

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας ΡΕΥΣΤΩΝ Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών

Εργαστήριο Αεροδυναμικής

**Ανάλυση αβεβαιότητας πρόβλεψης φορτίων εμπορικού
μοντέλου ανεμογεννήτριας με στόχο την επέκταση ζωής της**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Δελιζήσης Αθανάσιος

Επιβλέπων: Βασίλειος Ριζιώτης



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΑΘΗΝΑ, 2021

I. Ευχαριστίες

Με την παρούσα εργασία ολοκληρώνεται η φοίτησή μου στο ΔΠΜΣ Υπολογιστικής Μηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μέσα από το πρόγραμμα σπουδών του συγκεκριμένου Μεταπτυχιακού ήρθα σε επαφή και εργάστηκα με ένα ιδιαίτερα πρωτοπόρο και σύγχρονο αντικείμενο των Μηχανικών, αυτό της Υπολογιστικής Μηχανικής. Εκφράζω τη βαθιά ευγνωμοσύνη στον αξιότιμο κύριο Ριζιώτη για την βοήθεια και πολύτιμή του καθοδήγησή του, καθώς επίσης και στους υπόλοιπους καθηγητές για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μεταδώσανε. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τους διδακτορικούς φοιτητές, Παναγιώτη Σχοινά και Νικόλαο Σπυρόπουλο, οι οποίοι μου μεταδώσανε τη γνώση τους και με βοήθησανε στις ανάπτυξη εργαλείων και μεθοδολογιών στο κομμάτι ολοκλήρωσης της Μεταπτυχιακής μου εργασίας. Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω την Eunice Energy Group για την παραχώρησή δεδομένων που αφορούν ανεμολογικά δεδομένα, καθώς επίσης και δεδομένα που αφορούν την απόδοση των ανεμογεννητριών, όπου και βασίζεται η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους οικείους μου για την υπομονή και αμέριστη συμπαράστασή τους, ώστε να ολοκληρώσω με επιτυχία το πρόγραμμα σπουδών.

II. Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια κερδίζει πρόσφορο έδαφος η λογική της επέκτασης ζωής (life extension) για τη χρήση Αιολικών Πάρκων. Για την υλοποίηση/έλεγχο της επέκτασης ζωής απαιτείται να υπάρχει ένα γενικό μοντέλο της Ανεμογεννήτριας προς εξέταση, ή να φτιαχτεί ένα με βάση ελάχιστη υπάρχουσα πληροφορία από την εγκατεστημένη μηχανή. Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας είναι να δει ένα τέτοιο γενικό (generic) μοντέλο το οποίο φτιάχνεται από την ελάχιστη πληροφορία και προσθέτοντας στοιχεία που σχετίζονται από την πείρα, εξετάζει πόσο ευαίσθητο είναι σε μία μικρή τροποποίηση βασικών μεγεθών. Μέσα από την μεταπτυχιακή αυτή εργασία παρουσιάζετε τη μεθοδολογία βαθμονόμησης μοντέλου εμπορικής Ανεμογεννήτριας σε λογισμικό υδρο-σέρβο-αέρο-ελαστικής ανάλυσης και καταγράφεται η αβεβαιότητα πρόβλεψης των φορτίων της. Για τη δημιουργία της συγκεκριμένης Μεταπτυχιακής εργασίας αξιοποιήθηκε εμπορική ανεμογεννήτρια τύπου Enercon E-82, η οποία ανήκει στον Ενεργειακό Όμιλο Eunice Energy Group και είναι εγκατεστημένη στο Αιολικό Πάρκο Κέδρος, στη Βοιωτία.

Το πρώτο κομμάτι την μεταπτυχιακής εργασίας αφορά την αποτύπωση του μοντέλου της E-82 στο hGAST, λογισμικό όπου και χρησιμοποιήθηκε. Για να γίνει η σωστή αποτύπωση τόσο των αεροδυναμικών, όσο και των δομικών χαρακτηριστικών της ανεμογεννήτριας έγιναν αναλυτικοί υπολογισμοί θεωρώντας ότι η ανεμογεννήτρια είναι βελτιστοποιημένο προϊόν. Επιπλέον αξιοποιήθηκε κάθε διαθέσιμη πληροφορία που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, όπως είναι η αξιοποίηση πληροφοριών από τεχνικά εγχειρίδια του κατασκευαστή (Enercon), ή πληροφορία προερχόμενη από καταγραφείς στοιχείων της Ανεμογεννήτριας (Scada).

Στη συνέχεια έγινε προγραμματισμός και βαθμονόμηση του Ελεγκτή, για λειτουργία σε συνθήκες τυρβώδους ανέμου. Η βαθμονόμηση των κερδών του ελεγκτή έγινε στη βάση της μεθόδου ziegel nichols, με την ανάλογη τροποποίηση στα αποτελέσματα, προκειμένου να επέλθει βελτιστοποίηση.

Τέλος έχοντας στήσει ένα ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης γίνεται η ανάλυση της αβεβαιότητας πρόβλεψης φορτίων. Αξιοποιώντας διαφορετικές χρονοσειρές, γίνεται αναγωγή αυτών σε επίπεδο πενήκονταετίας μετρώντας τα μέγιστα φορτία με πιθανότητα εμφάνισης αυτών μία φορά τα 50 έτη. Η ανάλυση της αβεβαιότητάς γίνεται για διαφορετικές τιμές τόσο για την τιμή κερδών K_i του Ελεγκτή, όσο και για την ιδιοσυχνότητα του πύργου μέσα από τη μεταβολή του πάχους του.

III. Περιεχόμενα

I.	Ευχαριστίες.....	2
II.	Περίληψη.....	3
III.	Περιεχόμενα.....	4
IV.	Κατάλογος Σχημάτων	5
V.	Κατάλογος Πινάκων	7
1.	Εισαγωγή.....	8
2.	Χρήση λογισμικού προσομοίωσης.....	11
3.	Αεροδυναμική των Πτερυγίων	12
3.1.	Περιγραφή του Προβλήματος	12
3.2.	Διαμόρφωση του πτερυγίου	12
4.	Δομικές Ιδιότητες Συνιστωσών Ανεμογεννήτριας.....	18
4.1.	Περιγραφή του προβλήματος	18
4.2.	Πύργος.....	19
4.3.	Πτερύγια.....	22
4.4.	Άξονας.....	26
5.	Βαθμονόμηση Ελεγκτή	27
5.1.	Μεθοδολογία Εύρεσης τιμής.....	27
5.2.	Υπολογισμός K_u , T_u	28
5.3.	Υπολογισμός K_p , K_i	30
5.4.	Βηματική αλλαγή ταχύτητας.....	31
5.5.	Απόδοση Ανεμογεννήτριας.....	32
6.	Ανάλυση Αβεβαιότητας Πρόβλεψης Φορτίων.....	35
6.1.	Επιλογή ταχύτητας ανέμου.....	35
6.2.	Δημιουργία μεταβλητών προς εξέταση	36
6.3.	Μεθοδολογία στατιστικής ανάλυσης αποτελεσμάτων	36
6.4.	Ανάλυση αβεβαιότητας πρόβλεψης φορτίων τιμών Κέρδους K_i	39
6.4.1.	Επιλογή Τιμών K_i	39
6.4.2.	Αποτελέσματα	41
6.5.	Ανάλυση αβεβαιότητας πρόβλεψης φορτίων τιμών ιδιοσυχνότητας/πάχους του Πύργου	49
6.5.1.	Επιλογή τιμών πάχους Πύργου	49
6.5.2.	Αποτελέσματα	51
6.6.	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	59
7.	Συμπεράσματα-Προτάσεις	60
8.	Παράρτημα	61

IV. Κατάλογος Σχημάτων

ΕΙΚΟΝΑ 1.1 2D ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ENERCON E-82.....	9
ΕΙΚΟΝΑ 3.2.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ ΤΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΤΟΥ ΠΤΕΡΥΓΑΣ.....	13
ΕΙΚΟΝΑ 3.2.2 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΥ.....	14
ΕΙΚΟΝΑ 3.2.3 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	15
ΕΙΚΟΝΑ 3.2.4 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΓΩΝΙΑΣ Φ ΚΑΤΑ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΕΠΕΚΤΑΣΜΑΤΟΣ.....	17
ΕΙΚΟΝΑ 3.2.5 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΣΥΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΕΠΕΚΤΑΣΜΑΤΟΣ.....	17
ΕΙΚΟΝΑ 4.1.1 ΑΡΧΗ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	18
ΕΙΚΟΝΑ 4.2.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΥΨΟΣ ΤΟΥ.....	20
ΕΙΚΟΝΑ 4.2.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΑΖΑΣ ΠΥΡΓΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΥΨΟΣ ΤΟΥ.....	20
ΕΙΚΟΝΑ 4.2.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΜΟΠΤΙΚΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΠΥΡΓΟΥ.....	21
ΕΙΚΟΝΑ 4.2.4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΤΡΕΠΤΙΚΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΠΥΡΓΟΥ.....	21
ΕΙΚΟΝΑ 4.3.1 ΕΜΠΙΡΙΚΗ ΣΥΣΧΕΤΗΣΗ ΒΑΡΟΥΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΜΕ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ.....	22
ΕΙΚΟΝΑ 5.2.1 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΡΙΤΣΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΙ ΓΙΑ ΤΟ ΚΙ.....	29
ΕΙΚΟΝΑ 5.2.2 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ FORE AFT ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΙ ΓΙΑ ΤΟ ΚΙ.....	29
ΕΙΚΟΝΑ 5.2.3 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΚΤΙΝΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ FZ ΤΟΥ ΑΞΟΝΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΙ ΓΙΑ ΤΟ ΚΙ.....	30
ΕΙΚΟΝΑ 5.4.1 ΓΩΝΙΑ ΡΙΤΣΗ ΓΙΑ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΑΝΕΜΟΥ.....	31
ΕΙΚΟΝΑ 5.4.2 ΑΠΟΚΡΙΣΗ RPM ΓΙΑ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΑΝΕΜΟΥ.....	31
ΕΙΚΟΝΑ 5.5.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ HGAST.....	33
ΕΙΚΟΝΑ 5.5.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ.....	34
ΕΙΚΟΝΑ 6.1.1 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑΣ ΜΕ ΤΥΡΒΩΔΗ ΑΝΕΜΟ.....	35
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.1.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΩΝΙΑΣ ΡΙΤΣΗ ΓΙΑ ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΚΕΡΔΟΥΣ ΚΙ.....	39
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.1.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΤΙΜΩΝ ΚΙ.....	40
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.1.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΚΙ.....	40
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ WEIBULL 2P, 3P ΚΑΙ LONG NORMAL ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΜΕΓΙΣΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ FLAP WISE ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ, ΣΙ=0.707.....	42
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ WEIBULL 2P, 3P ΚΑΙ LONG NORMAL ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΜΕΓΙΣΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ EDGE WISE ΡΟΠΗ, ΣΙ=0.581.....	42
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ WEIBULL 2P, 3P ΚΑΙ LONG NORMAL ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΜΕΓΙΣΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ FLAP WISE ΡΟΠΗ, ΣΙ=0.728.....	43
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ WEIBULL 2P, 3P ΚΑΙ LONG NORMAL ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΜΕΓΙΣΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ FORE AFT ΡΟΠΗ, ΣΙ=0.613.....	43
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ WEIBULL 2P, 3P ΚΑΙ LONG NORMAL ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΜΕΓΙΣΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ SIDE SIDE ΡΟΠΗ, ΣΙ=0.647.....	44
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.6 ΌΡΙΑ ΑΚΡΩΝ 5% ΚΑΙ 95%, WEIBULL 2P ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ FLAP WISE, ΣΙ=0.707.....	44
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.7 ΌΡΙΑ ΑΚΡΩΝ 5% ΚΑΙ 95%, WEIBULL 3P ΓΙΑ ΤΗ ΡΟΠΗ EDGE WISE, ΣΙ=0.581.....	45
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.8 ΌΡΙΑ ΑΚΡΩΝ 5% ΚΑΙ 95%, WEIBULL 2P ΓΙΑ ΤΗ ΡΟΠΗ FLAP WISE, ΣΙ=0.728.....	45
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.9 ΌΡΙΑ ΑΚΡΩΝ 5% ΚΑΙ 95%, WEIBULL 2P ΓΙΑ ΤΗ ΡΟΠΗ FORE AFT, ΣΙ=0.613.....	46
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.10 ΌΡΙΑ ΑΚΡΩΝ 5% ΚΑΙ 95%, WEIBULL 2P ΓΙΑ ΤΗ ΡΟΠΗ SIDE SIDE, ΣΙ=0.647.....	46
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.11 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ WEIBULL 2P ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ FLAP WISE.....	47
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.12 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ WEIBULL 3P ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΡΟΠΗΣ EDGE WISE...	47
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.13 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ WEIBULL 2P ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΡΟΠΗΣ FLAP WISE....	48
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.14 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ WEIBULL 2P ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΡΟΠΗΣ FORE AFT.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 6.4.2.15 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ WEIBULL 2P ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΡΟΠΗΣ SIDE SIDE.....	49
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.1.1 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΑΧΟΥΣ ΠΥΡΓΟΥ.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.1.2 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΠΥΡΓΟΥ.....	50

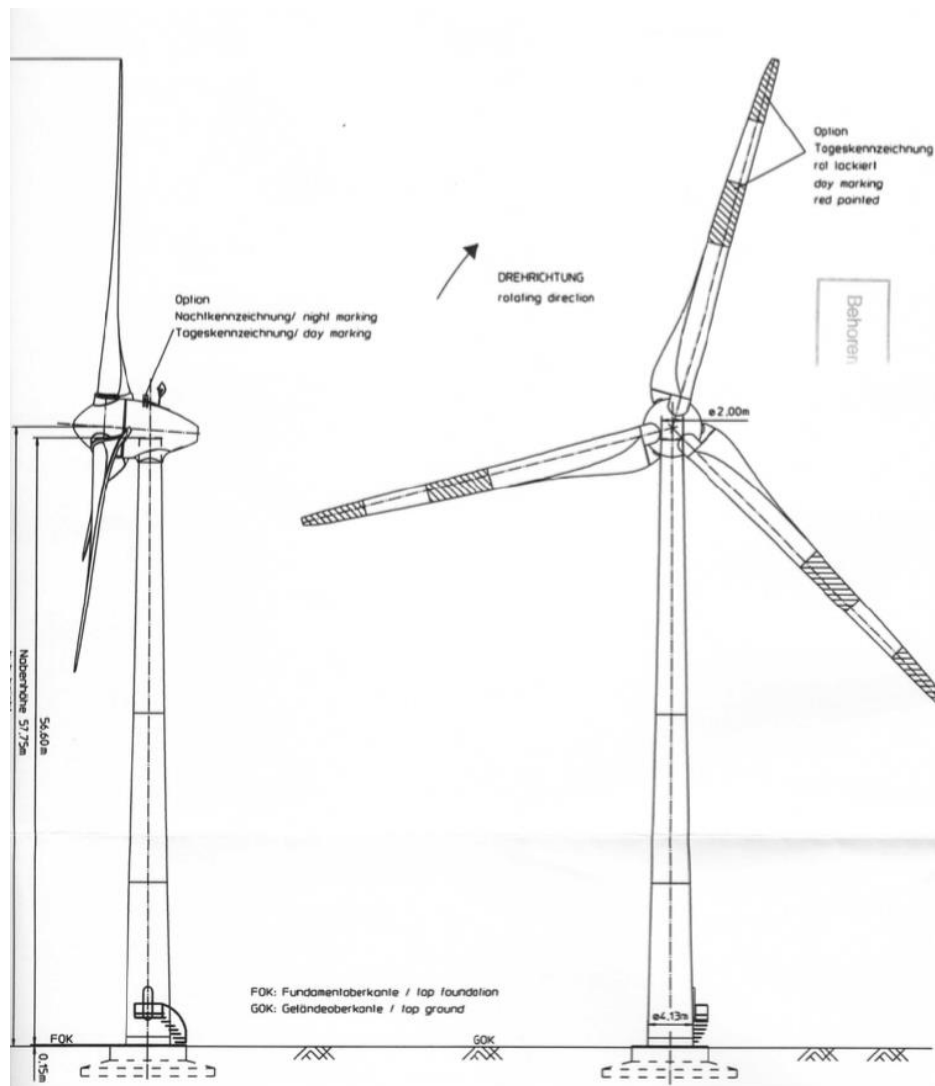
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.1 ΣΥΓΚΡΗΣΗ WEIBULL 2P, 3P ΚΑΙ LONG NORMAL ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΜΕΓΙΣΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ FLAP WISE ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ, $\Sigma I=1.665$	52
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.2 ΣΥΓΚΡΗΣΗ WEIBULL 2P, 3P ΚΑΙ LONG NORMAL ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΜΕΓΙΣΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ EDGE WISE ΡΟΠΗ, $\Sigma I=1.732$	52
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.3 ΣΥΓΚΡΗΣΗ WEIBULL 2P, 3P ΚΑΙ LONG NORMAL ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΜΕΓΙΣΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ FLAP WISE ΡΟΠΗ, $\Sigma I=1.292$	53
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.4 ΣΥΓΚΡΗΣΗ WEIBULL 2P, 3P ΚΑΙ LONG NORMAL ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΜΕΓΙΣΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ FORE AFT ΡΟΠΗ, $\Sigma I=1.788$	53
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.5 ΣΥΓΚΡΗΣΗ WEIBULL 2P, 3P ΚΑΙ LONG NORMAL ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΤΟΠΙΚΑ ΜΕΓΙΣΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ SIDE SIDE ΡΟΠΗ, $\Sigma I=1.527$	54
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.6 ΌΡΙΑ ΑΚΡΩΝ 5% ΚΑΙ 95%, WEIBULL 2P ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ FLAP WISE, $\Sigma I=1.665$...	54
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.7 ΌΡΙΑ ΑΚΡΩΝ 5% ΚΑΙ 95%, WEIBULL 3P ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΟΠΗ EDGE WISE , $\Sigma I=1.732$	55
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.8 ΌΡΙΑ ΑΚΡΩΝ 5% ΚΑΙ 95%, WEIBULL 2P ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΟΠΗ FLAP WISE, $\Sigma I=1.292$	55
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.9 ΌΡΙΑ ΑΚΡΩΝ 5% ΚΑΙ 95%, WEIBULL 2P ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΟΠΗ FORE AFT, $\Sigma I=1.788$	56
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.10 ΌΡΙΑ ΑΚΡΩΝ 5% ΚΑΙ 95%, WEIBULL 3P ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΟΠΗ SIDE SIDE, $\Sigma I=1.527$	56
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.11 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ WEIBULL 2P ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ FLAP WISE.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.12 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ WEIBULL 3P ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΡΟΠΗΣ EDGE WISE...	57
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.13 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ WEIBULL 2P ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΡΟΠΗΣ FLAP WISE....	58
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.14 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ WEIBULL 2P ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΡΟΠΗΣ FORE AFT	58
ΕΙΚΟΝΑ 6.5.2.15 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ WEIBULL 3P ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΡΟΠΗΣ SIDE SIDE	59
ΕΙΚΟΝΑ 8.1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ CL,CD,CM ΓΙΑ ΤΗΝ DU 99 W 405 LM	61
ΕΙΚΟΝΑ 8.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ CL,CD,CM ΓΙΑ ΤΗΝ DU 99 W 350	61
ΕΙΚΟΝΑ 8.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ CL,CD,CM ΓΙΑ ΤΗΝ DU 97 W 300 LM	62
ΕΙΚΟΝΑ 8.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ CL,CD,CM ΓΙΑ ΤΗΝ DU 91 W2-250.....	62
ΕΙΚΟΝΑ 8.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ CL,CD,CM ΓΙΑ ΤΗΝ DU 93 W 210 LM	63
ΕΙΚΟΝΑ 8.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ CL,CD,CM ΓΙΑ ΤΗΝ NACA 64-618	63

V. Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2.1 ΠΡΟΦΙΛ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΕΠΕΚΤΑΣΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ	12
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΧΟΡΔΩΝ NREL 5MW ΚΑΙ ENERCON E-82.....	13
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ.....	16
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2.1 ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΠΑΧΗ ΠΥΡΓΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΥΨΟΣ ΤΟΥ	19
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΥΡΓΟΥ	19
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1.1 ΤΙΜΕΣ ΚΕΡΔΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΕΛΕΓΚΤΗ ΚΑΤΑ ZIEGLER NICHOLS	27
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΕΡΔΩΝ ΕΛΕΓΚΤΗ.....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2.2 ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΚΕΡΔΟΥΣ ΚΙ.....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2.3 ΤΙΜΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΧΡΟΝΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ.....	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΚΕΡΔΩΝ ΚΙ ΚΑΙ ΚΡ	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5.1 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ RPM HGAST ΜΕ SCADA	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΓΚΡΗΣΗ ΜΕ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗ	34
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4.2.1 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΚΕΡΔΟΥΣ ΚΙ	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5.2.1 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ	51

1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια δεδομένης της ταχύτατης ανάπτυξης των Ανεμογεννητριών, αλλά και της ανάγκης πρόβλεψης σφαλμάτων και ελαχιστοποίησης του κόστους λειτουργίας και συντήρησης τους, γίνεται συστηματική προσπάθεια δημιουργίας ψηφιακών μοντέλων που προσομοιώνουν συνολικά τη λειτουργία τους. Πιο συγκεκριμένα, ανάμεσα στις 216000 κατ' εκτίμηση εγκατεστημένες Ανεμογεννήτριες παγκοσμίως, εμφανίζονται γύρω στις 38000 περιστατικά βλαβών ετησίως. Έρευνες έχουν δείξει ότι η προληπτική συντήρηση κοστίζει 25% λιγότερο από την έκτακτη συντήρηση. Επιπλέον η προγνωστική συντήρηση κοστίζει 47% λιγότερο. [Digital twin of wind turbines for real time continuous monitoring and inspection [Online] // brunel. - <https://www.brunel.ac.uk/research/Projects/WindTwin-Digital-twin-of-wind-turbines-for-real-time-continuous-monitoring-and-inspection.>][3],[Pal Subhankar How digital twins could transform the wind energy industry [Online] // Windpower. - 2020. - [https://www.windpowerengineering.com/how-digital-twins-could-transform-the-wind-energy-industry/.](https://www.windpowerengineering.com/how-digital-twins-could-transform-the-wind-energy-industry/)][11]. Επιπλέον ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης επιφέρει και η επέκταση του προσδόκιμου ζωής μίας ανεμογεννήτριας. Λύση στα παραπάνω είναι η δημιουργία τόσο α) μοντέλων, τα οποία βασίζονται στην αξιοποίηση μετρήσεων και πληροφοριών, β) τη δημιουργία φυσικών μοντέλων τα οποία βαθμονομούνται στη βάση μετρήσεων, όπως γίνεται και με την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.



Εικόνα 1.1 2D αναπαράσταση της Enercon E-82

Σκοπός της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας είναι να αποδώσει τη μεθοδολογία προκειμένου να δημιουργηθεί ένα μαθηματικό πρότυπο του φυσικού μοντέλου, το οποίο βαθμονομείτε στη βάση μετρημένων δεδομένων, με σκοπό την ανάλυση μοντέλου εμπορικής Ανεμογεννήτριας, αναλύοντας την αβεβαιότητα πρόβλεψης των φορτίων της. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης Μεταπτυχιακής εργασίας αξιοποιήθηκε εμπορική ανεμογεννήτρια της Enercon E-82¹, η οποία ανήκει στον Ενεργειακό Όμιλο Eunice Energy Group².

¹ Πρόκειται για το ομώνυμο μοντέλο της Enercon των 2.35MW.
<https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-82/>

² Η Eunice Energy Group είναι ενεργειακός Όμιλος εταιριών, ο οποίος μεταξύ άλλων έχει στη κατοχή του Αιολικά και Φωτοβολταϊκά Πάρκα. Η Ανεμογεννήτρια της παρούσας Μεταπτυχιακής εργασίας αναφέρεται σε συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια του Αιολικού Πάρκου Κέδρος της Eunice Energy Group.
<https://eunice-group.com/>

Ένας χρήστης Αιολικών Πάρκων/ ή και εταιρία ανάλυσης τέτοιων δεδομένων λόγω περιορισμένης πρόσβασης σε δεδομένα της ίδιας της Ανεμογεννήτριας, θα πρέπει να βρει διάφορους τρόπους, προκειμένου να δημιουργήσει ένα σωστό φυσικό μοντέλο. Η δημιουργία του φυσικού αυτού μοντέλου χωρίζεται σε τρία κυρίως μέρη. (α), Την αεροδυναμική της πτέρυγας (β), τη δημιουργία των δομικών ιδιοτήτων των συνιστωσών της Ανεμογεννήτριας (structural beam properties) και (γ), τέλος τον προγραμματισμό του ελεγκτή, προκειμένου η Ανεμογεννήτρια να δουλέψει ολοκληρωμένα σε συνθήκες μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου ή αλλιώς στην ύπαρξη της τύρβης του αέρα [Dimitris Manolas & Vasilis Riziotis Input / Output of hGAST [Report].[5].

Με βάση τα παραπάνω, αλλά και χρησιμοποιώντας μεθόδους που ο κώδικας IEC 61400-1 θέτει, πραγματοποιήθηκε ανάλυση της αβεβαιότητας πρόβλεψης φορτίων της Ανεμογεννήτριας. Εργαλείο για αυτή την εργασία αποτέλεσε η weibull ανάλυση διαφορετικών παραμέτρων τόσο του σχεδιασμού, όσο και της λειτουργίας της Ανεμογεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν 20 διαφορετικές, τυχαίες μεταβλητές για το κέρδος ολοκληρωτικού ελέγχου K_i του PI ελεγκτή, όσο και για διαφορετικά πάχη του πύργου. Σκοπός της εξέτασης αυτής είναι να δειχθεί κατά πόσο η επιλογή τιμών εντός αναμενόμενου από την πείρα εύρους μεταβολής αυτών κατά τη δημιουργία του φυσικού μοντέλου επηρεάζει τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, άρα και την ανάλυση των φορτίων της με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων από τους χρήστες Ανεμογεννητριών.

2. Χρήση λογισμικού προσομοίωσης

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιεί εργαλεία αεροελαστικής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιεί το hGAST[Riziotis Dimitris Manolas & Vasilis Presentation of HydroGast (hGAST) servo-hydro-aero-elastic tool [Report].][13]. Το hGAST αποτελεί πλατφόρμα για την υδρο-σέρβο-αέρο-ελαστική προσομοίωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Τα επιμέρους πρότυπα που απαρτίζουν την πλατφόρμα, δηλαδή το αεροδυναμικό πρότυπο, το υδροδυναμικό, το ελαστο-δυναμικό, καθώς επίσης και του αυτομάτου ελέγχου εξετάζονται χωριστά και στη συνέχεια συντίθενται επιβάλλοντας κατάλληλη μη-γραμμική σύζευξη στα σημεία αλληλεπίδρασης τους. Κάθε διακριτό ελαστικό τμήμα της κατασκευής ή μέρος αυτής μοντελοποιείται με βάση τη θεωρία δοκού Timoshenko και επιλύεται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αεροδυναμικά φορτία υπολογίζονται είτε με τη μέθοδο του δίσκου ορμής είτε με τη λεπτομερέστερη μέθοδο των στοιχείων στροβιλότητας με ελεύθερο όμορο. Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίζονται μέσω επιλύτη που επιλύει τις γραμμικές υδροδυναμικές εξισώσεις βασισμένου στη μέθοδο των συνοριακών στοιχείων ή χρησιμοποιώντας τον ημί-εμπειρικό τύπο του Morison. Το σύστημα αγκύρωσης στην περίπτωση πλωτής ανεμογεννήτριας διακριτοποιείται με μη-γραμμικά ελαστικά στοιχεία που υπόκεινται μόνο σε εφελκυστικά φορτία. Το σύστημα αυτομάτου ελέγχου μεταβλητών στροφών / μεταβλητού βήματος λαμβάνεται υπόψη συνήθως με κατάλληλη προσαρμογή εξωτερικών αρχείων σε μορφή βιβλιοθήκης (αρχεία DLL) και υλοποιεί ελεγκτές τύπου PI και κατάλληλα φίλτρα. Το λογισμικό hGAST [Dimitris I. Manolas, Vasilis A. Riziotis, George P. Papadakis and Spyros G. Voutsinas Hydro-Servo-Aero-Elastic Analysis of Floating Offshore Wind Turbines [Report]. - 2020.][4] πραγματοποιεί μη-γραμμικούς υπολογισμούς στο πεδίο του χρόνου, καθώς και ιδιοδιανυσματική ανάλυση και ανάλυση ευστάθειας στη βάση συνεπούς διαδικασίας γραμμικοποίησης. Καθορίζοντας την εξωτερική περιβαλλοντική διέγερση (συνθήκες αέρα, κύματος και θαλάσσιου ρεύματος) οι υπολογισμοί στο πεδίο του χρόνου επιτρέπουν την εκτίμηση των κοπωτικών και των ακραίων φορτίων της κατασκευής κατά το διεθνή κανονισμό (IEC standard).

Το hGAST μοντελοποιεί όλα τα υπάρχοντα είδη βάσεων στήριξης στο βυθό καθώς και πλωτήρες για οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα ανεμογεννήτριες, ενώ έχει πιστοποιηθεί σε σύγκριση με άλλα υπολογιστικά εργαλεία στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων της IEA OC3 και OC4. Εξετάζονται περιπτώσεις στήριξης με μονοκόμματο πυλώνα (monopile), χωροδικτύωμα (jacket), πλωτή ημιβυθισμένη πλατφόρμα (semi-submersible) και πλωτήρα τύπου «spar-buoy» όπου επάνω τους εδράζεται η NREL 5MW ανεμογεννήτρια αναφοράς[Dimitris Manolas & Vasilis Riziotis Input / Output of hGAST [Report].][5].

Αποτελεί απόγονο του GAST, το οποίο αρχικά είχε αναπτυχθεί για χερσαίες ανεμογεννήτριες, από το ΕΜΠ. Η παρούσα έκδοση έχει επαληθευθεί σε σχέση με δεδομένα παρμένα από μετρήσεις στα πλαίσια πολλών Ευρωπαϊκών προγραμμάτων όπως τα: MOUNTURB, COMTERID, VEWTDC, STABCON and UPWIND[Manolas Dimitris Hydro-Aero_Elastic Analysis of Offshore Wind Turbines [Report]. - 2015.][9].

3. Αεροδυναμική των Πτερυγίων

3.1. Περιγραφή του Προβλήματος

Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τη βαθμονόμηση του αεροδυναμικού μέρους της E-82. Πιο συγκεκριμένα το πτερύγιο του δρομέα της E-82 δημιουργήθηκε με βάση αυτή της NREL των 5MW [Definition of a 5-MW Reference [Report]. - [s.l.] : NREL.][2]. Τροποποιώντας τα χαρακτηριστικά του φυσικού μοντέλου (NREL 5MW) σε αυτά της Epercon E-82, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο υπό κλίμακα (scale down). Με τον όρο scale down νοείται τόσο η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, όσο και των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων της ανεμογεννήτριας.

3.2. Διαμόρφωση του πτερυγίου

Για τη δημιουργία του πτερυγίου επιλέχθηκαν οι αεροτομές της NREL 5MW (από Εικόνα 8.1 μέχρι και Εικόνα 8.6).

Πιο συγκεκριμένα για κάθε κομμάτι του επεκτάσματος της πτέρυγας επιλέχθηκαν οι εξής αεροτομές:

R (m)	Profile
0	DU 99 W 405 LM
1.87	DU 99 W 405 LM
3.64	DU 99 W 405 LM
5.42	DU 99 W 405 LM
7.65	DU 99 W 405 LM
10.32	DU 99 W 350
12.98	DU 99 W 350
15.65	DU 97 W 300 LM
18.32	DU 91 W2-250
20.99	DU 91 W2-250
23.66	DU 93-W-210 LM
26.32	DU 93-W-210 LM
28.99	NACA 64-618
31.66	NACA 64-618
34.33	NACA 64-618
36.55	NACA 64-618
38.33	NACA 64-618
40.11	NACA 64-618
41.00	NACA 64-618

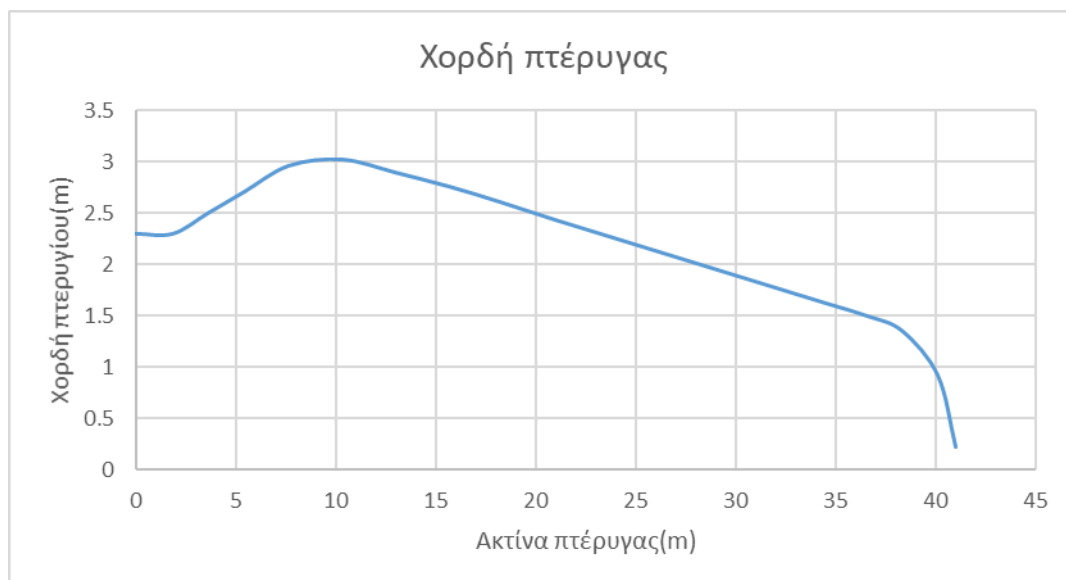
Πίνακας 3.2.1 Προφίλ αεροτομών κατά το μήκος επεκτάσματος της πτέρυγας

Για τη χορδή, όπως και τη γωνία συστροφής (twist angle) έγινε μελέτη με βάση τα παρακάτω για κάθε κομμάτι της πτέρυγας. Για την εύρεση του μήκους χορδής υπολογίστηκε ο λόγος διαμέτρου δρομέα της NREL (126m) με αυτόν της E82 (82m). Πιο συγκεκριμένα ίσος με 0,65.

NREL (m)	Chord Nrel (m)	E-82 (m)	Chord E-82 (m)
0	3.54	0	2.31
2.87	3.54	1.87	2.31
5.6	3.85	3.64	2.51
8.33	4.17	5.42	2.71
11.75	4.56	7.65	2.97
15.85	4.65	10.32	3.03
19.95	4.46	12.98	2.90
24.05	4.25	15.65	2.77
28.15	4.01	18.32	2.6
32.25	3.75	20.99	2.44
36.35	3.50	23.66	2.28
40.45	3.26	26.32	2.12
44.55	3.01	28.99	1.96
48.65	2.76	31.66	1.80
52.75	2.52	34.33	1.64
56.17	2.31	36.55	1.51
58.9	2.09	38.33	1.36
61.63	1.42	40.11	0.92
63.00	0.35	41	0.23

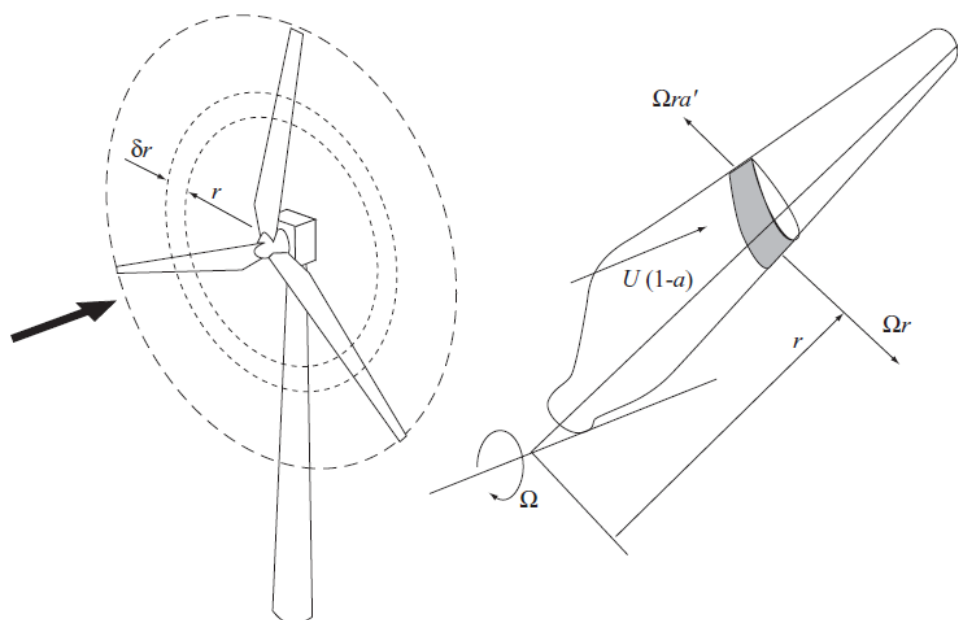
Πίνακας 3.2.2 Σύγκρισης χορδών NREL 5MW και Enercon E-82

Στην Εικόνα 3.2.1 Διάγραμμα αποτύπωσης της χορδής του πτέρυγας κατά το μήκος του επεκτάσματος.



Εικόνα 3.2.1 Διάγραμμα αποτύπωσης της χορδής του πτέρυγας

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι ταχύτητες που επενεργούν πάνω σε μία τυχαία αεροτομή πτέρυγας ανεμογεννήτριας. Ο υπολογισμός της γωνίας συστροφής γίνεται με βάση τη θεωρία δίσκου ορμής και στοιχείων περύγωσης (Blade Element Momentum, BEM).



Εικόνα 3.2.2 Ταχύτητες περιστροφής και ανέμου

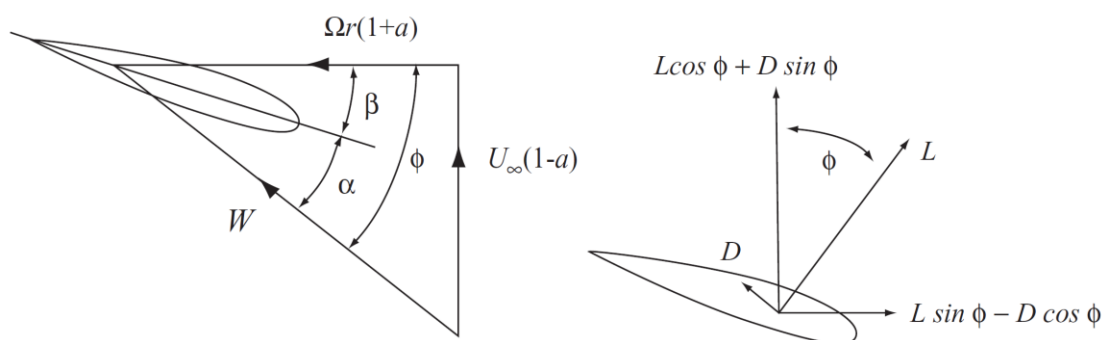
Θεωρούμε ότι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται αναφέρονται σε δισδιάστατη τομή του πτερυγίου. Θεωρούμε επίσης ότι η ροή στη διεύθυνση του επεκτάσματος αγνοείται, καθώς επίσης και τα τρισδιάστατα φαινόμενα της ροής. Η ταχύτητα στην ακτινική κατεύθυνση εκφράζεται μέσα από την ταχύτητα του ανέμου, συντελεστών της ροής, καθώς επίσης και της περιστροφικής ταχύτητας. Έχοντας σαν δεδομένα τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης του πτερυγίου, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι αξονικοί και εφαπτομενικοί επαγόμενοι συντελεστές α και α' . Ωστόσο εμείς τους θεωρούμε σταθερούς καθ' όλο το μήκος εκπετάσματος και ίσους με $\alpha=0.33$ και $\alpha'=0$, αντίστοιχα.

Θεωρούμε ότι έχουμε μία αεροτομή μήκους R , με N αριθμό πτερυγίων, χορδής c και γωνίας βήματος β . Το μήκος της χορδής, καθώς επίσης και η γωνία συστροφής μεταβάλλονται κατά μήκος του εκπετάσματος. Τα πτερύγια περιστρέφονται με ταχύτητα Ω και εφαρμόζεται ταχύτητα ανέμου U_∞ . Η εφαπτομενική ταχύτητα Ωr για κάθε τμήμα του πτερυγίου φαίνεται στο στην Εικόνα 3.2.2 σε συνδυασμό με την εφαπτομενική ταχύτητα του όμορου $\alpha' \Omega r$. Αποδίδουν την ταχύτητα $(1 + \alpha) \Omega r$. Η Εικόνα 3.2.3 δείχνει τις ταχύτητες και δυνάμεις σε σχέση με την αεροτομή για συγκεκριμένο μήκος επεκτάσματος [Tony Burton, David Sharpe, Nick Jeckins, Ervin Bossanyi Wind Energy Handbook [Book]. - 2001.][14].

Από την Εικόνα 3.2.3 αποτυπώνεται η συνισταμένη ταχύτητα του περυγίου όπως αυτή περιγράφεται από την σχέση (1).

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

Η ταχύτητα W δρα υπό τη γωνία φ ως προς το επίπεδο περιστροφής, όπως φαίνεται και από το σχήμα



Εικόνα 3.2.3 Αποτύπωση ταχυτήτων και δυνάμεων σε αεροτομής ανεμογεννήτριας

Από την Εικόνα 3.2.3 φαίνεται ότι η γωνία φ συνδέεται με τις υπόλοιπες παραμέτρους μέσω των εξισώσεων (2), (3) και (4).

$$\sin\varphi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{W} \quad (2)$$

και

$$\tan\varphi = \frac{\Omega r(1+a')}{W} \quad (3)$$

Η γωνία προσβολής δίνεται από την σχέση

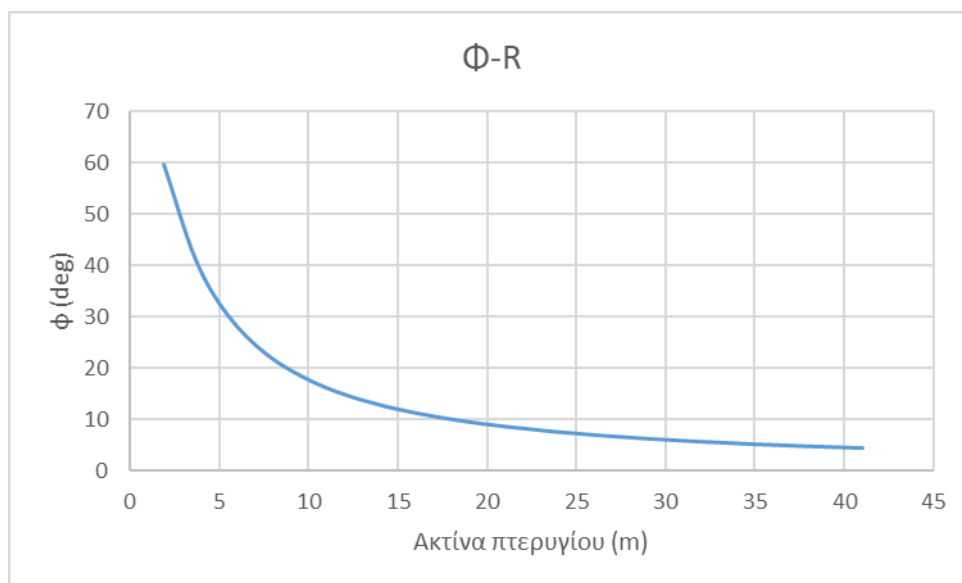
$$\alpha = \varphi - \beta \quad (4)$$

Με βάση τα παραπάνω υπολογίστηκε και η γωνία συστροφής (twist angle), δεδομένου ότι η γωνία βήματος (pitch angle) στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου είναι 2,5deg. Ως ταχύτητα περιστροφής επιλέχθηκε αυτή των 5m/sec και ίση με 1,053rad/sec. Η συγκεκριμένη αυτή τιμή λαμβάνεται από το Scada της Μηχανής, λαμβάνοντας υπόψιν τον μέσο όρο των ταχυτήτων περιστροφής για ταχύτητα ανέμου ίση με 5m/sec. Επιπλέον ως γωνία προσβολής επιλέχθηκε αυτή όπου και μεγιστοποιείται ο λόγος άνωσης/αντίστασης Max C_L/C_D . Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται οι αεροτομές που επιλέχθηκαν, μαζί με τη μεγιστοποίηση του C_L/C_D και τη γωνία προσβολής για την οποία επιτυγχάνεται αυτό.

R (m)	tanφ	Φ (deg)	Airfoils	Max CL/CD	AoA_@ max (CL/CD)	B (deg)	twist (Pitch=2.5deg)
0	1.70	59.60	DU 99 W 405 LM	71.63	6	53.60	51.10
1.87	1.70	59.60	DU 99 W 405 LM	71.63	6	53.60	51.10
3.64	0.87	41.11	DU 99 W 405 LM	71.63	6	35.12	32.61
5.42	0.59	30.39	DU 99 W 405 LM	71.63	6	24.39	21.89
7.65	0.42	22.58	DU 99 W 405 LM	71.63	6	16.58	14.08
10.32	0.31	17.14	DU 99 W 350	105	8	9.14	6.64
12.98	0.245	13.76	DU 99 W 350	105	8	5.76	3.26
15.65	0.20	11.49	DU 97 W 300 LM	112.14	7.5	3.99	1.49
18.32	0.17	9.85	DU 91 W2-250	134.43	5	4.85	2.35
20.99	0.15	8.62	DU 91 W2-250	134.43	5	3.62	1.12
23.66	0.13	7.66	DU 93-W-210 LM	143.64	3.5	4.16	1.66
26.32	0.12	6.89	DU 93-W-210 LM	143.64	3.5	3.39	0.89
28.99	0.11	6.26	NACA 64-618	174.31	5	1.26	-1.24
31.66	0.10	5.74	NACA 64-618	174.31	5	0.74	-1.76
34.33	0.09	5.29	NACA 64-618	174.31	5	-0.29	-2.21
36.55	0.09	4.97	NACA 64-618	174.31	5	0.03	-2.53
38.33	0.08	4.74	NACA 64-618	174.31	5	-0.26	-2.76
40.11	0.08	4.53	NACA 64-618	174.31	5	-0.47	-2.97
41	0.08	4.44	NACA 64-618	174.31	5	-0.56	-3.06

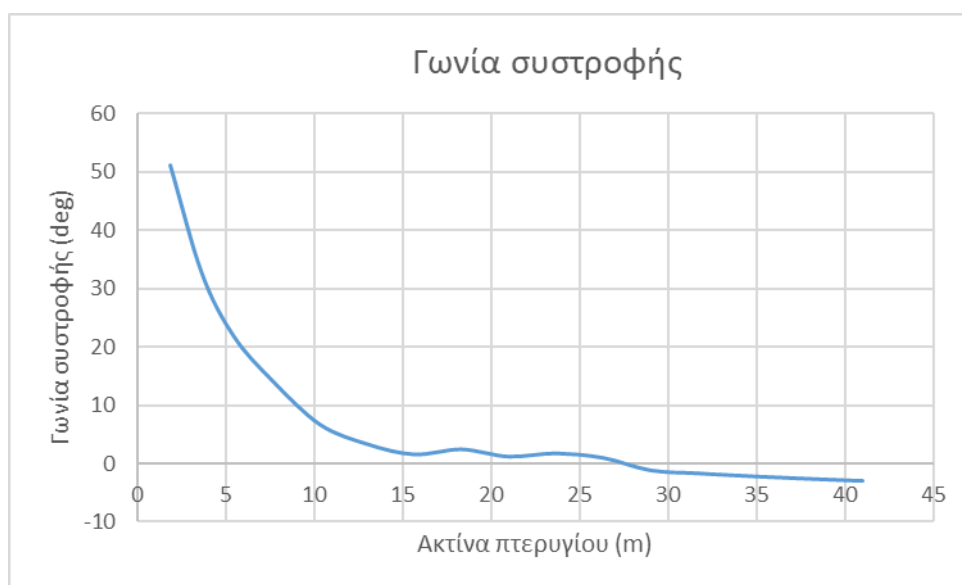
Πίνακας 3.2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αεροτομών

Στην Εικόνα 3.2.4 αποτυπώνεται η γωνία Φ συναρτήσει του επεκτάσματος του πτερυγίου.



Εικόνα 3.2.4 Αποτύπωση γωνίας Φ κατά το μήκος του επεκτάσματος

Στη συνέχεια, στην εικόνα Εικόνα 3.2.5 αποτυπώνεται η γωνία συστροφής κατά το μήκος του πτερυγίου με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς.

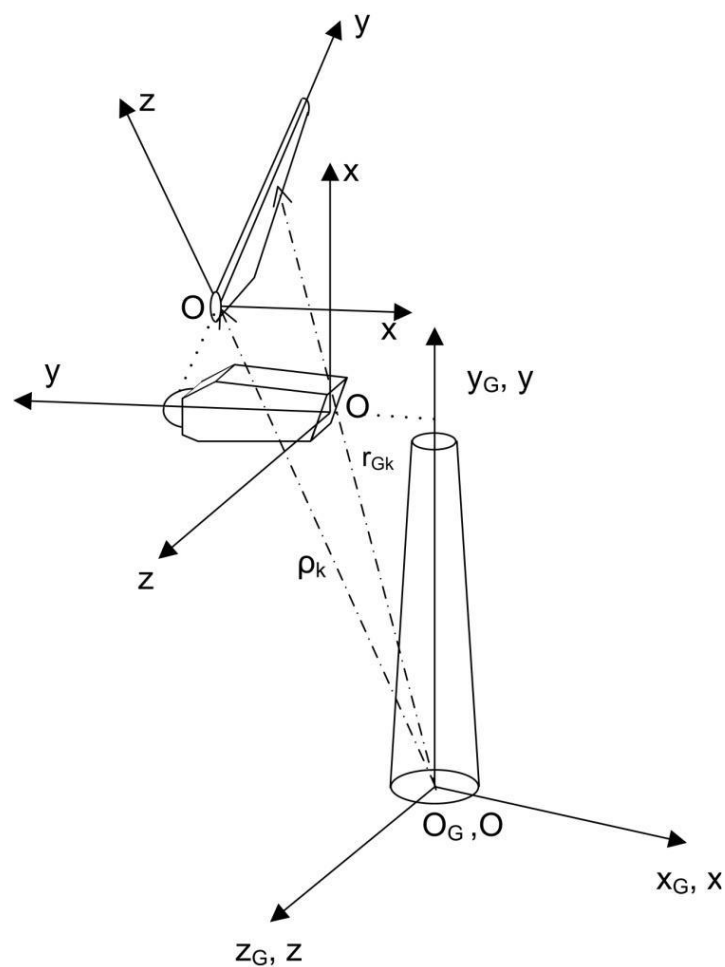


Εικόνα 3.2.5 Αποτύπωση γωνίας συστροφής κατά το μήκος του επεκτάσματος

4. Δομικές Ιδιότητες Συνιστωσών Ανεμογεννήτριας

4.1. Περιγραφή του προβλήματος

Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με το κομμάτι της αντοχής των υλικών της ανεμογεννήτριας. Οι συνιστώσες της ανεμογεννήτριας με βάση το hGAST χωρίζονται σε: Πύργο, Άξονα, Πτερύγια. Να σημειωθεί πως η Νασέλα (Nacelle) δεν λαμβάνεται ως δομικό στοιχείο της κατασκευής. Τέλος το πάχος τους πύργου υπολογίστηκε λαμβάνοντας ως δεδομένο τις εξωτερικές διαμέτρους, καθώς επίσης την πυκνότητα χάλυβα, το βάρος και το ύψος του πύργου.



Εικόνα 4.1.1 Αρχή συντεταγμένων επιμέρους συνιστωσών ανεμογεννήτριας

4.2. Πύργος

Ο Πίνακας 4.2.1 αποτυπώνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πύργου. Πιο συγκεκριμένα ο πύργος χωρίζεται σε πέντε διαφορετικές συνιστώσες. Για κάθε μία υπάρχει η διάμετρος στη βάση και στην κορυφή της. Επιπλέον αποτυπώνεται και η συνολική μάζα της κάθε συνιστώσας. Με δεδομένο ότι ο πύργος αποτελείται από χάλυβα και οτιδήποτε εξοπλισμός υπάρχει μέσα στην κάθε συνιστώσα (πχ σκάλες, ηλεκτρολογικοί πίνακες κλπ) θεωρείται αμελητέος υπολογίστηκαν τα πάχη του πύργου σε κάθε τομή του.

Τομή	Είδος Διαμέτρου	Εξωτερική Διάμετρος	Είδος Πάχους	Πάχος	Ύψος	Μάζα
Τομή 5	D_base	4.45m	t_base	100mm	1.35m	14.3tn
Τομή 5	D_top	4.30m	t_top	100mm		
Τομή 4	D_base	4.30m	t_base	60mm	11.77m	59.1tn
Τομή 4	D_top	3.91m	t_top	40mm		
Τομή 3	D_base	3.91m	t_base	40mm	18.20m	63.0tn
Τομή 3	D_top	3.35m	t_top	38mm		
Τομή 2	D_base	3.35m	t_base	35mm	21.80m	48.7tn
Τομή 2	D_top	2.71m	t_top	25mm		
Τομή 1	D_base	2.71m	t_base	28mm	23.68m	35.6tn
Τομή 1	D_top	2.19m	t_top	22mm		

Πίνακας 4.2.1 Διάμετροι και πάχη πύργου κατά το ύψος του

Στον Πίνακα 4.2.2 ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα, από τον οποίο και αποτελείται ο πύργος:

Μέτρο ελαστικότητας E (Young modulus)	195000MPa
Πυκνότητα ρ	7850kg/m ³
Σταθερά Poisson ν	0.3
Διαμητικό μέτρο Ελαστικότητας G	$G = \frac{E}{[2(1+\nu)]} = 75000\text{MPa}$

Πίνακας 4.2.2 Μηχανικές ιδιότητες πύργου

Για τις Ροπές αδρανείας με βάση και το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας ... έχουμε:

$$I_{xx} = \frac{\pi(D_{out}^4 - D_{in}^4)}{64} \quad (5)$$

$$I_{yy} = 0 \quad (6)$$

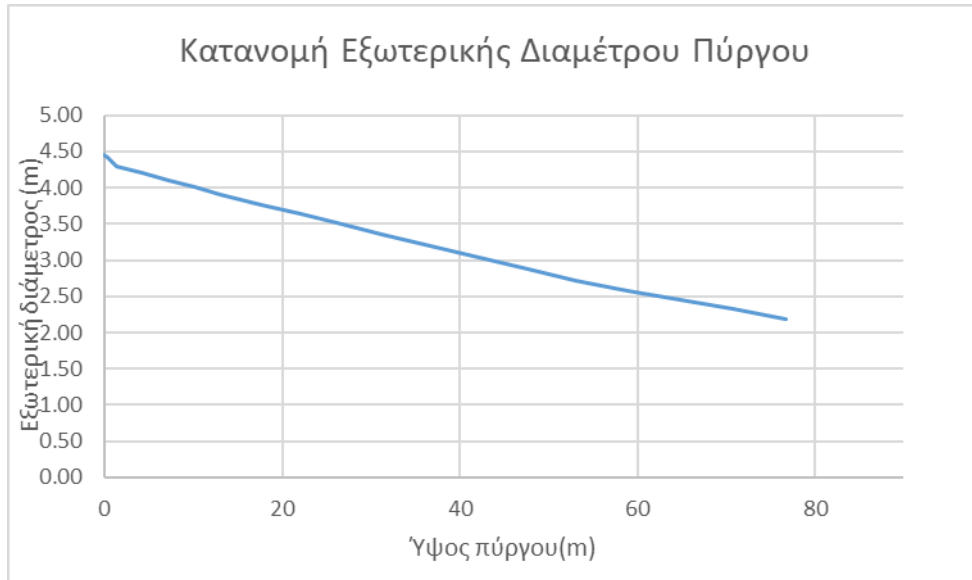
$$I_{zz} = \frac{\pi(D_{out}^4 - D_{in}^4)}{64} \quad (7)$$

$$I_t = \frac{\pi(D_{out}^4 - D_{in}^4)}{32} \quad (8)$$

Για τη διατομή της κάθε τομής έχουμε:

$$A = \pi \frac{(D_{out}^2 - D_{in}^2)}{4}$$

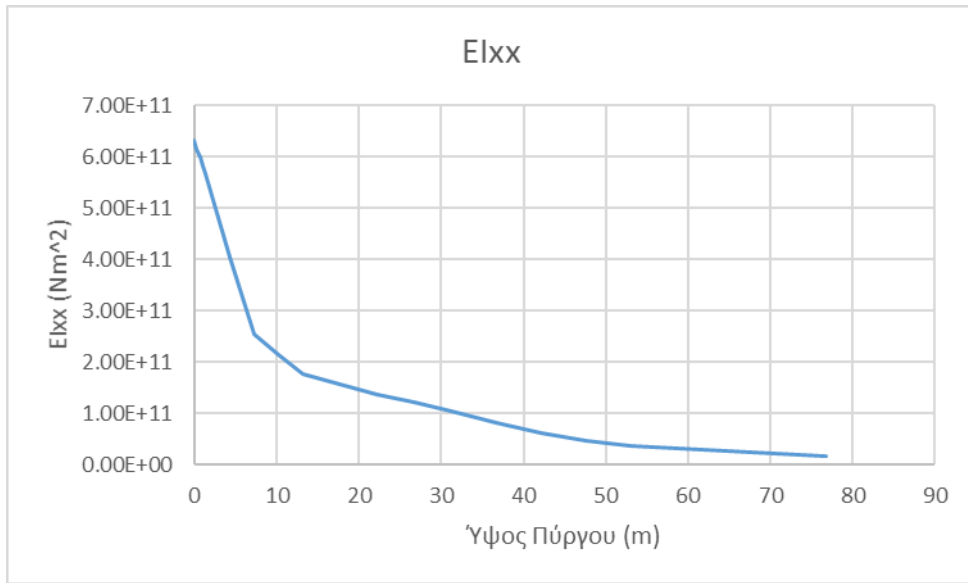
(9)



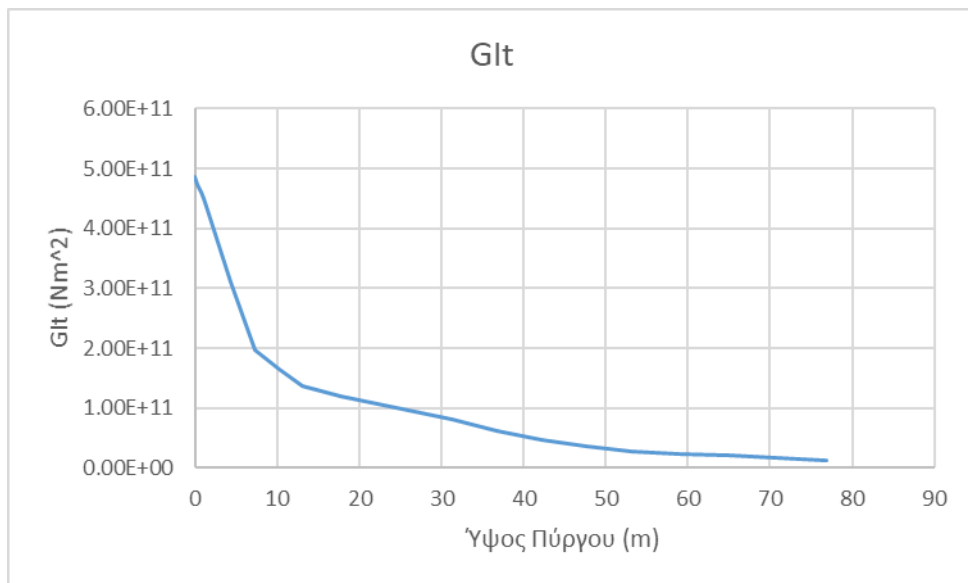
Εικόνα 4.2.1 Κατανομή εξωτερικής διαμέτρου Πύργου κατά το ύψος του



Εικόνα 4.2.2 Κατανομή μάζας Πύργου κατά το ύψος του



Εικόνα 4.2.3 Κατανομή καμπτικής δυσκαμψίας Πύργου

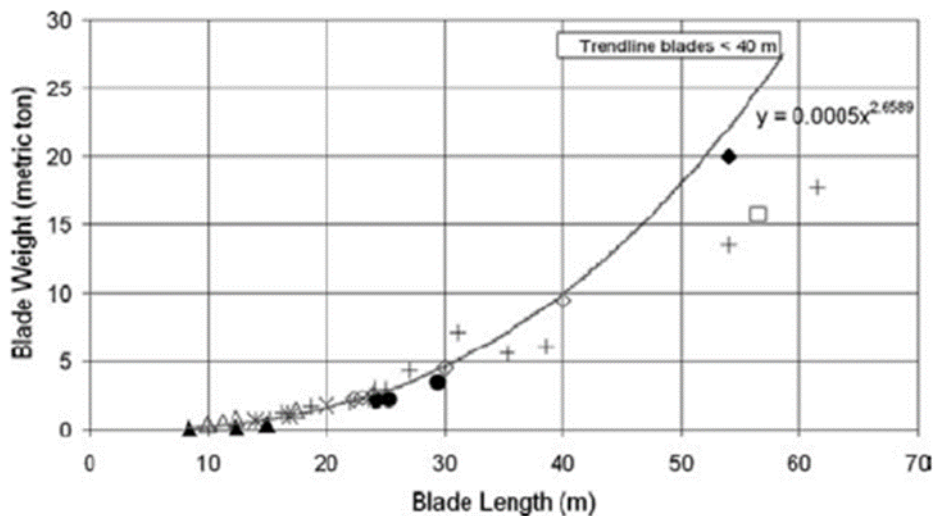


Εικόνα 4.2.4 Κατανομή στρεπτικής δυσκαμψίας Πύργου

4.3. Πτερύγια

Ο υπολογισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των πτερυγίων σε αντίθεση με αυτών του πύργου υπήρξε πιο σύνθετος και χρειάστηκε να αξιοποιηθούν στοιχεία του πτερυγίου της NREL. Για τον υπολογισμό του βάρους αξιοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες.

Η πρώτη αφορά σε εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού ακολουθώντας στατιστικές καμπύλες μάζας πτερυγίου συναρτήσει του μήκους του πτερυγίου, όπως και αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.3.1. Η παραπάνω μέθοδος αξιοποιήθηκε μόνο ως συμβουλευτικά. Η δεύτερη όπου και αξιοποιήθηκε, αφορά στην απευθείας μέτρηση του βάρους. Από τα στοιχεία του κατασκευαστή το συνολικό βάρος πτερυγίων και πλήμνης είναι 85 τόνοι. Το βάρος της πλήμνης είναι 35 τόνοι, άρα για το κάθε πτερύγιο το βάρος ανέρχεται σε 7,66 τόνους.



Εικόνα 4.3.1 Εμπειρική συσχέτιση βάρους πτερυγίου με το μήκος του

Για τον υπολογισμό της πρώτης μεθοδολογίας όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χρησιμοποιείτε η εμπειρική σχέση (10). Με τη χρήση της σχέσης (1) η μάζα του κάθε πτερυγίου με συνολικό μήκος πτερυγίου 38,8m ανέρχεται σε 8294kg.

$$y = 0.0005x^{2.6559} \quad (10)$$

Για τα πτερύγια της E-82 με βάση τη λογική του φυσικού μοντέλου υπό κλίμακας θα έχουμε για κάθε τιμή του y :

$$y = y_{NRel} * \frac{38.8}{61.5} \quad (11)$$

Όπου 38,8 το μήκος πτερυγίου της E-82 και 61,5 το μήκος πτερυγίου της NRel.

Στη συνέχεια για να μπορέσουμε να διακριτοποιήσουμε τη μάζα (kg/m) σε κάθε κόμβο (node) του πτερυγίου έπρεπε να οριστεί η συνολική μάζα για κάθε στοιχείο (element). Για να γίνει αυτό εφικτό, ορίστηκε το βάρος για κάθε στοιχείο i στο οποίο διακριτοποιείται το πτερόγιο της NREL ως:

$$w_i = \frac{1}{2} |m_i - m_{i-1}| (y_i - y_{i-1}) \quad (12)$$

Με συνολικό βάρος :

$$W_{blade NRel} = \sum_2^{28} w_i = 17740kg \quad (13)$$

Για τον υπολογισμό των w_i της E-82 θα έχουμε:

$$w_{i E-82} = w_{i NRel} \frac{W_{blade NRel}}{W_{blade E-82}} \quad (14)$$

Με,

$$W_{blade E-82} = \sum_2^{28} w_{i E-82} = 7667kg \quad (15)$$

Ως scale factor το βάρος και τον επιμερισμό του βάρους για τα πτερόγια της E-82 ορίστηκε ως:

$$BNSF = \frac{W_{blade E-82}}{W_{blade NRel}} \frac{1}{\frac{Y_{E-82}}{Y_{NRel}}} = 0.685 \quad (16)$$

BNSF= Blade's Node Scale Factor

Επομένως το βάρος m σε κάθε στοιχείο (element) ορίζεται ως:

$$m_{i E-82} = BNSF * m_{i NREL} \quad (17)$$

Επιπλέον ισχύει ο τύπος:

$$w_i = \frac{1}{2} |m_i - m_{i-1}| (y_i - y_{i-1}) \quad (18)$$

Για τον υπολογισμό του κέντρου βάρους του κάθε κόμβου πολλαπλασιάζουμε τη θέση σε X και Z με το λόγο μηκών των πτερυγίων. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

$$x_{cm E-82} = x_{cm NREL} * \frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}} \quad (19)$$

και,

$$z_{cm E-82} = z_{cm NREL} * \frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}} \quad (20)$$

Υπολογισμός Ροπών αδρανείας:

Για τον υπολογισμό των ροπών αδρανείας επί τη μάζα του κόμβου χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τύποι:

$$m_{i,E-82} * I_{xx,i E-82} = m_{i,E-82} * \frac{m_{i,E-82} * I_{xx,i NREL}}{m_{i,NREL}} \quad (21)$$

$$m_{i,E-82} * I_{zz,i E-82} = m_{i,E-82} * \frac{m_{i,E-82} * I_{zz,i NREL}}{m_{i,NREL}} \quad (22)$$

$$m_{i,E-82} * I_{xz,i E-82} = m_{i,E-82} * \frac{m_{i,E-82} * I_{xz,i NREL}}{m_{i,NREL}} \quad (23)$$

Για τις επιφάνειες A των διατομών ισχύει το παρακάτω:

$$A_{i,E-82} = A_{i,NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}} \right)^2 \quad (24)$$

Οπότε για τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών έχουμε τα εξής:

$$EA_{i,E-82} = E * A_{i,NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}}\right)^2 \quad (25)$$

$$EI_{xx,i E-82} = E * I_{xx,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}}\right)^4 \quad (26)$$

$$EI_{zz,i E-82} = E * I_{zz,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}}\right)^4 \quad (27)$$

$$EI_{xz,i E-82} = E * I_{xz,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}}\right)^4 \quad (28)$$

$$GI_{t,i E-82} = G * I_{t,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}}\right)^4 \quad (29)$$

$$GA_{x,i E-82} = G * A_{x,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}}\right)^2 \quad (30)$$

$$GA_{z,i E-82} = G * A_{z,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}}\right)^2 \quad (31)$$

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων της Enercon E-82.

4.4. Άξονας

Ο υπολογισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του άξονα (Shaft), έγινε επίσης με χρήση της μεθόδου του Scale Factor. Σε αντίθεση με τον πύργο εδώ δεν υπήρχαν επαρκή στοιχεία για τον απευθείας υπολογισμό.

Ως συνολικό μήκος άξονα επιλέχθηκε αυτό των 2,5m. Το παρόν νούμερο επιλέχθηκε προσεγγιστικά, γνωρίζοντας ότι η Enercon E-82 είναι ήδη μικρότερη από την NREL, καθώς επίσης και ότι εφαρμόζει τεχνολογία Direct Drive, πράγμα που της δίνει ακόμη μικρότερο μήκος άξονα, λόγω έλλειψης κιβωτίου ταχυτήτων.

Αντίστοιχα με πριν, το βάρος m σε κάθε στοιχείο (element) ορίζεται ως:

$$m_{i,E-82} = BNSF * m_{i,NREL} \quad (33)$$

Για τον υπολογισμό των ροπών αδρανείας επί τη μάζα του κόμβου χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τύποι:

$$m_{i,E-82} * I_{xx,i E-82} = m_{i,E-82} * \frac{m_{i,E-82} * I_{xx,i NREL}}{m_{i,NREL}} \quad (34)$$

$$m_{i,E-82} * I_{zz,i E-82} = m_{i,E-82} * \frac{m_{i,E-82} * I_{zz,i NREL}}{m_{i,NREL}} \quad (35)$$

$$m_{i,E-82} * I_{xz,i E-82} = m_{i,E-82} * \frac{m_{i,E-82} * I_{xz,i NREL}}{m_{i,NREL}} \quad (36)$$

Για τις επιφάνειες A των διατομών ισχύει το παρακάτω:

$$A_{i,E-82} = A_{i,NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}} \right)^2 \quad (36)$$

Οπότε για τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών έχουμε τα εξής:

$$EI_{xx,i E-82} = E * I_{xx,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}} \right)^4 \quad (37)$$

$$EI_{zz,i E-82} = E * I_{zz,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}} \right)^4 \quad (38)$$

$$EI_{xz,i E-82} = E * I_{xz,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}} \right)^4 \quad (39)$$

$$GI_{t,i E-82} = G * I_{t,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}} \right)^4 \quad (40)$$

$$GA_{x,i E-82} = G * A_{x,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}} \right)^2 \quad (41)$$

$$GA_{z,i E-82} = G * A_{z,i NREL} * \left(\frac{Y_{E-82}}{Y_{NREL}} \right)^2 \quad (42)$$

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων της Enercon E-82.

5. Βαθμονόμηση Ελεγκτή

Θεωρήθηκε κλασσικό σύστημα ελέγχου ισχύος στροφών με χρήση μεταβλητών στροφών για ταχύτητες κάτω της ονομαστικής και μεταβλητού βήματος για τη ρύθμιση ισχύος. Βαθμονομήθηκαν κατάλληλα οι σταθερές του ελεγκτή βήματος που βασίζετε σε έλεγχο PI. Για την εύρεση των τιμών των κερδών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Ziegler-Nichols. Στη συνέχεια με βάση τη τιμή που βρέθηκε έγιναν διάφορες δοκιμές για παρόμοιες τιμές κερδών, κρατώντας πάντα τον ίδιο λόγο διαφορών των κερδών. Αυτό, με σκοπό να γίνει μία βελτιστοποίηση στη λειτουργία του ελεγκτή [Bossanyi E. A. CONTROL ALGORITHM FOR THE 2MW and 5MW TURBINES [Report]. - 2002.],[1].

5.1. Μεθοδολογία Εύρεσης τιμής

Η Ziegler-Nichols αποτελεί μία μέθοδο συντονισμού ενός ελεγκτή PID. Αναπτύχθηκε από τους John G. Ziegler και Nathaniel B. Nichols. Στη διαδικασία βαθμονόμησης αρχικά ρυθμίζονται τα κέρδη I και P στο μηδέν. Παράλληλα επιλέγονται διάφορες τιμές για το κέρδος P ξεκινώντας από το μηδέν, μέχρις ότου επιτευχθεί το κέρδος K_u για το οποίο το σύστημα γίνεται ασταθές. Στο σημείο αυτό η ταλάντωση του συστήματος θεωρείται σταθερή και συνεχής. Το κέρδος K_u και η περίοδος T_u χρησιμοποιούνται, για να ρυθμιστούν εκ νέου τα κέρδη P, I και D.

Ο παρακάτω πίνακας θέτει εν συντομία τις σχέσεις μεταξύ των κερδών P, I και D σε σχέση με τα K_u και T_u .

Τύπος Ελεγκτή	K_p	T_i	T_d	K_i	K_d
P	$0.5K_u$	-	-	-	-
PI	$0.45K_u$	$0.80T_u$	-	$0.54K_u/T_u$	-
PD	$0.8K_u$	-	$0.125T_u$	-	$0.10K_uT_u$
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$	$1.2K_u/T_u$	$0.075K_uT_u$

Πίνακας 5.1.1 Τιμές κερδών για διάφορους τύπους Ελεγκτή κατά Ziegler Nichols

5.2. Υπολογισμός K_u , T_u

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο ελεγκτής στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ο PI. Οι αρχικές τιμές του K_i και K_p βασίστηκαν σε τιμές υπάρχοντος controller. Πιο συγκεκριμένα είχαμε:

K_i	1.524
K_p	4.56

Πίνακας 5.2.1 Υπολογισμός Κερδών Ελεγκτή

Με βάση τις παραπάνω τιμές, μηδενίστηκε το K_i και ορίστηκε:

$$K_u = \sigma_i * K_p \quad (43)$$

Το σ_i , είναι ουσιαστικά ένας συντελεστής ως προς το K_p . Ο παρακάτω πίνακας αποτυπώνει τις περιπτώσεις του σ , ή αλλιώς του K_u που δοκιμάστηκαν, μέχρι να επιλεγεί το τελικό K_u .

σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8	σ_9	σ_{10}
3	5	7	9	11	13	14	14.5	15	15.5

Πίνακας 5.2.2 Τιμές συντελεστών Κέρδους K_i

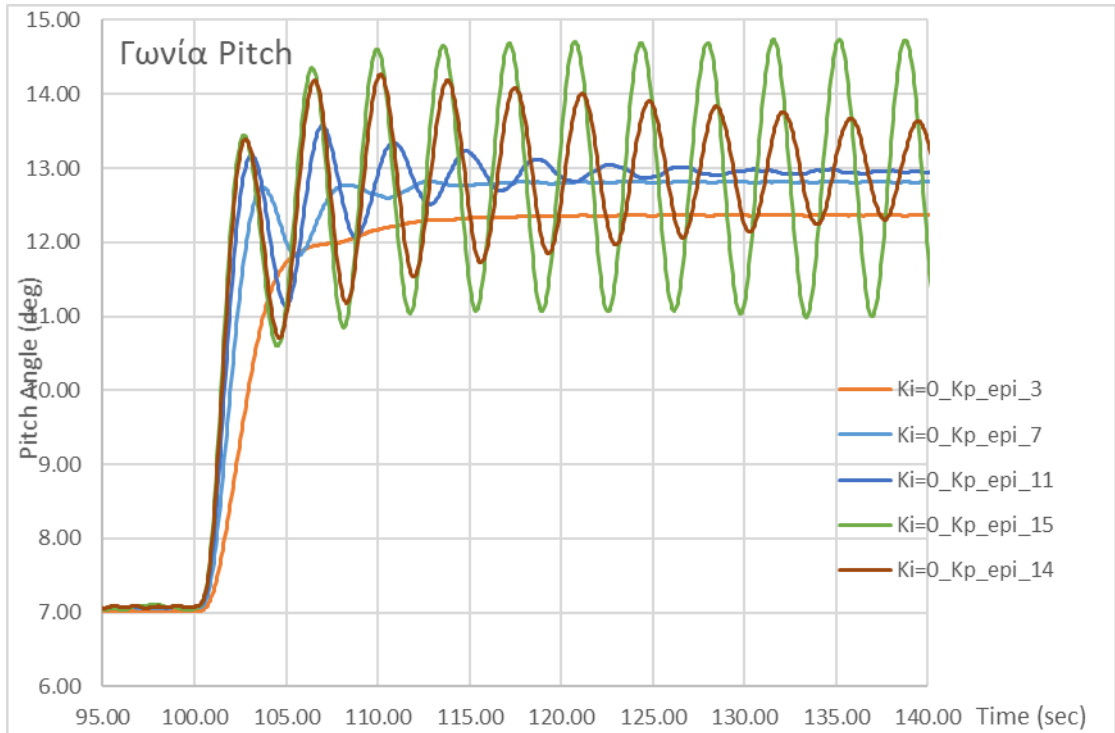
Οι τιμές του K_u ξεκίνησαν να αυξάνονται σταδιακά, μέχρις ότου άρχισε να διαφαίνεται η ασταθής λειτουργία με περίοδο αστάθειας T_u . Ο παρακάτω πίνακας αποτυπώνει την απόκριση του Controller στο κομμάτι ρύθμισης της γωνίας Pitch των πτερυγίων

Ο υπολογισμός των K_u και T_u έγινε για ταχύτητα ανέμου από 12m/s σε 14m/s, ορίζοντας ένα Wind Scenario. Πιο συγκεκριμένα στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η χρονική μετάβαση από τη μία ταχύτητα στην άλλη.

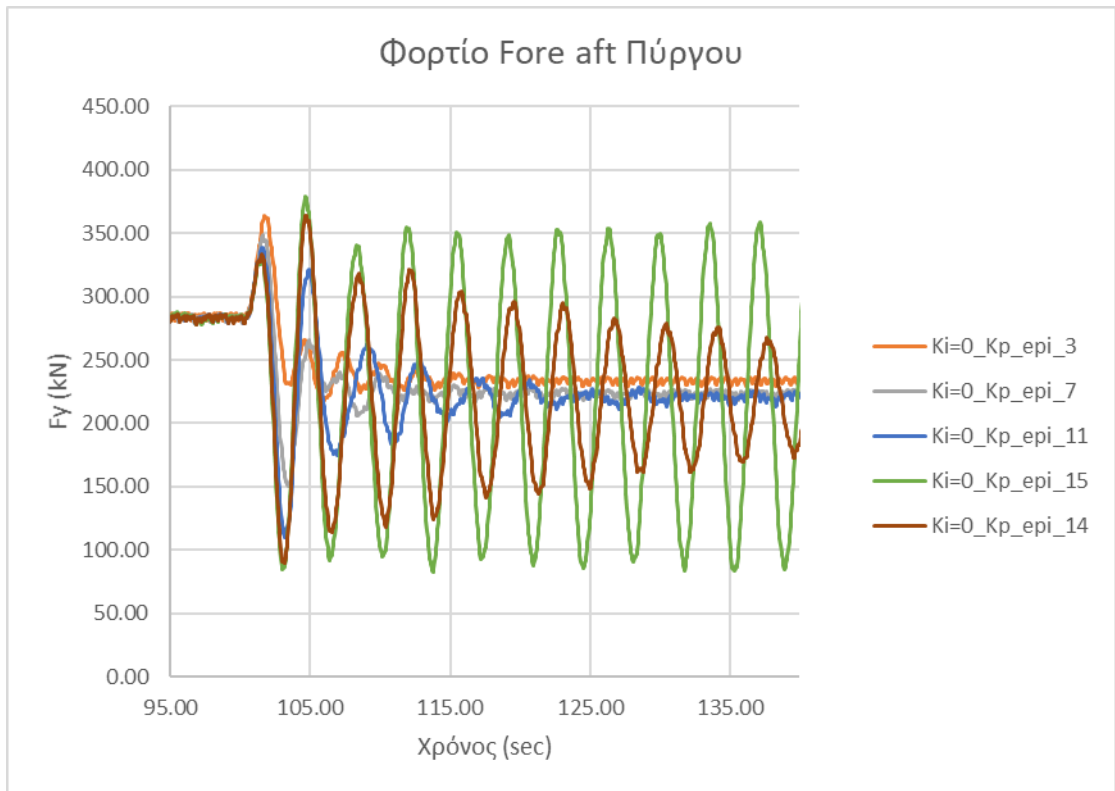
Βήματα	0	1	2	3
T	0sec	100sec	101sec	150sec
V	12m/s	12m/s	14m/s	14m/s

Πίνακας 5.2.3 Τιμές ταχυτήτων για διαφορετικά χρονικά βήματα

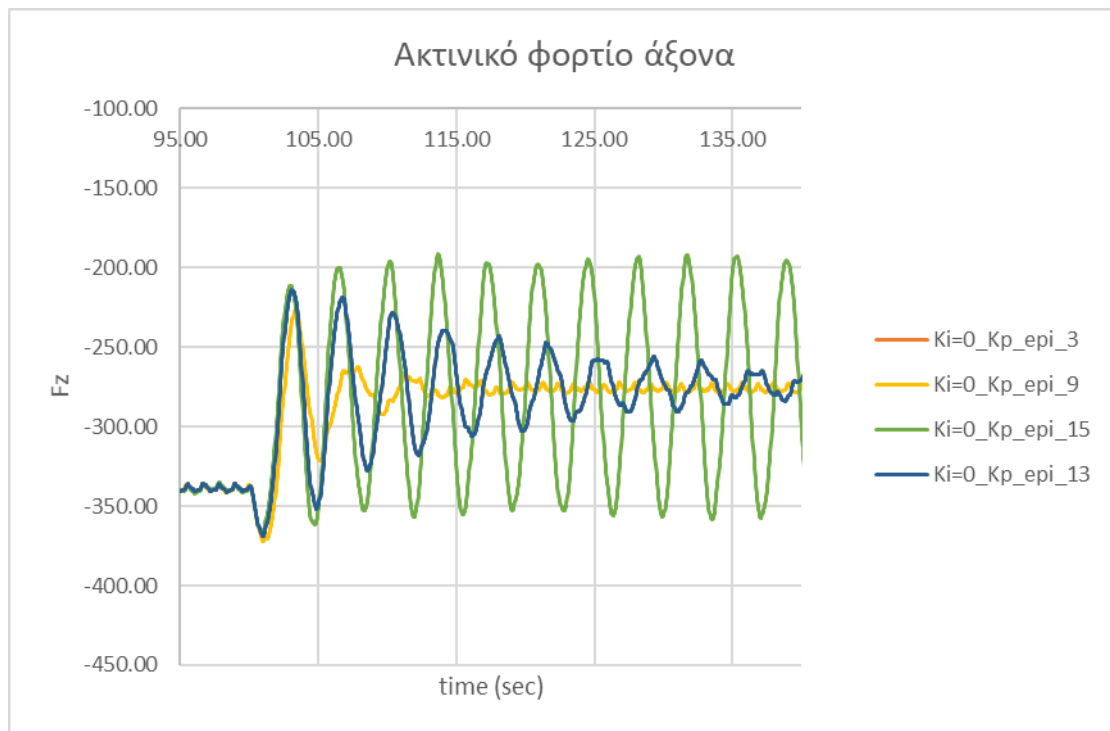
Για την εύρεση του K_u επιλέχθηκε η απόκριση της γωνίας του Βήματος (Pitch angle) σε συνδυασμό με τα φορτία στον άξονα λόγω αλλαγής της γωνίας πρόνευσης, καθώς επίσης και την απόκριση στα φορτία του πύργου. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε την απόκλιση του Pitch από τη χρονική στιγμή και μετά που αλλάζει η ταχύτητα ανέμου από τα 12 στα 14m/s.



Εικόνα 5.2.1 Απόκριση Γωνίας Pitch για διαφορετικές τιμές συντελεστή σ για το K_i



Εικόνα 5.2.2 Απόκριση του Φορτίου Fore aft του Πύργου για διαφορετικές τιμές συντελεστή σ για το K_i



Εικόνα 5.2.3 Απόκριση ακτινικού φορτίου F_z του άξονα για διαφορετικές τιμές συντελεστή σ_i για το K_i

Είναι φανερό ότι για $\sigma_i=15$ η ταλάντωση είναι σταθερή.

Ο υπολογισμός της περιόδου T_u έγινε με βάση την απόκριση του Pitch Angle. Πιο συγκεκριμένα υπολογίστηκε στα 3,6sec. Ο Πύργος υπολογίστηκε και αυτό, σαν μέτρο επαλήθευσης στα 3,7sec. Τέλος η απόλυτη τιμή του K_u χωρίς τον συντελεστή σ_i υπολογίστηκε ίση με $K_u=68.4$

5.3. Υπολογισμός K_P , K_I

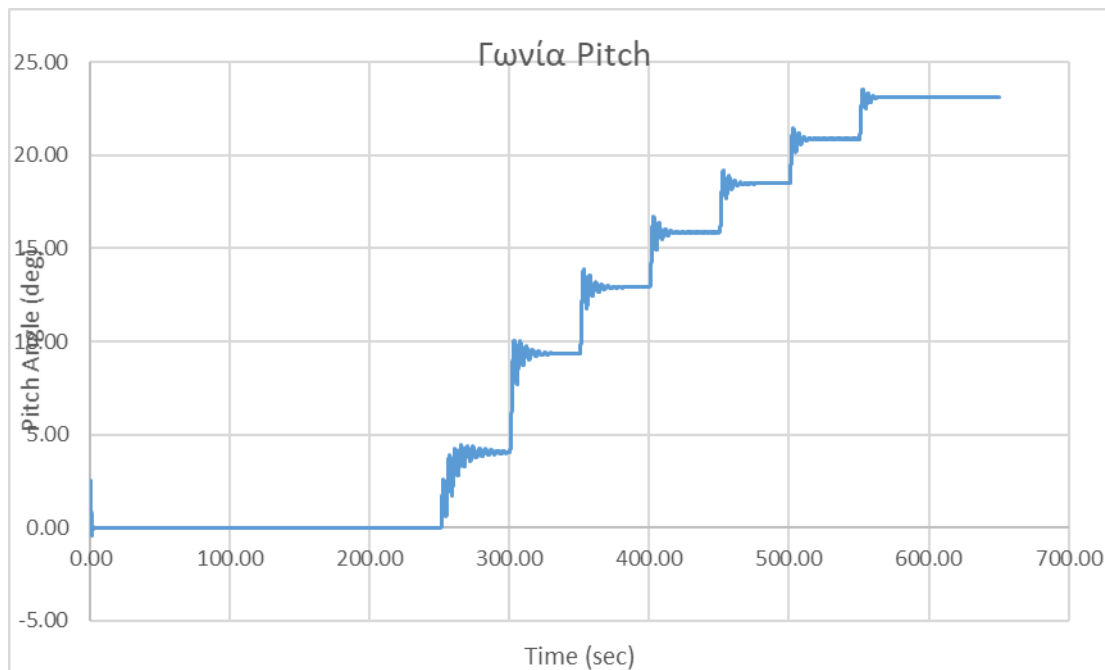
Με βάση τη τιμή του σ_i υπολογίστηκαν τα K_I και K_P . Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές υπολογισμού, τόσο με τον συντελεστή σ_i , όσο και με την απόλυτη τιμή των μεγεθών αυτών.

Είδος Ελεγκτή: PI	K_P	T_i	T_D	K_I	D_D
PI με συντελεστή σ_i	9	1.8	0	5	16.2
PI χωρίς συντελεστή σ_i	41.04	1.8	0.45	22.8	73.872

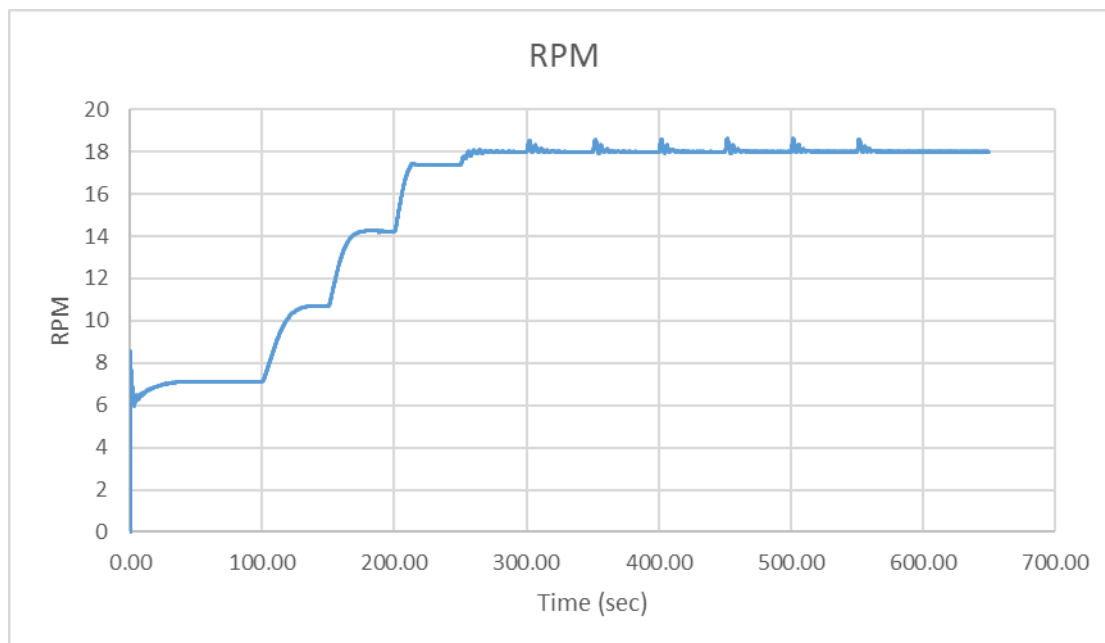
Πίνακας 5.3.1 Υπολογισμένες τιμές κερδών K_i και K_p

5.4. Βηματική αλλαγή ταχύτητας

Στην ενότητα αυτή θα δούμε την απόκριση του Controller σε πολλαπλές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, με βάση την εύρεση των K_p και K_i . Στόχος αυτού, είναι να δούμε την συνολική λειτουργία του controller από την ταχύτητα των 4m/s μέχρι των 24m/s, χρησιμοποιώντας την επιλογή του defined wind scenario. Όπως και πριν το πρώτο βήμα θα είναι για 100sec, προκειμένου να αποφευχθούν οποιεσδήποτε παρεμβολές λόγω της έναρξης λειτουργίας από κατάσταση ηρεμίας.



Εικόνα 5.4.1 Γωνία Pitch για διαδοχικές ταχύτητες ανέμου



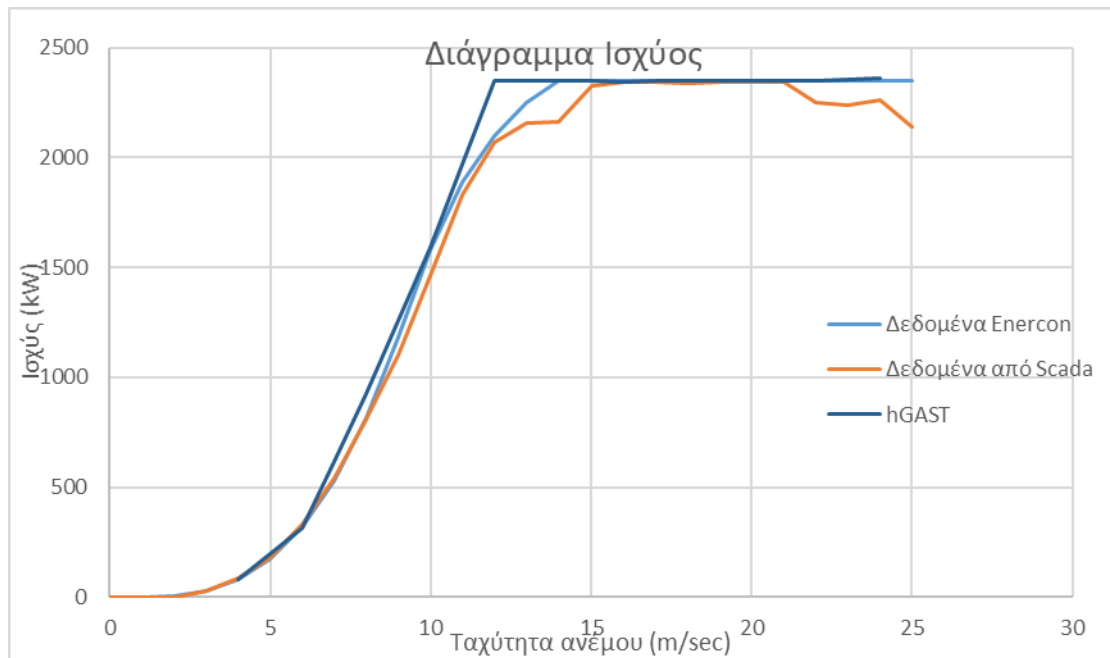
Εικόνα 5.4.2 Απόκριση RPM για διαδοχικές ταχύτητες ανέμου

5.5. Απόδοση Ανεμογεννήτριας

Με βάση τα στοιχεία που εξήχθησαν από τα τρεξίματα αυτά, έγινε έλεγχος της απόδοσης της Ανεμογεννήτριας σε σύγκριση τόσο με τα δεδομένα παραγωγής ισχύος του κατασκευαστή, όσο και από τα δεδομένα Scada της ανεμογεννήτριας.

Ταχύτητα Ανέμου	Ισχύς Enercon (kW)	Ισχύς Scada (kW)	Ισχύς hGast (kW)	Γωνία Βήματος Scada (deg)	Γωνία Βήματος hGast (deg)
0	0	0	-	-	0
1	0	0	-	55.75	2.5
2	3	1	-	13.91	2.5
3	25	28	-	6.69	2.5
4	82	84	106.54	4.68	2.5
5	174	182	226.48	3.79	2.5
6	321	332	346.42	3.80	2.5
7	532	541	589.65	3.72	2.5
8	815	811	832.89	2.80	2.5
9	1180	1098	1228.07	3.64	2.5
10	1580	1461	1623.25	4.35	2.5
11	2100	1831	1985.07	3.99	4.89
12	2250	2067	2346.89	3.64	7.27
13	2350	2156	2347.30	9.14	10.29
14	2350	2164	2347.71	11.61	13.3
15	2350	2323	2347.46	15.68	15.13
16	2350	2341	2347.22	15.40	16.95
17	2350	2341	2347.52	16.83	18.44
18	2350	2340	2347.82	18.73	19.92
19	2350	2342	2347.48	20.18	21.23
20	2350	2345	2348.48	21.25	22.54
21	2350	2345	2349.13	22.32	23.74
22	2350	2353	2349.56	24.35	24.94
23	2350	2236	2350.14	25.74	26.06
24	2350	2264	23.50.29	27.19	27.18

Πίνακας 5.5.1 Επαλήθευση αποτελεσμάτων απόδοσης με πραγματικά και θεωρητικά δεδομένα

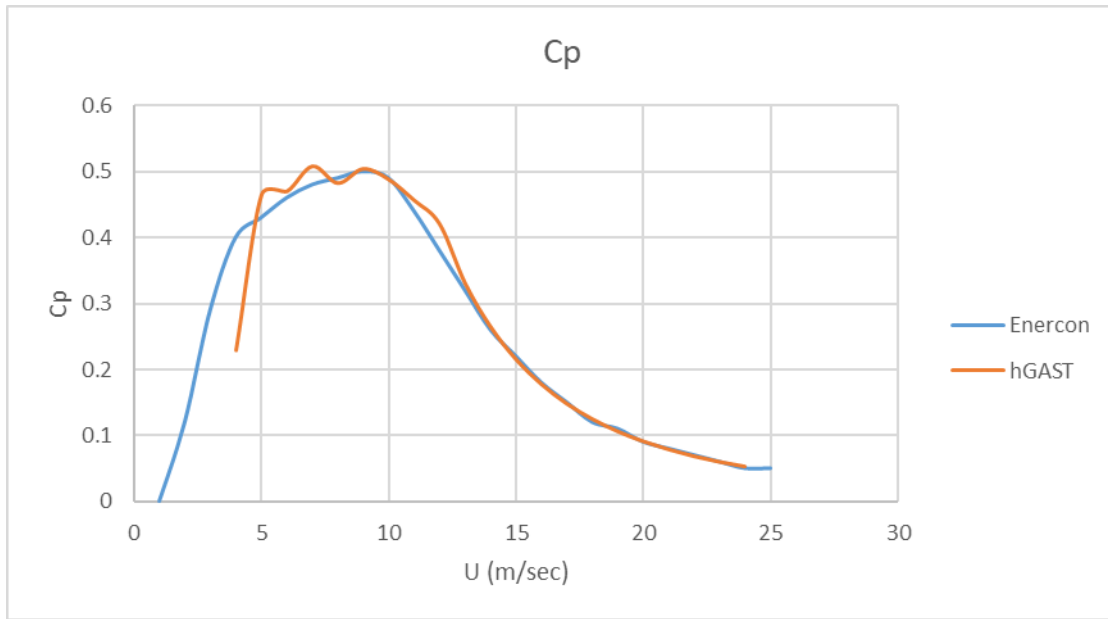


Εικόνα 5.5.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων hGAST

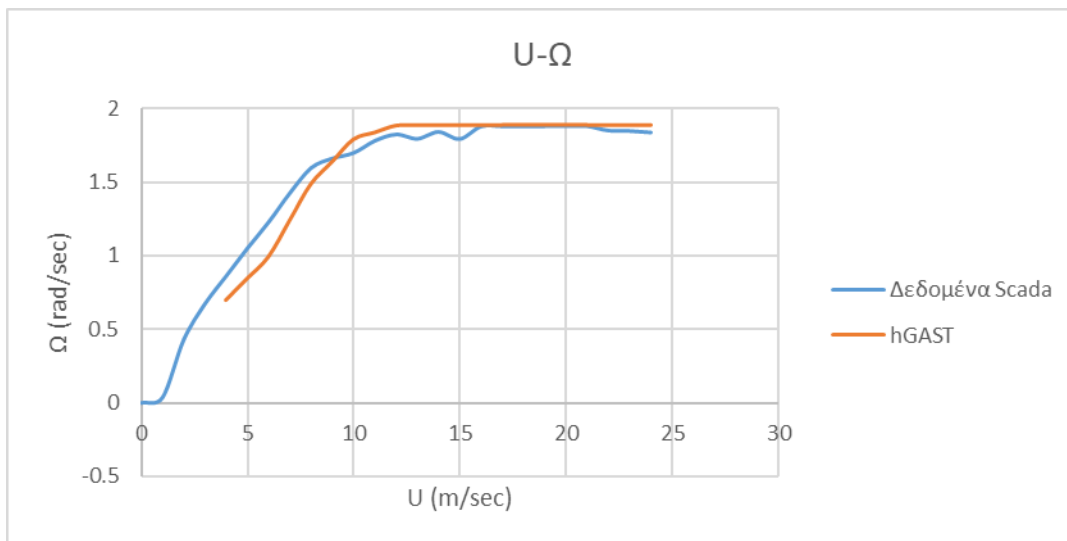
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα RPM της Ανεμογεννήτριας σε σχέση με τον μέσο όσο των τιμών του Scada για τις δεδομένες ταχύτητες ανέμου. Ο υπολογισμός των RPM γίνεται μέσα στο hGAST.

Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Scada RPM	hGast RPM with steps
0	0	-
1	0.35	-
2	4.10	-
3	6.435	-
4	8.25	6.69
5	10.06	8.09
6	11.76	9.49
7	13.65	11.85
8	15.29	14.20
9	15.90	15.65
10	16.26	17.09
11	17.05	17.54
12	17.46	17.99
13	17.18	18.01
14	17.63	18.03
15	17.16	18.02
16	17.98	18.02
17	17.99	18.03
18	17.99	18.04
19	18.00	18.04
20	18.00	18.04
21	18.00	18.03
22	17.71	18.02
23	17.68	18.02
24	17.59	18.02

Πίνακας 5.5.2 Σύγκριση RPM hGAST με SCADA



Πίνακας 5.5.3 Διάγραμμα συντελεστή ισχύος σε σύγκριση με του κατασκευαστή



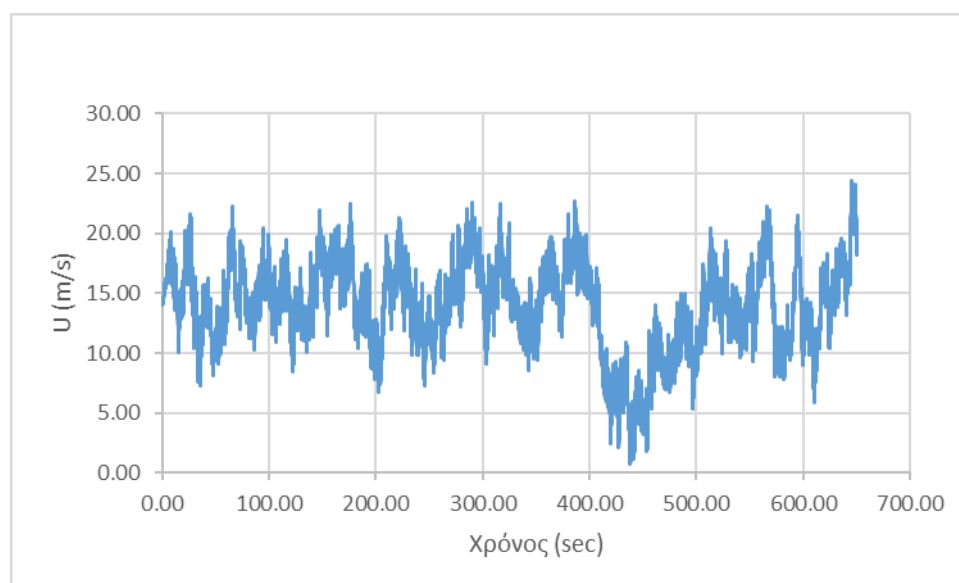
Εικόνα 5.5.2 Διάγραμμα Περιστροφικής ταχύτητας-Ταχύτητας ανέμου

6. Ανάλυση Αβεβαιότητας Πρόβλεψης Φορτίων

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε την ανάλυση αβεβαιότητας πρόβλεψης φορτίων. Πιο συγκεκριμένα επιλέγονται δύο μεταβλητές. Η μία αφορά στην τιμή του Κέρδους K_i του ελεγκτή (Controller) και η άλλη αφορά την ιδιοσυχνότητα του πύργου η οποία μεταβάλλεται μέσα από τη μεταβολή του πάχους του πύργου. Για την εξέταση της αβεβαιότητας πρόβλεψης φορτίων εξετάζονται 20 διαφορετικές τυχαίες μεταβλητές, οι οποίες επιλέγονται από γεννήτρια τυχαίων αριθμών και ακολουθούν κανονική κατανομή, έχοντας ορίσει πρώτα το εύρος διακύμανσης και την τυπική απόκλιση τους, καθώς επίσης και την μέση τιμή. Η κάθε τυχαία μεταβλητή αντιστοιχεί σε 24 διαφορετικούς τυρβώδεις ανέμους. Η ταχύτητα ανέμου για την οποία εξετάζονται είναι αυτή των 14m/s.. Στη συνέχεια για κάθε μία από τις 20 διαφορετικές τυχαίες μεταβλητές γίνονται τρεξίματα για 24 χρονοσειρές διαφορετικών τυχαίων πάλι τυρβωδών ανέμων. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται εξαγωγή των αποτελεσμάτων, υπολογίζοντας τα μέγιστα φορτία με πιθανότητα εμφάνισης μια φορά στα 50 έτη. Η κατανομή πιθανότητας που χρησιμοποιήθηκε είναι η Weibull είτε 2 παραμέτρων, είτε 3 παραμέτρων [Panagiotis N Schinas, Dimitris I Manolas, Vasilis A Riziotis, Theodore P Philippidis and Spyros G Voutsinas Statistical extrapolation methods for estimating extreme loads on wind turbine blades under turbulent wind conditions and stochastic material properties [Report]. - 2020.][12],[Kim Branner Y.s Choo, Jerzy Czujko, Masahiko Fujikubo COMMITTEE III.1 Ultimate Strength [Report]. - 2009.][8]

6.1. Επιλογή ταχύτητας ανέμου

Για την επιλογή της ταχύτητας του ανέμου που θα γίνει η μελέτη εξετάστηκαν 3 περιπτώσεις ανέμου. 14, 16 και 18m/s. Εξετάστηκε μία 10λεπτη χρονοσειρά για κάθε ταχύτητα ανέμου. Για κάθε μία χρονοσειρά υπολογίστηκε η μέγιστη ροπή πτερύγισης (flap wise) και επιλέχθηκε η ταχύτητα ανέμου με τη μέγιστη ροπή πτερύγισης. Πιο συγκεκριμένα αυτή των 14m/s. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ενδεικτικά χρονοσειρά με τυρβώδη άνεμο για τα 14m/s



Εικόνα 6.1.1 Ενδεικτικό διάγραμμα χρονοσειράς με τυρβώδη άνεμο

6.2. Δημιουργία μεταβλητών προς εξέταση

Για κάθε είδος μεταβλητής που πρόκειται να εξεταστεί (πχ Κέρδος K_i), ορίζονται τα όρια τιμών τα οποία θα εξεταστούν. Αντίστοιχα ορίζεται η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και το διάστημα εμπιστοσύνης. Στη συνέχεια το διάστημα εμπιστοσύνης διακριτοποιείται, ορίζοντας την αθροιστική πιθανότητα κάθε φορά της εκάστοτε μεταβλητής. Μέσα από μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών από το μηδέν μέχρι το ένα γίνεται αντιστοίχισή με την αθροιστική πιθανότητα των εκάστοτε διακριτοποιημένων μεταβλητών. Τέλος γίνεται αντιστοίχιση με χρήση της γραμμικής παρεμβολής για το ποια μεταβλητή ισοδύναμή με την αθροιστική πιθανότητα της γεννήτριας τυχαίων αριθμών.

6.3. Μεθοδολογία στατιστικής ανάλυσης αποτελεσμάτων

Η κάθε χρονοσειρά αποτελείται συνολικά από 650sec. Τα πρώτα 50 δευτερόλεπτα κάθε χρονοσειράς αποκόπτονται γιατί αντιστοιχούν στη διάρκεια ομαλοποίησης των μεταβλητών ταλαντώσεων. Στη συνέχεια αφού κρατηθούν τα τελευταία 600 δευτερόλεπτα γίνεται εφαρμογή στατιστικών μεθόδων αναγωγής των φορτίων και μετατοπίσεων σε επίπεδο 50 ετών. Τα αποτελέσματα των χρονοσειρών που θα μελετηθούν αφορούν τις side και fore aft ροπές του πύργου. Τη flap wise και edge wise ροπή των πτερυγίων, καθώς επίσης και τη μετατόπιση των πτερυγίων στη διεύθυνση πτερύγισης. Ως μέθοδο εύρεσης μεγίστων τιμών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος τοπικών μεγίστων (Peak over threshold). Με τη μέθοδο αυτή βρίσκουμε τη μέση τιμή (πχ των εκάστοτε φορτίων) και την προσθέτουμε με το 1.4 της τυπικής απόκλισης. Παράλληλα εφαρμόζεται φίλτρο ώστε να μη συσσωρευτούν τοπικά μέγιστα στην ίδια περιοχή. Για την αντιστοίχιση των μεγίστων χρησιμοποιήθηκε η κατανομή Weibull 2 και 3 παραμέτρων, καθώς επίσης γίνεται σύγκριση και με την Logarithmic Normal κατανομή [Panagiotis N Schinas, Dimitris I Manolas, Vasilis A Riziotis, Theodore P Philippidis and Spyros G Voutsinas Statistical extrapolation methods for estimating extreme loads on wind turbine blades under turbulent wind conditions and stochastic material properties [Report]. - 2020.],[12].

Για τη Logarithmic Normal κατανομή έχουμε:

$$F(x) = \Phi(\ln x - m/\sigma), \quad \Phi(x) = \frac{1}{2} [\operatorname{erf}(x/\sigma) + 1], \operatorname{erf}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (44)$$

Για την Weibull 2 και 3 παραμέτρων θα έχουμε:

$$2 - \text{parameter Weibull distribution (2pW): } F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (45)$$

$$3 - \text{parameter Weibull distribution (epW): } F(x) = 1 - e^{-((x-\varepsilon)/\lambda)^k} \quad (46)$$

Στις εξισώσεις (44),(45) και (46) τα m και σ εκφράζουν τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση, η $\Phi(x)$, την τυπική κανονική κατανομή, το $\text{erf}(x)$ τη συνάρτηση του σφάλματος. Τα κ , λ , ε αποτελούν τις παραμέτρους της Weibull κατανομής. Οι παράμετροι των κατανομών LN (Logarithmic Normal) και Weibull 2 παραμέτρων (2pW) καθορίζονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εκτίμησης της μέγιστης πιθανότητας. Οι παράμετροι της Weibull 3 παραμέτρων (3pW) χρησιμοποιούν τη μέθοδο των ροπών.

Για δεδομένη ταχύτητα ανέμου U και συγκεκριμένο χρόνο παρατήρησης T , η πιθανότητα το μέγιστο φορτίο F_{ext} να υπερβεί ένα δοσμένο φορτίο F (IEC 61400-1,2005:78) δίνεται από την εξίσωση (47)

$$\text{Prob}(F_{\text{ext}} \geq F; U, T) = 1 - (F_{\text{max}}(F; U))^{E(n; U, T)} \quad (47)$$

Όπου $F_{\text{max}}(F; U)$ είναι η βραχυπρόθεσμη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας των τοπικών μεγίστων για τη διαδικασία φόρτωσης. Ο εκθέτης $E(n; U, T)$ είναι ο αναμενόμενος αριθμός τοπικών μεγίστων στη χρονική περίοδο παρατήρησης T για μέση ταχύτητα U .

Στη συνέχεια, προκειμένου να ελεγχθεί αν η κατανομή των μεταβλητών είναι συμβατή με την κανονική εφαρμόζεται το τεστ Kolmogorov-Smirnov. Το τεστ πραγματοποιείται με επίπεδο βεβαιότητας $\alpha=0.05$. Η δοκιμή K-S είναι μία μη παραμετρική δοκιμή, ενώ οι στατιστικές της ποσοτικοποιούν την απόσταση μεταξύ της εμπειρικής κατανομής των δειγμάτων και του CDF, της κατανομής αναφοράς. Σε αυτή τη σύνδεση χρησιμοποιούνται οι τιμές p και h . Το παρατηρούμενο επίπεδο σημασίας p , ορίζεται ως το μικρότερο επίπεδο σημασίας που θα οδηγούσε σε απόρριψη της ‘μηδενικής υπόθεσης’ για δεδομένα τα οποία καθορίζουν εάν το δείγμα ακολουθεί την υποτιθέμενη κατανομή. Η μεταβλητή h ορίζεται ως μεταβλητή ‘απόφασης’ για τη «μηδενική υπόθεση» ότι τα δεδομένα προέρχονται από την υποτιθέμενη διανομή, έναντι της εναλλακτικής που δεν το κάνει. Εάν το τεστ απορρίψει το μηδέν στο επίπεδο σημασίας του 5% τότε $h=1$. Τιμές του P μεγαλύτερες από 0.05 και τιμές του h με μηδέν υποδηλώνουν ότι η επιλεγμένη CDF ταιριάζει στα δεδομένα που συλλέχθηκαν.

Παράλληλα υπολογίζεται η μακροπρόθεσμη απόκτηση σε επίπεδο λειτουργίας 50 ετών με διάστημα εμπιστοσύνης 5% και 95%. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται και πάλι με την μέθοδο POT, τόσο για 2pW, όσο και για 3pW, ανάλογα με την περίπτωση.

Η μακροπρόθεσμη πιθανότητα των μεγίστων φορτίων και μετατοπίσεων εξαρτάται από τη πιθανότητα εμφάνισής αυτών σε δεκάλεπτες χρονοσειρές. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μεγάλος αριθμός δεκάλεπτων αεροελαστικών τρεξιμάτων προκειμένου να κατασκευαστεί ένα επαρκές εμπειρικό μοντέλο, το οποίο να εμπεριέχει δεδομένα με το παραπάνω εύρος διακύμανσης. Δεδομένου του τεχνολογικού περιορισμού δημιουργίας όλων αυτών των χρονοσειρών που απαιτούνται, η αναγωγή των φορτίων σε επίπεδο 50-ετίας πραγματοποιείται με προσαρμοσμένα μοντέλα. Η ποιότητα των αξιολογήσεων σε μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα (50-ετίας) εξαρτάται από την πετυχημένη προσαρμογή του τελευταίου μέρους της κατανομής με την μικρότερη πυκνότητα πιθανότητας στο βραχυπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα. Από την πλευρά του το πρότυπο IEC 61400-1 (2005:78) εφαρμόζει την εκτίμηση για μακροπρόθεσμο χρονικό ορίζοντα ακραίων φορτίων, με βάση τις 10λεπτες χρονοσειρές σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας (ταχύτητες ανέμου)

$$P(F_{ext} \geq F; T) = \int_{V_{in}}^{V_{out}} P(F_{ext} \geq F; V, T) p(V) dV \quad (48)$$

Όπου, $P(F_{ext}; V, T)$ είναι η βραχυπρόθεσμη κατανομή πιθανότητας των εξαγόμενων ακραίων φορτίων. Η πιθανότητα εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου V στο ύψος της πλήμνης, καθώς επίσης και την περίοδο T . Η $P(V)$ αποτελεί τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου. Η κατανομή ακραίων φορτίων για δεδομένη περίοδο αναφοράς N ετών (50 έτη κατά το IEC 61400-1) εξάγεται μέσα από τις 10λεπτες χρονοσειρές. Τέλος ορίζεται ως:

$$P(F_{ext} < F; T = N) = 1 - (P(F_{ext} \geq F; V, T = 10min))^{(365 \cdot 24 \cdot 6 \cdot N)} \quad (49)$$

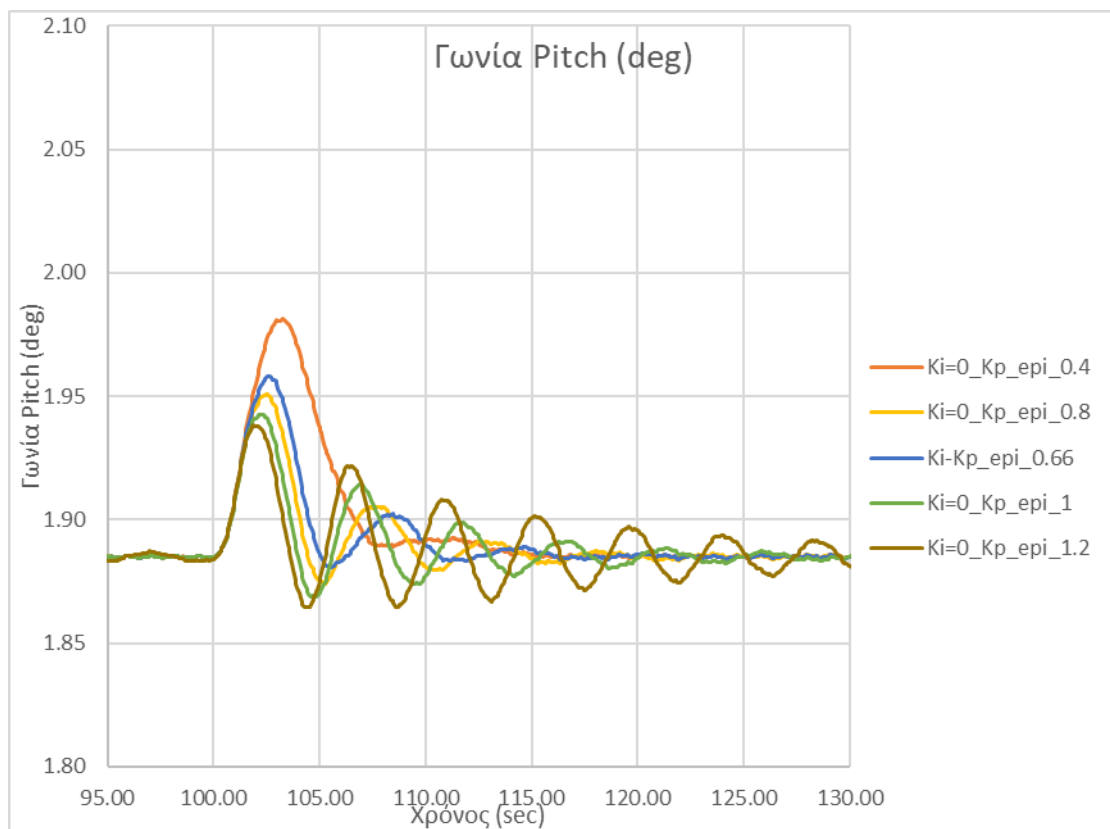
6.4. Ανάλυση αβεβαιότητας πρόβλεψης φορτίων τιμών Κέρδους K_i

Στο παρόν κομμάτι θα εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο βρέθηκαν οι τιμές του ελεγκτή μέσα από μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Οι τιμές αυτές είναι εντός των ορίων του εύρους που ορίστηκε.

6.4.1. Επιλογή Τιμών K_i

Για την επιλογή των τιμών K_i προς εξέταση πρώτο βήμα αποτελεί η επιλογή της μέσης τιμής. Με βάση την τιμή K_i όπως αυτή υπολογίστηκε από τη μέθοδο Ziegler-Nichols, υπήρξε επαναυπολογισμός της. Κριτήριο αποτέλεσε η επιλογή αυτής της τιμής, η οποία θα δίνει μία καλύτερη λειτουργία στον Ελεγκτή.

Με βάση την Εικόνα 6.4.1.1, θεωρήθηκε ότι η τιμή 0,66 της τιμής του K_i ως προς την τιμή υπολογισμού της Ziegler-Nichols είναι αυτή που λειτουργεί καλύτερα στον Ελεγκτή.

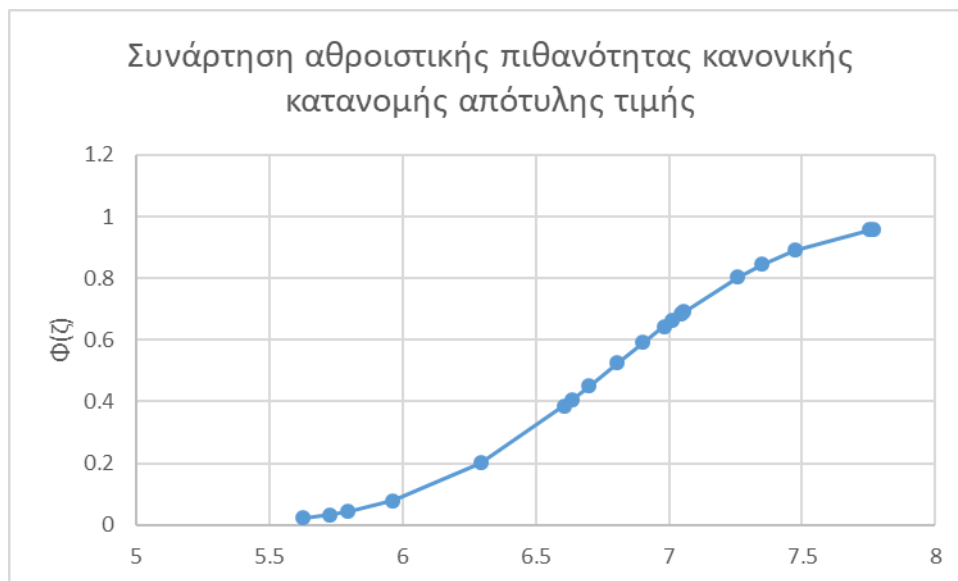


Εικόνα 6.4.1.1 Διάγραμμα γωνίας pitch για εύρος τιμών Κέρδους K_i

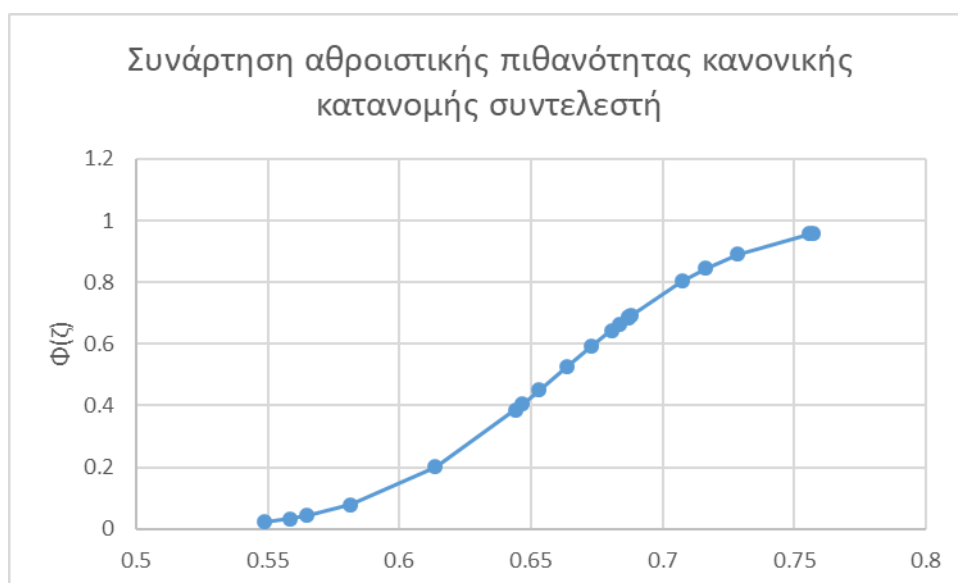
Με βάση αυτή την αδιάστατη τιμή του 0,66 θεωρήθηκε ότι οι τυχαίες 20 μεταβλητές συμπεριλαμβανομένης και του 0.66 θα πρέπει να βρίσκονται σε ένα εύρος με τυπική απόκλιση 0,055 ακολουθώντας κανονική κατανομή.

Μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών δημιούργησε 20 τιμές με αθροιστική πιθανότητα από 0 μέχρι το 1. Στη συνέχεια έγινε αντιστοίχιση των αθροιστικών πιθανοτήτων με τις τιμές του εύρους διακύμανσης όπως αυτό ορίστηκε. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκαν οι τιμές του Κέρδους K_i προς εξέταση.

Η Εικόνα 6.4.1.2 παρουσιάζει τις τιμές που προέκυψαν από τη γεννήτρια τυχαίων μεταβλητών τόσο ως προς την αρχική τιμή του 0,66 ως μέση τιμή, όσο και ως προς την πραγματική τιμή του K_i . Η Εικόνα 6.4.1.3 παρουσιάζει την μετατροπή των παραπάνω σε απόλυτη πραγματική τιμή.



Εικόνα 6.4.1.2 Διάγραμμα συνάρτησης πιθανότητας τιμών K_i



Εικόνα 6.4.1.3 Διάγραμμα συνάρτησης πιθανότητας συντελεστή K_i

6.4.2. Αποτελέσματα

Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι η διακύμανση των τιμών του Ελεγκτή Κ_i του Controller, παίζει πολύ μικρό ρόλο στην ανάλυση αβεβαιότητας πιθανότητας πρόβλεψης φορτίων. Η Weibull 2p ανταποκρίθηκε καλύτερα στην περίπτωση των flap wise μετατοπίσεων, και ροπών, καθώς επίσης και στη fore aft ροπή. Στην περίπτωση της πλευρικής ροπής (side side moment) καθώς επίσης και στην edge wise του πύργου χρησιμοποιήθηκε η Weibull 3p. Στην περίπτωση της edge side ροπής της πτέρυγας η ουρά των σημείων δεν ήταν σε θέση να ακολουθήσει την καμπύλη, χωρίς ωστόσο αυτό να σημαίνει ότι η μεγάλη πλειοψηφία των σημείων δεν ήταν στην καμπύλη επάνω.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τόσο τα στατιστικά αποτελέσματα της μεταβολής των τιμών του Κέρδους του Ελεγκτή, όσο και τα αποτελέσματα αυτών για τις ροπές και μετατοπίσεις της Ανεμογεννήτριας.

Ελεγκτής	Min τιμή	Max τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής Διακύμανσης COV(%)
Τιμές εισόδου συντελεστή σ _i	0,549	0,757	0.661	0,0616	9.3206%
Flap wise ροπή	3763(kNm)	3798(kNm)	3783(kNm)	10.953(kNm)	0.29%
Edge wise ροπή	2029(kNm)	2077(kNm)	2050(kNm)	11.9296(kNm)	0.5820%
Flap wise μετατόπιση	4,1725(m)	4,1996(m)	4,1808(m)	0.0065(m)	0.1564%
Side side ροπή	5972(kNm)	6243(kNm)	6105(kNm)	47.800(kNm)	0.7830%
Fore aft ροπή	35672(kNm)	36424(kNm)	36029(kNm)	229(kNm)	0.6358%

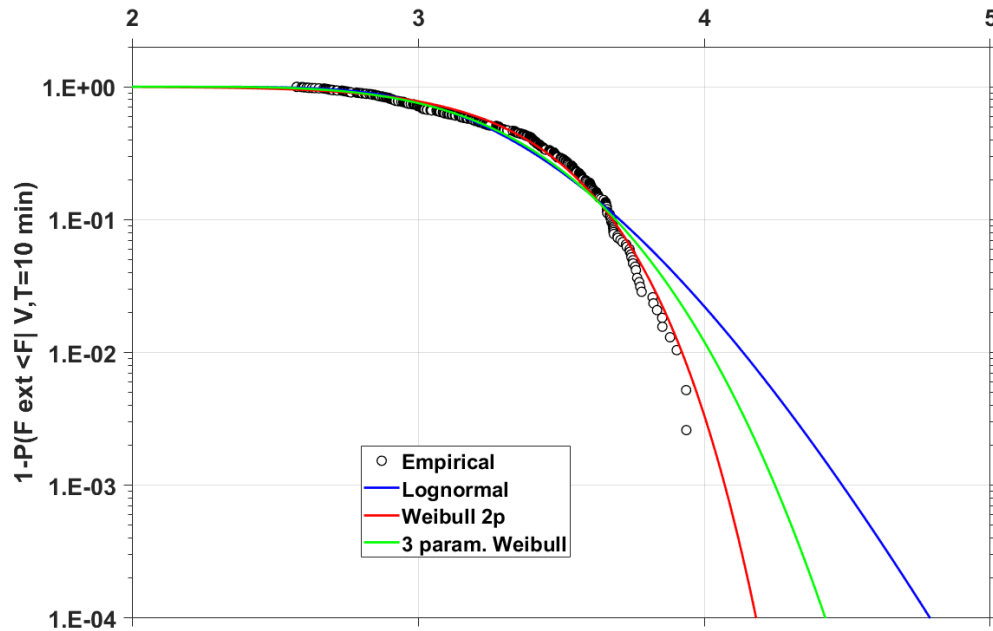
Πίνακας 6.4.2.1 Στατιστικά αποτελέσματα μεταβολών Κέρδους Κ_i

Επιγραμματικά αυτό που μπορούμε να πούμε είναι ότι για μία ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους Κ_i, επιφέρει μία πολύ μικρή διακύμανση σε επίπεδο 50ετίας. Επομένως σε επίπεδο προγραμματισμού του Ελεγκτή (Controller) δεν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στα φορτία της Ανεμογεννήτριας.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα μέσα από τη μορφή διαγραμμάτων τόσο τα συγκεντρωτικά με το μέγιστο φορτίο πιθανότητας 1E-4 (μία φορά τα 50 έτη), όσο και την σύγκριση της Weibull 2P και 3P, αλλά και τα όρια εμπιστοσύνης 5% και 95%

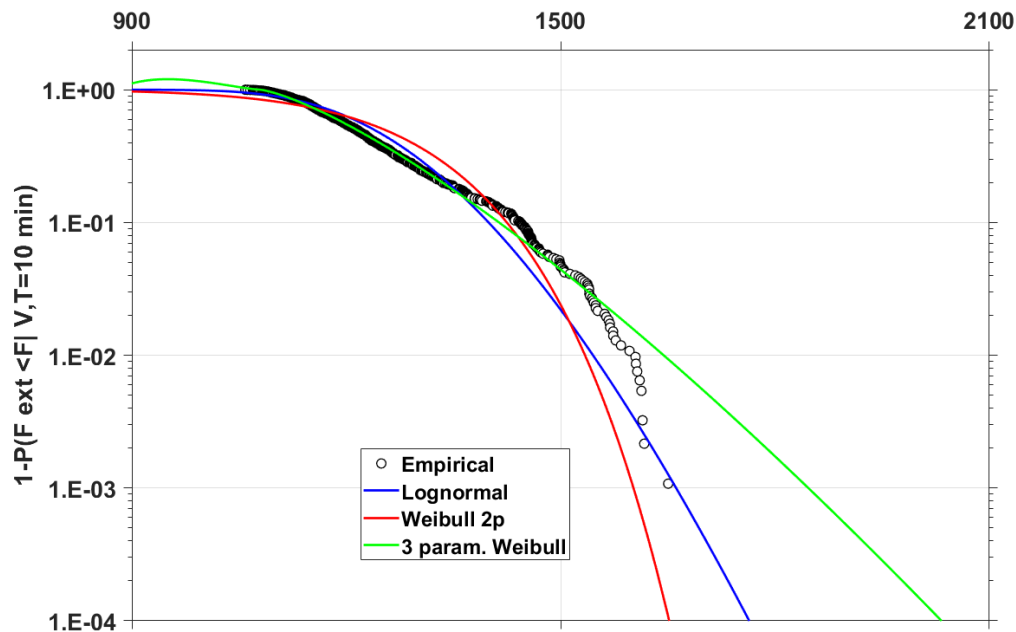
Ξεκινώντας από την Εικόνα 6.4.2.1 μέχρι και την Εικόνα 6.4.2.5 βλέπουμε τη σύγκριση μεταξύ Weibull 2P και 3P μαζί με την Log Normal για κάποια τυχαία τιμή του K_i κάθε φορά.

Short Term, Blade flap-wise deformation [m], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



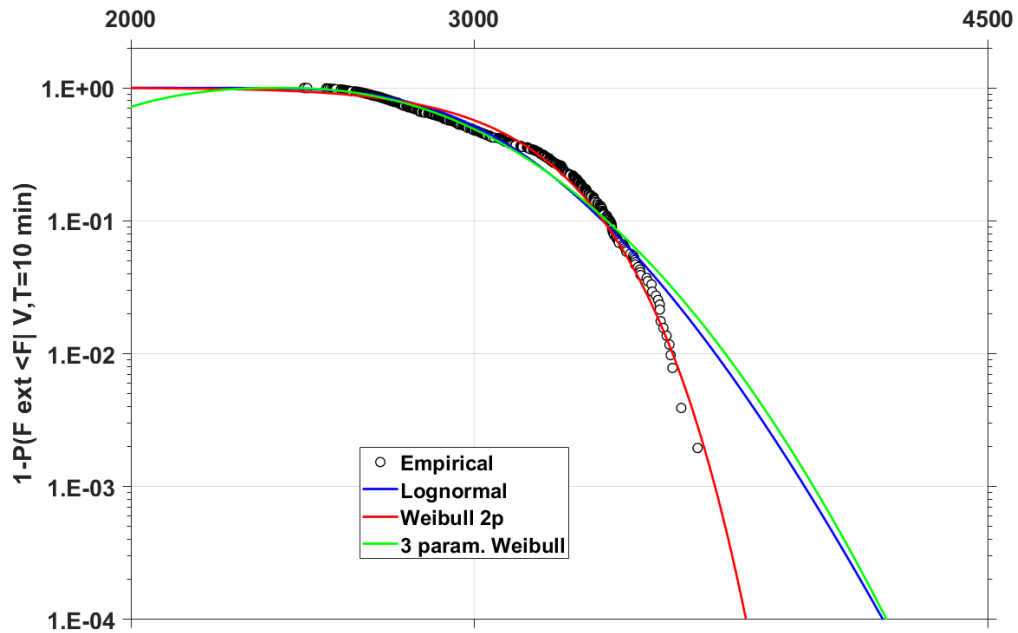
Εικόνα 6.4.2.1 Σύγκριση Weibull 2P, 3P και Log Normal σε σχέση με τα τοπικά μέγιστα για την flap wise μετατόπιση, $\sigma_i=0.707$

Short Term, Blade edge-wise moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



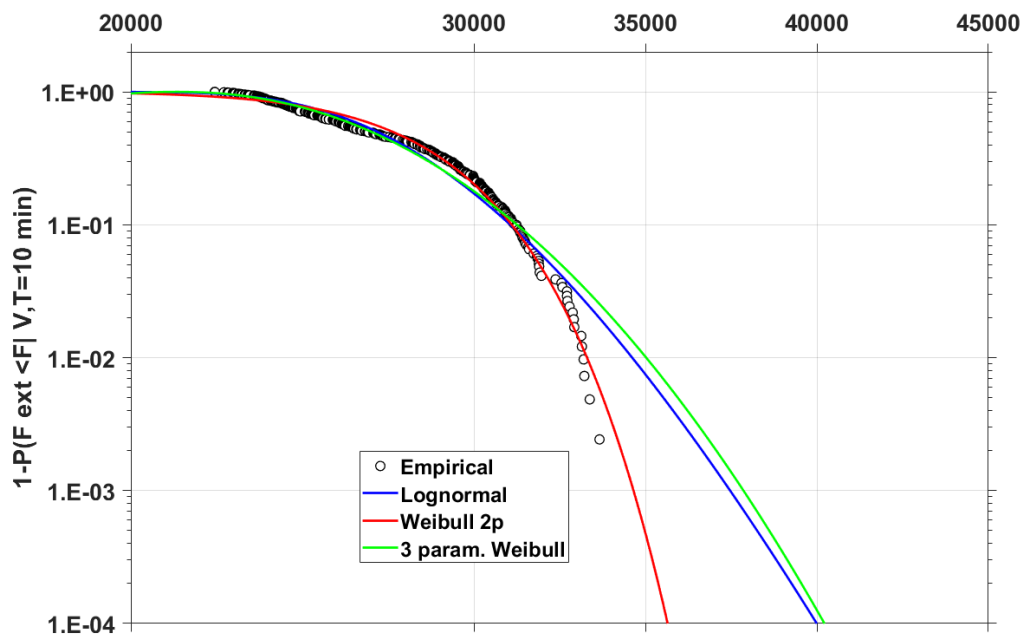
Εικόνα 6.4.2.2 Σύγκριση Weibull 2P, 3P και Log Normal σε σχέση με τα τοπικά μέγιστα για την edge wise ροπή, $\sigma_i=0.581$

Short Term, Blade flap-wise moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



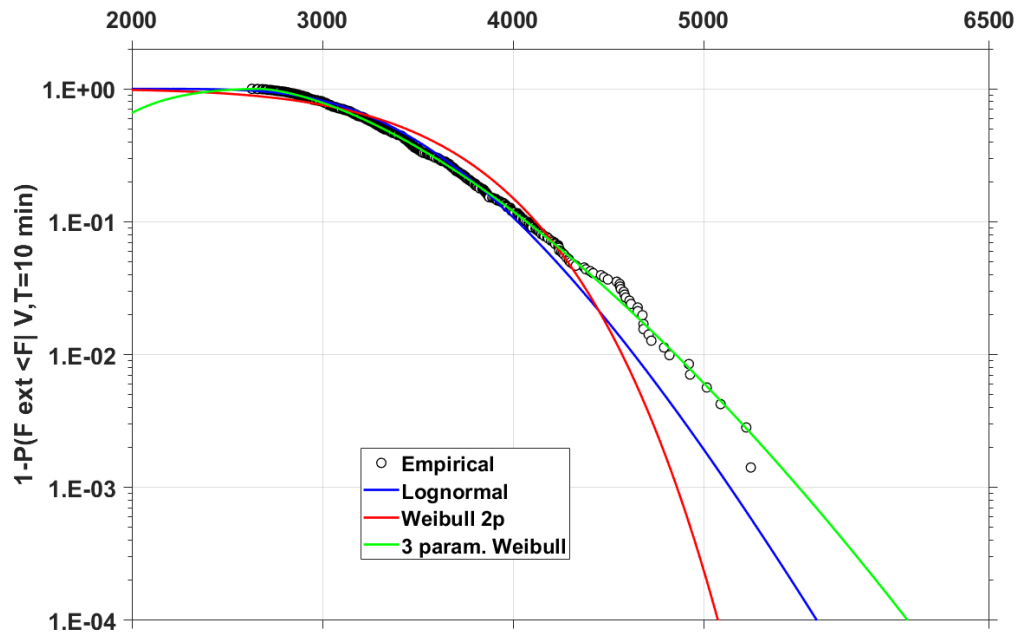
Εικόνα 6.4.2.3 Σύγκριση Weibull 2P, 3P και Log Normal σε σχέση με τα τοπικά μέγιστα για την flap wise ροπή, $\sigma_i=0.728$

Short Term, Tower fore-aft moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



Εικόνα 6.4.2.4 Σύγκριση Weibull 2P, 3P και Log Normal σε σχέση με τα τοπικά μέγιστα για την fore aft ροπή, $\sigma_i=0.613$

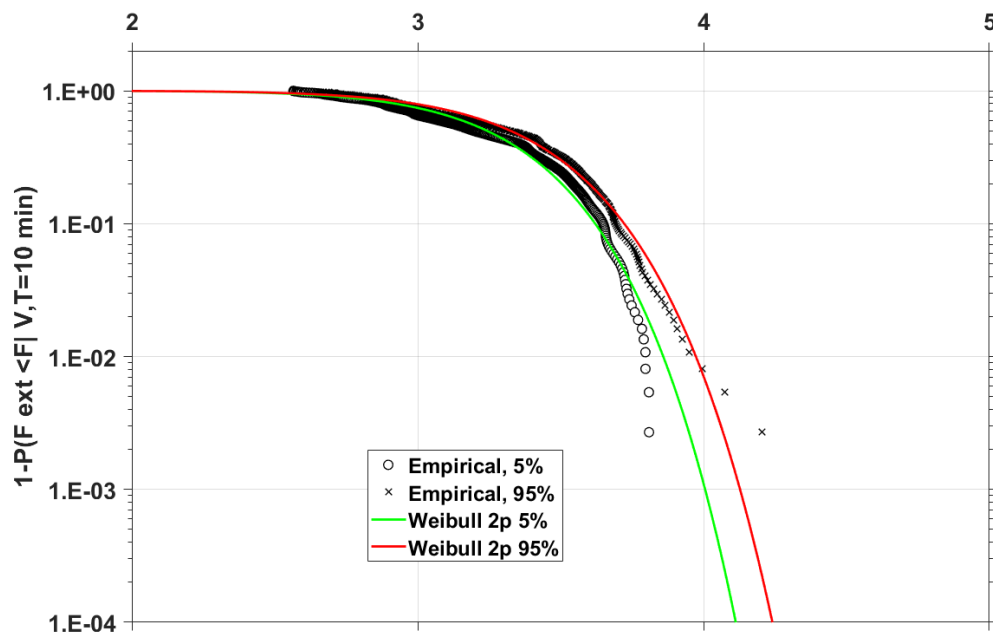
Short Term, Tower side-side moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



Εικόνα 6.4.2.5 Σύγκριση Weibull 2P, 3P και Log Normal σε σχέση με τα τοπικά μέγιστα για την side side ροπή, $\sigma_i=0.647$

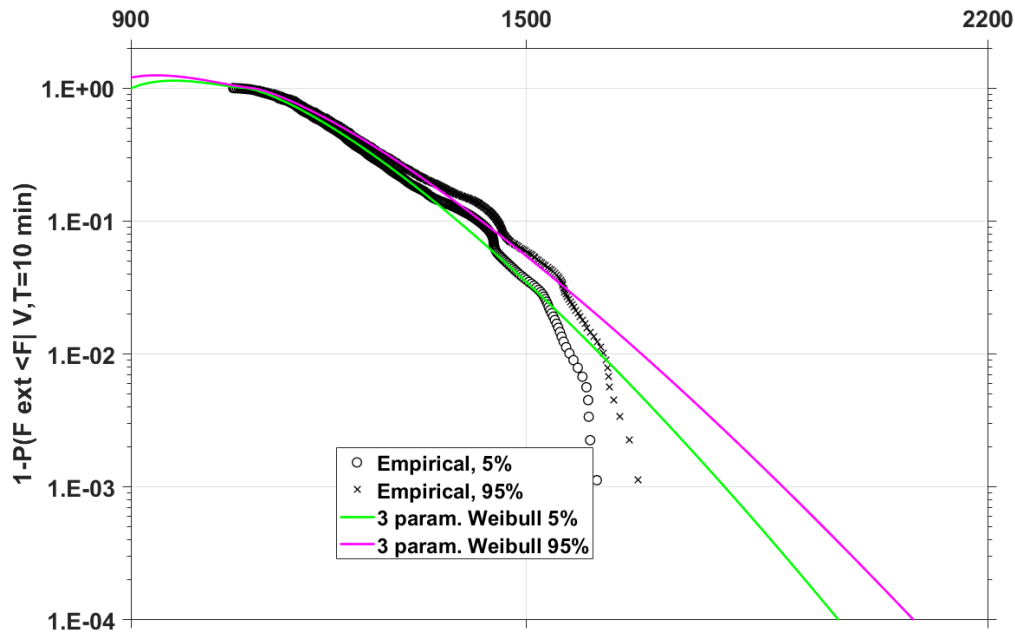
Με βάση την επιλογή είτε της 2P Weibull, είτε της 3P Weibull παρουσιάζονται τα όρια εμπιστοσύνης 5% και 95% από την Εικόνα 6.4.2.6 έως και Εικόνα 6.4.2.10

Short Term, Blade flap-wise deformation [m], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. 5% and 95% Conf. Bonus - Stochastic Wind



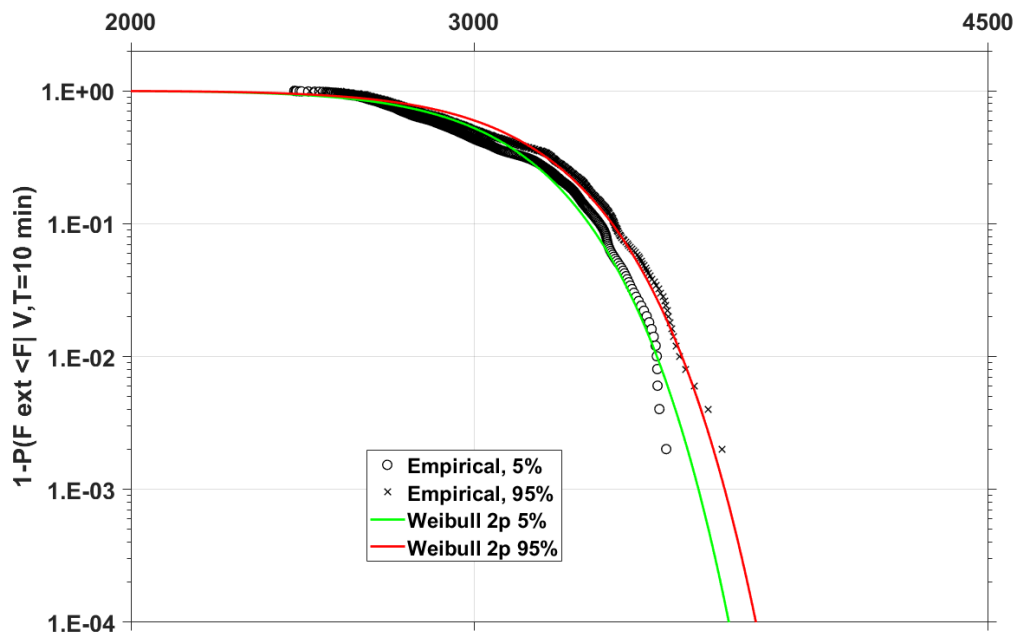
Εικόνα 6.4.2.6 Όρια άκρων 5% και 95%, Weibull 2P για τη μετατόπιση της flap wise, $\sigma_i=0.707$

Short Term, Blade edge-wise moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. 5% and 95% Conf. Bonus - Stochastic Wind



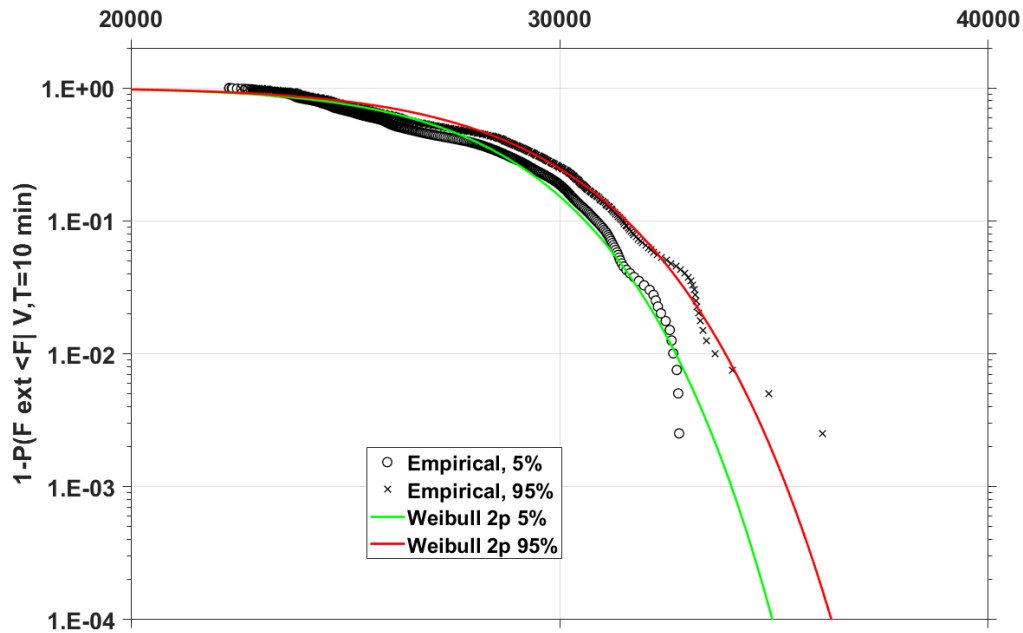
Εικόνα 6.4.2.7 Όρια άκρων 5% και 95%, Weibull 3P για τη ροπή edge wise, $\sigma_i=0.581$

Short Term, Blade flap-wise moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. 5% and 95% Conf. Bonus - Stochastic Wind



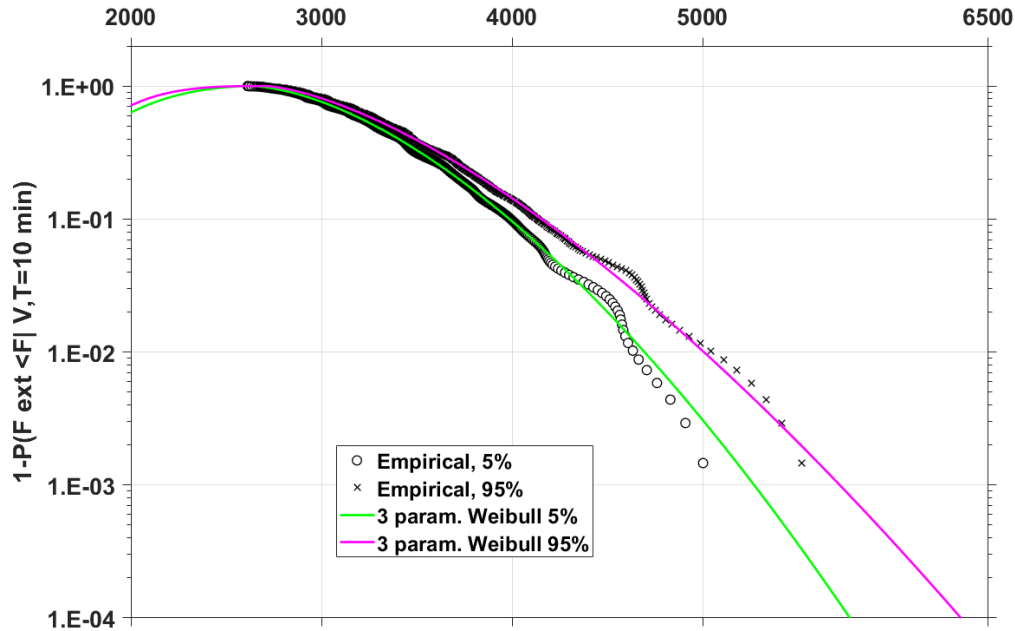
Εικόνα 6.4.2.8 Όρια άκρων 5% και 95%, Weibull 2P για τη ροπή flap wise, $\sigma_i=0.728$

**Short Term, Tower fore-aft moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$,
24 Simul. 5% and 95% Conf. Bonus - Stochastic Wind**



Εικόνα 6.4.2.9 Όρια άκρων 5% και 95%, Weibull 2P για τη ροπή fore aft, $\sigma_i=0.613$

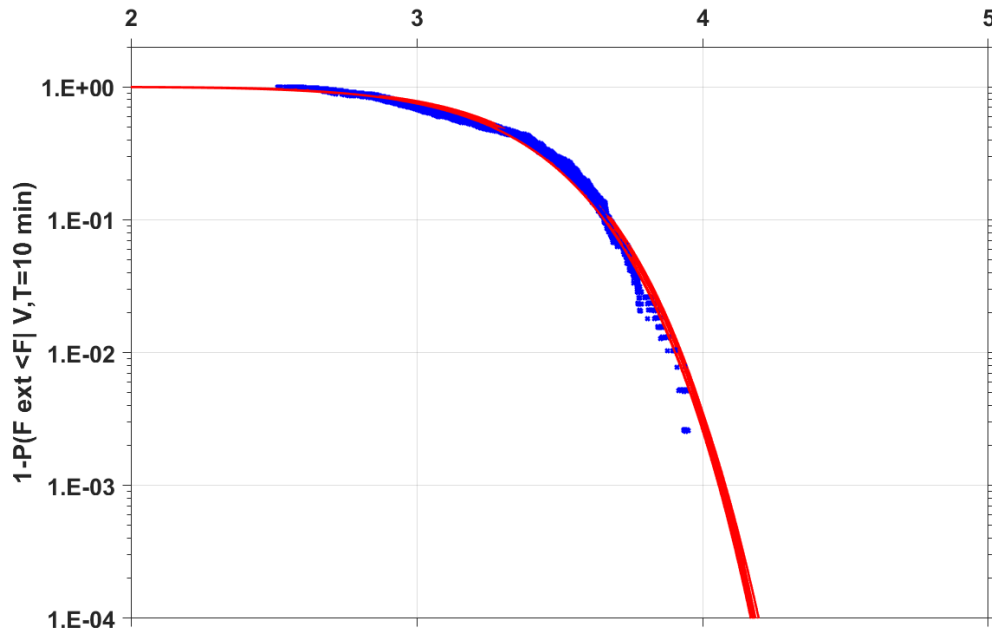
**Short Term, Tower side-side moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$,
24 Simul. 5% and 95% Conf. Bonus - Stochastic Wind**



Εικόνα 6.4.2.10 Όρια άκρων 5% και 95%, Weibull 2P για τη ροπή side side, $\sigma_i=0.647$

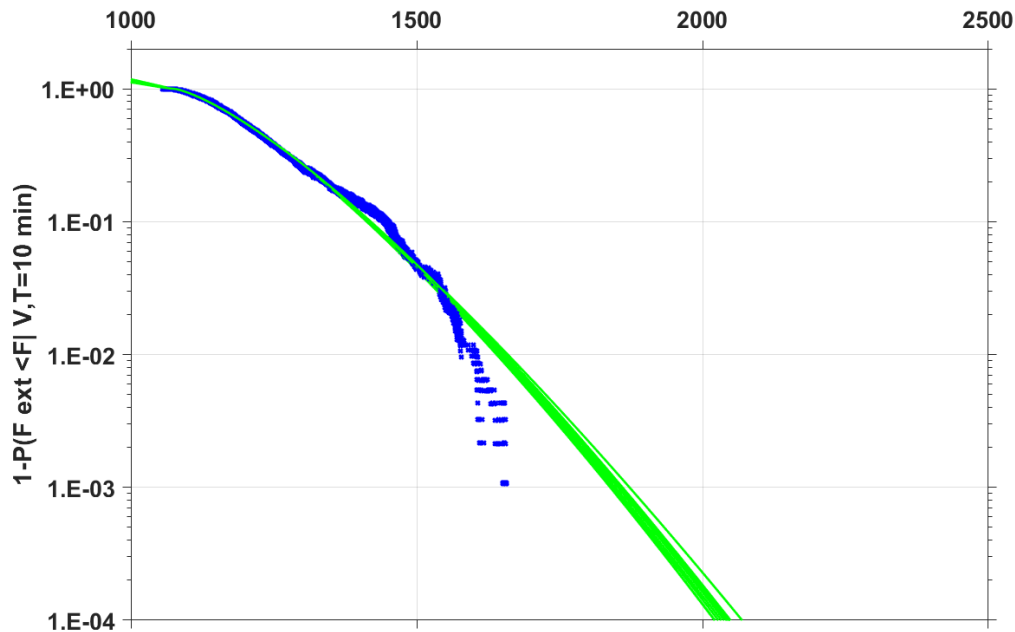
Τέλος από την Εικόνα 6.4.2.11 έως και Εικόνα 6.4.2.15 την βλέπουμε τα διαγράμματα που αφορούν τα συγκεντρωτικά μέγιστα ροπών/μετατοπίσεων με πιθανότητα μία φορά τα 50 έτη.

Short Term, Blade flap-wise deformation [m], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



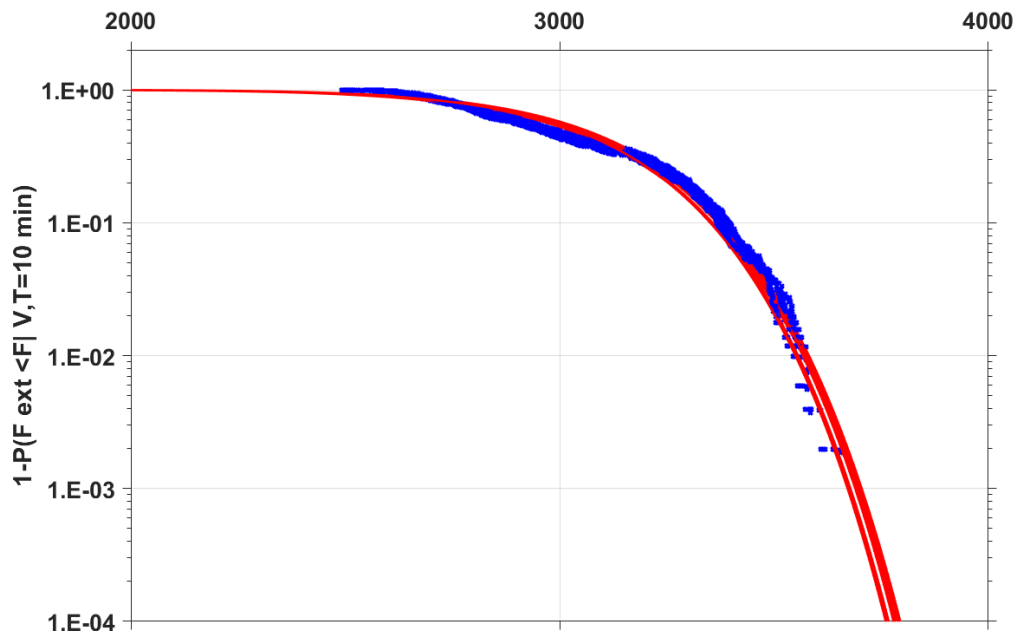
Εικόνα 6.4.2.11 Διακύμανση της πιθανότητας Weibull 2P της μέγιστης μετατόπισης flap wise

Short Term, Blade edge-wise moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



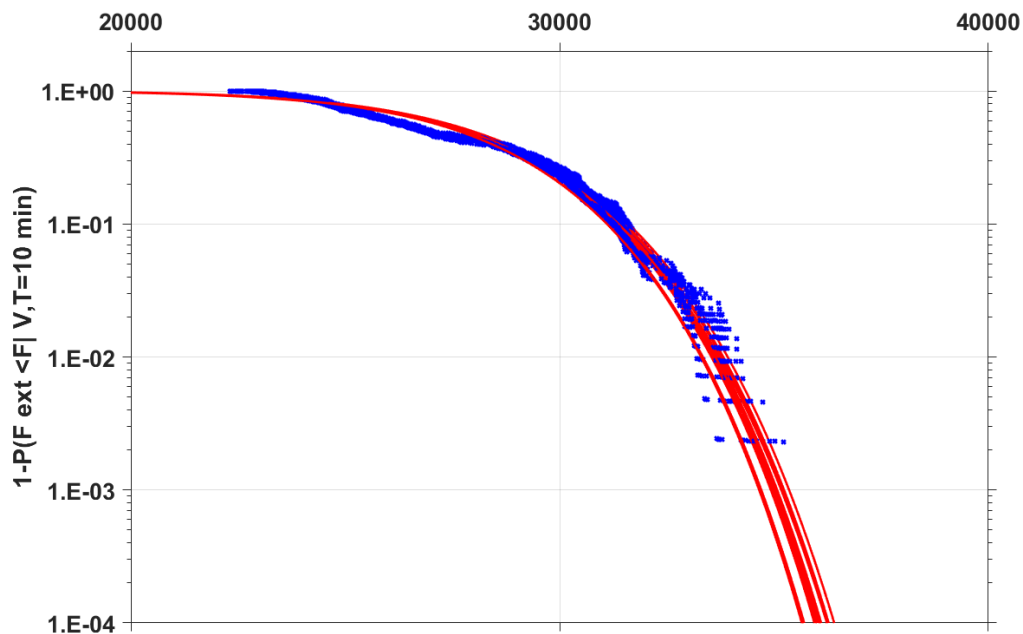
Εικόνα 6.4.2.12 Διακύμανση της πιθανότητας Weibull 3P της μέγιστης ροπής edge wise

**Short Term, Blade flap-wise moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$,
24 Simul. - Stochastic Wind**



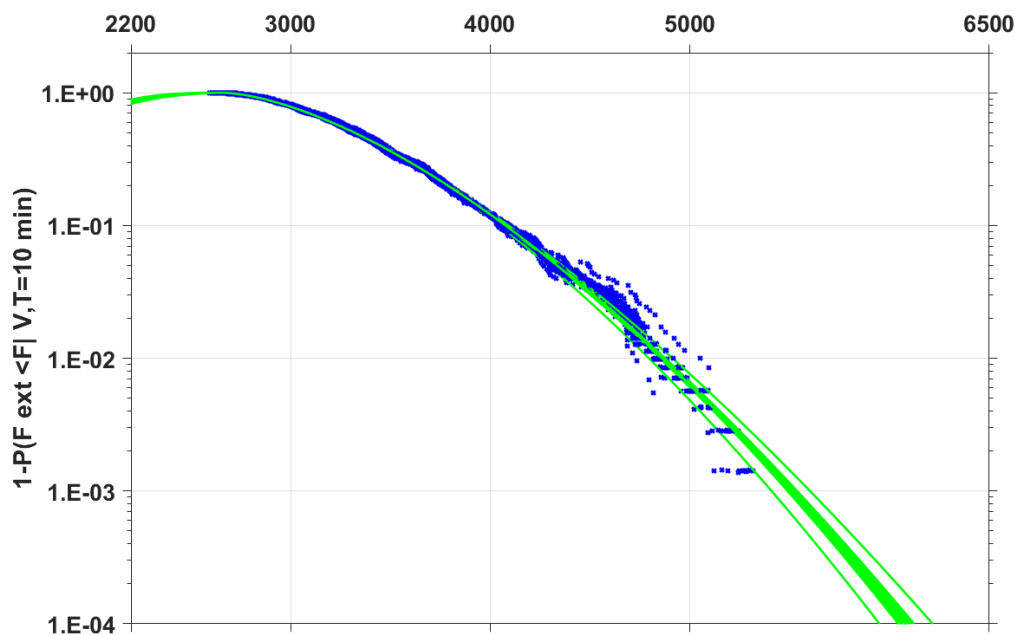
Εικόνα 6.4.2.13 Διακύμανση της πιθανότητας Weibull 2P της μέγιστης ροπής flap wise

**Short Term, Tower fore-aft moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$,
24 Simul. - Stochastic Wind**



Εικόνα 6.4.2.14 Διακύμανση της πιθανότητας Weibull 2P της μέγιστης ροπής fore aft

Short Term, Tower side-side moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



Εικόνα 6.4.2.15 Διακύμανση της πιθανότητας Weibull 2P της μέγιστης ροπής side side

6.5. Ανάλυση αβεβαιότητας πρόβλεψης φορτίων τιμών ιδιοσυχνότητας/πάχους του Πύργου

Στο παρόν κομμάτι θα εξετάσουμε την επίδραση που έχει η μεταβολή της ιδιοσυχνότητας του πύργου, μέσα από τη μεταβολή του πάχους του.

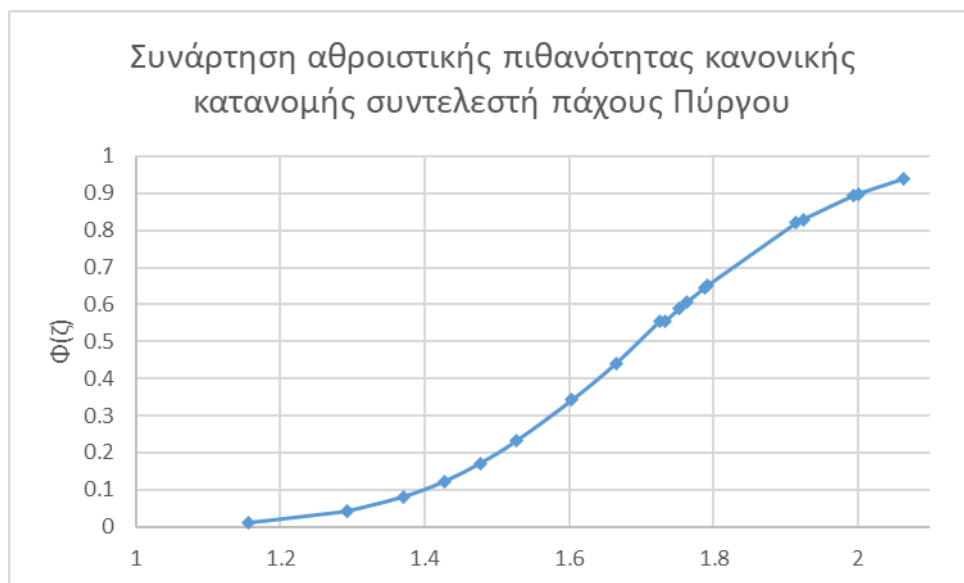
6.5.1. Επιλογή τιμών πάχους Πύργου

Η επιλογή του εύρους των παχών του πύργου έγινε ως προς τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων του πύργου. Η ονομαστική συχνότητα περιστροφής του ρότορα είναι ίση με 0.3Hz . Για λόγους συντονισμού ποτέ δεν πρέπει να ταυτίζεται ποτέ η συχνότητα περιστροφής με την ιδιοσυχνότητα του πύργου, λόγω κινδύνων με ανεπανόρθωτες συνέπειες. Δεδομένου αυτού, ως εύρος ορίστηκε να είναι από 1,2 έως 1,7 φορές την συχνότητα περιστροφής. Οπότε το εύρος της ιδιοσυχνότητας του πύργου ορίστηκε από $0,36\text{Hz}$ έως $0,51\text{Hz}$.

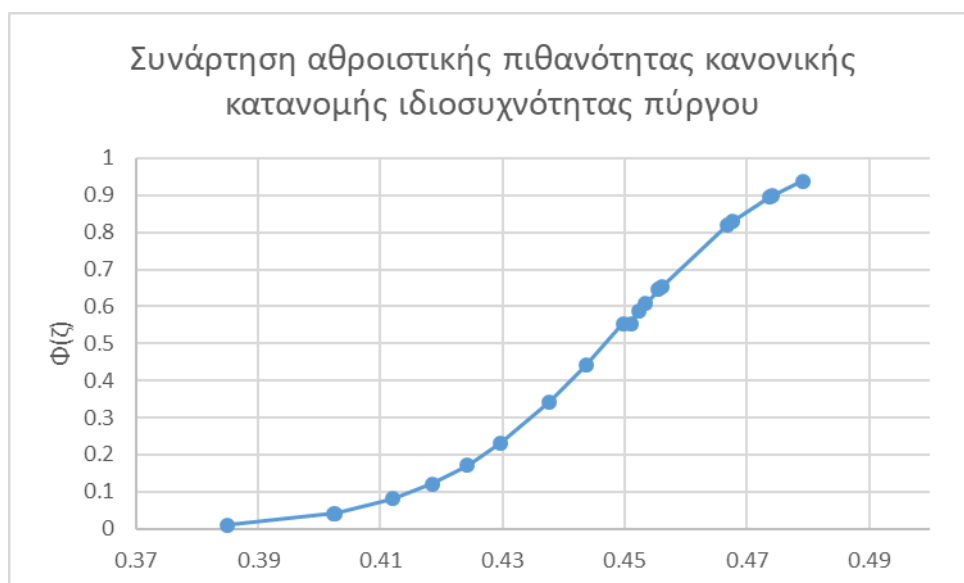
Με βάση αυτή την αδιάστατη τιμή του πάχους του πύργου για τα 0,36Hz ως κάτω ορίου και ίση με 1, θεωρήθηκε ότι οι τυχαίες 20 μεταβλητές θα πρέπει να βρίσκονται σε ένα εύρος με τυπική απόκλιση 0,233 ακολουθώντας κανονική κατανομή.

Όπως και στην περίπτωση του Ελεγκτή, μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών δημιούργησε 20 τιμές από 0 μέχρι το 1. Στη συνέχεια έγινε αντιστοίχιση του αριθμού αυτού ως αθροιστικής κανονικής πιθανότητας με βάση τις τιμές του πάχους του πύργου.

Η Εικόνα 6.5.1.1 παρουσιάζεται η αθροιστική πιθανότητα κανονικής κατανομής των τυχαίων τιμών του συντελεστή πάχους, με βάση την κανονική κατανομή ως προς το εύρος και τυπική απόκλιση που τέθηκε. Στην Εικόνα 6.5.1.2 φαίνεται πάλι η αθροιστική πιθανότητα κανονικής κατανομής για την ιδιοσυχνότητα των τιμών του συντελεστή πάχους.



Εικόνα 6.5.1.1 Αθροιστική πιθανότητα κανονικής κατανομής συντελεστή πάχους πύργου



Εικόνα 6.5.1.2 Αθροιστική πιθανότητα κανονικής κατανομής ιδιοσυχνότητας πύργου

6.5.2. Αποτελέσματα

Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι η διακύμανση των παχών του πύργου οδηγεί με μεγαλύτερη διακύμανση των φορτίσεων στην side side διεύθυνση του πύργου. Όπως και πριν για την κάθε ροπή-μετατόπισης ισχύει η ίδια κατανομή (2p-3p). Η Weibull 2 παραμέτρων ανταποκρίθηκε καλύτερα σε σχέση με την 3p με εξαίρεση την side side και edge wise ροπή. Παρ' ότι η μεγάλες αλλαγές στο πάχος του πύργου δημιουργούν μεγάλες αποκλίσεις της side ροπής, βλέπουμε πως τα πτερύγια δεν επηρεάζονται από αυτή την κατάσταση.

Ο Πίνακας 6.5.2.1 παρουσιάζει τόσο τα στατιστικά αποτελέσματα της μεταβολής των τιμών του Πάχους του Πύργου, όσο και τα αποτελέσματα αυτών για τις ροπές και μετατοπίσεις της Ανεμογεννήτριας.

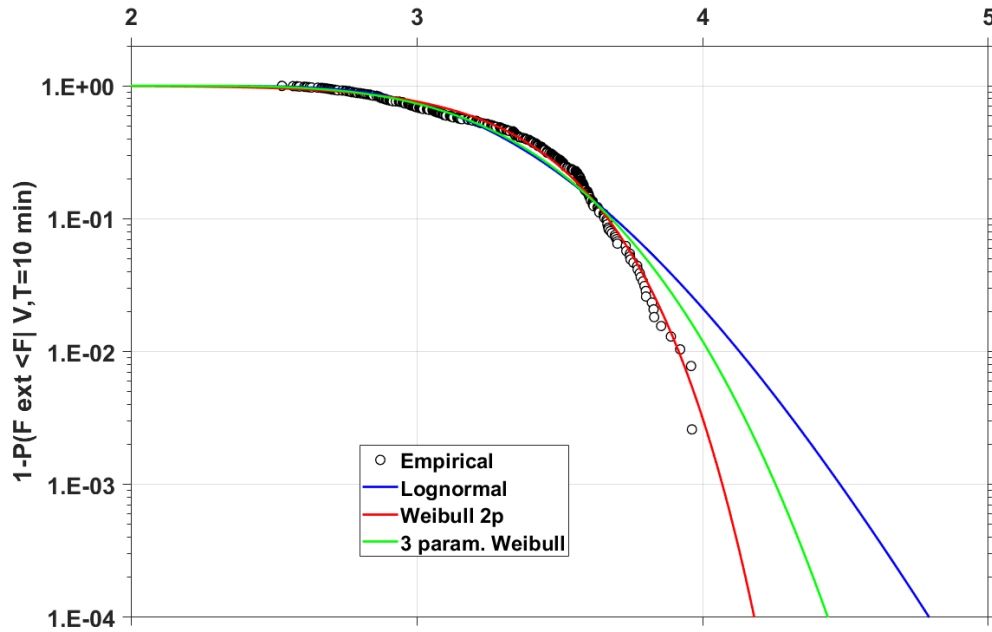
Ελεγκτής	Min τιμή	Max τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής Διακύμανσης COV(%)
Τιμές εισόδου	1,156	2,062	1,663	0,262	15,753%
Flap wise ροπή	3753(kNm)	3778(kNm)	3757(kNm)	6.61(kNm)	0.176%
Edge wise ροπή	2004(kNm)	2053(kNm)	2028(kNm)	16.216(kNm)	0.7994%
Flap wise μετατόπιση	4.182	4.191	4.185m	0.0034	0.081%
Side side ροπή	5796(kNm)	6859(kNm)	6325(kNm)	288.757(kNm)	4.5655%
Fore aft ροπή	35439(kNm)	35650(kNm)	35518(kNm)	55.465(kNm)	0.1562%

Πίνακας 6.5.2.1 Στατιστικά αποτελέσματα μεταβολών πάχους του πύργου

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα μέσα από τη μορφή διαγραμμάτων τόσο τα συγκεντρωτικά με το μέγιστο φορτίο πιθανότητας $1E-4$, όσο και την σύγκριση της Weibull 2P και 3P, αλλά και τα όρια εμπιστοσύνης 5% και 95%

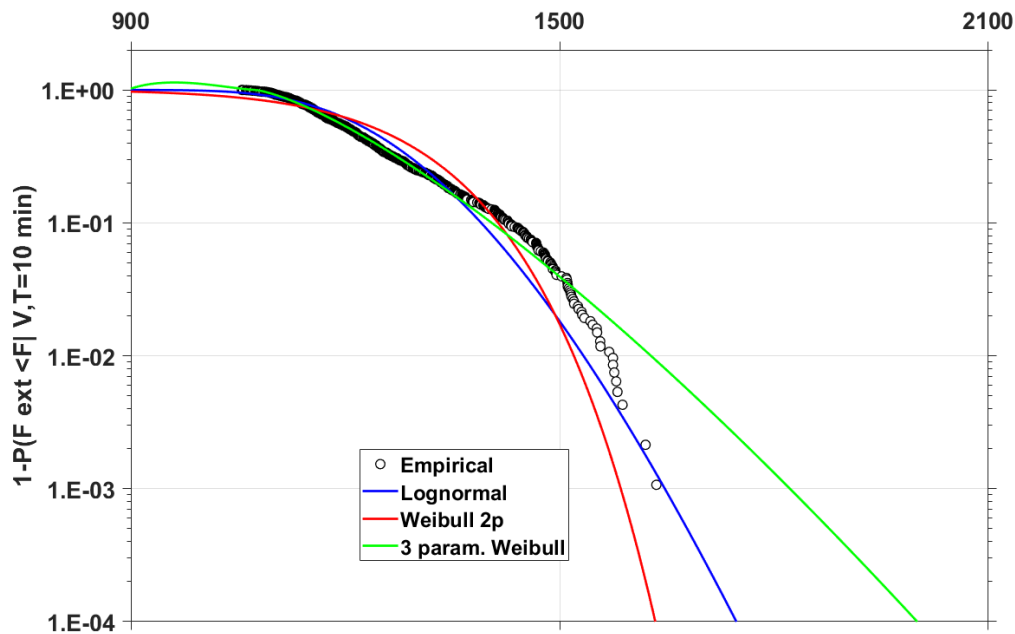
Ξεκινώντας από την Εικόνα 6.4.2.1 μέχρι και την Εικόνα 6.4.2.5 βλέπουμε τη σύγκριση μεταξύ Weibull 2 και 3 παραμέτρων για κάποια τυχαία τιμή του συντελεστή πάχους του πύργου κάθε φορά.

Short Term, Blade flap-wise deformation [m], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



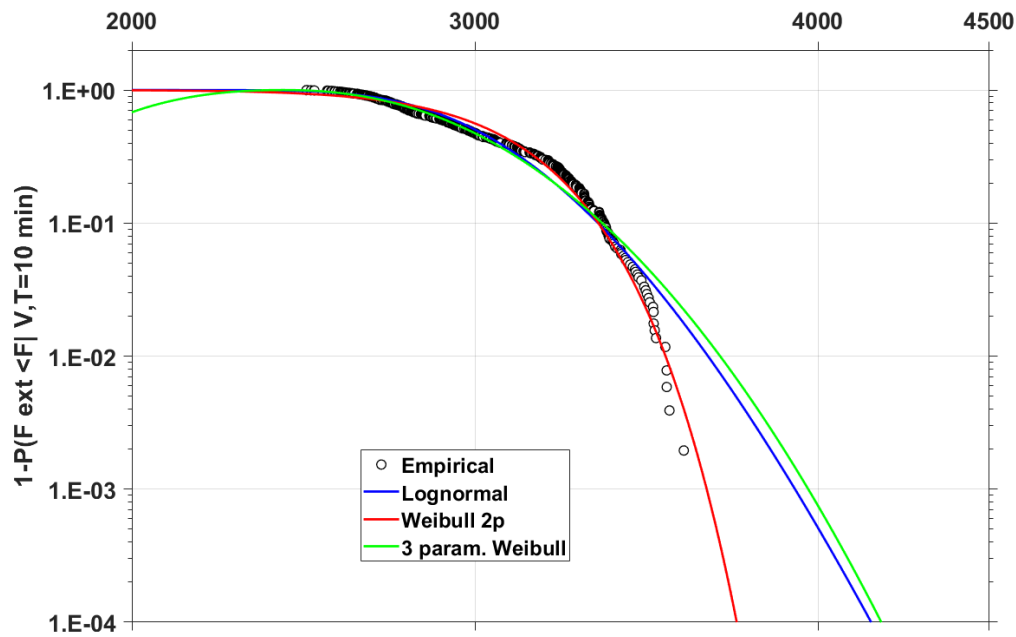
Εικόνα 6.5.2.1 Σύγκριση Weibull 2P, 3P και Log Normal σε σχέση με τα τοπικά μέγιστα για την flap wise μετατόπιση, $\sigma_i=1.665$

Short Term, Blade edge-wise moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



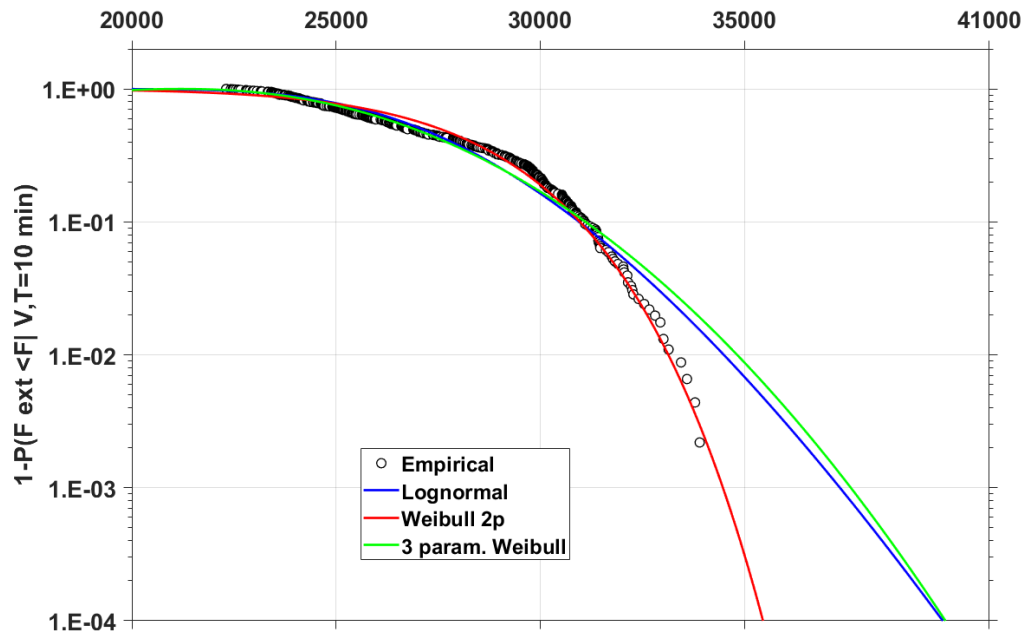
Εικόνα 6.5.2.2 Σύγκριση Weibull 2P, 3P και Log Normal σε σχέση με τα τοπικά μέγιστα για την edge wise ροπή, $\sigma_i=1.732$

**Short Term, Blade flap-wise moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$,
24 Simul. - Stochastic Wind**



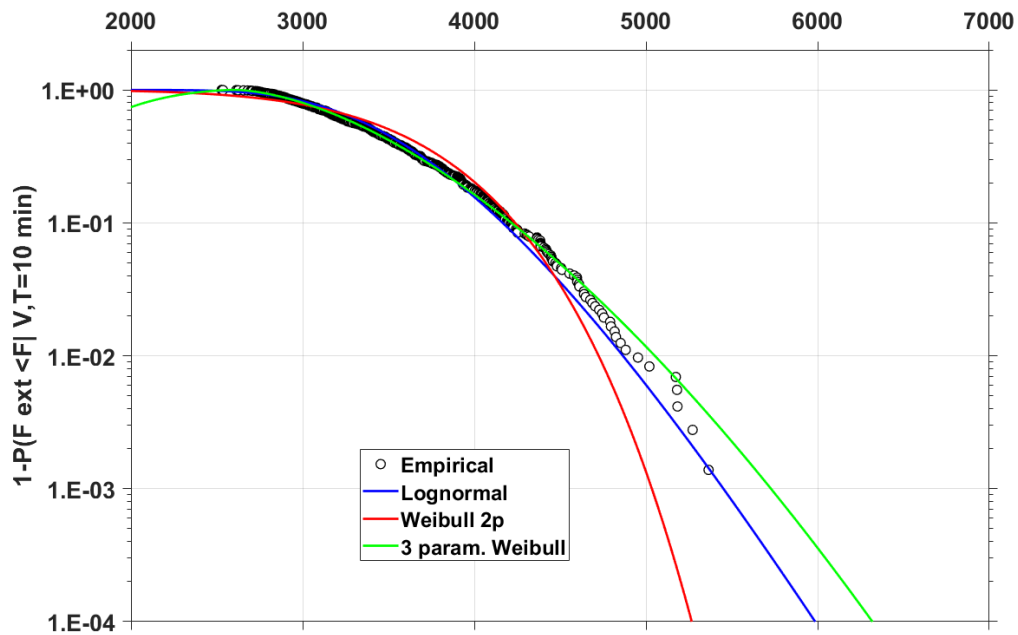
Εικόνα 6.5.2.3 Σύγκριση Weibull 2P, 3P και Log Normal σε σχέση με τα τοπικά μέγιστα για την flap wise ροπή, $\sigma_i=1.292$

**Short Term, Tower fore-aft moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$,
24 Simul. - Stochastic Wind**



Εικόνα 6.5.2.4 Σύγκριση Weibull 2P, 3P και Log Normal σε σχέση με τα τοπικά μέγιστα για την fore aft ροπή, $\sigma_i=1.788$

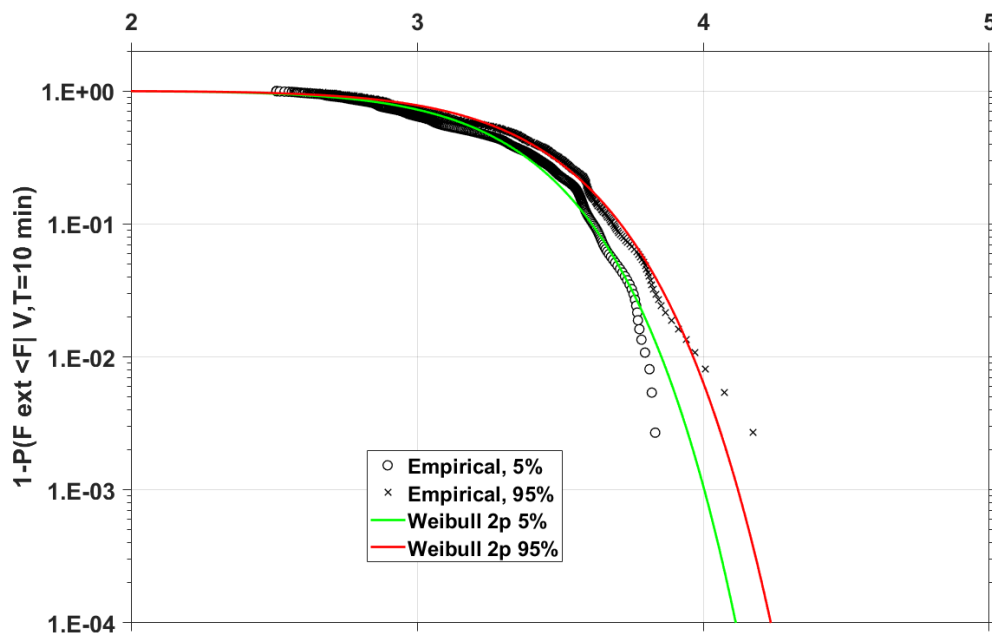
Short Term, Tower side-side moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



Εικόνα 6.5.2.5 Σύγκριση Weibull 2P, 3P και Log Normal σε σχέση με τα τοπικά μέγιστα για την side side ροπή, $\sigma_i=1.527$

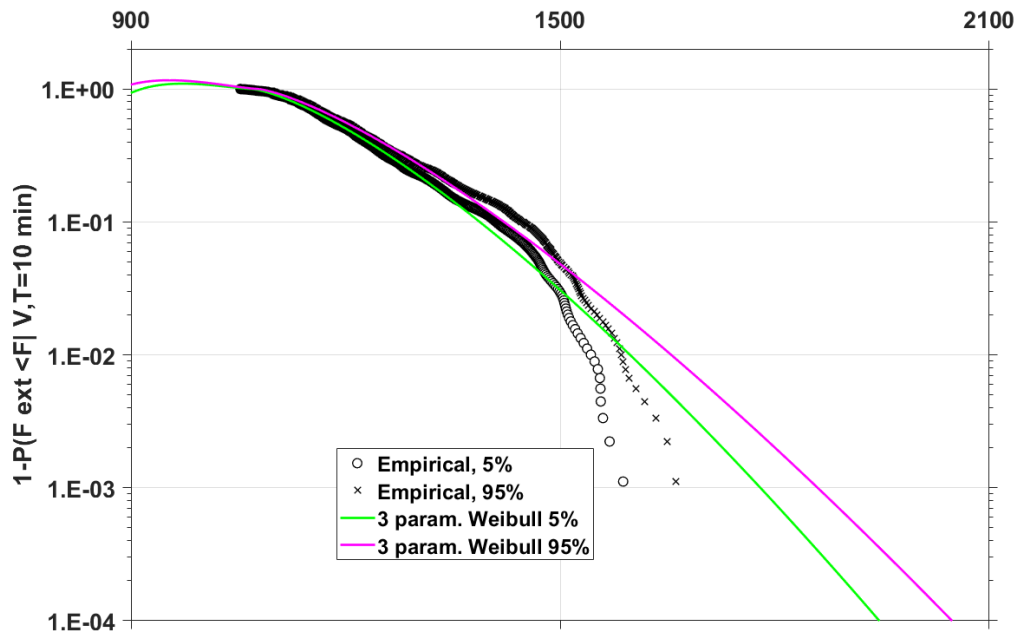
Με βάση την επιλογή είτε της Weibull 2 παραμέτρων, είτε της Weibull 3 παραμέτρων παρουσιάζονται τα όρια 5% και 95% από την Εικόνα 6.5.2.6 έως και την Εικόνα 6.5.2.10

Short Term, Blade flap-wise deformation [m], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. 5% and 95% Conf. Bonus - Stochastic Wind



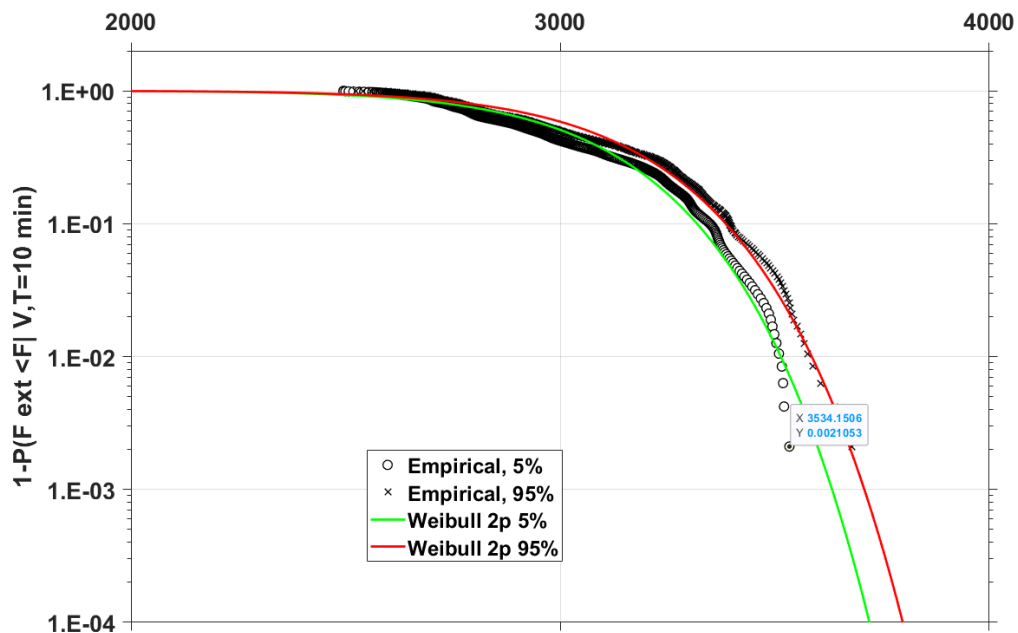
Εικόνα 6.5.2.6 Όρια άκρων 5% και 95%, Weibull 2P για την μετατόπιση flap wise, $\sigma_i=1.665$

Short Term, Blade edge-wise moment [kNm], POT Method, u=14m/s, 24 Simul. 5% and 95% Conf. Bonus - Stochastic Wind



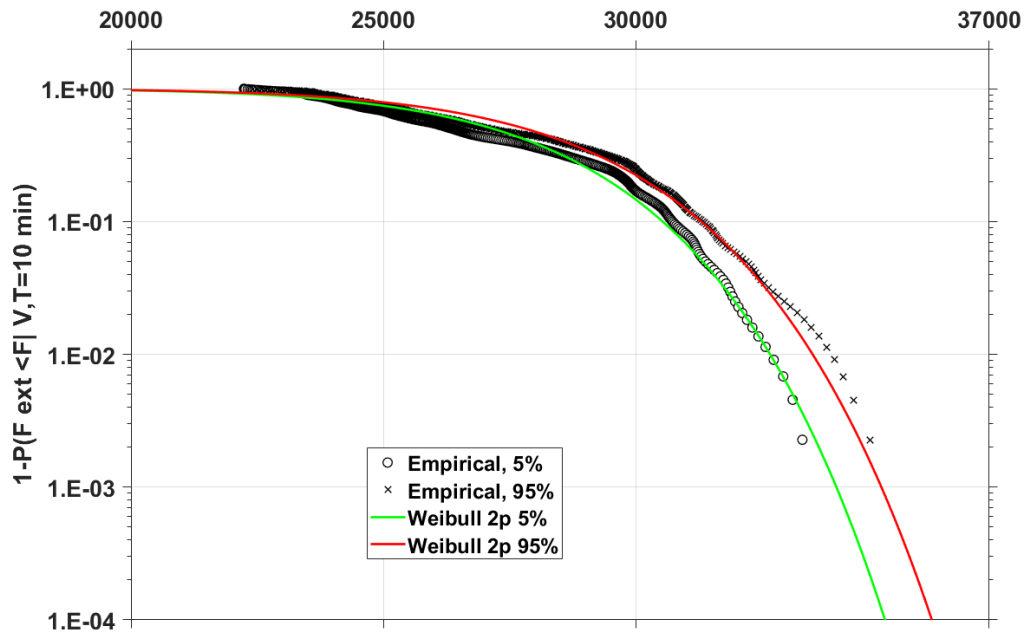
Εικόνα 6.5.2.7 Όρια άκρων 5% και 95%, Weibull 3P για την ροπή edge wise, $\sigma_i=1.732$

Short Term, Blade flap-wise moment [kNm], POT Method, u=14m/s, 24 Simul. 5% and 95% Conf. Bonus - Stochastic Wind



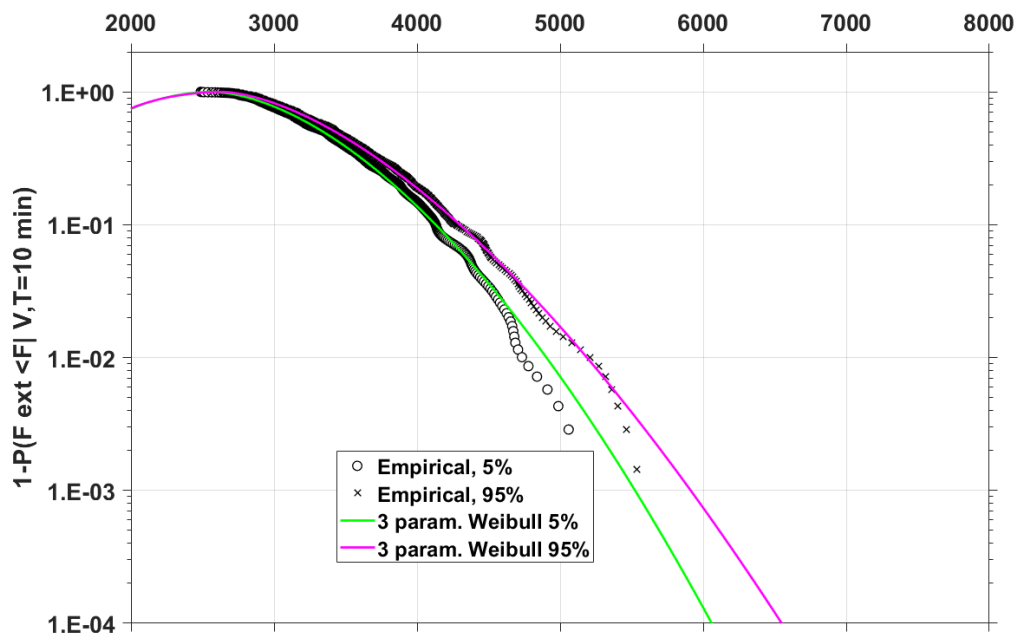
Εικόνα 6.5.2.8 Όρια άκρων 5% και 95%, Weibull 2P για την ροπή flap wise, $\sigma_i=1.292$

**Short Term, Tower fore-aft moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$,
24 Simul. 5% and 95% Conf. Bonus - Stochastic Wind**



Εικόνα 6.5.2.9 Όρια άκρων 5% και 95%, Weibull 2P για την ροπή fore aft, $\sigma_i=1.788$

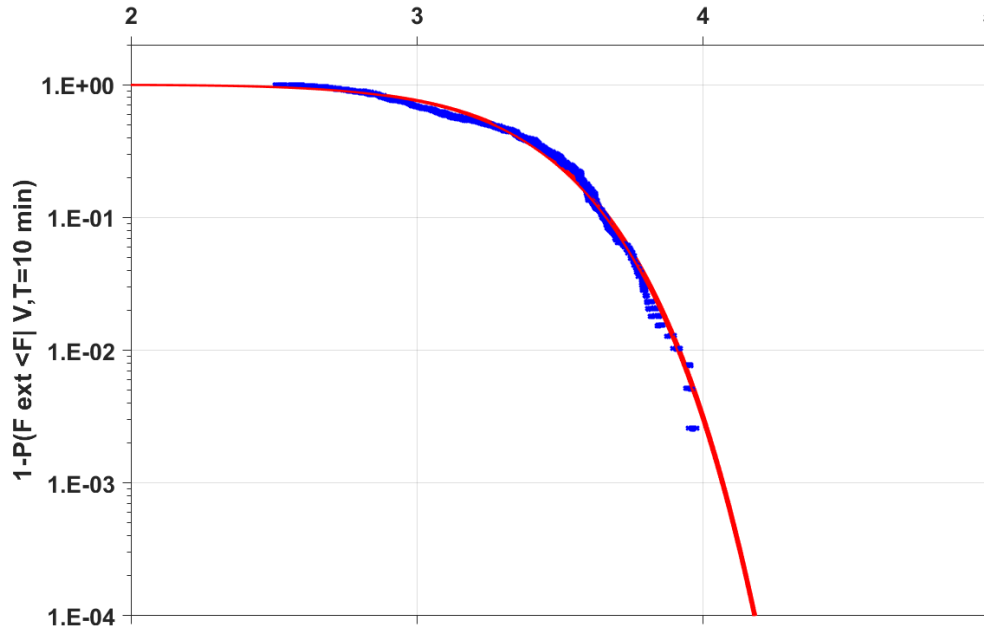
**Short Term, Tower side-side moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$,
24 Simul. 5% and 95% Conf. Bonus - Stochastic Wind**



Εικόνα 6.5.2.10 Όρια άκρων 5% και 95%, Weibull 3P για την ροπή side side, $\sigma_i=1.527$

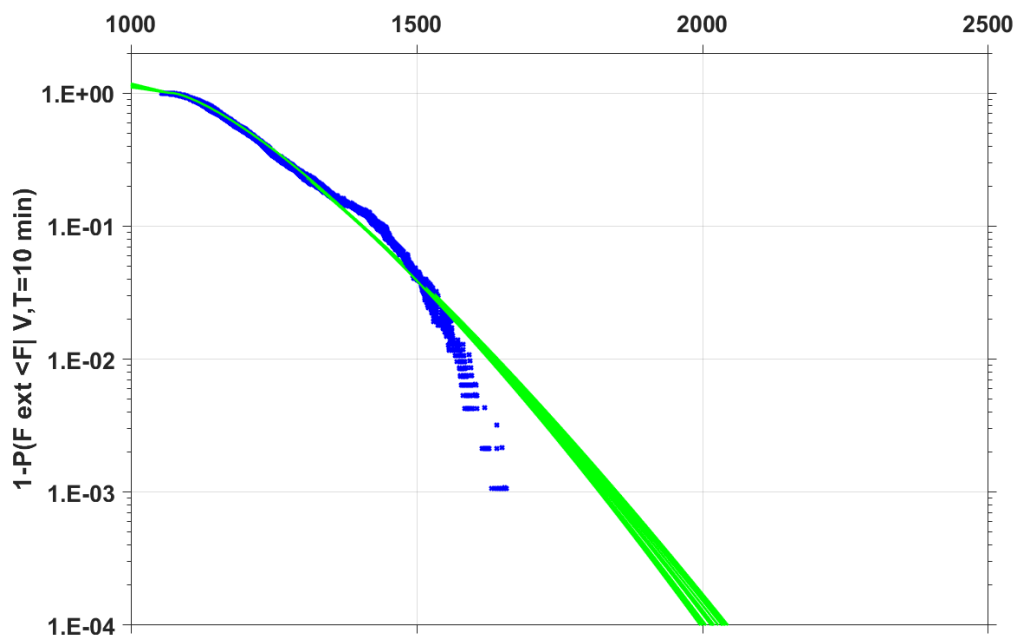
Τέλος από την Εικόνα 6.5.2.11 έως και την Εικόνα 6.5.2.15 βλέπουμε τα διαγράμματα που αφορούν τα συγκεντρωτικά μέγιστα φορτία/μετατοπίσεις.

Short Term, Blade flap-wise deformation [m], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



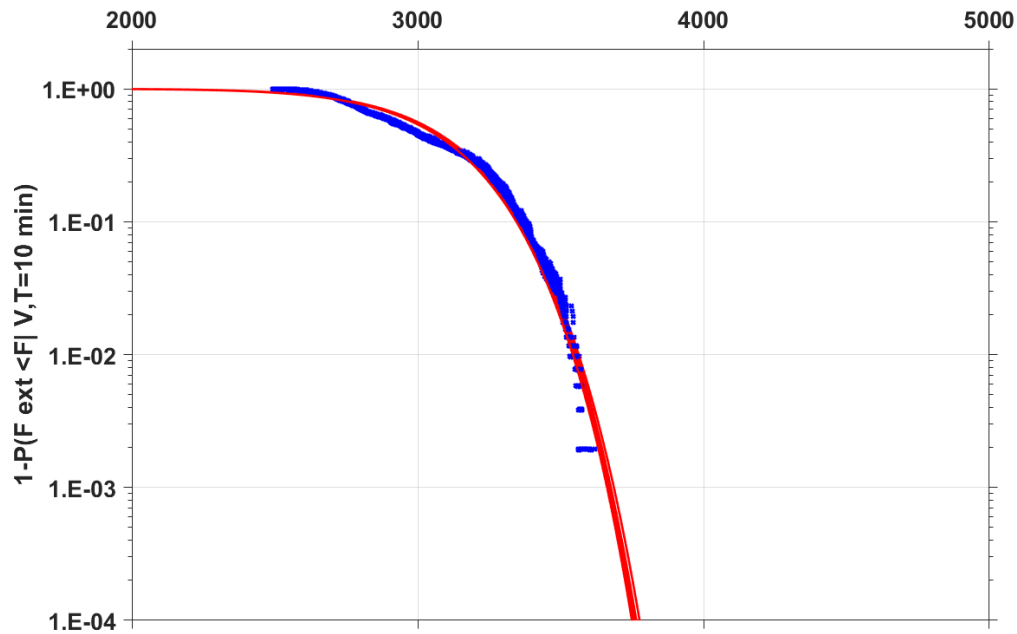
Εικόνα 6.5.2.11 Διακύμανση της πιθανότητας Weibull 2P της μέγιστης μετατόπισης flap wise

Short Term, Blade edge-wise moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. - Stochastic Wind



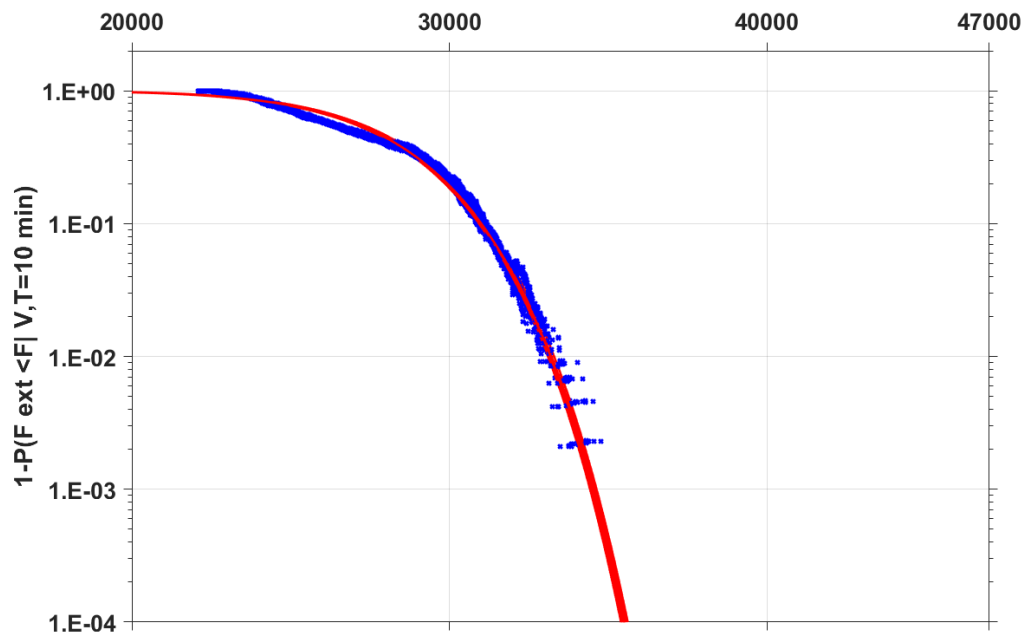
Εικόνα 6.5.2.12 Διακύμανση της πιθανότητας Weibull 3P της μέγιστης ροπής edge wise

**Short term, Blade flap-wise moment [kNm], POT Method, u=14m/s,
24 Simul. -Stochastic Wind**



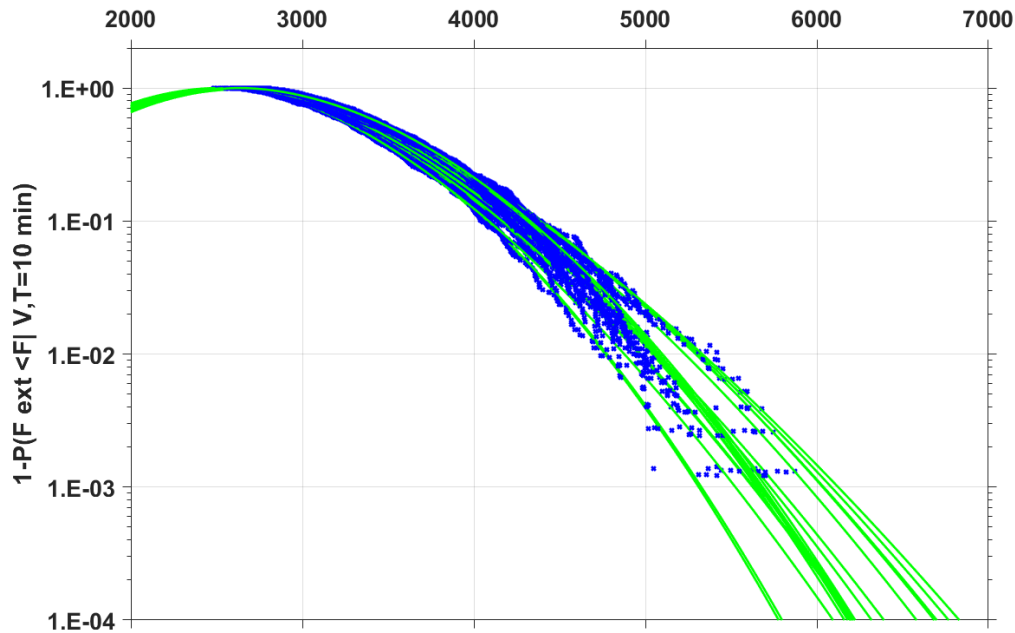
Εικόνα 6.5.2.13 Διακύμανση της πιθανότητας Weibull 2P της μέγιστης ροπής flap wise

**Short term, Tower fore-aft moment [kNm], POT Method, u=14m/s,
24 Simul. -Stochastic Wind**



Εικόνα 6.5.2.14 Διακύμανση της πιθανότητας Weibull 2P της μέγιστης ροπής fore aft

Short term, Tower side-side moment [kNm], POT Method, $u=14\text{m/s}$, 24 Simul. -Stochastic Wind



Εικόνα 6.5.2.15 Διακύμανση της πιθανότητας Weibull 3P της μέγιστης ροπής side side

6.6. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η ανάλυση αβεβαιότητας πρόβλεψης φορτίων είναι μία ιδιαίτερα χρήσιμη μεθοδολογία για την τεχνολογία των ανεμογεννητριών, η οποία επιβάλλεται και από τον IEC 61400 κώδικα. Τόσο ένας κατασκευαστής, όσο και ένας χρήστης αιολικού πάρκου μπορεί να βγάλει συμπεράσματα τα οποία θα τον βοηθήσουν τόσο στο κομμάτι σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας, αν αφορά κατασκευαστή, όσο και στο κομμάτι πρόβλεψης βλαβών με σκοπό την επέκταση του ορίου ζωής και άρα καλύτερης πρόβλεψης αναγκών συντήρησης, με προεκτάσεις στην ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου.

Οι μεταβλητές που εξετάστηκαν είναι δύο τελείως διαφορετικής φύσης. Η μία αφορά τον προγραμματισμό του Ελεγκτή (controller) και η άλλη ένα δομικό στοιχείο της Ανεμογεννήτριας.

Για ένα χρήστη αιολικών πάρκων, ο οποίος δεν έχει πρόσβαση στα βαθύτερα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών του, παρά μόνο βασικές πληροφορίες, μέσα από έντυπα, καθώς επίσης από πληροφορίες που μπορεί να αντλήσει στο αιολικό πάρκο, μία μεθοδολογία αποτύπωσης της ανεμογεννήτριας θεωρείται ασφαλής και ιδιαίτερα διδακτική. Παρ' ότι η διακύμανση στη side ροπή ήταν μεγάλη σε σχέση με τα υπόλοιπα αποτελέσματα, εντούτοις, η διακύμανση αυτή ήταν μικρότερη από τη διακύμανση των παχών τα οποία είψχαν ένα μεγάλο εύρος. Τέλος ένας χρήστης αιολικού πάρκου έχει τη δυνατότητα μέσα από τα βάρη των μερών του πύργου/πτερυγίων/νασέλας να είναι σε θέση να αποτυπώσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους με μικρή αβεβαιότητα.

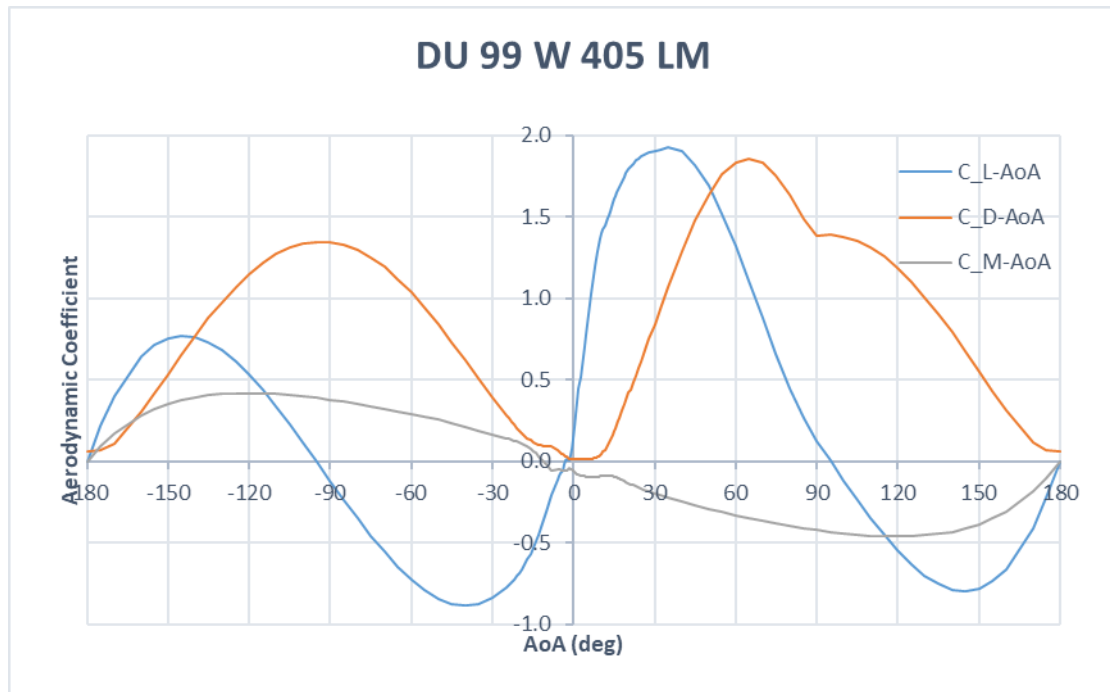
7. Συμπεράσματα-Προτάσεις

Συμπερασματικά θα μπορούσαμε πούμε πως ο Ελεγκτής δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα φορτία τόσο στα πτερύγια, όσο και στον πύργο. Οπότε ο προγραμματισμός του Ελεγκτή μπορεί να γίνει σύμφωνα με τη μέθοδο Ziegler Nichols. Αν κρίνεται απαραίτητο μπορεί στη συνέχεια να γίνει μία βελτιστοποίηση γύρω από το σημείο που επιβάλει η Ziegler Nichols.

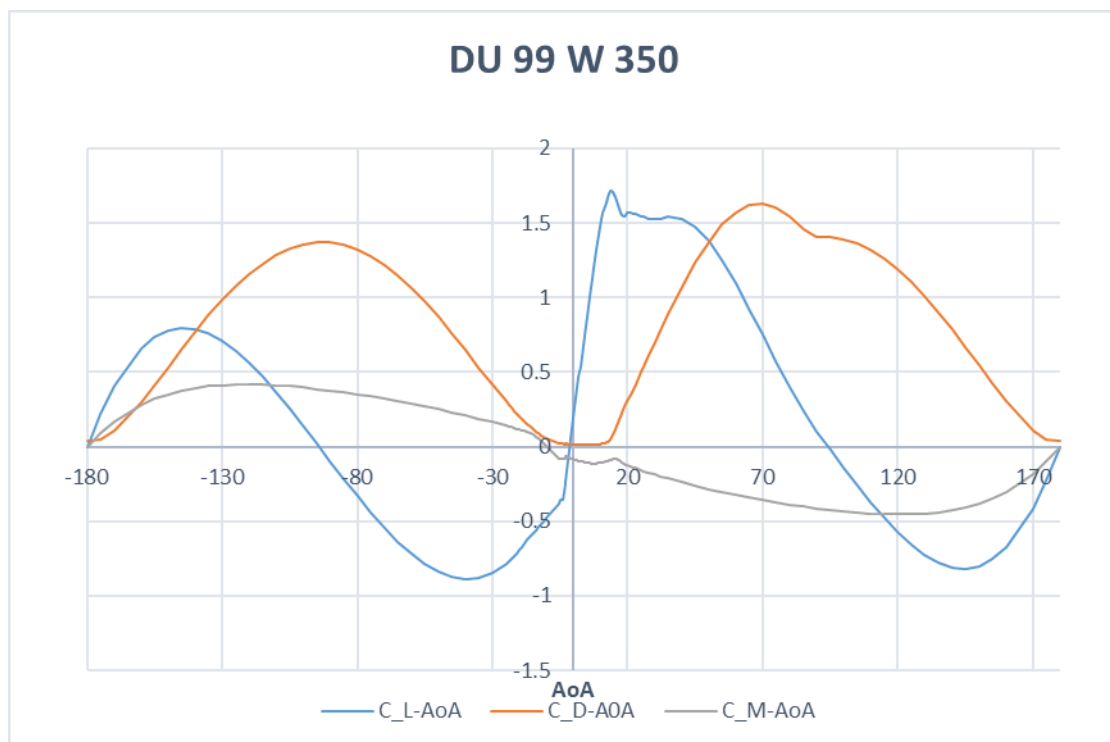
Για το κομμάτι των ιδιοσυχνοτήτων μέσα από την μεταβολή του πάχους θα μπορούσαμε να πούμε πως τα φορτία στα πτερύγια δεν επηρεάζονται από τις μεταβολές του πύργου. Αυτό που παίζει μεγάλο ρόλο είναι η side ροπή του πύργου, στην οποία παρατηρήθηκαν αξιόλογες διακυμάνσεις. Στην περίπτωση βέβαια που ένας χρήστης ενός Αιολικού πάρκου θελήσει να κάνει μία προσομοίωση των ανεμογεννητριών του, μέσα από τα τεχνικά εγχειρίδια λειτουργίας και εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας, θα έχει τη δυνατότητα μέσα από τη μάζα των κομματιών του πύργου να κάνει μία αρκετά λεπτομερή δημιουργία του μοντέλου της ανεμογεννήτριας.

8. Παράρτημα

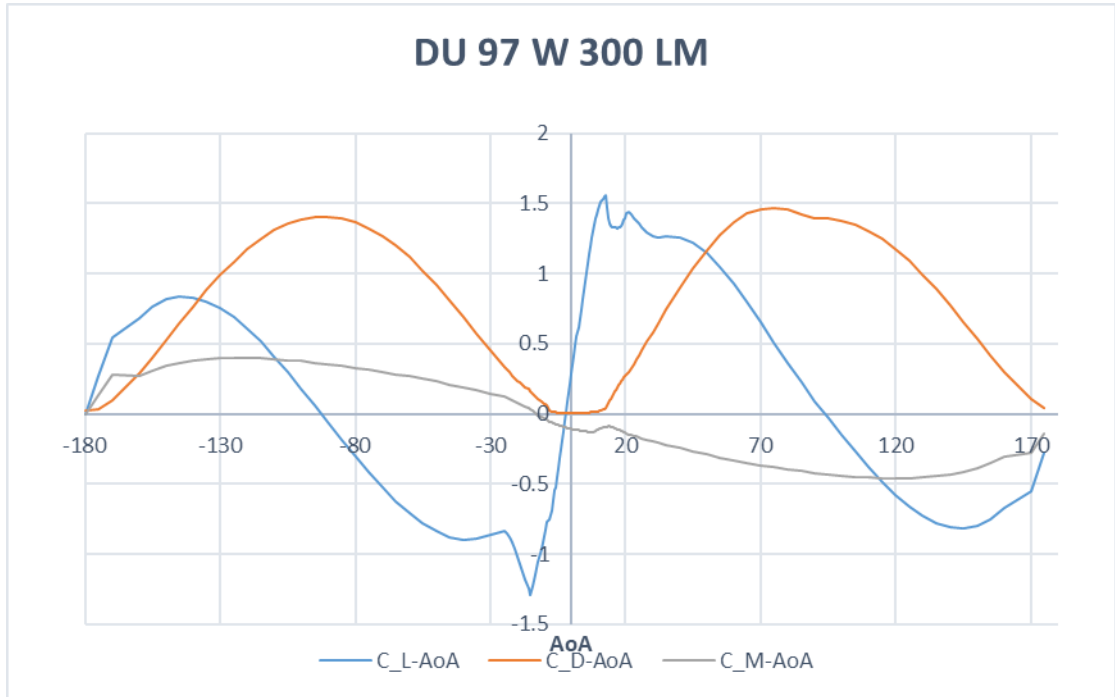
Από την Εικόνα 8.1 μέχρι και την Εικόνα 8.6 αποτυπώνεται οι συντελεστές άνωσης, αντίστασης και ροπής των αεροτομών που χρησιμοποιήθηκαν.



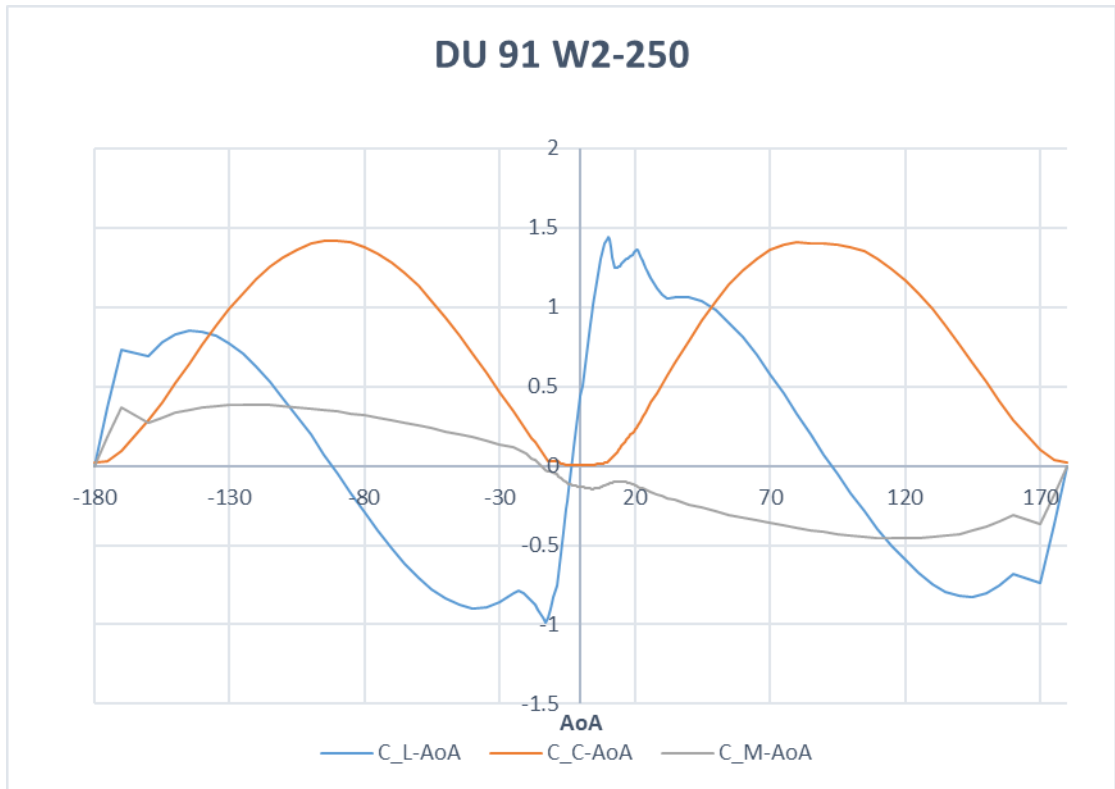
Εικόνα 8.1. Διάγραμμα συντελεστών C_L, C_D, C_M για την DU 99 W 405 LM



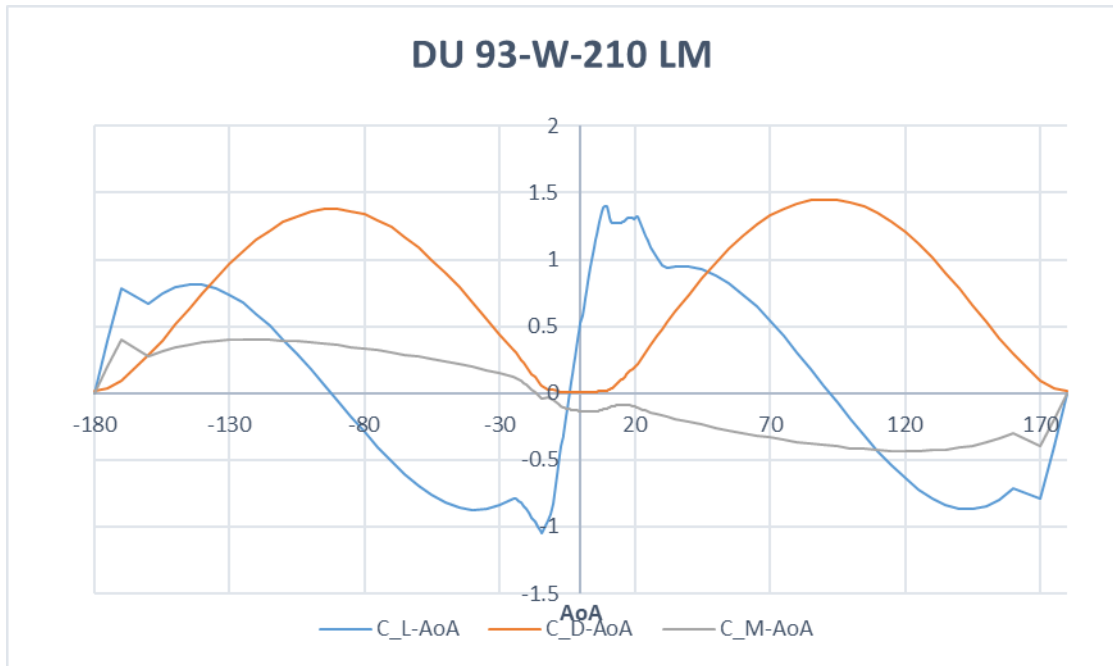
Εικόνα 8.2 Διάγραμμα συντελεστών C_L, C_D, C_M για την DU 99 W 350



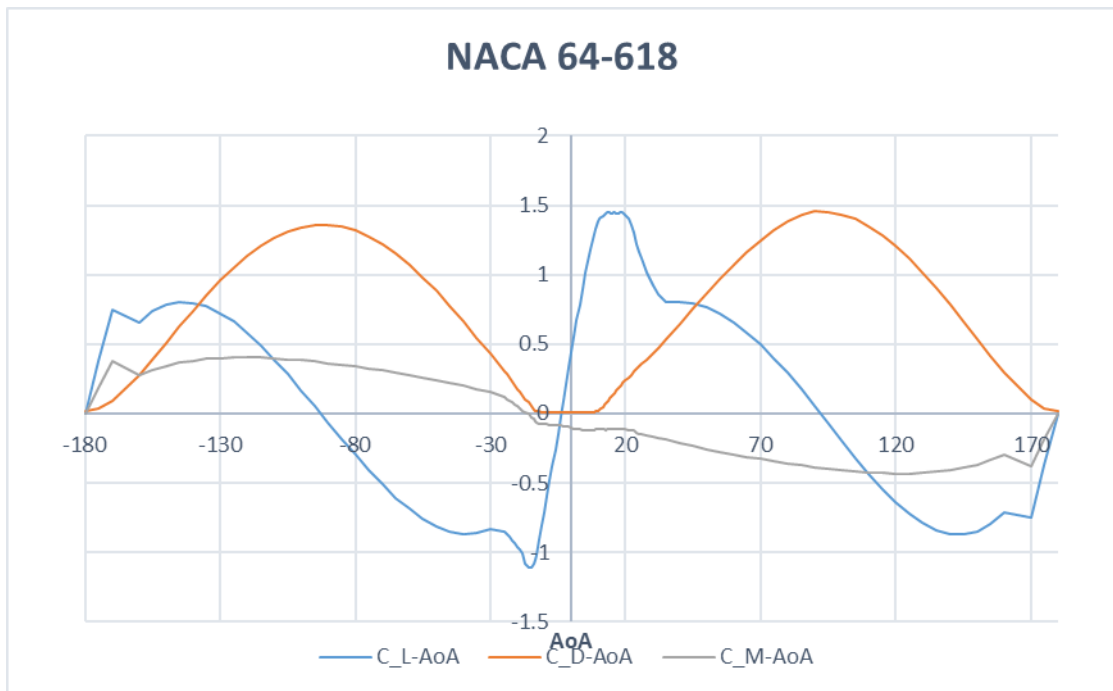
Εικόνα 8.3 Διάγραμμα συντελεστών C_L, C_D, C_M για την DU 97 W 300 LM



Εικόνα 8.4 Διάγραμμα συντελεστών C_L, C_D, C_M για την DU 91 W2-250



Εικόνα 8.5 Διάγραμμα συντελεστών C_L, C_D, C_M για την DU 93 W 210 LM



Εικόνα 8.6 Διάγραμμα συντελεστών C_L, C_D, C_M για την NACA 64-618

VI. Πηγές και Βιβλιογραφία

1. Bossanyi E. A. CONTROL ALGORITHM FOR THE 2MW and 5MW TURBINES [Report]. - 2002.
2. Definition of a 5-MW Reference [Report]. - [s.l.] : NREL.
3. Digital twin of wind turbines for real time continuous monitoring and inspection [Online] // Brunel. - <https://www.brunel.ac.uk/research/Projects/WindTwin-Digital-twin-of-wind-turbines-for-real-time-continuous-monitoring-and-inspection>.
4. Dimitris I. Manolas, Vasilis A. Riziotis, George P. Papadakis and Spyros G. Voutsinas Hydro-Servo-Aero-Elastic Analysis of Floating Offshore Wind Turbines [Report]. - 2020.
5. Dimitris Manolas & Vasilis Riziotis Input / Output of hGAST [Report].
6. Adhullah, A. Natarajan, J.D. Soresen Impact of uncertainty in airfoil characteristics on wind turbine extreme loads [Report]. - 2014.
7. J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development [Report]. - [s.l.] : NREL, 2009.
8. Kim Branner Y.s Choo, Jerzy Czujko, Masahiko Fujikubo COMMITTEE III.1 Ultimate Strength [Report]. - 2009.
9. Manolas Dimitris Hydro-Aero_Elastic Analysis of Offshore Wind Turbines [Report]. - 2015.
10. NREL IEC 61400-1 (2009) Wind turbines- PART 1: Design requirements- amendment 1 (3rd edn) [Report]. - 2009.
11. Pal Subhankar How digital twins could transform the wind energy industry [Online] // Windpower. - 2020. - <https://www.windpowerengineering.com/how-digital-twins-could-transform-the-wind-energy-industry/>.
12. Panagiotis N Schinas, Dimitris I Manolas, Vasilis A Riziotis, Theodore P Philippidis and Spyros G Voutsinas Statistical extrapolation methods for estimating extreme loads on wind turbine blades under turbulent wind conditions and stochastic material properties [Report]. - 2020.
13. Riziotis Dimitris Manolas & Vasilis Presentation of HydroGast (hGAST) servo-hydro-aero-elastic tool [Report].
14. Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi Wind Energy Handbook [Book]. - 2001.
15. Wagner Sousa de Oliveira, Antonio Jorge Fernandes Cost analysis of the material composition of the wind turbine blades for Wobben Windpower/Enercon GmbH model E-82 [Report]. - 2012.