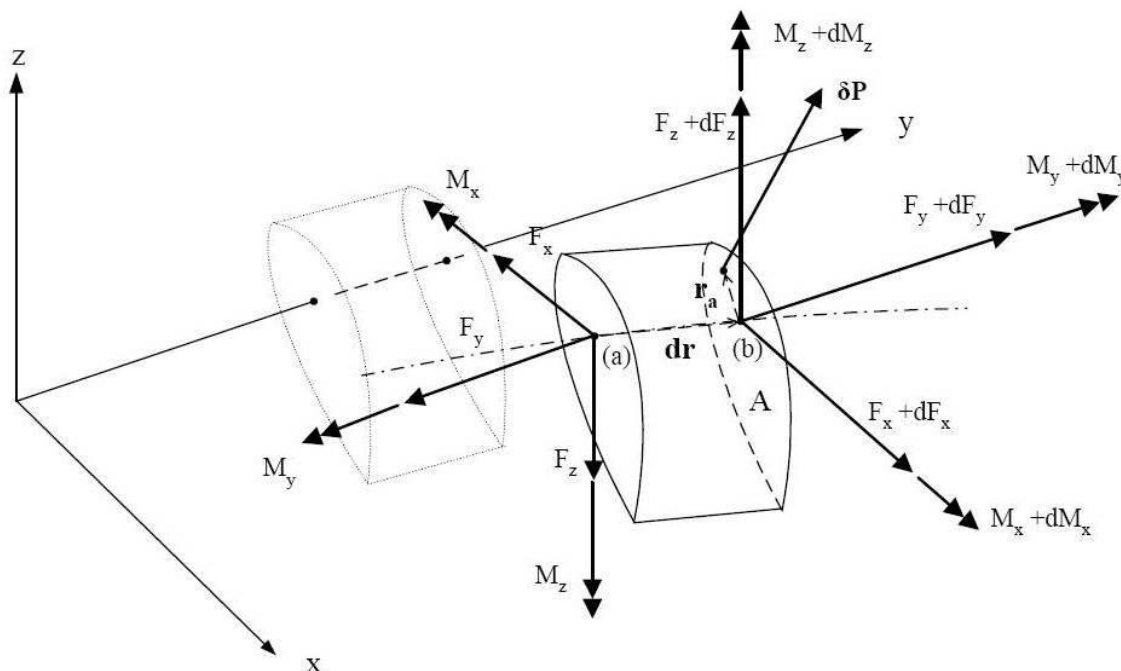
$$F_y = \int \sigma_{yy} dA = \int \mathbf{E} \mathbf{v}' dA \quad (2.34)$$

$$M_x = - \int \sigma_{yy} z dA = - \int (-Exzu'' - Ez^2w'') dA \quad (2.35)$$

$$M_y = - \int (\tau_{xy}z - \tau_{yz}x) dA = \int G(x^2 + z^2) \theta_y' dA \quad (2.36)$$

$$M_z = \int \sigma_{yy} x dA = \int (-Exzw'' - Ex^2u'') dA \quad (2.37)$$

όπου $\sigma_{yy}, \tau_{xy}, \tau_{yz}$ η ορθή τάση λόγω κάμψης και εφελκυσμού και οι διατμητικές τάσεις λόγω στρέψης αντίστοιχα.



Σχήμα 2.9 : εσωτερικές αντιδράσεις σε στοιχειώδες τμήμα dr

Στο **σχήμα 2.10** που ακολουθεί φαίνονται τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων των επιμέρους τμημάτων της ανεμογεννήτριας. Αρχικά έχει επιλεγεί ένα καθολικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $O_G X_G Y_G Z_G$ (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 καθολικό σύστημα συντεταγμένων δίνεται από τη σχέση :

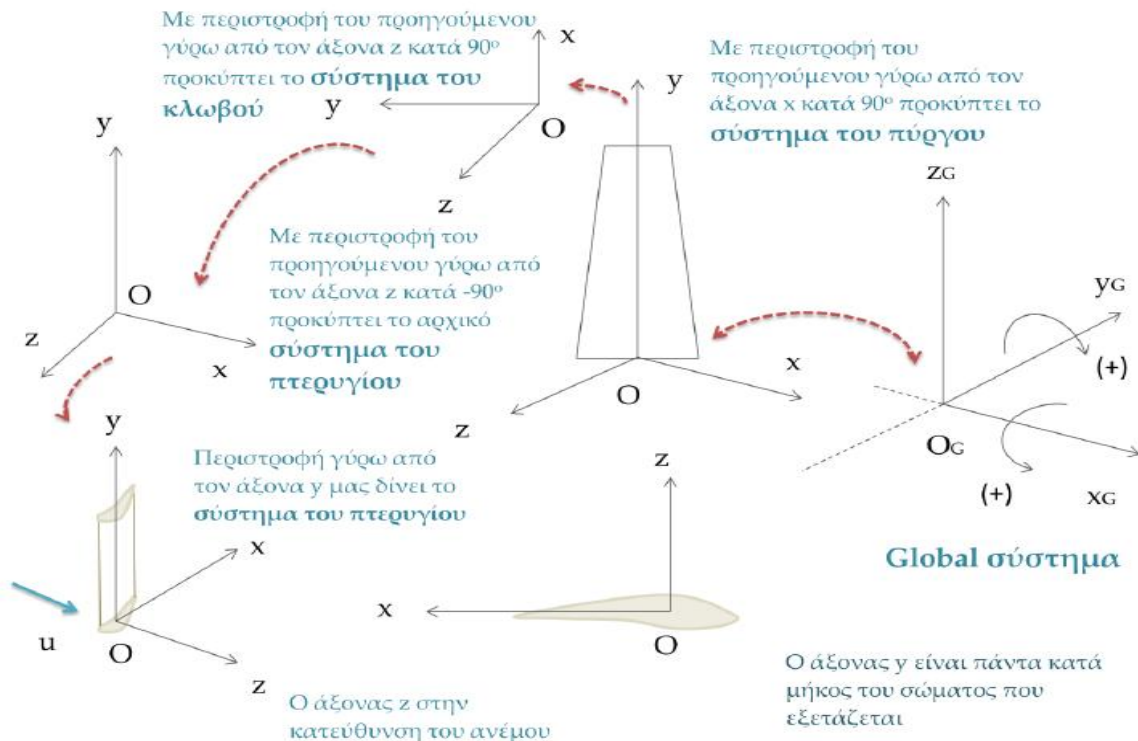
$$\mathbf{r}_{Gk} = \boldsymbol{\rho}_k + \mathbf{A}_k \mathbf{r}_k = \boldsymbol{\rho}_k + \mathbf{A}_k (\boldsymbol{\xi}_0 + \mathbf{E} \mathbf{u}_k), \quad k = 1, N_B \quad (2.38)$$

όπου με N_B συμβολίζεται το πλήθος των σωμάτων, με $\boldsymbol{\rho}_k = \boldsymbol{\rho}_k(t)$ το διάνυσμα θέσης της αρχής του τοπικού συστήματος συντεταγμένων του σώματος που εξετάζεται ως προς το αδρανειακό σύστημα και $\mathbf{A}_k = \mathbf{A}_k(t)$ το μητρώο στροφής από το τοπικό στο καθολικό σύστημα. Τα $\boldsymbol{\rho}_k$ και \mathbf{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 σε μια διατομή A του σώματος k ως προς το καθολικό σύστημα συντεταγμένων σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$\dot{\mathbf{r}}_{Gk} = \dot{\boldsymbol{\rho}}_k + \dot{\mathbf{A}}_k (\boldsymbol{\xi}_0 + \mathbf{E} \mathbf{u}_k) + \mathbf{A}_k \mathbf{E} \dot{\mathbf{u}}_k \quad (2.39)$$

$$\ddot{\mathbf{r}}_{Gk} = \ddot{\boldsymbol{\rho}}_k + \ddot{\mathbf{A}}_k (\boldsymbol{\xi}_0 + \mathbf{E} \mathbf{u}_k) + 2\dot{\mathbf{A}}_k \mathbf{E} \dot{\mathbf{u}}_k + \mathbf{A}_k \mathbf{E} \ddot{\mathbf{u}}_k \quad (2.40)$$



Σχήμα 2.10 : καθολικό σύστημα και τοπικά συστήματα συντεταγμένων των επιμέρους τμημάτων που υπόκεινται σε ελαστοδυναμική ανάλυση

Είναι γνωστό ότι στην άκρη κάθε τμήματος εμφανίζονται έξι βαθμοί ελευθερίας q , δηλαδή τρεις μετακινήσεις και τρεις στροφές. Στη 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 πτερύγια $k=1, B$ (B το πλήθος των πτερυγίων), συνεχίζει με τον άξονα (shaft) $k=B+1$ και ολοκληρώνεται με τον πύργο $k=B+2$.

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 (σχέσεις 2.41):

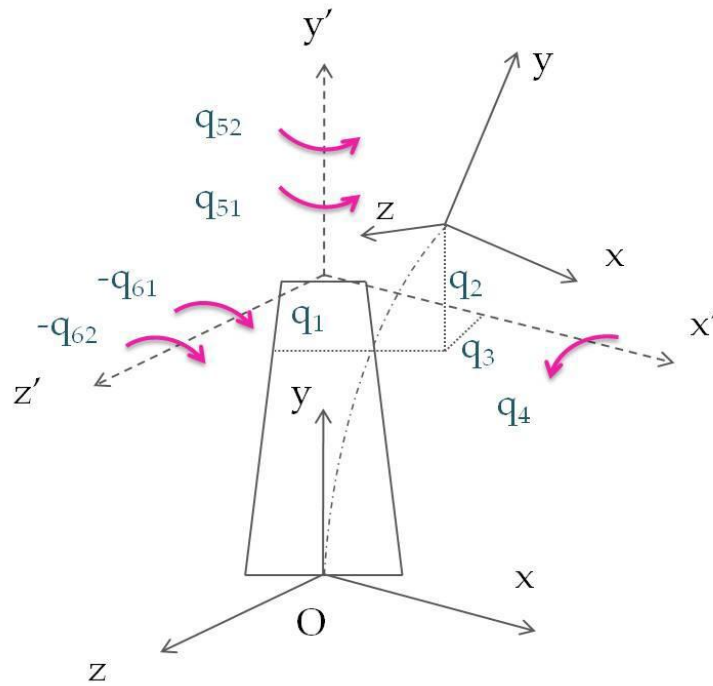
$$(F_{el})_k^i = \sum_m A_m^k \left[\int_{L_m} \left(\int_A (\rho dA \cdot A_m^T g_G) + \delta P_m - \int_A (\rho dA \cdot A_m^T \ddot{r}_{Gm}) \right) dy \right]$$

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

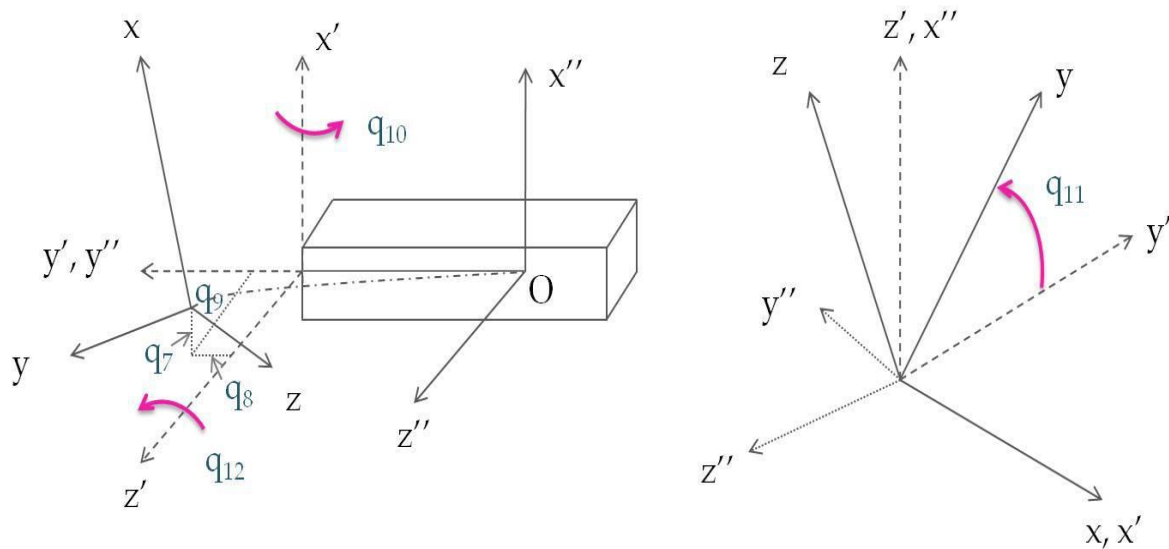
Όπου $(F_{el})_k^i = ((F_{elx})_k^i, (F_{ely})_k^i, (F_{elz})_k^i)^T$ και $(M_{el})_k^i = ((M_{elx})_k^i, (M_{ely})_k^i, (M_{elz})_k^i)^T$. (2.41)

Στις εξισώσεις (2.41) με m συμβολίζεται το κάθε σώμα το οποίο συνδέεται με το k μέσω του άκρου (i) και μεταφέρει σε αυτό φορτία. Αυτό σημαίνει ότι για τον υπολογισμό των αντιδράσεων στο άκρο (2) του αξονικού συστήματος πρέπει να γίνει ολοκλήρωση των φορτίων κατά μήκος των B πτερυγίων, ενώ για τον υπολογισμό των αντιδράσεων στο άκρο (2) του πύργου πρέπει να γίνει ολοκλήρωση των φορτίων κατά μήκος των πτερυγίων και του αξονικού συστήματος. Με A_m^k συμβολίζεται το μητρώο στροφής που οδηγεί 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 $r_{amk}^{(i)} = (x_{amk}^{(i)}, y_{amk}^{(i)}, z_{amk}^{(i)})^T$ το διάνυσμα θέσης του σημείου εφαρμογής των δυνάμεων δP_m ως προς το άκρο (i) του σώματος k και με L_m το μήκος της δοκού m (Ριζιώτης (2003)).

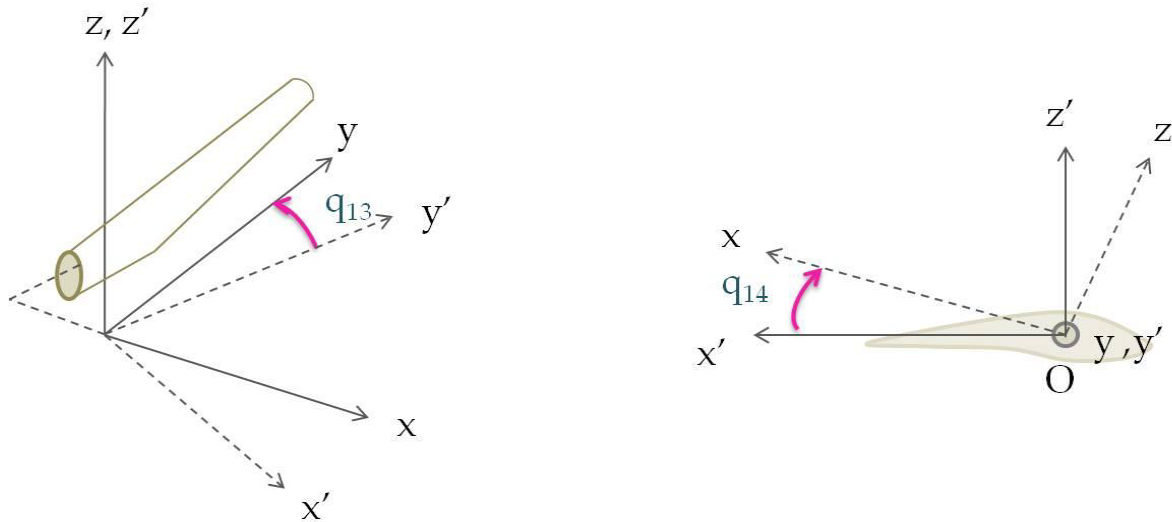
Στα ακόλουθα σχήματα (σχήματα 2.11, 2.12, 2.13) φαίνονται οι έξι βαθμοί ελευθερίας στο άκρο του κάθε σώματος και στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 2.1) περιγράφονται αναλυτικά



Σχήμα 2.11 : κινηματικοί βαθμοί ελευθερίας πύργου



Σχήμα 2.12 : κινηματικοί βαθμοί ελευθερίας άξονα



Σχήμα 2.13 : κινηματικοί βαθμοί ελευθερίας πτερυγίων

Το σύστημα των εξισώσεων (2.41) που αναφέρεται στις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται στο ελεύθερο άκρο κάθε σώματος συμπληρώνεται λαμβάνοντας υπόψη τις δυναμικές εξισώσεις για τους μη ελαστικούς βαθμούς ελευθερίας ($q_{52}, q_{62}, q_{13}, q_{14}$ –βλέπε **πίνακα 2.1**) οι οποίοι είναι συνάρτηση του τύπου της ανεμογεννήτριας. Ακόμα προστίθεται μια συνοριακή συνθήκη, η οποία αφορά στη στρεπτική αντιροπή της ηλεκτρογεννήτριας και η οποία εφαρμόζεται στο άκρο του άξονα και εξαρτάται από τον τύπο της γεννήτριας (ασύγχρονη, σύγχρονη, σταθερών και μεταβλητών στροφών). Η επαγωγή της δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\mathbf{M}_{GEN} = \mathbf{B}(\boldsymbol{\omega}_s - \boldsymbol{\omega}) \quad (2.42)$$

όπου \mathbf{B} η κλίση της χαρακτηριστικής της γεννήτριας, $\boldsymbol{\omega}_s$ οι σύγχρονες στροφές και $\boldsymbol{\omega}$ ταχύτητα περιστροφής 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 την επίτευξη της επιθυμητής ισχύος. Οι βαθμοί ελευθερίας σε αυτό το σημείο διέπονται από την ακόλουθη δυναμική εξίσωση :

$$\mathbf{k}_q \mathbf{q} + \mathbf{c}_q \dot{\mathbf{q}} = (\mathbf{M}_{ext} - \mathbf{M}_{in}) - \mathbf{M}_c \quad (2.43)$$

όπου με $\mathbf{k}_q, \mathbf{c}_q$ συμβολίζονται οι σταθερές ελαστικότητας και απόσβεσης που χαρακτηρίζουν την περιστροφή κατά \mathbf{q} , με $(\mathbf{M}_{ext} - \mathbf{M}_{in})$ συμβολίζεται η διαφορά αδρανειακών και εξωτερικών ροπών γύρω από τον άξονα που γίνεται η περιστροφή κατά \mathbf{q} και με \mathbf{M}_c η ροπή που επιβάλλεται από το σύστημα ελέγχου και η οποία είναι μηδενική όταν η κίνηση είναι ελεύθερη (Ριζιώτης (2003)).

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

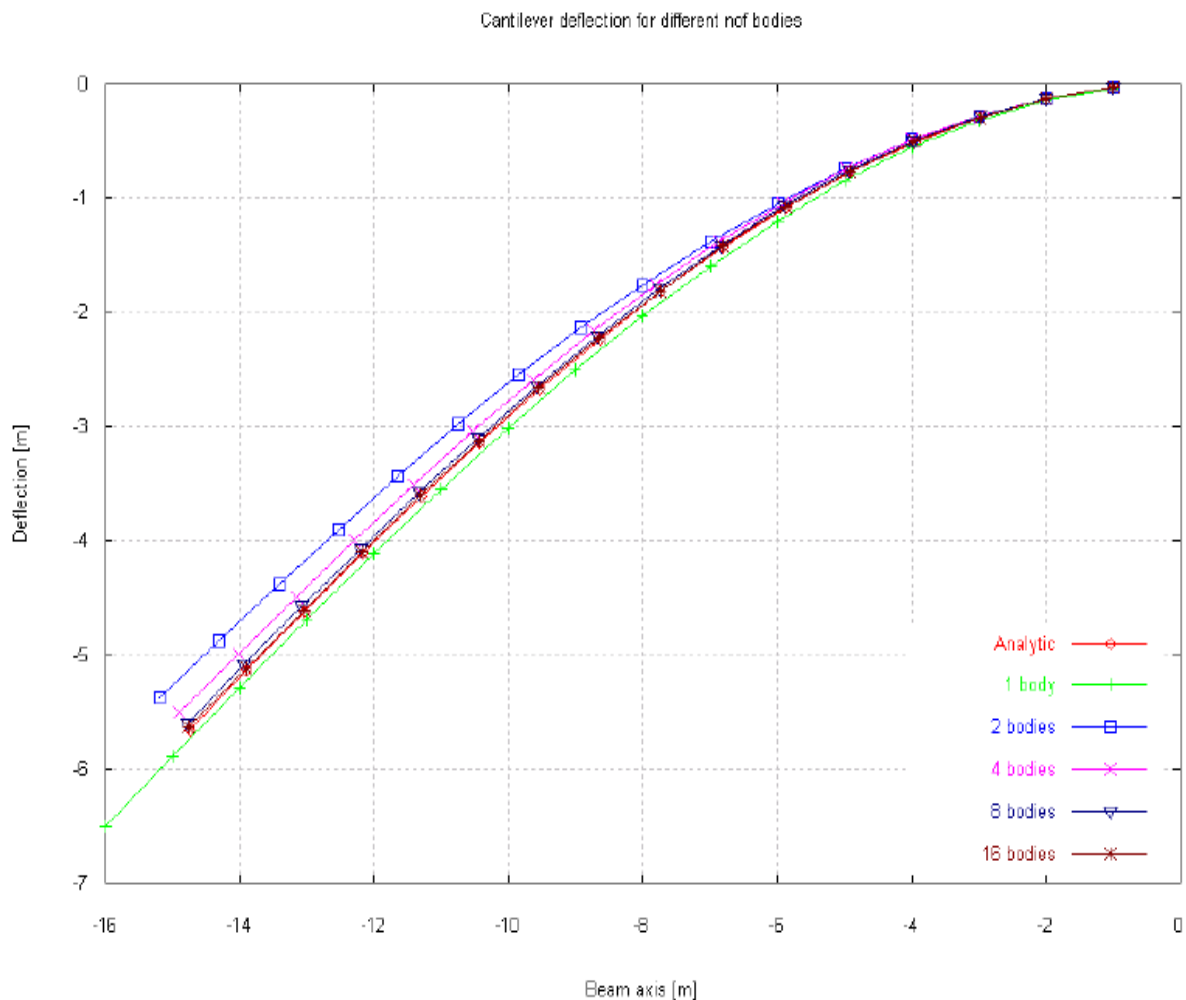
Πίνακας 2.1 : επεξήγηση κινηματικών βαθμών ελευθερίας

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. Η κατασκευαστική πολυπλοκότητα, όμως, αυτών των τμημάτων της μηχανής, 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 και αν φαντάζει είναι η πλέον αποδοτική.

Η προσέγγιση πολλαπλών σωμάτων (multi-body approach) :

Κατά την προσέγγιση αυτή, το κύριο σώμα (body) της πτέρυγας υποδιαιρείται σε ένα σύνολο υποσωμάτων (sub-bodies), καθένα από τα οποία χωρίζεται σε περαιτέρω στοιχεία δοκού Timoshenko. Κάθε υπόσωμα περιλαμβάνει το δικό του σύστημα συντεταγμένων, ενώ υπολογίζονται τα εσωτερικά φορτία αδράνειας καθώς το σύστημα αυτό κινείται στο χώρο.

Το εσωτερικό κάθε υποσώματος αποτελείται από γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία για τα οποία θεωρούμε μικρές καμπτικές και στρεπτικές παραμορφώσεις. Αυτό σημαίνει ότι ένα πτερύγιο το οποίο προσομοιώνεται σαν ένα και μόνο σώμα δεν περιλαμβάνει τις ίδιες μη γραμμικές γεωμετρικές επιδράσεις, που σχετίζονται με μεγάλες παραμορφώσεις, με ένα πτερύγιο χωρισμένο σε αρκετά υποσώματα. Οι επιδράσεις αυτές εξηγούνται πιο καθαρά με το παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.14), το οποίο απεικονίζει τη στατική παραμόρφωση μιας δοκού που υπόκειται σε δύναμη στο άκρο της με κατεύθυνση προς τα αρνητικά του κάθετου άξονα. Οι διαφορετικές καμπύλες δείχνουν την παραμορφωμένη κατάσταση της δοκού και αντιστοιχούν σε διαφορετικές υποδιαίρεσεις του κύριου σώματος (δοκός) σε υποσώματα. Οι καμπύλες αυτές συγκρίνονται επίσης με την καλύτερη δυνατή αναλυτική λύση. Έντονη διαφοροποίηση στο αποτέλεσμα παρατηρείται μεταξύ της μοντελοποίησης που χρησιμοποιεί ένα ενιαίο σώμα και αυτών που υποδιαιρούν το σώμα σε υποσώματα. Στην περίπτωση του ενιαίου σώματος, η άκρη της δοκού δεν κινείται κατά τον οριζόντιο άξονα με αποτέλεσμα να μη διατηρεί το αρχικό της μήκος, όπως θα έπρεπε, παρά να γίνεται αισθητά μακρύτερη. Ήδη με τη διαίρεση του σώματος σε δύο υποσώματα, η παραμόρφωση της δοκού πλησιάζει αρκετά την αναλυτική λύση και όσο ο αριθμός των υποσωμάτων αυξάνεται τόσο η λύση συγκλίνει προς την αναλυτική.



Σχήμα 2.14 : multi-body approach

2.3 Αεροελαστική σύζευξη ^{[4], [5], [6]}

Η επίδραση οποιασδήποτε ελαστικής παραμόρφωσης ή άλλου κινηματικού βαθμού ελευθερίας της κατασκευής(συμπεριλαμβανομένης και της περιστροφής των πτερυγίων) στα αεροδυναμικά φορτία του δρομέα, λαμβάνεται υπόψη μέσω (i) δύο ταχυτήτων \dot{u}, \dot{w} που αποτελούν τις ταχύτητες μετατόπισης των πτερυγίων κατά αξονική και περιφερειακή κατεύθυνση του δρομέα αντίστοιχα (βλέπε **σχήμα 2.15**) και (ii) μιας γωνιακής στροφής θ (και αντίστοιχα ταχύτητας $\dot{\theta}$) που αφορά στη στρέψη των πτερυγίων καθώς και στην επιβαλλόμενη αλλαγή της γωνίας βήματος τους (σε περίπτωση που εξετάζεται δρομέας με ρύθμιση της γωνίας βήματος)

Σε αυτήν την περίπτωση η συνολική φαινόμενη ταχύτητα καθώς και η φαινόμενη γωνία πρόσπτωσης δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις :

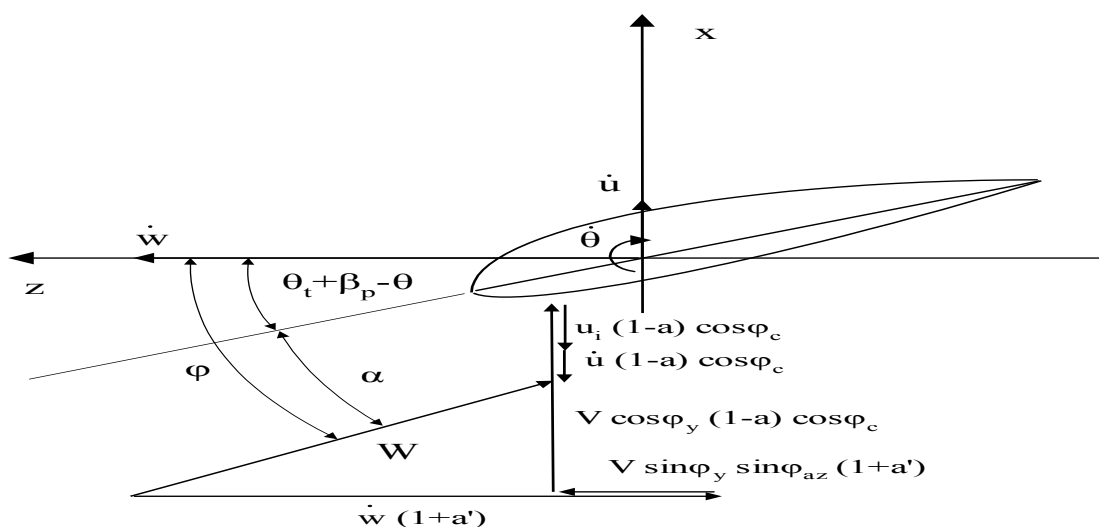
$$W = \sqrt{((V \cos \varphi_y - u_i - \dot{u}) \cdot (1-a) \cos \varphi_c)^2 + ((\dot{w} - V \sin \varphi_y \sin \varphi_{az}) \cdot (1+a'))^2} \quad (2.44)$$

$$\alpha = \varphi - \theta_i - \beta_p + \theta \quad (2.45)$$

Επειδή η φαινόμενη ταχύτητα υπολογίζεται για μία αντιπροσωπευτική θέση στην εκάστοτε αεροτομή, η οποία συνήθως ταυτίζεται με τη θέση από όπου διέρχεται ο διαμήκης άξονας του πτερυγίου, γύρω από τον οποίο γίνεται και η ρύθμιση της γωνίας βήματος αυτού, προκύπτει άμεσα ότι η ταχύτητα λόγω γωνιακής περιστροφής, γύρω από τον άξονα του πτερυγίου έχει μηδενική συνεισφορά στην συνολική φαινόμενη ταχύτητα W . Έτσι, στη σχέση (2.44) υπολογισμού της ταχύτητας W δεν υπεισέρχεται η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής $\dot{\theta}$.

Επιπλέον, ο λόγος ταχυτήτων X_L που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της γωνίας φ , δίνεται από τη σχέση :

$$X_L = \frac{\dot{w} - V \sin \varphi_y \sin \varphi_{az}}{V \cos \varphi_y - u_i - \dot{u}} \quad (2.46)$$



Σχήμα 2.15 : τρίγωνο ταχυτήτων στοιχείου πτερύγωσης όταν λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της ελαστικότητας

Οι δυνάμεις και η ροπή στρέψης που αναπτύσσονται κατά μήκος του κάθε περυγίου υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} F_n &= \frac{\rho}{2} C_n(\alpha) \cdot W^2 \cdot c \cdot \Delta r = \frac{\rho}{2} \cdot (C_L(\alpha) \cdot \cos\varphi + C_D(\alpha) \cdot \sin\varphi) \cdot W^2 \cdot c \cdot \Delta r \\ F_t &= \frac{\rho}{2} C_t(\alpha) \cdot W^2 \cdot c \cdot \Delta r = \frac{\rho}{2} \cdot (C_L(\alpha) \cdot \sin\varphi - C_D(\alpha) \cdot \cos\varphi) \cdot W^2 \cdot c \cdot \Delta r \\ M &= \frac{\rho}{2} C_m(\alpha) \cdot W^2 \cdot c^2 \cdot \Delta r \end{aligned} \quad (2.47)$$

Όπως αναφέρθηκε οι τιμές των συντελεστών C_L , C_D και C_m λαμβάνονται από μετρημένες καμπύλες C_L - α , C_D - α και C_m - α .

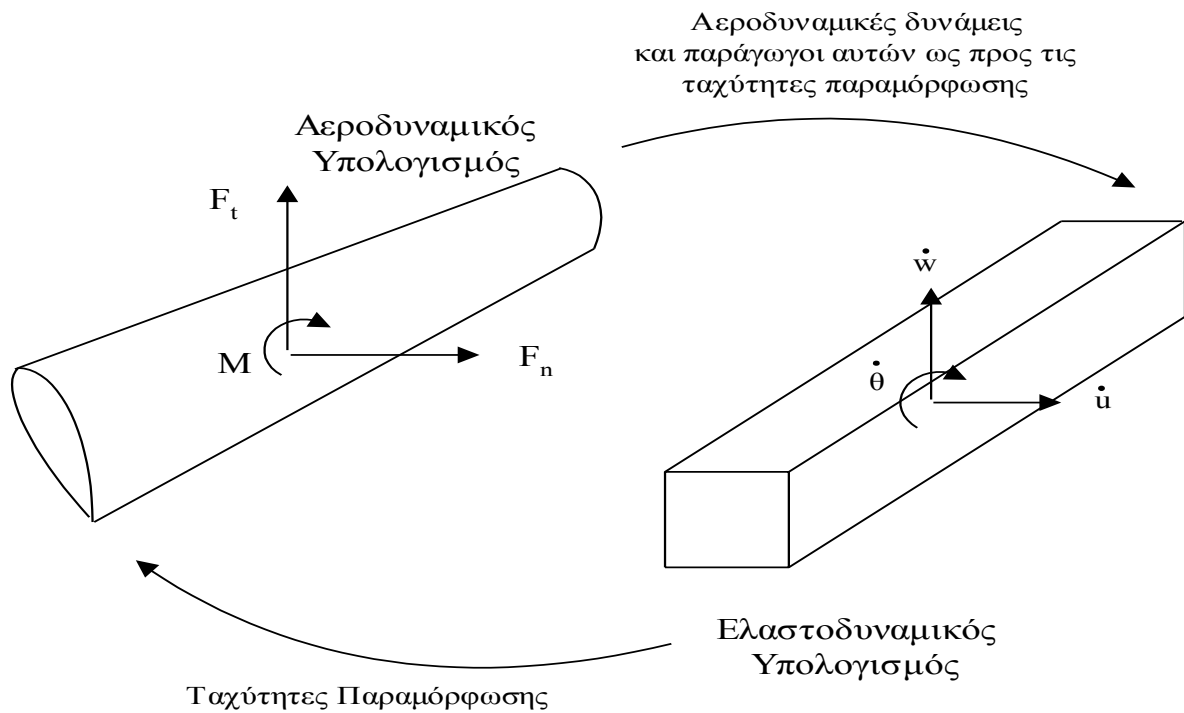
Στην περίπτωση αεροελαστικής σύζευξης οι δυνάμεις και η ροπή στρέψης αποτελούν την είσοδο του ελαστοδυναμικού προβλήματος για τον υπολογισμό των ελαστικών μετακινήσεων. Το γενικευμένο διάνυσμα των αεροδυναμικών φορτίων $\mathbf{F} = \{F_n, F_t, M\}^T$ εξαρτάται από το διάνυσμα των ελαστικών και απολύτως στερεών μετακινήσεων των περυγίων $\dot{\mathbf{u}} = \{\dot{u}, \dot{w}, \dot{\theta}\}^T$. Δεδομένου ότι ο αεροδυναμικός και ο ελαστοδυναμικός υπολογισμός εκτελούνται εναλλάξ, όπως απεικονίζεται στο **σχήμα 2.16**, με μια χρονική καθυστέρηση ίση με το χρονικό βήμα Δt , το διάνυσμα των φορτίων με τα οποία τροφοδοτούνται οι ελαστοδυναμικές εξισώσεις είναι συνάρτηση των μετακινήσεων της προηγούμενης χρονικής στιγμής από αυτήν που εξετάζεται. Έτσι αν $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{u}}^{(n)})$ είναι τα αεροδυναμικά φορτία της τρέχουσας χρονικής στιγμής, αναπτύσσοντας σε σειρά Taylor και διατηρώντας τους όρους πρώτης τάξης έχουμε:

$$\mathbf{F}(\dot{\mathbf{u}}^{(n)}) = \mathbf{F}(\dot{\mathbf{u}}^{(n-1)}) + \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \dot{\mathbf{u}}} \right|^{(n-1)} (\dot{\mathbf{u}}^{(n)} - \dot{\mathbf{u}}^{(n-1)}) \quad (2.48)$$

όπου $\mathbf{F}(\dot{\mathbf{u}}^{(n-1)})$ τα φορτία που έχουμε υπολογίσει στην προηγούμενη χρονική στιγμή. Φαίνεται λοιπόν ότι ως είσοδος των ελαστικών εξισώσεων απαιτείται και η Ιακωβιανή των φορτίων ως προς τις ταχύτητες των ελαστικών μετακινήσεων

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \dot{\mathbf{u}}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_n}{\partial \dot{u}} & \frac{\partial F_n}{\partial \dot{w}} & \frac{\partial F_n}{\partial \dot{\theta}} \\ \frac{\partial F_t}{\partial \dot{u}} & \frac{\partial F_t}{\partial \dot{w}} & \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\theta}} \\ \frac{\partial M}{\partial \dot{u}} & \frac{\partial M}{\partial \dot{w}} & \frac{\partial M}{\partial \dot{\theta}} \end{bmatrix}, \quad (2.49)$$

Η Ιακωβιανή αυτή, λόγω του ότι πολλαπλασιάζεται με την χρονική παράγωγο των μετακινήσεων δίνει έναν όρο απόσβεσης, ο οποίος επειδή σχετίζεται με τα αεροδυναμικά φορτία ονομάζεται αεροδυναμική απόσβεση (aerodynamic damping). Ο υπολογισμός των (2.49) είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί αναλυτικά απευθείας μέσω των σχέσεων (2.47).

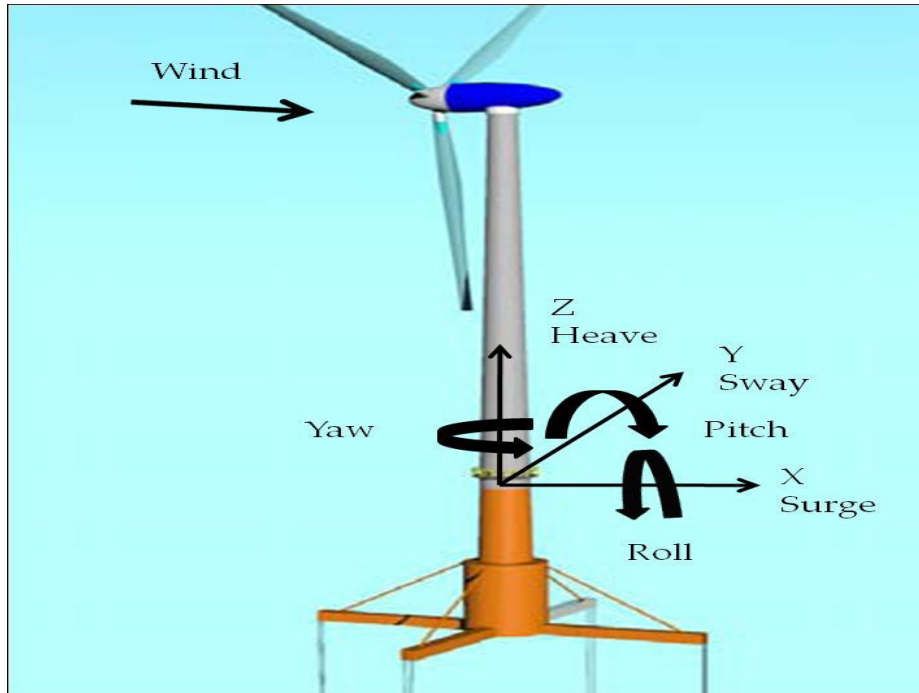


Σχήμα 2.16 : η σύζευξη του αεροδυναμικού και ελαστοδυναμικού προβλήματος

2.4 Υδροδυναμική ανάλυση ^{[2],[7]}

Κατά την ανάλυση του κινηματικού και υδροδυναμικού φορτίου της πλατφόρμας και της δυναμικής του συστήματος αγκυροβόλησης γίνονται δύο βασικές παραδοχές. Η πρώτη αφορά την πλατφόρμα, σύμφωνα με την οποία η πλατφόρμα θεωρείται άκαμπτο σώμα με 6 βαθμούς ελευθερίας (βλέπε **σχήμα 2.17**), 3 μεταφορικούς (ταλάντωση εμπρός-πίσω (surge), ταλάντωση πλευρική (sway) και ταλάντωση πάνω-κάτω (heave)) και 3 περιστροφικούς (περιστροφή (roll), πρόνευση (pitch) και γωνιακή απόκλιση (yaw)), η γωνιακή μετατόπιση των οποίων είναι μικρή. Η δεύτερη παραδοχή αφορά τον τρόπο αντιμετώπισης του υδροδυναμικού προβλήματος, σύμφωνα με τον οποίο γίνεται γραμμικοποίηση του προβλήματος με τις εξής επιμέρους παραδοχές:

- το πλάτος του κύματος είναι πολύ μικρότερο από το μήκος του
- οι μετατοπίσεις της πλατφόρμας είναι μικρές σε σχέση με το μέγεθος της. Με αυτόν τον τρόπο το υδροδυναμικό πρόβλημα χωρίζεται σε πρόβλημα ακτινοβολίας, περίθλασης και υδροστατικό πρόβλημα
- μπορεί να προσδιοριστεί η απόκριση της κατασκευής σε φυσικούς θαλάσσιους σχηματισμούς ως υπέρθεση (superposition) των αποκρίσεων της σε μεμονωμένες συνιστώσες (αρμονικά κύματα)
- δεν υπάρχει θαλάσσιο ρεύμα
- αγνοείται το φορτίο που προκαλείται από τα επιπλέοντα θραύσματα και τον πάγο



Σχήμα 2.17 : βαθμοί ελευθερίας της πλατφόρμας

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 (Jonkman (2007)).

Η τελική μορφή της μη-γραμμικής εξίσωσης κίνησης του πλήρως συζευγμένου συστήματος πλατφόρμας-ανεμογεννήτριας στο πεδίο του χρόνου, είναι η εξής :

$$M_{ij}(q, u, t)\ddot{q}_j = f_i(q, \dot{q}, u, t) \quad (2.50)$$

όπου M_{ij} : μητρώο αδρανειακής μάζας , q : βαθμοί ελευθερίας , u : δεδομένα εισόδου , t : χρόνος , f_i : εξίσωση δύναμης

Το συνολικό εξωτερικό φορτίο που ασκείται στην πλατφόρμα (εκτός από τα φορτία που μεταβιβάζονται από την ανεμογεννήτρια και εκτός του ίδιου βάρους της πλατφόρμας) είναι :

$$F_i^{platform} = -A_{ij}\ddot{q}_j + F_i^{Hydro} + F_i^{lines} \quad (2.51)$$

όπου A_{ij} το μητρώο υδροδυναμικής μάζας που έρχεται να προστεθεί στο μητρώο μάζας M_{ij} της εξίσωσης (2.50), F_i^{Hydro} η εφαρμοζόμενη υδροδυναμική δύναμη στην πλατφόρμα , F_i^{lines} η εφαρμοζόμενη δύναμη στην πλατφόρμα από τη συνεισφορά όλων των σχοινιών πρόσδεσης (mooring lines) του συστήματος αγκυροβόλησης. Οι $F_i^{Hydro} + F_i^{lines}$ προστίθενται στη δύναμη f_i της εξίσωσης (2.50)

Γενικά, μια κατασκευή που εκτίθεται στην επίδραση θαλάσσιων κυματισμών υπόκειται σε δυνάμεις που προκαλούνται από διάφορους μηχανισμούς. Μπορούμε να διακρίνουμε τους ακόλουθους τύπους [7]:

(α) Δυνάμεις Froude-Kryloff : είναι οι δυνάμεις που ασκούνται στο νοητό περίγραμμα της κατασκευής από τους θαλάσσιους κυματισμούς. Η βασική παραδοχή για τον προσδιορισμό τους είναι ότι η παρουσία του σώματος δεν παραμορφώνει το πεδίο ροής, το σώμα δηλαδή είναι σα να μην υπάρχει. Οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται εύκολα με απ' ευθείας ολοκλήρωση της πίεσης του πεδίου ροής του απλού αρμονικού κυματισμού στη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος.

(β) Δυνάμεις Diffraction (περίθλασης) : εάν ληφθεί υπόψη η παρουσία του σώματος και η παραμόρφωση (diffraction) που υφίσταται το πεδίο ροής λόγω αυτής, θεωρώντας όμως το σώμα ακίνητο, τότε θα πρέπει στο δυναμικό της ροής του απλού αρμονικού κυματισμού να προστεθεί και ένα επιπλέον δυναμικό που οφείλεται ακριβώς στην παραμόρφωση και ονομάζεται δυναμικό περίθλασης (diffraction potential). Οι δυνάμεις που βρίσκονται συνυπολογίζοντας τα δύο δυναμικά ονομάζονται δυνάμεις περίθλασης (diffraction forces). Στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας, η υπέρθεση σημαίνει άθροιση των δύο δυναμικών.

(γ) Δυνάμεις radiation (ακτινοβολίας) : εάν επιπλέον θεωρηθεί η κατασκευή κινούμενη, τότε δημιουργούνται κυματισμοί και κατ' επέκταση ένα δυναμικό ροής που με τη σειρά της επάγει στο σώμα δυνάμεις. Στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας το δυναμικό αυτό προστίθεται στα δύο προηγούμενα δυναμικά.

(δ) Δυνάμεις αντίδρασης : Οφείλονται στη συνεκτικότητα του πεδίου ροής και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της ταχύτητας

Επανερχόμενοι, λοιπόν, στο γραμμικό υδροδυναμικό πρόβλημα, η εξίσωση του γραμμικοποιημένου υδροδυναμικού φορτίου συναρτήσει του χρόνου χωρίζεται σε τρία απλούστερα προβλήματα : περίθλασης (diffraction) , ακτινοβολίας (radiation) και υδροστατικής (hydrostatics) και δίνεται στην παρακάτω έκφραση :

$$\mathbf{F}_i^{Hydro} = \mathbf{F}_i^{Waves} + \rho g V_0 \delta_{i3} - \mathbf{C}_{ij}^{Hydrostatic} \mathbf{q}_j - \int_0^t \mathbf{K}_{ij}(t - \tau) \dot{\mathbf{q}}_j(\tau) dt \quad (2.52)$$

Ο πρώτος όρος αναφέρεται στο πρόβλημα περίθλασης και συμβολίζει το συνολικό φορτίο από το προσπίπτον κύμα. Για να μειωθεί η διέγερση από το κύμα πρέπει η πλατφόρμα να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο έξω από την επιφάνεια

Ο δεύτερος και τρίτος όρος της εξίσωσης αναφέρονται στο πρόβλημα υδροστατικής και συγκεκριμένα,

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

$\mathbf{C}_{ij}^{Hydrostatic} \mathbf{q}_j$: 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 $\mathbf{C}_{ij}^{Hydrostatic}$ παρέχει την πληροφορία ότι η υδροστατική μπορεί να

επαναφέρει μόνο τη heave μετακίνηση, τη περιστροφή roll και την πρόνευση pitch, ενώ ελαχιστοποίηση της κίνησης στους άλλους βαθμούς ελευθερίας μπορεί να επιτευχθεί μέσω του συστήματος αγκυροβόλησης

Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης (2.52) αναφέρεται στο πρόβλημα ακτινοβολίας και αντιπροσωπεύει το φορτίο της απόσβεσης της ακτινοβολίας του κύματος. Για να μειωθεί το φορτίο από την ακτινοβολία του κύματος, η πλατφόρμα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο μέρος της έξω από την επιφάνεια της θάλασσας

Το σύστημα αγκυροβόλησης θεωρείται επίσης γραμμικό, οπότε το συνολικό φορτίο που ασκείται στην πλατφόρμα από αυτό και συμβολίζεται με F_i^{lines} στην εξίσωση (2.51) είναι :

$$F_i^{lines} = F_i^{lines,0} - C_{ij}^{lines} q_j \quad (2.53)$$

Όπου $F_i^{lines,0}$ είναι το συνολικό φορτίο από όλες τις γραμμές πρόσδεσης στην πλατφόρμα, όταν αυτή βρίσκεται στη θέση ισορροπίας της και C_{ij}^{lines} στοιχείο του γραμμικού μητρώου επαναφοράς

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες απ' ευθείας πακτωμένες στον πυθμένα (monopile) για τον υπολογισμό του υδροδυναμικού φορτίου χρησιμοποιείται η ανάλυση Morison. Σύμφωνα με αυτήν την ανάλυση η δύναμη ανά μονάδα κατακόρυφου κυλινδρικού φορτίου μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα των αδρανειακών δυνάμεων $((\alpha)+(\gamma))$ και των αντίστοιχων δυνάμεων αντίστασης $(F_D = C_D \rho / 2 U^2 A)$

2.5 Άνεμος

Ο ρεαλιστικός άνεμος παράγεται μέσω μίας φασματικής μεθόδου προσδιορισμού του πεδίου ταχύτητας σε διάφορα σημεία του δίσκου του δρομέα. Στη μέθοδο αυτή πρέπει κανείς να γνωρίζει :

- τη συνάρτηση φάσματος της κάθε συνιστώσας του πεδίου ταχύτητας του ανέμου
- τη συνάρτηση χωρικής συσχέτισης των συνιστωσών του πεδίου ταχύτητας του ανέμου.

Έχοντας ορίσει ένα κυλινδρικό πλέγμα πάνω στο δίσκο του δρομέα μπορεί κανείς να υπολογίσει τις τιμές των παραπάνω συναρτήσεων σε κάθε σημείο του πλέγματος αυτού. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζεται ο φασματικός πίνακας με διαχωρισμό του οποίου λαμβάνονται οι τιμές των συνιστωσών της ταχύτητας του ανέμου στο πεδίο συχνοτήτων. Με εφαρμογή στη συνέχεια αντίστροφου μετασχηματισμού fourier λαμβάνονται οι χρονοσειρές του πεδίου ταχύτητας του ανέμου (Ριζιώτης (2003)). Η μέθοδος αυτή αρχικά προτάθηκε από τον Veers (1988) για την προσομοίωση της αξονικής (κύριας) κατεύθυνσης του ανέμου ενώ βελτίωση της παραπάνω μεθόδου για την προσομοίωση τρισδιάστατου ανέμου προτάθηκε από τον Kelly (1993).

Σε ότι αφορά τις συναρτήσεις φάσματος και χωρικής συσχέτισης στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις Von Karman, Kaimal και η εκθετική σχέση του Davenport (ESDU reports (1990)) αντίστοιχα.

Με την παραπάνω διαδικασία είναι δυνατό να αναπαραχθούν χρονοσειρές στοχαστικού ανέμου, τα στατιστικά χαρακτηριστικά των οποίων είναι όμοια με αυτά μετρημένων χρονοσειρών. Ωστόσο η πιστότητα της αναπαραγωγής εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό και από την ακρίβεια της προσαρμογής μεταξύ μετρημένου και θεωρητικού φάσματος (Mourikis, Riziotis και Voutsinas (1999)). Επιπλέον ο τυχαίος χαρακτήρας της διαδικασίας προσομοίωσης του πεδίου ταχυτήτων έχει ως αποτέλεσμα οι υπολογισμένες χρονοσειρές να διαφέρουν σε σχέση με τις μετρημένες ως προς το στοχαστικό τους μέρος. Σημειώνεται ότι η προσομοίωση του στοχαστικού μέρους της χρονοσειράς στηρίζεται σε μια Gaussian κατανομή των τιμών της ταχύτητας και σε μια τυχαία κατανομή των φάσεων – δηλαδή της αλληλουχίας των διαφόρων τιμών στη χρονοσειρά. Το γεγονός αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό των φορτίων κόπωσης καθώς είναι λογικό ότι δύο χρονοσειρές ανέμου με ταυτόσημα στατιστικά χαρακτηριστικά δεν προκαλούν την ίδια καταπόνηση σε μια κατασκευή όταν το στοχαστικό τους μέρος διαφέρει. Επομένως για την εκτίμηση της κόπωσης που υφίσταται μια Α/Γ απαιτείται η προσομοίωση της λειτουργίας της για περισσότερα του ενός 10λεπτα στοχαστικού ανέμου, στις ίδιες μέσες συνθήκες διαδικασία που ακολουθήθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία (3 διαφορετικά realizations για τις ίδιες μέσες συνθήκες-βλέπε κεφάλαιο 3)

Τα παραπάνω αφορούν το στοχαστικό τμήμα της ροής. Σε ότι αφορά το ντετερμινιστικό τμήμα αυτής υποθέτουμε ότι το πεδίο του ανέμου, ανάντι της μηχανής, εμφανίζει μία καθ' ύψος μεταβολή σύμφωνη με τον εκθετικό νόμο. Πολλές φορές όμως, ιδιαίτερα σε περιοχές σύνθετης τοπογραφίας, η καθ' ύψος κατανομή της ταχύτητας του ανέμου δεν ακολουθεί τον εκθετικό νόμο. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο ακριβής προσδιορισμός του κατακόρυφου προφίλ της ταχύτητας του ανέμου απαιτεί μετρήσεις σε πολλές κατά το ύψος θέσεις ανάντι του δρομέα.

2.6 Κύμα

Τα αρμονικά κύματα (regular waves), δηλαδή τα κύματα των οποίων η περιοδική ανύψωση αναπαρίσταται ως μια ημιτονοειδής διάδοση συγκεκριμένου πλάτους και συχνότητας (περιόδου) ή μήκους κύματος, περιγράφονται μέσω της κυματικής θεωρίας Airy. Από την άλλη μεριά, ακανόνιστα ή τυχαία κύματα (irregular or random waves) που αντιπροσωπεύουν ποικίλες στοχαστικές καταστάσεις θάλασσας (stochastic sea states) μοντελοποιούνται ως υπέρθεση πολλαπλών κυματικών συνιστωσών που καθορίζονται από ένα κατάλληλο κυματικό φάσμα (wave spectrum). Τα κυριότερα φάσματα που χρησιμοποιούνται είναι το Pierson-Moskowitz και το JONSWAP (Joint North Sea Wave Project). Το Pierson-Moskowitz φάσμα χρησιμοποιείται κυρίως για πλήρως αναπτυγμένες θάλασσες, ενώ το JONSWAP χρησιμοποιείται σε πιο περιορισμένες εφαρμογές, όπως αναπτυσσόμενες θάλασσες (ρηγά ύδατα).^[2]

Από τον κανονισμό σχεδιασμού IEC 61400-3 ^[13] (που αφορά τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες), το μονόπλευρο φάσμα JONSWAP (one-sided JONSWAP spectrum) καθορίζεται ως εξής :

$$S_{\zeta}^{1-sided}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{5}{16} H_s^2 T_p \left(\frac{\omega T_p}{2\pi}\right)^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega T_p}{2\pi}\right)^{-4}\right] [1 - 0,287 \ln(\gamma)] \gamma \exp\left\{-0,5 \left[\frac{\frac{\omega T_p}{2\pi} - 1}{\sigma(\omega)}\right]^2\right\} \quad (2.54)$$

όπου H_s είναι το σημαντικό ύψος κύματος (significant wave height), T_p είναι η μέγιστη φασματική περίοδος (peak spectral period), γ είναι η παράμετρος σχήματος (peak shape parameter) μιας δοσμένης ακανόνιστης κατάστασης θαλάσσης και σ είναι ένας παράγοντας κλίμακας (scaling factor). Οι δύο τελευταίοι όροι σ και γ εξαρτώνται από το ύψος κύματος και την περίοδο και δίνονται ως ακολούθως :

$$\sigma(\omega) = \begin{cases} 0,07 & \text{για } \omega \leq \frac{2\pi}{T_p} \\ 0,09 & \text{για } \omega > \frac{2\pi}{T_p} \end{cases} \quad (2.55)$$

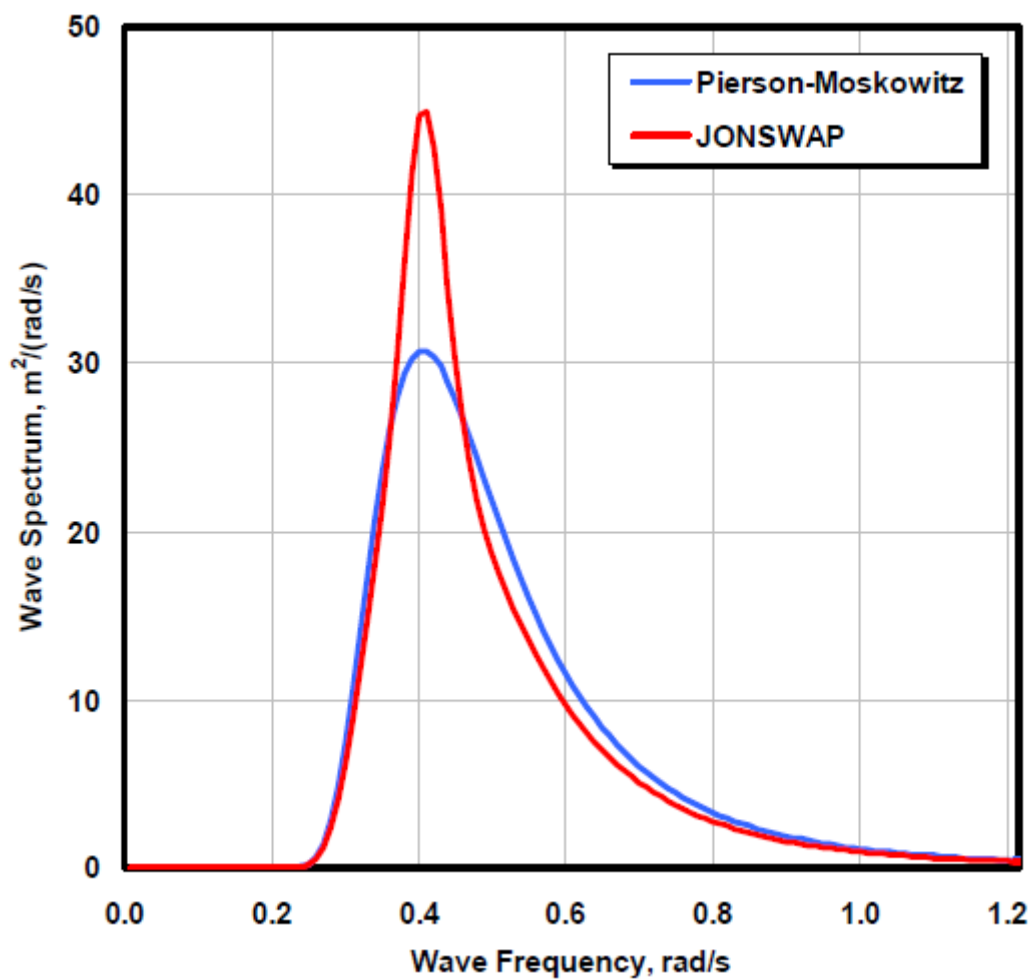
$$\gamma = \begin{cases} 5 & \\ \exp(5,75 - 1,15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}) & \\ 1 & \end{cases} \quad (2.56)$$

Όπου στις (2.56) η πρώτη ισότητα ισχύει για $\frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3,6$, η δεύτερη ισότητα ισχύει για $3,6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 5$ και η τρίτη ισότητα ισχύει για $\frac{T_p}{\sqrt{H_s}} > 5$. Επίσης τα μεγέθη H_s και T_p έχουν μονάδες μέτρα (m) και δευτερόλεπτα (sec) αντίστοιχα.

Όταν η παράμετρος σχήματος γ γίνεται μονάδα ($\gamma=1$), τότε ο τύπος ορισμού του μονόπλευρου φάσματος JONSWAP εκφυλίζεται στο μονόπλευρο φάσμα Pierson-Moskowitz που δίνεται από την εξίσωση (2.57) :

$$S_{\zeta}^{1-sided}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \frac{5}{16} H_s^2 T_p \left(\frac{\omega T_p}{2\pi}\right)^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega T_p}{2\pi}\right)^{-4}\right] \quad (2.57)$$

Στο **σχήμα 2.18** που ακολουθεί, γίνεται σύγκριση του Pierson-Moskowitz και του JONSWAP φάσματος για μια ακραία κατάσταση θαλάσσης (extreme sea state) με σημαντικό ύψος κύματος H_s ίσο με 11,8 μέτρα και φασματική περίοδο T_p ίση με 15,5 δευτερόλεπτα, δεδομένα που αντιστοιχούν σε μια παράμετρο σχήματος περίπου 1,75 στο φάσμα του JONSWAP. Από τη σύγκριση γίνεται σαφές ότι για δύο φάσματα με την ίδια συνολική ενέργεια, το JONSWAP φάσμα εμφανίζει υψηλότερη και στενότερη κορυφή.



Σχήμα 2.18 : σύγκριση JONSWAP και Pierson-Moskowitz φασμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

3

**ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ
ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΠΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

3.1 Ανεμογεννήτρια αναφοράς (Reference Wind Turbine)

Τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας των 5 MW (ανεμογεννήτρια αναφοράς-NREL 5MW) που χρησιμοποιείται για τις αναλύσεις είναι τα ακόλουθα (Πίνακας 3.1):

Όνομαστική ισχύς	5 MW
Τύπος ανεμογεννήτριας	Ανάντι, τρίπτερη
Σύστημα ελέγχου	Μεταβλητών στροφών, μεταβλητής γωνίας βήματος
Σύστημα μετάδοσης κίνησης	Αύξησης στροφών, κιβώτιο ταχυτήτων πολλαπλών βαθμίδων
Διάμετρος δρομέα/πλήμνης	126 m / 3 m
Ύψος πλήμνης	90 m
Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας/ονομαστική ταχύτητα/ταχύτητα αποκοπής	3 m/s / 11,4 m/s / 25 m/s
Έναρξη ρύθμισης στροφών/ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	6,9 rpm / 12,1 rpm
Μέγιστη ταχύτητα ακροπτερυγίου	80 m/s
Κλίση άξονα / γωνία κώνου	5° / 2,5°
Μάζα δρομέα	110000 kg
Μάζα κλωβού	240000 kg
Μάζα πύργου	347460 kg

Πίνακας 3.1 : χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας αναφοράς

Η ανεμογεννήτρια τύπου monopile που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η NREL-offshore 5 MW του OC3-Phase I ^{[9], [10]} .

Η ανεμογεννήτρια τύπου spar-buoy που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η NREL-offshore 5 MW του OC3-Phase IV ^{[9], [11]} .

Οι ιδιοσυχνότητες των δύο αυτών διαφορετικών τύπων υπεράκτιων ανεμογεννητριών, όπως προκύπτουν από ιδιοδιανυσματική ανάλυση με τη βοήθεια του εργαλείου προσομοίωσης HydroGAST, δίνονται στους πίνακες 3.2 , 3.3 . Οι ιδιομορφές που προκύπτουν είναι συζευγμένες μεταξύ τους αλλά παίρνουν το όνομα τους από το τμήμα της κατασκευής που διεγείρεται πιο έντονα από αυτές. Οι ιδιομορφές που παρουσιάζονται στην εικόνα 3.1 περιγράφονται προηγουμένως για την καλύτερη κατανόηση.

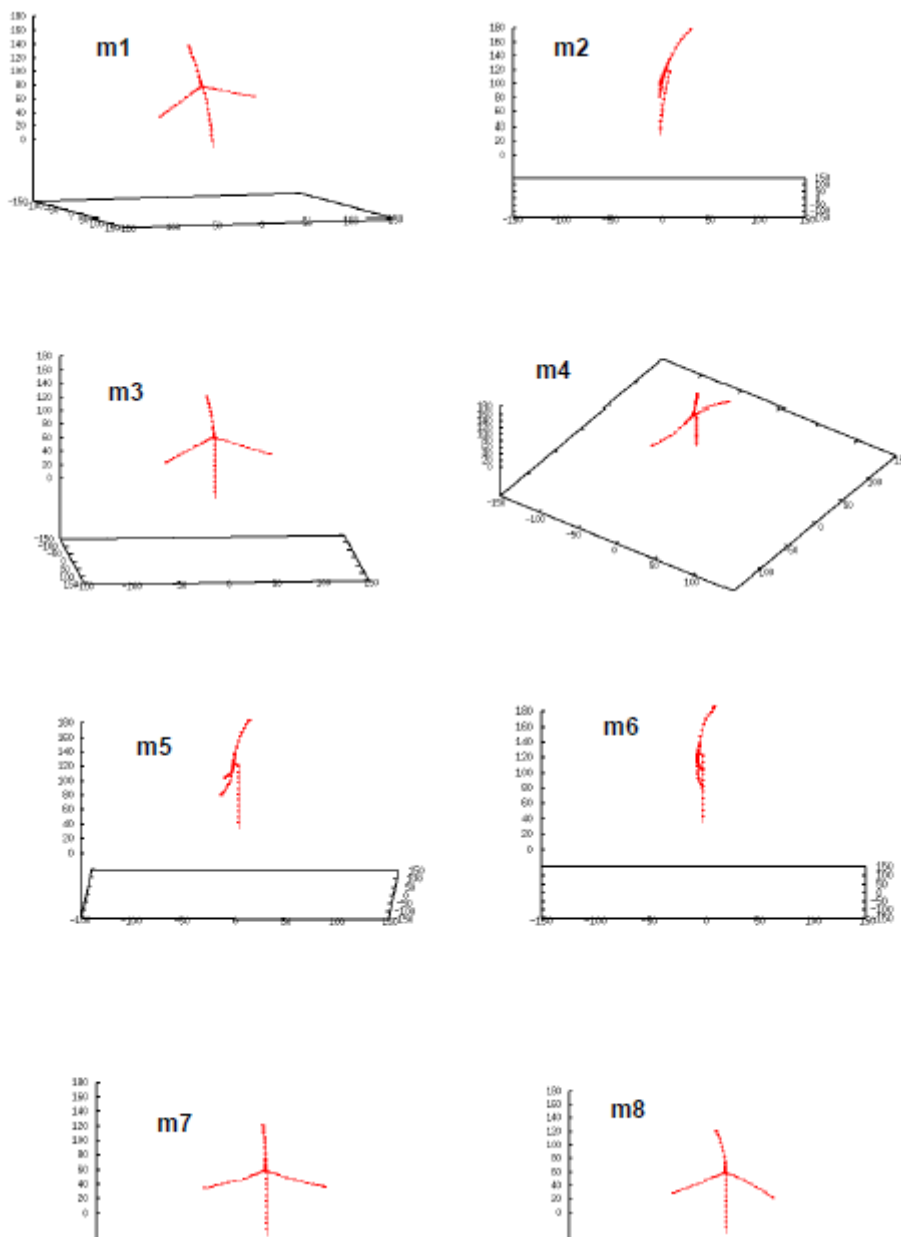
ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΠΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΥΠΟΥ ΜΟΝΟΠΙΛΕ	Ιδιοσυχνότητα (Hz)
1 ^η καμπτική πύργου (πλευρική) [m1]	0,28
1 ^η καμπτική πύργου (εμπρός-πίσω) [m2]	0,28
1 ^η στρεπτική άξονα [m3]	0,60
1 ^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) / στρέψη πύργου [m4]	0,63
1 ^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) / κάμψη πύργου [m5]	0,67
1 ^η συμμετρική δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) [m6]	0,72
1 ^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση περιστροφής) A [m7]	1,08
1 ^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση περιστροφής) B [m8]	1,10

Πίνακας 3.2 : ιδιοσυχνότητες ανεμογεννήτριας τύπου monopile

- **1^η καμπτική πύργου (πλευρική) [m1]** : στην ιδιομορφή αυτή διεγείρεται πιο έντονα ο πύργος στην κατεύθυνση που είναι κάθετη στην κατεύθυνση πνοής του ανέμου. Η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα καθορίζεται κυρίως από τα ελαστικά χαρακτηριστικά και τη μάζα του πύργου καθώς και από τη συνολική μάζα του δρομέα, του κλωβού και της γεννήτριας που βρίσκονται στην κορυφή του πύργου
- **1^η καμπτική πύργου (εμπρός-πίσω) [m2]** : στην ιδιομορφή αυτή διεγείρεται πιο έντονα ο πύργος στην κατεύθυνση που είναι παράλληλη στην κατεύθυνση πνοής του ανέμου. Η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα είναι πολύ κοντά στην πρώτη λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζουν τα ελαστικά χαρακτηριστικά ενός κυλινδρικού πύργου.
- **1^η στρεπτική άξονα [m3]** : 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
- **1^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) / στρέψη πύργου [m4]** : στην ιδιομορφή αυτή διεγείρονται κυρίως τα πτερύγια στην κατεύθυνση πτερύγισης με τρόπο 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
- **1^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) / κάμψη πύργου [m5]** : στην ιδιομορφή αυτή διεγείρονται επίσης τα πτερύγια στην κατεύθυνση πτερύγισης με τρόπο μη συμμετρικό. Η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα ρυθμίζεται από τη μάζα και τα χαρακτηριστικά δυσκαμψίας των πτερυγίων στην κατεύθυνση πτερύγισης και από την καμπτική δυσκαμψία του πύργου

- **1^η συμμετρική δρομέα (κατεύθυνση περύγισης) [m6]** : στην ιδιομορφή αυτή τα περύγια διεγείρονται με τρόπο συμμετρικό. Η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα είναι πολύ κοντά στην ιδιοσυχνότητα των ίδιων των περυγίων στην κατεύθυνση περύγισης, αν αυτά εξεταστούν αποκομμένα από την υπόλοιπη κατασκευή
- **1^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση περιστροφής) A [m7]** : στην ιδιομορφή αυτή διεγείρονται τα περύγια στη κατεύθυνση περιστροφής τους μη συμμετρικά. Η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα σχετίζεται με τη μάζα των περυγίων και την δυσκαμψία στην κατεύθυνση περιστροφής τους
- **1^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση περιστροφής) B [m8]** : η ιδιομορφή αυτή είναι αντίστοιχη προς την προηγούμενη (Ριζιώτης (2003))



Εικόνα 3.1 : ιδιομορφές ανεμογεννήτριας αναφοράς

**ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΥΠΟΥ spar-buoy	Ιδιοσυχνότητα (Hz)
platform surge (x)	0,00811
platform sway (y)	0,00811
platform heave (z)	0,03243
platform roll (θ_x)	0,0346
platform pitch (θ_y)	0,0346
platform yaw (θ_z)	0,12031
1 ^η καμπτική πύργου (πλευρική)	0,456118
1 ^η καμπτική πύργου (εμπρός-πίσω)	0,47308
1 ^η στρεπτική άξονα	0,64536
1 ^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) / στρέψη πύργου	0,67005
1 ^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης) / κάμψη πύργου	0,68677
1 ^η συμμετρική δρομέα (κατεύθυνση πτερύγισης)	0,72533
1 ^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση περιστροφής) A	1,08851
1 ^η ασύμμετρη δρομέα (κατεύθυνση περιστροφής) B	1,10078

Πίνακας 3.3 : ιδιοσυχνότητες ανεμογεννήτριας τύπου spar-buoy

Η εισαγωγή του πλωτήρα συνεπάγεται επιπλέον ιδιοσυχνότητες στο πλήρες σύστημα. Οι ιδιοσυχνότητες αυτές αντιστοιχούν στους 6 βαθμούς ελευθερίας του πλωτήρα (surge, sway, heave, roll, pitch, yaw) και είναι αρκετά χαμηλές.

Οι δύο καμπτικές ιδιοσυχνότητες του πύργου (διαμήκης, πλευρική) αυξάνονται στην περίπτωση του spar-buoy τύπου ανεμογεννήτριας, γεγονός που οφείλεται στη μείωση του μεγέθους της κατασκευής (μείωση ύψους πύργου).

Οι υπόλοιπες ιδιοσυχνότητες που αφορούν το αξονικό σύστημα και το δρομέα, είναι πρακτικά αμετάβλητες, γεγονός αναμενόμενο μιας και δεν υπάρχουν κατασκευαστικές διαφορές σε αυτά τα υποσυστήματα μεταξύ monopile και spar-buoy.

3.2 Περιπτώσεις φορτίσεων σχεδιασμού (DLC)

Η δομική ακεραιότητα μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί μέσα από δυναμική ανάλυση μιας σειράς φορτίσεων σχεδιασμού (DLC's-Design Load Cases). Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι ο προσδιορισμός των ακραίων φορτίων (extreme loads) και των κοπωτικών φορτίων (fatigue loads) που εμφανίζονται σε μια ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια της ζωής της, όταν αυτή υποβάλλεται σε διαφορετικές περιπτώσεις κόπωσης. Οι περιπτώσεις αυτές περιλαμβάνουν λειτουργία σε κανονικές συνθήκες (normal Operating Conditions), έναρξη-σβέση της μηχανής (start-up & shutdown events), ακινητοποιημένη λειτουργία (parked or idling state) υπό κανονικές ή ακραίες εξωτερικές συνθήκες και πιθανά σφάλματα. Στον **πίνακα 3.4** παρουσιάζονται οι DLC's που εφαρμόστηκαν. Κάθε περίπτωση φόρτισης συνοδεύεται από την κατάσταση του ανέμου, τις εξεταζόμενες ταχύτητες ανέμου, την κατεύθυνση πνοής του ανέμου, την κατάσταση της θάλασσας, τη διαφορά φάσης ανέμου και κύματος(συγγραμικά ή υπό γωνία), τη συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου, το συντελεστή ασφαλείας και την απαιτούμενη χρονική διάρκεια εξέτασης του φαινομένου.

ΣΥΝΟΠΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΩΝ DLC's ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ												
dlc	wind	bins	wave	Wind direct.	wind wave misal.	wave Per.	tide	control	num of dlcs	sf	time (sec)	
1,1	NTM	bins11	NSS	wind0	codir	1	MSL	normal	11x3=33	1,25	630	
1,3	ETM	bins11	NSS	wind0	codir	1	MSL	normal	11x3=33	1,35	630	
1,4	ECD+	bins3	NSS	wind3	codir	1	MSL	normal	3x2x3=18	1,35	100	
6.1a	EWM	46 m/s	ESS	0 deg.	angl7	1	50y	no	7x1=7	1,35	630	
6.2a	EWM	46 m/s	ESS	angl12	wave3	1	50y	no	12x3x1=36	1,1	630	
									127			
		bins3	10,12,14					NSS	Hs	6		
		bins7	4,8,12,13,17,21,25					NSS	Tr	10		
		angl7	0,+30,+60,+90,+120,+150,180							ESS	Hs	20
		angl12	0,-+30,-+60,-+90,-+120,-+150,180							ESS	Tr	18
		wind3	wind dir.: 0, +-15									
		wave3	wave, wind mis 0, +-15									
		DEPTH										
50year	20	320	20:for monopile and 320:for spar-buoy									
		bins11	5,7,9,11,4,13,15,17,19,21,23,25									
		wind0	wind dir.: 0 and 3 different realisations for each wind bin									

Πίνακας 3.4 : Δεδομένα των DLC's που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Τα μοντέλα του ανέμου και του κυματισμού που αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα είναι τα ακόλουθα :

Άνεμος

- NTM (Normal Turbulence Model) = κανονικό τυρβώδες μοντέλο
- ETM (Extreme Turbulence Model) = μοντέλο ακραίας τύρβης
- ECD (Extreme Coherent gust with Direction Change) = συνεχής ριπή ανέμου με αλλαγή διεύθυνσης
- EWM (Extreme Wind Model) = ακραίο μοντέλο ανέμου

Κύμα

- NSS (Normal Sea State) = κανονική κατάσταση θάλασσας
- ESS (Extreme Sea State) = ακραία κατάσταση θάλασσας

Στον **πίνακα 3.5** που ακολουθεί δίνονται όλα τα απαραίτητα μεγέθη προσδιορισμού του τυρβώδους ανέμου για κάθε επιβαλλόμενη κατάσταση ανέμου και κάθε πιθανή ταχύτητα στο εξεταζόμενο εύρος ταχυτήτων που αφορούν τις παραπάνω περιπτώσεις φορτίσεων σχεδιασμού.

		Spectrum type: Kaimal				
		bins (m/s)	5,00	7,00	9,00	10,00
NTM	z0	7,257827E-05	1,600392E-04	2,905358E-04	3,727867E-04	5,775161E-04
	σ1	0,657	0,832	1,019	1,116	1,316
	σ2	0,525	0,666	0,815	0,893	1,053
	σ3	0,328	0,416	0,510	0,558	0,658
	Lu	340,20	340,20	340,20	340,20	340,20
	Lv	113,40	113,40	113,40	113,40	113,40
	Lw	27,72	27,72	27,72	27,72	27,72
	a	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
ETM	σ1	2,929	3,110	3,290	3,381	3,562
	σ2	2,343	2,488	2,632	2,705	2,849
	σ3	1,464	1,555	1,645	1,690	1,781
	Lu	340,20	340,20	340,20	340,20	340,20
	Lv	113,40	113,40	113,40	113,40	113,40
	Lw	27,72	27,72	27,72	27,72	27,72
	a	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

bins (m/s)		11,40	13,00	14,00	15,00	17,00
NTM	z0	5,116568E-04	7,006105E-04	8,383578E-04	9,939219E-04	1,345654E-03
	σ1	1,255	1,420	1,526	1,634	1,854
	σ2	1,004	1,136	1,221	1,307	1,484
	σ3	0,628	0,710	0,763	0,817	0,927
	Lu	340,20	340,20	340,20	340,20	340,20
	Lv	113,40	113,40	113,40	113,40	113,40
	Lw	27,72	27,72	27,72	27,72	27,72
	a	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
ETM	σ1	3,507	3,652	3,743	3,833	4,014
	σ2	2,806	2,922	2,994	3,066	3,211
	σ3	1,754	1,826	1,871	1,917	2,007
	Lu	340,20	340,20	340,20	340,20	340,20
	Lv	113,40	113,40	113,40	113,40	113,40
	Lw	27,72	27,72	27,72	27,72	27,72
	a	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

bins (m/s)		19,00	21,00	23,00	25,00
NTM	z0	1,773145E-03	2,264113E-03	2,846145E-03	3,494496E-03
	σ1	2,083	2,318	2,560	2,809
	σ2	1,666	1,854	2,048	2,247
	σ3	1,041	1,159	1,280	1,404
	Lu	340,20	340,20	340,20	340,20
	Lv	113,40	113,40	113,40	113,40
	Lw	27,72	27,72	27,72	27,72
	a	0,14	0,14	0,14	0,14
ETM	σ1	4,195	4,376	4,556	4,737
	σ2	3,356	3,500	3,645	3,790
	σ3	2,097	2,188	2,278	2,369
	Lu	340,20	340,20	340,20	340,20
	Lv	113,40	113,40	113,40	113,40
	Lw	27,72	27,72	27,72	27,72
	a	0,14	0,14	0,14	0,14

**ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

	bin (m/s)	46,00		
EWM	σ1	5,260		l15
	σ2	4,208		zhub
	σ3	2,630		Ac
	Lu	340,20		g
	Lv	113,40		k
	Lw	27,72		Λ1
	a	0,11		c
				Vave

Πίνακας 3.5 : χαρακτηριστικά τυρβώδους ανέμου για όλο το εξεταζόμενο εύρος ταχυτήτων

- Η περίοδος του κύματος T_p και το ύψος κύματος H_s για τα DLC's 6.1a και 6.2a που αναφέρονται σε ακραία κατάσταση θάλασσας (βλέπε ESS στον πίνακα 3.1), υπολογίζονται με τη βοήθεια του IEC 61400-3^[13] ως εξής :

$$H_s = 1 \cdot H_{S_{50}} = 1 \cdot 20 = 20 \text{ m}$$

$$11,1 \cdot \sqrt{\frac{H_{S_{50}}}{g}} \leq T_p \ll 14,3 \cdot \sqrt{\frac{H_{S_{50}}}{g}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 15,85 \leq T_p \leq 20,42 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_p = 18 \text{ sec}$$

- Τα επίπεδα τύρβης των 3 συνιστωσών της ταχύτητας του ανέμου, σ_1 , σ_2 , σ_3 καθώς επίσης και οι κλίμακες μήκους τύρβης L_u , L_v , L_w των 3 συνιστωσών ταχύτητας αντίστοιχα, υπολογίζονται με τη βοήθεια του IEC 61400-3(offshore) και IEC 61400-1(onshore)^[12] ως εξής :

- Για NTM, ETM και EWM ισχύει :

$$\sigma_2 = 0,8 \cdot \sigma_1$$

$$\sigma_3 = 0,5 \cdot \sigma_1$$

$$L_u = 8,1 \cdot \Lambda_1$$

$$L_v = 2,7 \cdot \Lambda_1$$

$$L_w = 0,66 \cdot \Lambda_1$$

- Για Extreme Turbulence Model-ETM ισχύει :

$$\sigma_1 = c \cdot I_{15} \cdot \left[0,072 \cdot \left(\frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \cdot \left(\frac{V_{hub}}{c} - 4 \right) + 10 \right]$$

- Για Extreme Wind Model-EWM ισχύει :

$$\sigma_1 = 0,11 \cdot V_{hub} + 0,2$$

- Για Normal Turbulence Model-NTM ισχύει :

$$Z_0 = \frac{A_c}{g} \cdot \left[\frac{\kappa \cdot V_{hub}}{\ln \left(Z_{hub} / Z_0 \right)} \right]^2$$

$$\sigma_1 = \frac{V_{hub}}{\ln \left(Z_{hub} / Z_0 \right)} + 1,28 \cdot 1,44 \cdot I_{15}$$

Όπου

Z_0 : τραχύτητα επιφανείας

A_c : σταθερά του Charnock

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

κ : σταθερά του Von Karman

V_{hub} : η εξεταζόμενη ταχύτητα στο ύψος πλήμνης

Z_{hub} : ύψος πλήμνης

I_{15} : η μέση τιμή των εντάσεων τύρβης στο ύψος πλήμνης καθορισμένες για ταχύτητα ανέμου 15 m/s

V_{ave} : μέση ταχύτητα ανέμου

Λ_1 : παράμετρος κλίμακας τύρβης

c : σταθερά

Συνοψίζοντας, λοιπόν, έχουμε τον ακόλουθο πίνακα :

i	1(u)	2(v)	3(w)
Standard deviation, σ_i	σ_1	$0,8 \cdot \sigma_1$	$0,5 \cdot \sigma_1$
Length scale, L_i	$8,1 \cdot \Lambda_1$	$2,7 \cdot \Lambda_1$	$0,66 \cdot \Lambda_1$

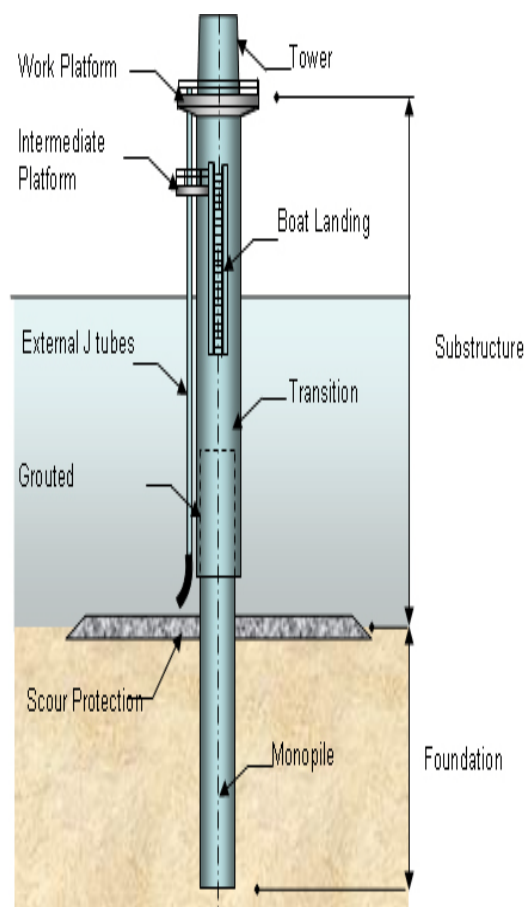
Πίνακας 3.6

Όπου το σ_1 υπολογίζεται ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση ισχύοντος ανέμου

3.3 Φορτίσεις σε υπεράκτια ανεμογεννήτρια τύπου monopile

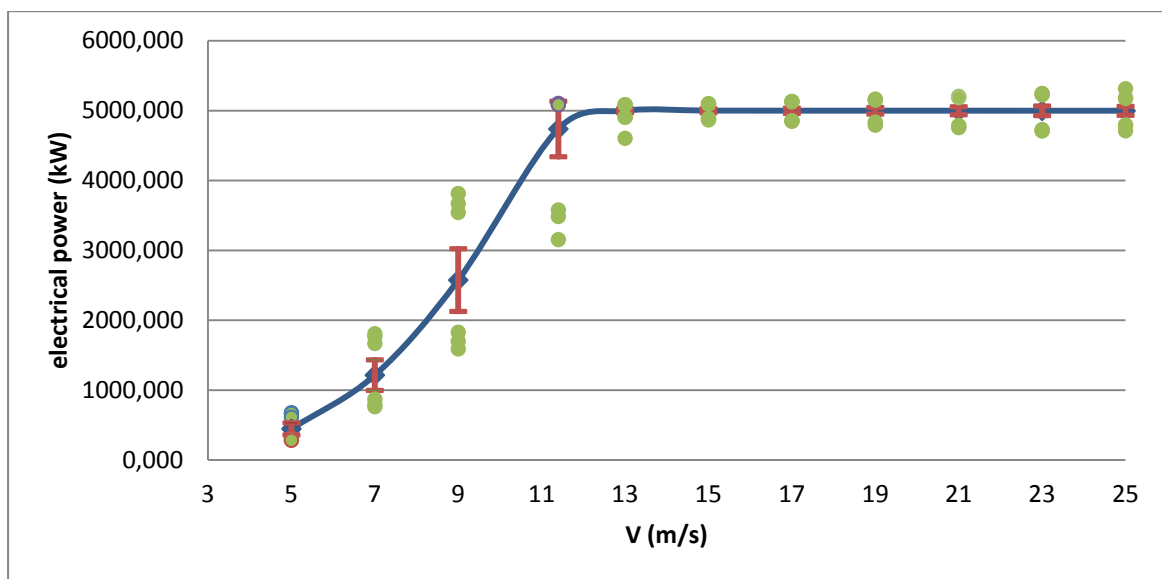


Εικόνα 3.2 : αριστερά: γενική άποψη ανεμογεννήτριας με υποστήριξη τύπου μονοπασσάλου και κάτω : λεπτομέρειες μονοπασσάλου

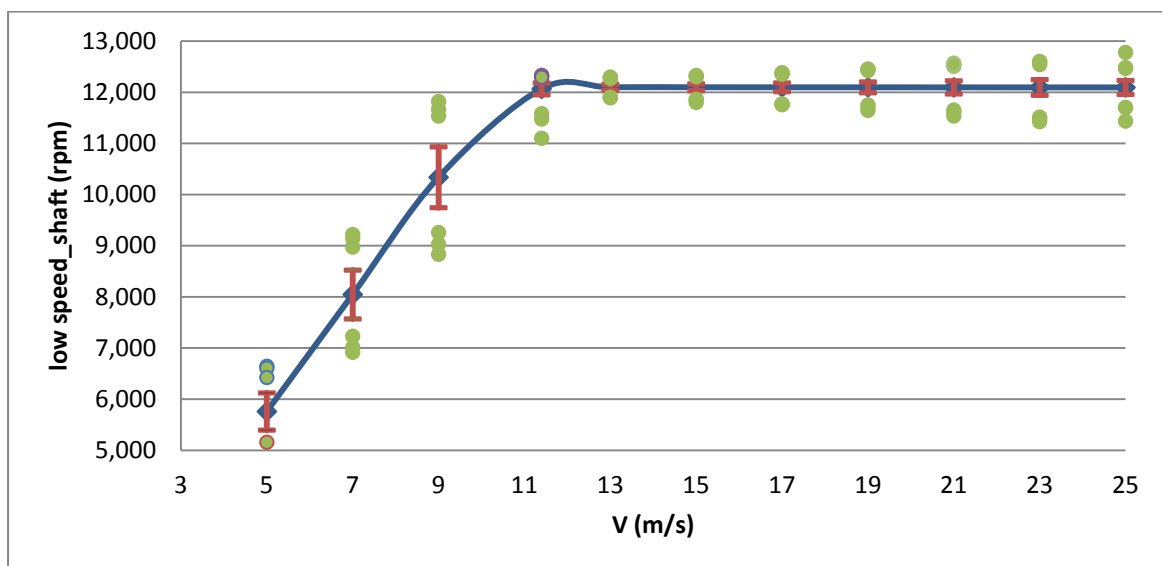


Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης ύστερα από στατιστική επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, με **μπλε** συνεχόμενη γραμμή δίνεται η **μέση τιμή** του εξεταζόμενου μεγέθους, με **κόκκινη μπάρα** δίνεται η **τυπική απόκλιση** του εξεταζόμενου μεγέθους στην εκάστοτε ταχύτητα ανέμου και με **πράσινες κουκίδες** δίνονται οι **απολύτως ελάχιστες** και **οι απολύτως μέγιστες** τιμές του εξεταζόμενου μεγέθους για τις 3 διαφορετικές υλοποιήσεις (realizations) που αντιστοιχούν σε κάθε ταχύτητα

DLC 1.1

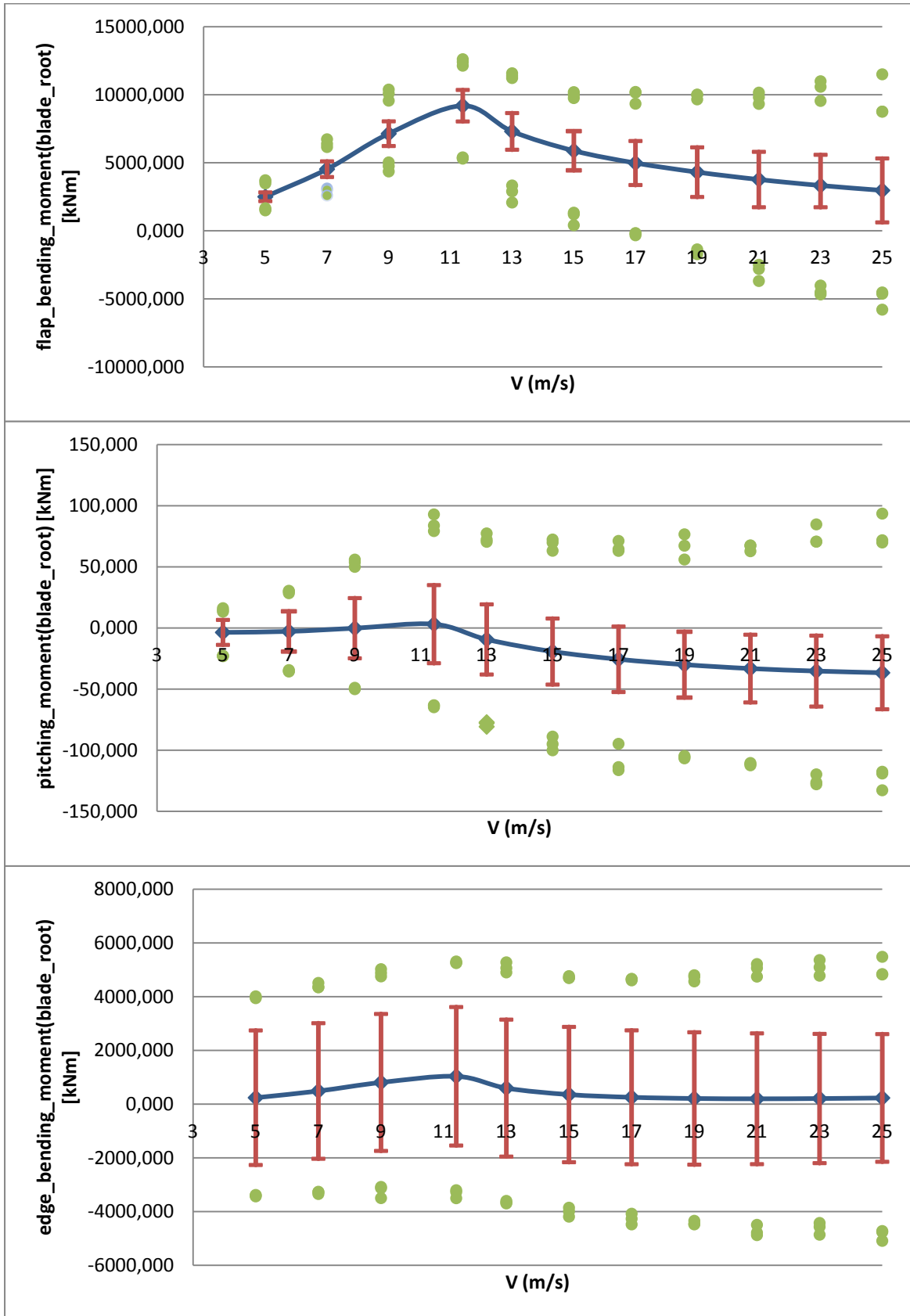


Σχήμα 3.1 : Καμπύλη ηλεκτρικής ισχύος

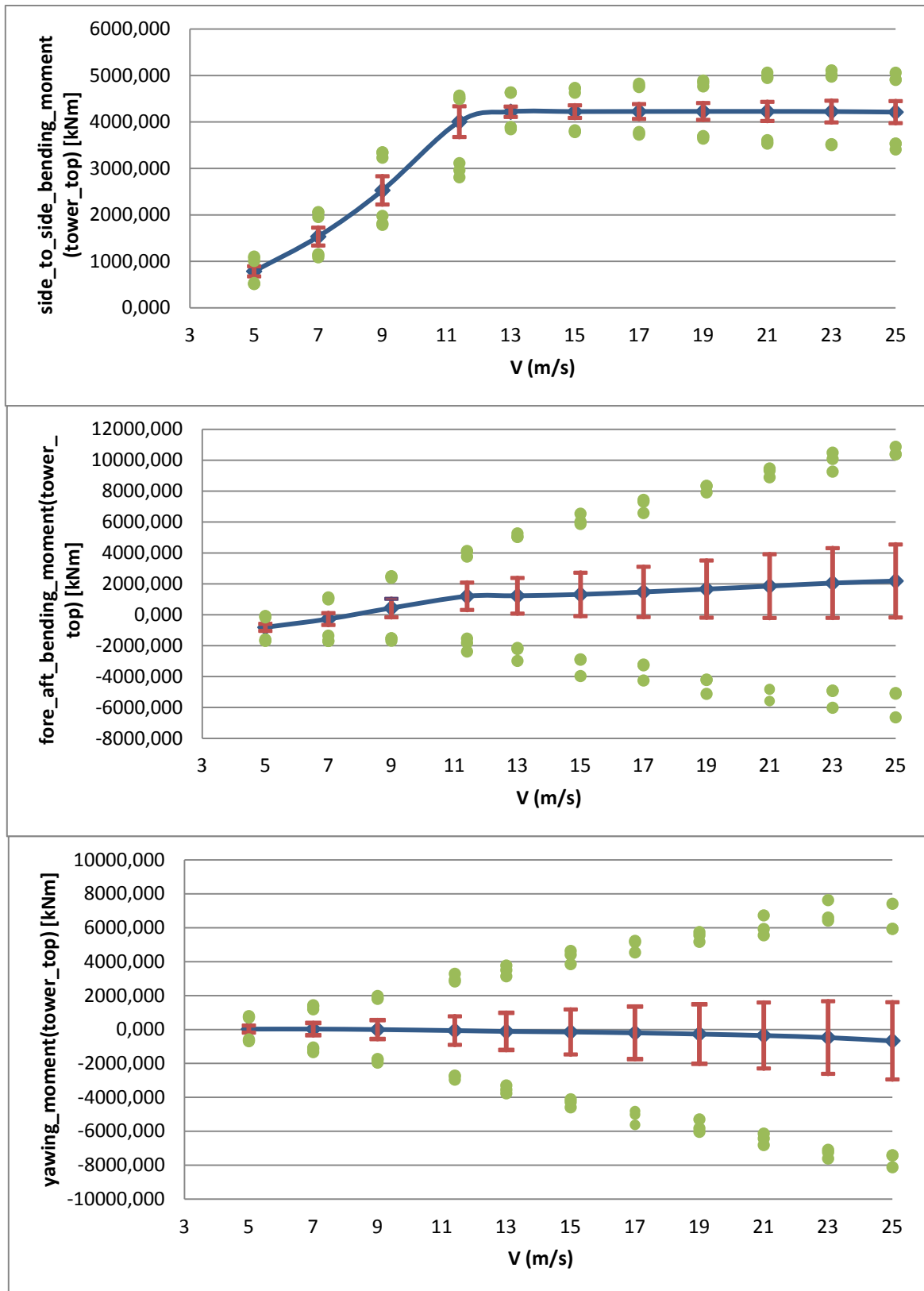


Σχήμα 3.2 : γωνιακή ταχύτητα περιστροφής συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
 ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

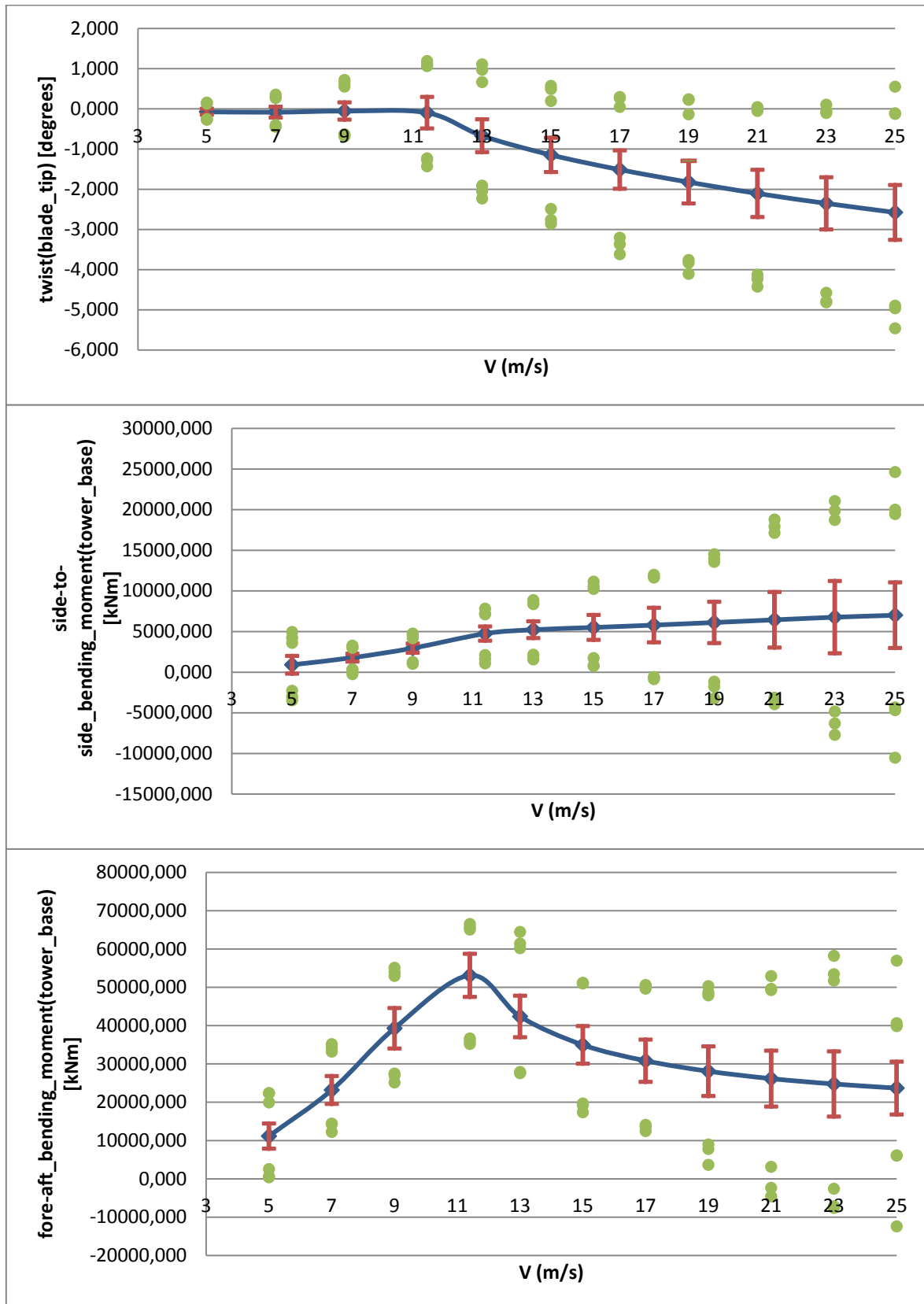


Σχήματα 3.3-3.5 : Ροπές κατά x, y, z στη ρίζα του πτερυγίου συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου

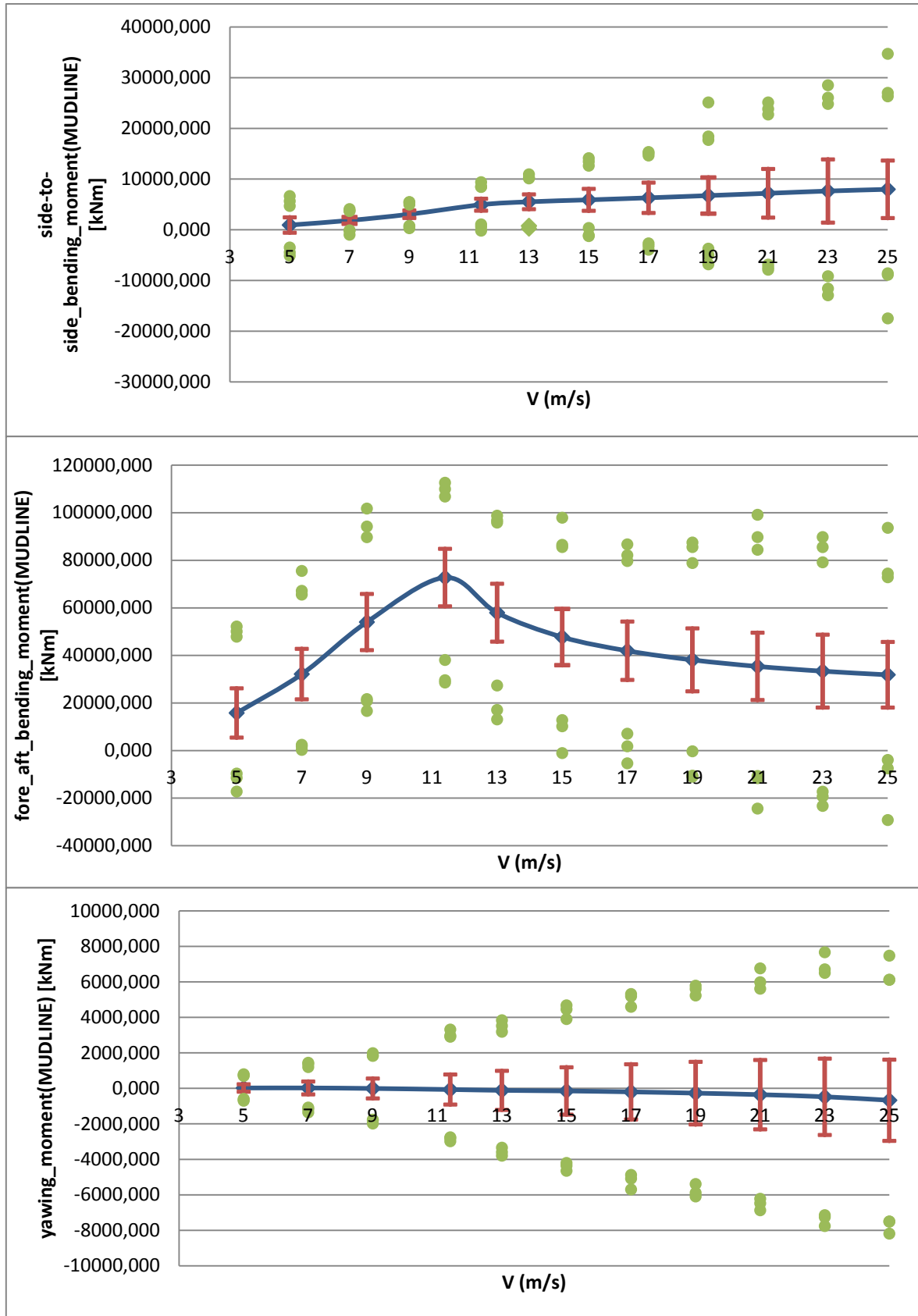


Σχήματα 3.6-3.8 : πλευρική καμπτική ροπή, διαμήκης καμπτική ροπή και ροπή στρέψης στην κορυφή του πύργου αντίστοιχα ως συνάρτηση της ταχύτητας ανέμου

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
 ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



Σχήματα 3.9-3.11 : συστροφή στο ακροπτερύγιο, πλευρική και διαμήκης καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της Α/Γ(σημείο πρόσδεσης με το μονοπάσσαλο)



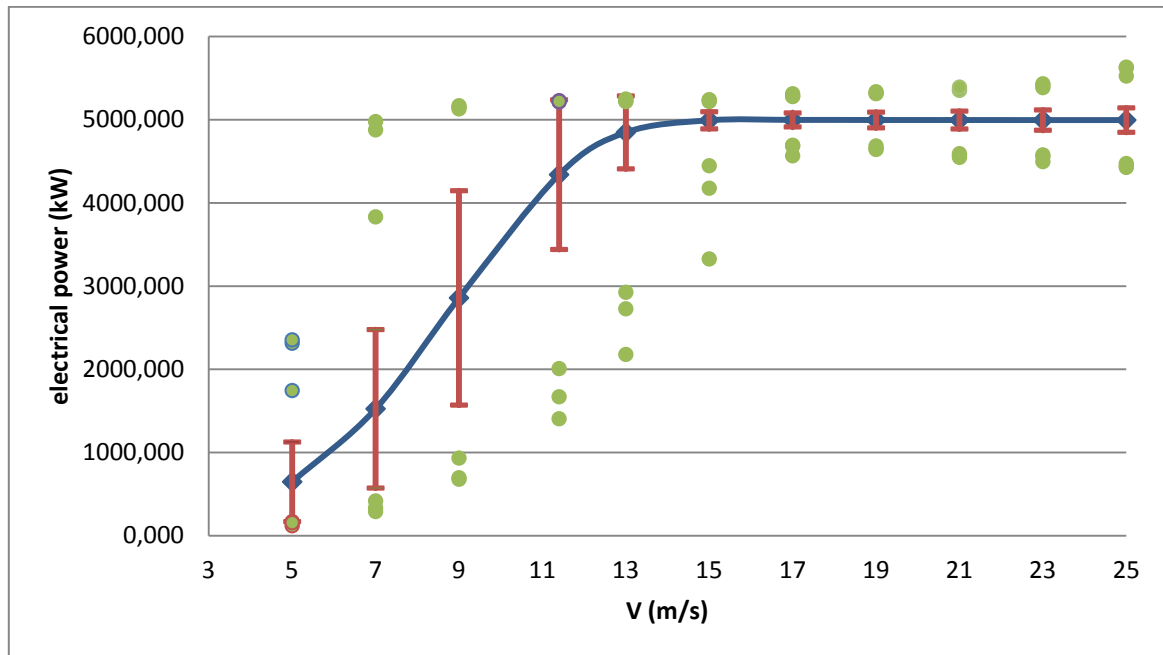
Σχήματα 3.12-3.14 : Καμπτικές ροπές και στρεπτική ροπή στη βάση του μονοριλε(πυθμμένας)

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

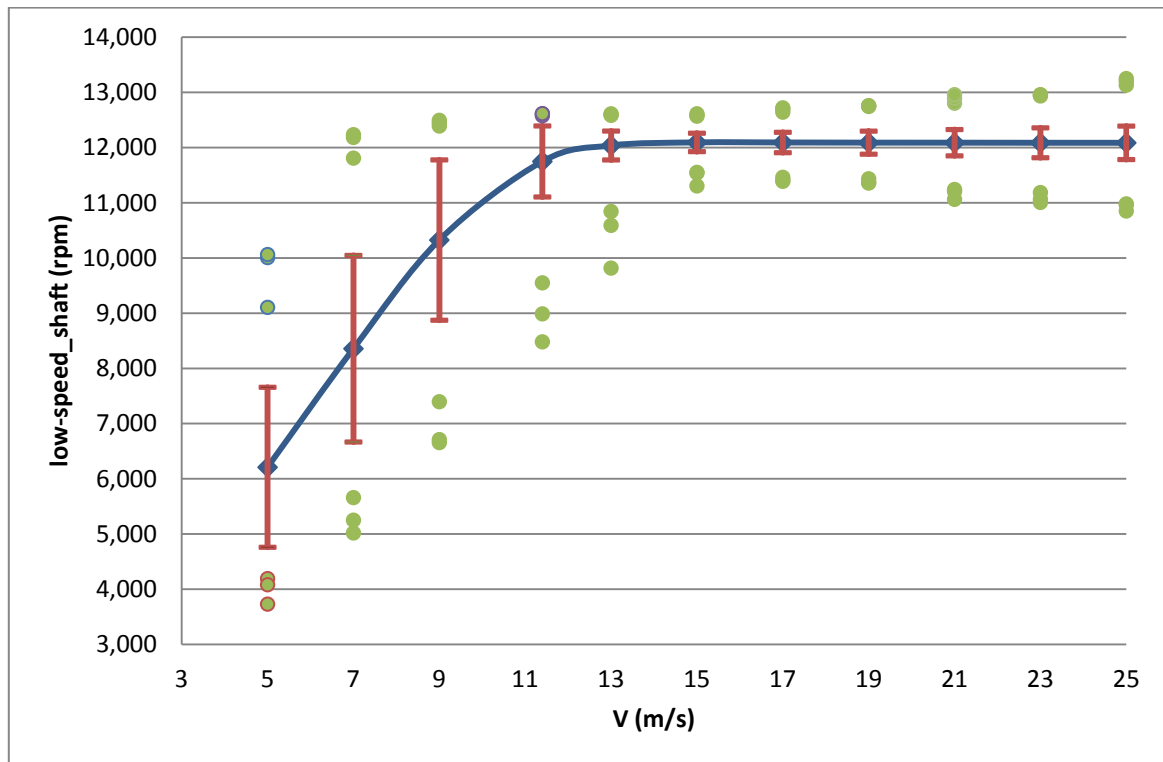
Η καμπύλη της μέσης ισχύος (**σχήμα 3.1**) αυξάνει ραγδαία, κυβικά με την ταχύτητα του ανέμου μέχρι την ονομαστική ταχύτητα (11,4 m/s) και στη συνέχεια διατηρείται σταθερή με τη βοήθεια συστήματος ελέγχου ρύθμισης γωνίας βήματος και διατήρησης σταθερών στροφών. Στο **σχήμα 3.2** δίνεται η συμπεριφορά της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής, ω , με την ταχύτητα του ανέμου, η οποία λειτουργεί ως εξής : στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου (κάτω από την ονομαστική-εδώ 11,4 m/s) αυξάνει γραμμικά και στις υψηλές ταχύτητες (πάνω από την ονομαστική) διατηρείται σταθερή. Η καμπτική ροπή στη ρίζα του πτερυγίου κατά την κατεύθυνση πνοής του ανέμου (**σχήμα 3.3**) φτάνει σε ένα μέγιστο στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας και μετά φθίνει ξανά, γεγονός που εξηγείται από τη συμπεριφορά της αεροδυναμικής ώσης που εμφανίζει επίσης κορυφή στην ονομαστική ταχύτητα και συμβαίνει λόγω της αύξησης της γωνίας βήματος. [2], [19]

Παρόμοια εικόνα με αυτήν της κανονικής λειτουργίας (NTM, NSS) εμφανίζεται και στην περίπτωση του DLC 1.3 (ETM, NSS) με τη μόνη διαφορά ότι παρουσιάζονται ελαφρώς μεγαλύτερα εύρη φορτίσεων που οφείλονται στην αυξημένη τύρβη κατά τη ροή του ανέμου

DLC 1.3

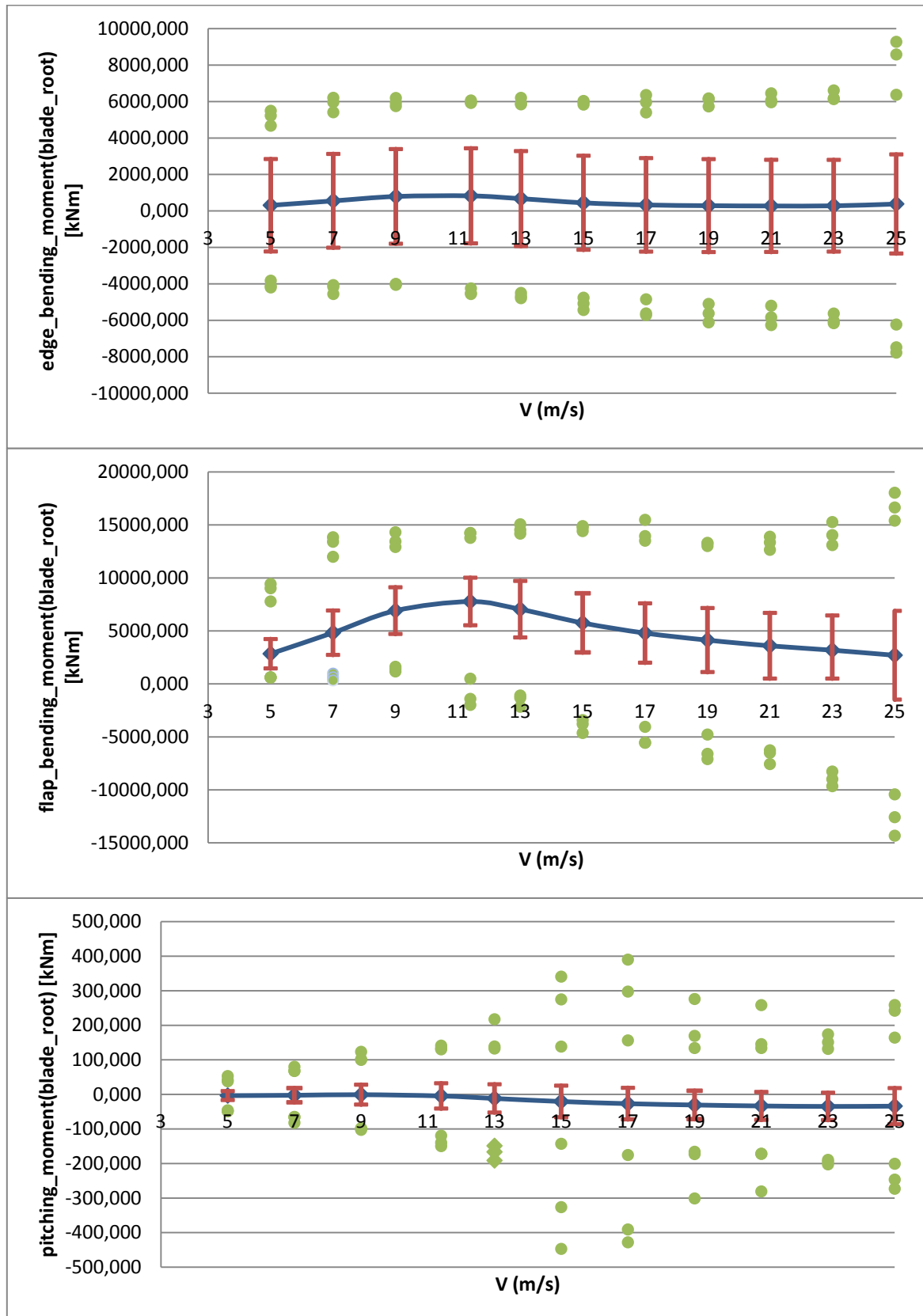


Σχήμα 3.15 : Καμπύλη ηλεκτρικής ισχύος

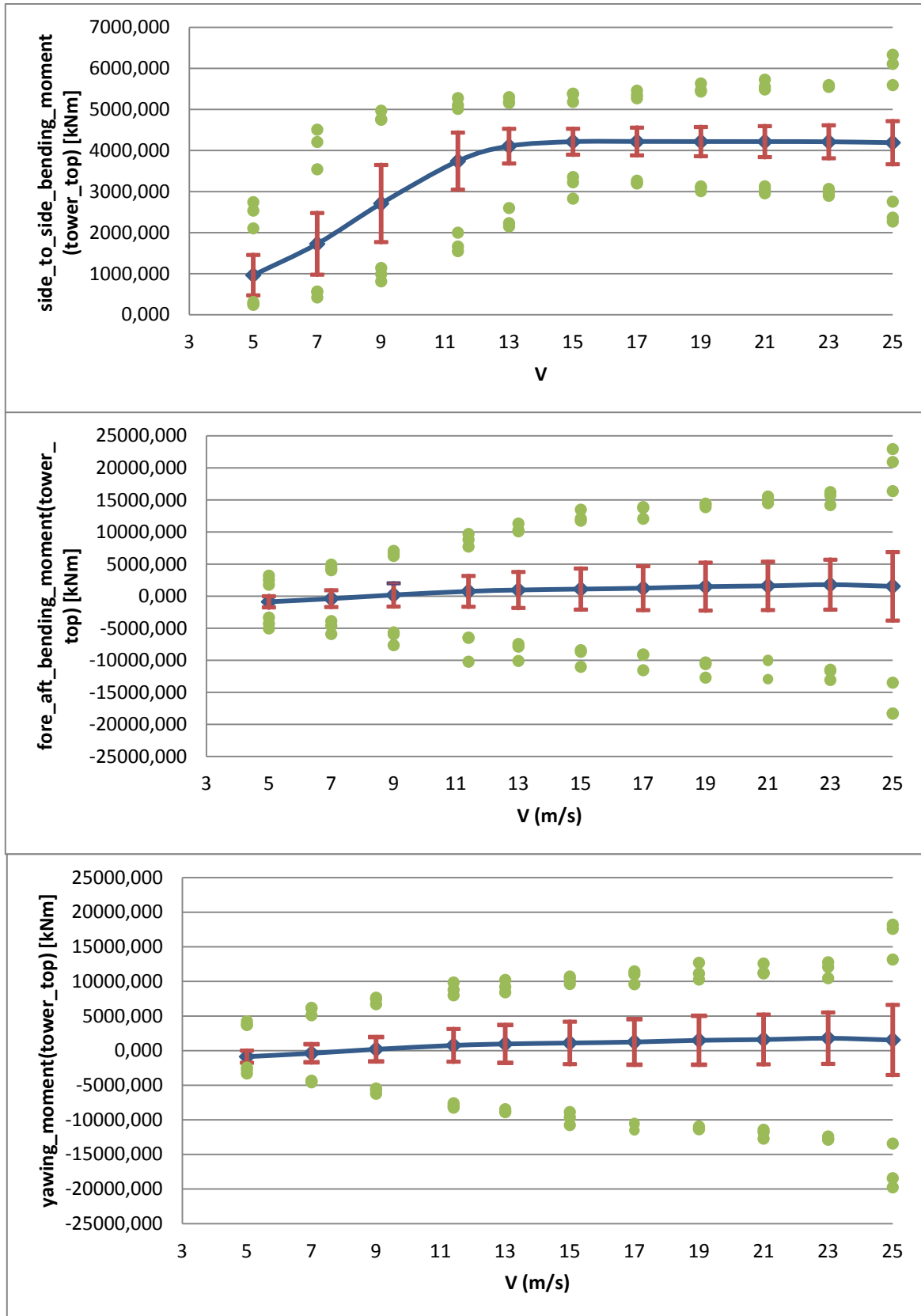


Σχήμα 3.16 : γωνιακή ταχύτητα περιστροφής συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
 ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

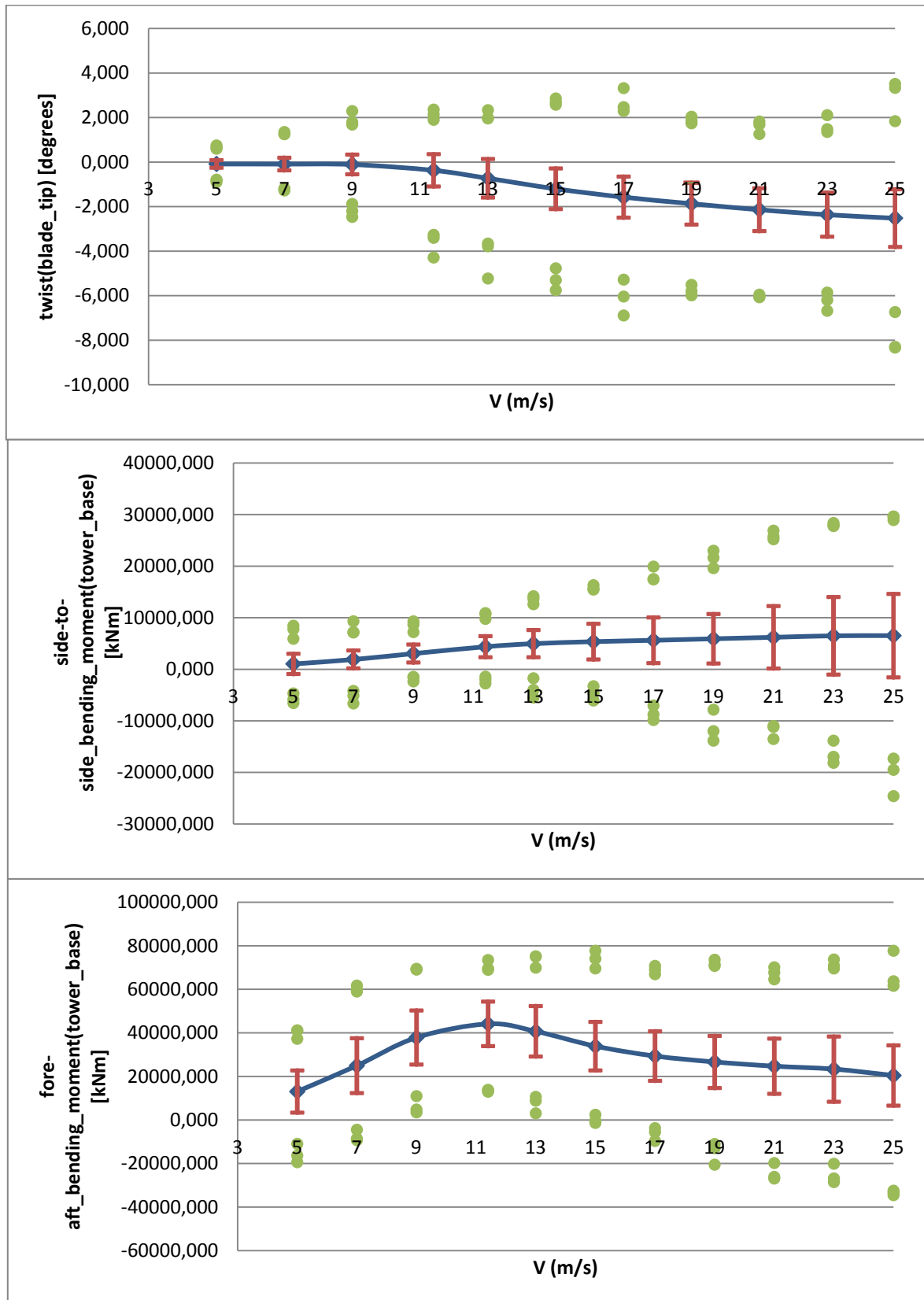


Σχήματα 3.17-3.19 : Ροπές κατά z, x, y στη ρίζα του πτερυγίου συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου

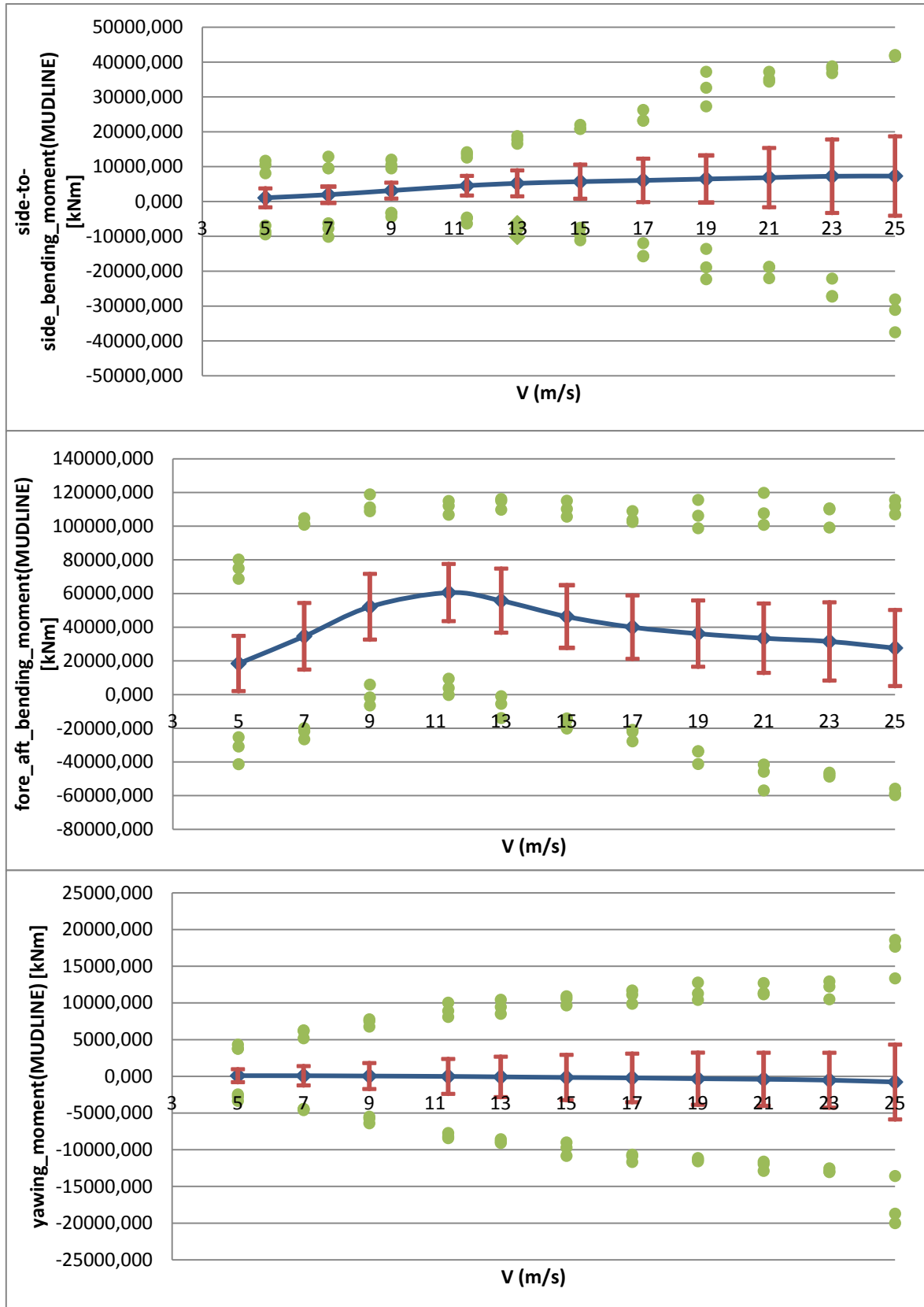


Σχήματα 3.20-3.22 : πλευρική καμπτική ροπή, διαμήκης καμπτική ροπή και ροπή στρέψης στην κορυφή του πύργου αντίστοιχα ως συνάρτηση της ταχύτητας ανέμου

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
 ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



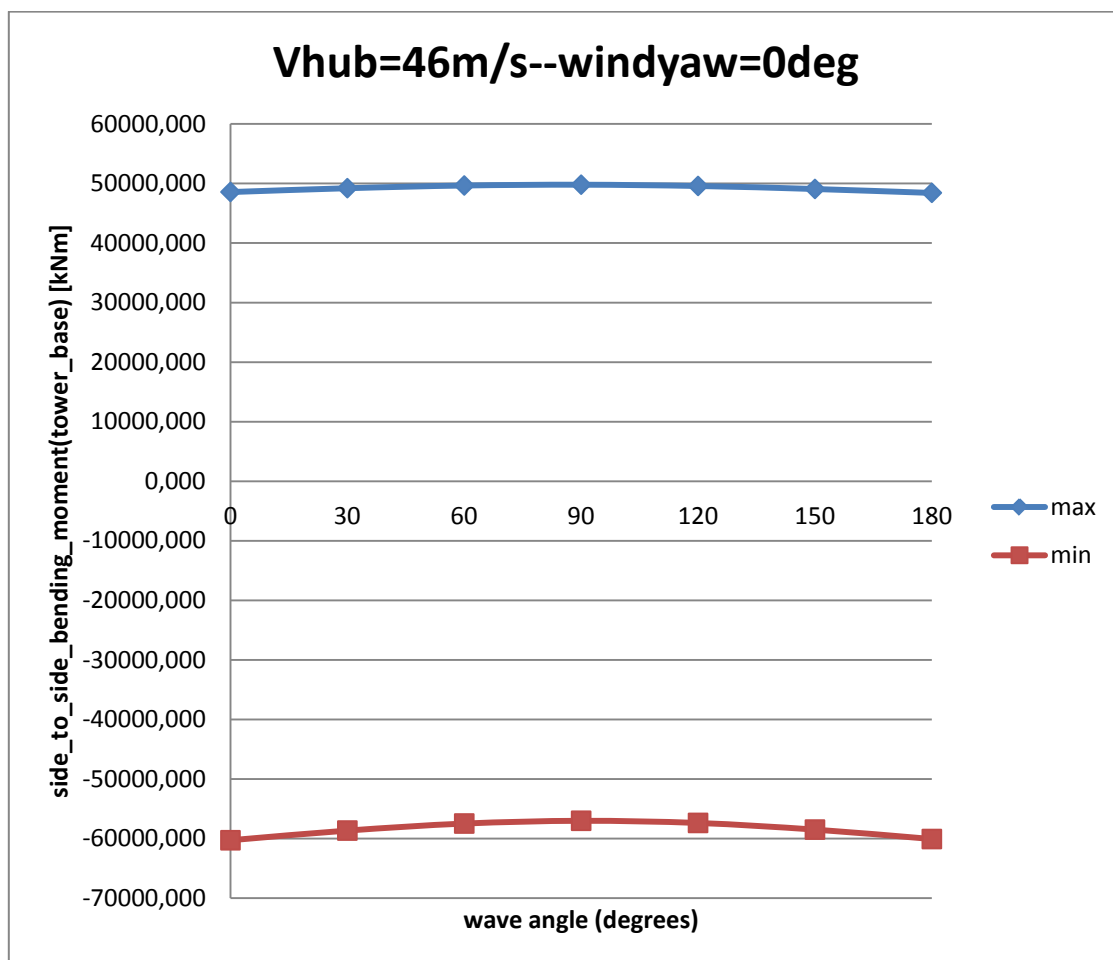
Σχήματα 3.23-3.25 : συστρόφη στο ακροπτερύγιο, πλευρική και διαμήκης καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της Α/Γ(σημείο πρόσδεσης με το μονοπάσσαλο)



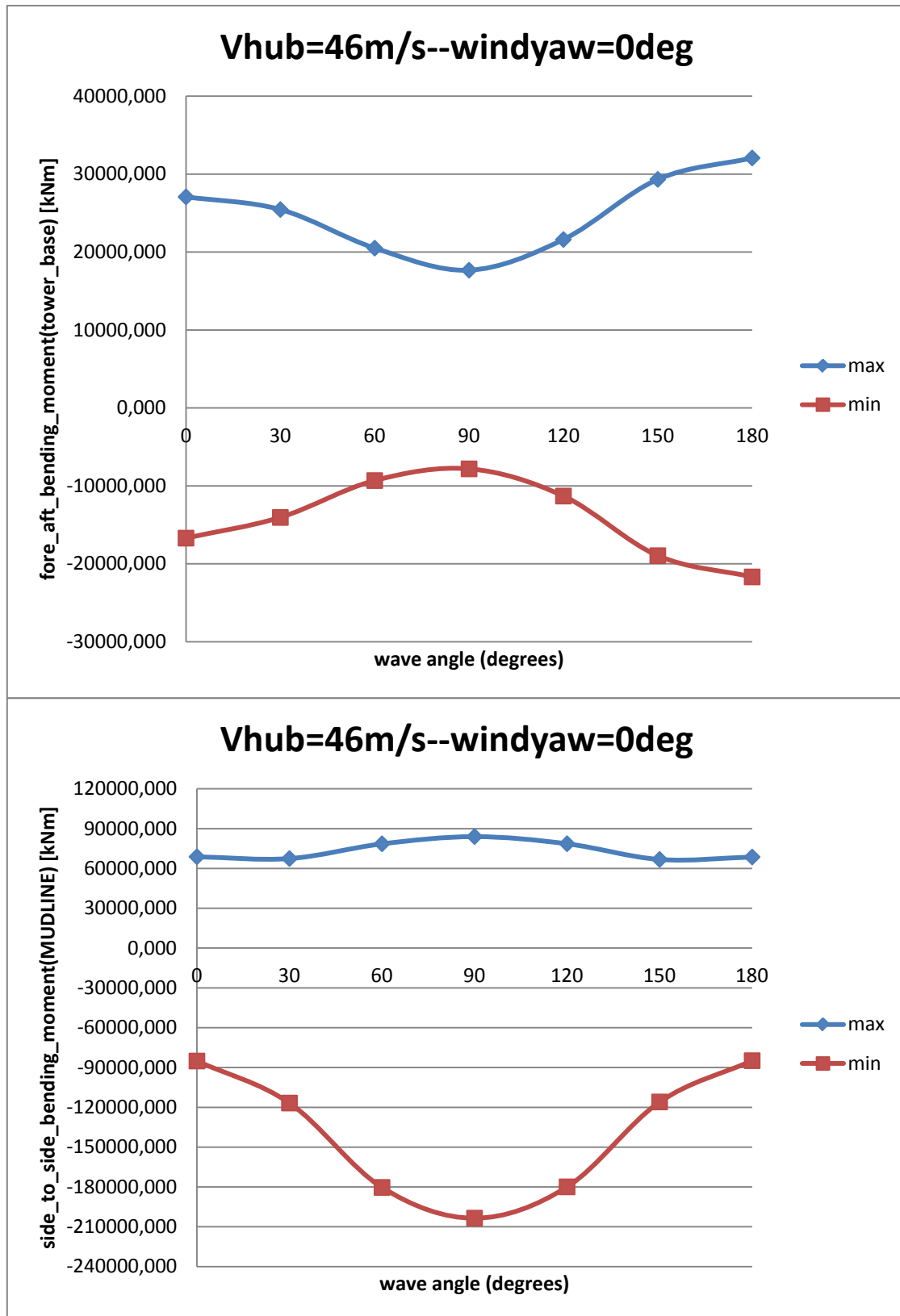
Σχήματα 3.26-3.28 : Καμπτικές ροπές και στρεπτική ροπή στη βάση του μονοπίλε(πυθμένας)

DLC 6.1a

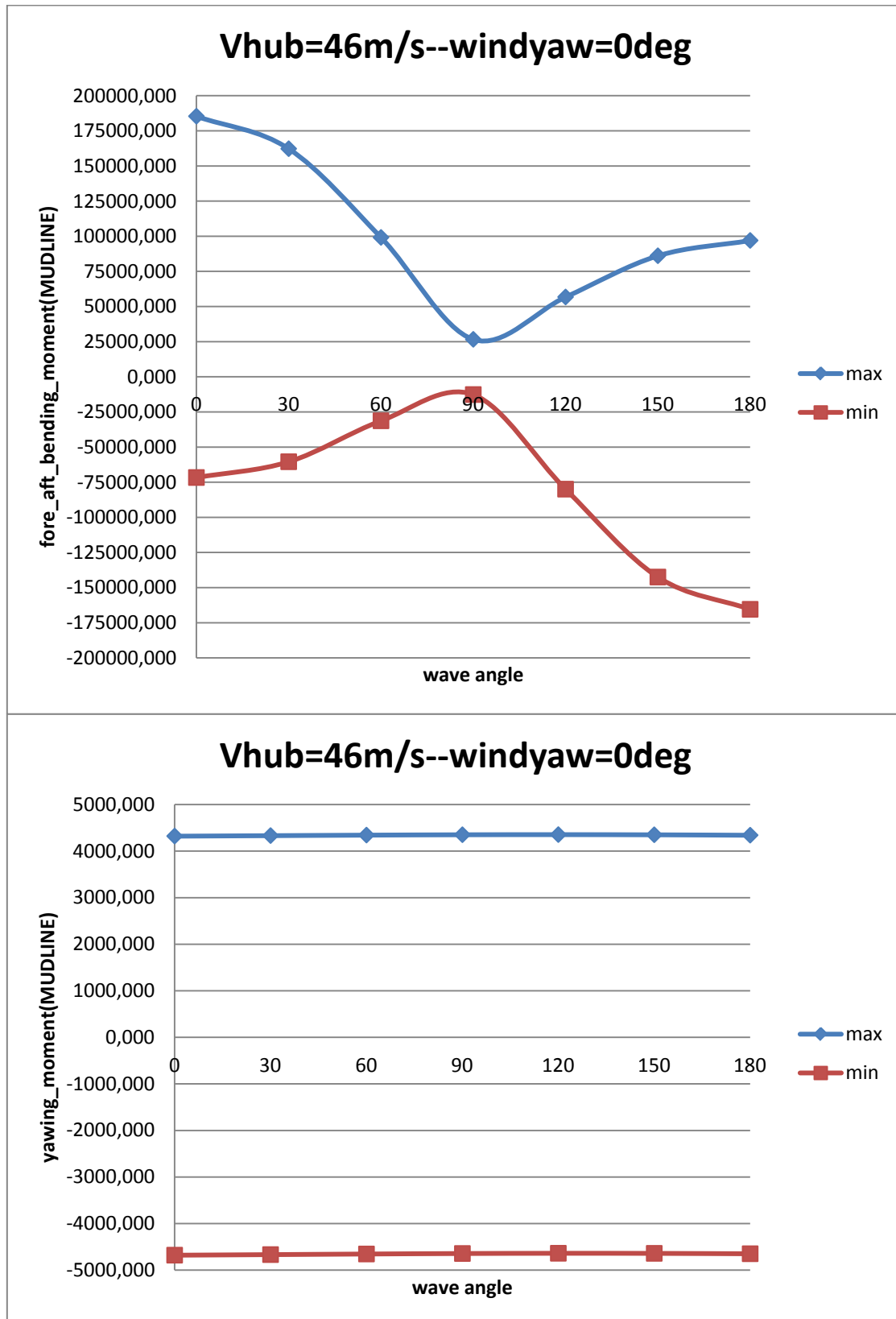
Στην περίπτωση φορτίσεων σχεδιασμού 6.1a, φυσάει άνεμος ταχύτητας 46 m/s (EWM) υπό μηδενική γωνία κλίσης (wind direction= 0°), επικρατούν ακραίες συνθήκες θαλάσσης (ESS), ενώ το κύμα “χτυπάει” την ανεμογεννήτρια με 7 διαφορετικές γωνίες (0, +30, +60, +90, +120, +150, +180) Για το σκοπό αυτό ιδιαίτερο βάρος της ανάλυσης δίνεται στις φορτίσεις που δέχονται τόσο η βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας-σημείο σύνδεσης με το μονοπάσσαλο (tower base) όσο και η βάση του μονοπασσάλου-πυθμένας (MUDLINE). Τα διαγράμματα δίνονται υπό τη μορφή ελαχίστων-μεγίστων, όπου με **κόκκινο** χρώμα παρουσιάζεται η **καμπύλη ελαχίστων** και με **μπλε** χρώμα η **καμπύλη μεγίστων** τιμών του εξεταζόμενου μεγέθους, όπως αυτές προκύπτουν ύστερα από στατιστική επεξεργασία.



Σχήμα 3.29 : πλευρική καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας (σημείο σύνδεσης με το μονοπάσσαλο) συναρτήσει της γωνίας κύματος



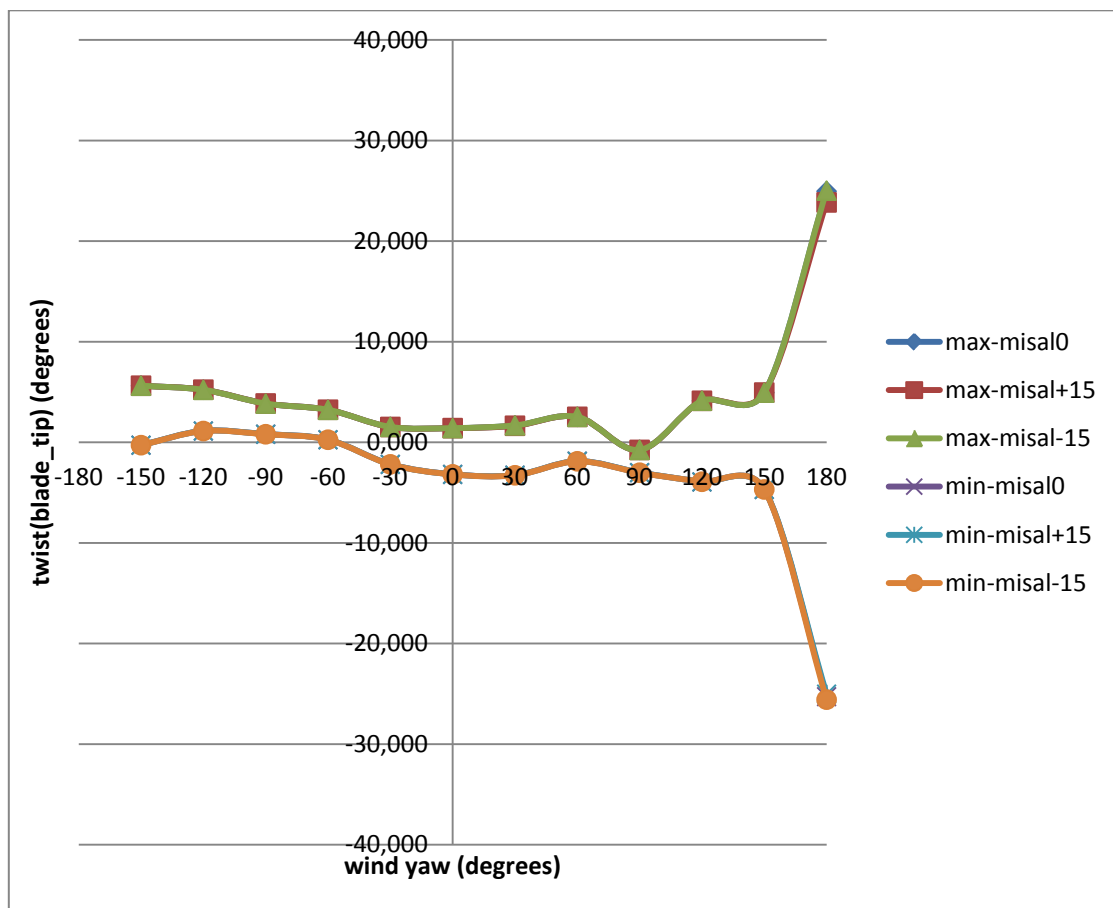
Σχήματα 3.30-3.31 : διαμήκης καμπτική ροπή στη βάση του πύργου και πλευρική καμπτική ροπή στη βάση του μοπαρίλε (πυθμένας) αντίστοιχα με παράμετρο τη γωνία κύματος



Σχήματα 3.32-3.33 : διαμήκης καμπτική ροπή και ροπή στρέψεως στη βάση του monopile (πυθμένας) αντίστοιχα ως συνάρτηση της γωνίας κύματος

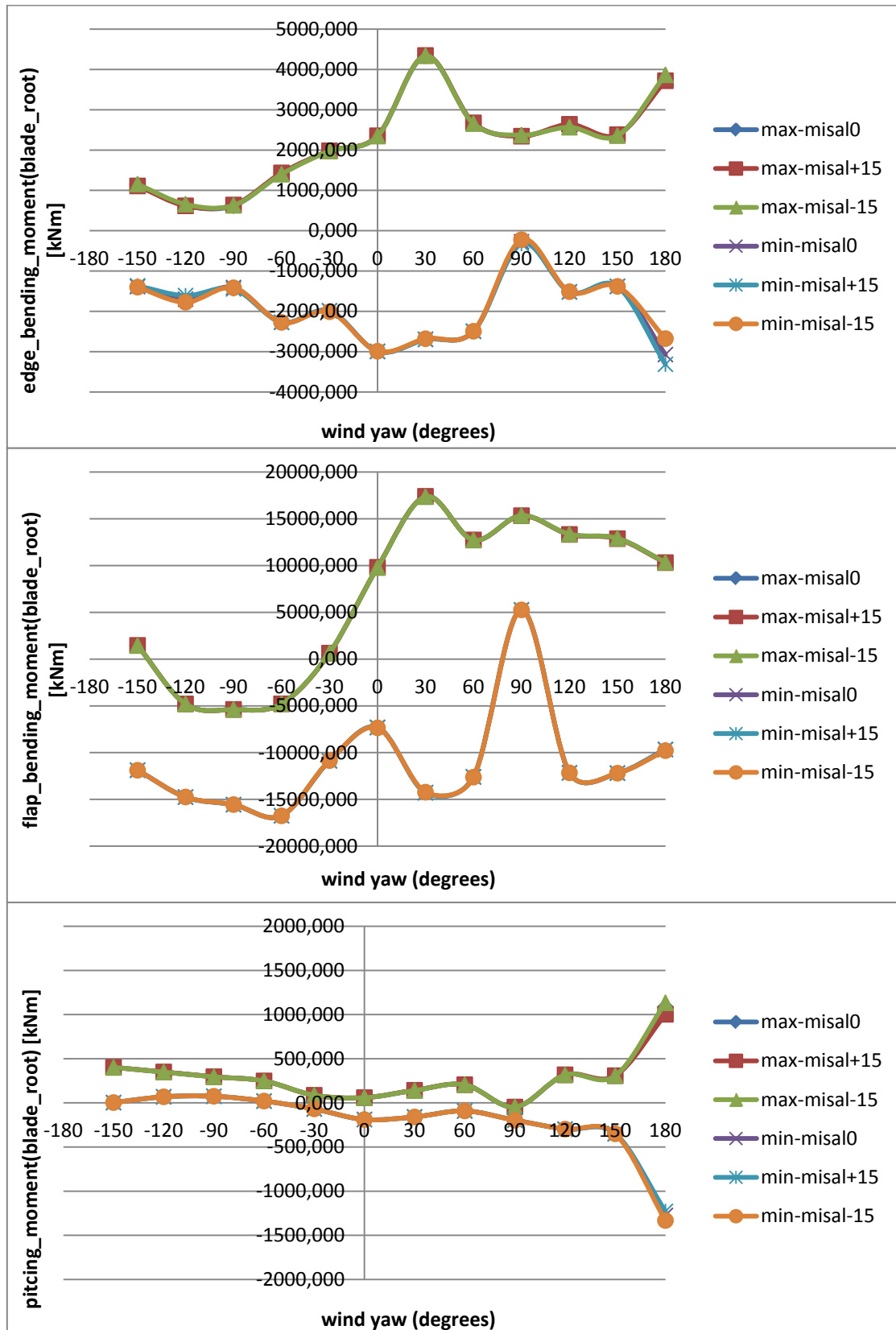
DLC 6.2a

Στην περίπτωση 6.2a (μηχανή ακινητοποιημένη ή ελαφρώς κινούμενη από τα αεροδυναμικά φορτία αποσυνδεδεμένη όμως από τη γεννήτρια) επικρατεί δυνατός άνεμος 46 m/s (EWM) που πνέει από διάφορες διευθύνσεις ($-180^\circ \leq \text{wind yaw} \leq 180^\circ$ με βήμα 30°). Παράλληλα επικρατούν συνθήκες ακραίας θαλάσσης (ESS) και το κύμα βρίσκεται είτε σε ευθυγράμμιση με τον άνεμο (wave-wind misalignment = 0°) είτε προπορεύεται κατά 15 μοίρες του ανέμου (wave-wind misalignment = $+15^\circ$) είτε ακολουθεί κατά 15° τον άνεμο (wave-wind misalignment = -15°). Για το σκοπό αυτό, παρατίθενται παρακάτω μια σειρά από διαγράμματα που απεικονίζουν υπό τη μορφή ελαχίστων-μεγίστων τα εξεταζόμενα μεγέθη για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου και κύματος.

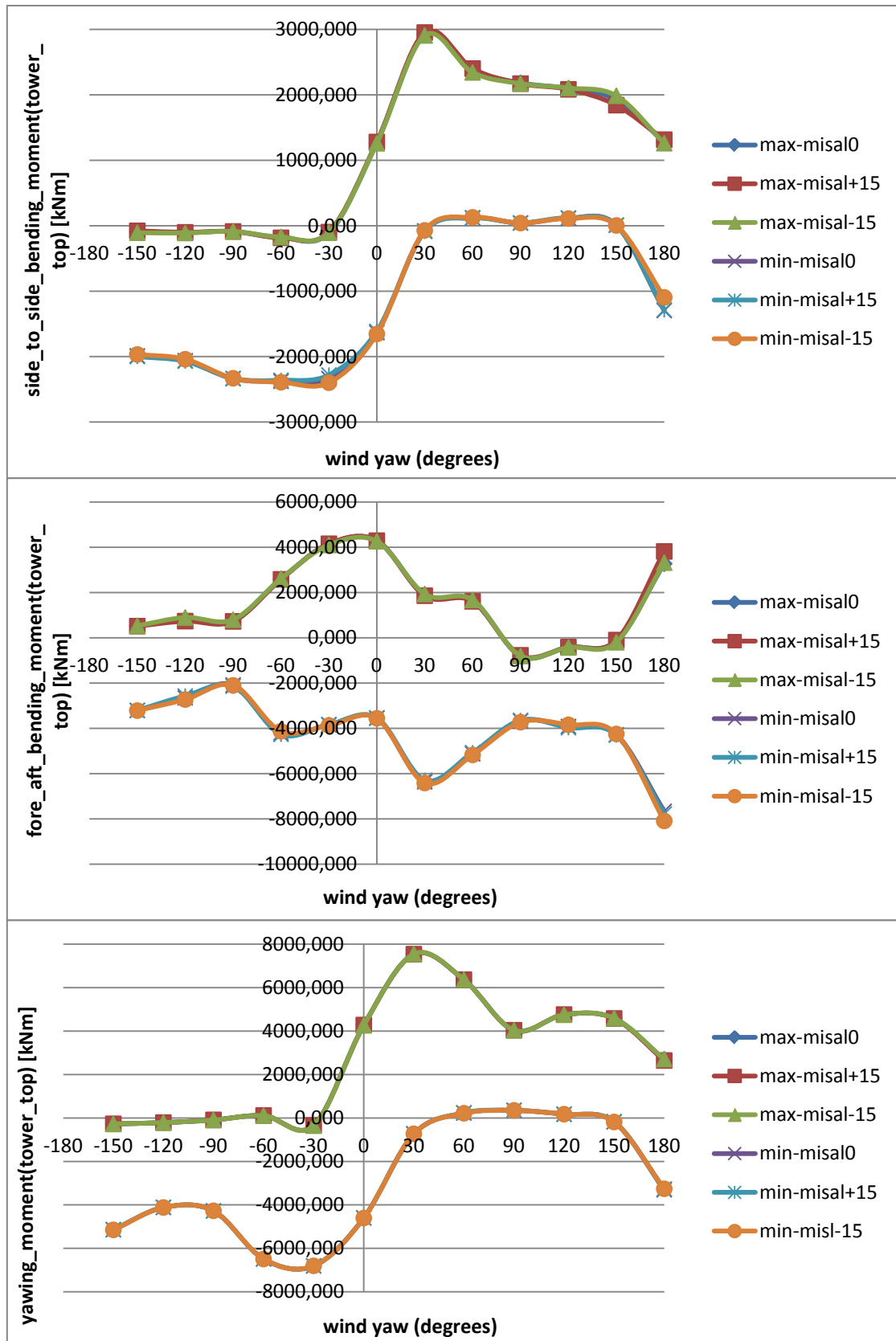


Σχήμα 3.34 : συστροφή στο ακροπερίγιο για όλους του δυνατούς συνδυασμούς ανέμου και κύματος

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

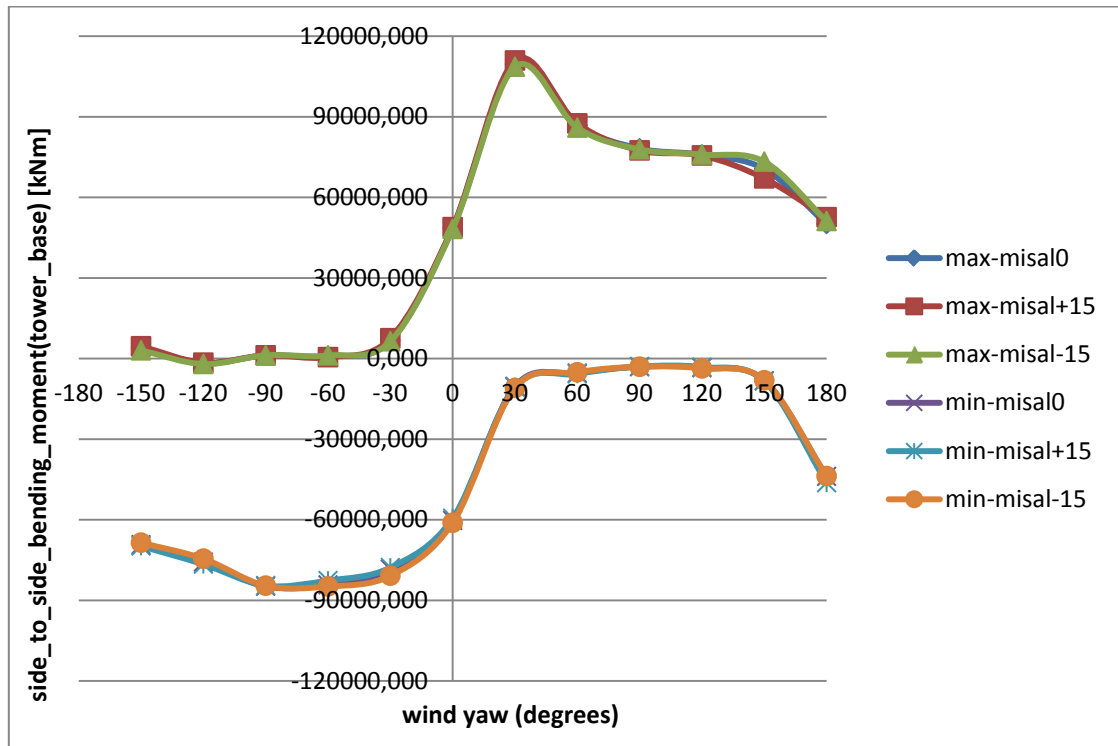


Σχήματα 3.35-3.37 : ροπές κατά z, x, y στη ρίζα του πτερυγίου για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου και κύματος

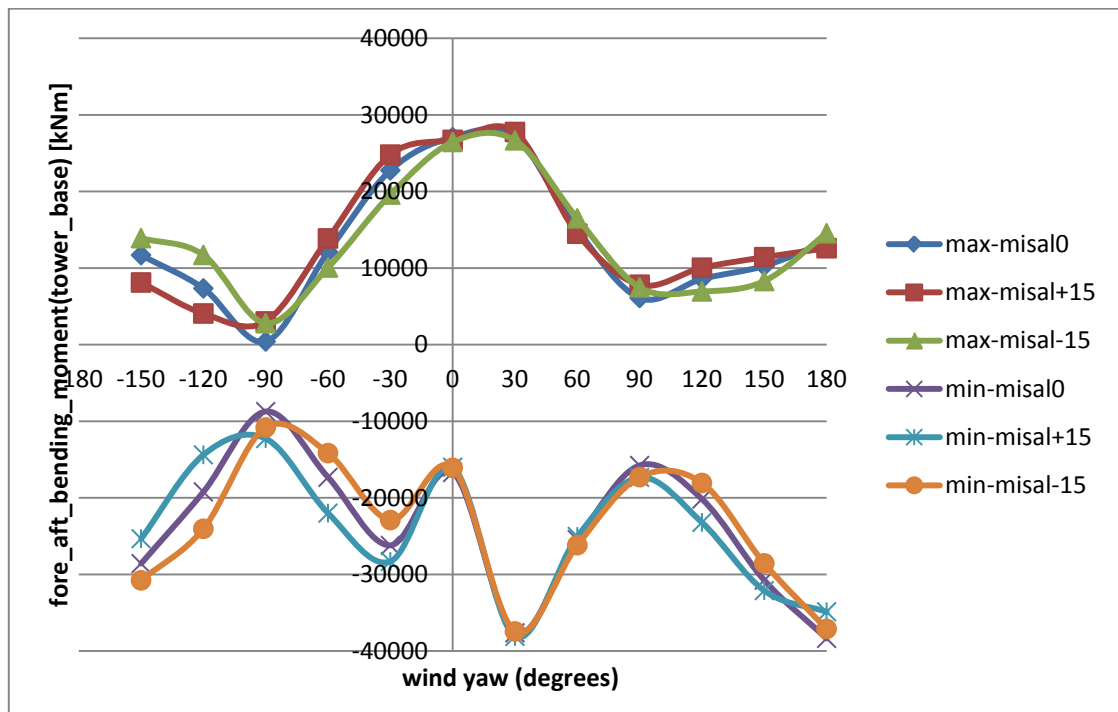


Σχήματα 3.38-3.40 : πλευρική καμπτική ροπή, διαμήκης καμπτική ροπή και ροπή στρέψης στην κορυφή του πύργου αντίστοιχα για όλους του δυνατούς συνδυασμούς ανέμου-κύματος

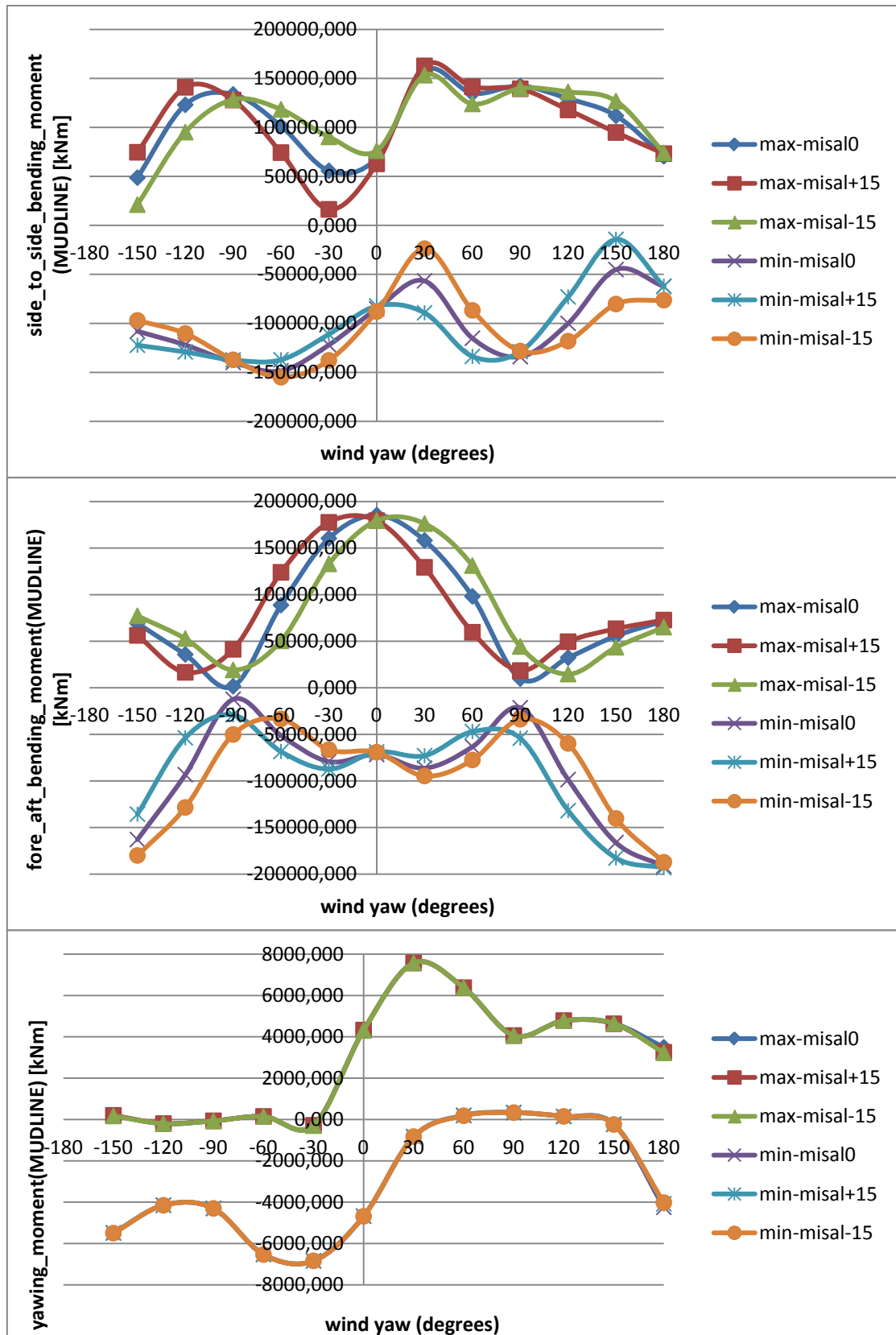
ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



Σχήμα 3.41: πλευρική καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας (σημείο σύνδεσης με μονοριλέ) για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου-κύματος

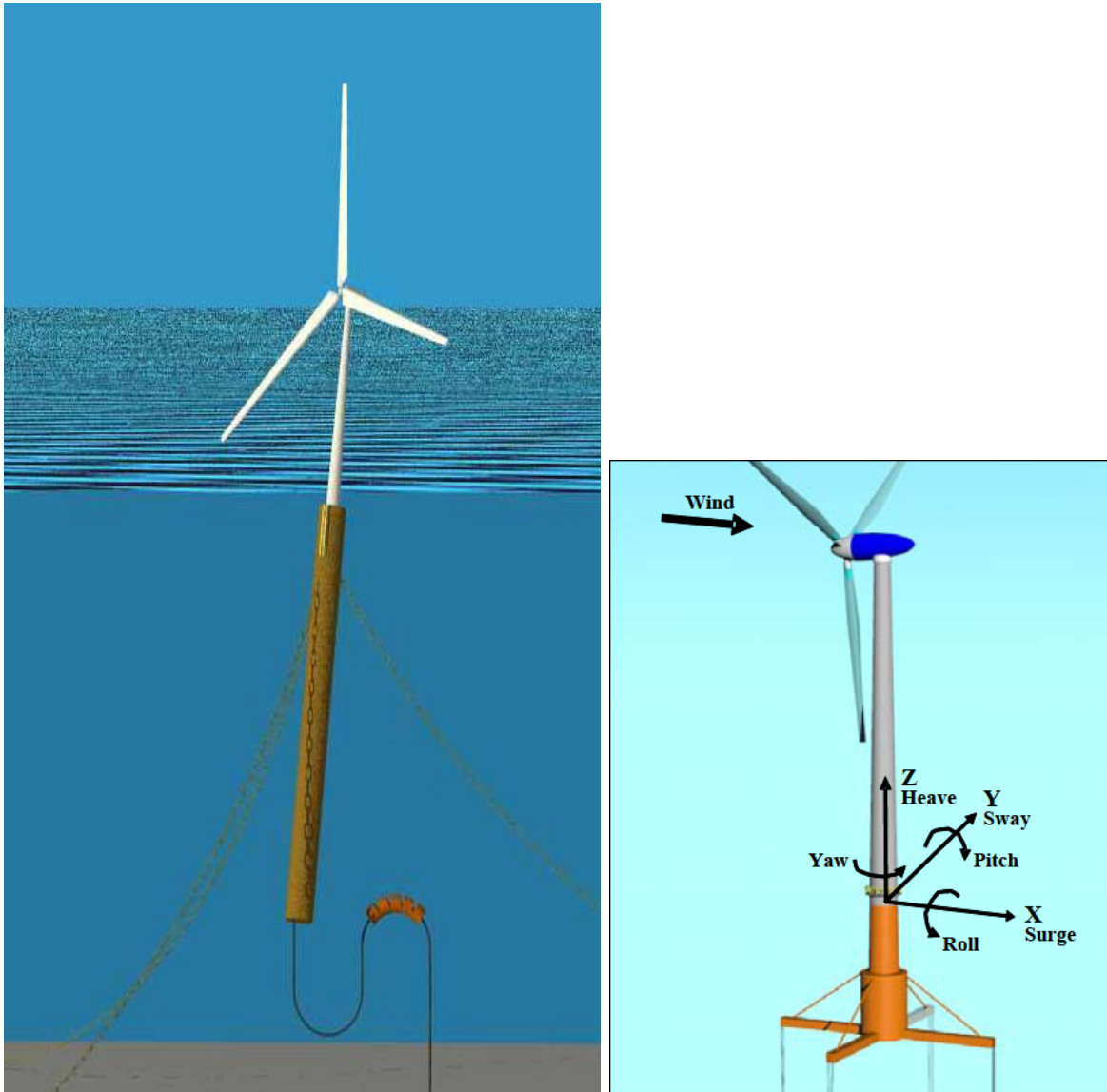


Σχήμα 3.42 : διαμήκης καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας (σημείο σύνδεσης με μονοριλέ) για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου-κύματος



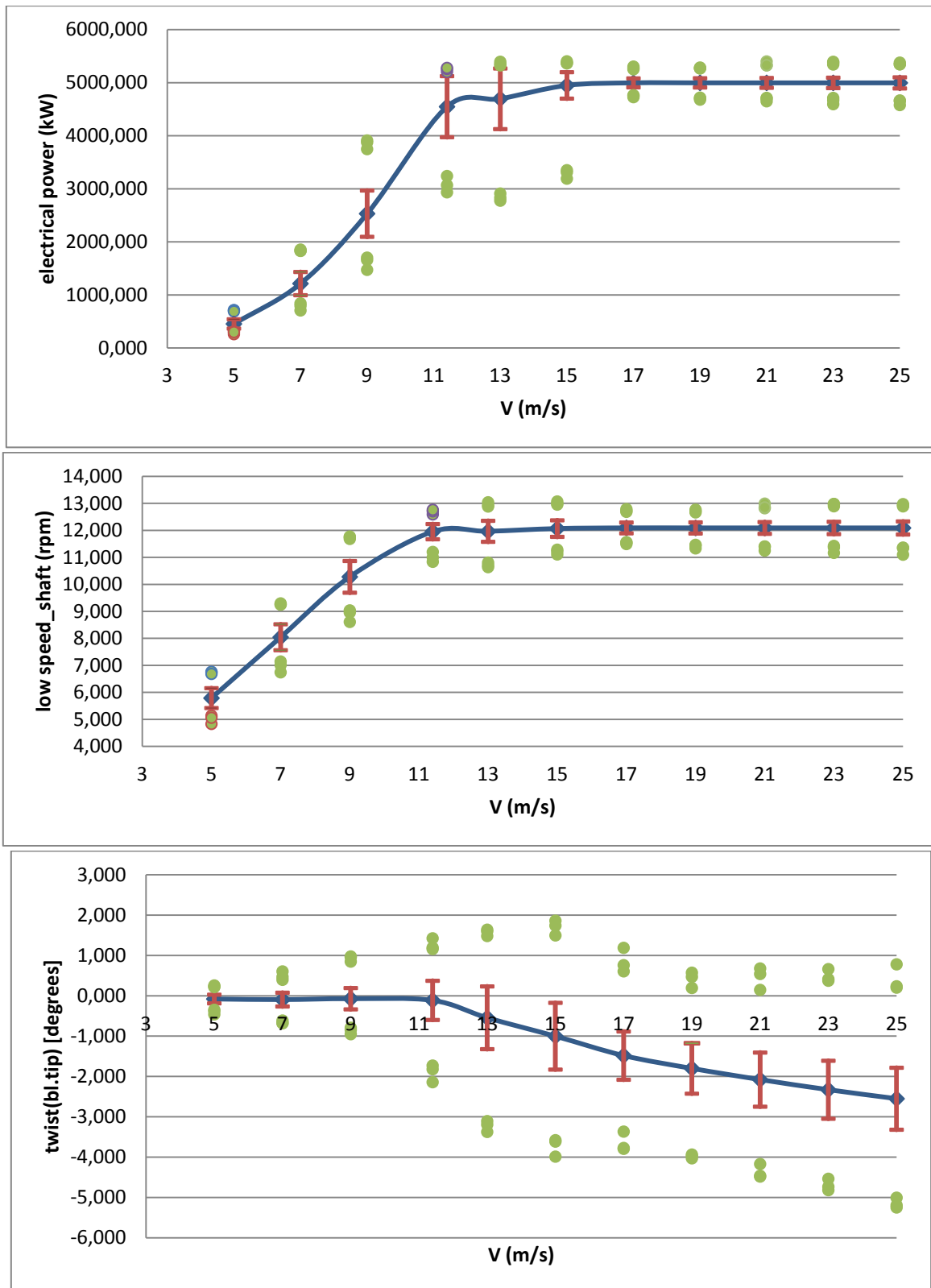
Σχήματα 3.43-3.45 : καμπτικές ροπές και στρεπτική ροπή στη βάση του μονοριλε(πυθμένας) για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου και κύματος

3.4 Φορτίσεις σε πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου spar-buoy



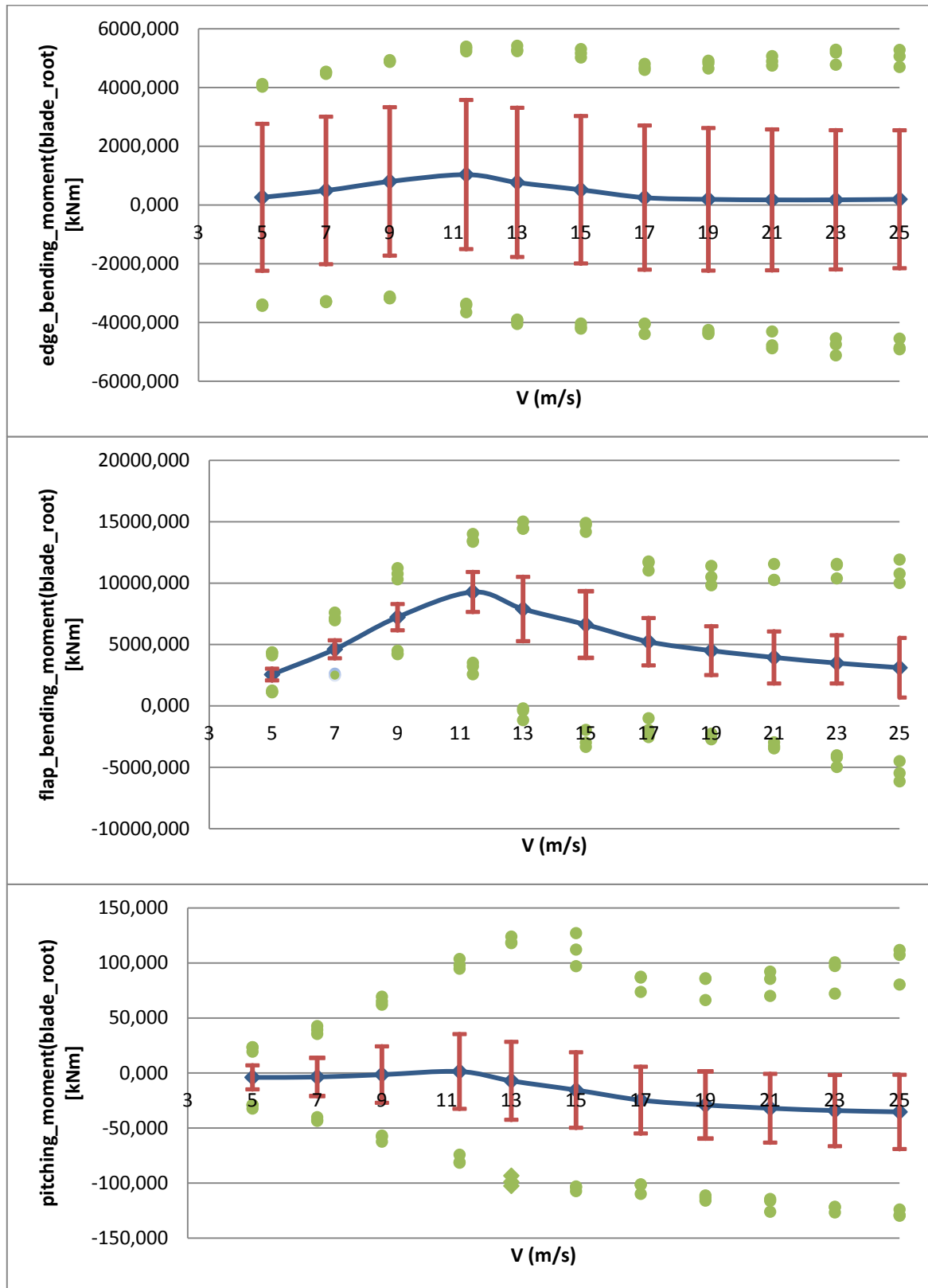
εικόνα 3.3 : αριστερά- γενική άποψη ανεμογεννήτριας με υποστήριξη τύπου spar-buoy και δεξιά-βαθμοί ελευθερίας του πλωτού υποσυστήματος (3 μετακινήσεις : surge, sway, heave και 3 στροφές : roll, pitch και yaw αντίστοιχα)

DLC 1.1

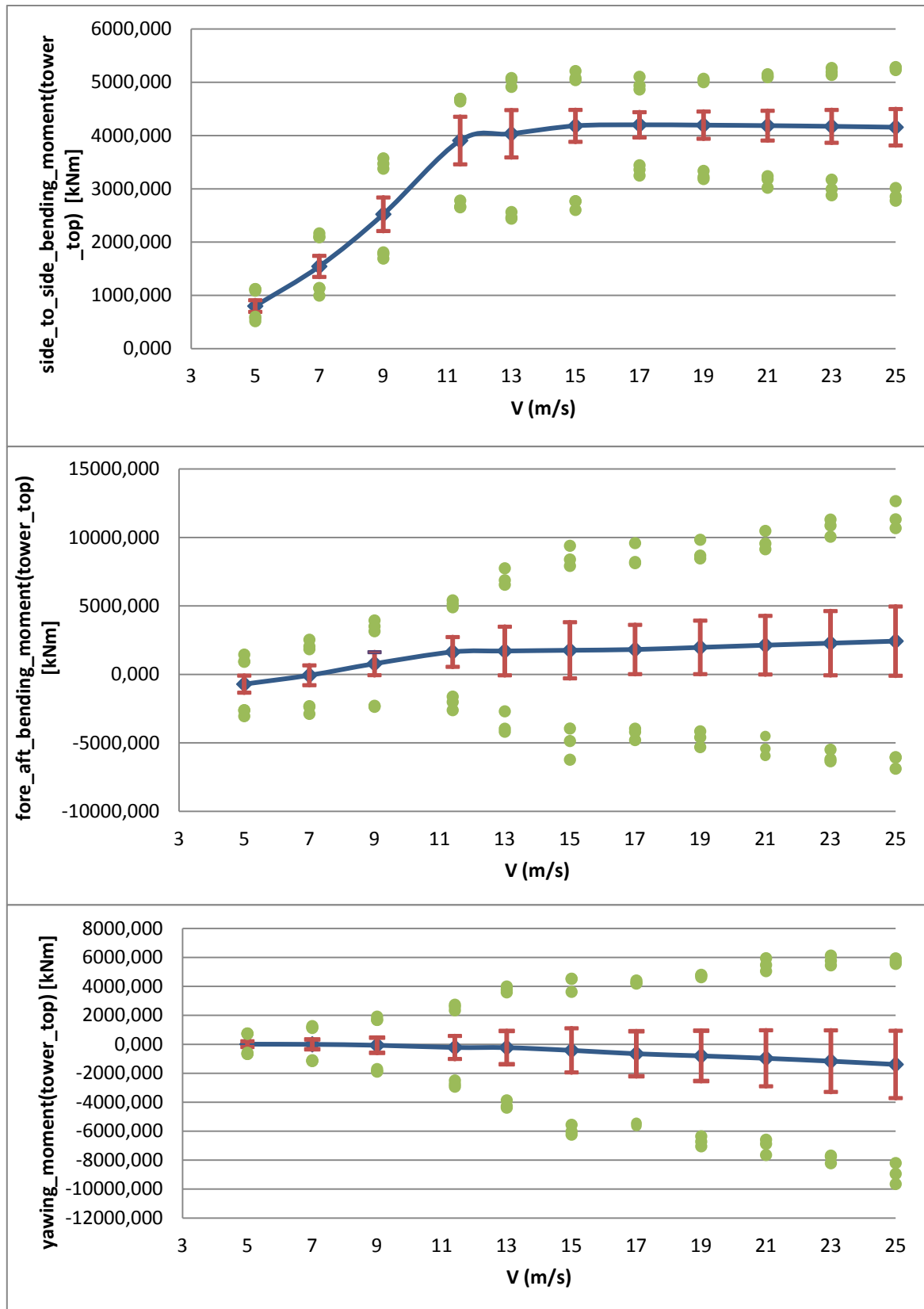


Σχήματα 3.46-3.48 : καμπύλη ηλεκτρικής ισχύος, γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και συστροφή του ακροπτερυγίου συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
 ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

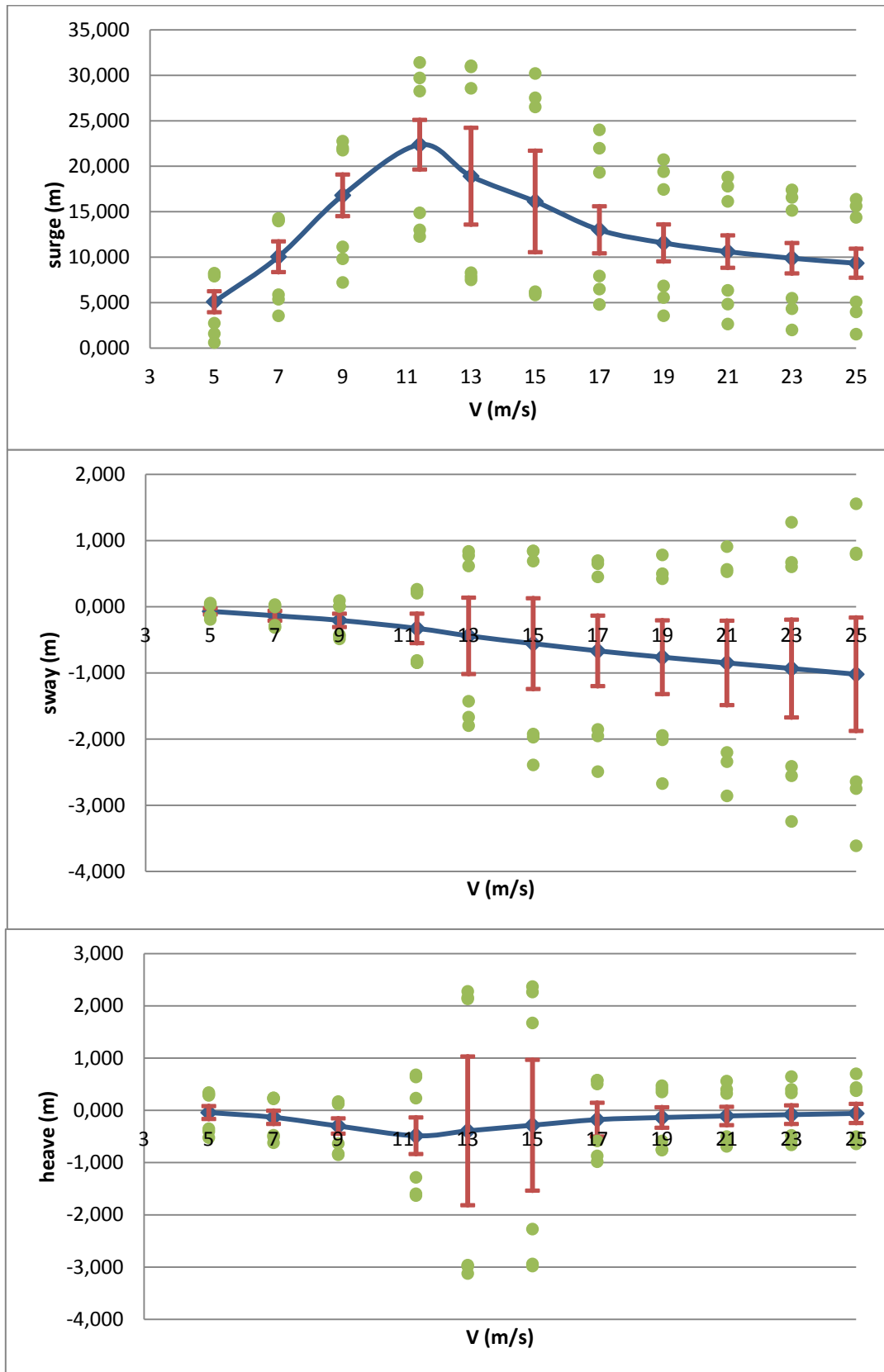


Σχήματα 3.49-3.51 : ροπές κατά z, x, y στη ρίζα του πτερυγίου συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου

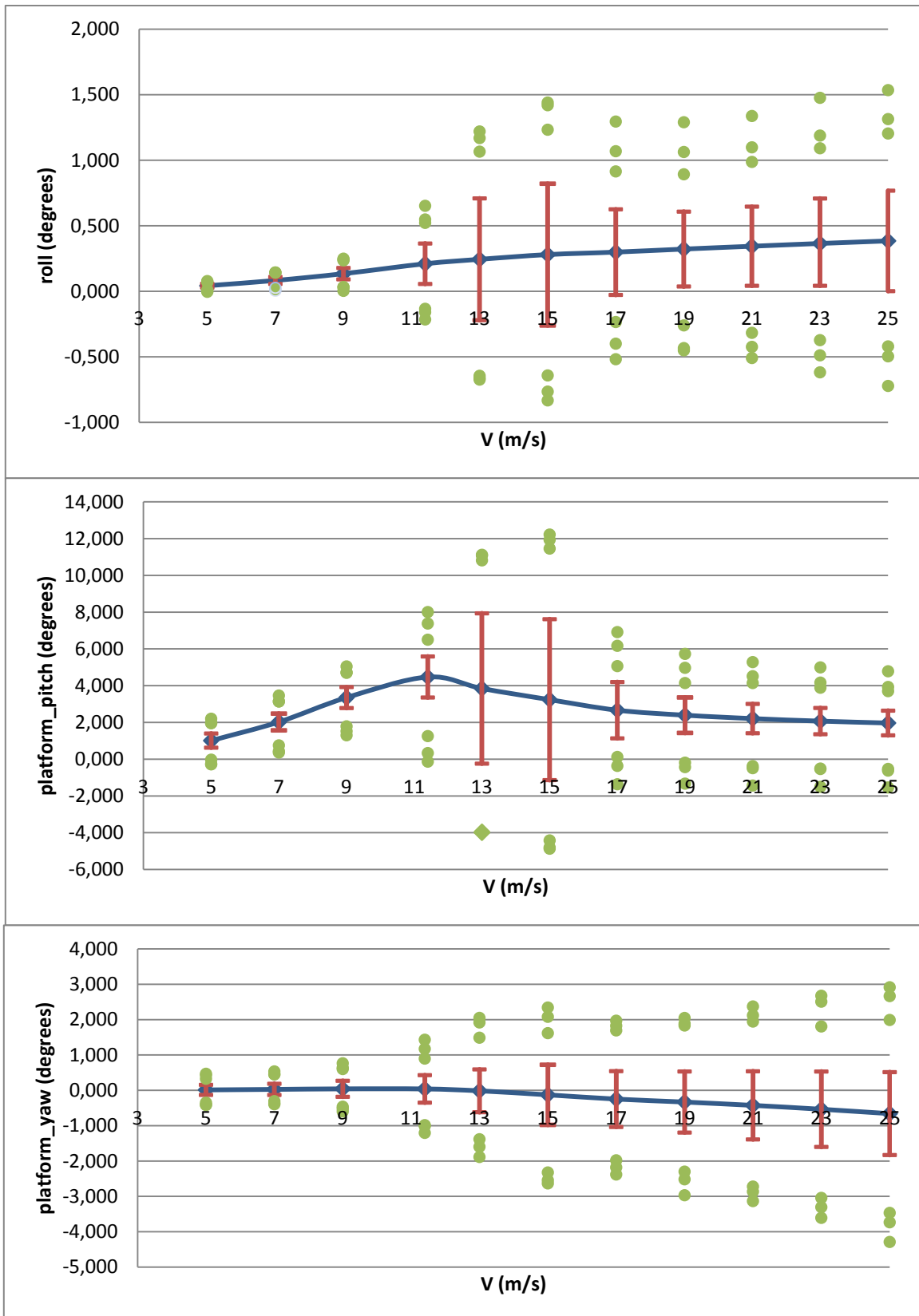


Σχήματα 3.52-3.54 : πλευρική καμπτική ροπή, διαμήκης καμπτική ροπή και ροπή στρέψης στην κορυφή του πύργου αντίστοιχα ως συνάρτηση της ταχύτητας ανέμου

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

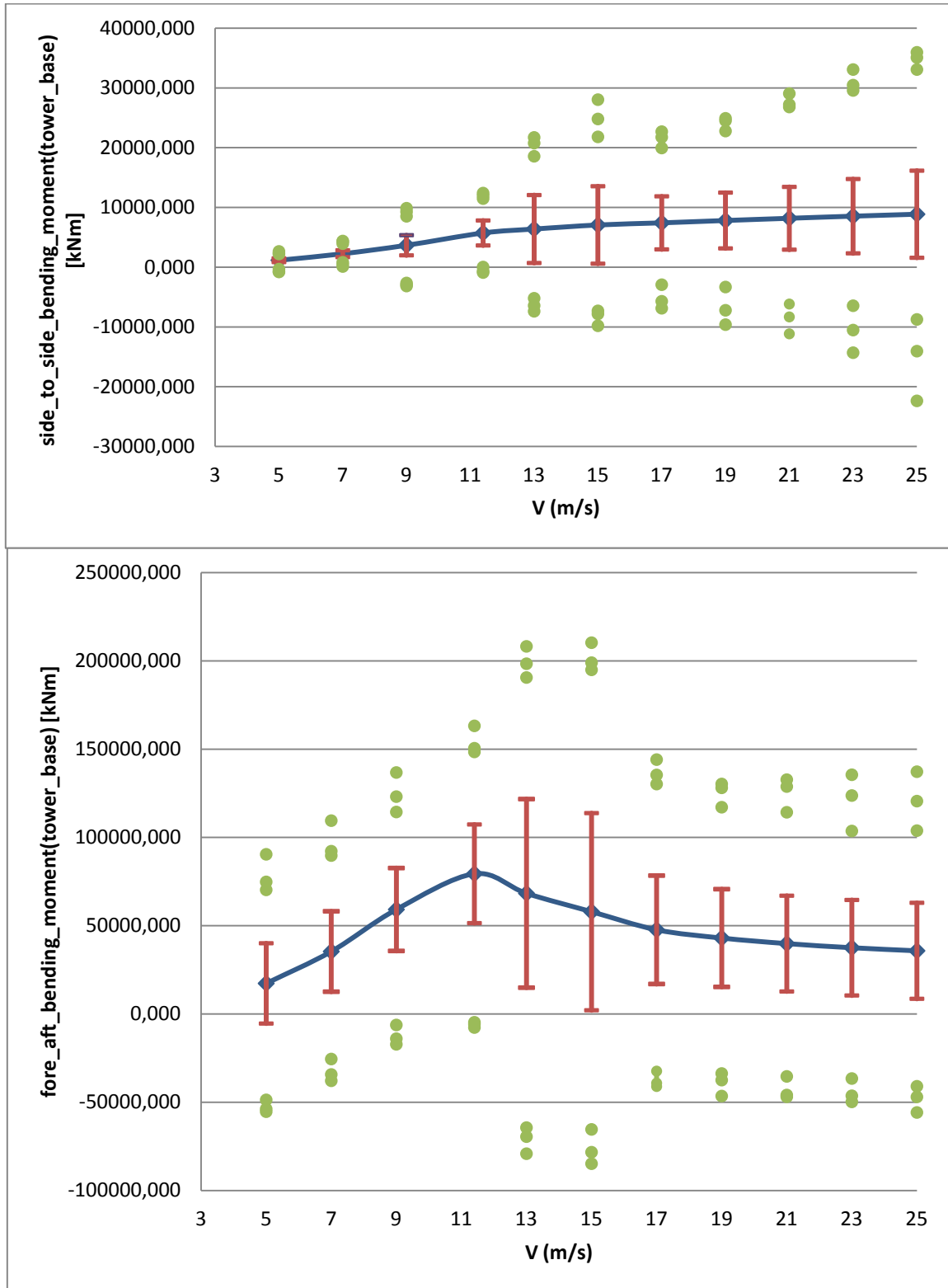


Σχήματα 3.55-3.57 : μεταφορικές μετακινήσεις του πλωτήρα (κατά x , y , z αντίστοιχα) συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου



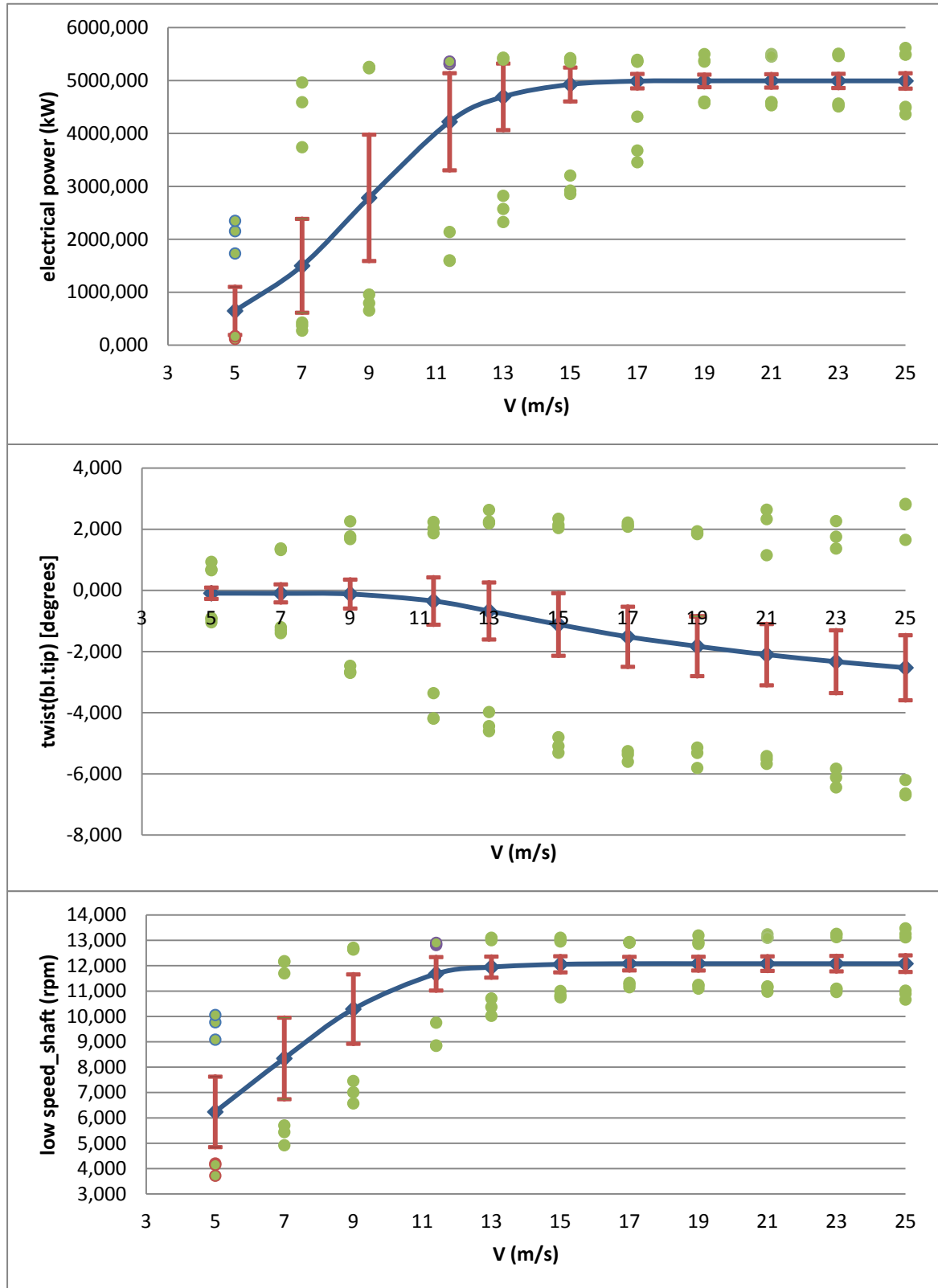
Σχήματα 3.58-3.60 : περιστροφικές κινήσεις του πλωτήρα (κατά x , y , z αντίστοιχα) συναρτήσει της γωνίας ανέμου

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



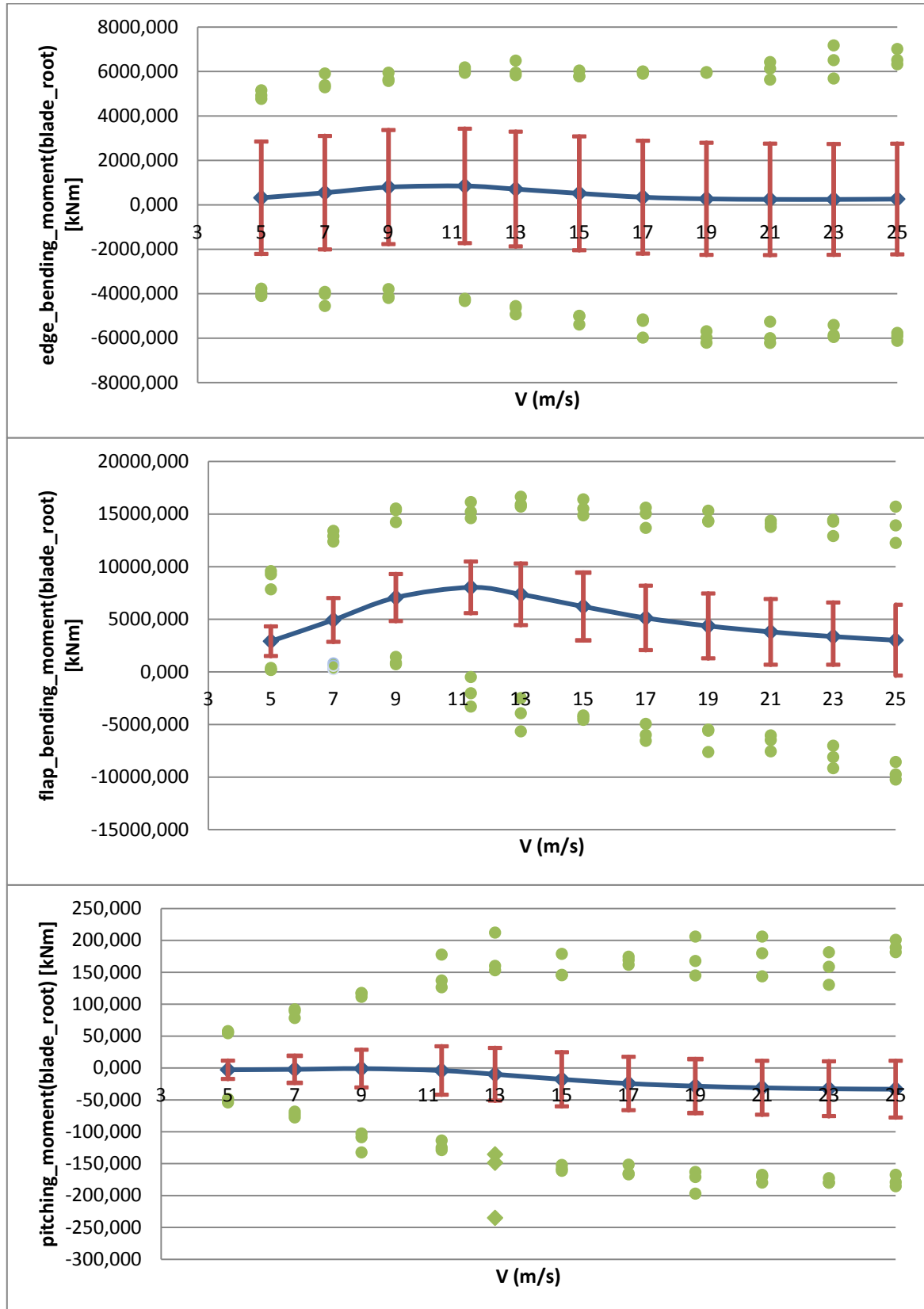
Σχήματα 3.61-3.62 : πλευρική και διαμήκης καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της Α/Γ (σημείο πρόσδεσης με το spar-buoy)

DLC 1.3

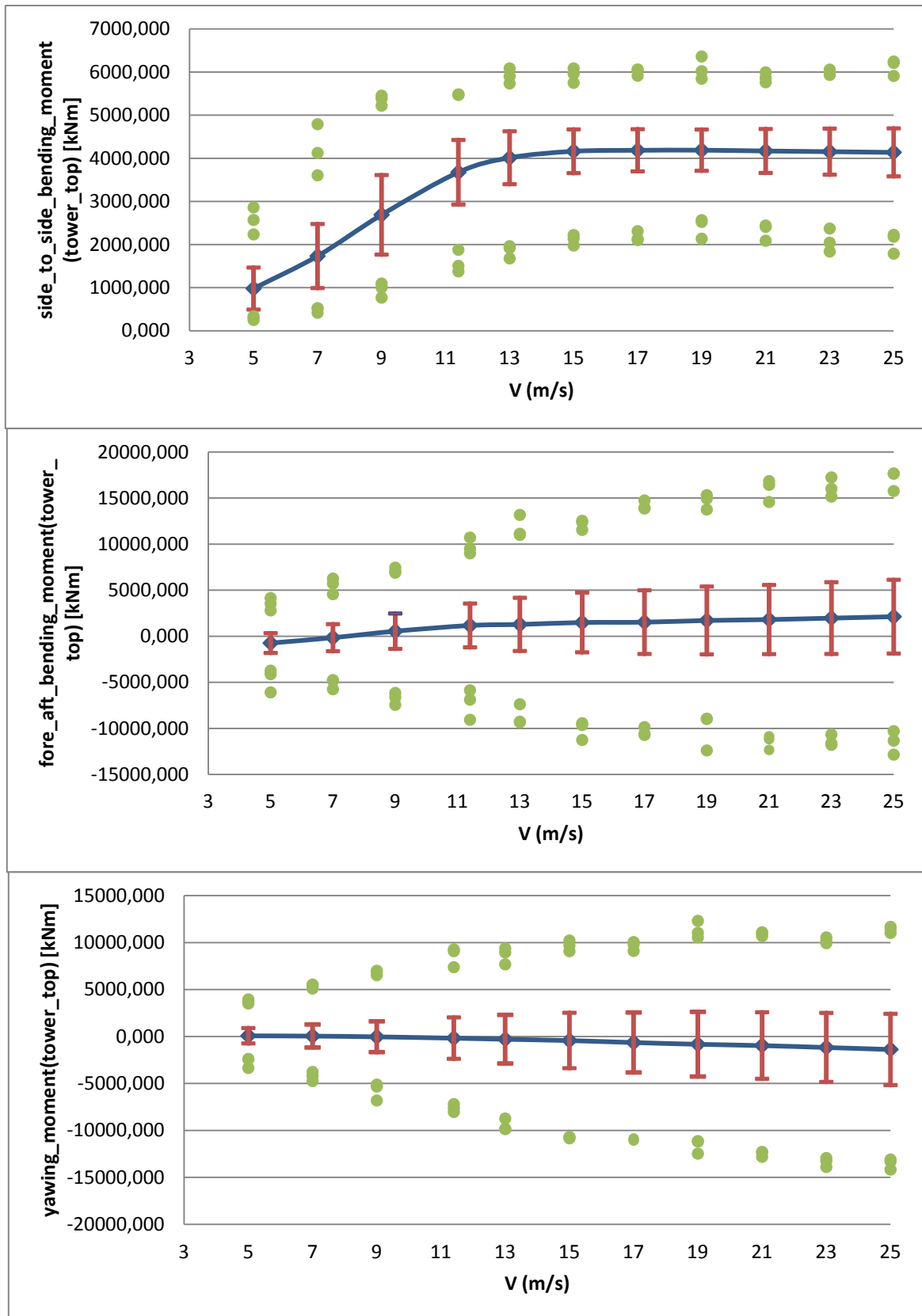


Σχήματα 3.63-3.65 : καμπύλη ηλεκτρικής ισχύος, συστροφή του ακροπτερυγίου και γωνιακή ταχύτητα περιστροφής συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
 ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

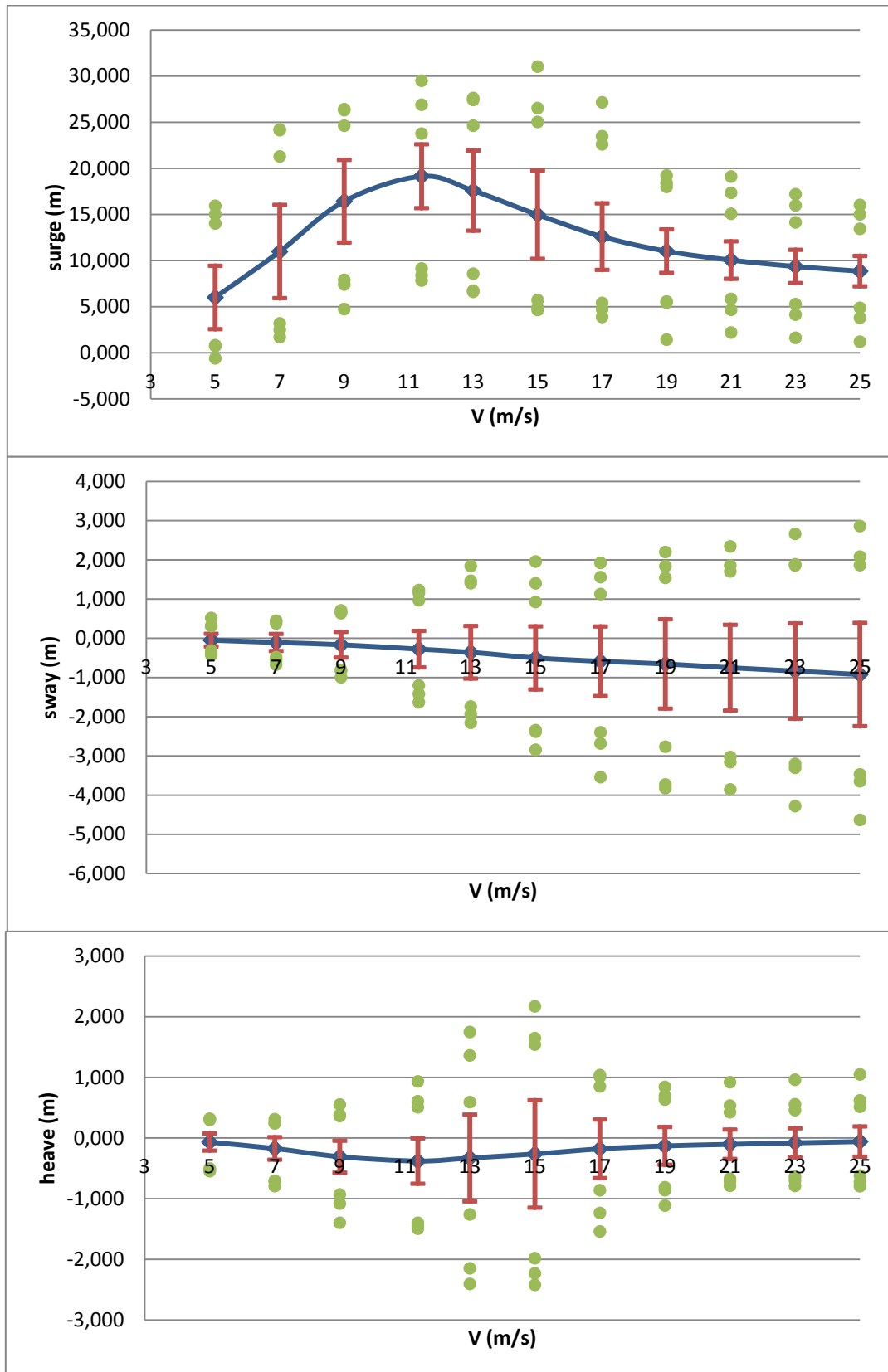


Σχήματα 3.66-3.68 : ροπές κατά z, x, y στη ρίζα του πτερυγίου συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου

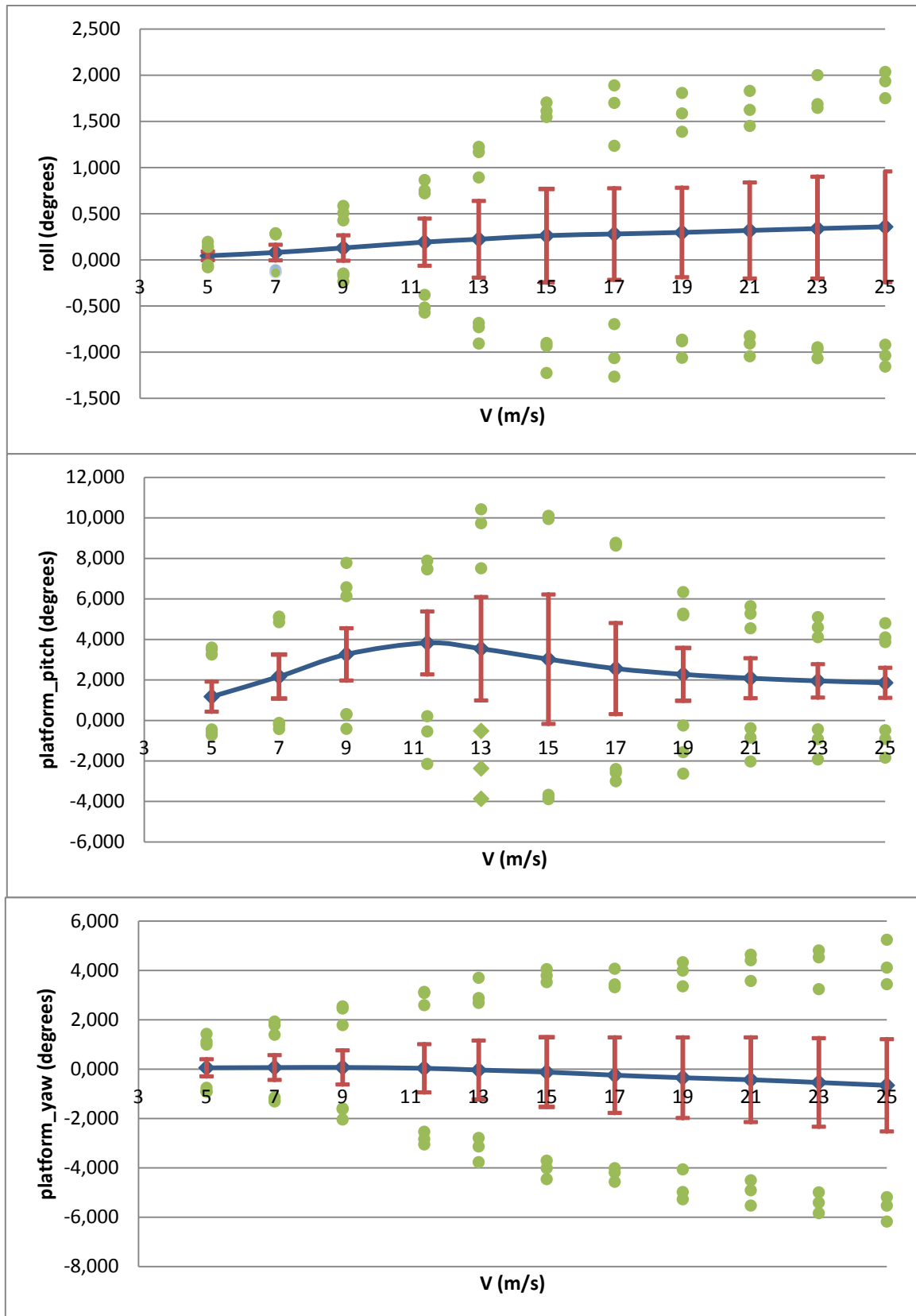


Σχήματα 3.69-3.71 : πλευρική καμπτική ροπή, διαμήκης καμπτική ροπή και ροπή στρέψης στην κορυφή του πύργου αντίστοιχα ως συνάρτηση της ταχύτητας ανέμου

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
 ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

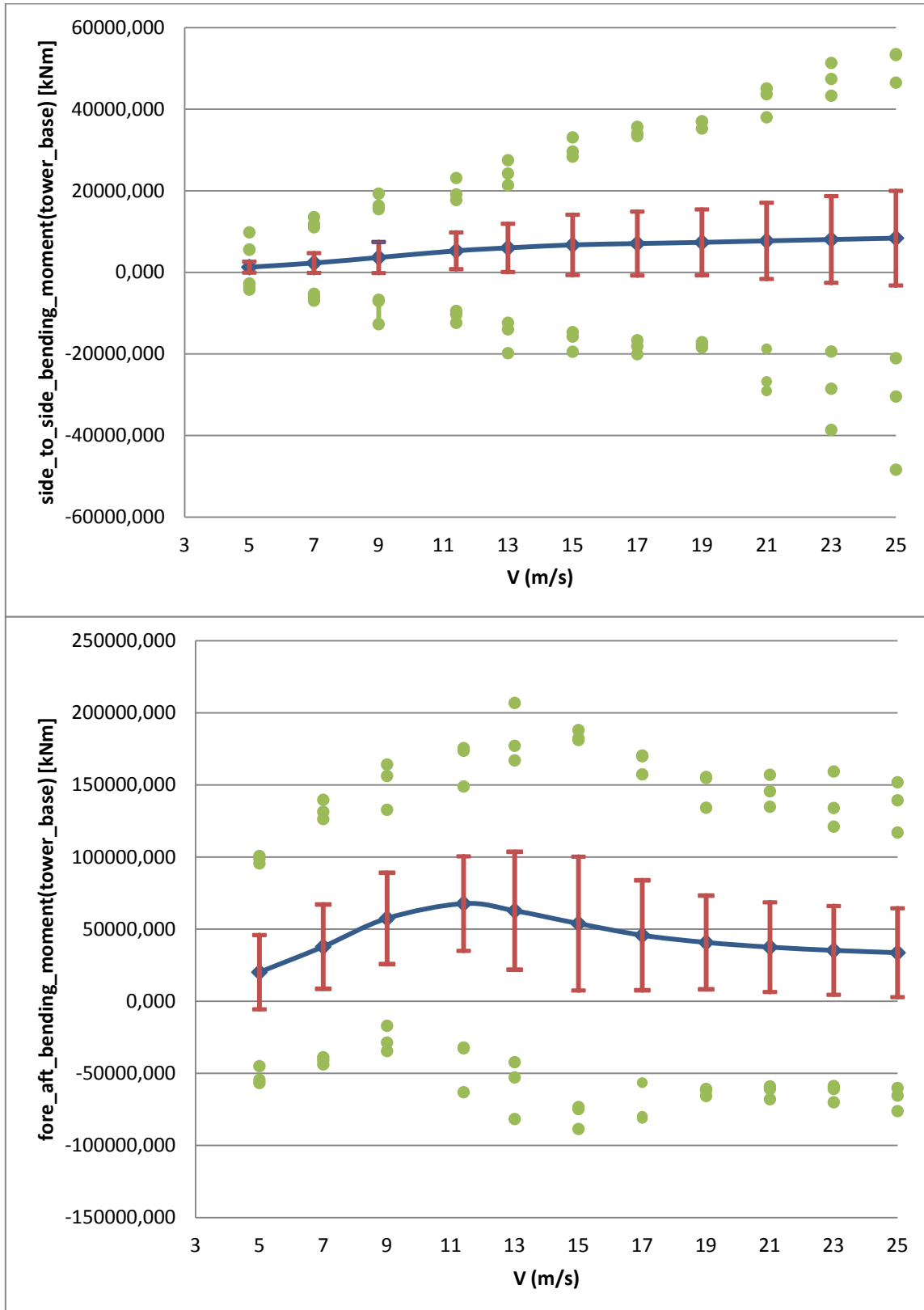


Σχήματα 3.72-3.74 : μεταφορικές μετακινήσεις του πλωτήρα (κατά x, y, z αντίστοιχα) συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου



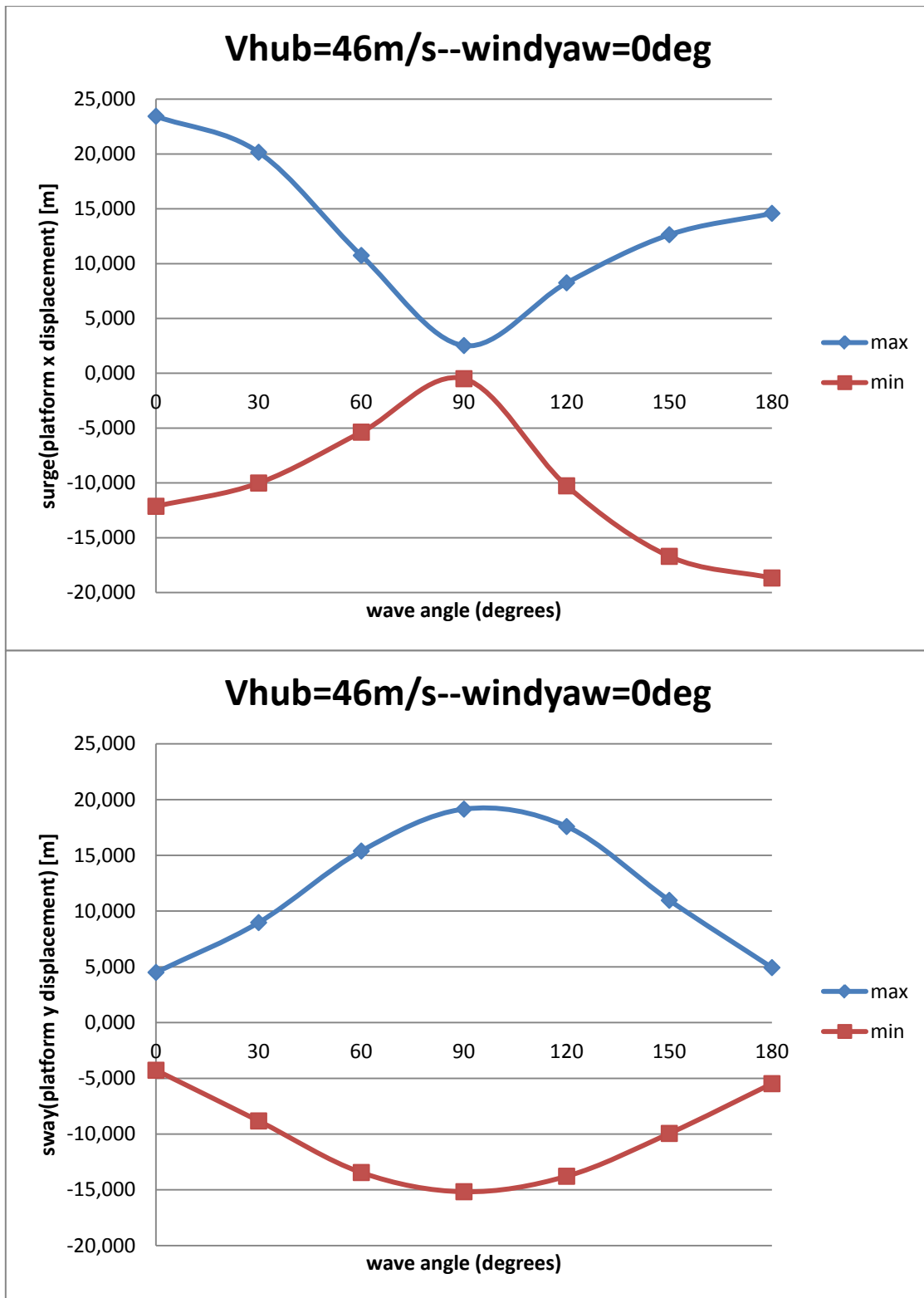
Σχήματα 3.75-3.77 : περιστροφικές κινήσεις του πλωτήρα (κατά x , y , z αντίστοιχα) συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
 ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

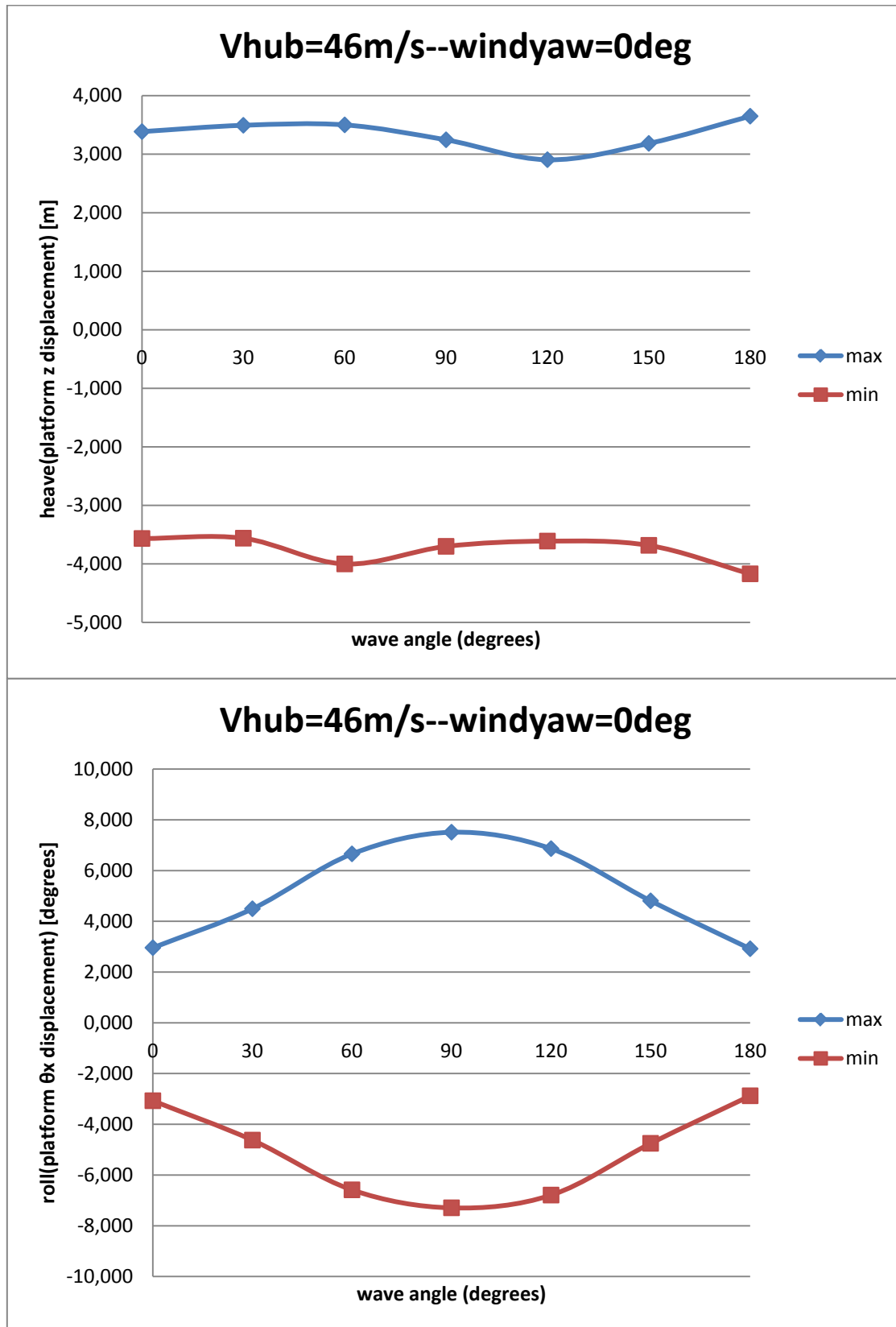


Σχήματα 3.78-3.79 : πλευρική και διαμήκης καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της Α/Γ
 (σημείο σύνδεσης με το spar-buoy)

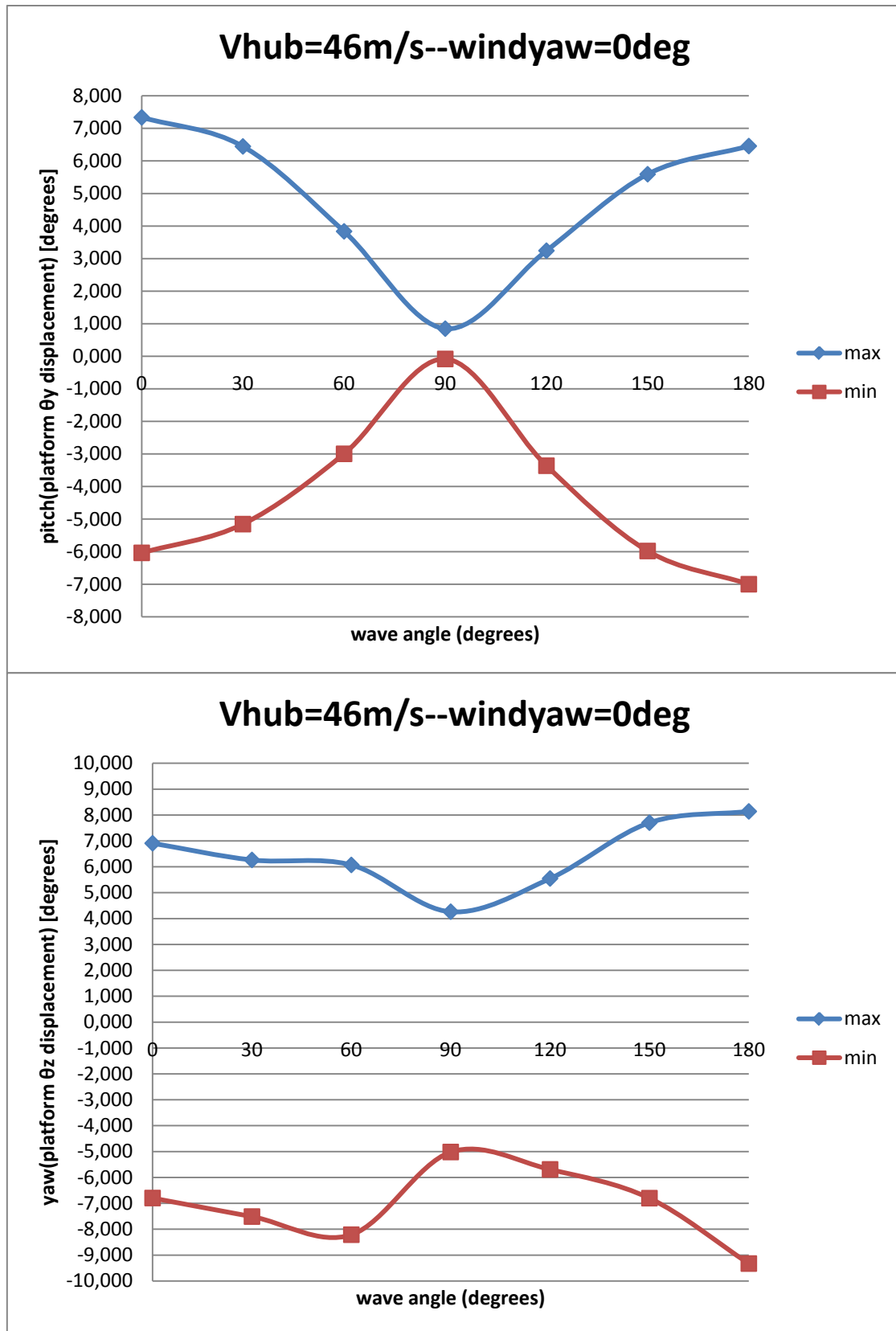
DLC 6.1a



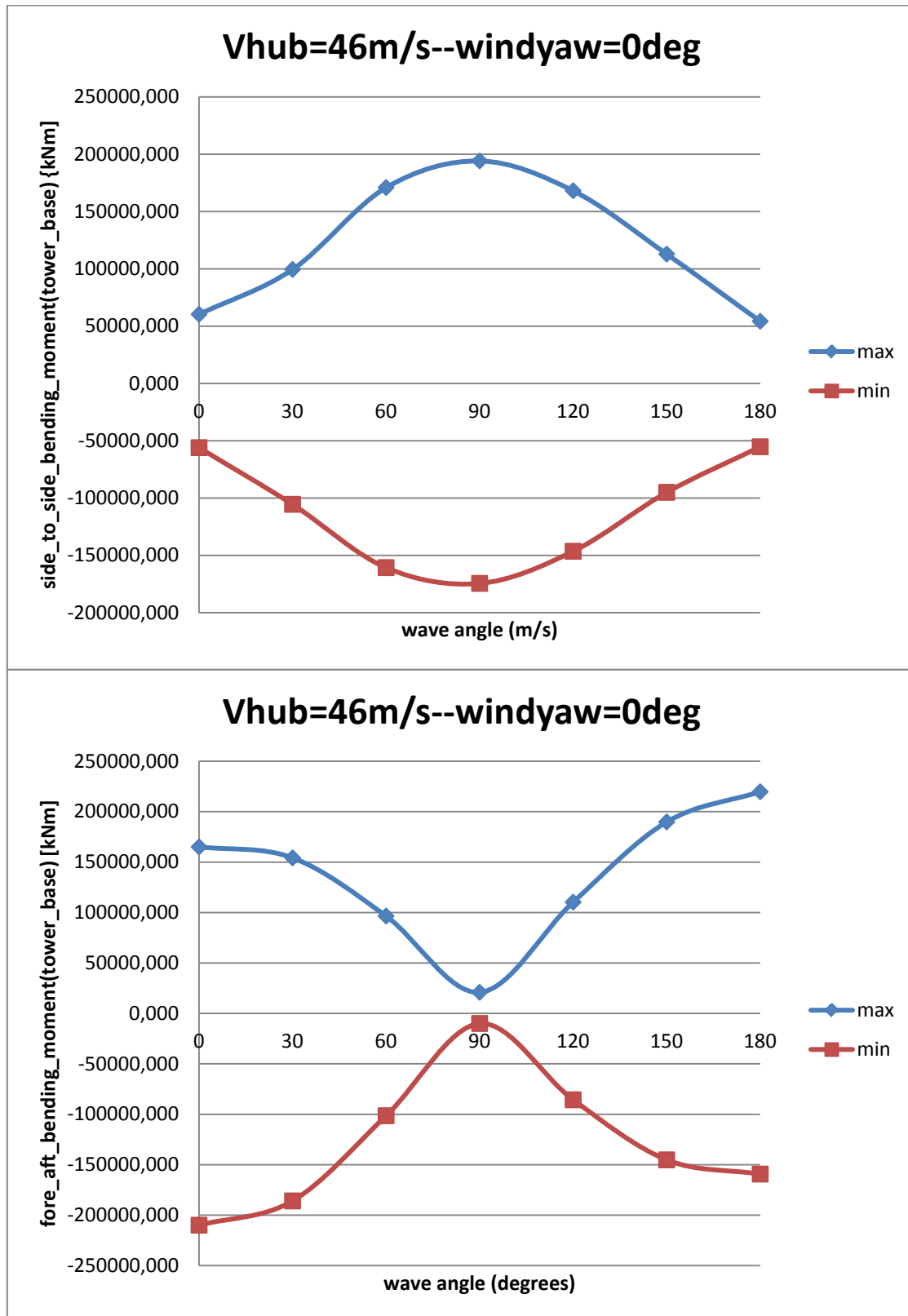
Σχήματα 3.80-3.81 : ταλάντωση εμπρός-πίσω και αριστερά-δεξιά αντίστοιχα του πλωτήρα συναρτήσει της γωνίας κύματος



Σχήματα 3.82-3.83 : ταλάντωση πάνω-κάτω και περιστροφή γύρω από άξονα χ αντίστοιχα του πλωτήρα συναρτήσει της γωνίας κόματος

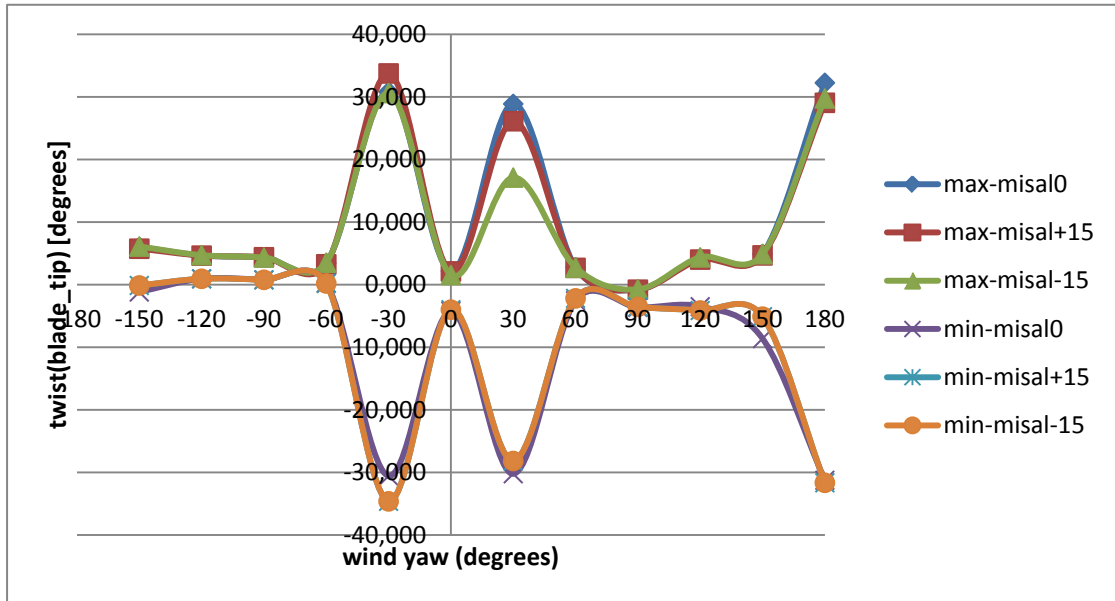


Σχήματα 3.84-3.85 : περιστροφική κίνηση γύρω από άξονα y και z αντίστοιχα του πλωτήρα συναρτήσει της γωνίας κύματος

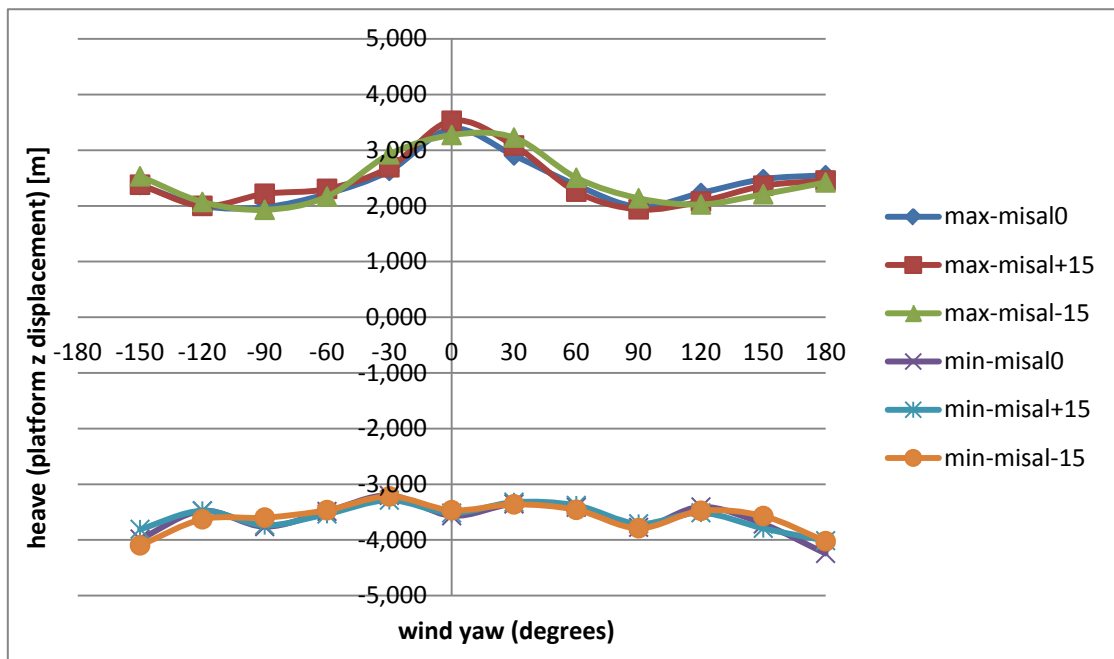


Σχήματα 3.86-3.87 : πλευρική και διαμήκης καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της Α/Γ (σημείο σύνδεσης με το spar-buoy) συναρτήσει της γωνίας κύματος

DLC 6.2a

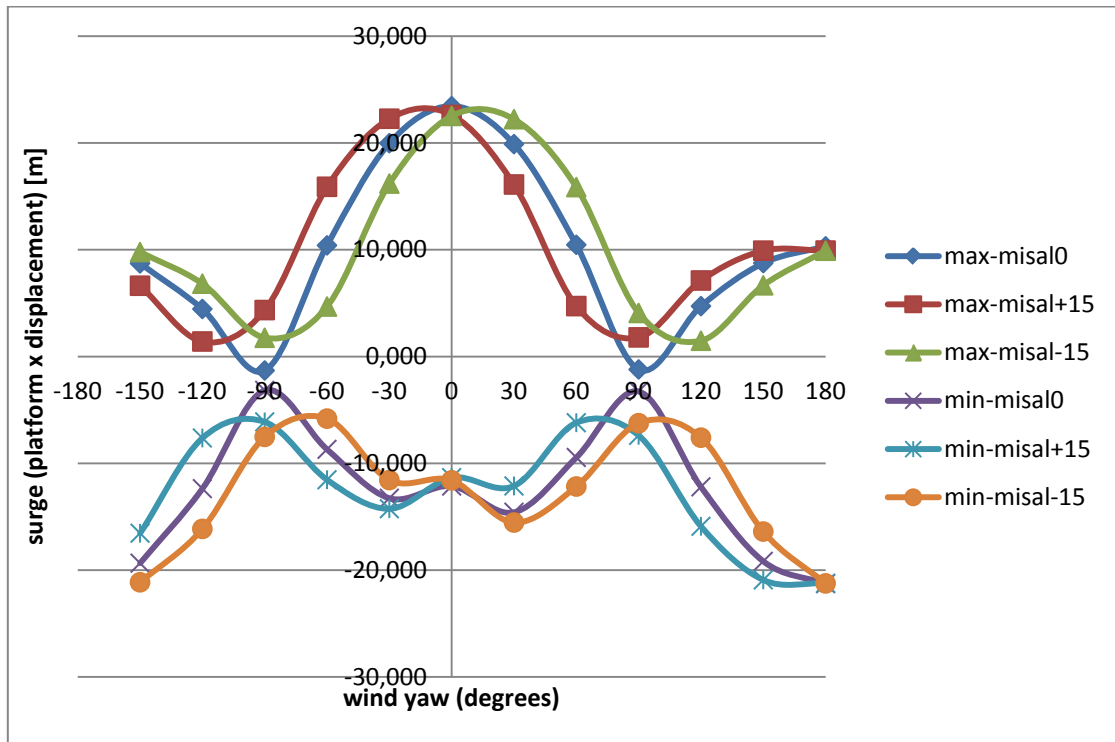


Σχήμα 3.88 : συστροφή ακροπτερυγίου για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου-κύματος

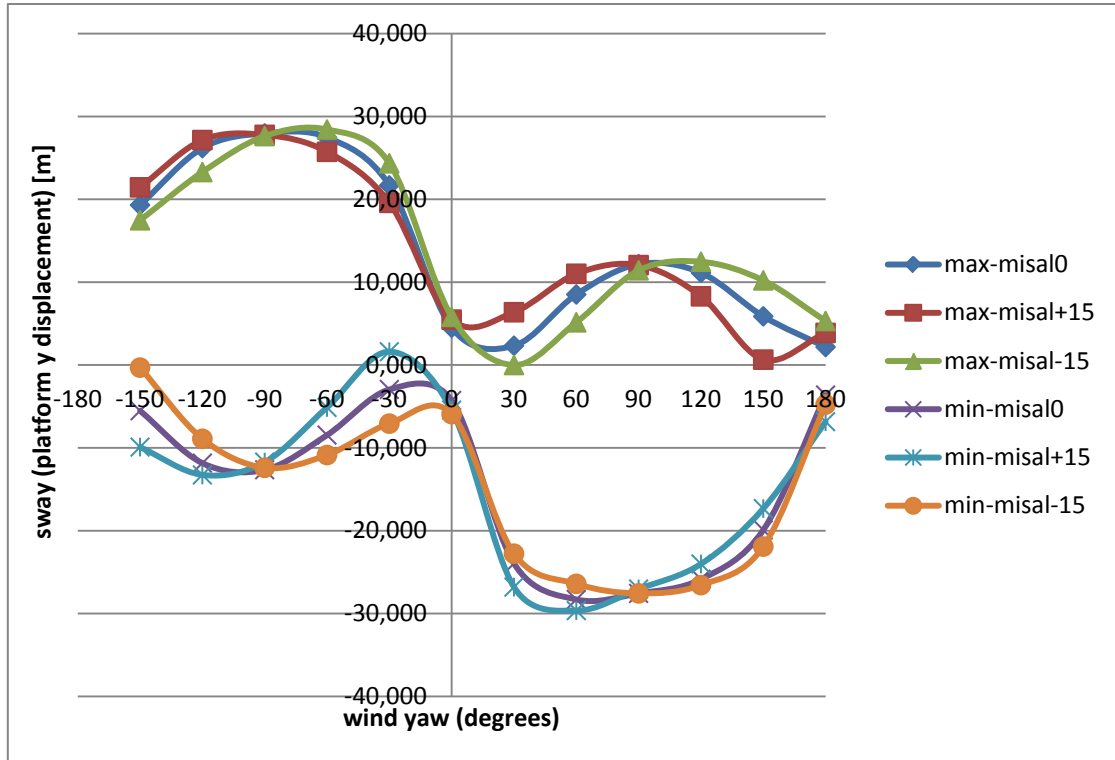


Σχήμα 3.89 : ταλάντωση πάνω-κάτω του πλωτήρα για όλους του δυνατούς συνδυασμούς ανέμου και κύματος

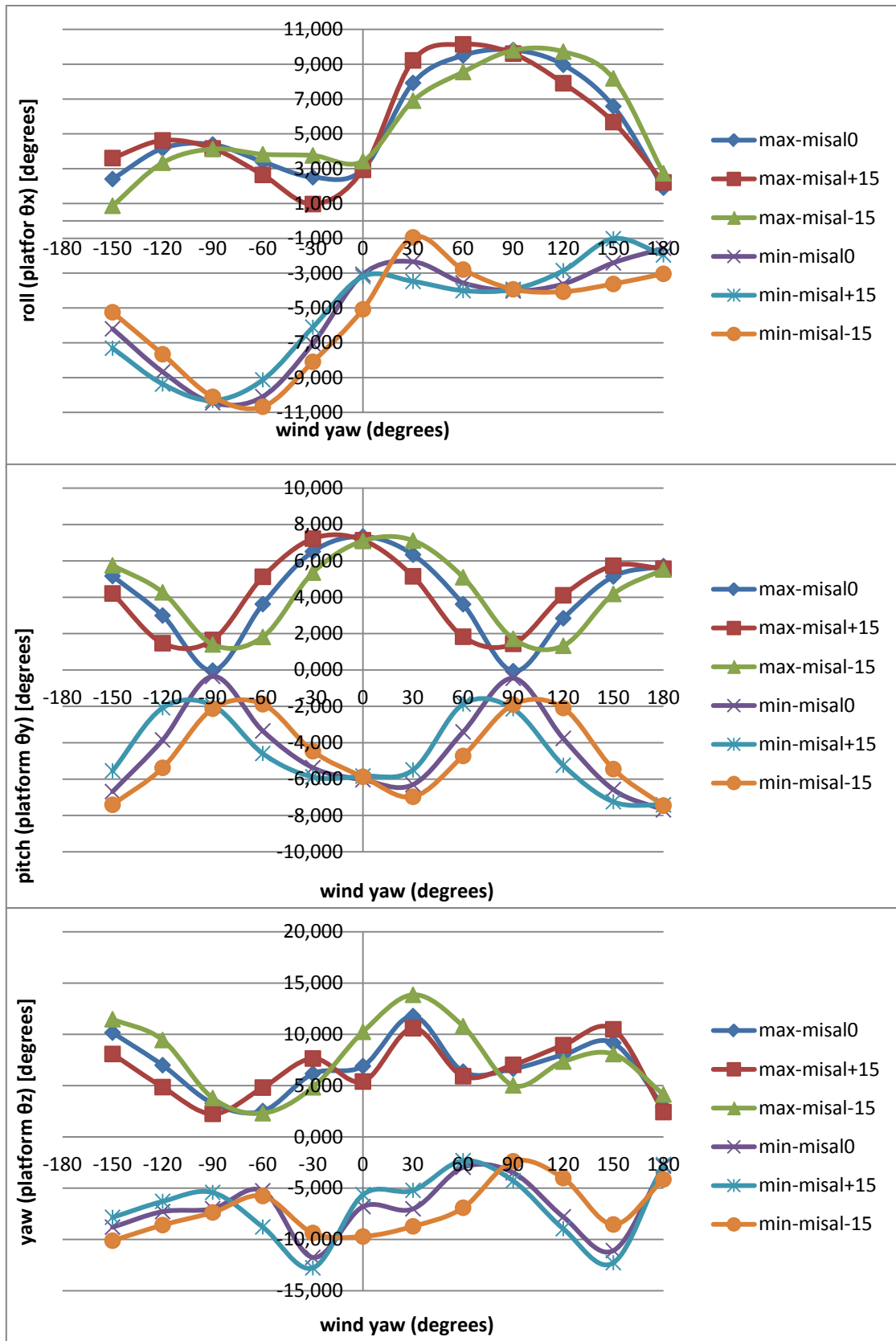
ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



Σχήμα 3.90 : ταλάντωση εμπρός-πίσω του πλωτήρα για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου και κύματος

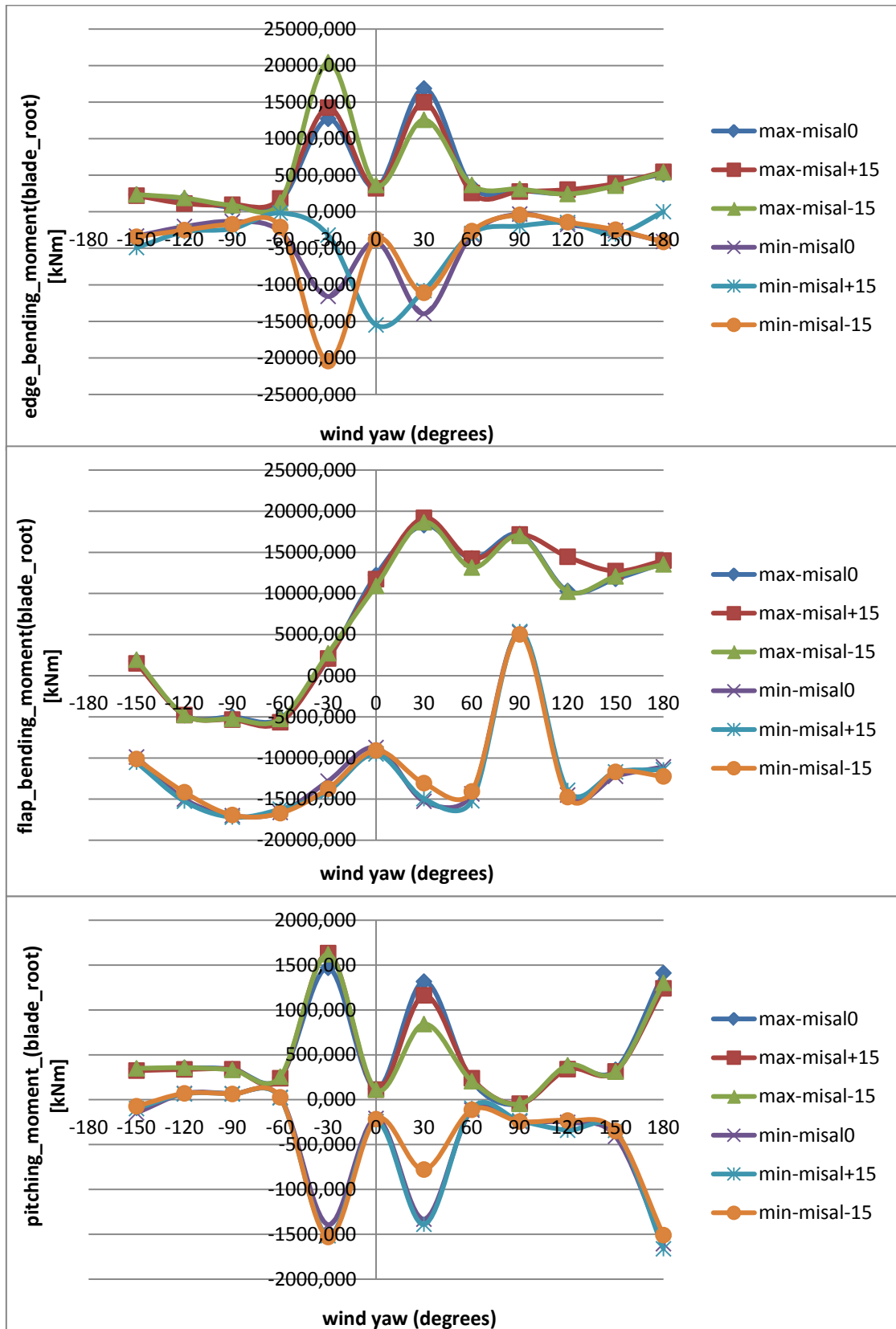


Σχήμα 3.91 : ταλάντωση αριστερά-δεξιά του πλωτήρα για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου και κύματος

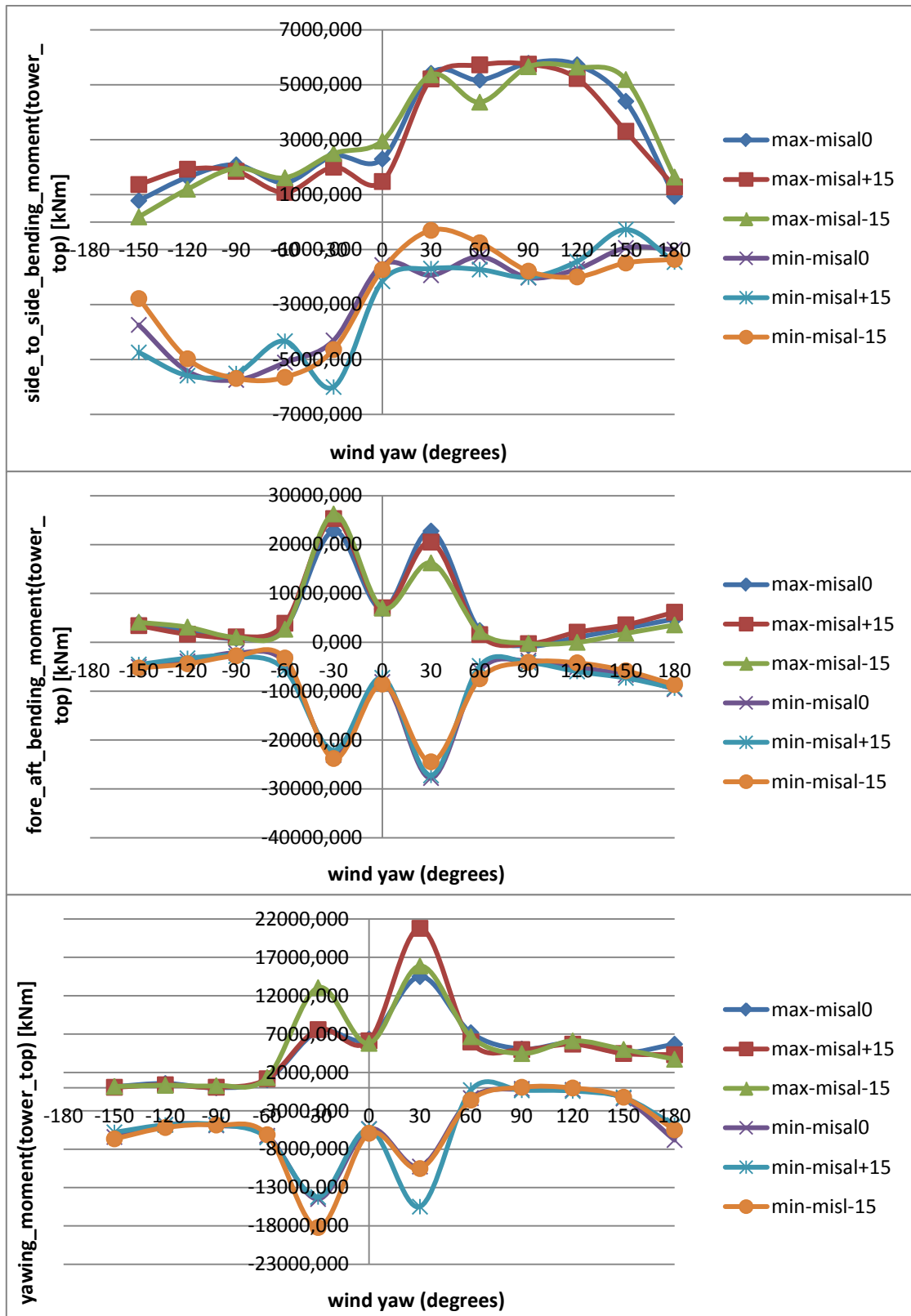


Σχήματα 3.92-3.94 : περιστροφικές κινήσεις του πλωτήρα για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου και κύματος

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

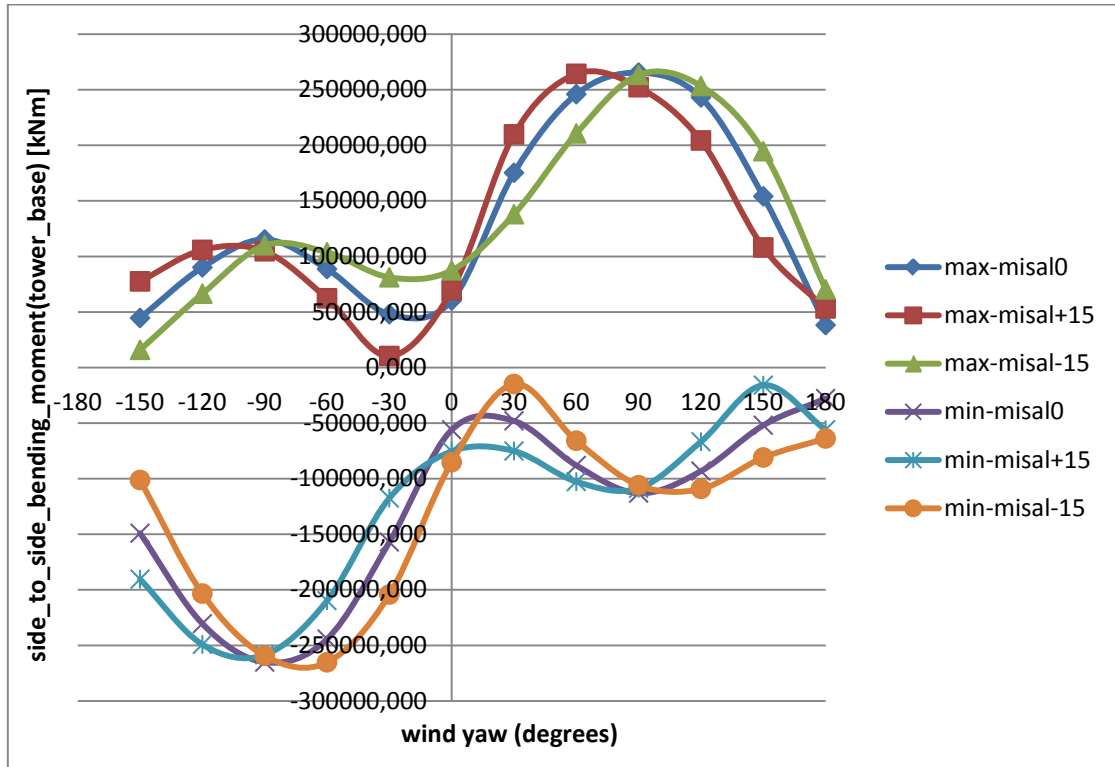


Σχήματα 3.95-3.97 : ροπές κατά z, x, y στη ρίζα του περυγίου για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου και κύματος

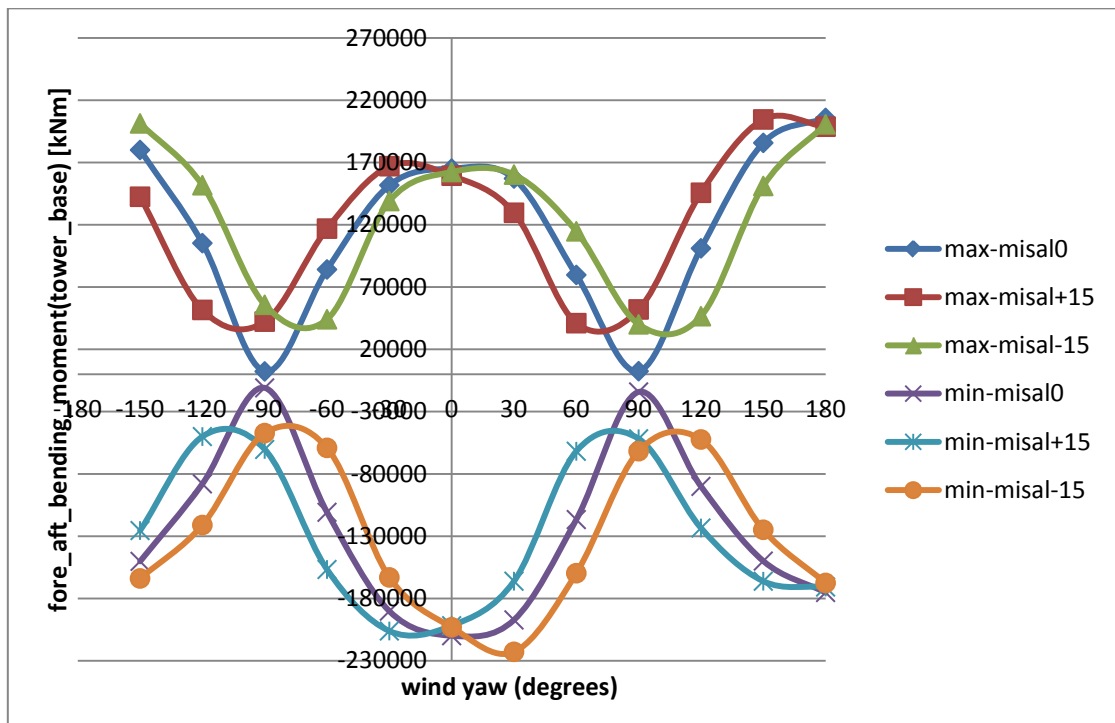


Σχήματα 3.98-3.100 : πλευρική καμπτική ροπή, διαμήκης καμπτική ροπή και ροπή στρέψης αντίστοιχα στην κορυφή του πύργου για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου-κύματος

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY
 ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



Σχήμα 3.101 : πλευρική καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της Α/Γ (σημείο σύνδεσης με το spar-buoy) για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου-κύματος



Σχήμα 3.102 : διαμήκης καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της Α/Γ (σημείο σύνδεσης με το spar-buoy) για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ανέμου-κύματος

3.5 Προβληματισμοί- συμπεράσματα από τη σύγκριση των φορτίσεων σε ανεμογεννήτριες τύπου monopile και spar-buoy

- Η μετάβαση από υπεράκτια ανεμογεννήτρια τύπου monopile σε πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου spar-buoy συνεπάγεται μείωση των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος, οπότε μεγαλύτερη πιθανότητα υπερδιέγερσης της κατασκευής από τον άνεμο και το κύμα
- Επιβάλλεται αλλαγή του συμβατικού συστήματος ελέγχου από γρήγορο σε πιο αργό σύστημα (μειωμένα Gains) έτσι ώστε να αποφεύγεται η αλληλεπίδραση των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος ελέγχου με τις ιδιοσυχνότητες του πλωτήρα που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υπερβαλλόντων φορτίων στην κατασκευή
- Οι φορτίσεις που προκύπτουν στην πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου spar-buoy είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας τύπου monopile
- Η pitching κίνηση του πλωτήρα συνεπάγεται μεγάλες διακυμάνσεις στα φορτία που αφορούν περισσότερο τη βάση του πύργου, γεγονός λιγότερο εμφανές στην περίπτωση των αντίστοιχων φορτίσεων της πακτωμένης ανεμογεννήτριας monopile (βλέπε σχήματα 3.61, 3.62, 3.78, 3.79, 3.87, 3.102 έναντι των αντίστοιχων σχημάτων 3.10, 3.11, 3.24, 3.25, 3.30, 3.42)
- Η pitching κίνηση του πλωτήρα οδηγεί σε μεγάλες μεταβολές στην ηλεκτρική ισχύ και στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα με αποτέλεσμα ακόμη και απώλεια ισχύος στο δίκτυο και αύξηση των αερακουστικών εκπομπών (βλέπε σχήματα 3.46, 3.47, 3.63, 3.64 έναντι των αντίστοιχων σχημάτων 3.1, 3.2, 3.15, 3.16)
- Η συγγραμμικότητα ή μη ανέμου και κύματος δεν επηρεάζει σημαντικά την εικόνα μεγίστων-ελαχίστων στην περίπτωση του monopile σε αντίθεση με την περίπτωση του spar-buoy όπου η συγγραμμικότητα, η προπόρευση ή η υστέρηση του κύματος σε σχέση με τον άνεμο συνεπάγεται διαφορετική συμπεριφορά στην εκάστοτε φόρτιση (βλέπε σχήματα 3.34-3.42 έναντι των αντίστοιχων σχημάτων στο διάστημα 3.88-3.102)
- Οι γωνίες ανέμου $+30^\circ$ και -30° διεγείρουν πολύ εντονότερα την κατασκευή στην περίπτωση του spar-buoy και δημιουργούν εμφανώς διαφορετική εικόνα στα διαγράμματα. Αυτό οφείλεται στην εντονότερη αποκόλληση της ροής που εμφανίζεται στην περίπτωση του spar-buoy καθώς επίσης και στις εντονότερες ταλαντώσεις στην κατεύθυνση περιστροφής (edgewise vibrations) λόγω μικρής

ΑΝΑΛΥΣΗ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΟΡΙΛΕ ΚΑΙ SPAR-BUOY ΤΥΠΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

αεροδυναμικής απόσβεσης (aerodynamic damping) [σχήματα 3.34-3.42 έναντι των αντίστοιχων σχημάτων στο διάστημα 3.88-3.102]

- Προχωρώντας από τα πτερύγια στη βάση του πύργου γίνεται σαφέστερη η επίδραση της διαφοράς φάσης μεταξύ ανέμου και κύματος στα αντίστοιχα φορτία της ανεμογεννήτριας τύπου spar-buoy και λιγότερο αλλά εξίσου αξιόλογη στα αντίστοιχα φορτία της ανεμογεννήτριας τύπου monopile
- Οι φορτίσεις που αφορούν τη βάση του πύργου είναι ξεκάθαρα διαφοροποιημένες και εντονότερες στην περίπτωση του spar-buoy έναντι του monopile (σχήματα 3.101, 3.102 έναντι 3.41, 3.42)
- Μεταβαίνοντας από την ανεμογεννήτρια τύπου monopile στην ανεμογεννήτρια τύπου spar-buoy , διαφαίνεται ότι η αυξημένη τύρβη (DLC 1.3) επενεργεί θετικά (μειωμένα εύρη) στις φορτίσεις που αφορούν τη ρίζα του πτερυγίου (σχήματα 3.66-3.68 έναντι των σχημάτων 3.17-3.19). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ένα μέρος της ενέργειας του ανέμου πηγαίνει στην κίνηση του πλωτήρα, επομένως οι φορτίσεις που δέχονται τα πτερύγια, οι οποίες ως επί το πλείστον καθορίζονται από την αεροδυναμική και όχι από το κύμα, εμφανίζονται μειωμένες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

4

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΥ
CONTROLLER

4.1 Ανάδραση από τη διαμήκη επιτάχυνση της κορυφής του πύργου ^[30]

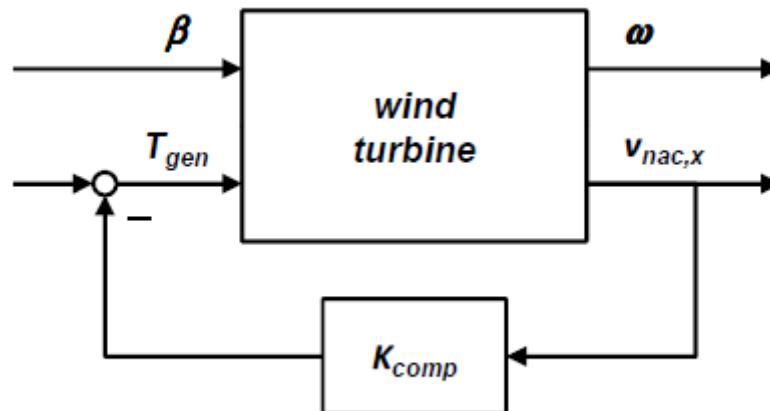
Το πλήρως συζευγμένο αέρο-ύδρο-σέρβο-ελαστικό πρόβλημα οδηγεί σε αλλαγή των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής (εν προκειμένω της πλωτής υπεράκτιας ανεμογεννήτριας). Πιο συγκεκριμένα, η εισαγωγή του πλωτήρα στο σύστημα ρίχνει την πρώτη ιδιοσυχνότητα της κατασκευής σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα από τα αντίστοιχα επίπεδα μιας ανεμογεννήτριας απευθείας πακτωμένης στον πυθμένα (monopile). Στην περίπτωση αυτή, οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος πλησιάζουν περισσότερο το εύρος συχνοτήτων στο οποίο ο άνεμος και το κύμα εμφανίζουν το μέγιστο ενεργειακό τους περιεχόμενο, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερες διεγέρσεις στην ανεμογεννήτρια. Επιπλέον, η μείωση των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής σε αυτά τα επίπεδα, είναι πιθανότερο να οδηγήσει σε αλληλεπίδραση αυτών των ιδιοσυχνοτήτων με τις ιδιοσυχνότητες του συστήματος ελέγχου (controller). Ειδικότερα, η αλληλεπίδραση της κίνησης των πτερυγίων με τις κινήσεις του πύργου, οδηγεί σε υπερδιέγερση της κατασκευής και αρνητικές αποσβέσεις (negative damping) που εμφανίζονται ιδιαίτερα στις κινήσεις του πλωτήρα (κυρίως platform pitch). Οι αρνητικές αποσβέσεις έχουν ως αποτέλεσμα υπερβάλλοντα φορτία στην κατασκευή. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, το “γρήγορο” controller (μεγάλα κέρδη-Gains) με τη βοήθεια του οποίου έγινε η ανάλυση των φορτίσεων στο κεφάλαιο 3, είναι πιθανό να προκληθούν προβλήματα, όπως αυτά που αναφέρθηκαν νωρίτερα με αρνητικές συνέπειες για την κατασκευή.

Από την άλλη μεριά, δε θα ήταν επίσης λύση να μειώσουμε τα κέρδη (gains) του συστήματος ελέγχου σε υπερβολικά επίπεδα, να έχουμε δηλαδή έναν “αργό” controller προκειμένου να αποφύγουμε την αλληλεπίδραση των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής με το σύστημα ελέγχου. Ο λόγος είναι ότι ο αργός controller συνεπάγεται αργή απόκριση στις μεταβολές του ανέμου, γεγονός που σημαίνει ότι δεν επενεργεί σωστά στη διατήρηση του επιπέδου των στροφών. Αντί αυτού μάλιστα αυξάνει την τυπική απόκλιση των στροφών άρα και της ισχύος και συνεπάγεται μεγαλύτερα φορτία ώσης καθώς επίσης και μεγαλύτερα κοπωτικά φορτία γενικότερα. ^{[24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]}

Με αφορμή τα παραπάνω, λοιπόν, καταδεικνύεται η ανάγκη εναλλακτικού σχεδιασμού του συστήματος ελέγχου που θα οδηγεί σε μείωση των φορτίσεων της πλωτής ανεμογεννήτριας τύπου spar-buoy. Το νέο σύστημα ελέγχου, λαμβάνει υπόψη του τη διαμήκη επιτάχυνση στην κορυφή του πύργου και τη χρησιμοποιεί ως επιπλέον ανάδραση στο σύστημα ελέγχου της ροπής της γεννήτριας (feedback of tower top acceleration)-(σχήμα 4.1). Η αρχή λειτουργίας του είναι η εξής : περνώντας την επιτάχυνση της κορυφής του πύργου μέσα από ένα αναλογικό-ολοκληρωτικό κατευθυντή PI (Proportional-Integral) τροφοδοτείται το σύστημα ελέγχου με μία επιπλέον ροπή στη γεννήτρια. Η ροπή αυτή επενεργεί στις στρόφες της γεννήτριας ω και μέσω αυτών επηρεάζεται η ώση, η οποία είναι άμεσα συσχετιζόμενη με τις στρόφες. Η ώση που δημιουργείται σε κάθε περίπτωση αντιτίθεται στη δύναμη που κινεί την ανεμογεννήτρια ανάντι και κατάντι. Έτσι, στην περίπτωση που η ανεμογεννήτρια κινείται προσήνεμα, η αντιρροπή στη γεννήτρια από την επίδραση της διαμήκου επιτάχυνσης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας τεχνητής “αντι-ώσης” που τείνει να

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΥ CONTROLLER

επαναφέρει την κατασκευή στην αρχική της θέση, ενώ όταν η ανεμογεννήτρια κινείται προς τα ανάντι επιβραδυνόμενη, η δύναμη ώσης επενεργεί και πάλι προς την αντίθετη κατεύθυνση προκαλώντας μια επιτάχυνση που θα την επαναφέρει.



Σχήμα 4.1 : ανάδραση από τη διαμήκη επιτάχυνση της κορυφής του πύργου

Η βασική εξίσωση που διέπει το νόμο της ανάδρασης μέσω του PI κατευθυντή είναι η εξής :

$$T_{gen} = \left(\frac{K_I}{s} \right) accel_{ttop} \Rightarrow$$

$$sT_{gen} = K_I \cdot accel_{ttop} \Rightarrow$$

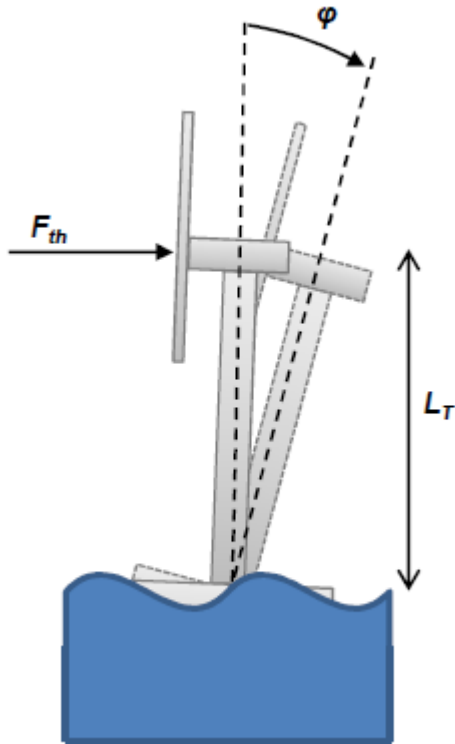
$$\dot{T}_{gen} = K_I \cdot accel_{ttop} \quad (4.1)$$

Από μια control engineering σκοπιά, η αλληλεπίδραση των ιδιοσυχνοτήτων της κίνησης των πτερυγίων με τις ιδιοσυχνότητες κίνησης του πλωτήρα, που διεγείρουν την κατασκευή, οφείλεται σε ένα σύνθετο ζεύγος μηδενιστών μη ελάχιστης φάσης (Non Minimum Phase Zeros- NMPZ) που εμφανίζονται στη συνάρτηση μεταφοράς που συνδέει τη γωνία βήματος των πτερυγίων με την ταχύτητα περιστροφής. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος γίνεται αντιστάθμιση (compensation) των μηδενιστών μη ελάχιστης φάσης με τη βοήθεια της επιπλέον ανάδρασης που εισάγεται στο σύστημα, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Ένα απλοποιημένο σύστημα (Fischer (2012))^[30] για την αντιστάθμιση δουλεύει ως εξής :

Η pitching κίνηση της πλατφόρμας δίνεται από μια διαφορική εξίσωση δευτέρας τάξης

$$J_T \ddot{\varphi} + D_T \dot{\varphi} + C_T \varphi = L_T F_{th} \quad (4.2)$$

όπου φ είναι η γωνία pitch της πλατφόρμας, F_{th} είναι η δύναμη ώσης, L_T το ύψος της ανεμογεννήτριας (σχήμα 4.2)



Τα περιστρεφόμενα μέρη συνοψίζονται στην παρακάτω διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης :

$$J_R \dot{\omega} = T_{aero} - T_{gen} \quad (4.3)$$

όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής, T_{aero} , T_{gen} είναι η αεροδυναμική ροπή και η ροπή της γεννήτριας αντίστοιχα

Στο απλοποιημένο αυτό πρότυπο, οι αεροδυναμικοί όροι που αφορούν την ώση και τη ροπή δίνονται από τους παρακάτω προσεγγιστικούς τύπους :

$$F_{th} = C_{F,v}(v_w - L_T \dot{\phi}) + C_{F,\omega} \omega + C_{F,\beta} \beta \quad (4.4)$$

$$T_{aero} = C_{T,v}(v_w - L_T \dot{\phi}) + C_{T,\omega} \omega + C_{T,\beta} \beta \quad (4.5)$$

Σχήμα 4.2 : σχηματική αναπαράσταση της pitching κίνησης του πλωτήρα υπό την επίδραση της ώσης

όπου οι σταθερές $C_{F,v}$, $C_{T,v}$ είναι οι συντελεστές αεροδυναμικής ώσης και ροπής που αντιστοιχούν στην εκάστοτε τοπική ταχύτητα ανέμου στα πτερύγια. Οι άλλες σταθερές είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές ώσης και ροπής με αναφορά στην εκάστοτε ταχύτητα περιστροφής ω και στην εκάστοτε γωνία βήματος β .

Η συνάρτηση μεταφοράς που συνδέει τη γωνία βήματος των πτερυγίων με τη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, προκύπτει με μετασχηματισμό Laplace των παραπάνω εξισώσεων και δίνεται από τη σχέση :

$$\omega(s) = \frac{\frac{C_T}{J_T} + \frac{1}{J_T} (D_T + \mu_{aero} L_T^2) s + s^2}{\alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + \alpha_3 s^3} \beta(s) \quad (4.6)$$

όπου το μ_{aero} στον αριθμητή ορίζεται ως εξής :

$$\mu_{aero} = C_{F,v} - C_{T,v} \frac{C_{F,\beta}}{C_{T,\beta}} \quad (4.7)$$

Από τη συνάρτηση μεταφοράς γίνεται σαφές ότι το ζεύγος των μηδενιστών μη ελάχιστης φάσης εμφανίζεται στην περίπτωση που ισχύει :

$$\mu_{aero} L_T^2 < -D_T \quad (4.8)$$

Δηλαδή η ύπαρξη των μηδενιστών μη ελάχιστης φάσης (NMPZ) εξαρτάται από την τιμή του όρου μ_{aero} (δηλαδή από το λόγο των αεροδυναμικών συντελεστών) και από την τιμή του όρου της απόσβεσης της pitching κίνησης της πλατφόρμας, D_T . Ο όρος μ_{aero} εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας και έχει πολύ χαμηλή τιμή κοντά στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου.

Η αντιμετώπιση, λοιπόν, του προβλήματος μέσω αντιστάθμισης των μηδενιστών μη ελάχιστης φάσης περιγράφεται παρακάτω :

Ανατροφοδοτείται η ροπή της γεννήτριας από την ταχύτητα του κλωβού με αποτέλεσμα την τροποποίηση των μηδενιστών που εμφανίζονται στη συνάρτηση μεταφοράς γωνίας βήματος-στροφών, με τρόπο ώστε να μην εισάγουν σημαντική απώλεια φάσης (διάγραμμα Bode) στην περιοχή συχνοτήτων κοντά στην ιδιοσυχνότητα της pitching κίνησης της πλατφόρμας (Fischer (2012))

Έτσι, η διαμήκης ταχύτητα του κλωβού δίνεται από την απλοποιημένη σχέση :

$$V_{nac,x} = L_T \dot{\phi} \quad (4.9)$$

ενώ η ροπή από την αναλογική (proportional) ανάδραση με την ταχύτητα δίνεται από τη σχέση :

$$T_{gen} = -K_{comp} L_T \dot{\phi} \quad (4.10)$$

και οδηγεί σε ένα τροποποιημένο αεροδυναμικό συντελεστή :

$$\tilde{\mu}_{aero} = C_{F,v} - (C_{T,v} - K_{comp}) \frac{C_{F,\beta}}{C_{T,\beta}} \quad (4.11)$$

όπου ο συντελεστής K_{comp} παίρνει κατάλληλες τιμές για την αντιστάθμιση των μηδενιστών μη ελάχιστης φάσης

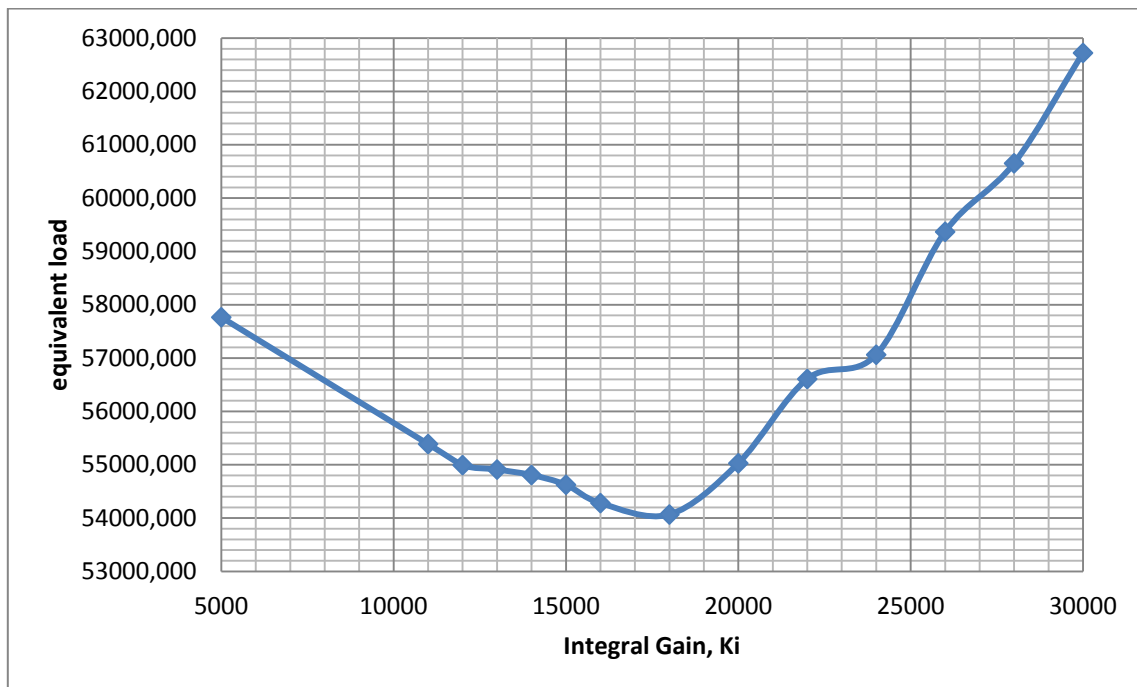
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο σχεδιασμός του εναλλακτικού συστήματος ελέγχου γίνεται σύμφωνα με την **εξίσωση 4.1**, η οποία είναι πιο ακριβής διότι η επιτάχυνση $accel_{ttop}$ δε λαμβάνει υπόψη της μόνο τη γωνιακή επιτάχυνση (όπως στο παραπάνω απλοποιημένο πρότυπο στο οποίο η ταχύτητα ορίζεται ως η γωνιακή ταχύτητα ενός σημείου στην κορυφή). Αντίθετα, λαμβάνει υπόψη της τη συνολική επιτάχυνση όπως αυτή προκύπτει με διπλή παραγωγή της κινηματικής εξίσωσης θέσης του βαθμού ελευθερίας που αντιστοιχεί στην κορυφή του πύργου. Με άλλα λόγια, λαμβάνει υπόψη του την πλήρη ελαστικότητα του προβλήματος. Ωστόσο, η παραπάνω ερευνητική δουλειά παρουσιάστηκε για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της επιπλέον ανάδρασης στο σύστημα ελέγχου της ροπής της γεννήτριας

Κριτήριο για την επιλογή της βέλτιστης τιμής του κέρδους ολοκληρωτή (integral Gain- K_I) που υπεισέρχεται στην εξίσωση (4.1) είναι να επιφέρει τη μεγαλύτερη δυνατή ποσοστιαία μείωση στα ισοδύναμα φορτία καταστροφής (Damage equivalent loads) συγκρινόμενο με την αρχική κατάσταση του controller, όπου δεν υπάρχει η επιπλέον ανάδραση

Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε να γίνει σύγκριση των ισοδύναμων φορτίων καταστροφής της διαμήκους καμπτικής ροπής στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας (σημείο σύνδεσης με το spar-buoy) αναφερόμενα στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου (δηλαδή στα 11,4 m/s). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται παρακάτω :

fa_bending_moment(tb)		
K _i	Equiv.load (kNm)	%
5000	57765,383	-6,01
11000	55388,258	-9,88
12000	54992,996	-10,52
13000	54909,695	-10,65
14000	54807,035	-10,82
15000	54624,793	-11,12
16000	54280,871	-11,68
18000	54066,535	-12,03
20000	55027,305	-10,46
22000	56608,137	-7,89
24000	57063,074	-7,15
26000	59367,938	-3,40
28000	60652,559	-1,31
30000	62722,035	2,06

original equival.load
61457,254



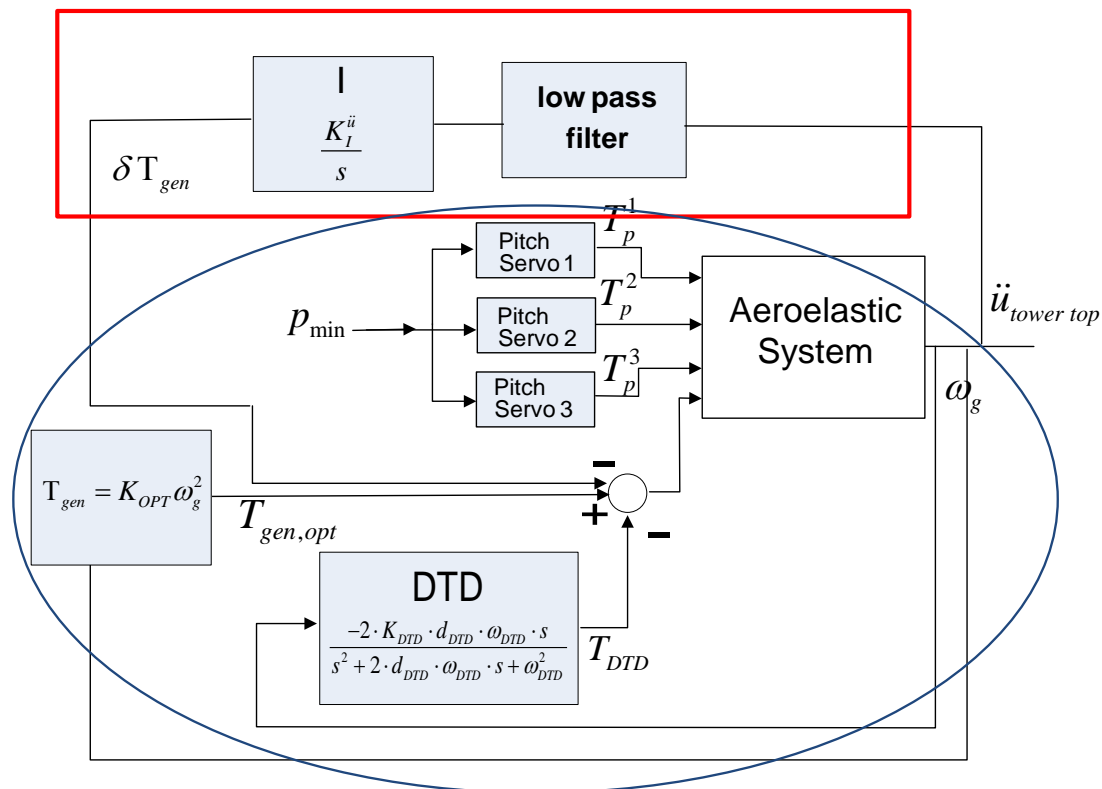
Γίνεται σαφές, λοιπόν, ότι για την τιμή κέρδους ολοκληρωτή ίση με 18000 έχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή μείωση στο ισοδύναμο φορτίο καταστροφής σε ποσοστό που φτάνει το 12 % .

4.2 Εισαγωγή χαμηλοπερατού φίλτρου

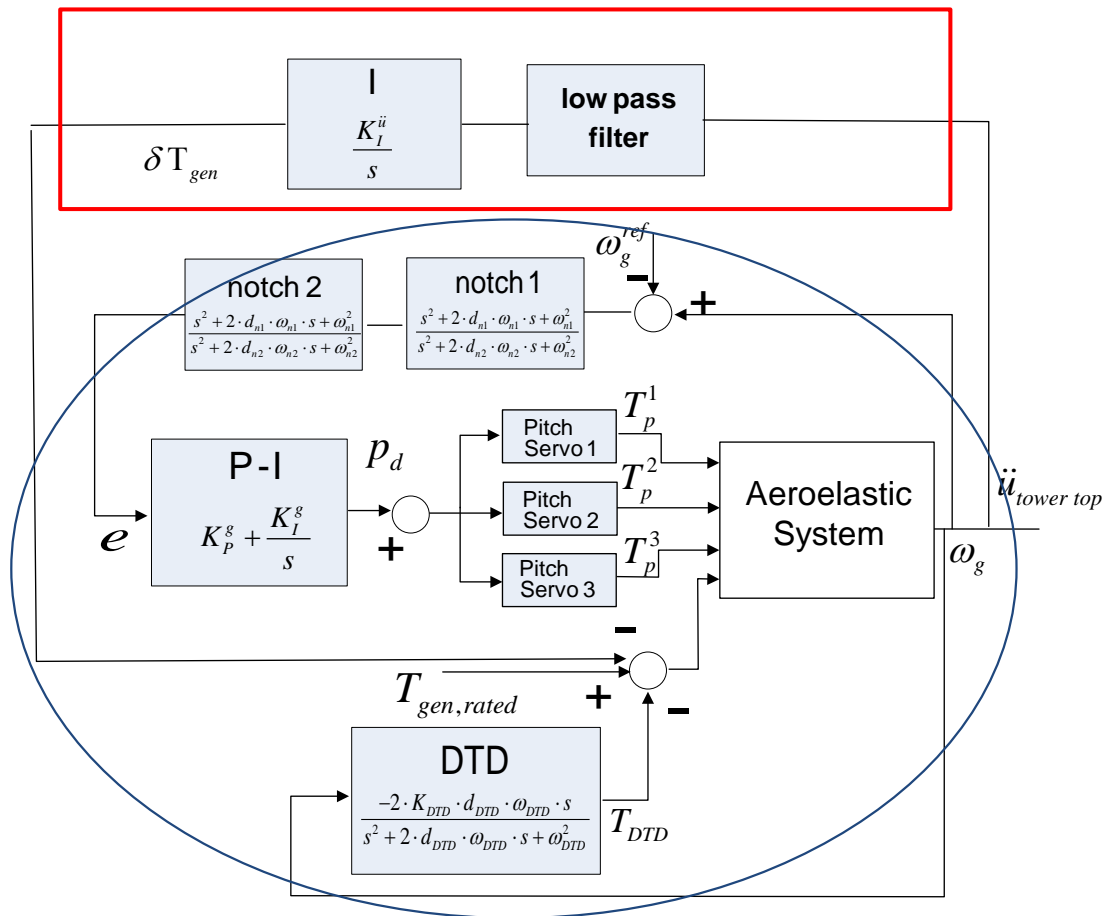
Μια επιπλέον επέμβαση που γίνεται στο σύστημα ελέγχου είναι η προσθήκη ενός χαμηλοπερατού φίλτρου (low pass filter) προ του PI κατευθυντή που καθορίζει τη νέα συνιστώσα ροπής στο σύστημα ελέγχου της ροπής της γεννήτριας. Έτσι, αντί να προσδιορίζεται η ροπή αυτή απευθείας από τη διαμήκη επιτάχυνση στην κορυφή του πύργου, λαμβάνεται ως είσοδος στον PI η φιλτραρισμένη πλέον τιμή της επιτάχυνσης. Αυτό γίνεται έτσι ώστε το σήμα που θα δέχεται ο ελεγκτής να είναι όσο το δυνατόν πιο ήπιο (smooth) χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις που οφείλονται στη στοχαστικότητα (υψίσυχνες μεταβολές ανέμου) και τις υψηλότερης τάξης ιδιοσυχνότητες της ανεμογεννήτριας. Επίσης, όπως διαπιστώνεται και από το ενεργειακό περιεχόμενο της καμπτικής ροπής στη βάση του πύργου, που προκύπτει με μετασχηματισμό Fourier και φασματική απεικόνιση αυτού, βρίσκεται συγκεντρωμένο σε περιοχές συχνοτήτων μικρότερες από 0,2 Hz. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η εισαγωγή ενός χαμηλοπερατού φίλτρου που θα περνάει αυτές τις χαμηλές συχνοότητες και θα επεμβαίνει σε αυτές διορθώνοντας τις αρνητικές επιδράσεις που επιφέρουν.

Η τροποποιημένη εξίσωση 4.1 που λαμβάνει πλέον υπόψη της και την ύπαρξη του φίλτρου δίνεται από τη σχέση :

$$\dot{T}_{gen} = K_I \cdot accel_{ttop_filtered} \quad (4.12)$$



Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται το πλήρες σύστημα ελέγχου για την περιοχή χαμηλών ταχυτήτων όπου επιδρά ο έλεγχος των στροφών για τη βέλτιστη λειτουργία από άποψη ισχύος της ανεμογεννήτριας (variable speed για βέλτιστο συντελεστή ισχύος), ενώ παρακάτω δίδεται το πλήρες σύστημα ελέγχου στην περιοχή υψηλών ταχυτήτων (μεγαλύτερων της ονομαστικής) όπου επιδρά ο έλεγχος της γωνίας βήματος με σταθερές στροφές (ονομαστικές) για τη διατήρηση σταθερής ισχύος [constant power-variable pitch]



Σε κύκλο δίνεται το βασικό σύστημα ελέγχου (συμβατικός controller), ενώ μέσα στο τετράγωνο απεικονίζεται το πρόσθετο σύστημα που εισάγεται στο σύστημα ελέγχου και περιλαμβάνει χαμηλοπερατό φίλτρο και PI κατευθυντή για την πρόσθετη αντιροπή μέσω της διαμήλους επιτάχυνσης της κορυφής του πύργου.

4.2.1 Συνάρτηση και ορίσματα φίλτρου στη Matlab

Υπάρχουν διάφοροι τύποι χαμηλοπερατών φίλτρων. Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε ελλειπτικό χαμηλοπερατό φίλτρο έναντι των φίλτρων Butterworth και Chebyshev, διότι πετυχαίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τη μικρότερη τάξη από οποιοδήποτε άλλο φίλτρο. Κάθε ελλειπτικό χαμηλοπερατό φίλτρο δέχεται μια είσοδο και αποδίδει μια έξοδο με τη βοήθεια των παρακάτω εξισώσεων κατάστασης :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}$$

όπου u είναι η είσοδος, y είναι η επιθυμητή έξοδος, x είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης και A, B, C, D είναι τα μητρώα κατάστασης.

Όταν επιζητείται η έξοδος που δίδει το φίλτρο με γνωστή την είσοδο, αρκεί να είναι γνωστά τα μητρώα κατάστασης του εκάστοτε φίλτρου. Στην παρούσα ανάλυση, είσοδο στο φίλτρο αποτελεί η διαμήκης επιτάχυνση της κορυφής του πύργου $accel_{ttop}$ και έξοδο από το φίλτρο αποτελεί η φιλτραρισμένη τιμή της επιτάχυνσης δηλαδή η συμβολιζόμενη ως $accel_{ttop_filtered}$ στην εξίσωση (4.12) . Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που επιθυμούμε να έχει το φίλτρο, έχουμε και διαφορετικά μητρώα κατάστασης που το χαρακτηρίζουν. Έτσι, εισάγοντας στη Matlab μια σειρά από κατάλληλα ορίσματα που χαρακτηρίζουν την επιθυμητή λειτουργία του φίλτρου, παίρνουμε απ' ευθείας τα κατάλληλα μητρώα κατάστασης A, B, C, D . Τα ορίσματα αυτά περιλαμβάνουν την τάξη του φίλτρου n , τα dB της διαταραχής στο εύρος περατών συχνοτήτων R_p (dB of the ripple in the pass band), τα dB της διαταραχής στην περιοχή των αποκομμένων συχνοτήτων R_s (stop band dB down from the peak value in the pass band) , τη μη κανονικοποιημένη συχνότητα αποκοπής σε rad/sec ω_p (non normalized angular frequency), το είδος του φίλτρου '**ftype**' (στην περίπτωση του χαμηλοπερατού που εξετάζεται '**ftype**' = '**low**') και μια μεταβλητή ' s ' . Γράφοντας την εντολή `ellip` με τα προαναφερθέντα ορίσματα προσδιορίζονται τα αντίστοιχα μητρώα κατάστασης.

Η πλήρης σύνταξη είναι η ακόλουθη :

$$[A, B, C, D] = \text{ellip}(n, R_p, R_s, \omega_p, 'low', 's')$$

Παρακάτω δίνεται όλη η βοήθεια που αφορά ποικίλους και διαφορετικούς τρόπους ορισμού του χαμηλοπερατού φίλτρου , όπως ακριβώς προσδιορίζεται στη Matlab :

ellip

Elliptic filter design

Syntax

```
[z,p,k]=ellip(n,Rp,Rs,Wp)
[z,p,k] = ellip(n,Rp,Rs,Wp,'ftype')
[b,a]=ellip(n,Rp,Rs,Wp)
[b,a]=ellip(n,Rp,Rs,Wp,'ftype')
[A,B,C,D]=ellip(n,Rp,Rs,Wp)
[A,B,C,D]=ellip(n,Rp,Rs,Wp,'ftype')
[z,p,k]=ellip(n,Rp,Rs,Wp,'s')
[z,p,k]=ellip(n,Rp,Rs,Wp,'ftype','s')
[b,a]=ellip(n,Rp,Rs,Wp,'s')
[b,a]=ellip(n,Rp,Rs,Wp,'ftype','s')
[A,B,C,D]=ellip(n,Rp,Rs,Wp,'s')
[A,B,C,D]=ellip(n,Rp,Rs,Wp,'ftype','s')
```

Description

`ellip` designs lowpass, bandpass, highpass, and bandstop digital and analog elliptic filters. Elliptic filters offer steeper rolloff characteristics than Butterworth or Chebyshev filters, but are equiripple in both the pass- and stopbands. In general, elliptic filters meet given performance specifications with the lowest order of any filter type.

Digital Domain

`[z,p,k] = ellip(n,Rp,Rs,Wp)` designs an order n lowpass digital elliptic filter with normalized passband edge frequency W_p , R_p dB of ripple in the passband, and a stopband R_s dB down from the peak value in the passband. It returns the zeros and poles in length n column vectors z and p and the gain in the scalar k .

The *normalized passband edge frequency* is the edge of the passband, at which the magnitude response of the filter is $-R_p$ dB. For `ellip`, the normalized cutoff frequency W_p is a number between 0 and 1, where 1 corresponds to half the sampling frequency (Nyquist frequency). Smaller values of passband ripple R_p and larger values of stopband attenuation R_s both lead to wider transition widths (shallower rolloff characteristics).

If W_p is a two-element vector, $W_p = [w1 \ w2]$, `ellip` returns an order $2 * n$ bandpass filter with passband $w1 < \omega < w2$.

`[z,p,k] = ellip(n,Rp,Rs,Wp,'ftype')` designs a highpass, lowpass, or bandstop filter, where the string `'ftype'` is one of the following:

- `'high'` for a highpass digital filter with normalized passband edge frequency W_p
- `'low'` for a lowpass digital filter with normalized passband edge frequency W_p
- `'stop'` for an order $2 * n$ bandstop digital filter if W_p is a two-element vector, $W_p = [w1 \ w2]$. The stopband is $w1 < \omega < w2$.

With different numbers of output arguments, `ellip` directly obtains other realizations of the filter. To obtain the transfer function form, use two output arguments as shown below.

`[b, a] = ellip(n, Rp, Rs, Wp)` designs an order n lowpass digital **elliptic** filter with normalized passband edge frequency W_p , ripple in the passband, and a stopband R_s dB down from the peak value in the passband. It returns the filter coefficients in the row vectors b and a , with coefficients in descending powers of z .

$$H(z) = \frac{b(1) + b(2)z^{-1} + \dots + b(n+1)z^{-n}}{1 + a(2)z^{-1} + \dots + a(n+1)z^{-n}}$$

`[b, a] = ellip(n, Rp, Rs, Wp, 'ftype')` designs a highpass, lowpass, or bandstop filter, where the string `'ftype'` is `'hi'` or `'stop'`, as described above.

To obtain state-space form, use four output arguments as shown below:

`[A, B, C, D] = ellip(n, Rp, Rs, Wp)` or

`[A, B, C, D] = ellip(n, Rp, Rs, Wp, 'ftype')` where A , B , C , and D are

$$\begin{aligned}x[n+1] &= Ax[n] + Bu[n] \\y[n] &= Cx[n] + Du[n]\end{aligned}$$

and u is the input, x is the state vector, and y is the output.

Analog Domain

`[z, p, k] = ellip(n, Rp, Rs, Wp, 's')` designs an order n lowpass analog **elliptic** filter with angular passband edge frequency and returns the zeros and poles in length n or $2*n$ column vectors z and p and the gain in the scalar k .

The *angular passband edge frequency* is the edge of the passband, at which the magnitude response of the filter is $-R_p$ dB. For angular passband edge frequency W_p must be greater than 0 rad/s.

If W_p is a two-element vector with $w_1 < w_2$, then `ellip(n, Rp, Rs, Wp, 's')` returns an order $2*n$ bandpass analog filter with passband $w_1 < \omega < w_2$.

`[z, p, k] = ellip(n, Rp, Rs, Wp, 'ftype', 's')` designs a highpass, lowpass, or bandstop filter, where the string `'ftype'` is `'high'`, `'low'`, or `'stop'`, as described above.

With different numbers of output arguments, `ellip` directly obtains other realizations of the analog filter. To obtain the transfer function use two output arguments as shown below:

`[b, a] = ellip(n, Rp, Rs, Wp, 's')` designs an order n lowpass analog **elliptic** filter with angular passband edge frequency W_p and returns the filter coefficients in the length $n+1$ row vectors b and a , in descending powers of s , derived from this transfer function:

$$H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b(1)s^n + b(2)s^{n-1} + \dots + b(n+1)}{s^n + a(2)s^{n-1} + \dots + a(n+1)}$$

`[b, a] = ellip(n, Rp, Rs, Wp, 'ftype', 's')` designs a highpass, lowpass, or bandstop filter, where the string `'ftype'` is `'low'`, or `'stop'`, as described above.

To obtain state-space form, use four output arguments as shown below:

`[A, B, C, D] = ellip(n, Rp, Rs, Wp, 's')` or

`[A, B, C, D] = ellip(n, Rp, Rs, Wp, 'ftype', 's')` where A , B , C , and D are

$$\begin{aligned}x &= Ax + Bu \\y &= Cx + Du\end{aligned}$$

and u is the input, x is the state vector, and y is the output.

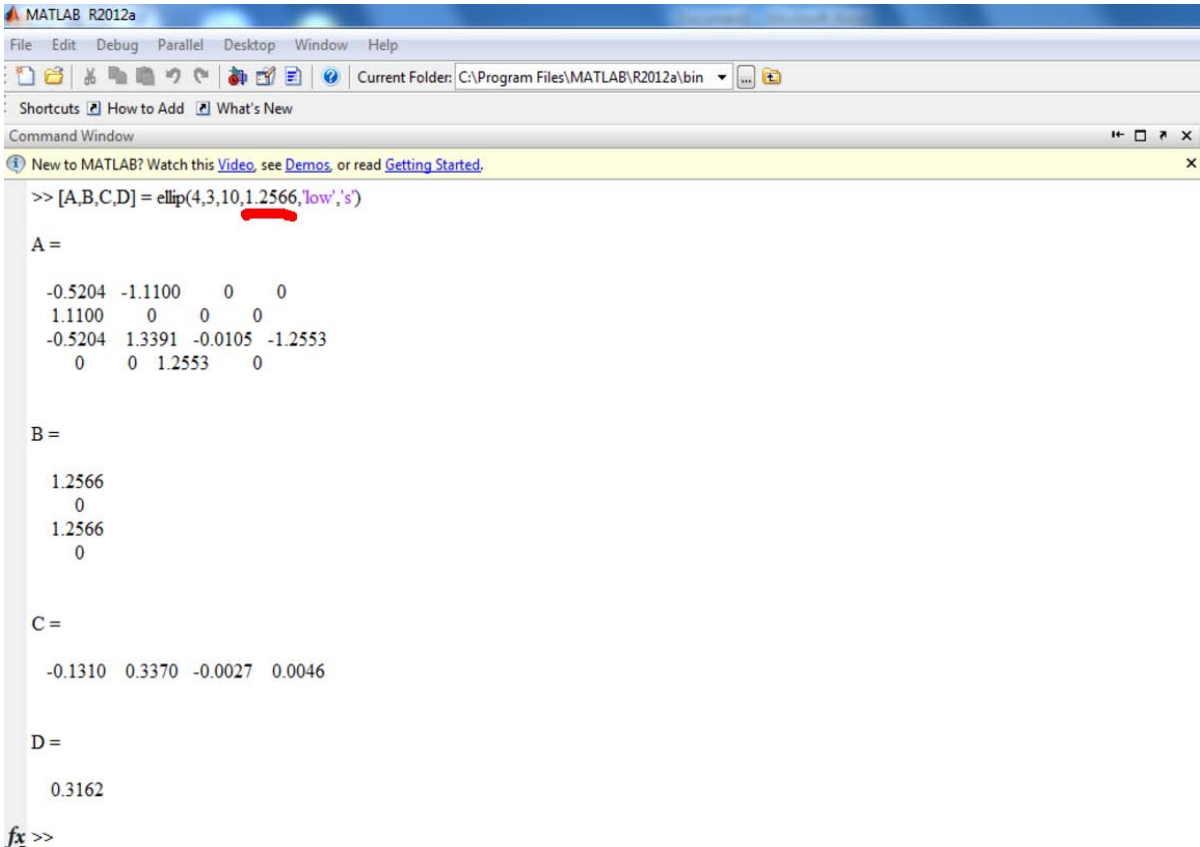
Επειδή χρησιμοποιείται ελλειπτικό χαμηλοπερατό φίλτρο 4^{ης} τάξης στην παρούσα εργασία, οι μεταβλητές κατάστασης είναι 4, δηλαδή $(x_1, x_2, x_3, x_4)^T$. Αυτό σημαίνει ότι το μητρώο A είναι διάστασης 4×4 , το μητρώο B είναι διάστασης 4×1 (αφού u είναι μία μοναδική τιμή), το μητρώο C είναι διάστασης 1×4 και τέλος το μητρώο D εκφυλίζεται σε ένα στοιχείο.

4.2.2 Κριτήριο επιλογής του κατάλληλου φίλτρου

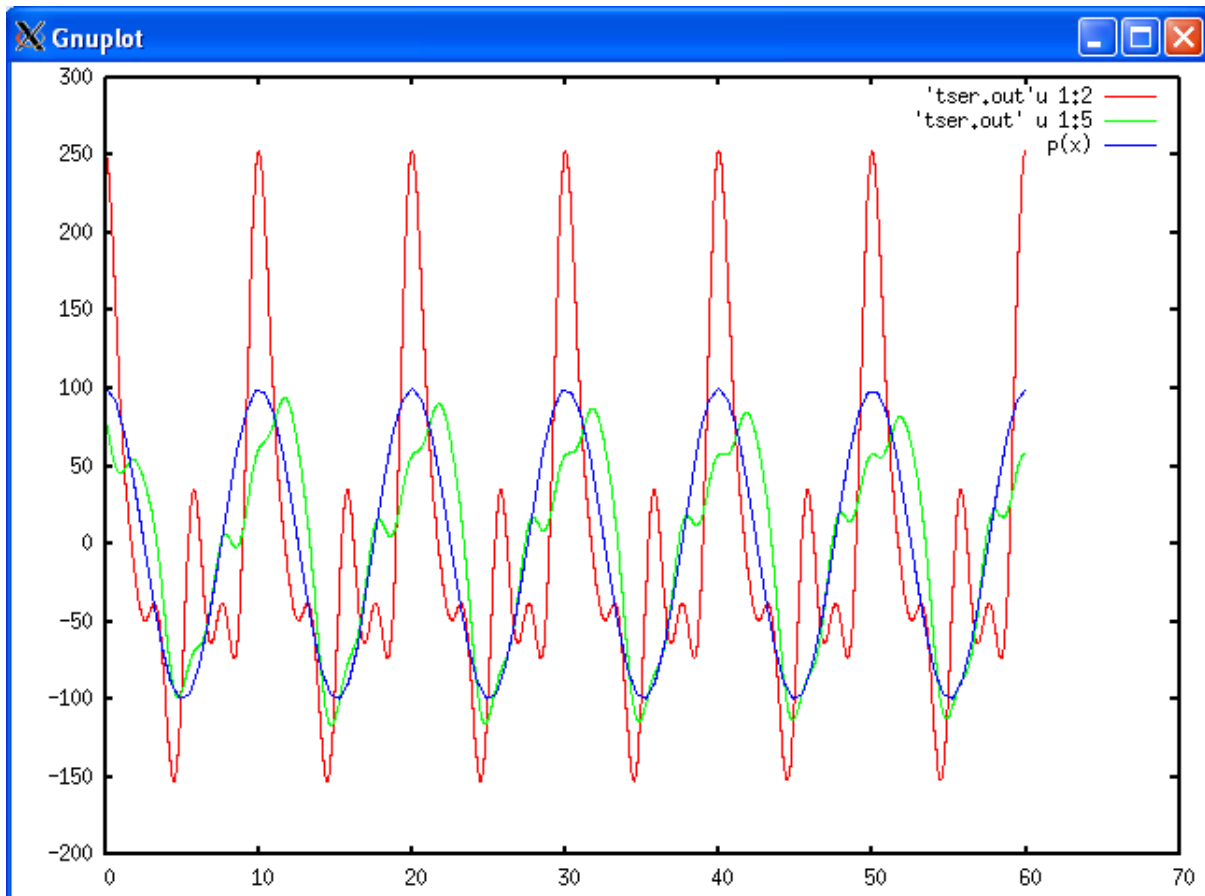
Η επιλογή του κατάλληλου φίλτρου που ενσωματώνεται στον εναλλακτικό σχεδιασμό του controller γίνεται με τη διαδικασία try and error. Αυτό σημαίνει ότι δοκιμάζονται φίλτρα με διαφορετικές συχνότητες αποκοπής (0,2 Hz ή 1,2566 rad/sec και 0,1 Hz ή 0,6283 rad/sec) και διαφορετικά Rp (10 dB, 20dB, 30 dB έως και 100 dB) και εξετάζονται ως προς την απόκριση τους σε δεδομένη είσοδο. Πιο συγκεκριμένα για κάθε συνδυασμό ορισμάτων που προαναφέρθηκαν λαμβάνονται τα μητρώα κατάστασης από τη Matlab σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 4.2.1. Στη συνέχεια τα μητρώα τροφοδοτούνται ως δεδομένα σε ένα κώδικα γραμμένο σε γλώσσα Fortran 77 και Fortran 90 , με τον οποίο γίνεται η επίλυση των εξισώσεων κατάστασης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Newmark. Η δεδομένη είσοδος είναι ένα άθροισμα 5 συνημιτονοειδών όρων διαφορετικού πλάτους και διαφορετικής συχνότητας (από 0,1 Hz έως 0,5 Hz με βήμα 0,1 Hz) και φάσης και είναι η ακόλουθη :

```
X(i) = 100d0*dcos(0.1d0*2.d0*pi*T(i))
      + 75d0*dcos(0.2d0*2.d0*pi*T(i)-pi/6.d0)
      + 55d0*dcos(0.3d0*2.d0*pi*T(i)+pi/8.d0)
      + 30d0*dcos(0.4d0*2.d0*pi*T(i)-pi/4.d0)
      + 30d0*dcos(0.5d0*2.d0*pi*T(i)+pi/3.d0)
```

- *Lowpass φίλτρο 4^{ης} τάξης 0,2 Hz- 10 dB*



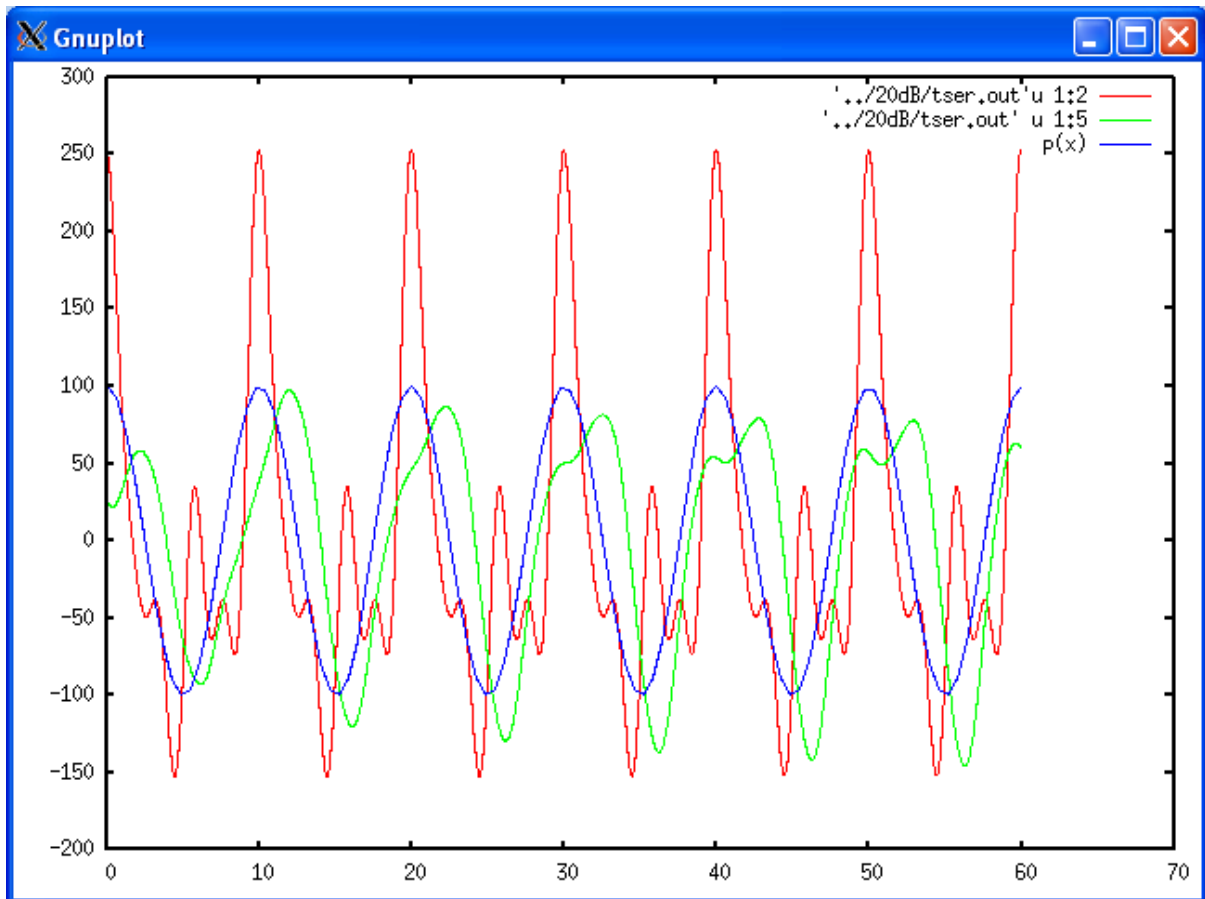
```
MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin
Shortcuts How to Add What's New
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> [A,B,C,D] = ellip(4,3,10,1.2566,'low','s')
A =
-0.5204 -1.1100 0 0
1.1100 0 0 0
-0.5204 1.3391 -0.0105 -1.2553
0 0 1.2553 0
B =
1.2566
0
1.2566
0
C =
-0.1310 0.3370 -0.0027 0.0046
D =
0.3162
fx >>
```



Με **κόκκινο** χρώμα απεικονίζεται η **είσοδος** (άθροισμα 5 αρμονικών συνιστωσών), με **μπλε** χρώμα απεικονίζεται η **πρώτη συνιστώσα του σήματος εισόδου** (αυτή με τη μικρότερη συχνότητα = 0,1 Hz) και με **πράσινο** απεικονίζεται η **έξοδος του χαμηλοπερατού φίλτρου**

- *Lowpass φίλτρο 4^{ης} τάξης 0,2 Hz- 20 dB*

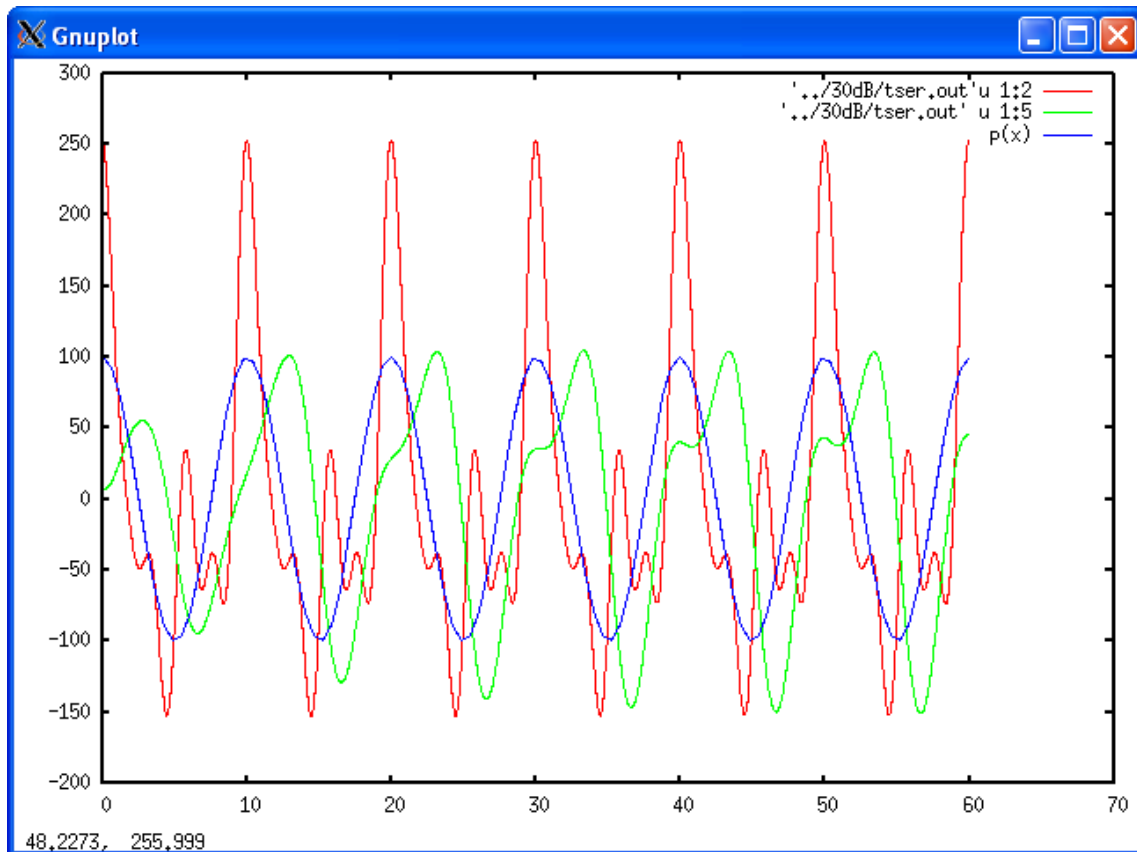
```
>> [A,B,C,D] = ellip(4,3,20,1.2566,'low','s')
A =
-0.6297 -0.8796 0 0
0.8796 0 0 0
-0.6297 4.5719 -0.0568 -1.2450
0 0 1.2450 0
B =
1.2566
0
1.2566
0
C =
-0.0501 0.3638 -0.0045 0.0141
D =
0.1000
fx >> |
▲ Start
```



- *Lowpass φίλτρο 4^{ης} τάξης 0,2 Hz- 30 dB*

```

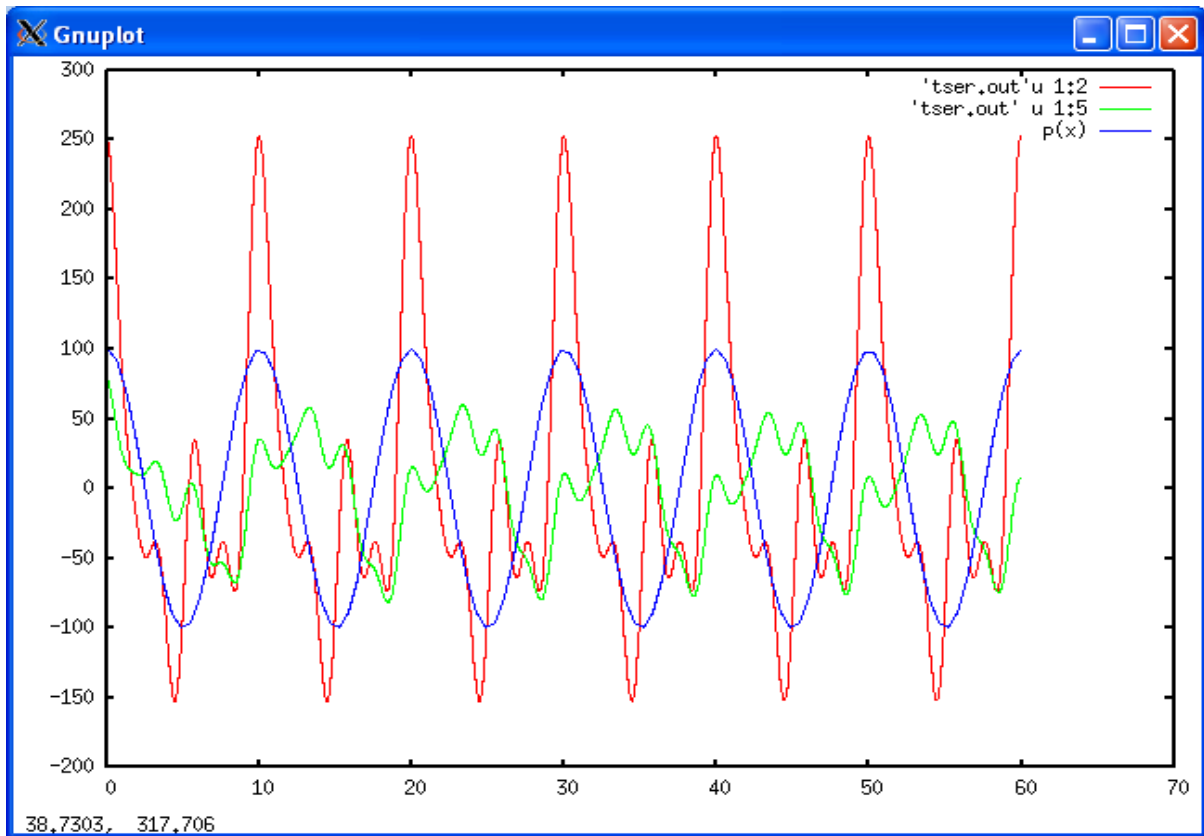
MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin
Shortcuts How to Add What's New
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> [A,B,C,D] = ellip(4,3,30,1.2566,'low','s')
A =
-0.6038 -0.7373 0 0
0.7373 0 0 0
-0.6038 10.4243 -0.1092 -1.2300
0 0 1.2300 0
B =
1.2566
0
1.2566
0
C =
-0.0152 0.2623 -0.0027 0.0148
D =
0.0316
    
```



- *Lowpass φίλτρο 4^{ης} τάξης 0,1 Hz- 10 dB*

```

MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin
Shortcuts How to Add What's New
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> [A,B,C,D] = ellip(4,3,10,0.6283,'low','s')
A =
-0.2602 -0.5550 0 0
0.5550 0 0 0
-0.2602 0.6695 -0.0053 -0.6277
0 0 0.6277 0
B =
0.6283
0
0.6283
0
C =
-0.1310 0.3370 -0.0027 0.0046
D =
0.3162
fx >>
    
```



- *Lowpass φίλτρο 4^{ης} τάξης 0,1 Hz- 20 dB*

```

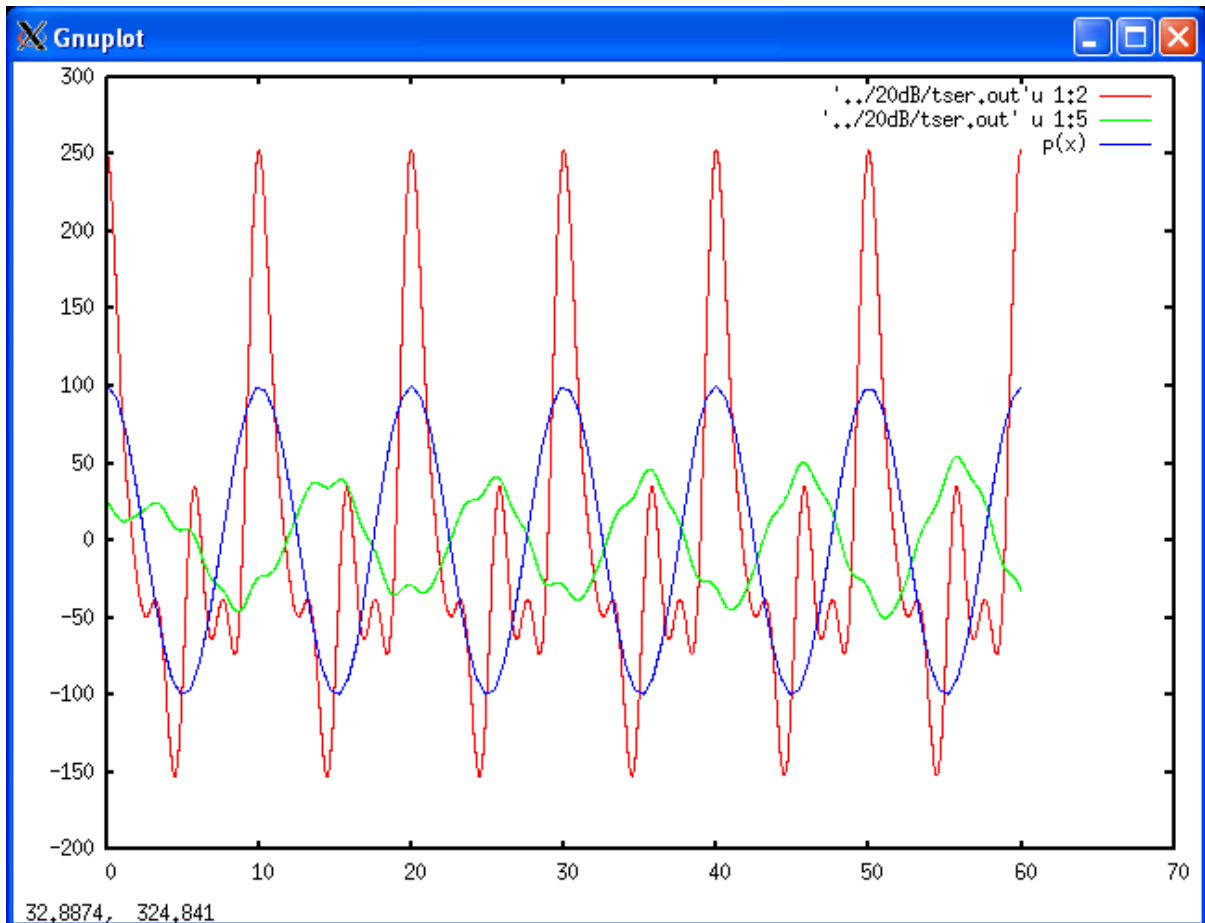
MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin
Shortcuts How to Add What's New
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> [A,B,C,D] = ellip(4,3,20,0.6283,'low','s')
A =
-0.3148 -0.4398 0 0
0.4398 0 0 0
-0.3148 2.2859 -0.0284 -0.6225
0 0 0.6225 0

B =
0.6283
0
0.6283
0

C =
-0.0501 0.3638 -0.0045 0.0141

D =
0.1000

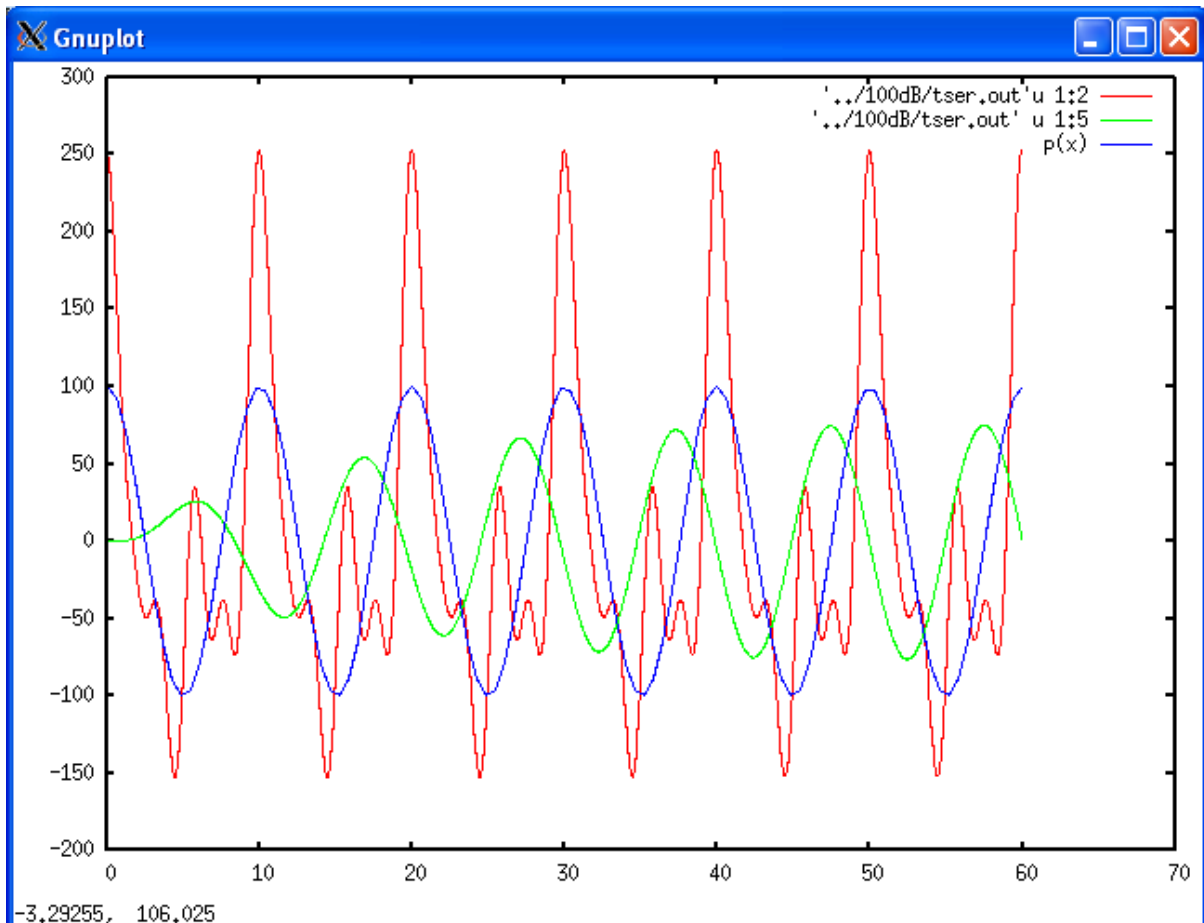
fx >>
    
```

- *Lowpass φίλτρο 4^{ης} τάξης 0,1 Hz- 100 dB*

```

MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Program Files\MATLAB\R2012a\bin
Shortcuts How to Add What's New
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> [A,B,C,D] = ellip(4,3,100,0.6283,'low','s')
A =
-0.2593 -0.2797 0 0
0.2797 0 0 0
-0.2593 381.8181 -0.1059 -0.5975
0 0 0.5975 0
B =
0.6283
0
0.6283
0
C =
-0.0000 0.0061 -0.0000 0.0005
D =
1.0000e-05
fx >>
    
```



Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται σαφές ότι το **καταλληλότερο φίλτρο** μεταξύ των περιπτώσεων που ελέγχθησαν είναι αυτό που αντιστοιχεί σε **συχνότητα αποκοπής 0,2 Hz και $R_s = 10$ dB**. Δεν επιλέγονται τα φίλτρα της κατηγορίας των 0,1 Hz είτε διότι εμφανίζουν περισσότερες συχνότητες (δεν αποκόπτουν σωστά)[βλέπε 0,1 Hz – 20 dB] είτε διότι εισάγουν μεγάλη διαφορά φάσης στην έξοδο του σήματος σε σχέση με την είσοδο ,γεγονός μη επιθυμητό (βλέπε 0,1 Hz – 100 dB) είτε διότι εμφανίζουν τάση αρνητικής απόσβεσης (αύξηση πλάτους σήματος εξόδου- βλέπε 0,1 Hz – 100 dB)

Αξίζει να σημειωθεί ότι σχολαστικότερη και λεπτομερέστερη διερεύνηση των παραμέτρων που ορίζουν το χαμηλοπερατό φίλτρο ίσως οδηγεί σε διαφορετική λύση ως βέλτιστη.

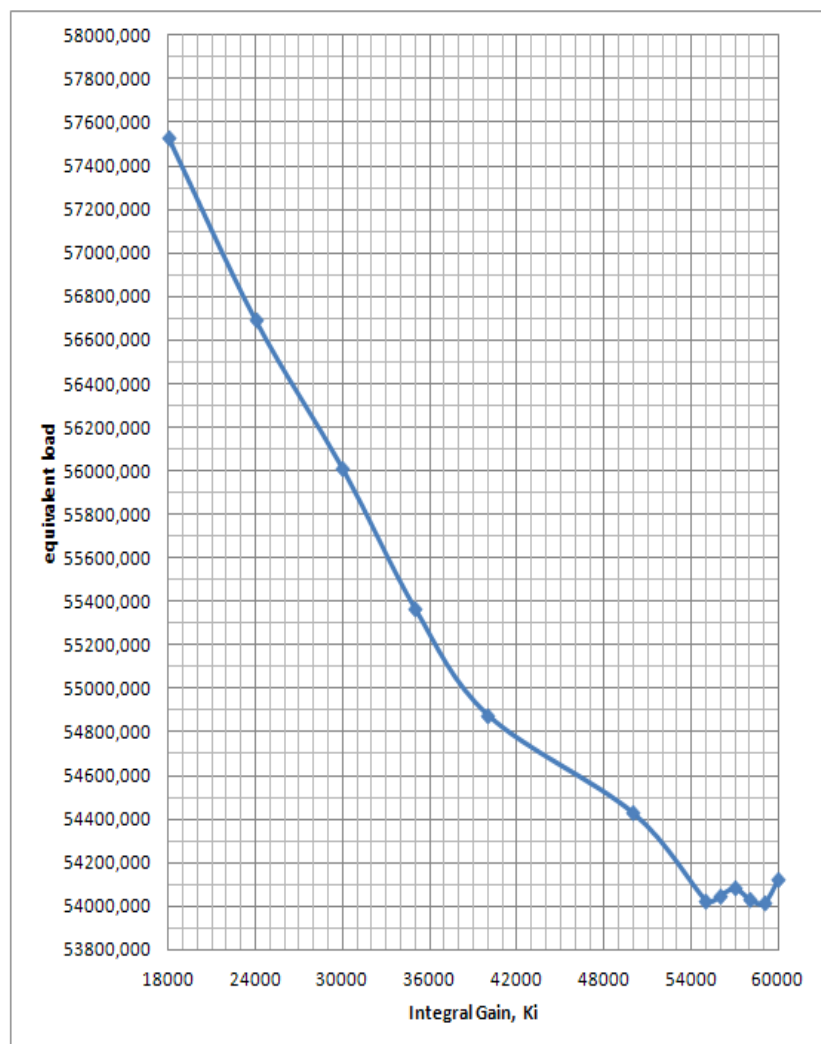
4.3 Κριτήριο επιλογής του κατάλληλου κέρδους ολοκληρωτή

Αφού επιλέχθηκε το κατάλληλο φίλτρο, μένει να οριστεί το κατάλληλο κέρδος του ολοκληρωτή (integral Gain- K_I). Καθώς η φιλτραρισμένη τιμή της επιτάχυνσης είναι μικρότερη από την αρχική αναμένεται μια αύξηση του κέρδους του ολοκληρωτή μετά την επιβολή του φίλτρου. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.1, **κριτήριο** για την επιλογή της βέλτιστης τιμής του κέρδους ολοκληρωτή (integral Gain- K_I) που υπεισέρχεται στην εξίσωση (4.12) είναι να επιφέρει τη μεγαλύτερη δυνατή ποσοστιαία μείωση στα ισοδύναμα φορτία καταστροφής (Damage equivalent loads) συγκρινόμενο με την αρχική κατάσταση του controller, όπου δεν υπάρχει η επιπλέον ανάδραση

Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε να γίνει σύγκριση των ισοδύναμων φορτίων καταστροφής της διαμήκουσ καμπτικής ροπής στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας (σημείο σύνδεσης με το spar-buoy) αναφερόμενα στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου (δηλαδή στα 11,4 m/s). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται παρακάτω :

fa_bending_moment(tb)		
K_I	Equiv.load	%decrease
18000	57534,094	-6,38
24000	56695,184	-7,75
30000	56012,184	-8,86
35000	55366,867	-9,91
40000	54879,570	-10,70
50000	54429,086	-11,44
55000	54028,492	-12,09
56000	54051,793	-12,05
57000	54082,625	-12,00
58000	54034,363	-12,08
59000	54014,070	-12,11
60000	54125,543	-11,93

Original eq.load
61457,254 kNm



Στην ενότητα 4.1 έγινε σαφές ότι η βέλτιστη τιμή του κέρδους ολοκληρωτή πριν την εφαρμογή του χαμηλοπερατού φίλτρου είναι 18000. Επιλέγοντας μια μέση τιμή κέρδους ολοκληρωτή ίση με 30000 μετά την επιβολή του φίλτρου στο σύστημα ελέγχου και συγκρίνοντας το ποσοστό μείωσης των ισοδύναμων φορτίων στην περίπτωση αυτή με τα ποσοστά μείωσης των ισοδύναμων φορτίων καταστροφής που λαμβάνονται χωρίς την επιβολή του φίλτρου στο νέο σύστημα ,αναφερόμενοι πλέον σε ταχύτητα ανέμου 13 m/sec και 15 m/sec, παίρνουμε την ακόλουθη εικόνα :

Vhub=13 m/s		
	no filter	filter
Ki	18000	30000
eq.load	59754,867	60852,293
%	-40,4	-39,4

orig.eq.load 100339,695

Vhub=15 m/s		
	no filter	filter
Ki	18000	30000
eq.load	61515,160	61949,828
%	-41,4	-41,0

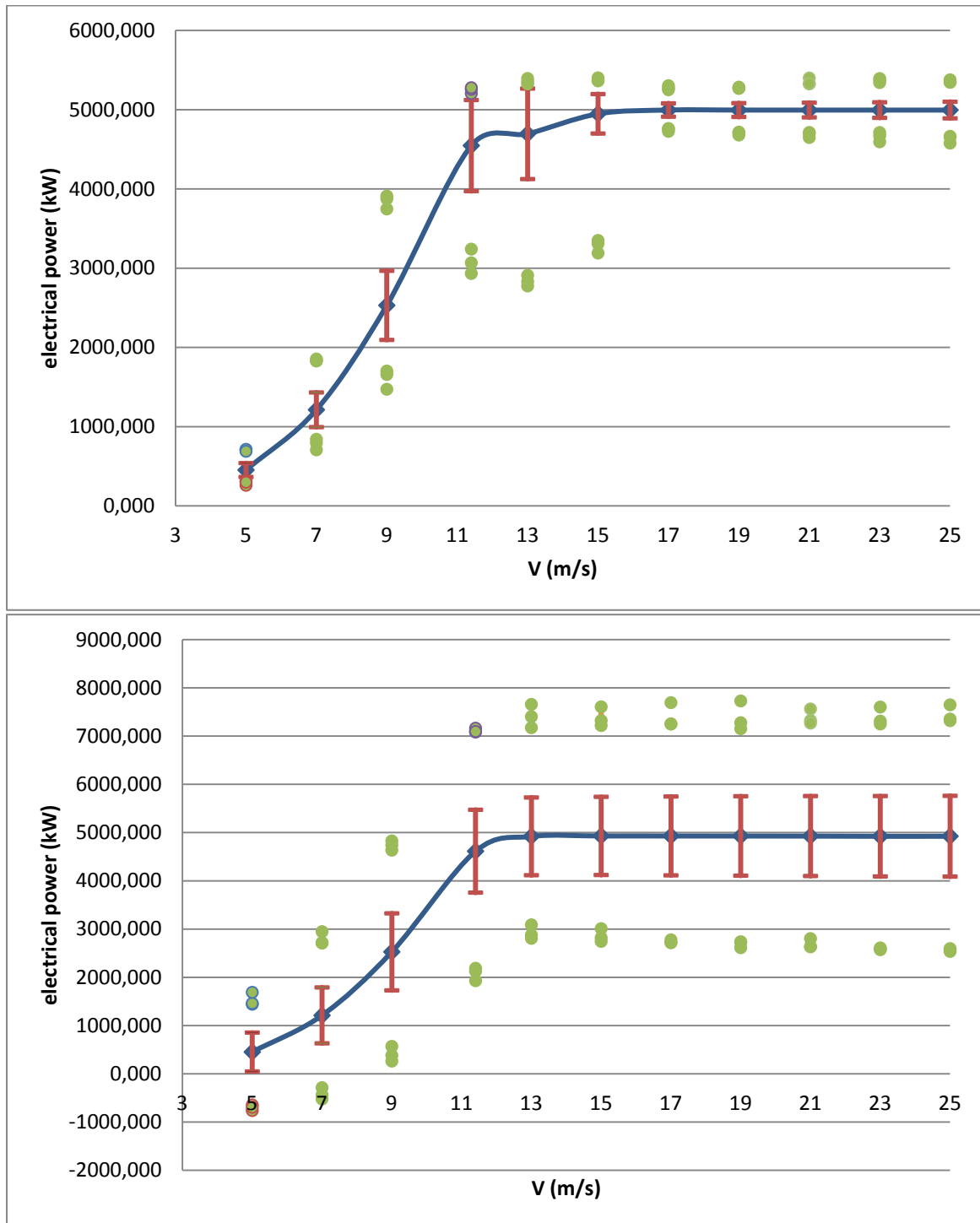
orig.eq.load 105010,68

Τα ποσοστά μείωσης προκύπτουν σε σχέση με την αρχική κατάσταση όπου δεν έχω καμιά αλλαγή στο σύστημα ελέγχου (χωρίς την επιπλέον ανάδραση από την επιτάχυνση)

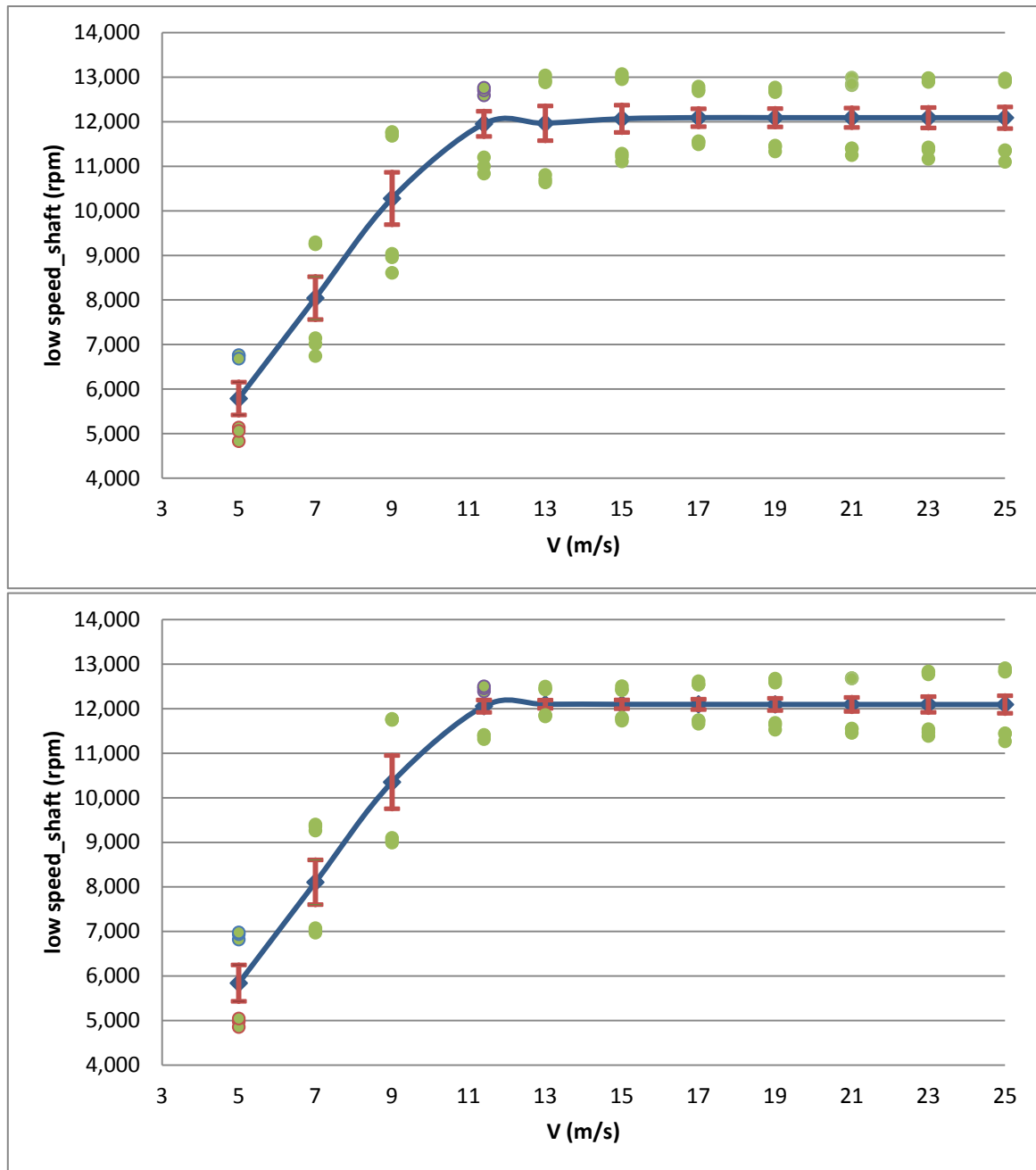
Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι μια τιμή κέρδους ολοκληρωτή ίση με 30000 επιφέρει σημαντική μείωση (της τάξης του 41 %) στα ισοδύναμα φορτία καταστροφής . Για το λόγο αυτό, στην ανάλυση των φορτίσεων που ακολουθεί στην επόμενη ενότητα (ενότητα 4.4) χρησιμοποιείται ο εναλλακτικός controller με την πρόσθετη ανάδραση κέρδους ολοκληρωτή ίσο με 30000 και το χαμηλοπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 0,2 Hz και $R_s=10$ dB. Η ανάλυση, τέλος αφορά κανονική λειτουργία (DLC 1.1)

4.4 Σύγκριση φορτίσεων σε spar-buoy με χρήση συμβατικού και εναλλακτικού controller

➤ DLC 1.1



Σχήμα 4.3 : καμπύλη ηλεκτρικής ισχύος στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα

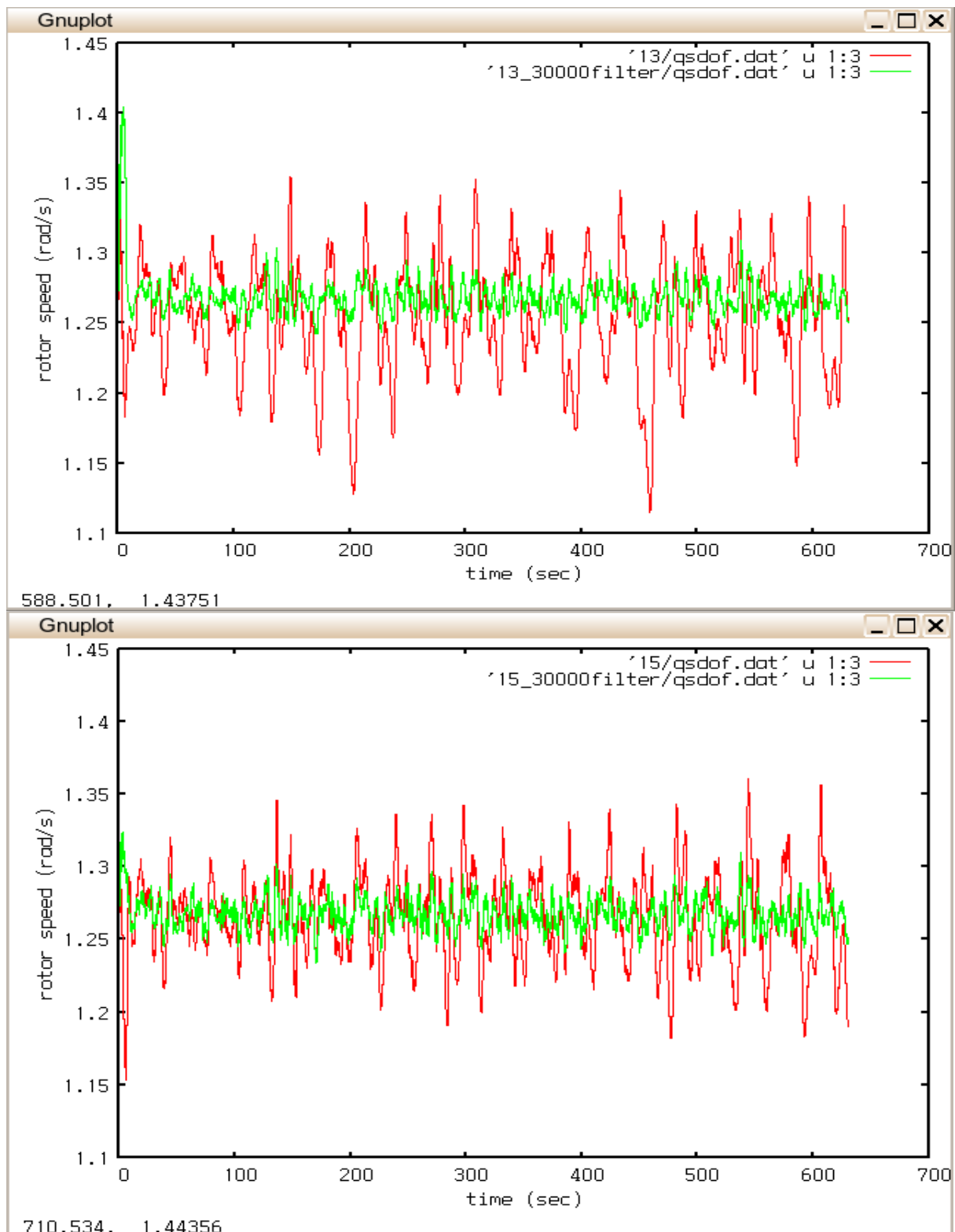


Σχήμα 4.4 : γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα

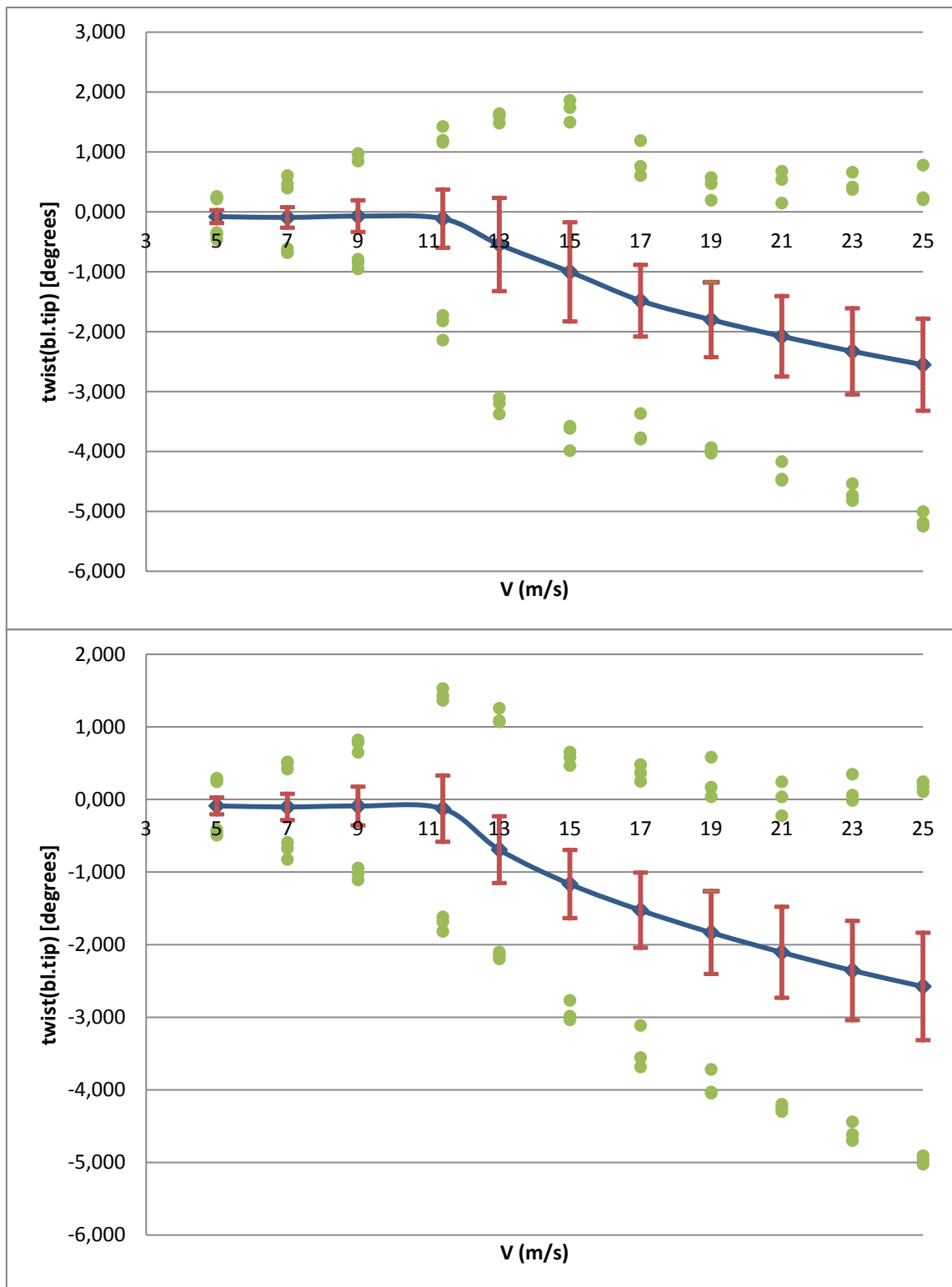
Είναι προφανής η μείωση των τυπικών αποκλίσεων καθώς επίσης και των απολύτως μεγίστων και ελαχίστων τιμών του μεγέθους στην περιοχή πάνω από την ονομαστική ταχύτητα, ιδιαίτερα στις ταχύτητες 11,4 m/s – 23 m/s . Η μείωση αυτή οφείλεται στην καλύτερη λειτουργία του συστήματος ελέγχου μετά την προσθήκη της πρόσθετης ανάδρασης στο σύστημα ελέγχου της ροπής της γεννήτριας σε συνδυασμό με το χαμηλοπερατό φίλτρο.

Για μια διαφορετική εποπτεία της μείωσης των διαταραχών της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, δίνονται παρακάτω οι δεκάλεπτες χρονοσειρές του μεγέθους σε rad/sec για ταχύτητες ανέμου 13 m/s και 15 m/s

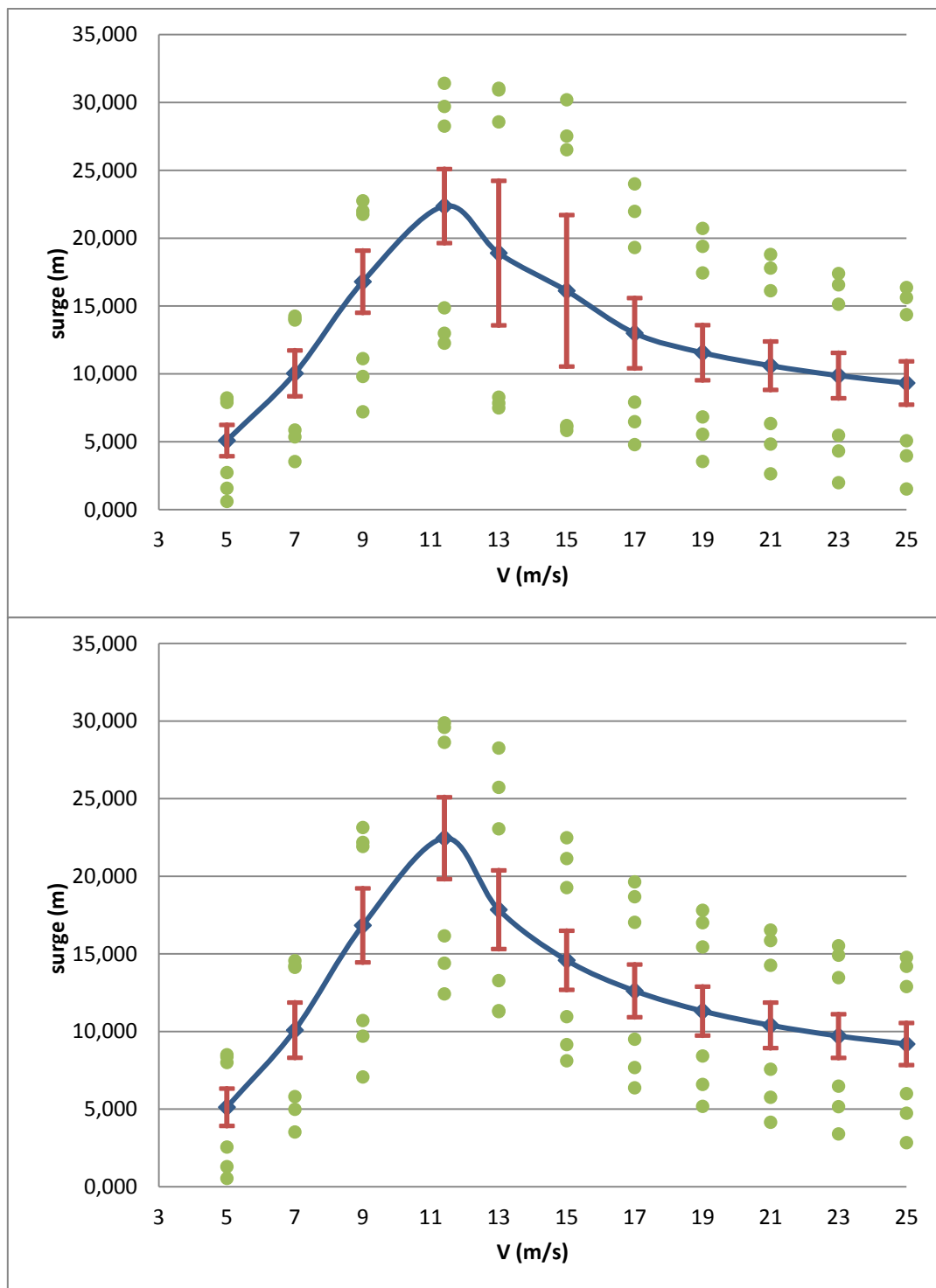
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΥ CONTROLLER



Στις παραπάνω χρονοσειρές με **κόκκινο χρώμα** δίνεται η χρονοσειρά **του μεγέθους πριν την επιβολή της πρόσθετης ανάδρασης στο σύστημα ελέγχου**, ενώ με **πράσινο χρώμα απεικονίζεται η χρονοσειρά στην τελική κατάσταση, δηλαδή μετά την επιβολή της πρόσθετης ανάδρασης και του χαμηλοπερατού φίλτρου**. Ιδιαίτερα εμφανής είναι η μείωση των διαταραχών στη δεύτερη περίπτωση.

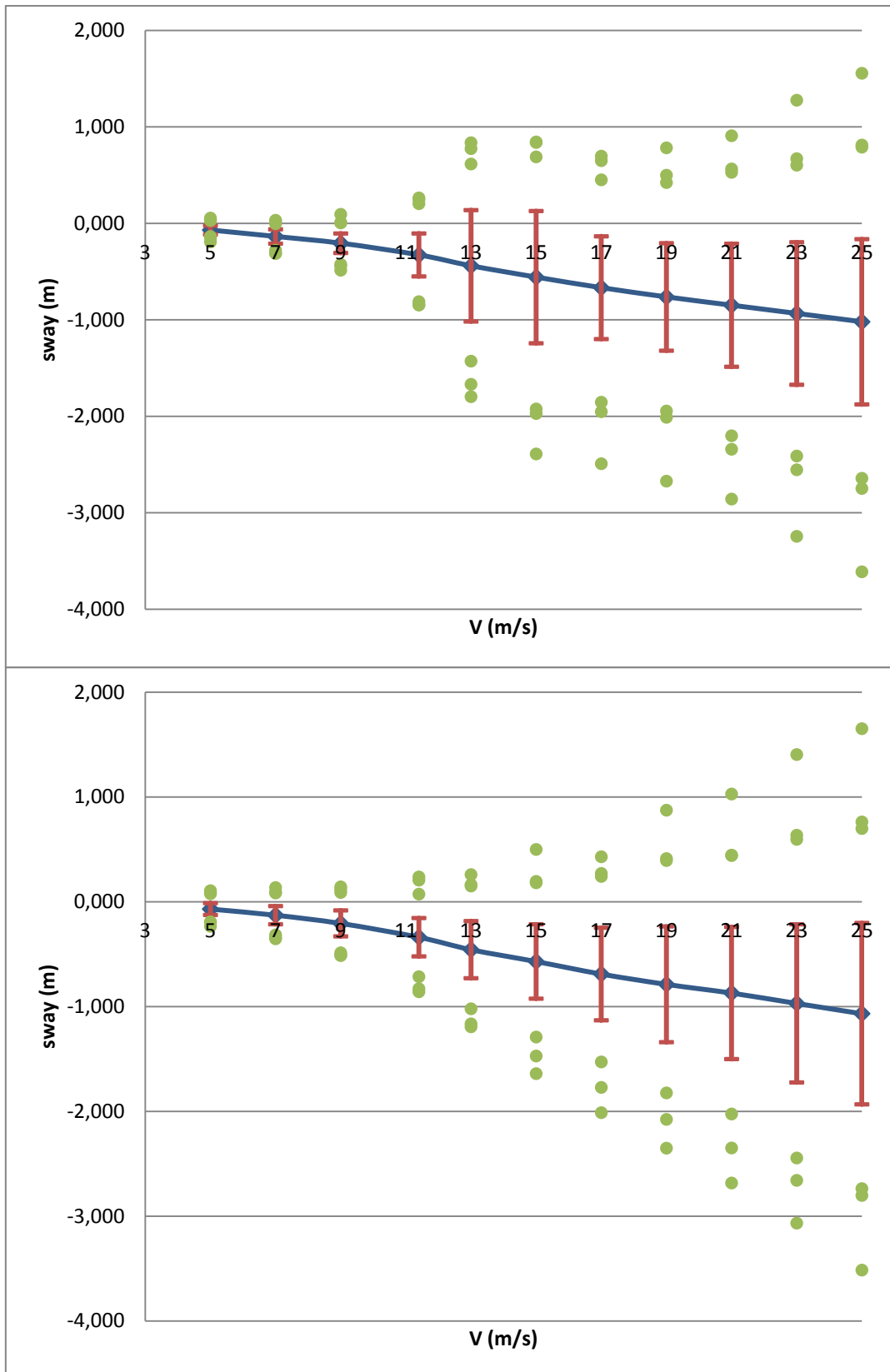


Σχήμα 4.5 : συστροφή στο ακροπερὺγιο με χρήση συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα

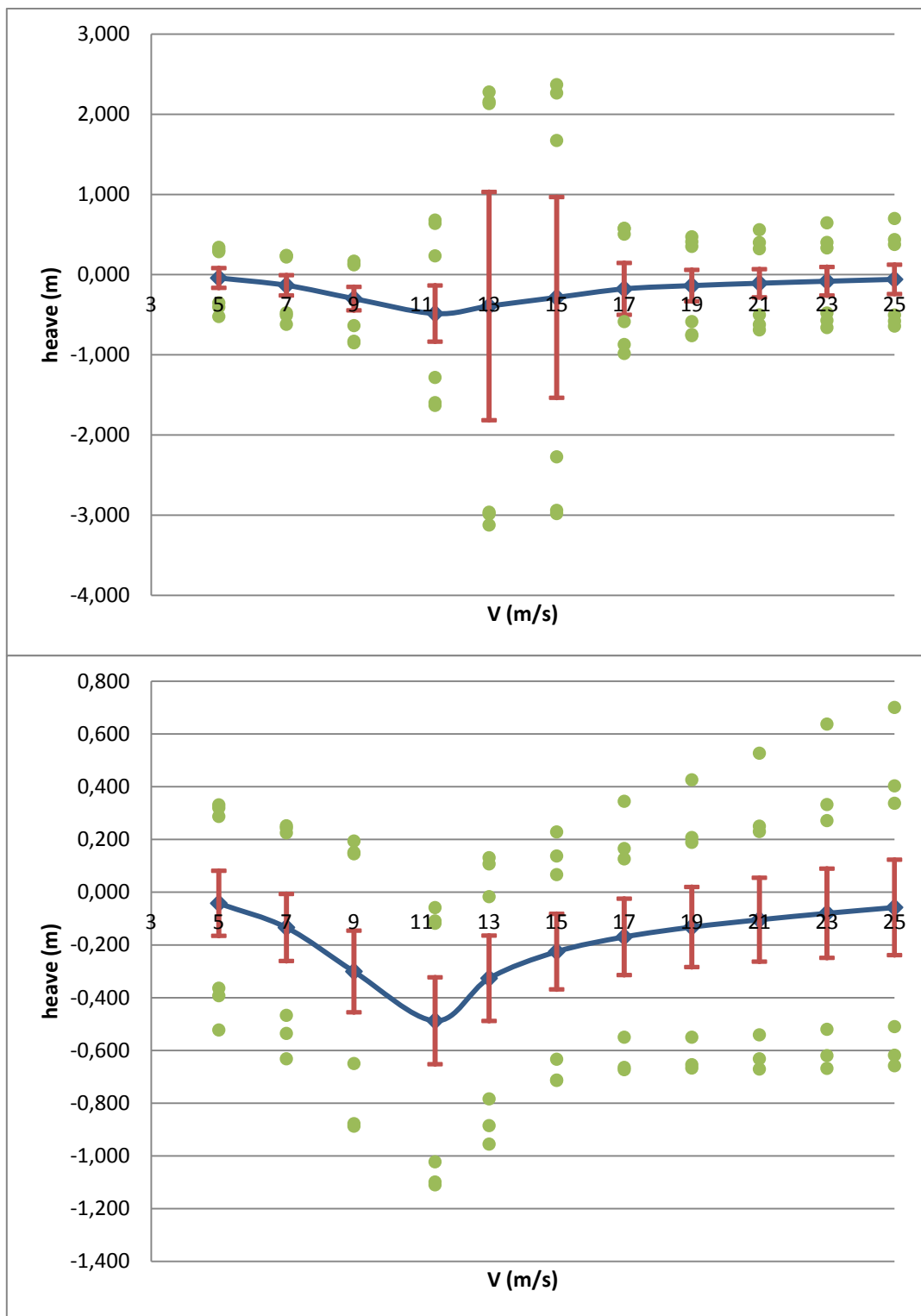


Σχήμα 4.6 : διαμήκης μετακίνηση του πλωτήρα (*platform x displacement*) στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού *controller* αντίστοιχα

Εμφανής είναι η μείωση στις τυπικές αποκλίσεις αλλά και στις απολύτως μέγιστες και ελάχιστες τιμές του μεγέθους για ταχύτητες ανέμου 11,4 m/s - 13 m/s - 15 m/s, που οφείλεται στη μειωμένη δύναμη ώσης που ασκείται στην ανεμογεννήτρια στην περίπτωση του εναλλακτικού σχεδιασμού με την πρόσθετη ανάδραση και το χαμηλοπερατό φίλτρο.

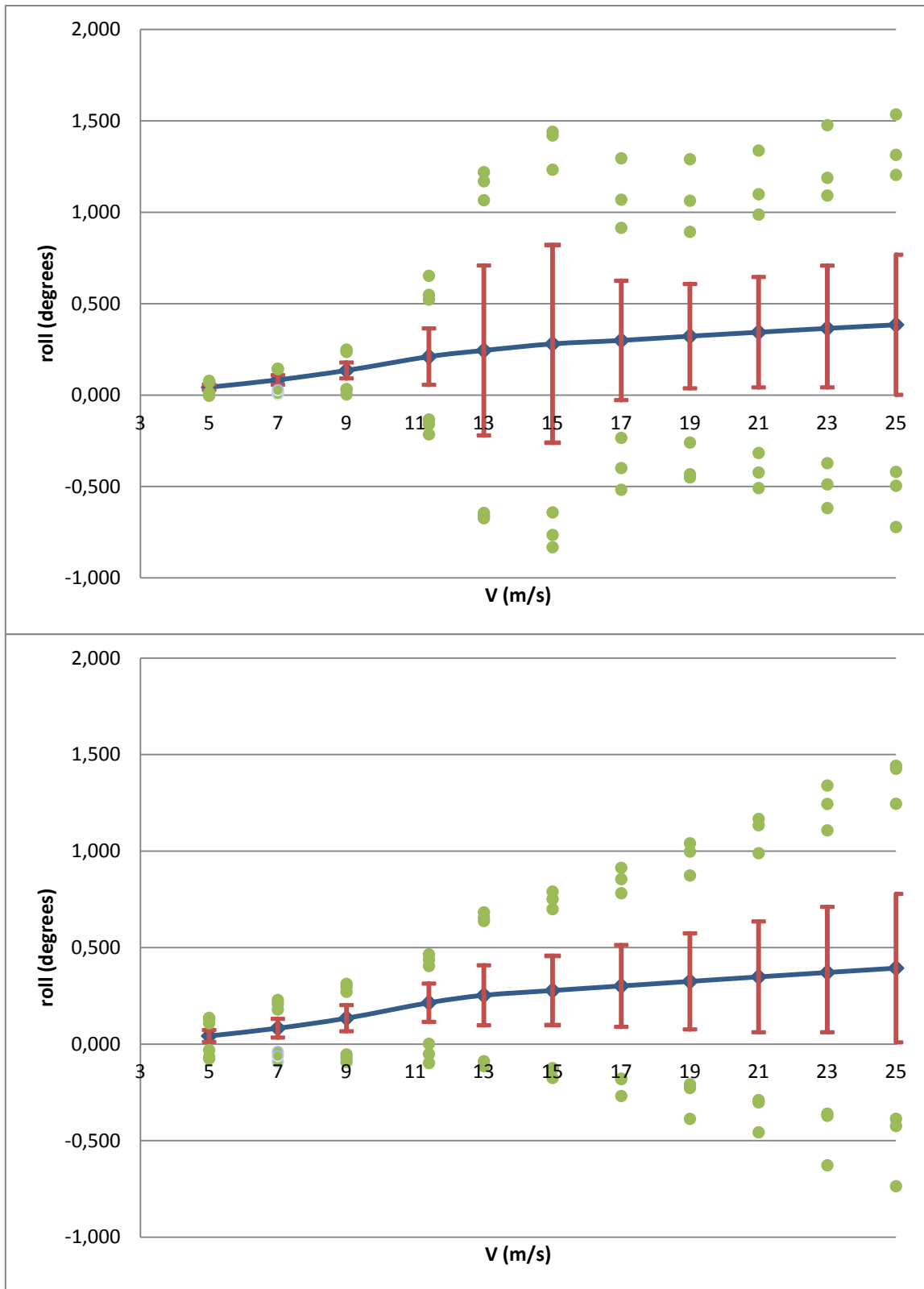


Σχήμα 4.7 : πλευρική μετακίνηση του πλωτήρα (platform y displacement) στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα

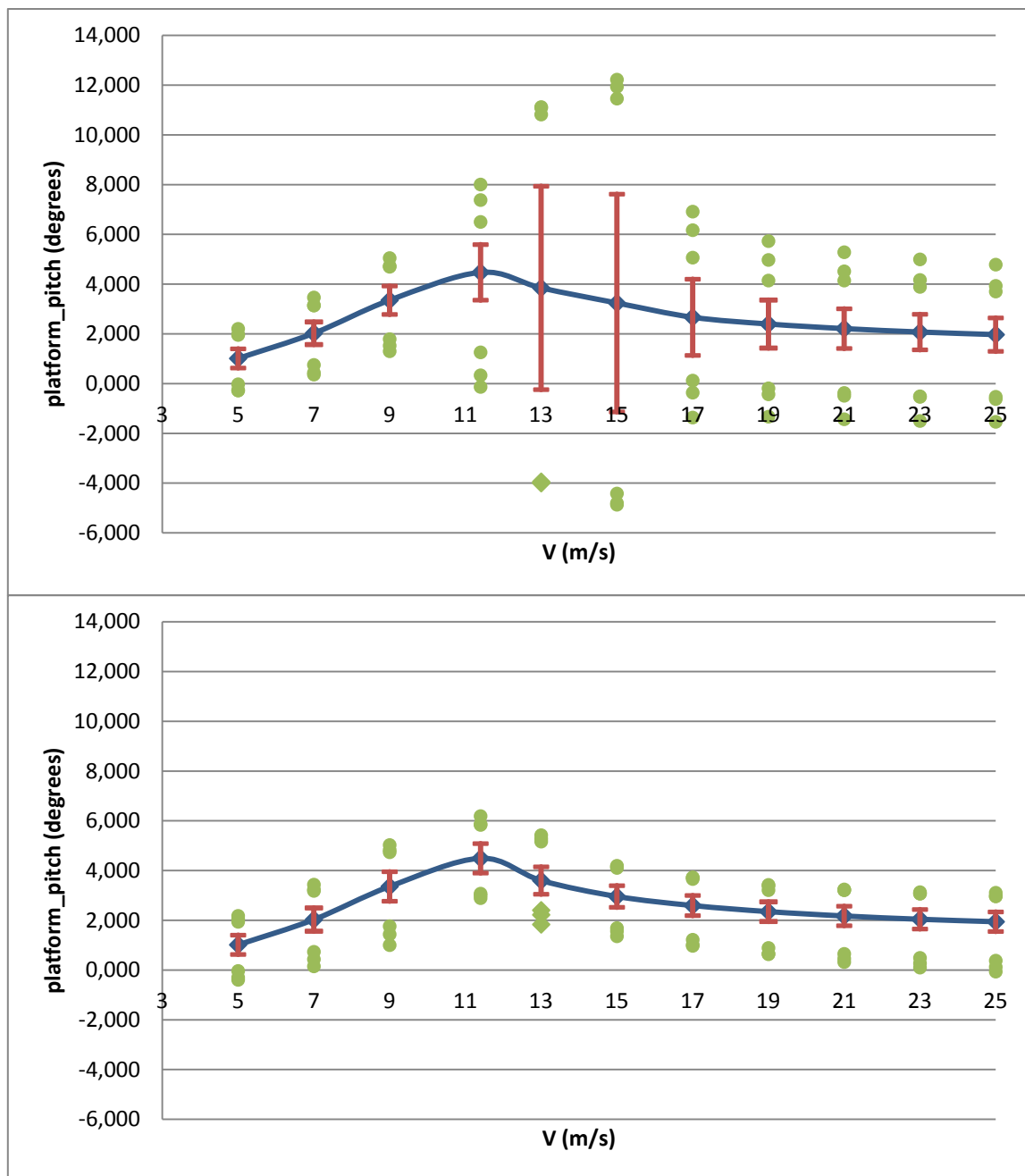


Σχήμα 4.8 : κατακόρυφη ταλάντωση (platform z displacement) του πλωτήρα στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα

Ιδιαίτερα σαφής είναι ο περιορισμός της κατακόρυφης ταλάντωσης σε όλη την περιοχή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας με έμφαση στις ταχύτητες 13 m/s και 15 m/s. Ξεκάθαρο και αξιοσημείωτο είναι το νέο εύρος τιμών -1,2 m έως 0,8 m περίπου έναντι της αρχικής κατάστασης -3,2 m έως 2,5 m

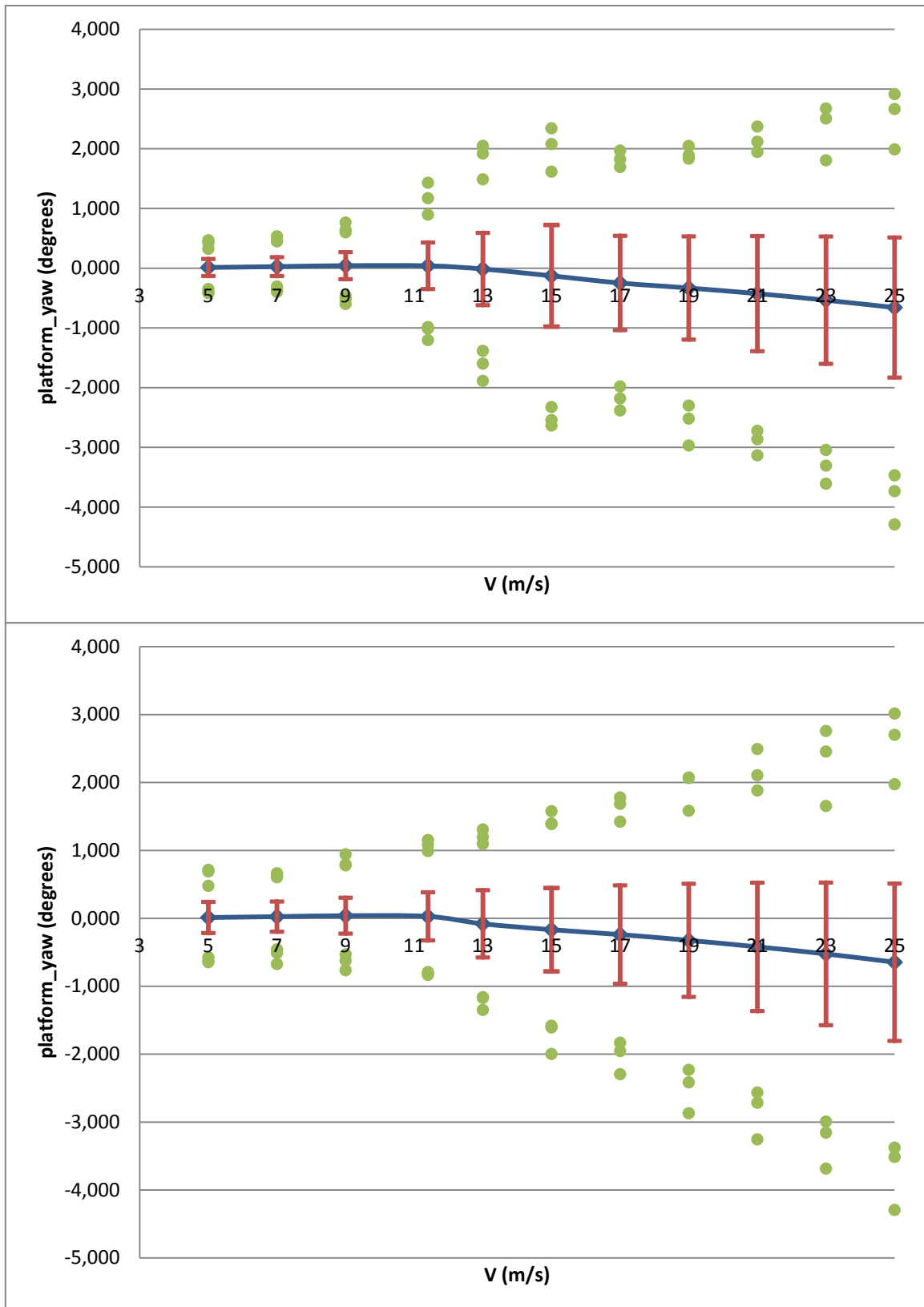


Σχήμα 4.9 : περιστροφική κίνηση γύρω από άξονα χ (platform θ_x) του πλωτήρα στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα

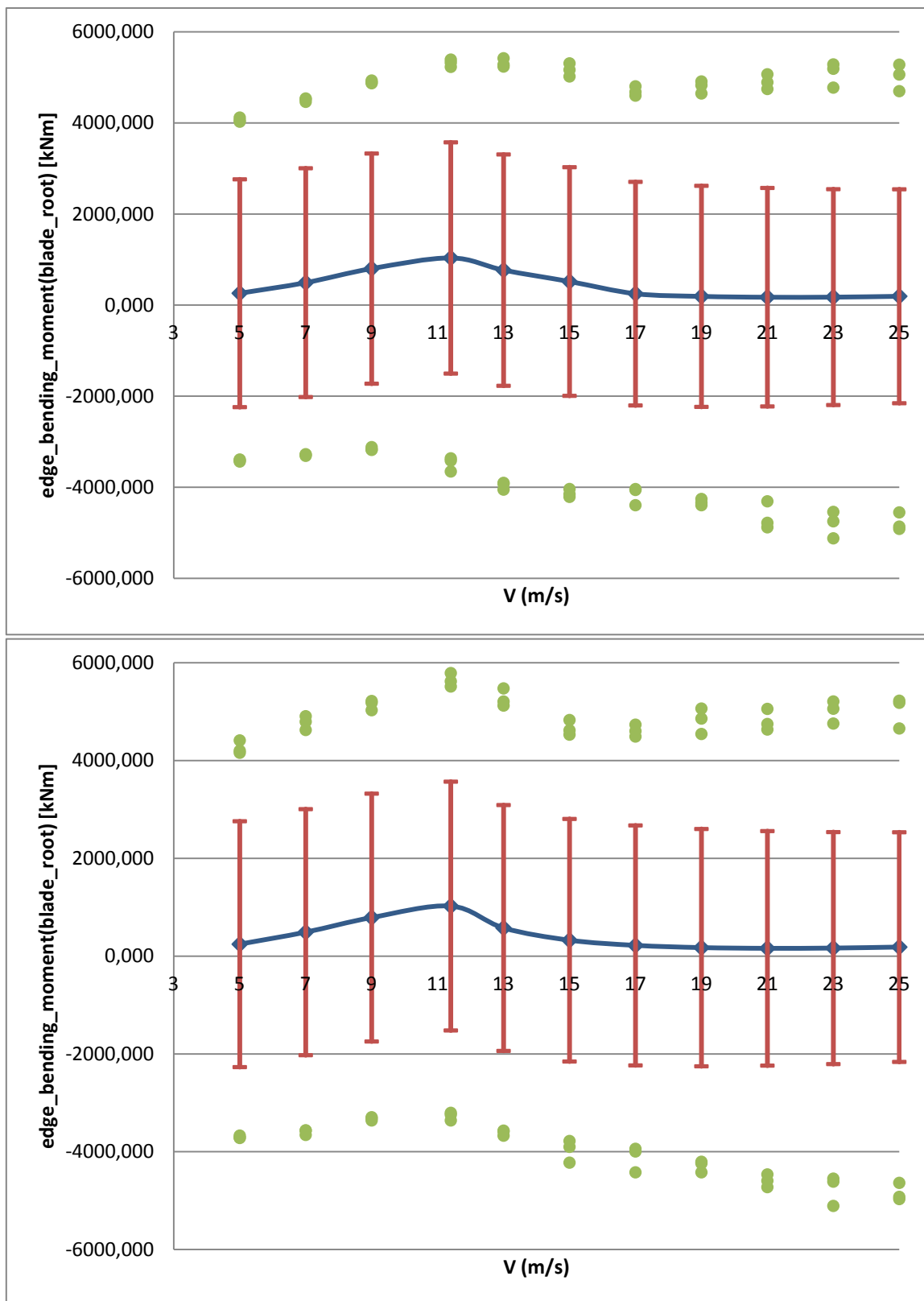


Σχήμα 4.10 : περιστροφική κίνηση γύρω από άξονα y (platform θ_y) του πλωτήρα στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα

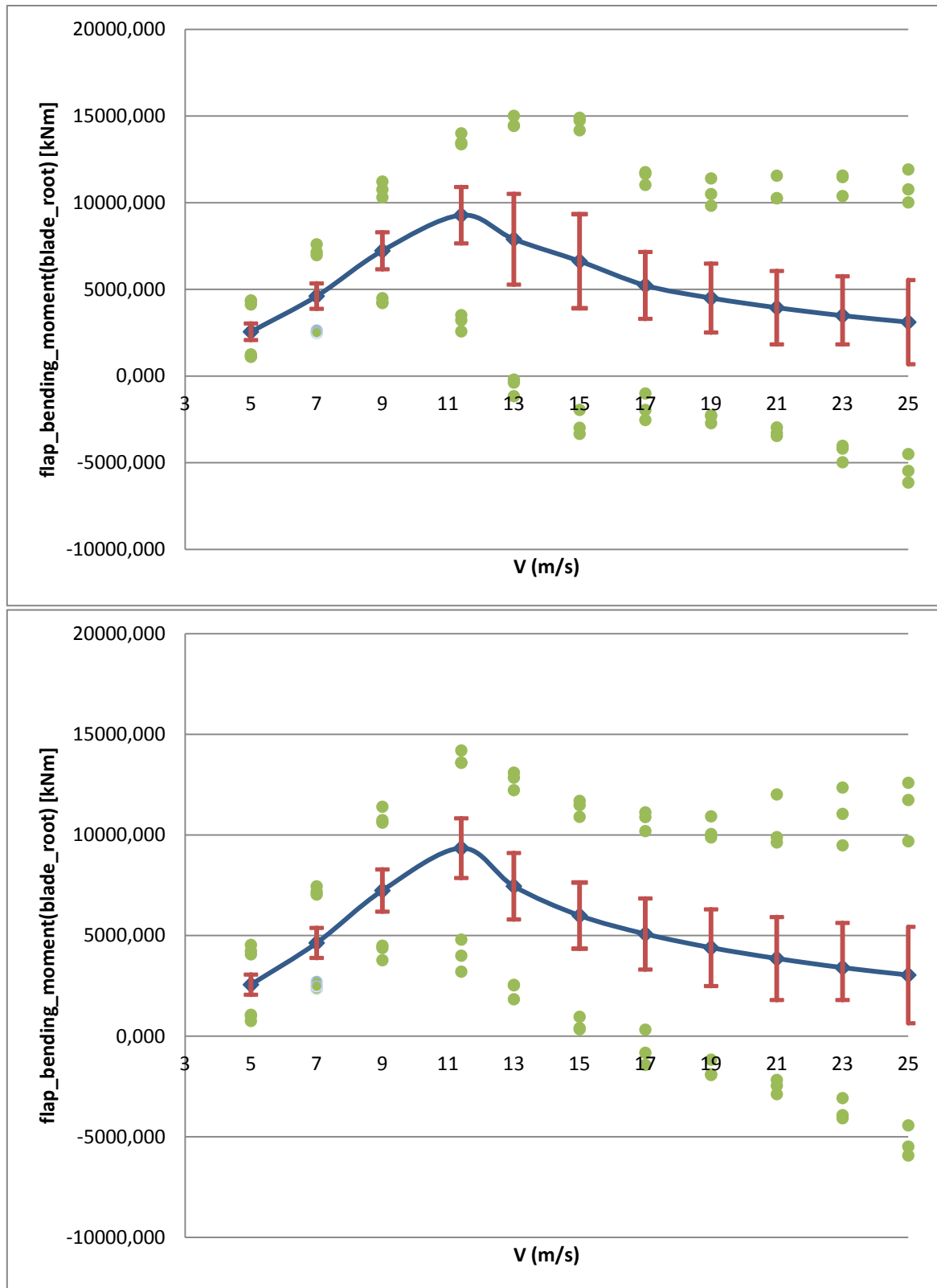
Ο σημαντικός περιορισμός της pitching κίνησης του πλωτήρα συνιστά ένα τεράστιο πλεονέκτημα χρήσης της εναλλακτικής μεθόδου σχεδιασμού του συστήματος ελέγχου, διότι η κίνηση αυτή είναι η γενεσιουργός αιτία μεγάλων διακυμάνσεων στην ηλεκτρική ισχύ, στη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και γενικότερα στα κοπωτικά φορτία του πύργου της ανεμογεννήτριας (ιδιαίτερα στη βάση). Όντας περιορισμένη λοιπόν, μόνο ευεργετικές συνέπειες μπορεί να έχει για την κατασκευή (μεγαλύτερη ευστάθεια). Άξιο επισήμανσης είναι το μειωμένο εύρος τιμών σε όλη την περιοχή ταχυτήτων λειτουργίας και ιδιαίτερα η σημαντική μείωση των τυπικών αποκλίσεων στις ταχύτητες ανέμου λίγο πάνω από την ονομαστική (βλέπε 13 m/s και 15 m/s)



Σχήμα 4.11 : περιστροφική κίνηση γύρω από άξονα z (platform θ_z) του πλωτήρα στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα

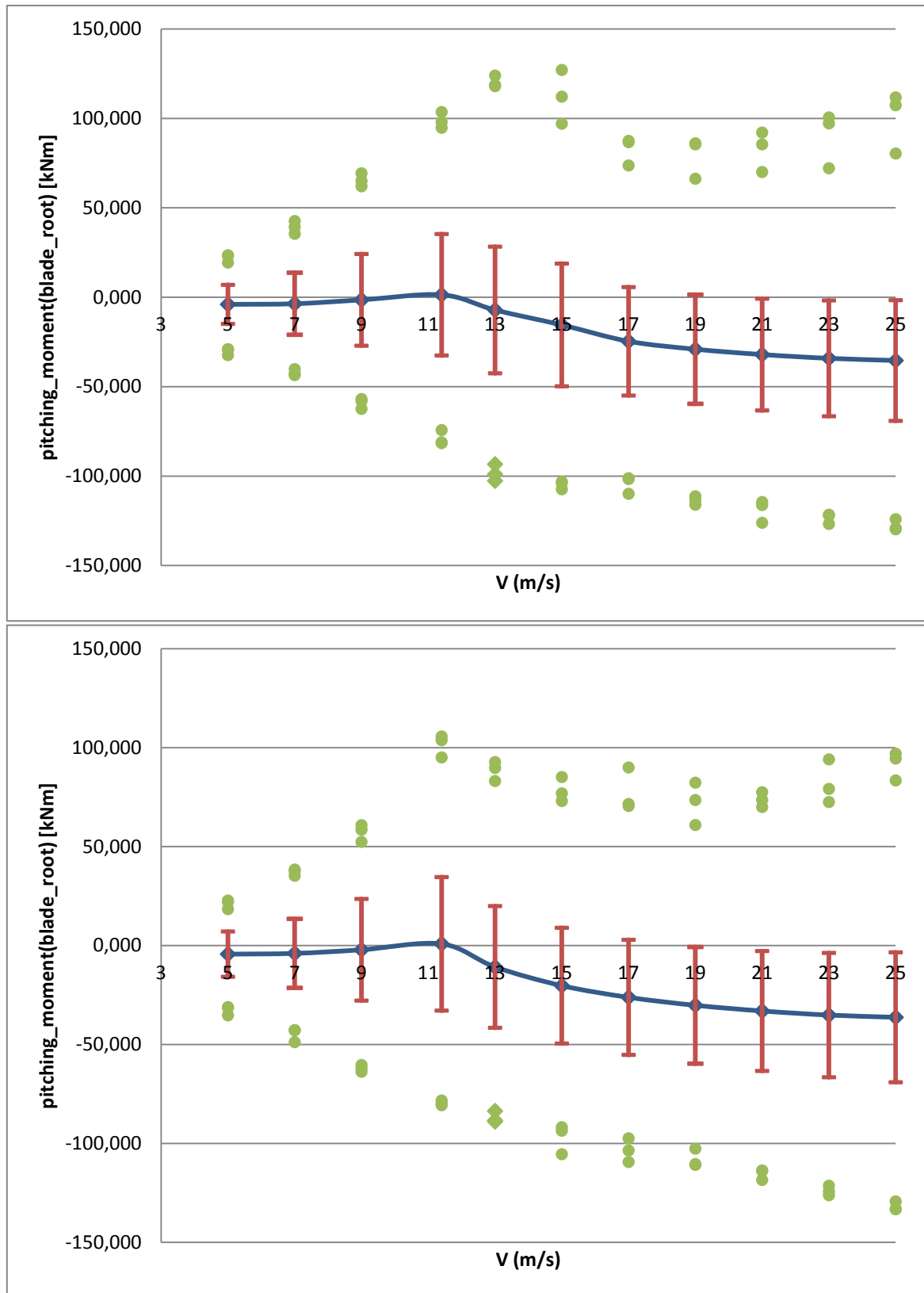


Σχήμα 4.12 : καμπτική ροπή στη ρίζα του πτερυγίου κατά την κατεύθυνση περιστροφής στην περίπτωση συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα.

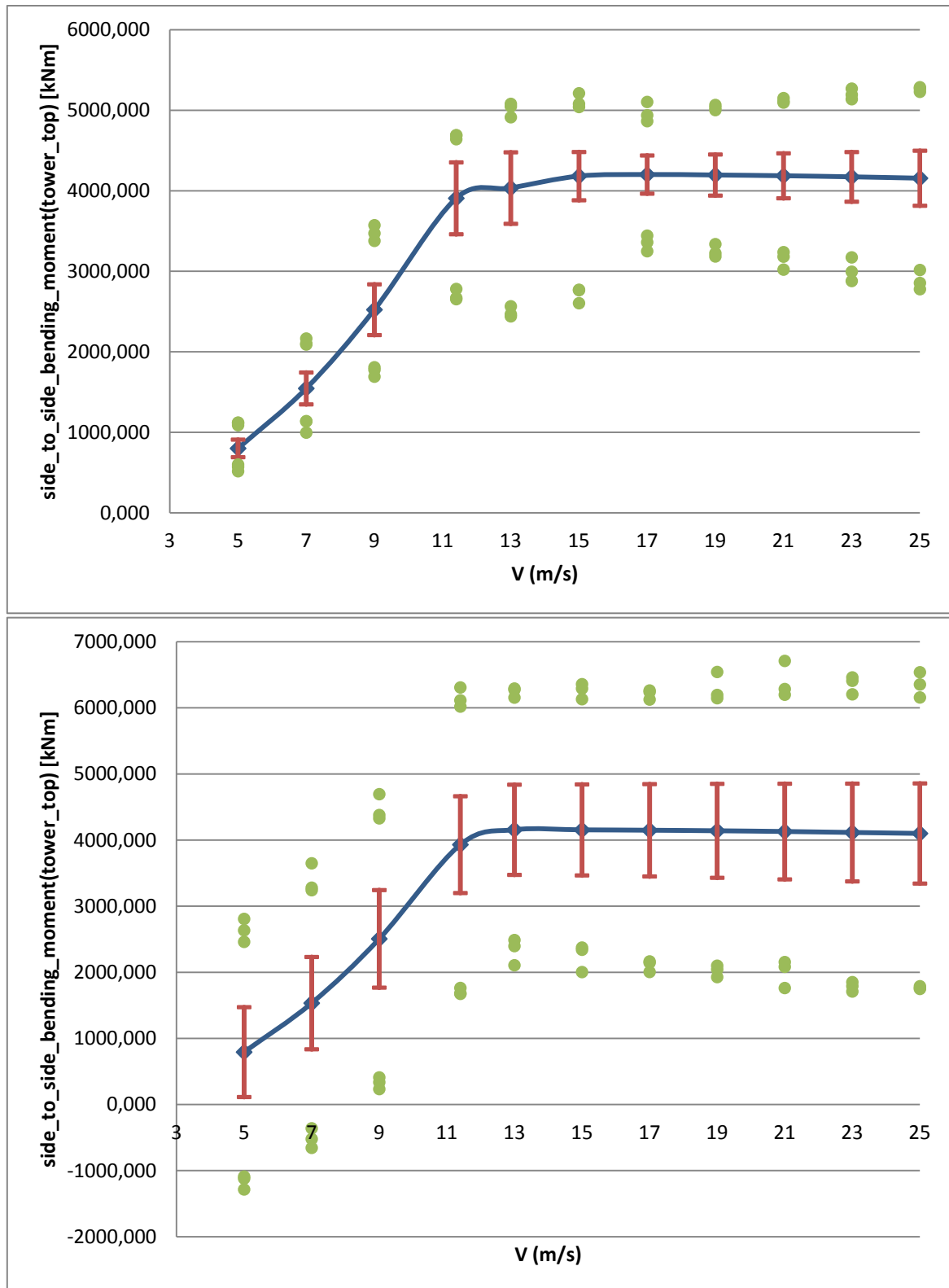


Σχήμα 4.13 : ροπή περύγισης στη ρίζα του περυγίου στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller

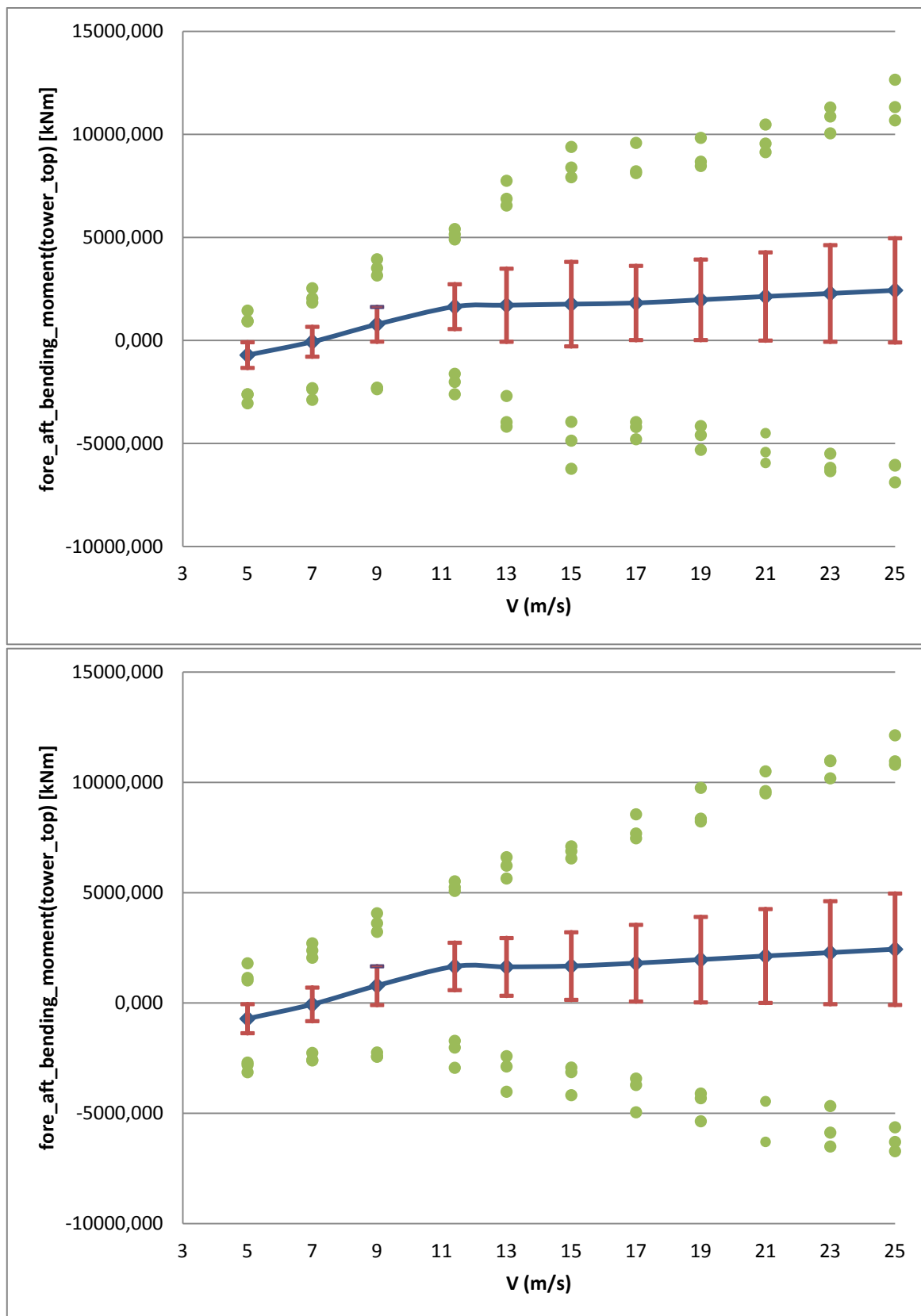
Αξιόλογη μείωση εμφανίζεται και πάλι στις τυπικές αποκλίσεις του μεγέθους για ταχύτητες ανέμου 13 και 15 m/s



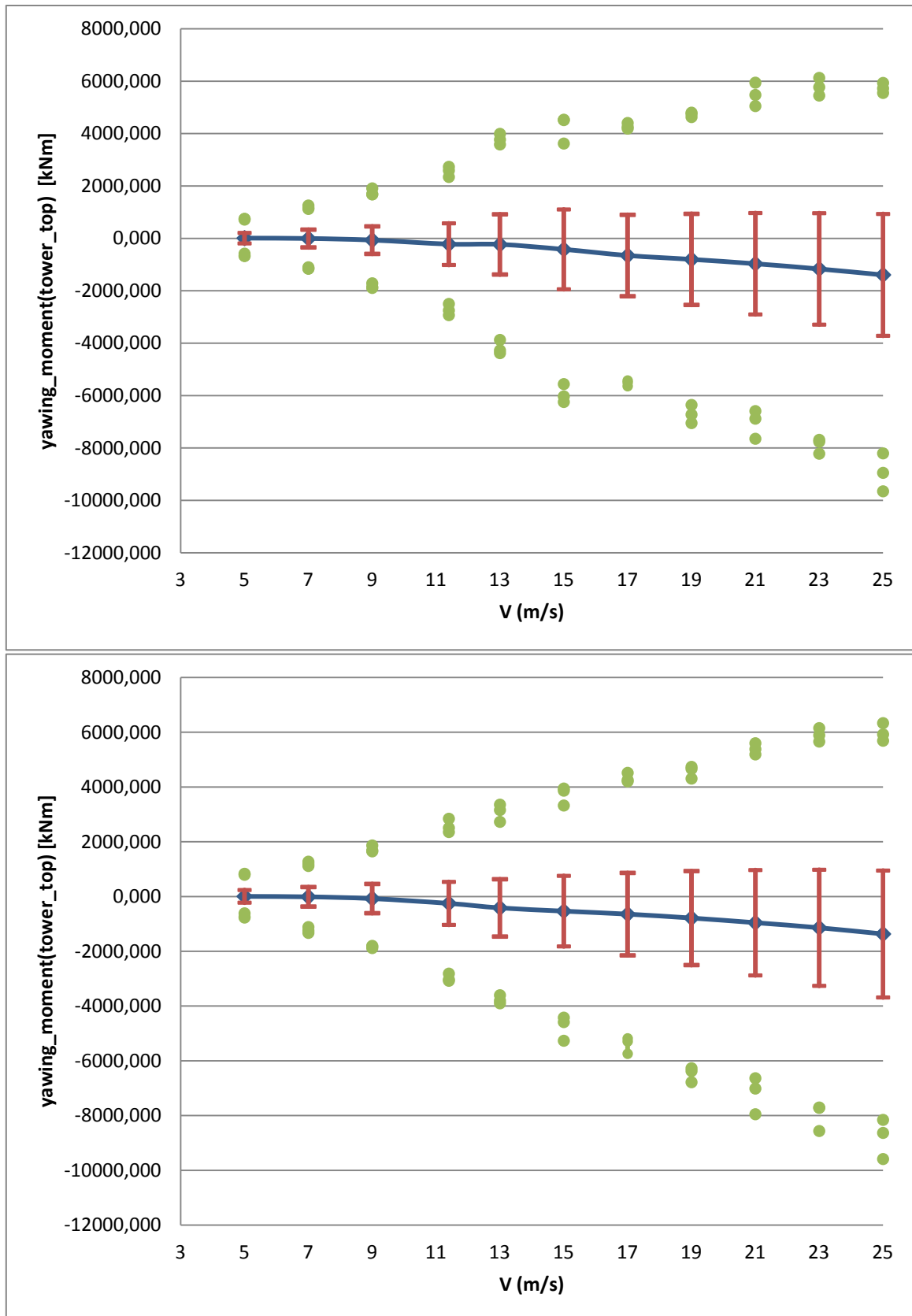
Σχήμα 4.14 : στρεπτική ροπή στη ρίζα του πτερυγίου στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα



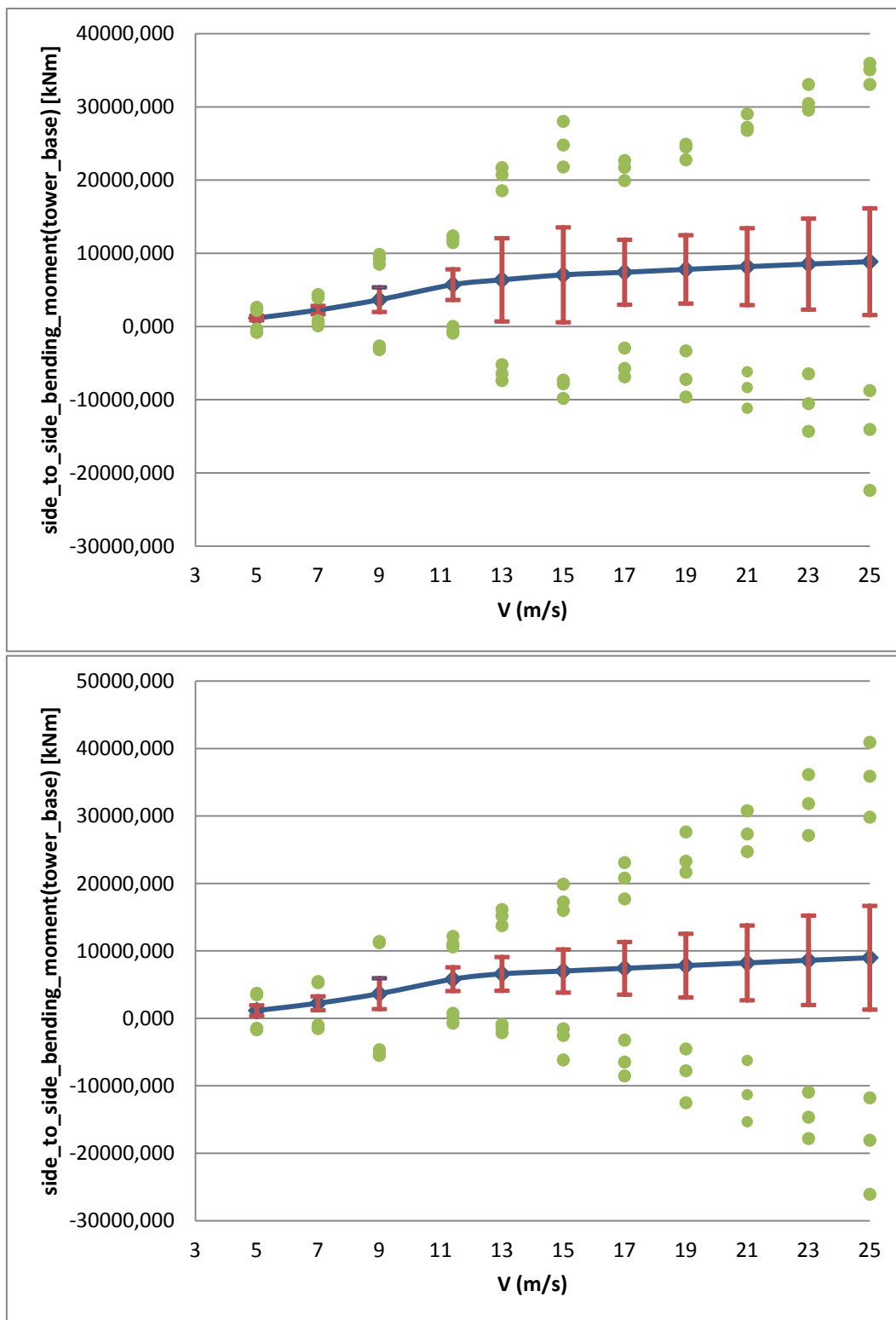
Σχήμα 4.15 : πλευρική καμπτική ροπή στην κορυφή του πύργου στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller



Σχήμα 4.16 : διαμήκης καμπτική ροπή στην κορυφή του πύργου στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα

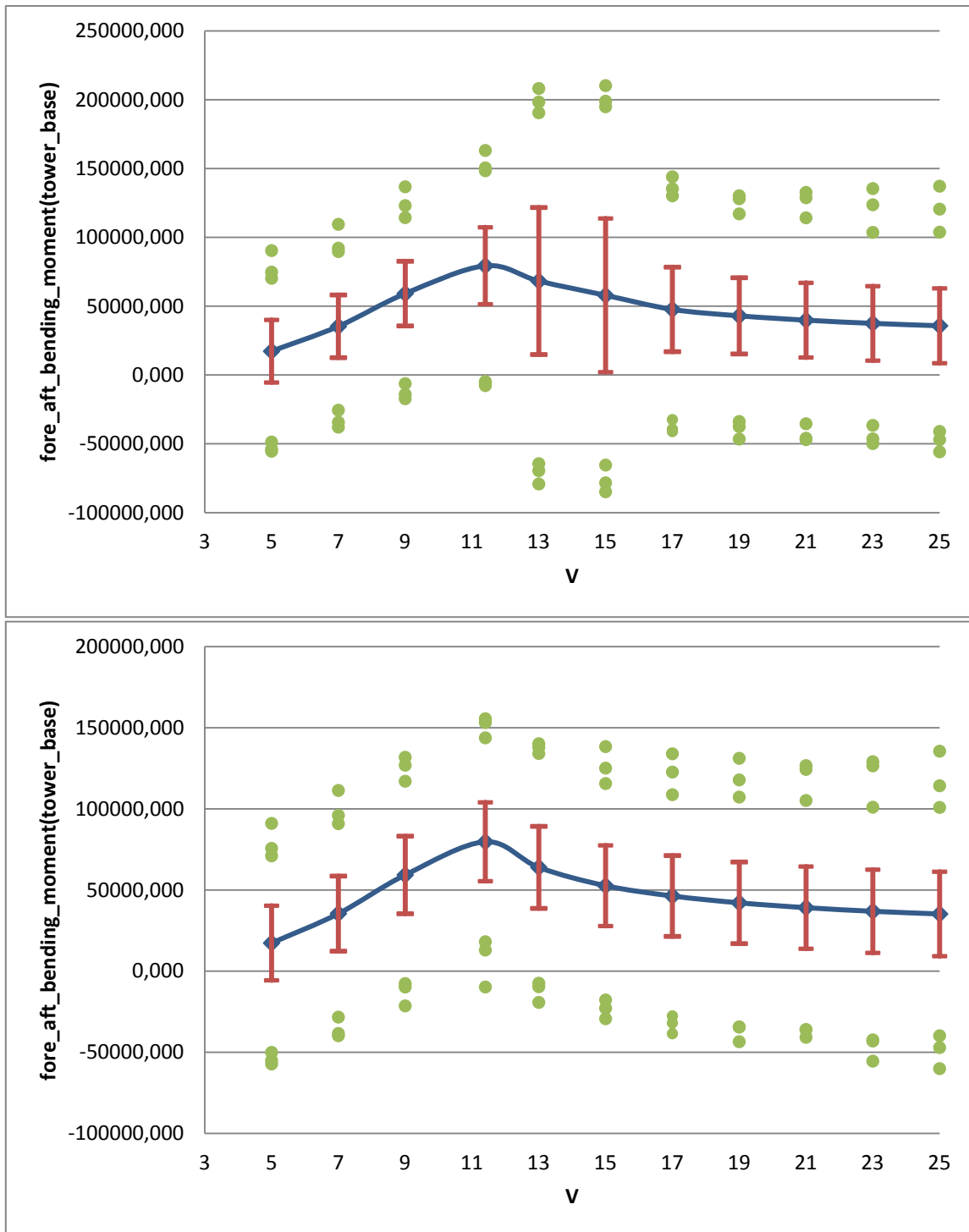


Σχήμα 4.17 : στρεπτική ροπή στην κορυφή του πύργου στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα



Σχήμα 4.18 : πλευρική καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας (σημείο σύνδεσης με το spar-buoy) στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα

Στις ταχύτητες 11,4 m/s- 13 m/s- 15 m/s είναι για ακόμη μια φορά εμφανής η μείωση που επέρχεται στις τυπικές αποκλίσεις του μεγέθους .



Σχήμα 4.19 : διαμήκης καμπτική ροπή στη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας (σημείο σύνδεσης με το spar-buoy) στην περίπτωση χρήσης συμβατικού και εναλλακτικού controller αντίστοιχα

Εξκάθαρη είναι η μείωση της διαμήκουσ καμπτικής ροπής στη βάση του πύργου, ιδιαίτερα στις ταχύτητες 13 m/s και 15 m/s. Η μείωση αυτή οφείλεται στη μειωμένη pitching κίνηση του πλωτήρα που επέρχεται στην περίπτωση εναλλακτικού σχεδιασμού του συστήματος ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ
ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ**

5.1 Συμπεράσματα

- Οι φορτίσεις που προκύπτουν στην πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου spar-buoy είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας τύπου monopile
- Η pitching κίνηση του πλωτήρα είναι αξιοσημείωτη (αρκετά μεγάλη) στην περίπτωση μεγάλων ή/και απότομων κυμάτων και ιδιαίτερα στην περίπτωση ακραίων κυμάτων όπως αυτά που εμφανίζονται στα DLC's 6.x με περίοδο επαναφοράς 1 και 50 χρόνια.
- Η pitching κίνηση του πλωτήρα συνεπάγεται μεγάλες διακυμάνσεις στα φορτία που αφορούν περισσότερο τη βάση του πύργου και λιγότερο τα φορτία που σχετίζονται με τα πτερύγια
- Η pitching κίνηση του πλωτήρα οδηγεί σε μεγάλες μεταβολές στην ηλεκτρική ισχύ και στην ταχύτητα περιστροφής του δρομέα με αποτέλεσμα ακόμη και απώλεια ισχύος στο δίκτυο και αύξηση των αερακουστικών εκπομπών.
- Η μετάβαση από υπεράκτια ανεμογεννήτρια τύπου monopile σε πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου spar-buoy συνεπάγεται μείωση των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος, οπότε μεγαλύτερη πιθανότητα υπερδιέγερσης της κατασκευής από τον άνεμο και το κύμα
- Επιβάλλεται αλλαγή του συμβατικού συστήματος ελέγχου από γρήγορο σε πιο αργό σύστημα (μειωμένα Gains) έτσι ώστε να αποφεύγεται η αλληλεπίδραση των ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος ελέγχου με τις ιδιοσυχνότητες του πλωτήρα που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υπερβαλλόντων φορτίων στην κατασκευή
- Αργός controller συνεπάγεται αργή απόκριση στις μεταβολές του ανέμου και συνεπώς μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις στη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και μεγαλύτερες αστάθειες στην παραγόμενη ισχύ, γεγονός μη ευεργετικό για την κατασκευή
- Βέλτιστη λύση για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προέρχονται από το συμβατικό controller (είτε είναι γρήγορος είτε είναι αργός) αποτελεί ο σχεδιασμός ενός εναλλακτικού συστήματος ελέγχου που λαμβάνει υπόψη του τη διαμήκη επιτάχυνση της κορυφής του πύργου και τη χρησιμοποιεί ως επιπλέον ανάδραση στο σύστημα ελέγχου της ροπής της γεννήτριας
- Η πρόσθετη ανάδραση οδηγεί σε μείωση 12 % των ισοδύναμων φορτίων της διαμήκουσ καμπτικής ροπής στη βάση του πύργου για ταχύτητα ανέμου ίση με την ονομαστική
- Η εισαγωγή χαμηλοπερατού φίλτρου προ του PI κατευθυντή στο σύστημα ελέγχου της ροπής της γεννήτριας με επιπλέον ανάδραση συνεπάγεται μικρότερες διαταραχές στο σήμα εισόδου και μικρότερες διαταραχές στη ροπή της γεννήτριας
- Ο συνδυασμός χαμηλοπερατού φίλτρου και πρόσθετης ανάδρασης στο σύστημα ελέγχου οδηγεί σε μείωση έως και 40 % των ισοδύναμων φορτίων της καμπτικής ροπής στη βάση του πύργου

5.2 Συστάσεις για περαιτέρω μελέτη

- Παραμετρική διερεύνηση όλων των ορισμάτων του χαμηλοπερατού φίλτρου για την εξεύρεση των βέλτιστων τιμών τους που οδηγούν στην καλύτερη δυνατή απόκριση του συστήματος ελέγχου
- Έλεγχος της δυνατότητας προσαρμογής της τιμής του κέρδους ολοκληρωτή (integral Gain) ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου που επικρατεί και τις συνθήκες ανέμου και κύματος (Normal- Extreme) [adaptive PI controller]
- Έλεγχος της δυνατότητας προσαρμογής των ιδιοτήτων του χαμηλοπερατού φίλτρου ανάλογα με τις συνθήκες ανέμου και κύματος που επικρατούν και την ταχύτητα του ανέμου (adaptive filter)
- Σύγκριση των φορτίσεων μεταξύ spar-buoy και TLP πλωτών διατάξεων ανεμογεννητριών που έχουν εφαρμογή σε ίδιος βάθος θάλασσας

Βιβλιογραφία

- [1] Beurskens, J., Converting Offshore Wind into Electricity, We@Sea research Programme 2004-2010, Eburon Academic Publishers
- [2] Jonkman, J., Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine, Doctor of Philosophy Thesis, Colorado State University, 2007
- [3] Henderson, A., Witcher, D., Morgan, K., Floating Support Structures Enabling New Markets for Offshore Wind Energy, European Wind Energy Conference 2009, Marseille, France
- [4] Riziotis, V. and Politis, E., Methods for linearizing the servo-aero-elastic equations of the full wind turbine, Technical Report, Centre for Renewable Energy Sources and Saving and National Technical University of Athens, May 2010
- [5] Ριζιώτης, Β. , Αεροδυναμική και Αεροελαστική Ανάλυση της απώλειας στήριξης σε δρομείς Ανεμογεννητριών, διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, 2003
- [6] Βουτσινάς, Σ. , Μη μόνιμη Αεροδυναμική, Αεροελαστικότητα, Αερακουστική, Πανεπιστημιακές σημειώσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
- [7] Μαυράκος, Σ.Α, Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
- [8] Μπεργελές, Γ. , Ανεμοκινήτρες, νέα βελτιωμένη έκδοση 2005, Εκδόσεις Συμείων
- [9] Jonkman, J., Musial, W., Final Report, Subtask 2: The Offshore Code Comparison Collaboration (OC3), IEA Wind Task 23: Offshore Wind Technology and Deployment, National Renewable Energy Laboratory, March 31, 2010
- [10] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G., Definition of a 5-MW Reference Turbine for Offshore System Development, Technical Report, NREL/TP-500-38060, USA, February 2009
- [11] Jonkman, J., Definition of the Floating System for Phase IV of OC3, Technical Report, NREL/TP-500-47535, USA, 2010
- [12] IEC 61400-1 Ed. 3: Wind Turbines – Part 1: Design requirements
- [13] IEC 61400-3 Ed. 1: Wind Turbines – Part 3: Design requirements for offshore Wind Turbines
- [14] Musial, W.D., Butterfield, C.P., Boone, A., Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines, NREL/CP-500-34874, 23rd ASME Wind Energy Symposium Proceedings, Reno, Nevada, January 2004
- [15] Butterfield, S., Musial, W., Jonkman, J., Sclavounos, P., Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines, NREL/CP-500-38776, 2005 Copenhagen Offshore Wind Conference, Copenhagen, Denmark, October 2005

- [16] Jonkman, J., Sclavounos, P., Development of Fully Coupled Aeroelastic and Hydrodynamic Models for Offshore Wind Turbines, NREL/CP-500-39066, 2006 ASME Wind Energy Symposium, Reno, Nevada, January 2006
- [17] Wayman, E.N., Sclavounos, P., Coupled Dynamic Modeling of Floating Wind Turbine Systems, NREL/CP-500-39481, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 2006
- [18] Jonkman, J., Buhl, M., Development and Verification of a Fully Coupled Simulator for Offshore Wind Turbines, NREL/CP-500-40979, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Wind Energy Symposium, Reno, Nevada, January 2007
- [19] Jonkman, J., Buhl, M., Loads Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine Using Fully Coupled Simulation, NREL/CP-500-41714, WindPower 2007 Conference & Exhibition, Los Angeles, California, June 2007
- [20] Bir, J. and Jonkman, J., Aeroelastic Instabilities of Large Offshore and Onshore Wind Turbines, NREL/CP-500-41804, EAWE 2007 Torque from Wind Conference, Lyngby, Denmark, August 2007
- [21] Henderson, Andrew R. and Patel, Minoos H., On the Modelling of a Floating Offshore Wind Turbine, *Wind Energy*, Vol. 6, No. 1, February 2003, pp. 53–86
- [22] Henderson, A., Bulder, B., Peeringa, J., Pierik, J., Huijsmans, R., Hees, M., Snidjers, E., Wijnants, G., Wolf, M., Floating Windfarms for Swallow Offshore Sites, OWEMES Conference, Naples, Italy, April 2003
- [23] Lackner, M., Rotea, M., Structural Control of Floating Wind Turbines, *Mechatronics*, Vol. 21, December 2010, pp. 704-719
- [24] Riziotis, V.A., Madsen, H.A., Rasmussen, F., Politis, E.S., Voutsinas, S.G., Implications on loads by up-scaling towards 20 MW size
- [25] Riziotis, V.A., Politis, E.S., Voutsinas, S.G., Chaviaropoulos P.K., Stability Analysis of Pitch-regulated, Variable-speed Wind Turbines in Closed Loop Operations using a Linear Eigenvalue Approach, *Wind Energy*, May 2008, pp. 517-535
- [26] Bossanyi, E.A., Wind turbine control for load reduction, *Wind Energy*, 2003; **6**, pp. 229–244
- [27] Bossanyi EA., The design of closed loop controllers for wind turbines. *Wind Energy* 2000; **3**, pp. 149–163
- [28] Bossanyi EA., Control Algorithm for the 2MW and 5MW Turbines, Document No : 2762/BR/08, Ed. A, May 2002
- [29] Bossanyi EA., Controller for 5MW reference Turbine, Document No. : 11593/BR/04, Ed. A, July 2009
- [30] Fischer, B., Reducing Rotor Speed Variations of Floating Wind Turbines by Compensation of non-minimum phase zeros, EWEA 2012