



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Ελαχιστοποίηση μάζας πτερυγίου Α/Γ 10 MW με χρήση μεθόδων παθητικού ελέγχου φορτίων

ΓΕΩΡΓΙΑ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Τομέας Ρευστών

Επιβλέπων: Βασίλειος Ριζιώτης, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, 2021



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

Minimization of 10 MW wind turbine blade mass using passive load control methods

GEORGIA NIKOLAOU

Fluids Section

Supervisor: Vasilis Riziotis, NTUA Professor

ATHENS, 2021

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή αυτής της Διπλωματικής Εργασίας κ. Βασίλη Ριζιώτη, όχι μόνο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο, αλλά και για όλες τις γνώσεις που έχω λάβει από αυτόν από το 3^ο έτος της Σχολής στο οποίο μας έκανε μάθημα για πρώτη φορά. Η μεταδοτικότητα, η μεθοδικότητα καθώς και η διάθεση που πάντα είχε κατά τη διάρκεια του μαθήματος αποτέλεσαν εφιαλτήριο, ώστε να αποφασίσω στη συνέχεια να ασχοληθώ περαιτέρω με αυτόν τον τομέα.

Ένα τεράστιο «ευχαριστώ» οφείλω επίσης στον υποψήφιο διδάκτορα Γιάννη Σεραφείμ για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής μου. Η εξαιρετική συνεργασία μας και η άμεση ανταπόκρισή του σε όλες τις απορίες μου (που δεν ήταν και λίγες) και σε όποιο πρόβλημα προέκυψε αποδείχθηκαν ιδιαίτερα σημαντικές για την ομαλή διεξαγωγή αυτής της εργασίας αλλά και για να κατανοήσω σε βάθος τα επιμέρους τμήματα της.

Δεδομένου ότι η Διπλωματική Εργασία σηματοδοτεί και το τέλος των προπτυχιακών μου σπουδών, λαμβάνω την ευκαιρία να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές, μα πάνω απ' όλα φίλους μου, Αλεξάνδρα, Ηρώ, Αριστοτέλη, Αλέξανδρο και Κώστα που με συνόδευσαν στη φοιτητική μου ζωή και μοιραστήκαμε τόσο ξέγνοιαστες, όσο και πιο δύσκολες στιγμές.

Τέλος, την μεγαλύτερη ευγνωμοσύνη θα ήθελα να εκφράσω προς την οικογένειά μου, η οποία με στήριξε αδιάκοπα από τα μαθητικά μου χρόνια ώστε να καταφέρω να φοιτήσω στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών και να ολοκληρώσω τις σπουδές μου μένοντας προσηλωμένη στους στόχους μου.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Γεωργία Νικολάου

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract.....	6
1 Εισαγωγή	7
1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή	7
1.2 Το παρόν και το μέλλον της αιολικής ενέργειας.....	9
1.3 Παθητικός έλεγχος φορτίων.....	11
1.4 Στόχοι εργασίας	13
1.5 Διάρθρωση εργασίας.....	15
2 Μεθοδολογία.....	17
2.1 Ανεμογεννήτρια αναφοράς DTU 10 MW	17
2.2 Προσομοίωση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας μέσω του hGAST	19
2.2.1 Μοντελοποίηση δυναμικού συστήματος	20
2.2.2 Αεροδυναμικό πρότυπο	20
2.2.3 Ελαστο-δυναμικό πρότυπο	21
2.2.4 Πρότυπο αυτομάτου ελέγχου	23
2.3 Υλικά κατασκευής πτερυγίων.....	24
2.3.1 Σύνθετα υλικά.....	24
2.3.2 Λειτουργίες των υλικών στο πτερύγιο	24
2.3.3 Κριτήριο αστοχίας Tsai – Wu.....	25
2.4 Μέθοδος βελτιστοποίησης	26
2.4.1 Επιλογή εργαλείου βελτιστοποίησης.....	26
2.4.2 Περιγραφή αλγορίθμου COBYLA.....	27
2.5 Αλληλουχία βημάτων	28
2.5.1 Αρχική διερεύνηση – Παραδοχές.....	28
2.5.2 Στάδιο περιορισμού των φορτίων.....	29
2.5.3 Στάδιο μείωσης της μάζας του πτερυγίου	30
2.5.4 Συνδυασμένη βελτιστοποίηση	30
2.5.5 Τελική επαλήθευση	31
3 Παθητικός έλεγχος φορτίων μέσω ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών	32
3.1 Εισαγωγή γωνίας προσανατολισμού στα spar caps	32
3.2 Αρχική διερεύνηση με σταθερές τιμές γωνίας	32
3.3 Βελτιστοποίηση με στόχο τη μείωση φορτίων	34
3.4 Βελτιστοποίηση με στόχο τη μείωση του πάχους	37
3.5 Βελτιστοποίηση διπλού βρόχου με στόχο τη μέγιστη μείωση μάζας	41
4 Παθητικός έλεγχος φορτίων μέσω κύρτωσης του πτερυγίου	44

4.1 Σχεδιασμός πτερυγίου με backward sweep.....	44
4.2 Βελτιστοποίηση με στόχο τη μείωση φορτίων	45
4.3 Βελτιστοποίηση διπλού βρόχου με στόχο τη μέγιστη μείωση μάζας	48
5 Σύγκριση – Συμπεράσματα.....	52
5.1 Συνοπτική παρουσίαση βέλτιστων διαμορφώσεων	52
5.2 Πλήρεις προσομοιώσεις για τον εντοπισμό των μέγιστων φορτίων.....	53
5.3 Συμπεράσματα	59
6 Μελλοντική Εργασία	61
Κατάλογος Γραφημάτων	62
Κατάλογος Πινάκων.....	64
Κατάλογος Εικόνων	65
Βιβλιογραφία.....	66

Περίληψη

Στις μέρες μας, η αιολική ενέργεια έχει φτάσει σε υψηλό βαθμό τεχνολογικής ωρίμανσης, ωστόσο, υπάρχει ακόμα περιθώριο βελτίωσης όσον αφορά το σταθμισμένο κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy – LCOE). Το μεγαλύτερο μέρος της επένδυσης ενός αιολικού πάρκου αντιπροσωπεύει το κόστος των ανεμογεννητριών, σημαντικό μερίδιο του οποίου αποτελεί το κόστος των πτερυγίων. Επομένως, ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης του LCOE είναι η μείωση της ποσότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, για να επιτευχθεί ο τελικός στόχος μείωσης του LCOE, επιδιώκεται η μείωση της μάζας των πτερυγίων μέσω βελτιωμένου σχεδιασμού τους, στον οποίο ενσωματώνονται στρατηγικές παθητικού ελέγχου φορτίων. Οι στρατηγικές αυτές βασίζονται στην δομική σύζευξη κάμψης-στρέψης (Bend Twist Coupling – BTC), η οποία περιορίζει τα αναπτυσσόμενα αεροδυναμικά φορτία λόγω της μείωσης που επιφέρει στη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου. Το BTC επιτυγχάνεται είτε μέσω των ιδιοτήτων του υλικού, με μεταβολή του προσανατολισμού των ινών του σύνθετου υλικού στα καπάκια (spar caps) του πτερυγίου, είτε μέσω γεωμετρίας, εισάγοντας κυρτότητα (sweep) στον ελαστικό άξονα του πτερυγίου. Για κάθε μία από τις δύο παραπάνω μεθόδους, προτείνεται τελικά μια βέλτιστη διαμόρφωση ως προς τη μείωση της μάζας.

Ως σημείο εκκίνησης για την εφαρμογή των διαφόρων τροποποιήσεων στο σχεδιασμό του πτερυγίου, χρησιμοποιήθηκε η Α/Γ αναφοράς DTU 10 MW RWT που σχεδιάστηκε στο Πολυτεχνείο της Δανίας (DTU). Κατά την εφαρμογή των μεθόδων παθητικού ελέγχου φορτίων μεταβάλλονται κάποιες παράμετροι σχεδιασμού που τροποποιούν το πτερύγιο αναφοράς. Αυτές οι παράμετροι αποτελούν τις μεταβλητές ως προς τις οποίες πραγματοποιείται η εκάστοτε βελτιστοποίηση, μέσω του αλγορίθμου COBYLA. Ο αλγόριθμος αξιολογεί τις μεταβλητές βάσει μιας αντικειμενικής συνάρτησης που εξετάζει πως μεταβάλλονται οι τιμές του κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu κατά μήκος του τροποποιημένου πτερυγίου συγκριτικά με το πτερύγιο αναφοράς. Για τις αεροελαστικές προσομοιώσεις χρονικού πεδίου του δυναμικού συστήματος χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας hGAST, ο οποίος έχει αναπτυχθεί στο Ε.Μ.Π.

Κατά την αρχική διερεύνηση του αεροελαστικού προβλήματος στην ανεμογεννήτρια αναφοράς, έγινε προσομοίωση της περίπτωσης κανονικής λειτουργίας με ακραίες συνθήκες τυρβώδους ανέμου (DLC1.3). Βάσει του κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu, προκύπτει ότι η δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης του δρομέα εμφανίζεται στην ταχύτητα ανέμου των 13 m/s. Έτσι, μόνο αυτή η περίπτωση προσομοιώνεται εντός του πλαισίου βελτιστοποίησης για ένα διάστημα 25 δευτερολέπτων, προκειμένου να περιοριστεί το υπολογιστικό κόστος.

Η πρώτη μέθοδος παθητικού ελέγχου που εξετάζεται είναι η εισαγωγή γωνίας προσανατολισμού στις ίνες των στρώσεων του μονοδιευθυντικού υλικού των spar caps. Το βέλτιστο πτερύγιο επιμερίστηκε σε 3 τμήματα κατά το μήκος του, σε κάθε ένα από τα οποία εισάγεται μια σταθερή γωνία. Η μέγιστη μείωση μάζας που επετεύχθη ήταν λίγο μεγαλύτερη του 7%.

Η δεύτερη μέθοδος παθητικού ελέγχου που μελετήθηκε ήταν η πρόσδοση κυρτότητας στον ελαστικό άξονα του πτερυγίου με κατεύθυνση αντίθετη της περιστροφής του (backward sweep). Το βέλτιστο πτερύγιο χρησιμοποιεί μια απλή εξίσωση εκθετικής μορφής για την περιγραφή της κατανομής κυρτότητας κατά το μήκος του. Η μέγιστη μείωση μάζας που επετεύχθη σε αυτό πλησιάζει το 13%.

Όσον αφορά τα φορτία που αναπτύσσονται στις ανεμογεννήτριες με τις βελτιστοποιημένες διαμορφώσεις πτερύγωσης, σε γενικές γραμμές, διατηρούνται στα ίδια επίπεδα με αυτά της ανεμογεννήτριας αναφοράς. Επιπλέον οι ελάχιστες τιμές του κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu παραμένουν εντός ορίων σε όλο το εύρος ταχυτήτων ανέμου στο οποίο λειτουργεί η Α/Γ.

Abstract

Nowadays, wind energy has reached a high level of technological development, however, there is still room for improvement in terms of the levelized cost of energy (LCOE). The cost of wind turbines, a significant share of which is the cost of the blades, represents the largest part of the investment in a wind farm. Therefore, reducing the amount of materials used for the construction of the blades is an effective way to reduce the LCOE.

In the present thesis, the decrease of the blade mass is sought through an improved design, which incorporates passive load control strategies in order to achieve the final goal of reducing the LCOE. These strategies are based on the structural bending-torsion coupling (BTC), which limits the developing aerodynamic loads by reducing the angle of attack of the wind. BTC is based either on the material properties by introducing an orientation angle to the fibers of the composite material of the spar caps, or on the geometry by introducing a sweep into the elastic axis of the blade. For each one of the methods mentioned above, an optimal configuration, in terms of mass reduction, is proposed.

As a starting point for the application of the various modifications to the blade design, the DTU 10 MW Reference Wind Turbine, designed by the Technical University of Denmark (DTU), was used. When applying passive load control methods, some design parameters that modify the reference blade are taken into consideration. These parameters represent the variables of the optimization processes performed by the COBYLA algorithm. The algorithm assesses the design variables on the basis of an objective function that examines the Tsai – Wu failure criterion values along the modified blade in comparison with the reference blade. The hGAST code, developed by the National Technical University of Athens (NTUA), was used for the aeroelastic time domain simulations of the dynamic system.

During the initial examination of the aeroelastic problem, a case of normal operation with extreme turbulent wind conditions (DLC1.3) was simulated for the reference wind turbine. Based on the Tsai – Wu failure criterion, it appears that the worst case of rotor charging occurs at a wind speed of 13 m/s. Thus, this case is simulated within the optimization framework for a short period of 25 seconds, in order to minimize the computational cost.

The first passive load control method which was examined, was the introduction of an orientation angle to the fibers of the unidirectional material of spar caps. The optimum blade was divided into 3 sections along its span, in each of which a constant angle value is inserted. The maximum mass reduction achieved was slightly greater than 7%.

The second passive load control method which was studied, was the introduction of sweep into the elastic axis of the blade in an opposite direction to its rotation (backward sweep). The optimum blade uses a simple exponential equation to describe the distribution of sweep along its radius. The maximum mass reduction rate was almost 13%.

Regarding the loads developed in the wind turbines fitted with the optimized blade configurations, they are generally maintained at the same levels as those of the reference wind turbine. Furthermore, the minimum values of the Tsai – Wu failure criterion remain above the acceptable limit throughout the wind speed range in which the wind turbine operates.

1 Εισαγωγή

1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας χάνεται στα βάθη της ιστορίας. Ο άνεμος έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας από τα πανάρχαια χρόνια στη ναυτιλία για την κίνηση ιστιοφόρων πλοίων αλλά και σε αγροτικές εφαρμογές για άντληση νερού ή άλεση σιτηρών με τη χρήση του ανεμόμυλου. [1]

Το 1888 στο Οχάιο των Η.Π.Α. ο Charles F. Brush κατασκεύασε την πρώτη ανεμογεννήτρια για ηλεκτροπαραγωγή. Ο ρότορας της διέθετε 144 ξύλινα πτερύγια, είχε διάμετρο 17 m και πολύ μικρή ταχύτητα περιστροφής (Εικόνα 1.1). Στη Δανία, το 1897, ο Roul la Cour υπήρξε πρωτοπόρος των σύγχρονων Α/Γ (Εικόνα 1.2). Κατασκεύασε Α/Γ με λιγότερα πτερύγια και μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. [2]



Εικόνα 1.1: Brush, 1888, Η.Π.Α. [2]



Εικόνα 1.2: La Cour, 1897, Δανία [2]

Στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου, επίσης στη Δανία, η εταιρία F. L. Smidth παρήγαγε δίπτερες (Εικόνα 1.3) και τρίπτερες Α/Γ (Εικόνα 1.4), τα πτερύγια των οποίων είχαν για πρώτη φορά προφίλ αεροτομών.



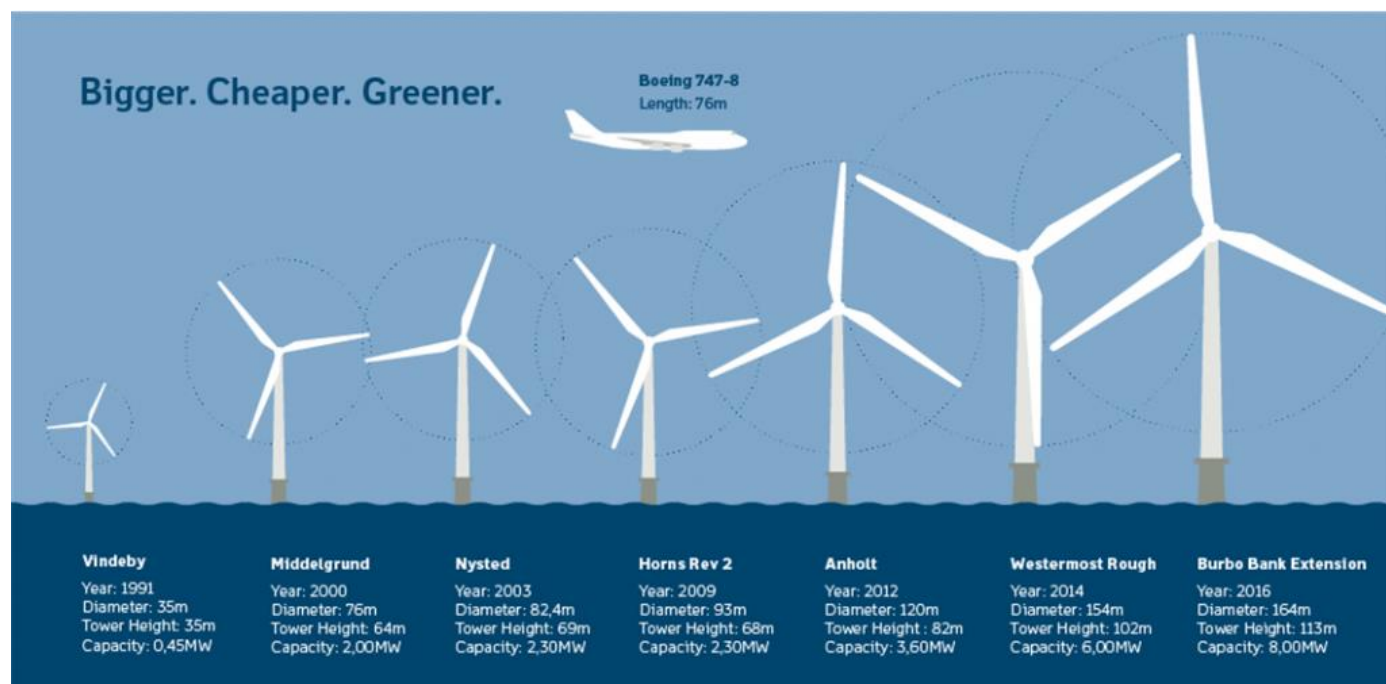
Εικόνα 1.3: Smidth, 1940, Δανία [2]



Εικόνα 1.4: Smidth, 1942, Δανία [2]

Μετά από ένα κενό 40 ετών, κατά τη διάρκεια των οποίων η εξάπλωση των συμβατικών καυσίμων ήταν ραγδαία, η πετρελαϊκή κρίση στις αρχές της δεκαετίας του '70 έφερε ξανά στο προσκήνιο τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Από τότε έως σήμερα σημειώνεται μια αλματώδης ανάπτυξη η οποία ενισχύεται και από την επιτακτική ανάγκη για την προστασία του περιβάλλοντος. Η αιολική ενέργεια προσφέρει τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς ουσιαστική επιβάρυνση για το περιβάλλον. Αποτελεί μία αποτελεσματική και αξιόπιστη τεχνολογία αλλά και την κυρία εναλλακτική ενεργειακή λύση προς την αειφόρο ανάπτυξη και τον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής. [1]

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες επιδεικνύουν υψηλό τεχνολογικό επίπεδο, εξελιγμένους τρόπους παραγωγής, γρήγορη εγκατάσταση, υψηλή διαθεσιμότητα και αξιοπιστία (μικρό ποσοστό αστοχιών). Τα μεγέθη τους κυμαίνονται από λίγα kW έως μερικά MW. Σε 35 χρόνια ύπαρξης των ανεμογεννητριών στην αγορά το μέγεθός τους πολλαπλασιάστηκε όσον αφορά την ονομαστική ισχύ (από 50 kW σε 8 MW) και δεκαπλασιάστηκε όσον αφορά την διάμετρο τους (από 15 m σε 164 m). [1]

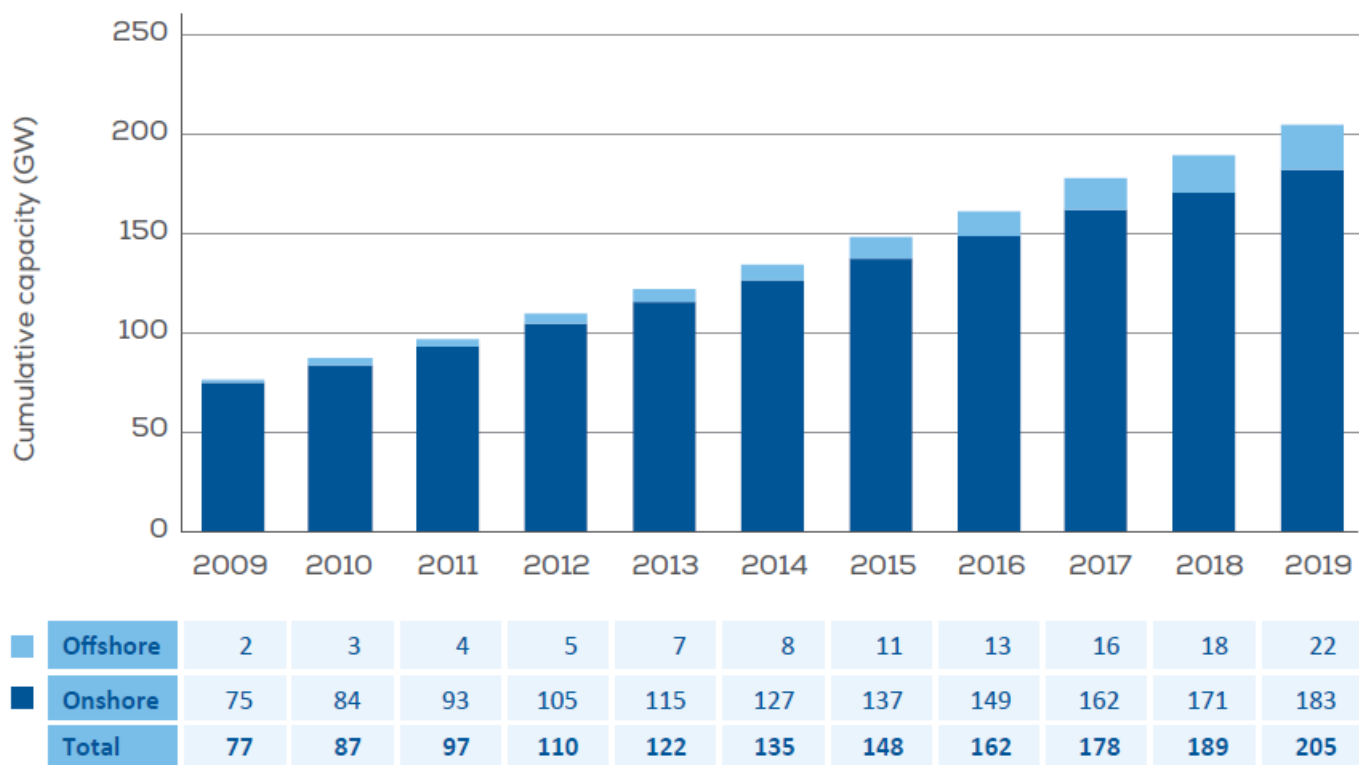


Εικόνα 1.5: Εξέλιξη του μεγέθους των Α/Γ [3]

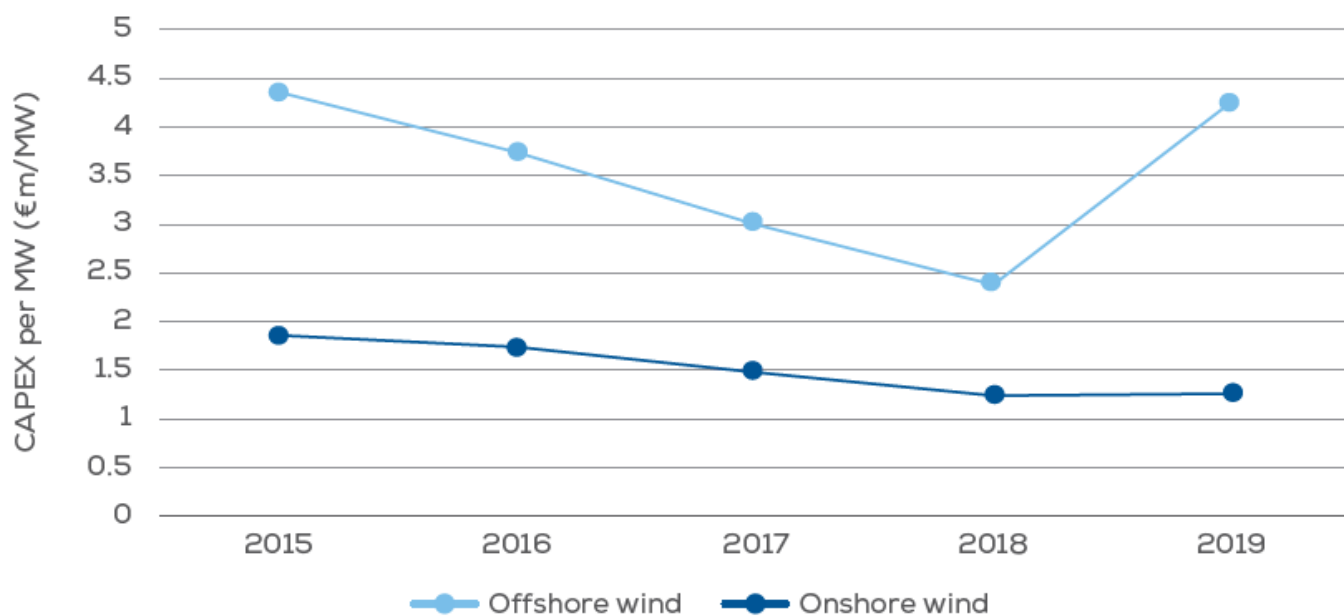
1.2 Το παρόν και το μέλλον της αιολικής ενέργειας

Στις μέρες μας η αιολική ενέργεια έχει φτάσει σε υψηλό βαθμό τεχνολογικής ωρίμανσης. Η τεχνολογική πρόοδος εξακολουθεί να βελτιώνει την απόδοση των ανεμογεννητριών αλλά και να επιτρέπει την διάθεσή τους σε ελκυστικές τιμές και με κόστος παραγόμενης ενέργειας ανταγωνιστικό σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αεροδυναμική απόδοση έχει φτάσει στο μέγιστο βαθμό της, ωστόσο, υπάρχει ακόμα χώρος σε ό,τι αφορά τη μείωση του κόστους συνδυάζοντας μεθόδους μείωσης των φορτίων και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών υλικών. Το κόστος τους ακολουθεί μία σταθερά πτωτική πορεία (Γράφημα 1.2). Στο άμεσο μέλλον αναμένεται να δοθεί ώθηση κυρίως στις υπεράκτιες εφαρμογές, για το λόγο αυτό, σημειώνεται τάση για αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών. [1]

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στη Λευκή Βίβλο για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έθεσε ως στόχο για την αιολική ενέργεια τα 180 GW εγκατεστημένης ισχύος για το 2020 (ο οποίος επετεύχθη 2 έτη νωρίτερα όπως φαίνεται και στο Γράφημα 1.1) και τα 300 GW εγκατεστημένης ισχύος για το 2030. Το 2019, η συνεισφορά της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη ήταν 15% ενώ ο στόχος για το 2030 είναι να αγγίξει το 23%. [1] [4]



Γράφημα 1.1: Εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε GW (χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων) κατά την δεκαετία 2009 – 2019 [4]



Γράφημα 1.2: Κεφαλαιουχικές δαπάνες σε € ανά MW για onshore και offshore εφαρμογές [4]



Εικόνα 1.6: Πρόβλεψη για τη συνεισφορά της αιολικής ενέργειας στη συνολική ζήτηση της Ευρώπης από την EWEA [5]

1.3 Παθητικός έλεγχος φορτίων

Η εξέλιξη των ανεμογεννητριών έχει δείξει ότι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και της απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται μέσω μεγάλων δρομέων, με νέα, μακρύτερα και πιο εύκαμπτα πτερύγια. Η αύξηση της ισχύος των σύγχρονων Α/Γ σε μεγέθη έως 20 MW, απαιτεί τεχνολογικές ανακαλύψεις και καινοτόμες ιδέες σχεδιασμού που συνδυάζουν νέα, προηγμένα υλικά, υβριδικές μεθόδους κατασκευής, νέα σχέδια εσωτερικής δομής των πτερυγίων, αεροτομές υψηλής αεροδυναμικής απόδοσης και τεχνικές ενεργού ή παθητικού ελέγχου των αεροελαστικών φορτίων. Μεταξύ των παραπάνω επιλογών, οι μέθοδοι παθητικού ελέγχου έχουν προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον και έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές στη μείωση των φορτίων. [6] [7]

Τα πτερύγια αποτελούν τα μεγαλύτερα σε μέγεθος περιστρεφόμενα στοιχεία της Α/Γ και κατασκευάζονται με προβλεπόμενη διάρκεια ζωής τα 20-25 έτη. Καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους υποβάλλονται σε μεγάλες παραμορφώσεις και έντονα μη μόνιμη φόρτιση. Παράλληλα, οι διαστάσεις των ανεμογεννητριών τείνουν διαρκώς να αυξάνονται. Καθίσταται, λοιπόν, σημαντική η εξοικονόμηση βάρους στο πτερύγιο. Στη φάση του σχεδιασμού, αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ισχυρότερων υλικών (με ασφαλώς όσο το δυνατόν μικρότερο ειδικό βάρος) και με βελτιωμένη σχεδίαση των δομικών λεπτομερειών και της γεωμετρίας. Στόχος της εισαγωγής στρατηγικών παθητικού ελέγχου φορτίων σε πτερύγια σύγχρονων ανεμογεννητριών είναι ο περιορισμός των φορτίων στη δομή της όλης κατασκευής. [6] [8]

Τα πτερύγια των σύγχρονων ανεμογεννητριών είναι ιδιαίτερες κατασκευές, αποτελούμενες από πολύστρωτες πλάκες σύνθετων πολυμερών υλικών ενισχυμένες με ίνες, ενώ τα μήκη τους πολύ συχνά πλέον ξεπερνούν τα 60 m. Τα ινώδη σύνθετα πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται εκτενώς στη κατασκευή πτερυγίων, αποτελούνται κατά κύριο λόγο από τους εξής συνδυασμούς ίνας – μήτρας: ίνες άνθρακα ή γυαλιού με εποξικές κόλλες. Έχει αποδειχθεί ότι η εφαρμογή τέτοιων δομών τύπου σάντουιτς, βελτιώνει τους δείκτες δυσκαμψίας/μάζας και αντοχής/μάζας, εισάγοντας ταυτόχρονα και την επιθυμητή σύζευξη μεταξύ καμπτικών και στρεπτικών παραμορφώσεων, η οποία επιδρά ευεργετικά στον παθητικό έλεγχο των φορτίων. [6]

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει αξιοποιηθεί μια ποικιλία τεχνικών για την επίτευξη της μείωσης των φορτίων στους δρομείς των σύγχρονων ανεμογεννητριών. Γενικά, οι τεχνικές αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριους κλάδους:

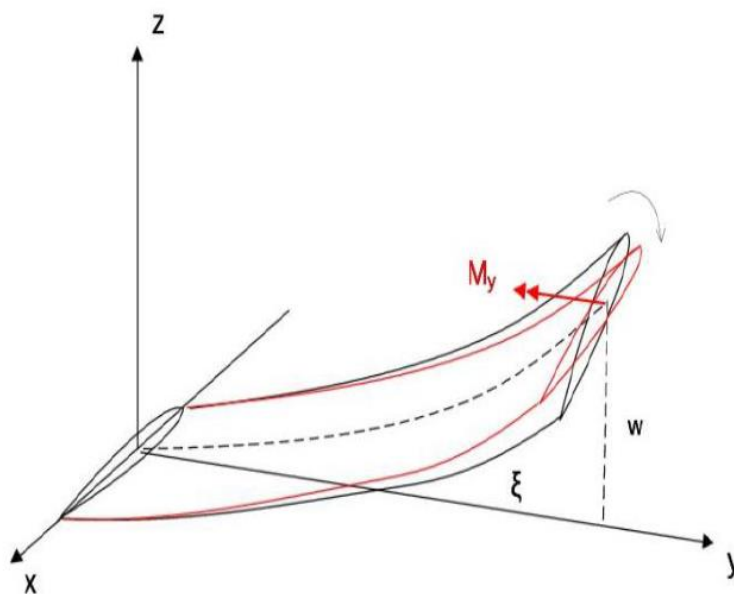
- Μέθοδοι ενεργού ελέγχου φορτίων: ασχολούνται με τεχνολογίες που στόχο έχουν τη μείωση των φορτίων ελέγχοντας ορισμένα εξαρτήματα του δρομέα μέσω του συστήματος ελέγχου της

ανεμογεννήτριας. Ο έλεγχος της γωνίας βήματος (pitch) των πτερυγίων και η χρήση μεταπτερυγίων στη πλευρά εκφυγής εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία. [6]

- Μέθοδοι παθητικού ελέγχου φορτίων: βασίζονται στην ιδέα του σχεδιασμού μιας δομής που, χωρίς πρόσθετα εξαρτήματα, όσο φορτίζεται, θα μειώνει τα φορτία που δέχεται μέσω των παραμορφώσεων της. [6]

Οι παθητικές μέθοδοι ελέγχου των φορτίων έχουν αποδοθεί από την επιστημονική κοινότητα της αεροδυναμικής ενέργειας μέσω του όρου “Aero – elastic Tailoring”. Πρόκειται για μια τεχνική σχεδιασμού μέσω της οποίας οι γεωμετρικές ιδιότητες ή/και η δυσκαμψία μιας αεροδυναμικής δομής συσχετίζονται με τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνονται τα συνολικά δομικά φορτία. Ο όρος “παθητικός” χρησιμοποιείται ουσιαστικά διότι η δομή περιορίζει τα αναπτυσσόμενα φορτία “από μόνη της”, καθώς παραμορφώνεται με έναν συγκεκριμένο τρόπο. [6] [7]

Η ιδέα πίσω από τον παθητικό έλεγχο των φορτίων είναι η εξής: εισάγονται κατάλληλες δομικές αλλαγές στο πτερύγιο, ώστε όταν αυτό φορτίζεται και κάμπτεται εκτός του επιπέδου περιστροφής (κάμψη πτερύγισης – flapwise bending), να στρέφεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε τελικά να μειώνει τη γωνία προσβολής (Εικόνα 1.7). Δημιουργείται επομένως μια δομική σύζευξη κάμψης – στρέψης (bend – twist coupling), η οποία περιορίζει τα αναπτυσσόμενα αεροδυναμικά φορτία λόγω της μείωσης που επιφέρει στη γωνία προσβολής. Δηλαδή, με τον όρο BTC περιγράφουμε τη συμπεριφορά μιας δομής που έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να υπόκειται σε παραμόρφωση στρέψης υπό τη δράση φορτίων κάμψης. [6] [7]



Εικόνα 1.7: Ανάπτυξη ροπής στρέψης καθώς το πτερύγιο κάμπτεται υπό την επίδραση του αεροδυναμικού φορτίου [7]

Στους δρομείς των σύγχρονων Α/Γ οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια, ο παθητικός έλεγχος φορτίων επιτυγχάνεται κάνοντας τα πτερύγια να στρέφονται προς την κατεύθυνση μείωσης της γωνίας προσβολής, όταν κάμπτονται προς την κατεύθυνση του πύργου. Το BTC μπορεί να βασίζεται είτε στο υλικό, εισάγοντας μια γωνία στις ίνες των στρώσεων του μονοδιευθυντικού υλικού στα καπάκια (spar caps) του πτερυγίου, είτε στη γεωμετρία, μέσω εφαρμογής κυρτότητας στον ελαστικό άξονα του πτερυγίου. [6] [7]

Επομένως, κάθε φορά που στρέφονται τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, υπάρχει άμεση επίδραση στη γωνία προσβολής, προκαλώντας αλλαγή των φορτίων και της παραγόμενης ισχύος. Η προοπτική εγκατάστασης πτερυγίων BTC σε σύγχρονες Α/Γ παρέχει τη δυνατότητα βελτιωμένης δέσμευση ενέργειας και μείωσης των φορτίων. Αν και αυτή η σύζευξη μπορεί να επιτευχθεί και με μεθόδους ενεργού ελέγχου, η παθητική προσέγγιση προκρίνεται ως μια πιο αποδοτική εναλλακτική λόγω της απλότητας και της οικονομίας της. [9]

1.4 Στόχοι εργασίας

Δεδομένης της ισχύουσας πολιτικής για την προστασία του περιβάλλοντος, η μείωση του κόστους της ενέργειας είναι το πρωταρχικό μέσο για τη συνεχή ανάπτυξη της βιομηχανίας της αιολικής ενέργειας. Επομένως, ο στόχος αυτός αποτελεί βασικό μέλημα τόσο για τον ακαδημαϊκό, όσο και για τον κατασκευαστικό τομέα. [6] [10]

Το σταθμισμένο κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy) ή σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (Levelized Cost of Electricity) χρησιμοποιείται ως μέτρο για τη σύγκριση διαφόρων μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το LCOE αντιπροσωπεύει το μέσο έσοδο ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που θα απαιτηθεί για την απόσβεση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας μιας μονάδας παραγωγής κατά τη διάρκεια ενός υποτιθέμενου οικονομικού κύκλου ζωής και λειτουργίας. [11]

Για λόγους πληρότητας, δίνονται στη συνέχεια οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τον προσαρμοσμένο στην αιολική ενέργεια δείκτη LCOE:

$$LCOE = \frac{C_{t_0}}{P_{t_0}}$$

Ο αριθμητής του κλάσματος εκφράζει την αξία όλων των δαπανών που σχετίζονται με το αιολικό πάρκο τη στιγμή της επένδυσης (χρόνος επενδυτικής απόφασης: t_0), ενώ ο παρονομαστής εκφράζει την παρούσα αξία της παραγωγής ενέργειας. Ειδικότερα:

$$C_{t_0} = \sum_{year}^T \frac{I_{year} + O_{year} + A_{year}}{(1 + w_n)^{year}} = \frac{I_0 + O_0 + A_0}{(1 + w_n)^0} + \dots + \frac{I_T + O_T + A_T}{(1 + w_n)^T}$$

$$P_{t_0} = \sum_{year}^T \frac{AEP_{year}}{(1 + w_r)^{year}} = \frac{AEP_0}{(1 + w_r)^0} + \frac{AEP_1}{(1 + w_r)^1} + \dots + \frac{AEP_T}{(1 + w_r)^T}$$

Το κόστος και η παραγωγή ενέργειας αθροίζονται ετησίως για μια διάρκεια ζωής T ετών. Η παρούσα αξία των δαπανών περιλαμβάνει:

- I_{year} , το αρχικό κόστος επένδυσης συμπεριλαμβανομένων:
 - των αναπτυξιακών δαπανών (DEVEX), δηλαδή όλων των εξόδων που δαπανώνται για την ανάπτυξη και το σχεδιασμό του έργου.
 - τις κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX), δηλαδή το κόστος που δαπανάται για την κατασκευή και την προμήθεια του εξοπλισμού.
- O_{year} , τις λειτουργικές δαπάνες (OPEX) που σχετίζονται με τη λειτουργία και τη συντήρηση του αιολικού πάρκου.
- A_{year} , το κόστος παροπλισμού (ABEX)

Η AEP_{year} εκφράζει τη ετήσια παραγωγή ενέργειας (Annual Energy Production) του αιολικού πάρκου, η οποία αποδίδει τελικά τα ετήσια έσοδα της επένδυσης. Τα w_n και w_r είναι το ονομαστικό και το πραγματικό σταθμισμένο μέσο κόστος κεφαλαίου, αντίστοιχα, και συνδέονται με την ακόλουθη εξίσωση:

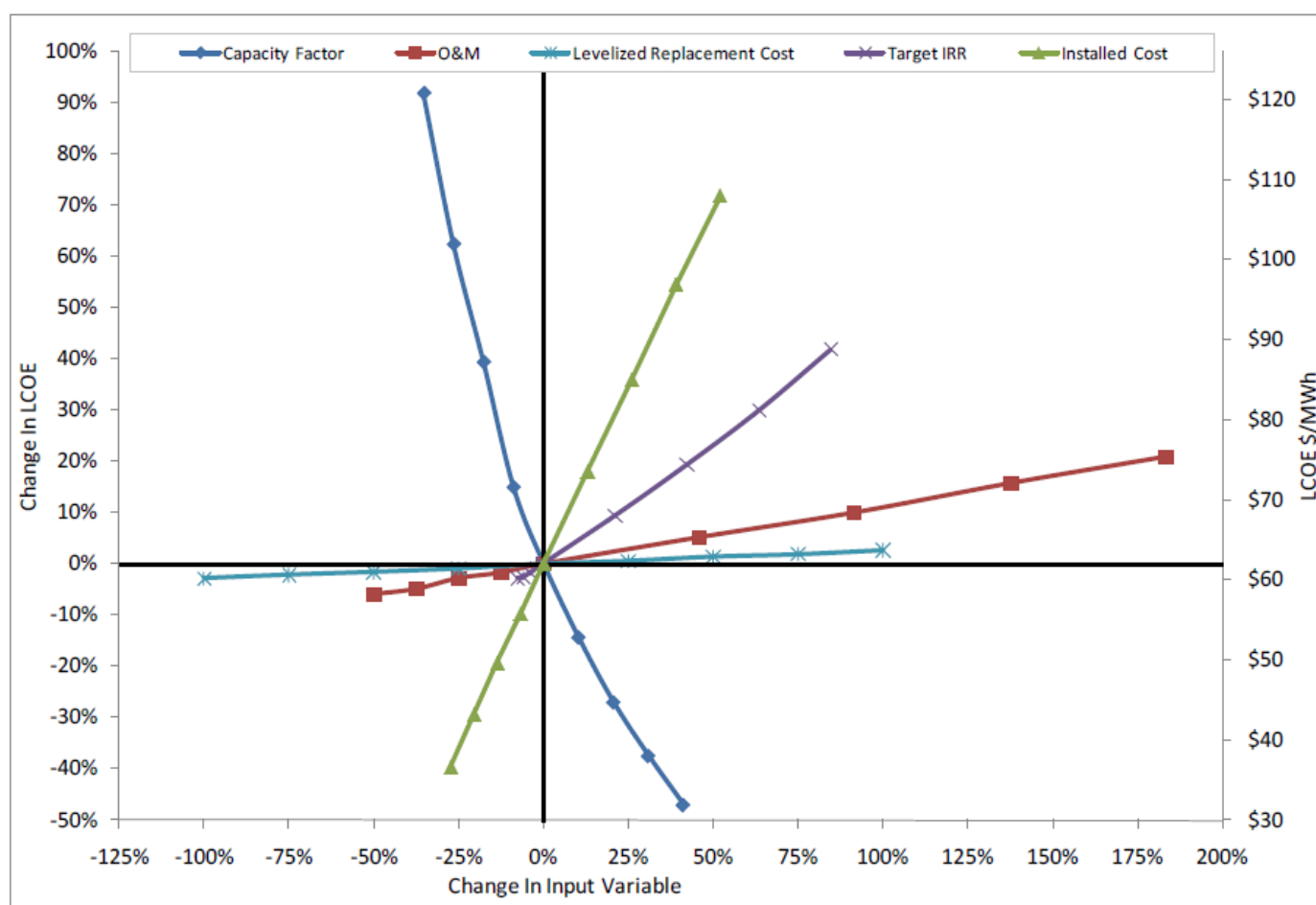
$$w_r = \frac{1 + w_n}{1 + I} - 1$$

όπου I αντιπροσωπεύει το ποσοστό πληθωρισμού. [6]

Το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL) πραγματοποίησε μια σύγκριση μεταξύ των σχετικών επιδράσεων διαφόρων οικονομικών, τεχνολογικών και αιολικών μεταβλητών στο σταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCOE). Οι μεταβλητές που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν:

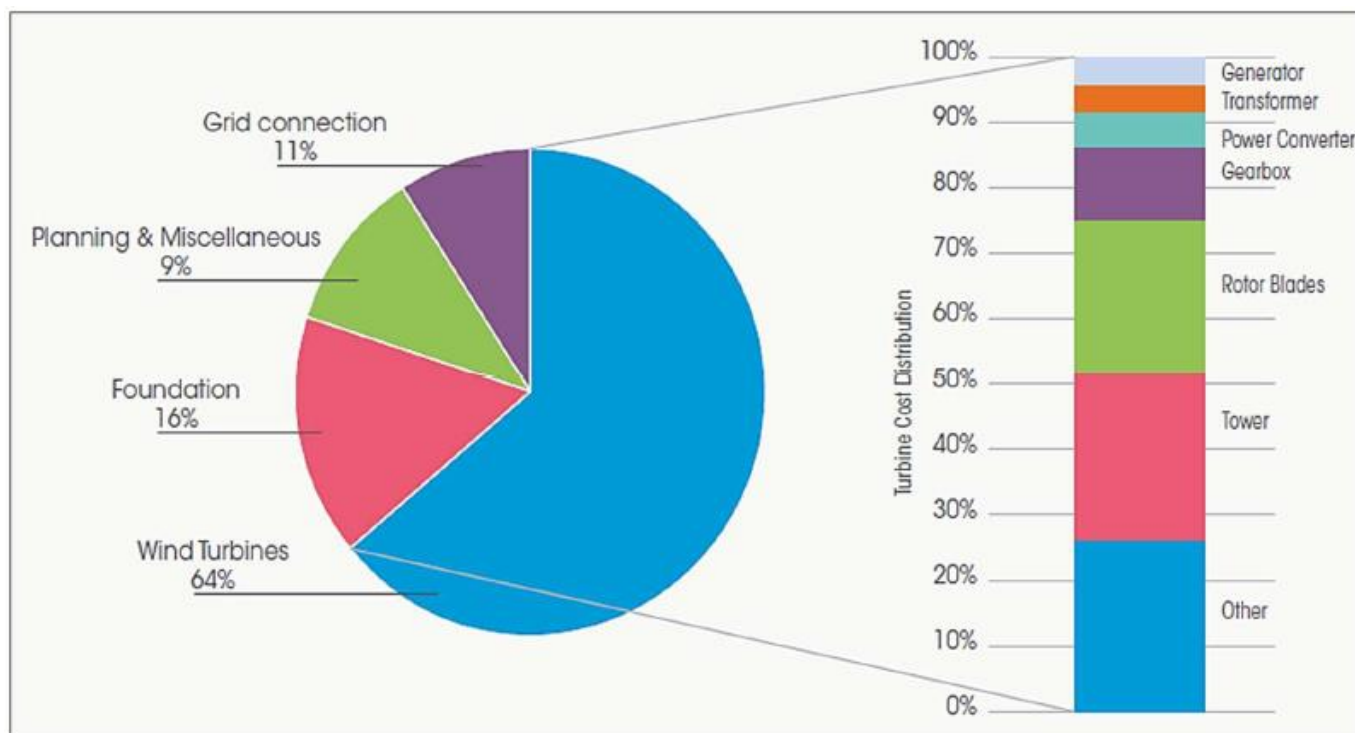
- Τεχνικές μεταβλητές
 - Συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας (Capacity Factor)
 - Συνολικό εγκατεστημένο κόστος (Total Installed Cost)
 - Λειτουργία & Συντήρηση (Operation & Maintenance)
 - Σταθμισμένο Κόστος Αντικατάστασης (Levelized Replacement Cost)
- Οικονομικές μεταβλητές
 - Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)
 - Επιτόκιο (interest rate)
 - Διάρκεια δανείου (loan duration)

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας των μεταβλητών δείχνουν ότι μεταξύ των παραμέτρων εισαγωγής, ο συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας και το εγκατεστημένο κόστος έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στο εκτιμώμενο LCOE (Γράφημα 1.3). [12]



Γράφημα 1.3: Ανάλυση ευαισθησίας κύριων μεταβλητών που επηρεάζουν το LCOE από το NREL [12]

Το μεγαλύτερο μέρος της επένδυσης για την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου αντιπροσωπεύει το κόστος αγοράς των ανεμογεννητριών. Το μερίδιο τους κυμαίνεται εντός του εύρους 60 – 80% για χερσαία έργα και 30 – 50% για υπεράκτια έργα. Εάν αναλυθεί περαιτέρω το κόστος των Α/Γ, διαπιστώνεται ότι τα πτερύγια αποτελούν τουλάχιστον το 20% αυτού του μεριδίου (Γράφημα 1.4). Άρα, ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης του I_{year} και κατ' επέκταση του LCOE είναι η μείωση της ποσότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων, δηλαδή της μάζας τους. [6]



Γράφημα 1.4: Ανάλυση του κόστους επένδυσης χερσαίων αιολικών πάρκων [6]

Μία άλλη μέθοδος για τη μείωση του LCOE είναι η αύξηση της διαμέτρου του ρότορα για την παραγωγή περισσότερης ισχύος. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της ετήσιας παραγωγής ενέργειας AEP_{year} , κατά τη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας, τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή του δείκτη LCOE. [6] [10]

Συνάγεται, επομένως, ότι ο καινοτόμος σχεδιασμός δρομέων ανεμογεννητριών μπορεί να έχει μια θετική επίδραση στη μείωση του κόστους της αιολικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, ο βελτιωμένος σχεδιασμός των πτερυγίων μπορεί να αυξήσει την ετήσια παραγωγή ενέργειας ή να μειώσει το κόστος επένδυσης παρέχοντας πτερύγια χαμηλότερης μάζας ή και τα δύο παραπάνω. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται έλεγχος και περιορισμός των φορτίων που δρουν στη κατασκευή. [6]

Σε αυτό το πλαίσιο, ο παθητικός έλεγχος των φορτίων αποτελεί ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού των σύγχρονων πτερυγίων. Ένας δρομέας ανεμογεννήτριας που περιορίζει παθητικά τα φορτία μπορεί σίγουρα να θεωρηθεί ως μια οικονομικά αποδοτική λύση, καθώς επιτρέπει τη χρήση ελαφρύτερων δομών και επιπλέον δεν απαιτεί την προσθήκη ενεργοποιητών ή άλλων μηχανικά ελεγχόμενων εξαρτημάτων. [6]

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, για να επιτευχθεί ο τελικός στόχος μείωσης του LCOE, επιδιώκεται η μείωση της μάζας των πτερυγίων μέσω βελτιωμένου σχεδιασμού τους στον οποίο ενσωματώνονται μέθοδοι παθητικού ελέγχου φορτίων.

1.5 Διάρθρωση εργασίας

Στο 1^ο Κεφάλαιο, αρχικά, παρουσιάζεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή όσον αφορά την εξέλιξη της αιολικής ενέργειας και στη συνέχεια, φτάνοντας στο σήμερα, αναδεικνύονται οι σύγχρονες ανάγκες του τομέα. Αυτές αφορούν κυρίως τη μείωση των φορτίων που δέχονται οι ανεμογεννήτριες έτσι ώστε αφενός να μειωθεί περαιτέρω το κόστος της αιολικής ενέργειας, καθιστώντας την πιο ανταγωνιστική, και αφετέρου να εξυπηρετηθεί η τάση μετάβασης σε υπεράκτιες εφαρμογές με μεγαλύτερα μεγέθη μηχανών, που σημειώνεται τα τελευταία χρόνια. Ως ιδανική λύση στο εγχείρημα αυτό προκρίνονται οι παθητικές μέθοδοι ελέγχου φορτίων οι οποίες βασίζονται στη σύζευξη κάμψης – συστροφής (BTC).

Στο 2^ο Κεφάλαιο δίνονται οι κύριες παράμετροι της ανεμογεννήτριας αναφοράς που χρησιμοποιείται ως βάση εκκίνησης για την εφαρμογή των μεθόδων παθητικού ελέγχου φορτίων και περιγράφεται εν συντομία το ύδρο-σέρβο-αέρο-ελαστικό εργαλείο προσομοίωσης hGAST. Ακόμη, γίνεται αναφορά στα σύνθετα υλικά τύπου sandwich των πτερυγίων και στο κριτήριο αστοχίας Tsai – Wu, με το οποίο ελέγχονται τα μέγιστα φορτία των τροποποιημένων πτερυγίων. Τέλος, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης COBYLA που χρησιμοποιείται για την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού των νέων πτερυγίων καθώς και η αλληλουχία βημάτων προς την επίτευξη του στόχου αυτού.

Στο 3^ο Κεφάλαιο εξετάζεται η πρώτη μέθοδος παθητικού ελέγχου φορτίων, αρχή της οποίας συνιστά η εισαγωγή μιας γωνίας προσανατολισμού στις ίνες του πολυστρωματικού σύνθετου υλικού των spar caps. Με την χρήση αυτής της μεθόδου διεξάγονται διάφορες διαδικασίες βελτιστοποίησης με στόχο τη μείωση των φορτίων, τη μείωση της μάζας αλλά και τον συνδυασμό των δύο παραπάνω. Τελικά, παρουσιάζεται μια βέλτιστη διαμόρφωση, ως αντιπρόσωπος αυτής της μεθόδου ελέγχου, με την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή μείωση μάζας του πτερυγίου.

Στο 4^ο Κεφάλαιο προχωράμε στη διερεύνηση της δεύτερης στρατηγικής παθητικού ελέγχου φορτίων η οποία βασίζεται στην κυρτότητα του ελαστικού άξονα του πτερυγίου. Σε ένα πλαίσιο βελτιστοποιήσεων, με την υιοθέτηση της στρατηγικής αυτής, επιδιώκεται και πάλι η μείωση της τελικής μάζας του πτερυγίου διατηρώντας τα φορτία σε επίπεδα ίδια με αυτά του πτερυγίου αναφοράς. Ο σχεδιασμός με τον οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη μείωση μάζας, αποτελεί τη βέλτιστη λύση της δεύτερης μεθόδου περιορισμού των φορτίων.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ολοκληρωμένων προσομοιώσεων που έγιναν για τις βέλτιστες διαμορφώσεις που προέκυψαν από τα δύο προηγούμενα κεφάλαια. Τα δύο πτερύγια συγκρίνονται ως προς τη μείωση μάζας που επετεύχθη, τα μέγιστα φορτία που αναπτύσσονται σε αυτά και την ικανοποίηση του κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu.

Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο προτείνονται κάποιες προεκτάσεις που θα μπορούσαν να εξεταστούν ως συνέχεια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

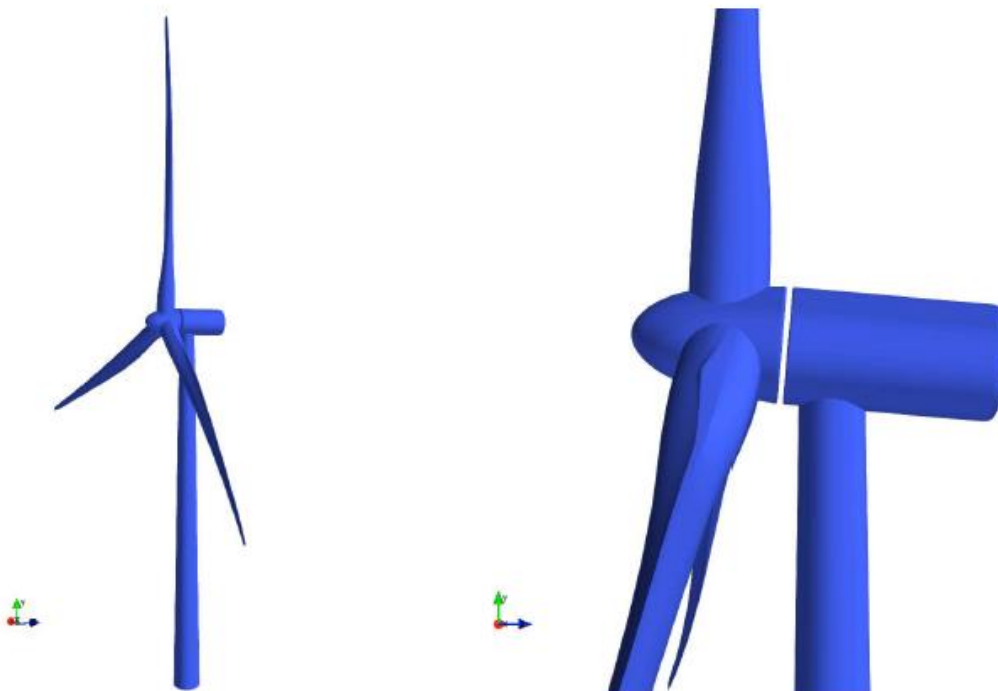
2 Μεθοδολογία

2.1 Ανεμογεννήτρια αναφοράς DTU 10 MW

Ως βάση για αυτή τη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η ανεμογεννήτρια DTU 10 MW RWT. Πρόκειται για μία τρίπτερη Α/Γ, οριζοντίου άξονα και ανάντι (upwind) διάταξης (*Εικόνα 2.1*). Αποτέλεσε το σημείο εκκίνησης για την εφαρμογή των διαφόρων τροποποιήσεων/βελτιστοποιήσεων στο σχεδιασμό του πτερυγίου, η αποτελεσματικότητα των οποίων αξιολογήθηκε σε κάθε περίπτωση συγκρίνοντας το νέο πτερύγιο με αυτό της ανεμογεννήτριας αναφοράς.

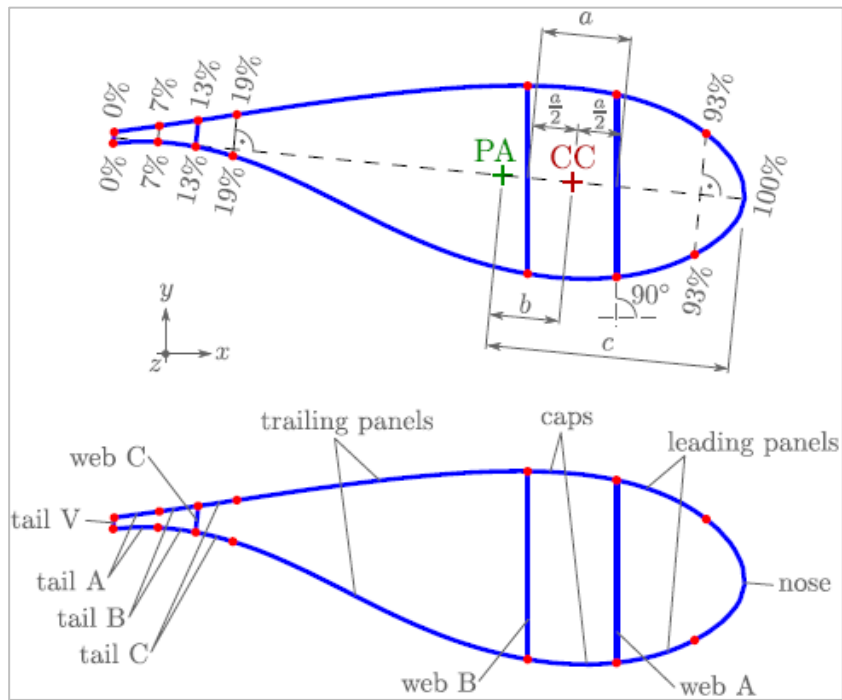
Η ανεμογεννήτρια αναφοράς σχεδιάστηκε στο Πολυτεχνείο της Δανίας (Technical University of Denmark). Σκοπός ήταν να καταστεί εφικτή η πρόσβαση σε έναν “παραδοσιακά” σχεδιασμένο δρομέα με αρκετά χαμηλό βάρος ώστε να υπάρχει μία βάση σχεδιασμού και σύγκρισης για νέα, βελτιστοποιημένα σχέδια.

Καθώς δεν υπήρχε ανεμογεννήτρια τέτοιου μεγέθους, δεν ήταν δυνατόν ο σχεδιασμός να βασιστεί σε δεδομένα από υπάρχουσες ανεμογεννήτριες. Έτσι, ακολουθήθηκε μία διαδικασία αλλαγής κλίμακας της ανεμογεννήτριας αναφοράς NREL 5 MW [13] εφαρμόζοντας κλασικούς κανόνες γεωμετρικής ομοιότητας. Ακόμη, ο αεροδυναμικός σχεδιασμός του ρότορα βασίστηκε στη θεωρία δίσκου ορμής (Blade Element Momentum Theory). [14]

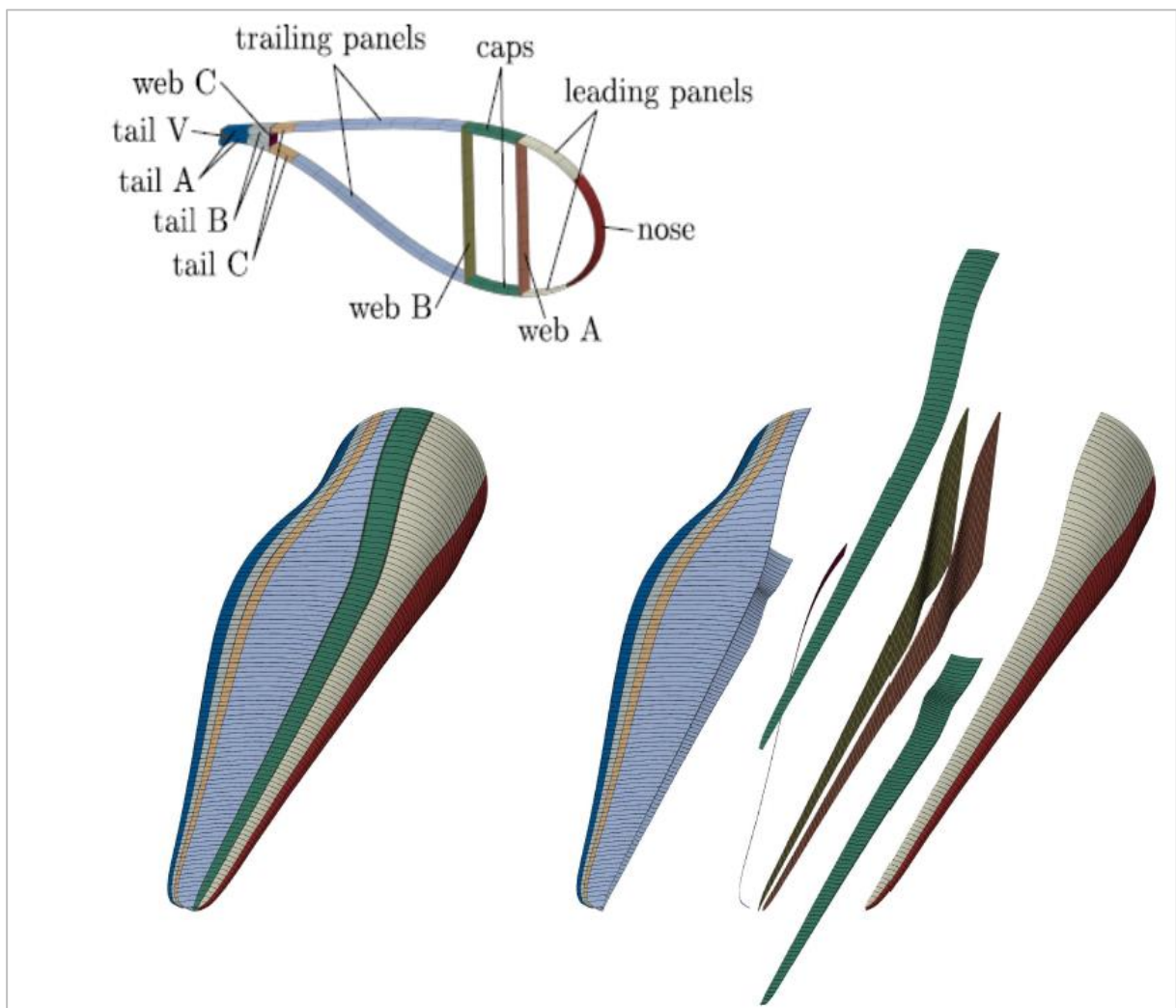


Εικόνα 2.1: Plots της ανεμογεννήτριας αναφοράς [14]

Το πτερύγιο αναφοράς είναι κατασκευασμένο από σύνθετο υλικό με δομή σάντουιτς. Το υλικό του πυρήνα είναι ξύλο μπάλας (balsa) ενώ οι εξωτερικές στρώσεις αποτελούνται από ενισχυμένες ίνες υάλου (E-glass) σε εποξική (epoxy) μήτρα. Η διάταξη καθορίστηκε ως μια αλληλουχία μονοδιευθυντικών ελασμάτων τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε το σύνολό τους να έχει ίνες σε πολλαπλές γωνίες προσανατολισμού. Τα caps τοποθετήθηκαν περίπου στο μέγιστο πάχος της αεροτομής για να επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή σε κάμψη πτερύγισης (flapwise bending). Τα caps οριοθετούνται από τις δοκούς διάτμησης (shear webs) A και B, οι οποίες σχηματίζουν γωνία 90° με τον global άξονα x, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.2*. Οι περιοχές Tail A, Tail B και Tail C εκτείνονται από 0% έως 7%, από 7% έως 13% και από 13% έως 19% του μήκους της χορδής, αντίστοιχα. Η περιοχή της μύτης εκτείνεται από το 93% έως το 100% του μήκους της χορδής. [14]



Εικόνα 2.2: Εσωτερική γεωμετρία πτερυγίου [14]



Εικόνα 2.3: Περιοχές πτερυγίου [14]

Πίνακας 2.1: Κύρια χαρακτηριστικά DTU 10 MW RWT [14]

Wind Regime	IEC Class 1A
Rotor Orientation	Clockwise rotation - Upwind
Control	Variable Speed, Collective Pitch
Cut in wind speed	4 m/s
Cut out wind speed	25 m/s
Rated wind speed	11.4 m/s
Rated power	10 MW
Number of blades	3
Rotor Diameter	178.3 m
Hub Diameter	5.6 m
Hub Height	119.0 m
Drivetrain	Medium Speed, Multiple-Stage Gearbox
Minimum Rotor Speed	6.0 rpm
Maximum Rotor Speed	9.6 rpm
Maximum Generator Speed	480.0 rpm
Gearbox Ratio	50
Maximum Tip Speed	90.0 m/s
Hub Overhang	7.1 m
Shaft Tilt Angle	5.0 deg.
Rotor Precone Angle	-2.5 deg.
Blade Prebend	3.332 m
Rotor Mass	227962 kg
Nacelle Mass	446036 kg
Tower Mass	628442 kg

2.2 Προσομοίωση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας μέσω του hGAST

Για τη μελέτη της εφαρμογής των μεθόδων παθητικού ελέγχου φορτίων απαιτούνται μη-γραμμικές αεροελαστικές προσομοιώσεις χρονικού πεδίου του συστήματος της ανεμογεννήτριας ώστε να ληφθούν οι κατανομές του φορτίου κατά μήκος των πτερυγίων. Για τις προσομοιώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας hGAST ο οποίος αναπτύχθηκε στο Ε.Μ.Π. [6] [7]

Το hGAST είναι μια γενική πλατφόρμα για την ύδρο-σέρβο-αέρο-ελαστική προσομοίωση υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Τα επιμέρους πρότυπα που την απαρτίζουν, δηλαδή το αεροδυναμικό, το υδροδυναμικό, το ελαστο-δυναμικό και το πρότυπο αυτομάτου ελέγχου εξετάζονται χωριστά και στη συνέχεια συνδυάζονται επιβάλλοντας την κατάλληλη μη-γραμμική σύζευξη στα σημεία αλληλεπίδρασης τους. Μέσω του hGAST πραγματοποιούνται μη-γραμμικοί υπολογισμοί στο πεδίο του χρόνου, καθώς και ιδιοδιανυσματική ανάλυση και ανάλυση ευστάθειας στη βάση συνεπούς διαδικασίας γραμμικοποίησης. Καθορίζοντας την εξωτερική περιβαλλοντική διέγερση (συνθήκες αέρα, κυμάτων και θαλάσσιων ρευμάτων), οι υπολογισμοί στο πεδίο του χρόνου επιτρέπουν την εκτίμηση των φορτίων κόπωσης και των ακραίων φορτίων της κατασκευής. [15]

2.2.1 Μοντελοποίηση δυναμικού συστήματος

Το πλήρες δυναμικό σύστημα θεωρείται συνδυασμός αλληλεπιδρώντων στοιχείων, ο οποίος περιλαμβάνει:

- τη ροή του αέρα που αλληλεπιδρά με το τμήμα της δομής πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η αλληλεπίδραση της ροής του αέρα με τον ρότορα που παρέχει τα αεροδυναμικά φορτία προσομοιώνεται είτε από τη Θεωρία Δίσκου Ορμής (BEM) είτε με τη λεπτομερέστερη μέθοδο των στοιχείων στροβιλότητας με ελεύθερο ομόρρο.
- τη ροή του νερού (κύματα και ρεύματα) που αλληλεπιδρά με τη βυθισμένη σταθερή ή πλωτή δομή του συστήματος.
- τη στερεά δομή του συστήματος που αλληλεπιδρά αφενός με τις ροές αέρα και νερού και αφετέρου με τη γεννήτρια και το σύστημα ελέγχου. Η συμπαγής κατασκευή περιλαμβάνει ως υποσυστήματα: τα πτερύγια, το σύστημα μετάδοσης κίνησης, τον πύργο, την υποδομή και τις γραμμές πρόσδεσης, στην περίπτωση πλωτής ανεμογεννήτριας.
- τη δομή του θαλάσσιου πυθμένα που αλληλεπιδρά με τις γραμμές πρόσδεσης των πλωτών ανεμογεννητριών ή με την υποδομή των bottom-fixed ανεμογεννητριών.
- το σύστημα ελέγχου που καθορίζει στις περισσότερες περιπτώσεις το βήμα (pitch) για κάθε πτερύγιο και τη ροπή της γεννήτριας.
- το ηλεκτρικό σύστημα, η μοντελοποίηση του οποίου περιλαμβάνει τη γεννήτρια και τη σύνδεση με το δίκτυο και δίνει μια χαρακτηριστική συνάρτηση για τη ροπή της γεννήτριας.

Η συμπεριφορά κάθε μέρους αλλά και του συστήματος ως σύνολο ορίζεται από την κατάστασή του που περιλαμβάνει όλους τους απαραίτητους βαθμούς ελευθερίας. Οι εξισώσεις που διέπουν το σύστημα έχουν τη μορφή ενός συνόλου διαφορικών εξισώσεων εξέλιξης 1^{ης} τάξης:

$$\frac{d}{dt}\tilde{u} + A(\tilde{u})\tilde{u} = f$$

όπου το \tilde{u} δηλώνει συγκεντρωτικά όλους τους βαθμούς ελευθερίας, το $A(\tilde{u})$ είναι ένα κατάλληλα ορισμένο μητρώο που περιλαμβάνει όλες τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του συστήματος και το f περιέχει όλους τους εξωτερικούς όρους διέγερσης.

Για ένα σύστημα σε δυναμική ισορροπία, ορίζονται περιορισμοί συνέχειας τόσο για την κινηματική όσο και για τη δυναμική του. Η κινηματική σχετίζεται με μετακινήσεις και περιστροφές, ενώ η δυναμική σχετίζεται με τη μεταφορά φορτίου που περιλαμβάνει δυνάμεις και ροπές. [15]

2.2.2 Αεροδυναμικό πρότυπο

Η πιο διάσημη και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον υπολογισμό της αεροδυναμικής φόρτισης των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας είναι η λεγόμενη θεωρία δίσκου ορμής και στοιχείων πτερυγίωσης (Blade Element Momentum Theory – BEMT). Καταλήγει σε δύο μη-γραμμικές εξισώσεις που επιλύονται επαναληπτικά:

$$dT = N \frac{\rho U_{eff}^2}{2} (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) c dr = 4\pi \rho U_{\infty}^2 a (1-a) r dr$$

$$dQ = N \frac{\rho U_{eff}^2}{2} (C_L \cos \phi - C_D \sin \phi) cr dr = 4\pi \rho \Omega U_{\infty} a' (1-a) r^3 dr$$

όπου dT και dQ η ώση και η ροπή ενός δακτυλιοειδούς αγωγού ακτίνας dr , N ο αριθμός των πτερυγίων, ρ η πυκνότητα του αέρα, U_{eff} η πραγματική ταχύτητα, U_{∞} η αδιατάρακτη ταχύτητα ανέμου, C_L και C_D οι συντελεστές άνωσης (lift) και οπισθέλκουσας (drag) αντίστοιχα, ϕ η γωνία μεταξύ της πραγματικής ταχύτητας και του επιπέδου του ρότορα, r η ακτινική θέση κάθε στοιχείου πτερυγίου σε σχέση με την πλήμνη, c το μήκος της τοπικής χορδής και Ω η ταχύτητα περιστροφής. [15]

Ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a εκφράζει τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου καθώς περνά μέσα από το δίσκο του ρότορα, ενώ ο συντελεστής περιφερειακής επαγωγής a' την περιστροφή που προστίθεται στη ροή από τον ρότορα. Η πραγματική ταχύτητα U_{eff} και η γωνία ϕ (Εικόνα 2.4) ορίζονται ως εξής:

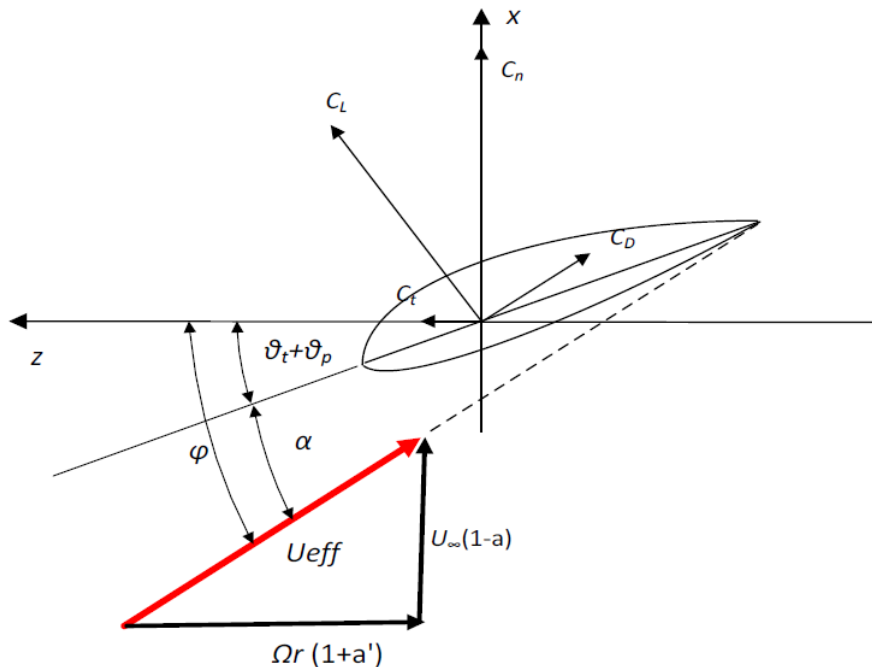
$$U_{eff} = \sqrt{[U_{\infty}(1-a)]^2 + [\Omega r(1+a')]^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{(1-a)U_{\infty}}{(1+a')\Omega r} \right]$$

Η γωνία πρόσπτωσης α που χρησιμοποιείται για να οριστούν οι συντελεστές C_L και C_D είναι:

$$\alpha = \phi - (\theta_t + \theta_p)$$

Όπου θ_t και θ_p η τοπική γωνία twist και η γωνία βήματος (pitch) αντίστοιχα. [15]

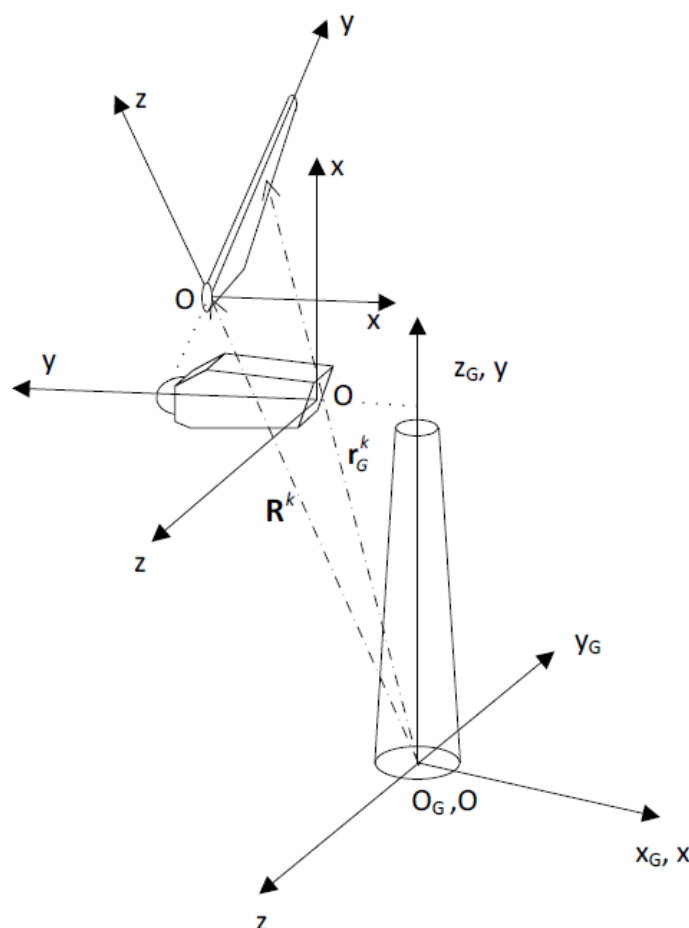


Εικόνα 2.4: Πραγματικές συνθήκες πρόσπτωσης της ροής του αέρα [15]

2.2.3 Ελαστο-δυναμικό πρότυπο

Στον hGAST, η ανεμογεννήτρια θεωρείται ως δυναμικό σύστημα πολλαπλών συνιστωσών, η συναρμολόγηση των οποίων πραγματοποιείται σύμφωνα με το μοντέλο πολλαπλών σωμάτων (multi-body model). Συνίσταται στην εξέταση κάθε εξαρτήματος ξεχωριστά, αλλά υπόκειται σε συγκεκριμένες κινηματικές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης που επιβάλλονται στα σημεία σύνδεσης. [7] [16]

Η δομική μοντελοποίηση των ανεμογεννητριών βασίζεται σχεδόν αποκλειστικά στη θεωρία δοκού (beam theory). Όλα τα εύκαμπτα εξαρτήματα διαμορφώνονται ως δομές δοκού Timoshenko που υπόκεινται σε κάμψη σε δύο κατευθύνσεις, διάτμηση, εφελκυσμό και στρέψη. Οι δοκοί χωρίζονται σε έναν αριθμό διασυνδεδεμένων “υπό-σωμάτων” (sub-bodies). Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί σε λεπτές συνιστώσες όπως τα πτερύγια ή ο πύργος. Ωστόσο, ορισμένα εξαρτήματα, όπως η πλήμνη, ο κλωβός (nacelle) ή το κιβώτιο ταχυτήτων, δεν ταιριάζουν στις παραδοχές της θεωρίας δοκού. Στις περιοχές αυτές εφαρμόζεται πλήρης τρισδιάστατη δομική μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). [15]



Εικόνα 2.5: Μοντέλο πολλαπλών σωμάτων με local και global συστήματα συντεταγμένων [15]

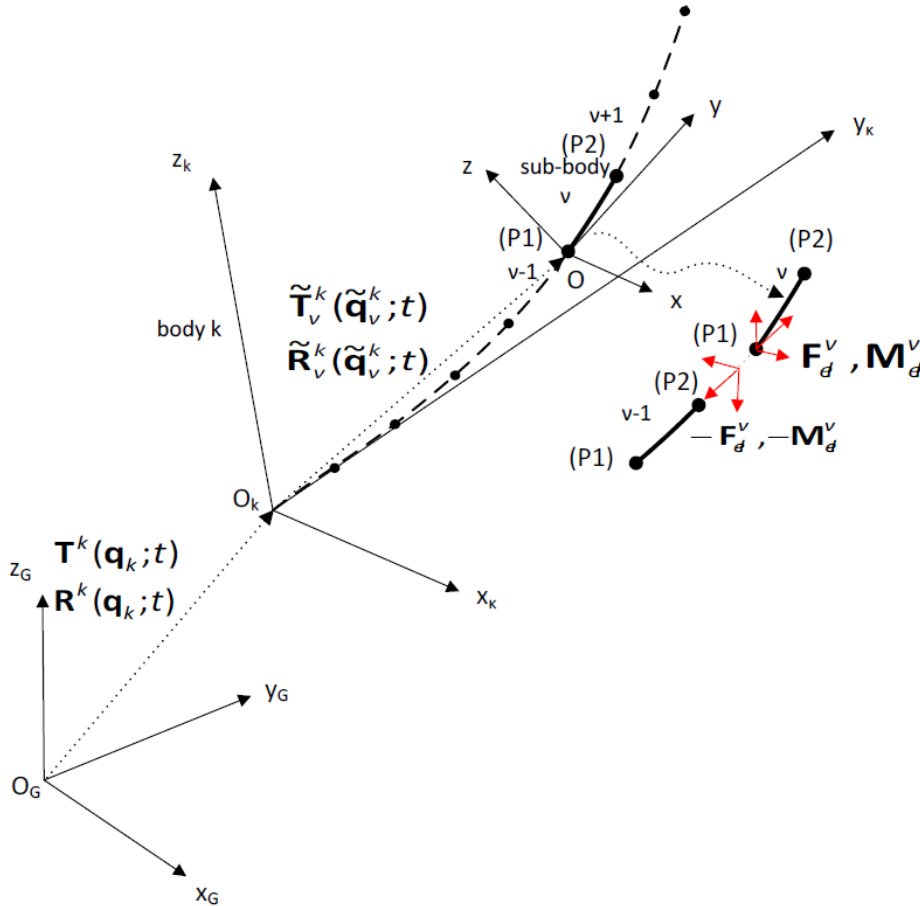
Κάθε υπό-εξάρτημα μπορεί να αντιπροσωπεύει μια φυσική δομή της ανεμογεννήτριας (δηλαδή τον πύργο, τον άξονα, ένα πτερύγιο, την υποδομή, μια γραμμή πρόσδεσης) ή ένα μέρος αυτού. Ένα τοπικό (local) σύστημα συντεταγμένων $[Oxyz]$ τίθεται στην αρχή κάθε υποσυστήματος, f οποίο ορίζονται οι τοπικές ελαστικές παραμορφώσεις (Εικόνα 2.5). Έστω ότι το R^k δηλώνει το διάνυσμα θέσης της αρχής $[Oxyz]$ του στοιχείου “ k ” και το T^k το μητρώο περιστροφής από το τοπικό στο αδρανειακό (global) σύστημα συντεταγμένων. Τότε, το διάνυσμα θέσης r_G^k ενός σημείου στο στοιχείο “ k ” σε σχέση με το αδρανειακό πλαίσιο $[O_G x_G y_G z_G]$, ορίζεται ως:

$$r_G^k = R^k + T^k \cdot r^k$$

Η σύνθεση πολλαπλών σωμάτων μπορεί να επεκταθεί και στο επίπεδο των ίδιων των συστατικών. Με αυτόν τον τρόπο, τα μεγάλα εύκαμπτα υποσυστήματα που υφίστανται σημαντικές παραμορφώσεις, όπως τα πτερύγια, χωρίζονται σε έναν αριθμό διασυνδεδεμένων υπό-σωμάτων, καθένα από τα οποία θεωρείται ως ξεχωριστό στοιχείο δοκού. Κάθε υπό-σώμα έχει το δικό του σύστημα συντεταγμένων $[Oxyz]$. Το πρώτο άκρο (P1) του υποσώματος θεωρείται ως η αρχή O ενώ το δεύτερο άκρο (P2) θεωρείται ως ελεύθερο άκρο.

Το σύστημα συντεταγμένων $[Oxyz]$ του υπο-σώματος “ v ” του σώματος “ k ” ορίζεται σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων $[O_k x_k y_k z_k]$ του σώματος από το διάνυσμα θέσης της αρχής του \tilde{R}_v^k και ένα μητρώο περιστροφής \tilde{T}_v^k (Εικόνα 2.6). Το διάνυσμα θέσης ενός τυχαίου σημείου του υπο-σώματος “ v ” του σώματος “ k ” γράφεται σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων $[O_G x_G y_G z_G]$ ως:

$$r_{G,v}^k = R^k(q_k, t) + T^k(q_k, t) \cdot \{ \tilde{R}_v^k(\tilde{q}_v^k, t) + \tilde{T}_v^k(\tilde{q}_v^k, t) \cdot r_v^k \}$$



Εικόνα 2.6: Μοντέλο πολλαπλών σωμάτων σε επίπεδο υπό-σώματος [15]

Εάν ένα συστατικό διαιρεθεί σε έναν αρκετά μεγάλο αριθμό υπό-σωμάτων, τότε οι μετατοπίσεις και οι περιστροφές, σε σχέση με το σύστημα υπό-σώματος, θεωρούνται μικρές κι έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξισώσεις γραμμικής δοκού. Μεγάλες παραμορφώσεις και περιστροφές “χτίζονται” σταδιακά και η μη-γραμμική δυναμική εισάγεται επιβάλλοντας σε κάθε υπό-σώμα, τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές των προηγούμενων ως κινήσεις άκαμπτου σώματος (rigid body motions). Η δυναμική σύζευξη των υπό-σωμάτων επιτυγχάνεται με την εισαγωγή των φορτίων αντίδρασης (3 δυνάμεις και 3 ροπές) του πρώτου κόμβου κάθε υπό-σώματος στον ελεύθερο κόμβο του προηγούμενου υπό-σώματος ως εξωτερικό φορτίο. [15]

2.2.4 Πρότυπο αυτομάτου ελέγχου

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες ρυθμίζονται με έλεγχο στροφών και βήματος. Η γωνία απόκλισης του κλωβού ελέγχεται επίσης, αλλά συνήθως στις αεροελαστικές προσομοιώσεις θεωρείται σταθερή εντός της χρονικής κλίμακας της προσομοίωσης (π.χ. 10 λεπτά). Όσον αφορά τη μοντελοποίηση, το σύστημα ελέγχου περιγράφεται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που εκφράζονται για τις μεταβλητές ελέγχου εξόδου, όπως η γωνία βήματος (πιθανώς διαφορετική για κάθε πτερύγιο), η απαιτούμενη ροπή της γεννήτριας και η γωνία απόκλισης του κλωβού (εάν ελέγχεται). Μία κοινή προσέγγιση είναι η μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα σε συνθήκες κάτω από την ονομαστική ισχύ και στη συνέχεια η μετάβαση σε έλεγχο βήματος διατηρώντας την ταχύτητα περιστροφής στην ονομαστική της τιμή. [15]

2.3 Υλικά κατασκευής πτερυγίων

2.3.1 Σύνθετα υλικά

Αναζητώντας ένα υλικό που να είναι ταυτόχρονα δύσκαμπτο και ελαφρύ, η βιομηχανία της αεροναυτικής ενέργειας οδηγήθηκε στα σύνθετα υλικά (composites). Τα πλέον συνήθη σύνθετα υλικά είναι αυτά που κατασκευάζονται από ισχυρές ίνες που συγκρατούνται με ένα συνδετικό υλικό, τη μήτρα (matrix). Είναι ελαφρύτερα από τα συμβατικά επειδή, τόσο οι ίνες, όσο και τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται ως συνδετικά, έχουν χαμηλό ειδικό βάρος. Ειδικότερα, οι ίνες έχουν υψηλότερες τιμές στους λόγους αντοχής/βάρους και δυσκαμψίας/βάρους από τα περισσότερα υλικά. [8]

Ωστόσο, οι ίνες δεν αντέχουν σε θλιπτικά ή εγκάρσια φορτία. Επομένως, αφού δεν συνεισφέρουν στην αντοχή κατά την εγκάρσια στη διεύθυνση τους έννοια, και με δεδομένο ότι η αντοχή του συνδετικού υλικού είναι πολύ μικρή, καθίσταται αναγκαίο να προστεθούν στρώσεις διάφορων προσανατολισμών ώστε να παραλαμβάνονται τα επιβαλλόμενα φορτία. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι να δημιουργηθεί μία αλληλουχία στρώσεων με διάφορους προσανατολισμούς. [8]

Το πιο κοινό υβριδικό σύνθετο υλικό είναι η κατασκευή “σάντουιτς”. Δύο λεπτά, ισχυρά και δύσκαμπτα περιβλήματα αποτελούν τις εξωτερικές επιφάνειες του σύνθετου υλικού περικλείοντας τον πυρήνα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ελαφρύ υλικό που διαθέτει μεγαλύτερο πάχος. Η μήτρα μεταξύ των δύο διαστρωματώσεων παίζει το ρόλο μοχλοβραχίονα αυξάνοντας τη ροπή αδράνειας τους και αποδίδοντας στο όλο σύστημα αυξημένη καμπτική δυσκαμψία αλλά και αντοχή σε λυγισμό. Η δομή των κατασκευών τύπου σάντουιτς είναι τέτοια που επιτρέπει στα περιβλήματα του υλικού να παραλαμβάνουν τα καμπτικά φορτία και στον πυρήνα να παραλαμβάνει τα θλιπτικά και διατμητικά φορτία. [8] [17]

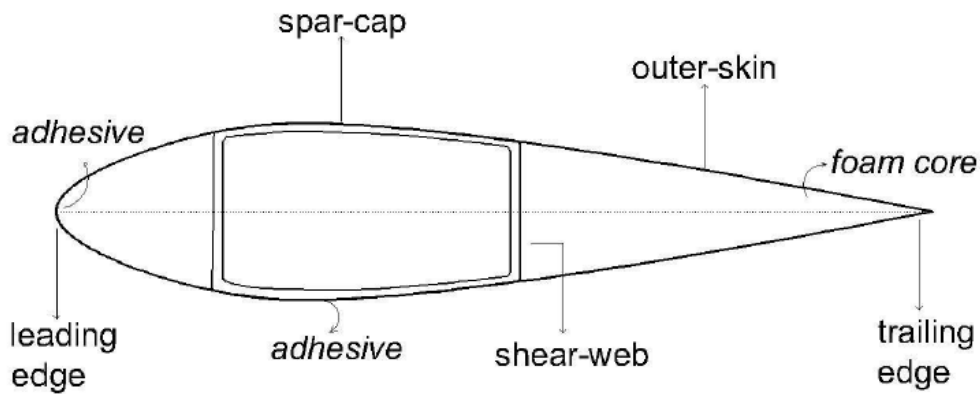
Όσον αφορά τα επιμέρους υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε πτερύγια ανεμογεννητριών, αυτά είναι οι ίνες γυαλιού ή άνθρακα και για τη μήτρα οι εποξειδικές ρητίνες. Οι ίνες γυαλιού παρουσιάζουν τις τυπικές ιδιότητες του γυαλιού, όπως σκληρότητα και αντοχή σε διάβρωση. Επίσης είναι εύκαμπτες, ελαφριές και σχετικά φθηνές. Οι ίνες E-glass (ονομασία που προήλθε από την αρχική χρήση τους σε εφαρμογές ηλεκτρικής μόνωσης) είναι το είδος που προτιμάται επειδή συνδυάζει μηχανική απόδοση, αντοχή στη διάβρωση και μικρό κόστος. Οι εποξειδικές (epoxy) ρητίνες χρησιμοποιούνται ευρύτατα λόγω της μεγάλης ικανότητας προσαρμογής, των υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων και της μεγάλης αντοχής σε διάβρωση που τις χαρακτηρίζει. Ακόμη, επηρεάζονται λιγότερο από την υγρασία και τη θερμοκρασία σε σχέση με άλλα πολυμερή συνδετικά. Το υλικό που χρησιμοποιείται ως πυρήνας της κατασκευής σάντουιτς πρέπει να έχει χαμηλή πυκνότητα έτσι ώστε να συνεισφέρει στο ελάχιστο στο βάρος της συνολικής κατασκευής. [8] [17]

2.3.2 Λειτουργίες των υλικών στο πτερύγιο

Ο δρομέας της ανεμογεννήτριας δέχεται φορτίσεις που οφείλονται στον άνεμο και στη βαρύτητα. Συνέπεια των φορτίων του ανέμου κάθετα στο επίπεδο περιστροφής είναι η κάμψη πτερύγισης (flapwise bending). Τα φορτία αυτά έχουν μέση τιμή και περιοδικότητα, προκαλώντας ταυτόχρονα μόνιμη κάμψη στα πτερύγια και κόπωση. Τα πτερύγια δέχονται επίσης φορτία βαρύτητας, με τη δυσμενέστερη περίπτωση σε ό,τι αφορά την κάμψη τους, να πραγματοποιείται όταν βρίσκονται σε οριζόντια θέση. Τα φορτία βαρύτητας προκαλούν και αυτά κάμψη στο πτερύγιο, αλλά διαφορετικού είδους, η οποία ονομάζεται κάμψη περιστροφής (edgewise bending). Προκαλείται και σε αυτήν την περίπτωση το φαινόμενο της κόπωσης, διότι το πτερύγιο κάμπτεται περιοδικά λόγω βάρους, κάθε φορά που εκτελεί μία πλήρη περιστροφή στο επίπεδο του δρομέα. Το 97% των βλαβών σε ένα πτερύγιο οφείλεται στα δύο παραπάνω είδη κάμψεων. [8]

Ο εξωτερικός φλοιός του πτερυγίου (outer skin ή wing shells) όπως επίσης και οι κάθετοι δοκοί διάτμησης (shear webs) που βρίσκονται στο εσωτερικό, έχουν δομή υλικού σάντουιτς (Εικόνα 2.7). Οι στρώσεις

διαχωρίζονται μεταξύ τους από τον πυρήνα, που κατασκευάζεται από ξύλο μπάλσα (balsa). Στον εξωτερικό φλοιό χρησιμοποιείται η δομή σάντουιτς για να ενισχυθεί η αντοχή του σε λυγισμό στην edgewise φόρτιση (φόρτιση κάθετα στη διατομή του πτερυγίου, δηλαδή στο επίπεδο του φλοιού). Παράλληλα, στις δοκούς διάτμησης έχει καθιερωθεί η δομή σάντουιτς, διότι η λειτουργία τους είναι να μεταφέρουν τις διατμητικές δυνάμεις από την flapwise φόρτιση (φόρτιση κάθετα στο επίπεδο του δρομέα). Συνεπώς, αποτελούν λεπτές πλάκες που δέχονται θλιπτικό αξονικό φορτίο στο επίπεδό τους, άρα, είναι ευάλωτες σε τοπικό/διατμητικό λυγισμό. [8]

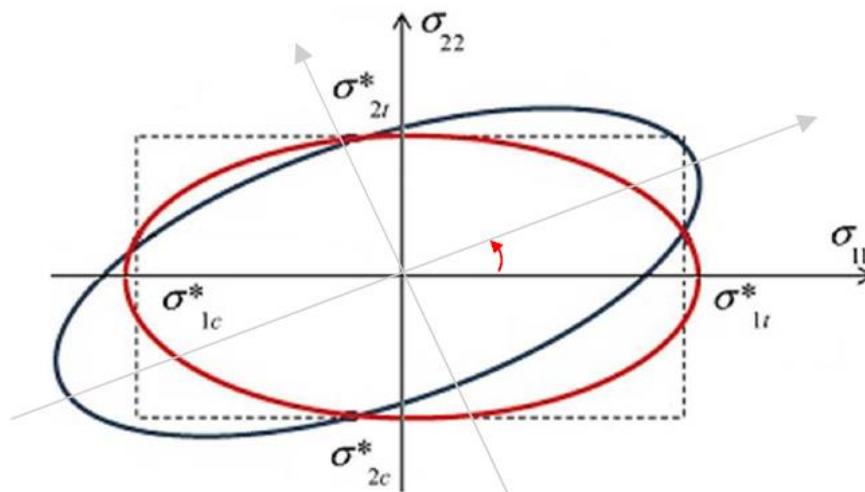


Εικόνα 2.7: Διατομή πτερυγίου και τμήματα [8]

2.3.3 Κριτήριο αστοχίας Tsai – Wu

Για τη μελέτη αστοχίας της πολυστρωματικής πλάκας από την οποία αποτελούνται τα spar caps, έχει εφαρμοστεί η προσέγγιση αστοχίας της πρώτης στρώσης (first-ply-failure), σύμφωνα με την οποία θεωρείται ότι η πολυστρωματική πλάκα αστοχεί μόλις αστοχήσει η πρώτη στρώση της, ακόμη και αν οι υπόλοιπες στρώσεις μπορούν να αντέξουν το επαναδιανεμημένο φορτίο, μετά την αστοχία της πρώτης. Αυτή η προσέγγιση, αποτελεί έναν αρκετά συντηρητικό τρόπο προσδιορισμού της αστοχίας. [6]

Το τετραγωνικό κριτήριο των Tsai – Wu αποτελεί ένα γενικό κριτήριο για τρισδιάστατη καταπόνηση που είναι αρκετά αξιόπιστο και χρησιμοποιείται κατά κόρον στα σύνθετα ορθότροπα υλικά. Προϋποθέτει ότι όλες οι καταπονήσεις συμβάλλουν ταυτόχρονα στην αστοχία του σύνθετου υλικού. Απεικονίζεται ως μια συνεχής καμπύλη και στα τέσσερα τεταρτημόρια (Εικόνα 2.8) και εκφράζεται με τη μορφή μίας και μόνο εξίσωσης. [8] [18]



Εικόνα 2.8: Απεικόνιση του κριτηρίου Tsai – Wu [6]

Σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης, το τετραγωνικό κριτήριο αστοχίας Tsai – Wu, απλοποιημένο σημαντικά δίνεται από την σχέση [6] [8] [17]:

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + F_{66}\sigma_{12}^2 \leq 1$$

Οι έξι παράγοντες που περιέχονται στη σχέση αυτή σχετίζονται με τις κρίσιμες τάσεις αστοχίας του υλικού μέσω απλών πειραμάτων μονοαξονικού εφελκυσμού, θλίψης και καθαρής διάτμησης ως εξής:

- $F_1 = \frac{1}{X_T} + \frac{1}{X_C}$
- $F_2 = \frac{1}{Y_T} + \frac{1}{Y_C}$
- $F_{11} = -\frac{1}{X_T X_C}$
- $F_{22} = -\frac{1}{Y_T Y_C}$
- $F_{66} = \frac{1}{S^2}$
- $F_{12} = f^* \sqrt{F_{11} F_{22}}$, όπου f^* βαθμωτή ποσότητα η τιμή της οποίας κυμαίνεται στο $[-1, 1]$

Τα μεγέθη που εμφανίζονται στις παραπάνω εξισώσεις δηλώνουν:

- X_T : την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σε μονοαξονικό εφελκυσμό παράλληλα προς τις ίνες
- X_C : την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σε θλίψη παράλληλα προς τις ίνες
- Y_T : την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σε μονοαξονικό εφελκυσμό κάθετα στις ίνες
- Y_C : την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σε θλίψη κάθετα στις ίνες
- S : την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σε καθαρή διάτμηση

Οι παραπάνω σχέσεις καθώς και ο υπολογισμός τάσεων – παραμορφώσεων στα πολυστρωματικά σύνθετα υλικά αναφέρονται σε μία μόνο στρώση. Επομένως με το κριτήριο αυτό ελέγχεται αν θα αστοχήσει κάποια από τις στρώσεις, ή αντίστροφα, ποια στρώση θα αστοχήσει πρώτη σε συγκεκριμένο φορτίο. Οι στρώσεις αστοχούν με τη σειρά, ξεκινώντας από τις πιο ευαίσθητες, που είναι συνήθως εκείνες που έχουν ίνες διατεταγμένες κάθετα στη διεύθυνση του φορτίου. [8]

2.4 Μέθοδος βελτιστοποίησης

2.4.1 Επιλογή εργαλείου βελτιστοποίησης

Η εφαρμογή παθητικού ελέγχου φορτίων στο σχεδιασμό ενός πτερυγίου προσθέτει πολυπλοκότητα σε ένα πρόβλημα που ήδη χαρακτηρίζεται από τις αλληλεπιδράσεις πολλαπλών επιστημονικών κλάδων, όπως η αεροδυναμική, η δομική μηχανική και ο αυτόματος έλεγχος. Ο πολύ-επιστημονικός χαρακτήρας του σχεδιασμού τέτοιων πτερυγίων αποτελεί πρόκληση διότι πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα πολλοί περιορισμοί, τις περισσότερες φορές αντικρουόμενοι. Σε αυτό το πλαίσιο, χρησιμοποιούνται μέθοδοι βελτιστοποίησης κατά τις οποίες οι παράμετροι σχεδιασμού, που υπόκεινται σε ορισμένους περιορισμούς, βελτιστοποιούνται σε σχέση με την αντικειμενική συνάρτηση. [6]

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος COBYLA (**C**onstrained **O**ptimization **b**y **L**inear **A**pproximation). Ο COBYLA είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης gradient-free (χωρίς υπολογισμό παραγώγων) ικανός να χειρίζεται μη-γραμμικούς περιορισμούς ανισότητας [19]. Εφαρμόζεται σε προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς της μορφής:

$$\{ \min F(\vec{x}), \vec{x} \in R^n \} \text{ subject to: } \{ c_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \}$$

Σχηματίζει γραμμικές πολυωνυμικές προσεγγίσεις της αντικειμενικής συνάρτησης $F(\vec{x})$ και των συναρτήσεων των περιορισμών $c_i(\vec{x})$ με παρεμβολή στις κορυφές ενός simplex. Ένα simplex n διαστάσεων είναι ένα κυρτό πολύτοπο $n + 1$ κορυφών, όπου n ο αριθμός των μεταβλητών ως προς τις οποίες γίνεται η βελτιστοποίηση. Σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται ένα νέο διάνυσμα μεταβλητών, το οποίο μπορεί να αντικαταστήσει μία από τις τρέχουσες κορυφές, είτε για να βελτιώσει το σχήμα του simplex είτε επειδή είναι το καλύτερο διάνυσμα που έχει βρεθεί μέχρι στιγμής. [20] [21]

Για την πραγματοποίηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, στον κώδικα που κατασκευάστηκε καλείται ως υπορουτίνα η συνάρτηση `fmin_cobyla` από το πακέτο `scipy.optimize` της Python [22]:

```
scipy.optimize.fmin_cobyla(func, x0, cons, args = (), consargs = None, rhobeg = 1.0, rhoend = 0.0001, maxfun = 1000, disp = None, catol = 0.0002)
```

Οι παράμετροι της συνάρτησης είναι:

- *func*: Συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση υπό τη μορφή $func(x, args)$
- *x0*: Αρχική υπόθεση
- *cons*: Συνάρτηση/συναρτήσεις περιορισμών. Πρέπει να είναι όλες ≥ 0 .
- *args*: Επιπλέον παράμετροι της συνάρτησης *func* (προαιρετικό)
- *consargs*: Επιπλέον παράμετροι των συναρτήσεων περιορισμών *cons* (προαιρετικό)
- *rhobeg*: Αρχική λογική μεταβολή των μεταβλητών (προαιρετικό)
- *rhoend*: Τελική επιθυμητή ακρίβεια της βελτιστοποίησης (προαιρετικό)
- *maxfun*: Μέγιστος αριθμός αξιολογήσεων της συνάρτησης (προαιρετικό)
- *catol*: Απόλυτη ανοχή στις παραβιάσεις των περιορισμών (προαιρετικό)

Η συνάρτηση επιστρέφει το διάνυσμα x , το οποίο ελαχιστοποιεί την *func*.

2.4.2 Περιγραφή αλγορίθμου COBYLA

Υποθέτουμε ότι η αντικειμενική συνάρτηση F και οι συναρτήσεις των περιορισμών c_i μπορούν να υπολογιστούν σε κάθε κορυφή $\{\vec{x}^{(j)}, \text{ με } j = 0, 1, \dots, n\}$ ενός μη εκφυλισμένου simplex στο \mathbb{R}^n . Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχουν μοναδικές γραμμικές συναρτήσεις, \hat{F} και $\{\hat{c}_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m\}$, που παρεμβάλλονται στην F και στους περιορισμούς $\{c_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m\}$ στις κορυφές. Δηλαδή, οι προσεγγίσεις \hat{F} και \hat{c}_i είναι τέτοιες ώστε οι τιμές τους στις κορυφές να συμφωνούν με αυτές των συναρτήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών F και c_i . Έτσι, προσεγγίζουμε την βελτιστοποίηση με ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού στο οποίο οι γραμμικές προσεγγίσεις των περιορισμών απαιτείται να είναι μη αρνητικές [20] [22]:

$$\{ \min \hat{F}(\vec{x}), \vec{x} \in \mathbb{R}^n \} \text{ subject to: } \{ \hat{c}_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \}$$

Ωστόσο, οι γραμμικές προσεγγίσεις είναι πιθανότατα ικανοποιητικές μόνο κοντά στο τρέχον simplex, για το λόγο αυτό, οι αλλαγές στις μεταβλητές περιορίζονται από το όριο μιας περιοχής εμπιστοσύνης (trust region). Η ακτίνα ρ της περιοχής εμπιστοσύνης δεν αυξάνεται ποτέ και μειώνεται μόνο όταν η τρέχουσα τιμή της εμποδίζει την περαιτέρω πρόοδο της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η αρχική και η τελική τιμή της ακτίνας, *rhobeg* και *rhoend* αντίστοιχα, δίνονται από τον χρήστη. Προτείνεται η *rhobeg* να είναι μία λογική μεταβολή που μπορεί να γίνει στις μεταβλητές ενώ η *rhoend* να είναι περίπου ίση με την απαιτούμενη απόσταση του τελικού διανύσματος μεταβλητών από τη πραγματική λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. [20] [21] [22]

Για να συγκρίνουμε την καταλληλότητα δύο διαφορετικών διανυσμάτων μεταβλητών χρησιμοποιούμε μια συνάρτηση αξίας (merit function) της μορφής:

$$\Phi(\vec{x}) = F(\vec{x}) + \mu \cdot \max\{-c_i(\vec{x}), i = 1, 2, \dots, m\}, \vec{x} \in \mathbb{R}^n$$

Το μ αποτελεί παράμετρο που προσαρμόζεται αυτόματα. Η έκφραση $\max\{-c_i(\vec{x}), i = 1, 2, \dots, m\}$ αντικαθίσταται με μηδέν αν και μόνο αν η τιμή της είναι αρνητική (άρα ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί), οπότε έχουμε $\Phi(\vec{x}) = F(\vec{x})$ όταν το \vec{x} είναι εφικτό. Λαμβάνεται ότι ένα διάνυσμα $\vec{x} \in R^n$ είναι καλύτερο από ένα άλλο $\vec{y} \in R^n$ αν και μόνο αν ικανοποιείται η ανισότητα $\Phi(\vec{x}) < \Phi(\vec{y})$. [20]

Το simplex για την 1^η επανάληψη κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας την αρχική ακτίνα ρ_{beg} και ένα αρχικό διάνυσμα μεταβλητών $\vec{x}^{(0)}$, τα οποία παρέχονται από το χρήστη (*rhobeg* και $x0$). Για κάθε $j = 1, 2, \dots, n$ ορίζουμε το $\vec{x}^{(j)} = \vec{x}^{(0)} + \rho_{beg}\vec{e}_j$. Κάθε ένα από τα $\vec{x}^{(j)}$ παίρνει τη θέση του $\vec{x}^{(0)}$, πριν προχωρήσουμε στον υπολογισμό του επόμενου, αν και μόνο αν ισχύει: $F(\vec{x}^{(j)}) < F(\vec{x}^{(0)})$. Το $\vec{x}^{(0)}$ που προέκυψε μετά τις όποιες αλλαγές στο τέλος της 1^{ης} επανάληψης αποτελεί το βέλτιστο διάνυσμα του αρχικού simplex. [20]

Σε κάθε επόμενη επανάληψη θεωρούμε το διάνυσμα μεταβλητών $\vec{x}^{(*)}$ που υπολογίζεται από το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού:

$$\{\min \hat{F}(\vec{x}), \vec{x} \in R^n\} \text{ subject to: } \{\hat{c}_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m\}$$

Αν οι ανισοτικοί γραμμικοί περιορισμοί $\{\hat{c}_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m\}$ δεν ικανοποιούνται, το $\vec{x}^{(*)}$ ορίζεται ελαχιστοποιώντας την μεγαλύτερη παραβίαση περιορισμού $\{-\hat{c}_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m\}$. Οι κορυφές του τρέχοντος simplex έχουν ήδη διαταχθεί έτσι ώστε το $\vec{x}^{(0)}$ να είναι το βέλτιστο επομένως ισχύουν οι ανισότητες: $\Phi(\vec{x}^{(0)}) < \Phi(\vec{x}^{(j)})$ για $j = 1, 2, \dots, n$. Η συνθήκη της περιοχής εμπιστοσύνης για το νέο διάνυσμα εκφράζεται ως:

$$\|\vec{x}^{(*)} - \vec{x}^{(0)}\| \leq \rho$$

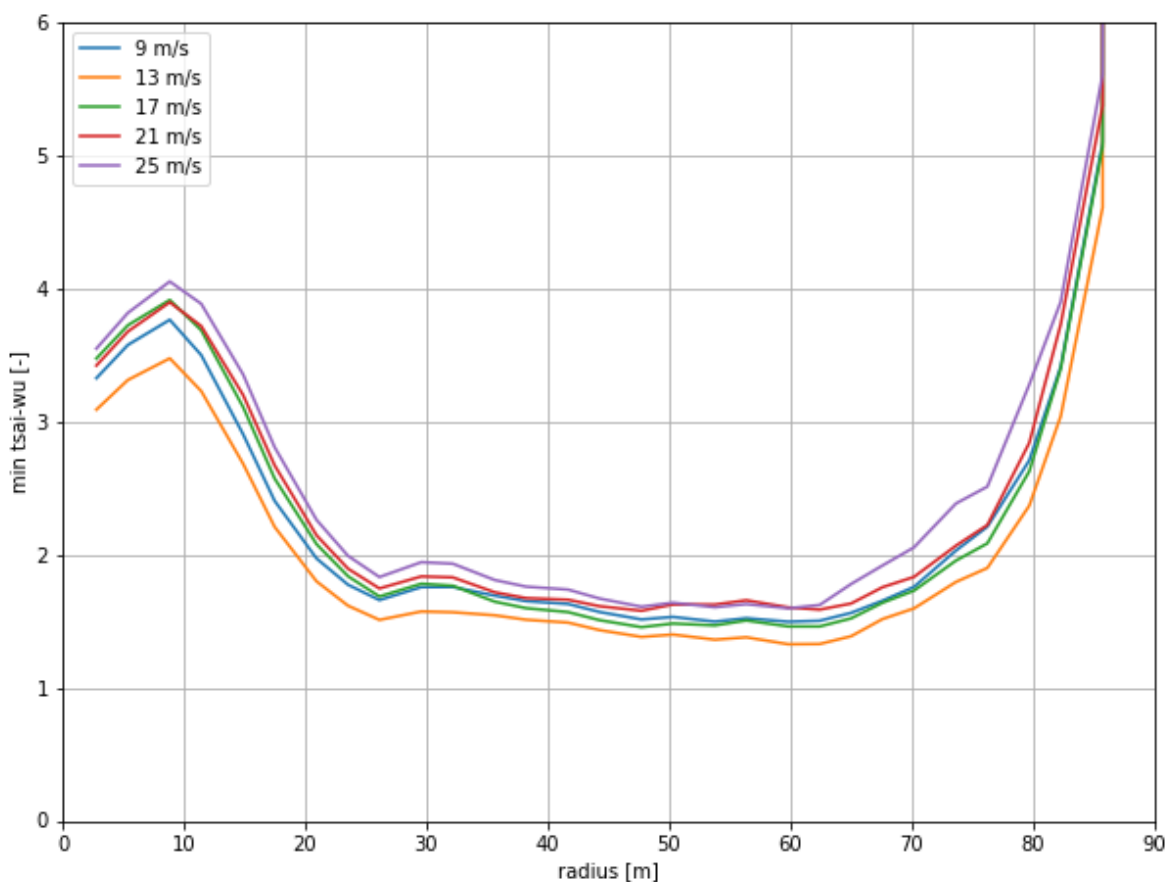
Στη συνέχεια το simplex μετασχηματίζεται για την επόμενη επανάληψη αντικαθιστώντας μόνο μία από τις κορυφές του με το $\vec{x}^{(*)}$. [20] [21]

2.5 Αλληλουχία βημάτων

2.5.1 Αρχική διερεύνηση – Παραδοχές

Κατά την αρχική διερεύνηση του αεροελαστικού προβλήματος στην ανεμογεννήτρια αναφοράς, έγινε προσομοίωση, μέσω του hGAST, για τη περίπτωση κανονικής λειτουργίας με ακραίες συνθήκες τυρβώδους ανέμου (περίπτωση σχεδιασμού DLC1.3), σε όλο το εύρος ταχυτήτων ανέμου από 5 m/s έως 25 m/s. Βάσει των ελάχιστων τιμών του κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu που προέκυψαν, είναι φανερό ότι στην ταχύτητα ανέμου των 13 m/s, τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας αναφοράς δέχονται τη μεγαλύτερη φόρτιση (Γράφημα 2.1). Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι η ταχύτητα ανέμου των 13 m/s αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης του δρομέα.

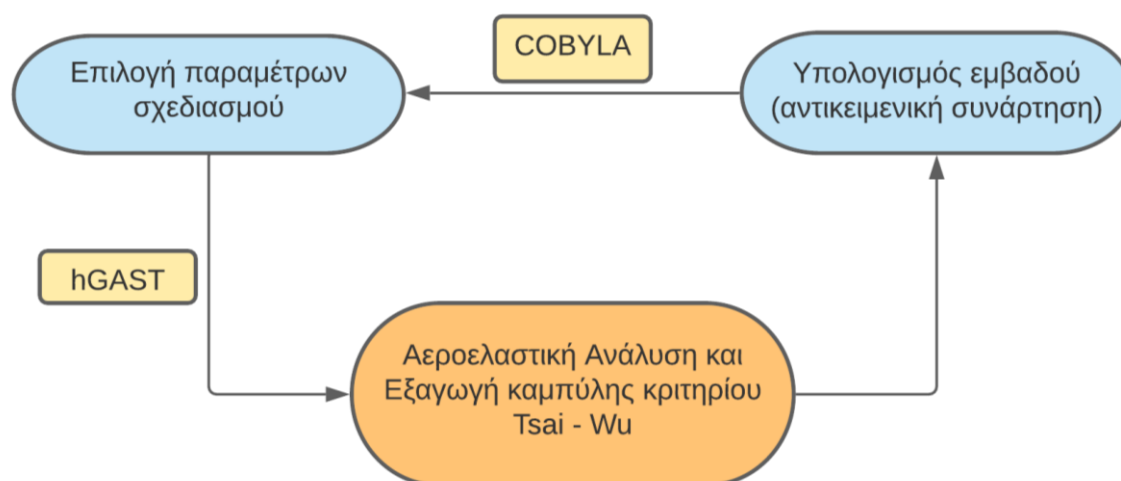
Η εφαρμογή μιας στρατηγικής παθητικού ελέγχου φορτίων έχει μεγάλο αντίκτυπο στη φόρτιση των ανεμογεννητριών. Απαιτείται, λοιπόν, ένας σημαντικός αριθμός σέρβο-αέρο-ελαστικών προσομοιώσεων για τη σωστή καταγραφή του αποτελέσματος των μεθοδολογιών αυτών στα φορτία της κατασκευής [6]. Ωστόσο, το πιο χρονοβόρο μέρος της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι ο υπολογισμός των φορτίων μέσω της σέρβο-αέρο-ελαστικής ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου. Έτσι, στην παρούσα εργασία, ακολουθώντας μια λογική του τύπου “worst-case scenario”, μόνο η περίπτωση DLC1.3, στην ταχύτητα ανέμου των 13 m/s, προσομοιώνεται εντός του βρόχου βελτιστοποίησης με σκοπό να διατηρηθεί το υπολογιστικό κόστος χαμηλό. Επιπλέον, για τον περαιτέρω περιορισμό του χρόνου της διαδικασίας βελτιστοποίησης, κάθε προσομοίωση πραγματοποιείται για διάρκεια μόνο 25 δευτερολέπτων. Η διάρκεια αυτών των 25 s επικεντρώνεται γύρω από τη χρονική στιγμή στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο φορτίο στο πτερύγιο αναφοράς. Αναμένεται και στο τροποποιημένο/βελτιστοποιημένο πτερύγιο να προκύψουν μέγιστα φορτία σε γειτονικές χρονικές στιγμές. [7]



Γράφημα 2.1: Ελάχιστες τιμές κριτηρίου Tsai – Wu κατά μήκος του πτερυγίου αναφοράς για διάφορες ταχύτητες ανέμου

2.5.2 Στάδιο περιορισμού των φορτίων

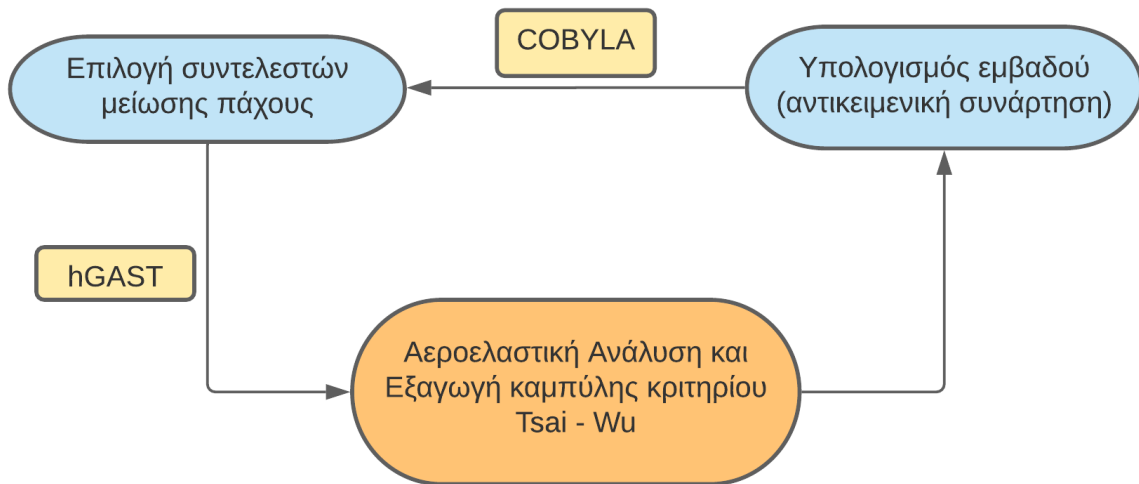
Κατά την εφαρμογή και των δύο μεθόδων παθητικού ελέγχου φορτίων που αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια μεταβάλλονται κάποιες παράμετροι σχεδιασμού που τροποποιούν το πτερύγιο αναφοράς. Αυτές οι παράμετροι αποτελούν σε κάθε περίπτωση τις μεταβλητές ως προς τις οποίες πραγματοποιείται η εκάστοτε βελτιστοποίηση. Ο αλγόριθμος COBYLA επιλέγει τιμές για τις μεταβλητές σχεδιασμού, οι οποίες αξιολογούνται με βάση την αντικειμενική συνάρτηση (Γράφημα 2.2). Ως αντικειμενική συνάρτηση λογίζεται το εμβαδόν που περικλείεται ανάμεσα στις καμπύλες των ελάχιστων τιμών του κριτηρίου Tsai – Wu κατά μήκος του πτερυγίου αναφοράς και του τροποποιημένου πτερυγίου για ταχύτητα ανέμου 13 m/s. Μεγιστοποίηση του εμβαδού δηλώνει και μέγιστη μείωση των φορτίων μέσω παθητικού ελέγχου.



Γράφημα 2.2: Διαδικασία βελτιστοποίησης με στόχο τη μείωση των φορτίων

2.5.3 Στάδιο μείωσης της μάζας του πτερυγίου

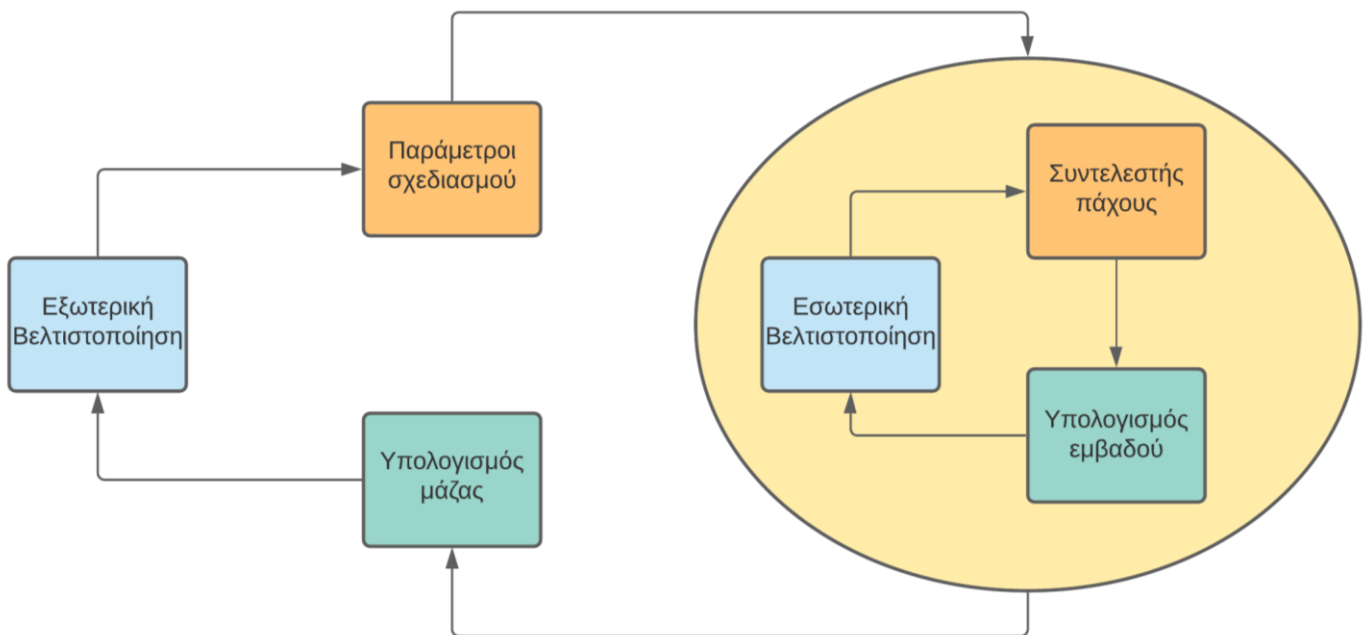
Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτουν οι βέλτιστες παράμετροι σχεδιασμού ως προς τη μείωση των φορτίων. Αυτές θεωρούνται δεδομένες και σταθερές σε αυτό το στάδιο. Ο συντελεστής ή οι συντελεστές μείωσης του πάχους γίνονται τώρα οι μεταβλητές ως προς τις οποίες διεξάγεται η βελτιστοποίηση (Γράφημα 2.3). Αντικειμενική συνάρτηση παραμένει η ίδια, ωστόσο, αυτή τη φορά, επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση του εμβαδού. Ελαχιστοποιώντας το εμβαδόν μεταξύ των δύο καμπυλών του κριτηρίου αστοχίας επιτυγχάνουμε τη μέγιστη μείωση πάχους (και κατ' επέκταση μάζας) με την προϋπόθεση ότι τα φορτία διατηρούνται στα ίδια επιτρεπτά όρια με αυτά του πτερυγίου αναφοράς.



Γράφημα 2.3: Διαδικασία βελτιστοποίησης με στόχο τη μείωση της μάζας

2.5.4 Συνδυασμένη βελτιστοποίηση

Τα δύο στάδια που αναπτύχθηκαν παραπάνω συγχωνεύονται σε μια ενιαία διαδικασία για τη λήψη της μέγιστης μείωσης μάζας η οποία χωρίζεται σε δύο βρόχους, προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των μεταβλητών βελτιστοποίησης και το υπολογιστικό κόστος (Γράφημα 2.4).



Γράφημα 2.4: Βελτιστοποίηση δύο βρόχων με διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις

Ο εξωτερικός βρόχος καθορίζει τις τιμές των κύριων μεταβλητών σχεδιασμού και αξιολογεί την εξωτερική αντικειμενική συνάρτηση. Οι κύριες μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι οι παράμετροι σχεδιασμού, ενώ ως εξωτερική συνάρτηση κόστους επιλέγεται η μάζα του πτερυγίου.

Ο εσωτερικός βρόχος καθορίζει τη δευτερεύουσα μεταβλητή σχεδιασμού του προβλήματος, δηλαδή την κατανομή του συντελεστή μείωσης του πάχους κατά μήκος του πτερυγίου. Ως εσωτερική αντικειμενική συνάρτηση επιλέγεται το εμβαδόν μεταξύ των καμπυλών του κριτηρίου αστοχίας του πτερυγίου αναφοράς και του τροποποιημένου πτερυγίου. Επομένως, ο εσωτερικός βρόχος αναζητά τις ελάχιστες τιμές του συντελεστή για τις οποίες οι ελάχιστες τιμές του κριτηρίου Tsai – Wu κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με αυτές του πτερυγίου αναφοράς.

Όταν ολοκληρωθεί μια επανάληψη στον εσωτερικό βρόχο, αξιολογείται η τιμή του εμβαδού που περικλείεται ανάμεσα στις δυο καμπύλες και αν δε βρεθεί ικανοποιητικά μικρή, ξεκινά ένας νέος κύκλος βελτιστοποίησης με νέους συντελεστές πάχους. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση στους συντελεστές μείωσης πάχους. Τότε, υπολογίζεται η μάζα του πτερυγίου και ο εξωτερικός βρόχος βελτιστοποίησης καλείται να επιλέξει νέες παραμέτρους σχεδιασμού, ώστε να ακολουθήσει άλλη μια επαναληπτική διαδικασία στον εσωτερικό. Η όλη διαδικασία τερματίζει όταν έχουμε σύγκλιση και των κύριων (εξωτερικών) μεταβλητών σχεδιασμού.

2.5.5 Τελική επαλήθευση

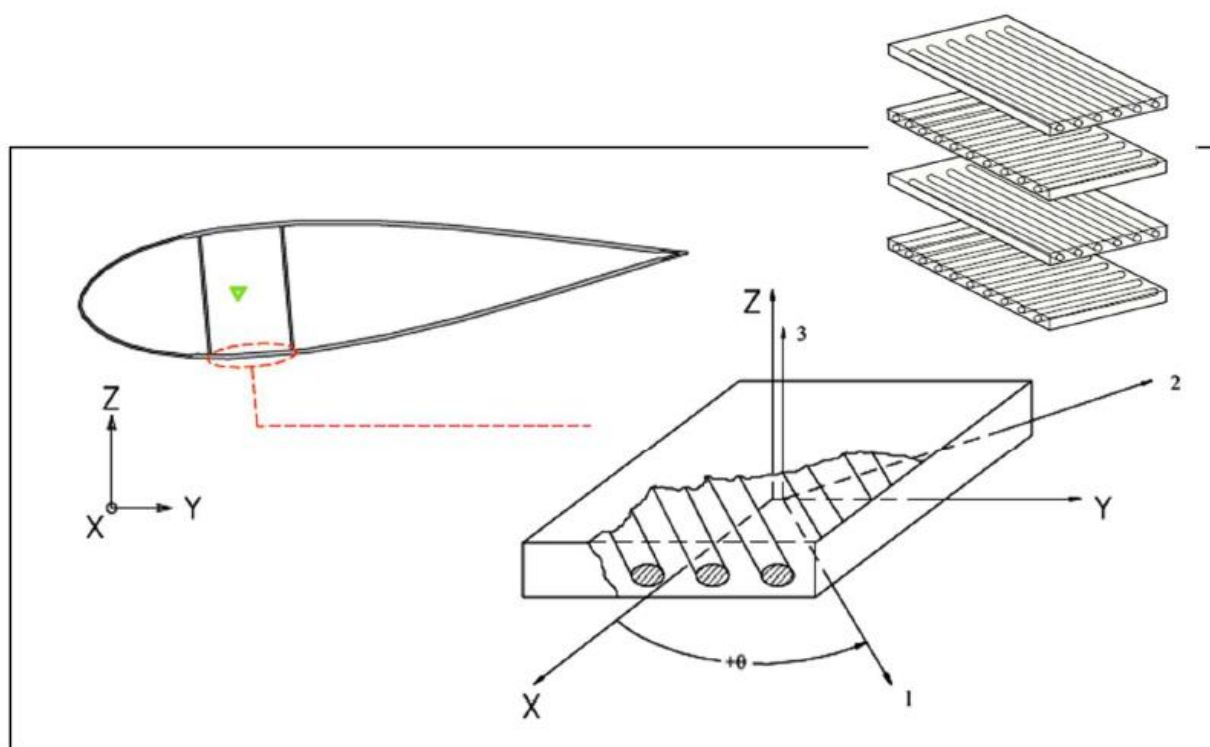
Για καθεμία από τις στρατηγικές παθητικού ελέγχου φορτίων που εξετάζονται προτείνεται μια τελική βέλτιστη λύση. Για τις δύο αυτές περιπτώσεις η επαλήθευση πραγματοποιείται μέσω προσομοιώσεων για την περίπτωση λειτουργίας με έντονη τύρβη DLC1.3. Σε αυτή τη φάση, πραγματοποιούνται τρεις πλήρεις προσομοιώσεις (realizations) των 10 λεπτών για ταχύτητες ανέμου από 5 m/s έως 25 m/s, όπως έγινε και στην αρχική διερεύνηση της ανεμογεννήτριας αναφοράς. Μέσω αυτών, είμαστε σε θέση να συγκρίνουμε τα μέγιστα φορτία που εμφανίζονται στην ανεμογεννήτρια αναφοράς με αυτά που εμφανίζονται στις ανεμογεννήτριες με τα δύο βελτιστοποιημένα σχέδια πτερυγίων και να ελέγξουμε ότι διατηρούνται εντός επιτρεπτών ορίων για όλες τις ταχύτητες ανέμου.

3 Παθητικός έλεγχος φορτίων μέσω ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών

3.1 Εισαγωγή γωνίας προσανατολισμού στα spar caps

Η πρώτη μέθοδος παθητικού ελέγχου που επιλέγεται είναι η εισαγωγή μιας γωνίας προσανατολισμού στις ίνες των στρώσεων του μονοδιευθυντικού υλικού των spar caps (Εικόνα 3.1). Η επιλογή της συγκεκριμένης στρατηγικής επιτρέπει αφενός την σύζευξη κάμψης – συστροφής (BTC) και αφετέρου τη διερεύνηση μιας βέλτιστης προσαρμογής, χωρίς την απαίτηση σημαντικών αλλαγών στον κύριο σχεδιασμό των πτερυγίων.

Η διεύθυνση προσανατολισμού των ινών κάθε στρώσης και ο τρόπος διαδοχής των στρώσεων έχει σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του πτερυγίου. Η προσαρμογή του τρόπου διαδοχής των στρώσεων του ινώδους σύνθετου υλικού που αποτελεί την πολυστρωματική πλάκα μπορεί να εφαρμοστεί κατάλληλα ώστε να εισάγει τελικά την επιθυμητή σύζευξη μεταξύ κάμψης και συστροφής. Συγκεκριμένα, η διεύθυνση προσανατολισμού των ινών κάθε στρώσης μπορεί να μεταβληθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργήσει μια δομική σύζευξη ικανή να οδηγήσει στον περιορισμό των αναπτυσσόμενων φορτίων. Στις πολυστρωματικές πλάκες παρουσιάζεται σύζευξη φόρτισης και μηχανικής απόκρισης, όχι μόνο λόγω ανισοτροπίας των στρώσεων, αλλά και λόγω της ανομοιογένειάς εκατέρωθεν του μέσου επιπέδου της πλάκας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιβάλλοντας μια μονοαξονική εφελκυστική φόρτιση, η πλάκα εκτός των ορθών παραμορφώσεων κατά την διεύθυνση της φόρτισης και την κάθετη προς αυτή, θα παρουσιάσει επίσης διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο της, ενώ ταυτοχρόνως θα συστραφεί και θα καμφθεί. [6]



Εικόνα 3.1: Εισαγωγή γωνίας προσανατολισμού στις ίνες του σύνθετου υλικού στα spar caps [6]

3.2 Αρχική διερεύνηση με σταθερές τιμές γωνίας

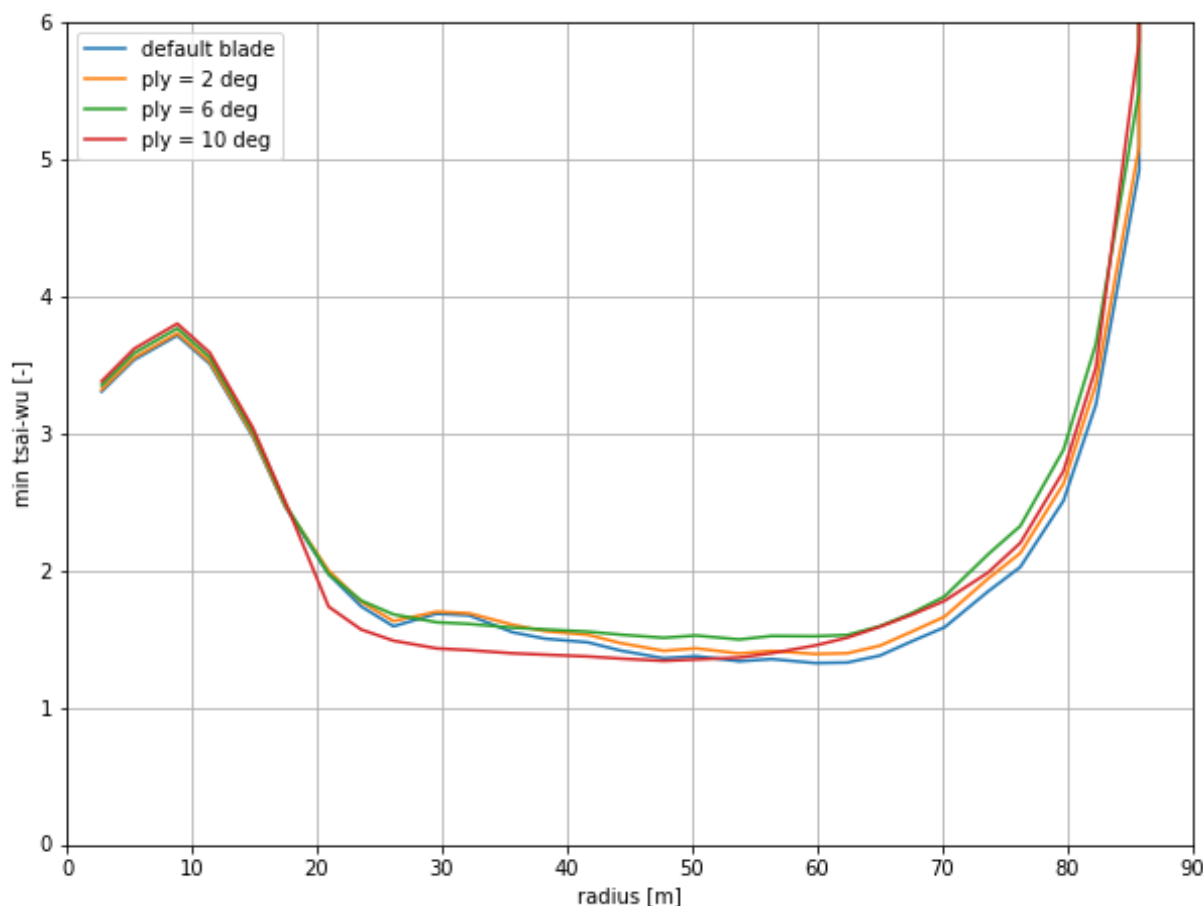
Αρχικά, χωρίς τη χρήση του πλαισίου βελτιστοποίησης, πραγματοποιήθηκε μια πρώτη εκτίμηση της δυνατότητας μείωσης των φορτίων δοκιμάζοντας κάποιες σταθερές τιμές της γωνίας προσανατολισμού των ινών (2° , 4° , 6° , 8° και 10°). Για κάθε μία από τις πέντε περιπτώσεις που εξετάστηκαν έγινε προσομοίωση της λειτουργίας της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου ίση με 13 m/s και προέκυψαν οι αντίστοιχες καμπύλες των ελάχιστων τιμών του κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu σε κάθε διατομή του πτερυγίου. Η

σύγκρισή τους με την κατανομή των τιμών του κριτηρίου σε κάθε διατομή του πτερυγίου αναφοράς αποτελεί ένα μέτρο της κατά το μήκος του πτερυγίου μείωσης ή αύξησης των αναπτυσσόμενων φορτίων. Έτσι, υπολογίστηκε το αδιάστατο εμβαδόν ανάμεσα στην εκάστοτε καμπύλη και στην καμπύλη του πτερυγίου αναφοράς και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Αρχική διερεύνηση με δοκιμές

Γωνία [°]	Εμβαδόν [-]
2	0,09399
4	0,17298
6	0,19515
8	0,10966
10	-0,03824

Βλέπουμε ότι μέχρι ένα σημείο η αύξηση της γωνίας έχει θετική επίδραση, ωστόσο, από τις 8° παρατηρείται μια πτώση της τιμής του εμβαδού και μάλιστα στις 10° αυτό γίνεται αρνητικό διότι μεγάλο μέρος της καμπύλης του τροποποιημένου πτερυγίου βρίσκεται χαμηλότερα από αυτήν του πτερυγίου αναφοράς (Γράφημα 3.1).



Γράφημα 3.1: Καμπύλες ελάχιστων τιμών κριτηρίου ασοχίας κατά μήκος των πτερυγίων

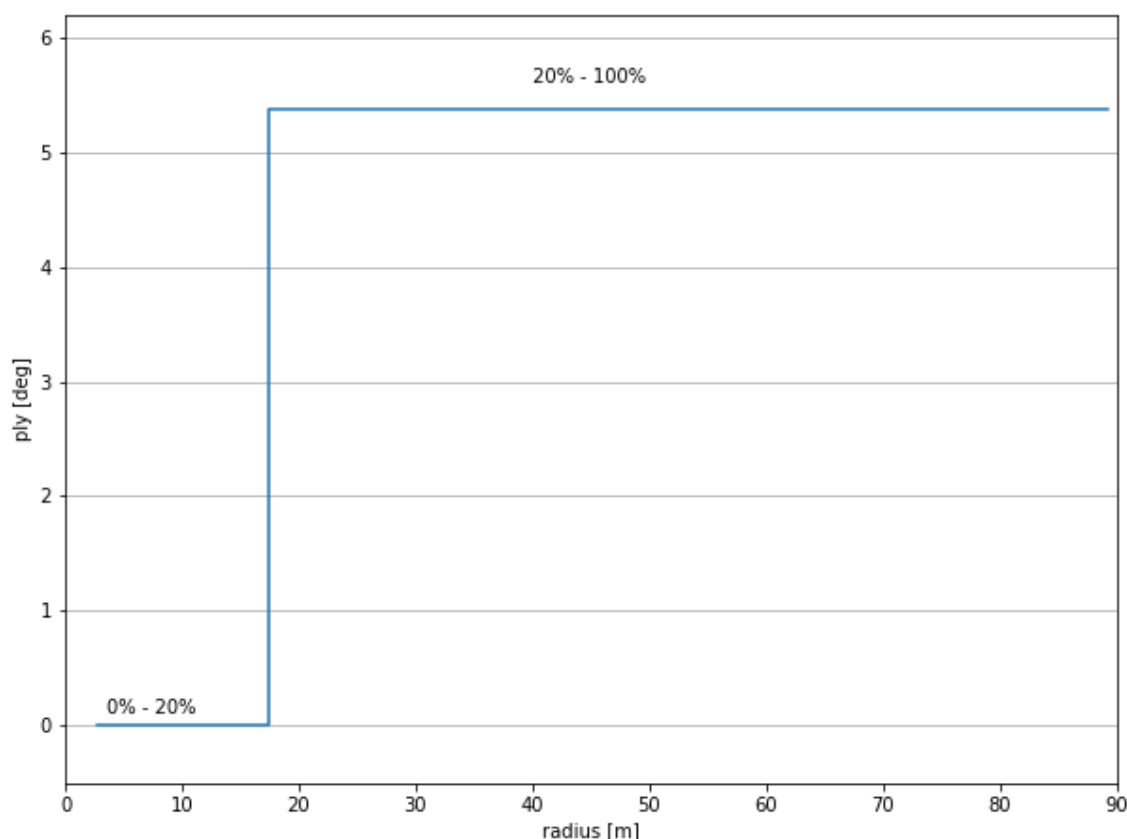
Η αρχική αυτή διερεύνηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για να κατανοήσουμε σε πρώτο βαθμό σε ποιο εύρος πρέπει να κυμαίνεται η τιμή τις γωνίας προσανατολισμού που θα εισαχθεί στις ίνες ώστε να επιδράσει θετικά στον περιορισμό των φορτίων. Ακόμη, χρησιμοποιούμε το εύρος αυτό στα μετέπειτα στάδια, όπου εισάγεται και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ώστε να περιορίσουμε ως ένα σημείο τις αλλαγές των μεταβλητών με σκοπό τη μείωση του υπολογιστικού κόστους.

3.3 Βελτιστοποίηση με στόχο τη μείωση φορτίων

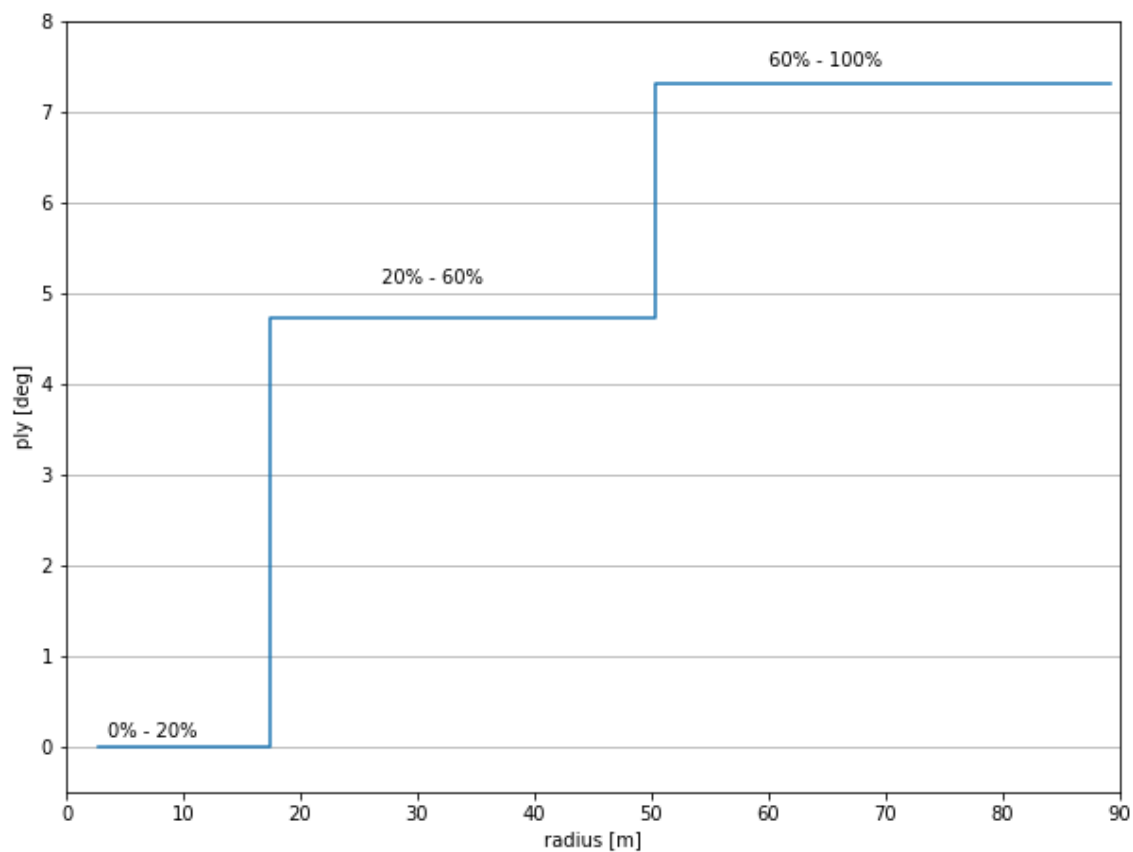
Σε αυτό το στάδιο, για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή μείωση φορτίων που αναπτύσσονται στο νέο πτερύγιο, στο πλαίσιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης, οι τιμές της γωνίας προσανατολισμού των ινών του μονοδιευθυντικού υλικού θα αποτελέσουν τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος. Ως αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται το εμβαδόν ανάμεσα στις καμπύλες νέου πτερυγίου – πτερυγίου αναφοράς και επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του. Στη φάση αυτή, η δυνατότητα παθητικού ελέγχου των φορτίων στο νέο πτερύγιο μελετάται χωρίς να γίνει οποιαδήποτε αλλαγή στη μάζα του.

Εξετάζονται 4 περιπτώσεις σχετικά με την κατανομή της γωνίας των ινών κατά μήκος του πτερυγίου. Σε αυτές, το πτερύγιο από το 20% του μήκους του (από τη ρίζα) κι έπειτα, χωρίζεται σε 1, 2, 3 και 4 τμήματα αντίστοιχα, κάθε ένα από τα οποία έχει μια διαφορετική αλλά σταθερή γωνία προσανατολισμού των ινών του υλικού του. Διεξάγονται επομένως 4 ανεξάρτητες βελτιστοποιήσεις με $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$ και $n = 4$ μεταβλητές σχεδιασμού, αντίστοιχα. Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις, στο αρχικό τμήμα του πτερυγίου (έως το 20% της ακτίνας) δεν εισάγεται κάποια γωνία. Αυτή η στρατηγική υιοθετήθηκε διότι με την εισαγωγή γωνίας (ply) στα caps, μειώνονται τα φορτία που αναπτύσσονται, ωστόσο, μειώνεται και η δυνατότητα του υλικού να παραλάβει φορτία και το τμήμα κοντά στη ρίζα δέχεται τα υψηλότερα λόγω μεγαλύτερου μοχλοβραχίονα.

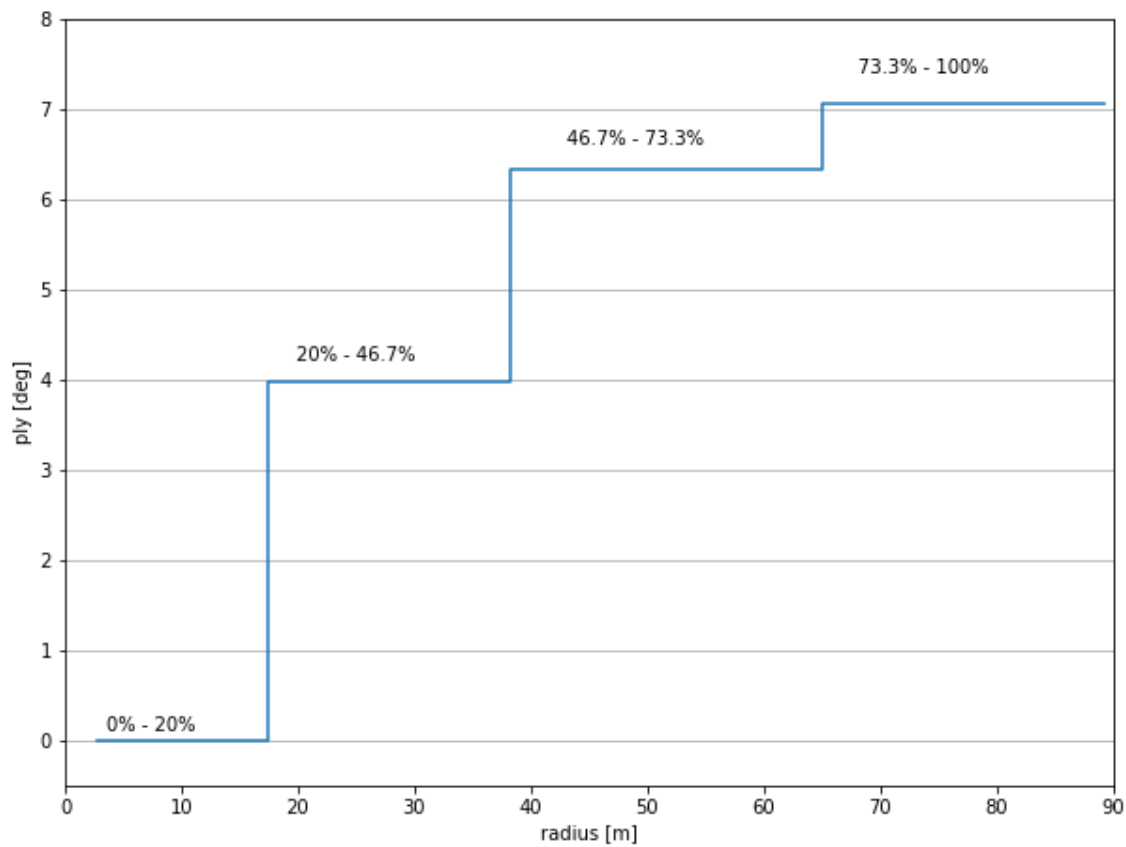
Ο τρόπος που κατανέμονται οι γωνίες κατά μήκος του πτερυγίου για τις περιπτώσεις $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$ και $n = 4$ απεικονίζεται στο *Γράφημα 3.2*, *Γράφημα 3.3*, *Γράφημα 3.4* και *Γράφημα 3.5*, αντίστοιχα. Ουσιαστικά, σε κάθε περίπτωση, το πτερύγιο από το 20% έως το 100% της ακτίνας του διαιρέθηκε σε n ίσα, κατά το ποσοστό, τμήματα. Ο τρόπος διαίρεσης των τμημάτων θα μπορούσε να αποτελέσει μια επιπλέον μεταβλητή της βελτιστοποίησης, ωστόσο, η πολυπλοκότητα του προβλήματος και το υπολογιστικό κόστος θα αυξάνονταν σημαντικά. Οι τιμές των γωνιών και των εμβαδών που προκύπτουν από τις 4 βελτιστοποιήσεις δίνονται αναλυτικά στον *Πίνακα 3.2*.



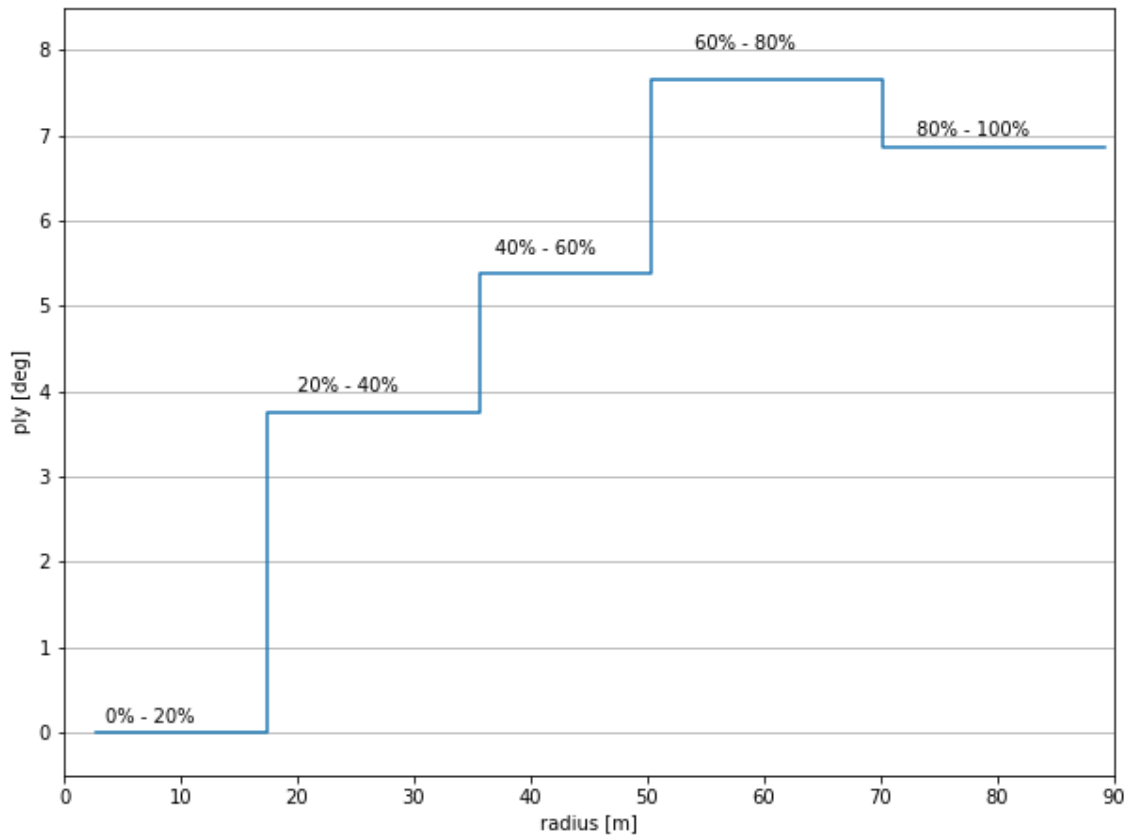
Γράφημα 3.2: Κατανομή της γωνίας των ινών κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 1$



Γράφημα 3.3: Κατανομή της γωνίας των ινών κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 2$



Γράφημα 3.4: Κατανομή της γωνίας των ινών κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 3$



Γράφημα 3.5: Κατανομή της γωνίας των ινών κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 4$

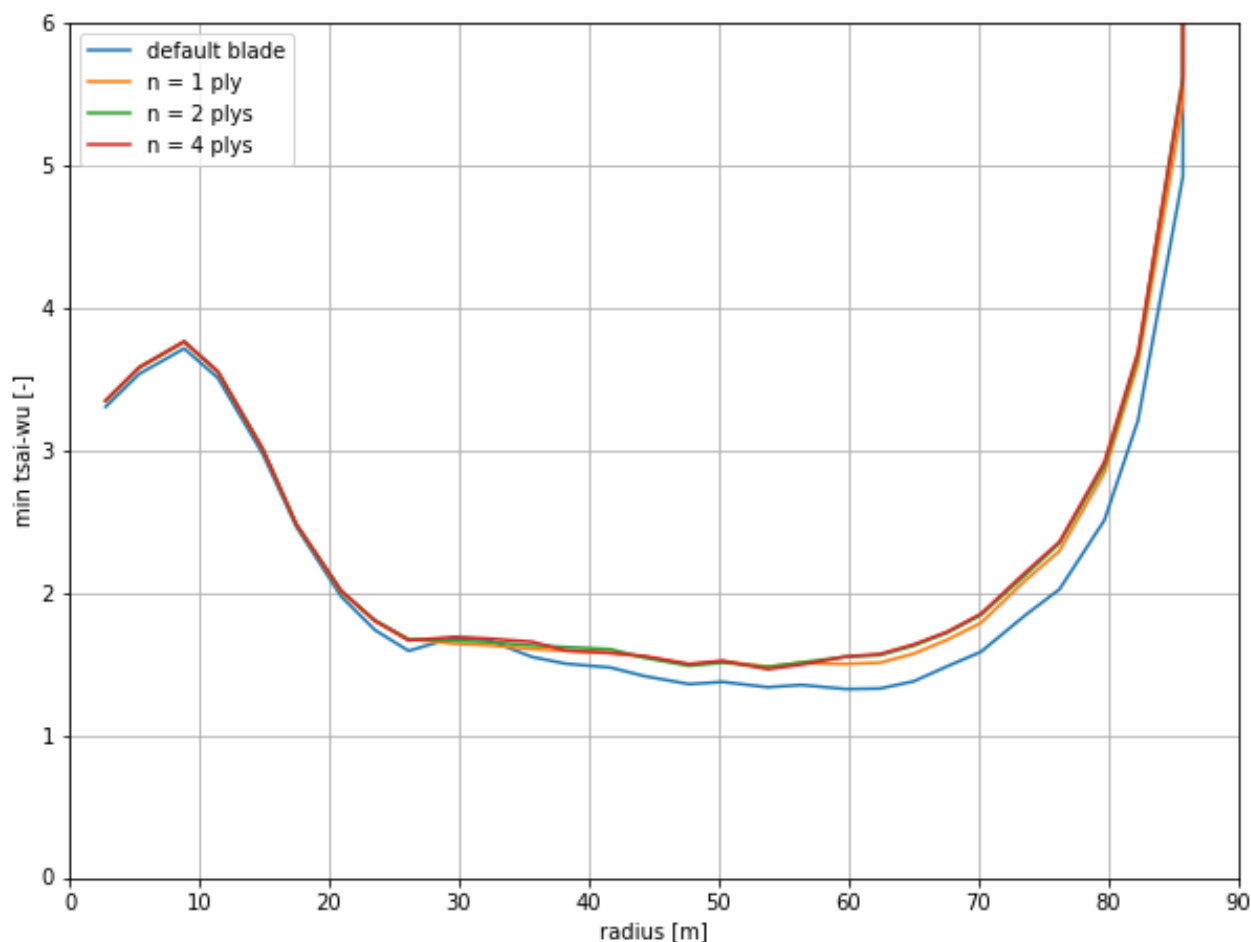
Από τις τιμές των εμβαδών που προκύπτουν, η περίπτωση $n = 4$ φαίνεται εκ πρώτης να δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα. Ωστόσο, αν παρατηρήσουμε τη μικρή βελτίωση που παρουσιάζει συγκριτικά με την περίπτωση $n = 2$, αναλογιζόμενοι και την αυξημένη πολυπλοκότητα που εισάγεται λόγω της διαίρεσης σε διπλάσιο αριθμό τμημάτων, τότε η τελευταία κρίνεται αποδοτικότερη. Ο παράγοντας της πολυπλοκότητας και του κόστους κατασκευής που αυτή συνεπάγεται δεν μπορεί να παραβλεφθεί διότι, αφενός ο τελικός στόχος της όλης διαδικασίας είναι η μείωση του *LCOE*, αφετέρου το βελτιστοποιημένο σχέδιο επιδιώκεται να είναι ρεαλιστικά εφαρμόσιμο από τη βιομηχανία της αιολικής ενέργειας.

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα των 4 βελτιστοποιήσεων του 1^{ου} σταδίου

Αριθμός μεταβλητών	ply_1 [°]	ply_2 [°]	ply_3 [°]	ply_4 [°]	Εμβαδόν [-]
$n = 1$	5,37				0,20064
$n = 2$	4,72	7,31			0,23078
$n = 3$	3,97	6,32	7,31		0,22612
$n = 4$	3,76	5,39	7,65	6,86	0,23761

Εξάλλου, η μικρή διαφορά ανάμεσα στις περιπτώσεις $n = 2$ και $n = 4$ φαίνεται χαρακτηριστικά και στο Γράφημα 3.6, όπου τα νέα σχέδια συγκρίνονται με το πτερύγιο αναφοράς μέσω των ελάχιστων τιμών του κριτηρίου αστοχίας σε κάθε διατομή κατά το μήκος τους.

Η κατανομή της γωνίας των ινών του πολυστρωματικού υλικού στα caps όπως προέκυψε από τη βελτιστοποίηση για την περίπτωση $n = 2$ διατηρείται σταθερή στο επόμενο στάδιο, όπου μεταβλητή θα αποτελέσει η κατανομή του συντελεστή μεταβολής πάχους.



Γράφημα 3.6: Συγκριτικό διάγραμμα κριτηρίου ασοχίας μεταξύ των νέων πτερυγίων και του πτερυγίου αναφοράς

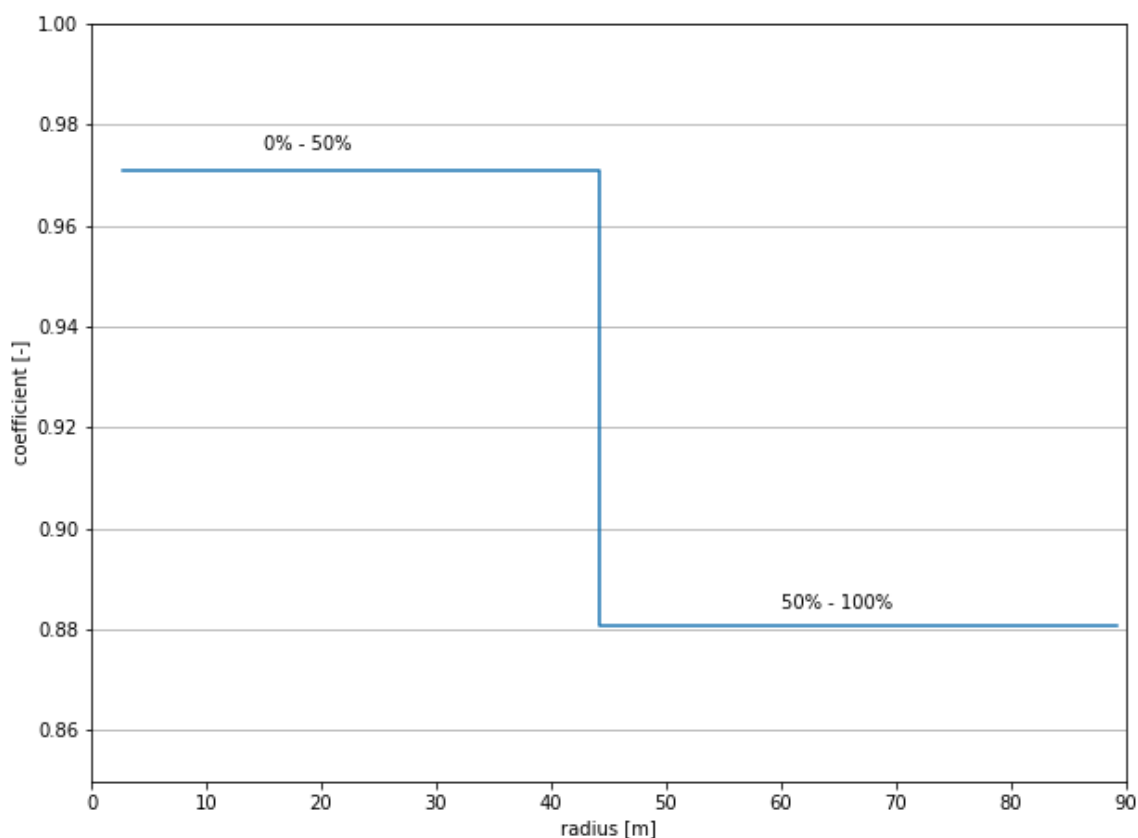
3.4 Βελτιστοποίηση με στόχο τη μείωση του πάχους

Στο στάδιο αυτό θεωρείται δεδομένο ότι η γωνία των ινών στα spar caps είναι ίση με $ply_1 = 4,72^\circ$ από το 20% έως το 60% του μήκους του πτερυγίου και με $ply_2 = 7,31^\circ$ από το 60% έως το 100% του μήκους του. Με βάση τη βέλτιστη αυτή διαμόρφωση, όπως προέκυψε από το προηγούμενο πλαίσιο βελτιστοποίησης, διερευνάται σε αυτό το στάδιο η δυνατότητα μείωσης του πάχους και κατ' επέκταση της μάζας του νέου πτερυγίου.

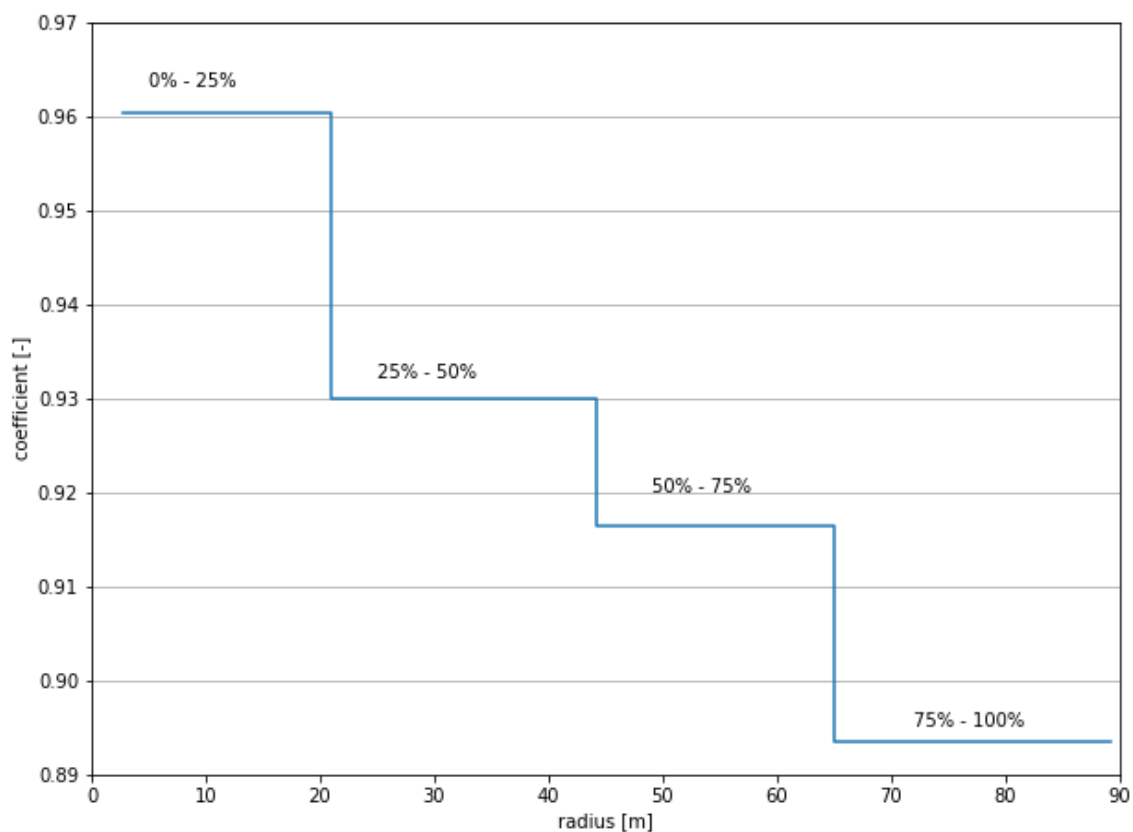
Για το σκοπό αυτό, εξετάζονται 4 περιπτώσεις σχετικά με την κατανομή του συντελεστή (coefficient) μεταβολής του πάχους. Στις 3 πρώτες, το πτερύγιο χωρίζεται σε 1, 2 και 4 ίσα (κατά το ποσοστό της ακτίνας) τμήματα, αντίστοιχα, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από μια σταθερή τιμή του συντελεστή. Δηλαδή, στην 1^η περίπτωση ($n = 1$) το πάχος μειώνεται ομοιόμορφα κατά το ίδιο ποσοστό σε όλο το μήκος του πτερυγίου. Η κατανομή του συντελεστή μεταβολής του πάχους για τη 2^η ($n = 2$) και την 3^η ($n = 4$) περίπτωση απεικονίζονται αντίστοιχα στο *Γράφημα 3.7* και *Γράφημα 3.8*. Όσον αφορά την 4^η περίπτωση, εξετάζεται μια συνεχής κατανομή του συντελεστή, η οποία δίνεται από μία κυβική καμπύλη Bezier (*Γράφημα 3.9*). Στις 3 πρώτες περιπτώσεις, μεταβλητές σχεδιασμού αποτελούν οι ίδιοι οι συντελεστές, ενώ στην 4^η περίπτωση ως μεταβλητές επιλέγονται τα 4 σημεία ελέγχου (control points) της Bezier και πιο συγκεκριμένα οι τεταγμένες τους. Οι τετμημένες ορίστηκαν σταθερές με τη λογική της προσπάθειας μείωσης του υπολογιστικού κόστους.

Στόχος του παρόντος πλαισίου βελτιστοποίησης αποτελεί η ελαχιστοποίηση του εμβαδού που περικλείεται ανάμεσα στις καμπύλες του κριτηρίου ασοχίας Tsai – Wu του νέου πτερυγίου και του πτερυγίου αναφοράς, έτσι ώστε τα μέγιστα φορτία στο πτερύγιο μειωμένου βάρους να διατηρούνται στα ίδια επίπεδα με αυτά του πτερυγίου αναφοράς. Άρα, η αντικειμενική συνάρτηση παραμένει ίδια με

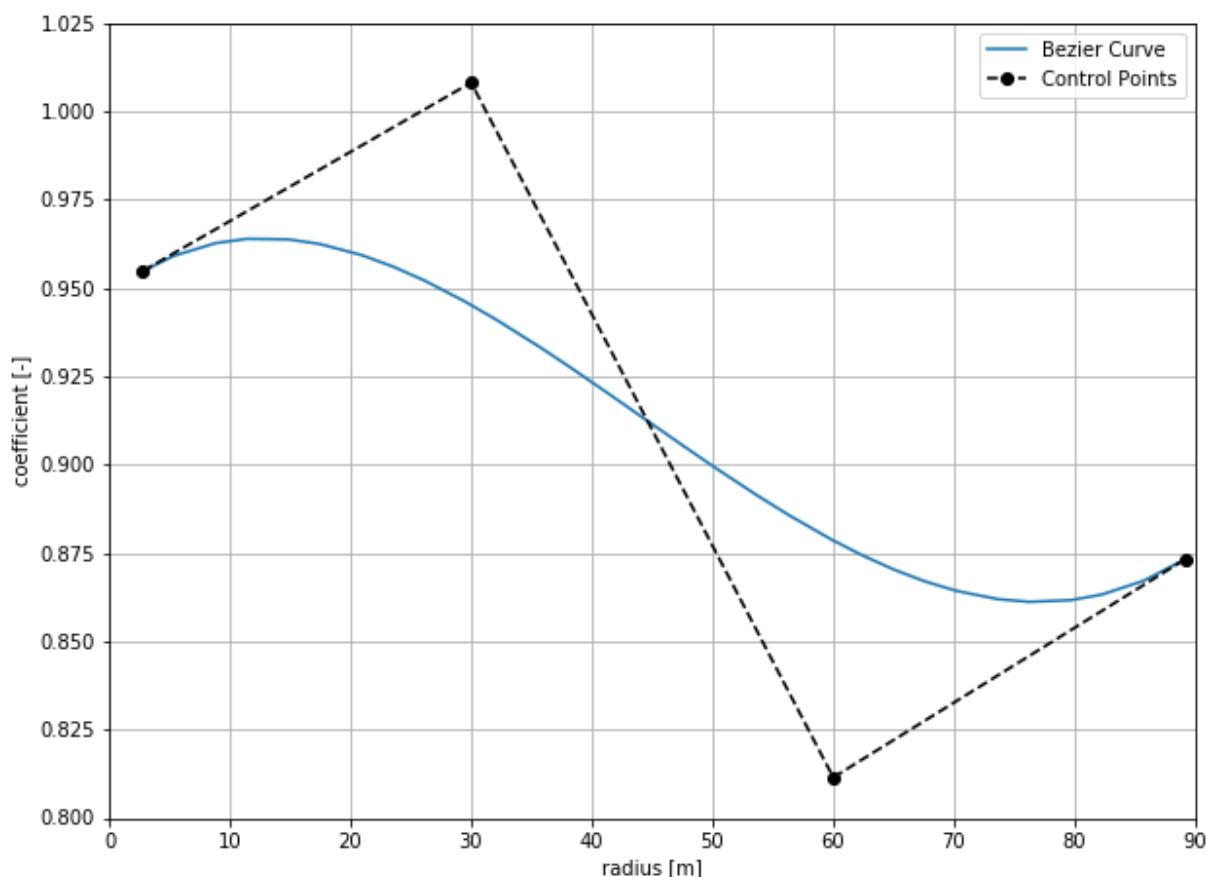
βασική, όμως, διαφορά ότι σε αυτή τη φάση επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις 4 βελτιστοποιήσεις δίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.3.



Γράφημα 3.7: Κατανομή του συντελεστή μεταβολής του πάχους κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 2$



Γράφημα 3.8: Κατανομή του συντελεστή μεταβολής του πάχους κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 4$



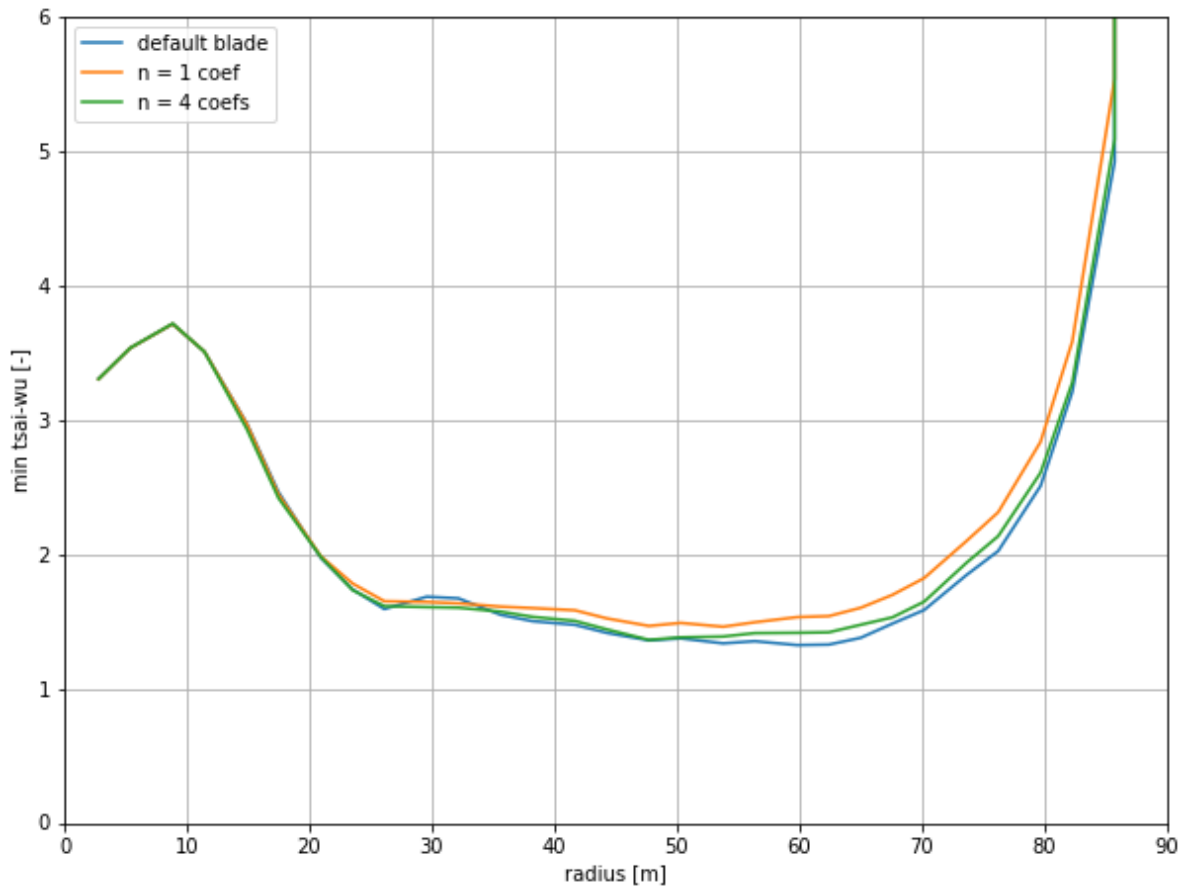
Γράφημα 3.9: Κατανομή του συντελεστή μεταβολής του πάχους κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση καμπύλης Bezier

Όπως αναμενόταν, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μείωση μάζας συγκριτικά με το πτερύγιο αναφοράς ($m_{default} = 42044,5 \text{ kg}$) όταν διαμερίζουμε το νέο πτερύγιο σε περισσότερα τμήματα, με βέλτιστη περίπτωση αυτήν της καμπύλης Bezier. Με την κυβική καμπύλη Bezier να περιγράφει την κατανομή του συντελεστή μεταβολής του πάχους, έχουμε σχεδόν ταύτιση των δύο καμπυλών ελάχιστων τιμών του κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu (Γράφημα 3.11).

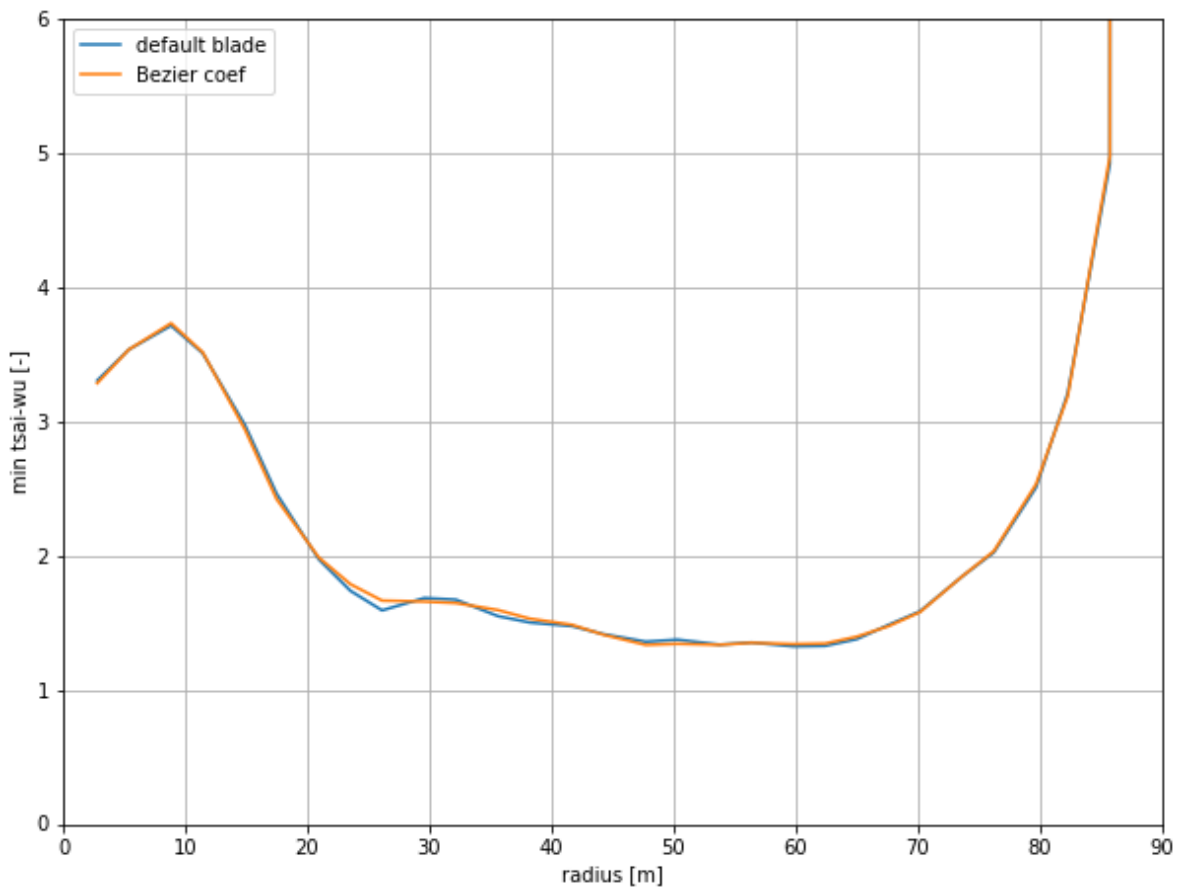
Επιπλέον, σε όλες τις περιπτώσεις (εκτός της 1^{ης} όπου το πάχος μειώνεται ομοιόμορφα), όσο μετακινούμαστε από τη ρίζα προς το ακροπτερύγιο (tip), η κατανομή του συντελεστή βαίνει μειούμενη, δηλαδή το πάχος μειώνεται πιο δραστικά. Η τάση αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι κοντά στη ρίζα τα φορτία που δέχεται το πτερύγιο είναι μεγαλύτερα, επομένως, υπάρχει μικρότερο περιθώριο μείωσης του πάχους για λόγους ασφαλούς λειτουργίας.

 Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα των 4 βελτιστοποιήσεων του 2^{ου} σταδίου

Περίπτωση	$coef_1$	$coef_2$	$coef_3$	$coef_4$	Εμβαδόν [-]	Μάζα [kg]	Μείωση μάζας
$n = 1$	0,982				0,16917	41285,2	1,806%
$n = 2$	0,971	0,881			0,09337	40012,7	4,832%
$n = 4$	0,960	0,930	0,916	0,893	0,08268	39527,7	5,986%
Καμπύλη Bezier	$x_1 = 2,8$ $y_1 = 0,955$	$x_2 = 30$ $y_2 = 1,008$	$x_3 = 60$ $y_3 = 0,811$	$x_4 = 89,2$ $y_4 = 0,873$	0,06357	39403,4	6,282%



Γράφημα 3.10: Συγκριτικό διάγραμμα κριτηρίου αστοχίας μεταξύ των ελαφρύτερων πτερυγίων και του πτερυγίου αναφοράς



Γράφημα 3.11: Σύγκριση ελάχιστων τιμών κριτηρίου αστοχίας κατά μήκος των πτερυγίων – Περίπτωση καμπύλης Bezier

3.5 Βελτιστοποίηση διπλού βρόχου με στόχο τη μέγιστη μείωση μάζας

Στο τελικό στάδιο, για να εκτιμηθεί ο βέλτιστος δυνατός σχεδιασμός του πτερυγίου ως προς τη μείωση της μάζας του, εφαρμόζεται ένα πλήρες πλαίσιο βελτιστοποίησης, στο οποίο μεταβλητές αποτελούν τόσο οι τιμές της γωνίας προσανατολισμού των ινών των επιμέρους τμημάτων του πτερυγίου, όσο και η κατανομή του συντελεστή μεταβολής του πάχους που αποδίδεται μέσω μιας κυβικής καμπύλης Bezier.

Για την καλύτερη δυνατή ακρίβεια των αποτελεσμάτων και τον περιορισμό του υπολογιστικού κόστους, το εν λόγω πλαίσιο βελτιστοποίησης επιμερίστηκε σε δύο βρόχους με διαφορετικές μεταβλητές σχεδιασμού και διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι γωνίες προσανατολισμού των ινών ply_1 και ply_2 που εισάγονται στα τμήματα 20% – 60% και 60% – 100% του μήκους του πτερυγίου ορίστηκαν ως οι μεταβλητές του εξωτερικού βρόχου, ενώ οι τεταγμένες των 4 σημείων ελέγχου της Bezier αποτέλεσαν τις μεταβλητές του εσωτερικού βρόχου της βελτιστοποίησης. Σε ό,τι αφορά τις συναρτήσεις κόστους, ο εξωτερικός βρόχος στοχεύει στη μείωση της μάζας, ενώ ο εσωτερικός στην ελαχιστοποίηση του εμβαδού μεταξύ των καμπυλών του κριτηρίου αστοχίας βελτιστοποιημένου πτερυγίου – πτερυγίου αναφοράς.

Από αυτή τη διαδικασία λαμβάνουμε το βέλτιστο σχεδιασμό του πτερυγίου με τη μέθοδο παθητικού ελέγχου της εισαγωγής γωνίας στις ίνες του σύνθετου υλικού των spar caps. Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται διεξοδικά παρακάτω μέσω πινάκων και γραφημάτων.

Πίνακας 3.4: Τιμές της γωνίας προσανατολισμού των ινών για τη βέλτιστη λύση

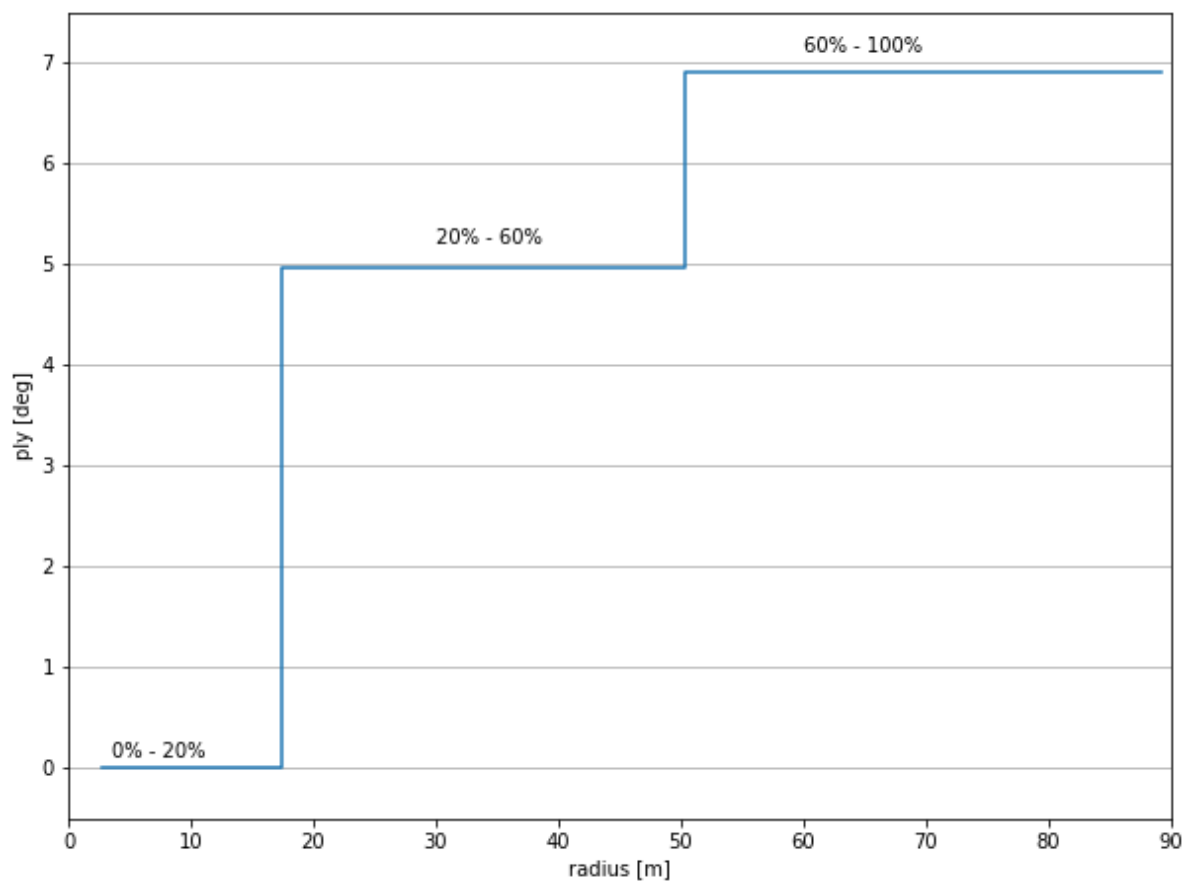
Τμήμα πτερυγίου [%]	Γωνία προσανατολισμού ινών [°]
0 – 20	0
20 – 60	4,96
60 – 80	6,91

Πίνακας 3.5: Συντεταγμένες των σημείων ελέγχου της Bezier

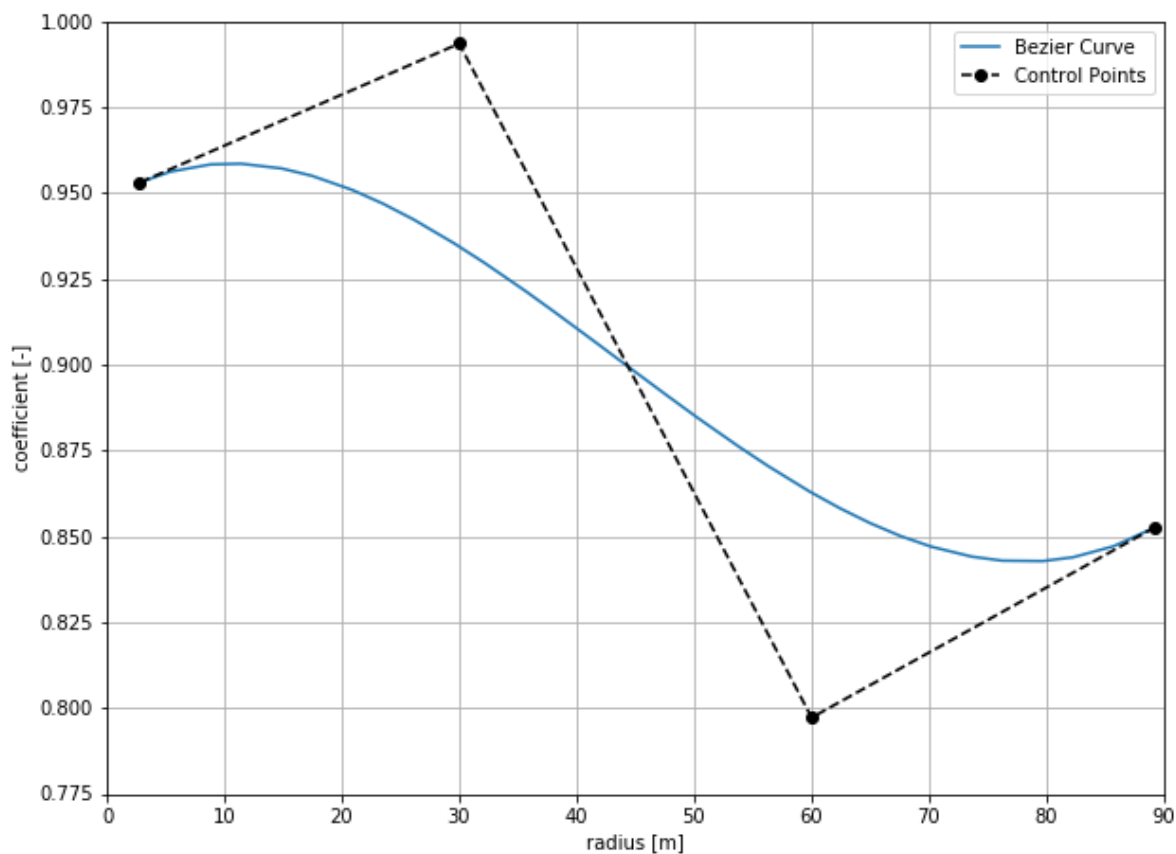
$x_{control}$	$y_{control}$
2,800	0,953
30,000	0,994
60,000	0,797
89,166	0,853

Πίνακας 3.6: Τελικά αποτελέσματα για τη βέλτιστη λύση

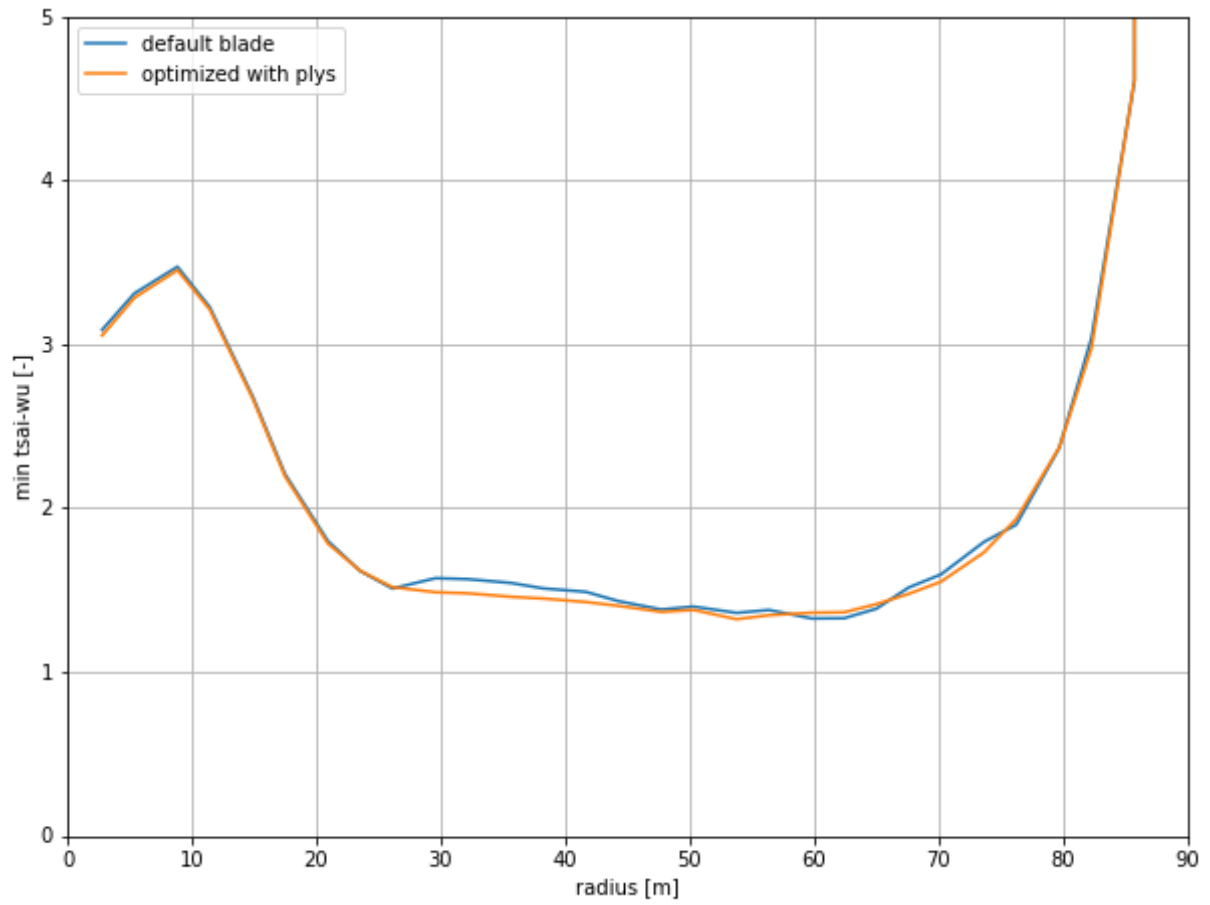
Εμβαδόν [–]	0,06822
Μάζα [kg]	39007,2
Μείωση μάζας συγκριτικά με το default	7,224%



Γράφημα 3.12: Κατανομή του ply κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου



Γράφημα 3.13: Κατανομή του coefficient κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με plys

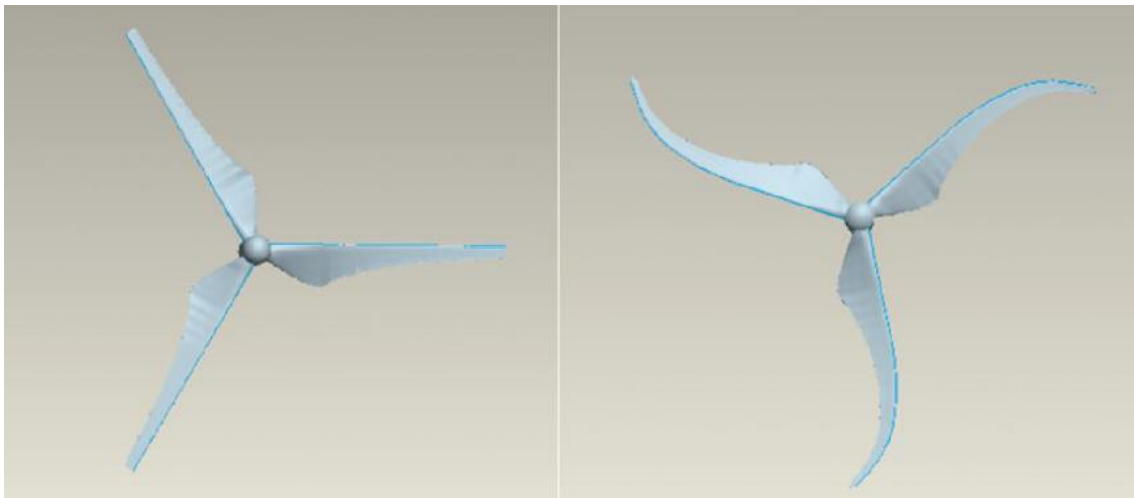


Γράφημα 3.14: Ελάχιστες τιμές του κριτηρίου Tsai – Wu κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με plys

4 Παθητικός έλεγχος φορτίων μέσω κύρτωσης του πτερυγίου

4.1 Σχεδιασμός πτερυγίου με backward sweep

Η δεύτερη μέθοδος παθητικού ελέγχου που επιλέγεται και βασίζεται επίσης στη σύζευξη κάμψης – συστροφής (BTC) είναι η πρόσδοση κυρτότητας (sweep) στον ελαστικό άξονα του πτερυγίου. Η κυρτότητα εισάγεται στο πτερύγιο με κατεύθυνση αντίθετη της περιστροφής του, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.1*, όπου η φορά περιστροφής είναι αριστερόστροφη. Κατ’ αυτόν τον τρόπο σχεδιάζονται τα λεγόμενα pre-swept πτερύγια. Όταν ένα τέτοιο πτερύγιο κάμπτεται προς την κατεύθυνση του ανέμου, στρέφεται ταυτόχρονα γύρω από τον ελαστικό άξονά του, με αποτέλεσμα να μειώνεται η γωνία πρόσπτωσης της φαινόμενης ροής και ως εκ τούτου να περιορίζονται τα αεροδυναμικά φορτία. [23]



Εικόνα 4.1: Ευθύ πτερύγιο (αριστερά) και pre-swept πτερύγιο (δεξιά) [23]

Επομένως, αυτή η μέθοδος παθητικού ελέγχου φορτίων χαρακτηρίζεται από την εισαγωγή γωνιακής απόκλισης/κύρτωσης στο σχήμα του πτερυγίου στο επίπεδο του δρομέα. Μια τέτοια αλλαγή στη γεωμετρία του πτερυγίου παράγει μια κατανομή δυνάμεων κατά μήκος του, η οποία περιορίζει ένα μέρος του από το να στρέφεται στην κατεύθυνση αύξησης της γωνίας προσβολής. Δηλαδή μέσω κύρτωσης προς τα πίσω (backward sweep) του ελαστικού άξονα του πτερυγίου προκαλείται μείωση της γωνίας προσβολής. [6]

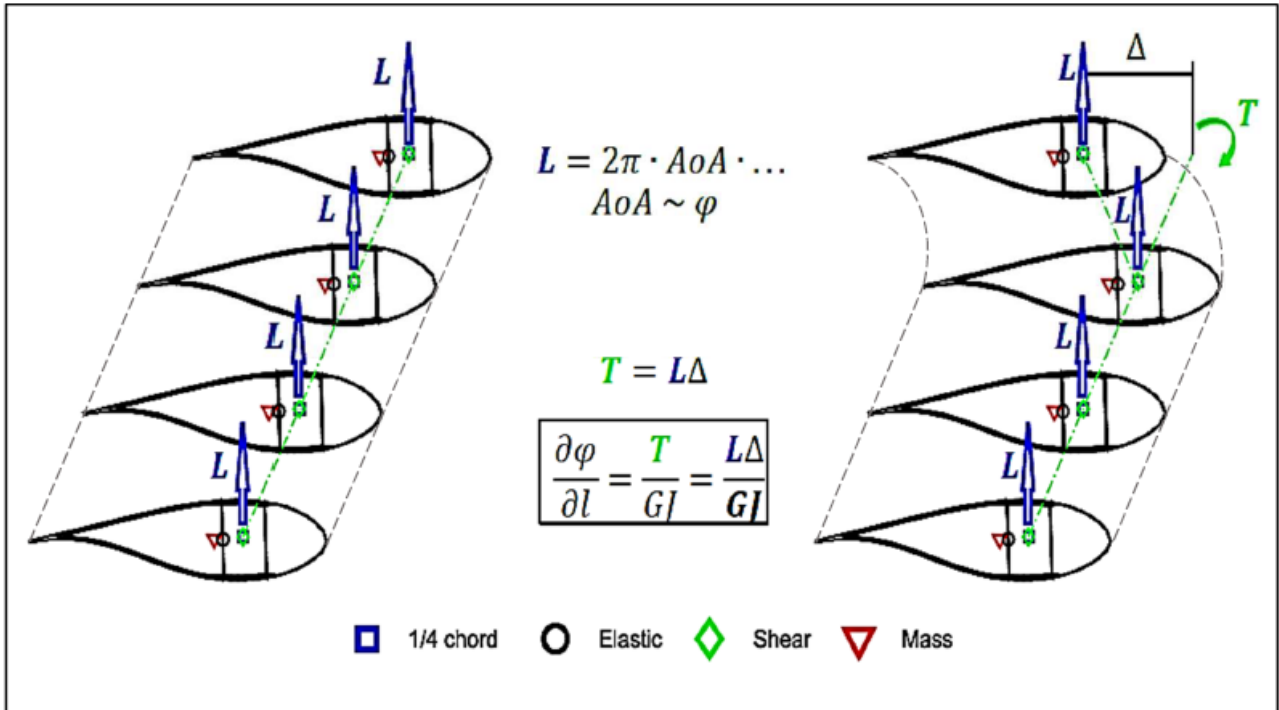
Αναλυτικότερα, η δύναμη ανύψωσης L που ασκείται στο πτερύγιο είναι ανάλογη της γωνίας προσβολής AoA , η οποία, με τη σειρά της, είναι ανάλογη με τη γωνία της εισερχόμενης ροής του ανέμου φ . Όταν ένα μέρος του πτερυγίου “αποκλίνει” από την ευθεία, δημιουργείται μια ροπή T , η οποία είναι ανάλογη της δύναμης ανύψωσης L και του βέλους Δ (*Εικόνα 4.2*). Αυτή η ροπή θα προκαλέσει τοπική μεταβολή της γωνίας φ , κατά μήκος ενός τμήματος l του πτερυγίου. Η ποσότητα $\partial\varphi/\partial l$, εάν η κύρτωση εφαρμοστεί προς την ακμή εκφυγής του πτερυγίου (backward sweep), προκαλεί μείωση της γωνίας προσβολής AoA με τελικό αποτέλεσμα τον περιορισμό των φορτίων. [6]

Προκειμένου να μετατρέψουμε το πτερύγιο αναφοράς σε pre-swept πτερύγιο, ώστε να προχωρήσουμε στη συνέχεια στις διάφορες διαδικασίες βελτιστοποίησης, χρειάζεται να περιγραφεί η κύρτωση αυτή που θα εισαχθεί μέσω κάποιων εξισώσεων – μοντέλων. Στην παρούσα εργασία, έχουν υιοθετηθεί δύο μοντέλα για την απόδοση της κυρτότητας, το ένα είναι μια εκθετική εξίσωση και το άλλο μια κυβική καμπύλη Bezier. Η κυβική καμπύλη Bezier καθορίζεται, ως γνωστόν, με τη βοήθεια 4 σημείων ελέγχου (control points).

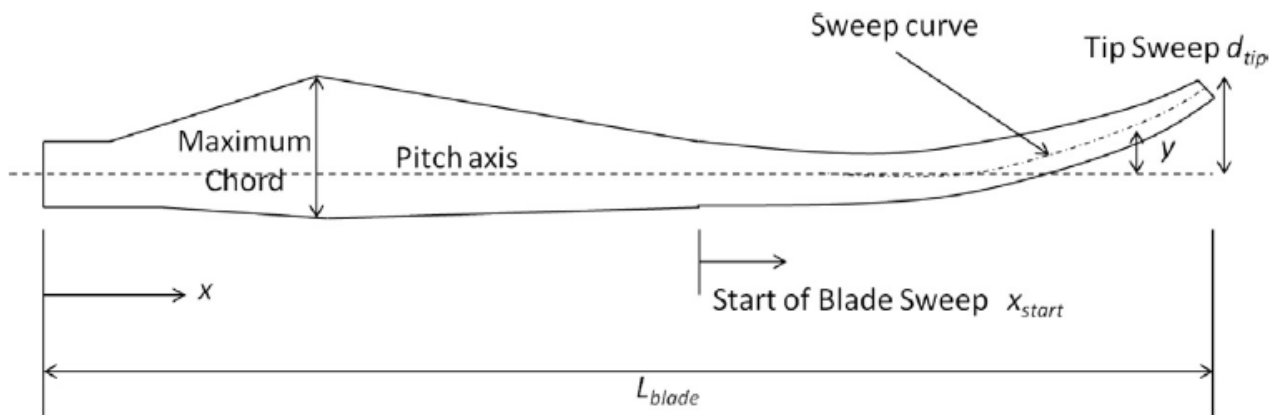
Όσον αφορά την εκθετική καμπύλη για την απόδοση της κυρτότητας (*Εικόνα 4.3*) αυτή δίνεται από την απλή εξίσωση:

$$y = d_{tip} \left(\frac{x - x_{start}}{L_{blade} - x_{start}} \right)^\gamma$$

όπου y είναι η τοπική απόσταση από τον άξονα βήματος (pitch axis) έως την καμπύλη, d_{tip} είναι η απόσταση από τον άξονα βήματος έως την καμπύλη στο ακροπτερύγιο (tip), x είναι η τοπική απόσταση κατά μήκος του πτερυγίου που μετρείται από τη ρίζα του, x_{start} είναι η θέση όπου αρχίζει να εφαρμόζεται η κυρτότητα, L_{blade} είναι το συνολικό μήκος του πτερυγίου και γ είναι ο εκθέτης του sweep. Υψηλότεροι εκθέτες δημιουργούν μεγαλύτερη καμπυλότητα. [10]



Εικόνα 4.2: Σχεδιασμός πτερυγίου με κύρτωση [6]



Εικόνα 4.3: Εκθετική καμπύλη sweep [10]

4.2 Βελτιστοποίηση με στόχο τη μείωση φορτίων

Σε αυτό το στάδιο, για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή μείωση φορτίων που αναπτύσσονται στο νέο πτερύγιο, στο πλαίσιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης, η καμπύλη του sweep θα αποτελέσει τη μεταβλητή σχεδιασμού του προβλήματος. Ως αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται το εμβαδόν ανάμεσα στις καμπύλες των ελάχιστων τιμών του κριτηρίου Tsai – Wu κατά μήκος του sweep πτερυγίου και του

πτερυγίου αναφοράς και επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του. Στη φάση αυτή, η δυνατότητα παθητικού ελέγχου των φορτίων στο νέο πτερυγίο μελετάται χωρίς να γίνει οποιαδήποτε αλλαγή στη μάζα του.

Εξετάζονται 3 περιπτώσεις σχετικά με την καμπύλη του sweep κατά μήκος του πτερυγίου. Στις πρώτες δύο χρησιμοποιείται το εκθετικό μοντέλο και ως μεταβλητές λογίζονται τα γ και d_{tip} . Το σημείο διαφοροποίησης τους είναι η θέση έναρξης της κύρτωσης x_{start} , που λαμβάνεται πολύ κοντά στη ρίζα για την 1^η περίπτωση και στο μέσο του πτερυγίου για τη 2^η. Στην 3^η περίπτωση γίνεται χρήση της καμπύλης Bezier για την απόδοση της κύρτωσης και ως μεταβλητές θεωρούνται τα 4 σημεία ελέγχου της και πιο συγκεκριμένα οι τεταγμένες τους. Διεξάγονται επομένως 3 ανεξάρτητες βελτιστοποιήσεις.

Ο τρόπος που εξελίσσεται το sweep κατά μήκος του πτερυγίου για τις πρώτες 2 περιπτώσεις (εκθετικές εξισώσεις) και για την 3^η περίπτωση (κυβική καμπύλη Bezier) απεικονίζεται στο *Γράφημα 4.1* και στο *Γράφημα 4.2*, αντίστοιχα. Οι τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού και των εμβαδών που προκύπτουν από τις 3 βελτιστοποιήσεις δίνονται στον *Πίνακα 4.1* και στον *Πίνακα 4.2*.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα των 3 βελτιστοποιήσεων του 1^{ου} σταδίου

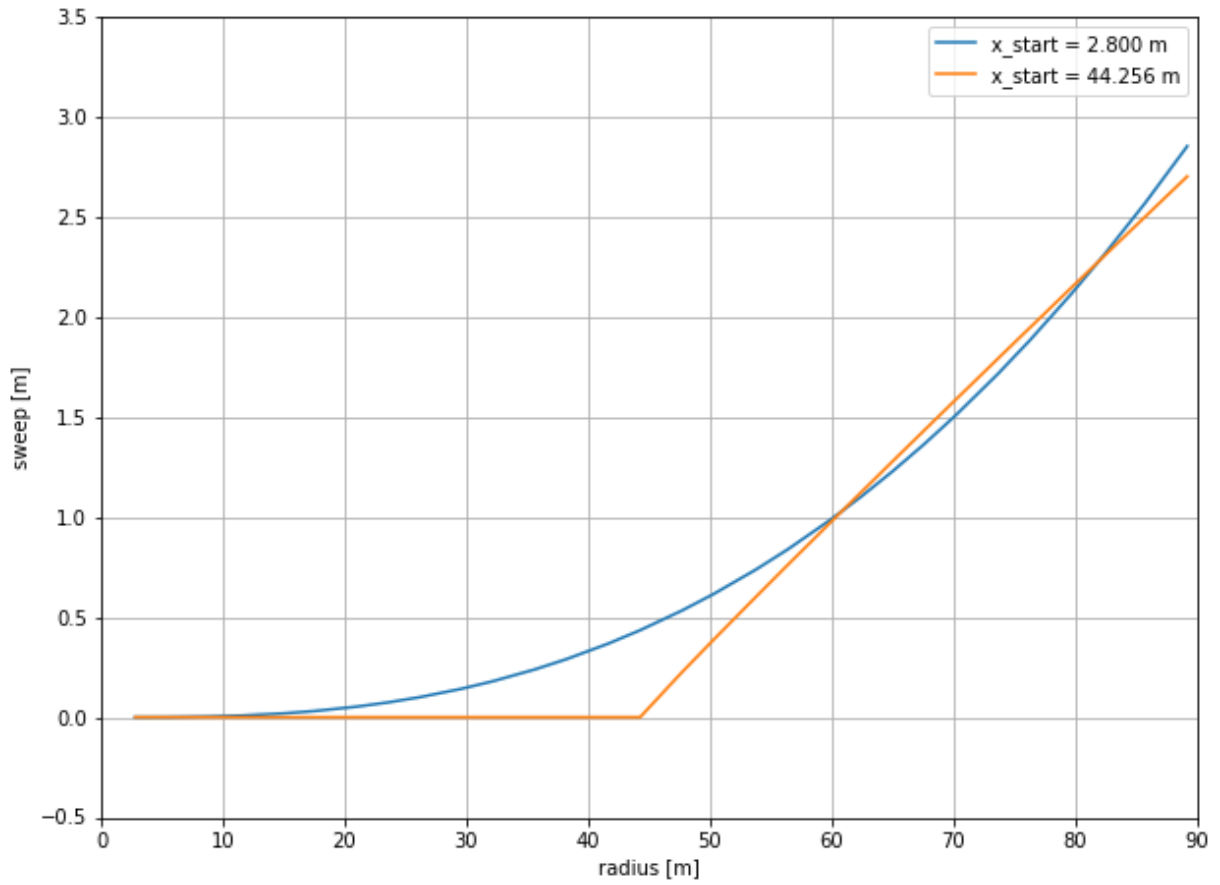
Περίπτωση	γ [–]	d_{tip} [m]	Εμβαδόν [–]
$x_{start} = 2,800\text{ m}$	2,564	2,851	0,39342
$x_{start} = 44,256\text{ m}$	0,968	2,700	0,45226
Καμπύλη Bezier	Σημεία ελέγχου (control points)		0,39382

Πίνακας 4.2: Σημεία ελέγχου (control points)

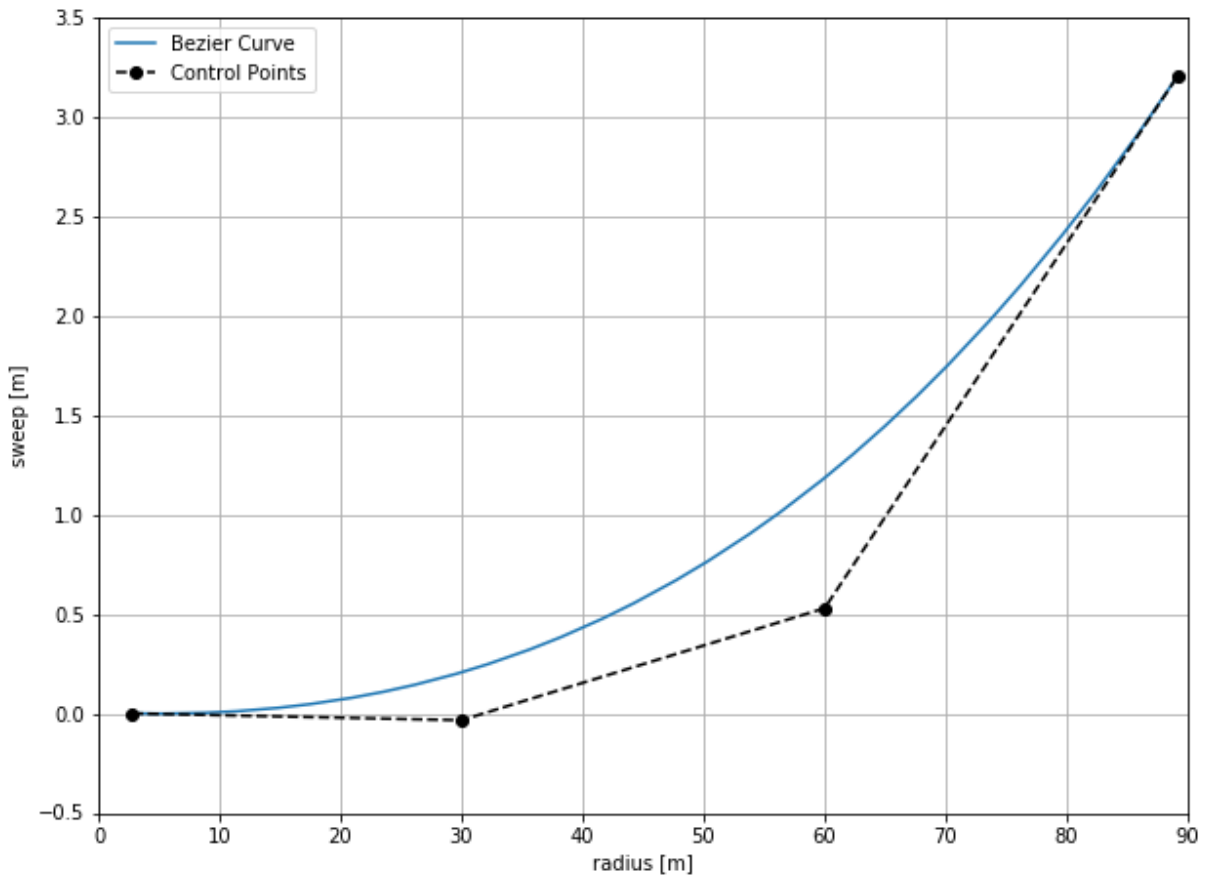
$x_{control}$	$y_{control}$
2,800	0,000
30,000	–0,034
60,000	0,529
89,166	3,204

Από τις τιμές των εμβαδών που προκύπτουν, η 2^η περίπτωση φαίνεται, αριθμητικά τουλάχιστον, να δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα. Ωστόσο, αν παρατηρήσουμε το *Γράφημα 4.1*, η γεωμετρία που προκύπτει είναι πολύ απότομη καθώς ο εκθέτης γ προέκυψε σχεδόν ίσος με τη μονάδα. Δεν έχουμε επομένως μια ομαλή/σταδιακή κύρτωση του πτερυγίου, αλλά μια γραμμική μεταβολή του sweep που πιθανότατα δεν κρίνεται εφαρμόσιμη στην πράξη, καθώς διαταράσσει το αεροδυναμικό σχήμα της πτέρυγας. Μεταξύ των άλλων 2 περιπτώσεων (της 1^{ης} και της 3^{ης}) η διαφορά που εντοπίζεται στο εμβαδόν είναι αμελητέα.

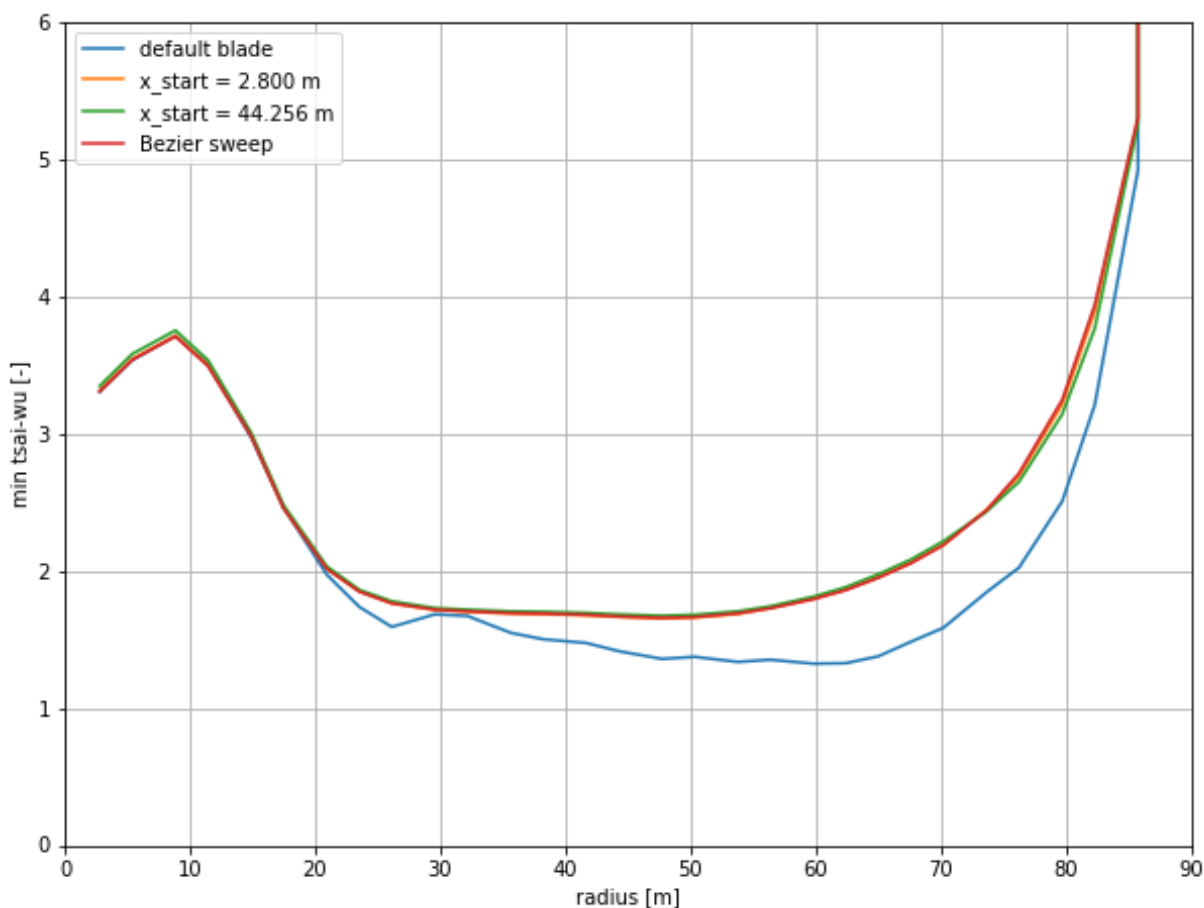
Ακόμη, στο *Γράφημα 4.3* που παρουσιάζονται συγκριτικά οι καμπύλες Tsai – Wu και για τις 3 περιπτώσεις, αυτές φαίνονται σχεδόν να συμπίπτουν. Επομένως, προς το παρόν δεν εξάγεται κάποια υπόθεση για το ποια διαμόρφωση είναι πιθανότερο να δώσει τελικά τη βέλτιστη λύση ως προς τη μείωση της μάζας. Για το λόγο αυτό, συνεχίζουμε στο επόμενο στάδιο της βελτιστοποίησης διπλού βρόχου εξετάζοντας εκ νέου και τις 3 περιπτώσεις για την κατανομή του sweep.



Γράφημα 4.1: Καμπύλες sweep με το μοντέλο της εκθετικής εξίσωσης



Γράφημα 4.2: Καμπύλη sweep που αποδίδεται μέσω κυβικής Bezier



Γράφημα 4.3: Σύγκριση καμπύλων Tsai – Wu του πτερυγίου αναφοράς με τις 3 περιπτώσεις swept πτερυγίων

4.3 Βελτιστοποίηση διπλού βρόχου με στόχο τη μέγιστη μείωση μάζας

Για να εντοπιστεί ο βέλτιστος δυνατός σχεδιασμός ενός swept πτερυγίου ως προς τη μείωση της μάζας του, εφαρμόζεται ένα πλήρες πλαίσιο βελτιστοποίησης, στο οποίο μεταβλητές αποτελούν τόσο η καμπύλη του sweep, όσο και η κατανομή του συντελεστή μεταβολής του πάχους που αποδίδεται μέσω μιας κυβικής καμπύλης Bezier.

Για την καλύτερη δυνατή ακρίβεια των αποτελεσμάτων και τον περιορισμό του υπολογιστικού κόστους, το εν λόγω πλαίσιο βελτιστοποίησης επιμερίστηκε σε δύο βρόχους με διαφορετικές μεταβλητές σχεδιασμού και διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που καθορίζουν την εκάστοτε καμπύλη sweep (γ και d_{tip} για τις εκθετικές, 4 τεταγμένες των σημείων ελέγχου για τη Bezier) ορίζονται ως μεταβλητές του εξωτερικού βρόχου, ενώ οι τεταγμένες των 4 σημείων ελέγχου της Bezier για την κατανομή του συντελεστή πάχους αποτελούν τις μεταβλητές του εσωτερικού βρόχου της βελτιστοποίησης. Όπου χρησιμοποιήθηκε καμπύλη Bezier, οι τετμημένες των σημείων ελέγχου της θεωρήθηκαν σταθερές και ίδιες έτσι ώστε να μειωθούν στο μισό οι μεταβλητές έναντι των οποίων διεξάγεται η διαδικασία βελτιστοποίησης. Σε ό,τι αφορά τις συναρτήσεις κόστους, ο εξωτερικός βρόχος στοχεύει στη μείωση της μάζας, ενώ ο εσωτερικός στην ελαχιστοποίηση του εμβαδού μεταξύ των καμπυλών του κριτηρίου αστοχίας βελτιστοποιημένου πτερυγίου – πτερυγίου αναφοράς.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις 3 βελτιστοποιήσεις διπλού βρόχου παρουσιάζονται εκτενώς στους Πίνακες 4.3 – 4.5. Όπως μπορούμε να δούμε στον πρώτο εξ αυτών, και στις τρεις επιτυγχάνεται μείωση μάζας, σε σύγκριση με το πτερύγιο αναφοράς ($m_{default} = 42044,5 \text{ kg}$), άνω του 12%. Οι τρεις περιπτώσεις για την καμπύλη του sweep απεικονίζονται στο Γράφημα 4.4. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι οι άξονες αυτού του γραφήματος έχουν πολύ διαφορετική κλίμακα μεταξύ τους έτσι

ώστε να είναι διακριτές οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των τριών διαμορφώσεων. Στην πραγματικότητα η κύρτωση αυτή είναι ανεπαίσθητη σ' ένα τόσο μεγάλο πτερύγιο.

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα των 3 βελτιστοποιήσεων διπλού βρόχου

Περίπτωση	γ [-]	d_{tip} [m]	Εμβαδόν [-]	Μάζα [kg]	Μείωση μάζας
$x_{start} = 2,800\text{ m}$	3,708	1,738	0,07797	36628,2	12,882%
$x_{start} = 44,256\text{ m}$	3,549	1,744	0,07420	36989,3	12,023%
Καμπύλη Bezier	Σημεία ελέγχου (control points)		0,08536	36635,8	12,864%

 Πίνακας 4.4: Σημεία ελέγχου για τη Bezier που περιγράφει το sweep – Περίπτωση 3^η

$x_{control}$	$y_{control}$
2,800	0,000
30,000	-0,187
60,000	-0,010
89,166	1,662

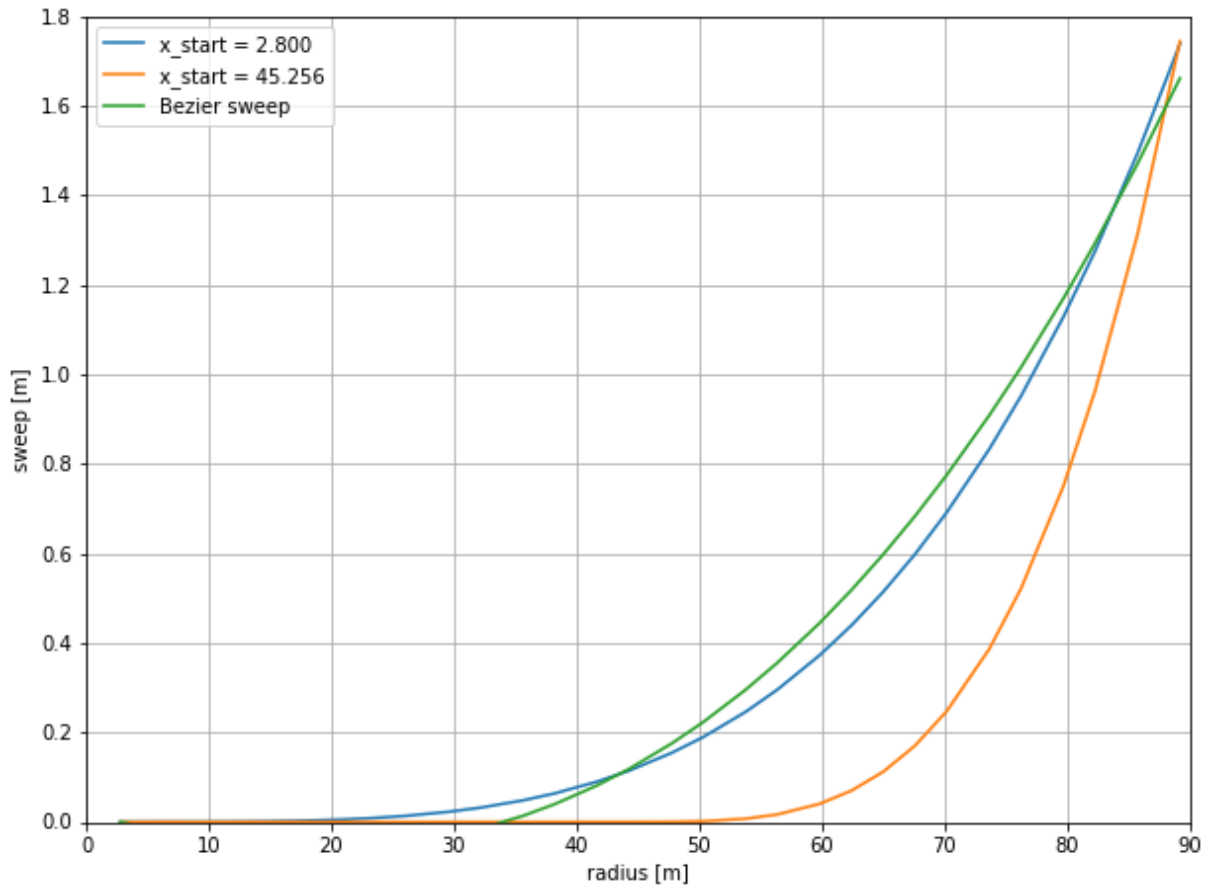
Πίνακας 4.5: Σημεία ελέγχου των Bezier που καθορίζουν τις κατανομές του συντελεστή μεταβολής του πάχους

Περίπτωση	$x_{start} = 2,800\text{ m}$	$x_{start} = 44,256\text{ m}$	Καμπύλη Bezier
$x_{control}$			$y_{control}$
2,800	0,939	0,934	0,943
30,000	0,994	1,060	0,967
60,000	0,544	0,478	0,570
89,166	0,799	0,837	0,815

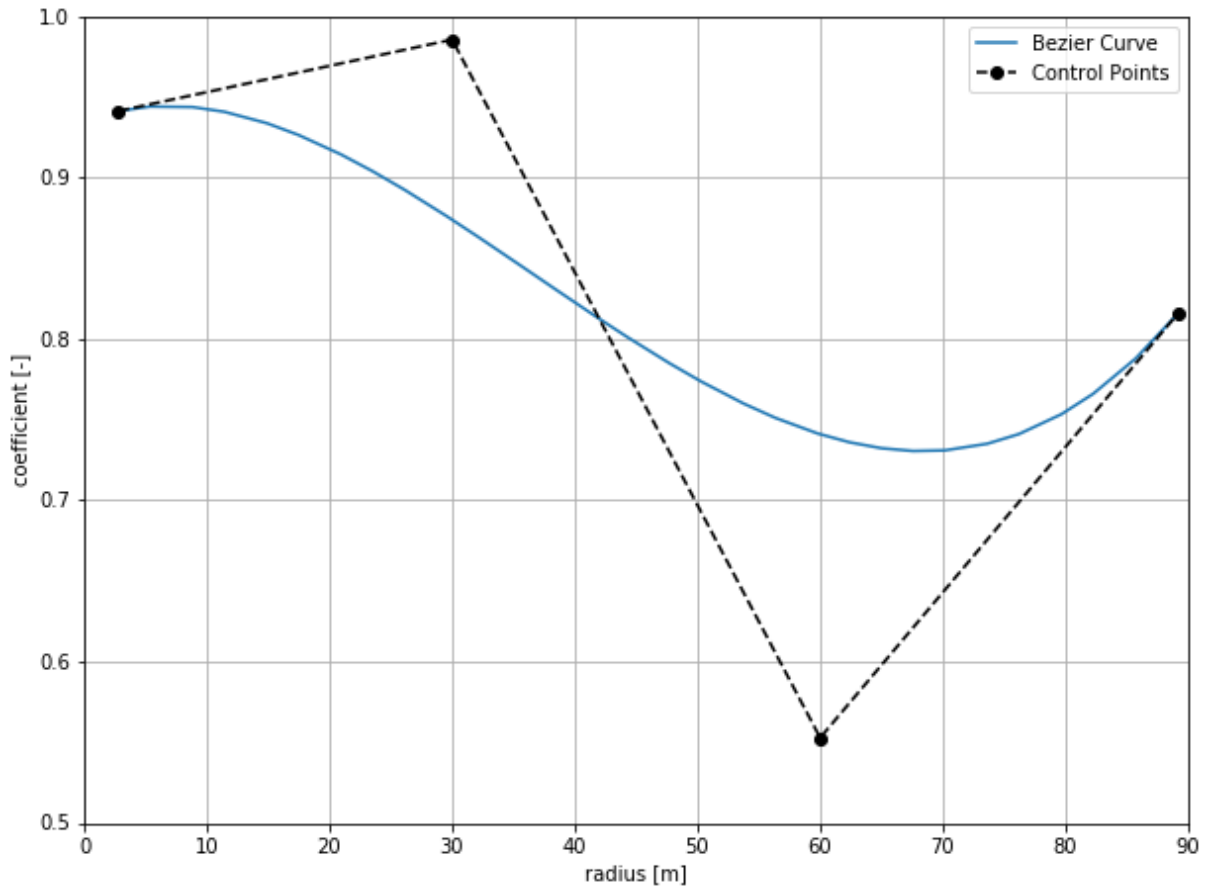
Και στις 3 περιπτώσεις το sweep στο ακροπτερύγιο (tip) κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα (μεταξύ 1,65 και 1,75 m από τον άξονα βήματος). Αυτό που αλλάζει αρκετά είναι η καμπυλότητα. Η 1^η περίπτωση, όπου το sweep δίνεται μέσω της εκθετικής εξίσωσης από την αρχή του πτερυγίου και η 3^η όπου το sweep αποδίδεται μέσω της καμπύλης Bezier καταλήγουν σε παρόμοια σχήματα της πτέρυγας. Στη 2^η περίπτωση, όπως είναι λογικό, αφού το sweep ξεκινά από το μέσο του πτερυγίου και καταλήγει σε παρόμοια τιμή στο tip, η καμπυλότητα είναι εμφανώς πιο έντονη. Παρά το γεγονός ότι και με τις 3 διαμορφώσεις επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό ο στόχος που έχει τεθεί, η μέγιστη μείωση μάζας σημειώνεται για την 1^η περίπτωση όπου η καμπύλη του sweep αποδόθηκε μέσω της εξίσωσης:

$$y = 1,738 \left(\frac{x - 2,8}{L_{blade} - 2,8} \right)^{3,708}$$

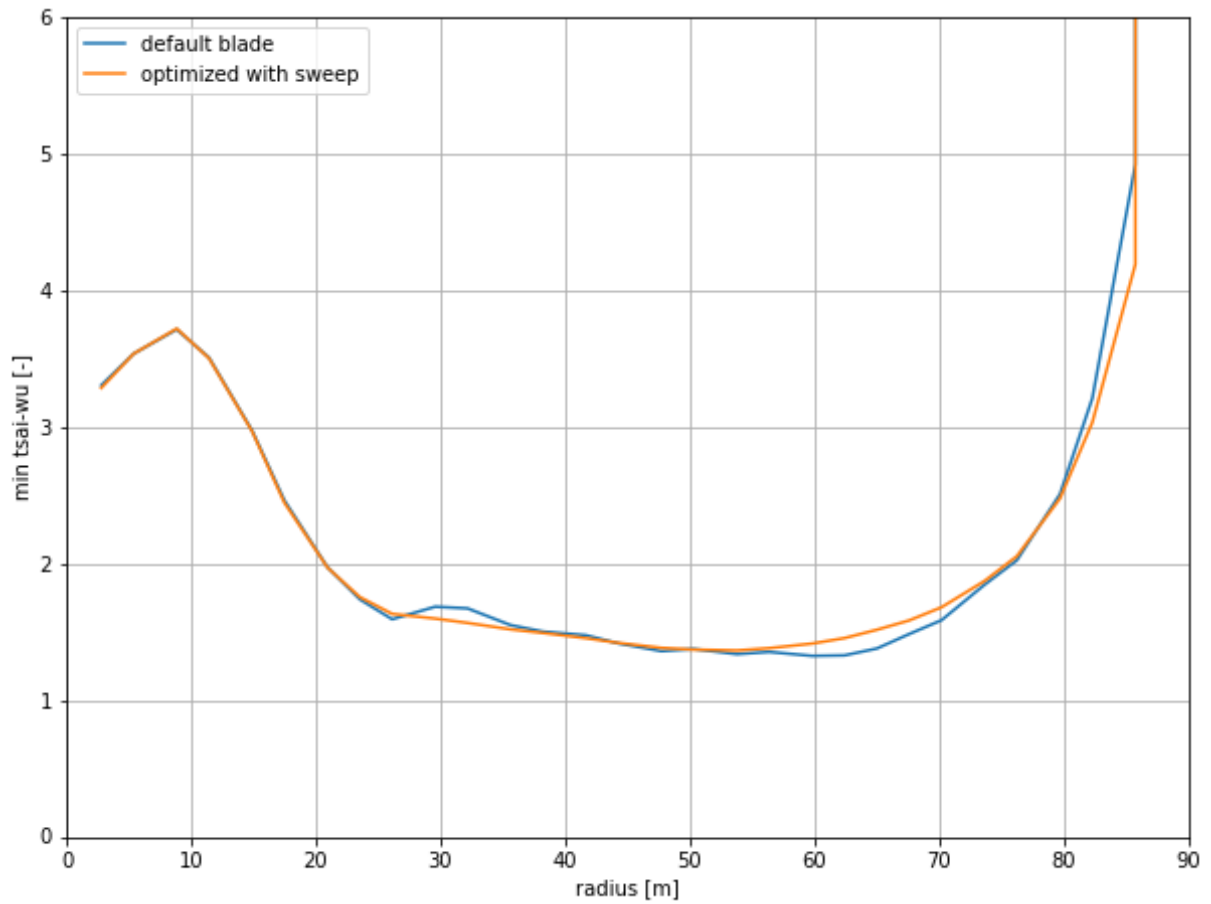
Αυτή η περίπτωση θα προκριθεί και ως η βέλτιστη για τη μέθοδο παθητικού ελέγχου φορτίων μέσω εισαγωγής κυρτότητας. Στο βελτιστοποιημένο αυτό πτερύγιο αναφέρεται και η κατανομή του coefficient και των ελάχιστων τιμών Tsai – Wu στο *Γράφημα 4.5* και στο *Γράφημα 4.6*, αντίστοιχα.



Γράφημα 4.4: Καμπύλες sweep 3 περιπτώσεων



Γράφημα 4.5: Κατανομή του coefficient κατά μήκος του βελτιστοποιημένου περυγίου με sweep



Γράφημα 4.6: Ελάχιστες τιμές του κριτηρίου Tsai – Wu κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με sweep

5 Σύγκριση – Συμπεράσματα

5.1 Συνοπτική παρουσίαση βέλτιστων διαμορφώσεων

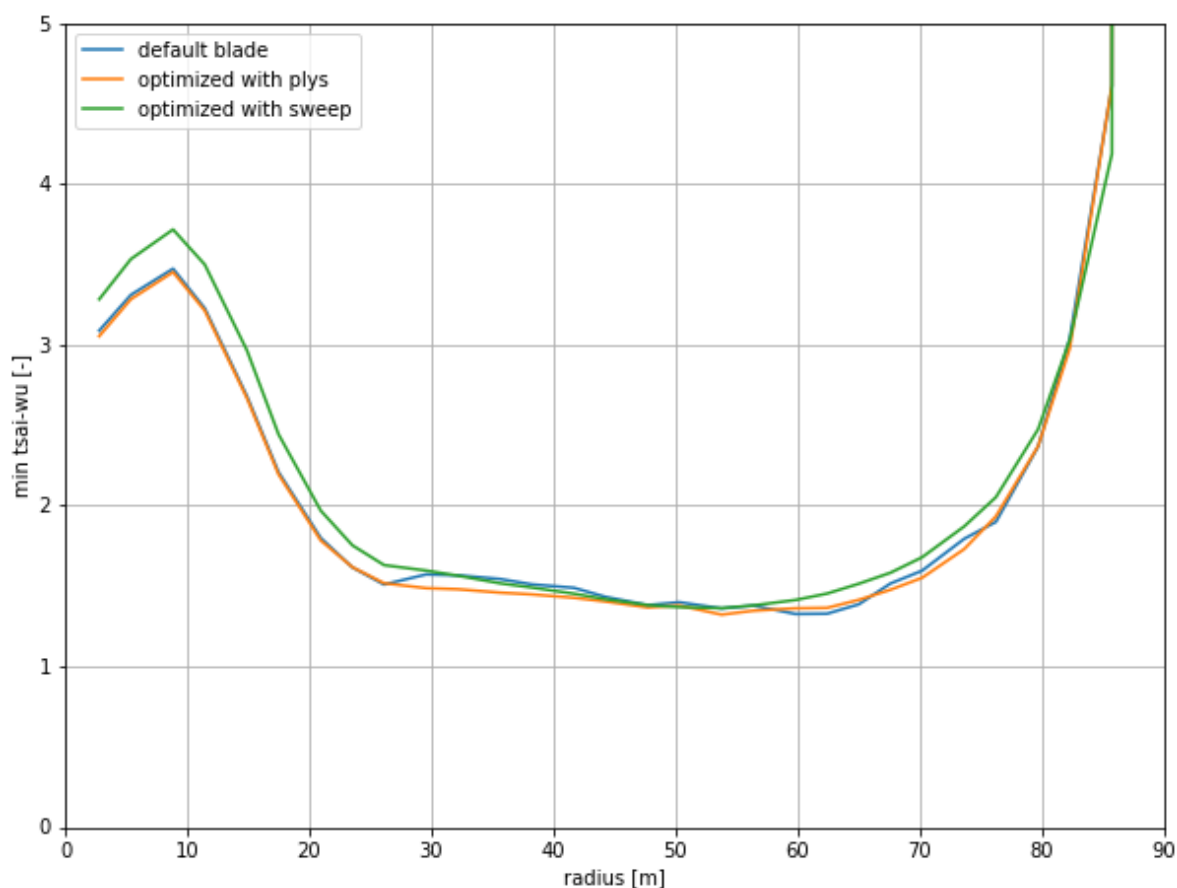
Για κάθε μία από τις δύο μεθόδους παθητικού ελέγχου φορτίων, που εξετάστηκαν αναλυτικά στα δύο προηγούμενα κεφάλαια, βρέθηκε τελικά μια βέλτιστη λύση ως προς τη μείωση της μάζας του νέου πτερυγίου. Οι βελτιστοποιημένες αυτές διαμορφώσεις, χρησιμοποιώντας σε κάθε περίπτωση την εκάστοτε στρατηγική για τον παθητικό περιορισμό των φορτίων, έχουν οδηγήσει σε νέα πτερύγια μειωμένης μάζας που διατηρούν ωστόσο τις ελάχιστες τιμές του κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu για τη δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης στα ίδια επίπεδα με αυτές του πτερυγίου αναφοράς (Γράφημα 5.1).

Το πρώτο βελτιστοποιημένο πτερύγιο χρησιμοποιεί την εισαγωγή γωνίας προσανατολισμού στις ίνες του μονοδιευθυντικού υλικού των spar caps για τον παθητικό έλεγχο των φορτίων που αναπτύσσονται σε αυτό. Το πτερύγιο επιμερίστηκε σε 3 τμήματα κατά το μήκος του, σε κάθε ένα από τα οποία εισάγεται μια σταθερή γωνία. Το πρώτο 20% του μήκους του πτερυγίου (ξεκινώντας από τη ρίζα του) δεν υφίσταται κάποια αλλαγή καθώς δέχεται τα μέγιστα φορτία. Οι τιμές των γωνιών (plys) που εισήχθησαν από το 20% έως το 60% του μήκους του και από το 60 έως το 100% είναι αντίστοιχα $4,96^\circ$ και $6,91^\circ$ (Γράφημα 3.12).

Το δεύτερο βελτιστοποιημένο πτερύγιο χρησιμοποιεί την εισαγωγή κυρτότητας (sweep) στον ελαστικό άξονά του για τον περιορισμό των αεροελαστικών φορτίων. Το καμπύλο αυτό σχήμα που λαμβάνει το πτερύγιο ξεκινάει να αναπτύσσεται στα 2,8 m από τη ρίζα του και δίνεται από την εκθετική εξίσωση:

$$y = 1,738 \left(\frac{x - 2,8}{L_{blade} - 2,8} \right)^{3,708}$$

όπου y είναι η απόσταση της διατομής στη θέση x από τον άξονα βήματος (Εικόνα 4.3).



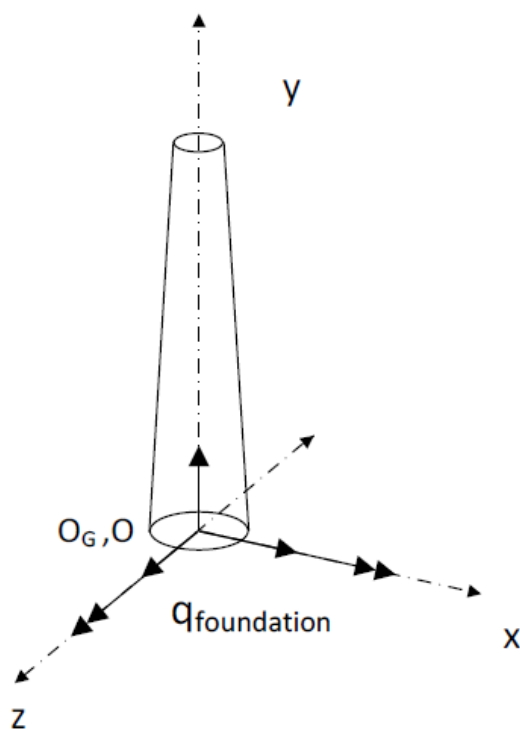
Γράφημα 5.1: Σύγκριση ελάχιστων τιμών κριτηρίου αστοχίας των βέλτιστων διαμορφώσεων για ταχύτητα ανέμου 13 m/s

Πίνακας 5.1: Σύγκριση βέλτιστων διαμορφώσεων

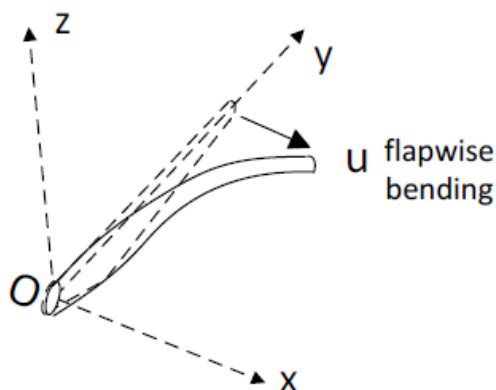
Μέθοδος παθητικού ελέγχου φορτίων	plys	sweep
Εμβαδόν [-]	0,06822	0,07797
Μάζα [kg]	39007,2	36628,2
Μείωση μάζας συγκριτικά με το default	7,224%	12,882%

5.2 Πλήρεις προσομοιώσεις για τον εντοπισμό των μέγιστων φορτίων

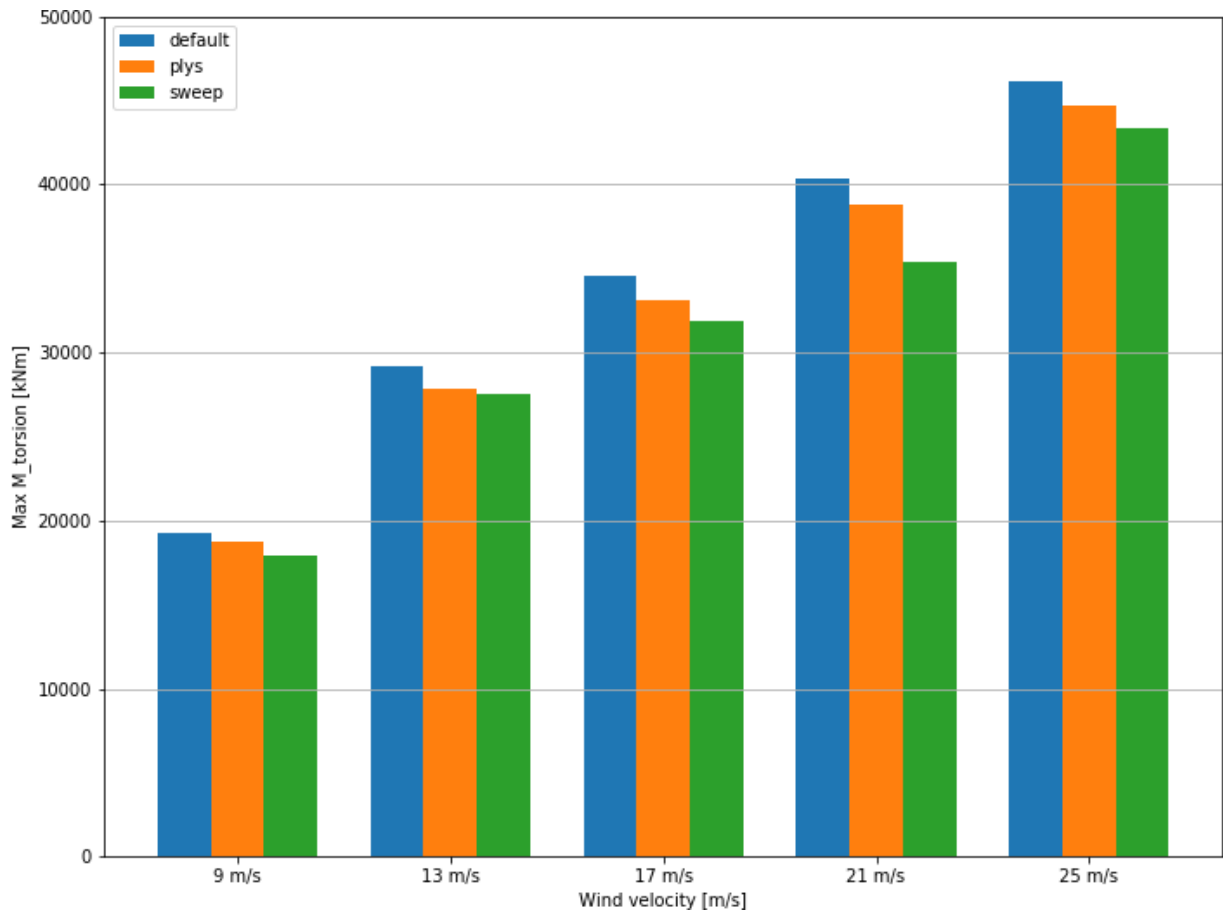
Για τις δύο παραπάνω βέλτιστες διαμορφώσεις πτερυγίων και σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας με έντονη τύρβη (DLC1.3) έγιναν 3 δεκάλεπτες προσομοιώσεις (realizations) της λειτουργίας των Α/Γ σε κάθε ταχύτητα ανέμου μέσα στο εύρος 5 m/s – 25 m/s. Στη συνέχεια, αφού σαρώθηκαν τα φορτία και στα 3 δεκάλεπτα σε κάθε ταχύτητα, εντοπίστηκαν οι μέγιστες (κατ' απόλυτη τιμή) ροπές που ασκούνται τόσο στη βάση του πύργου (Εικόνα 5.1), όσο και στη ρίζα των πτερυγίων (Εικόνα 5.2).



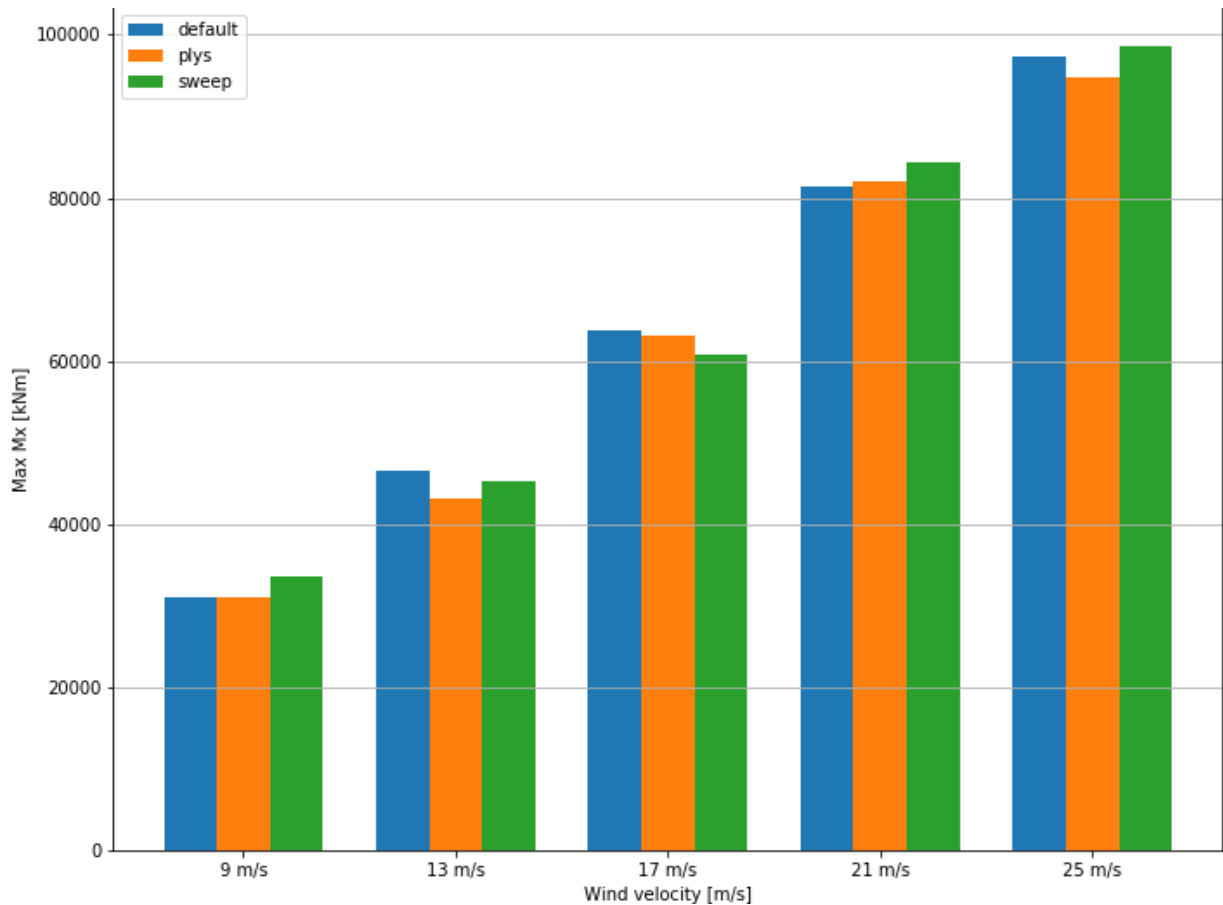
Εικόνα 5.1: Σύστημα συντεταγμένων για τον πύργο της Α/Γ [15]



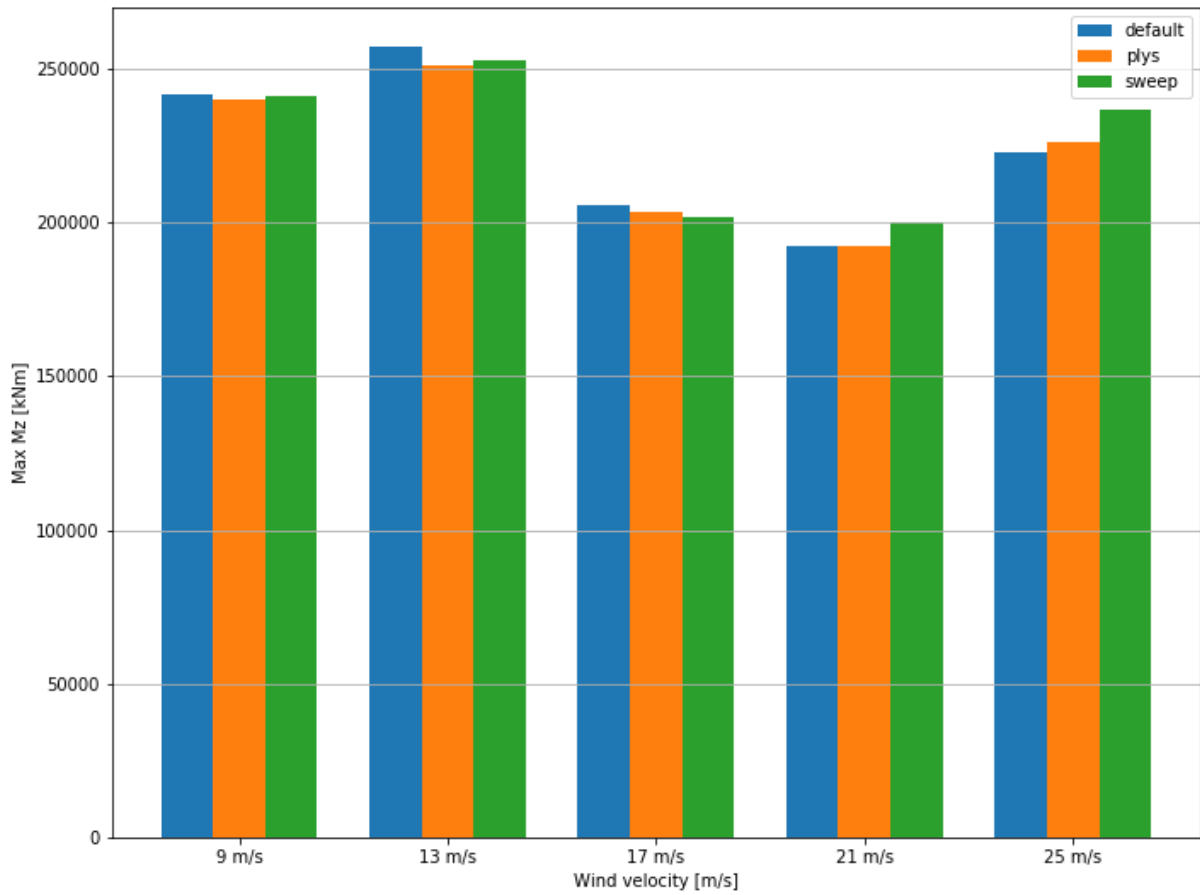
Εικόνα 5.2: Σύστημα συντεταγμένων για το πτερόγιο [15]



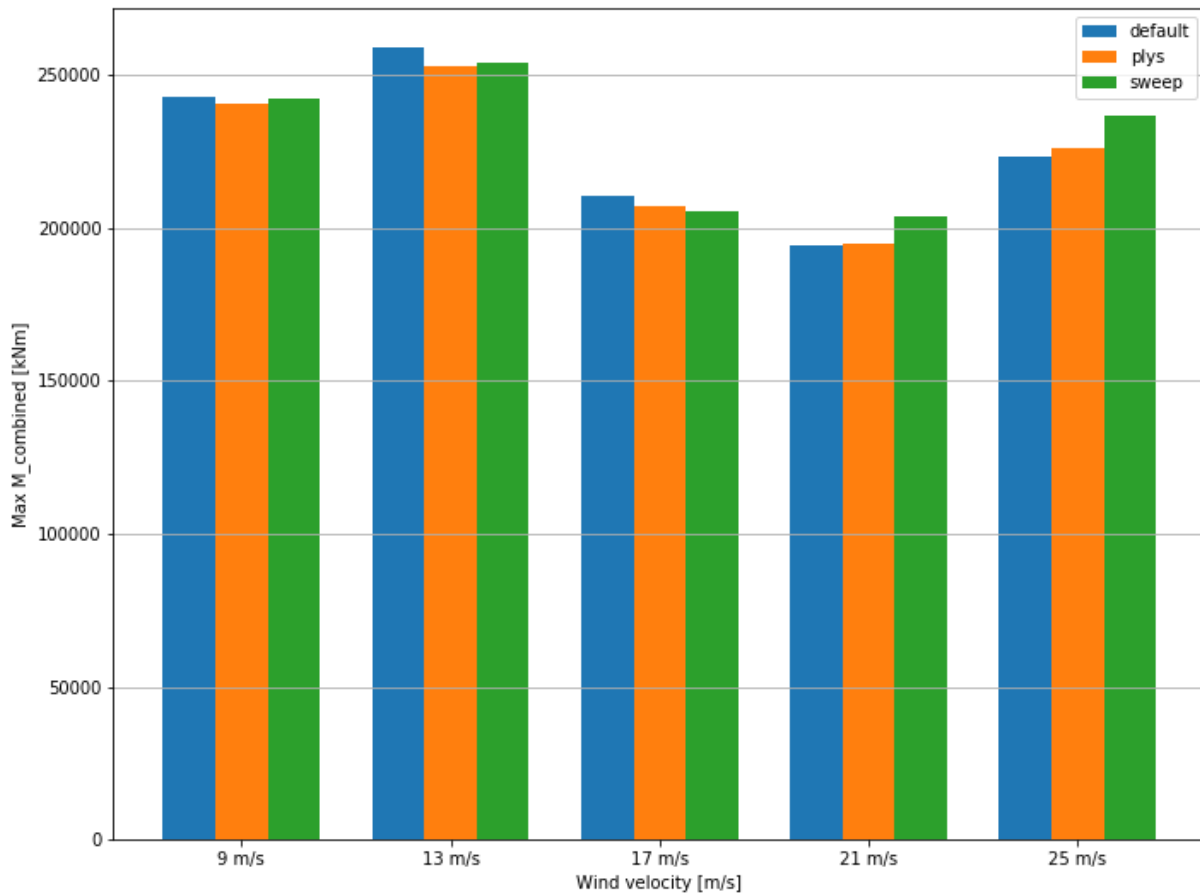
Γράφημα 5.2: Μέγιστες τιμές ροπής στρέψης M_y στη βάση του πύργου



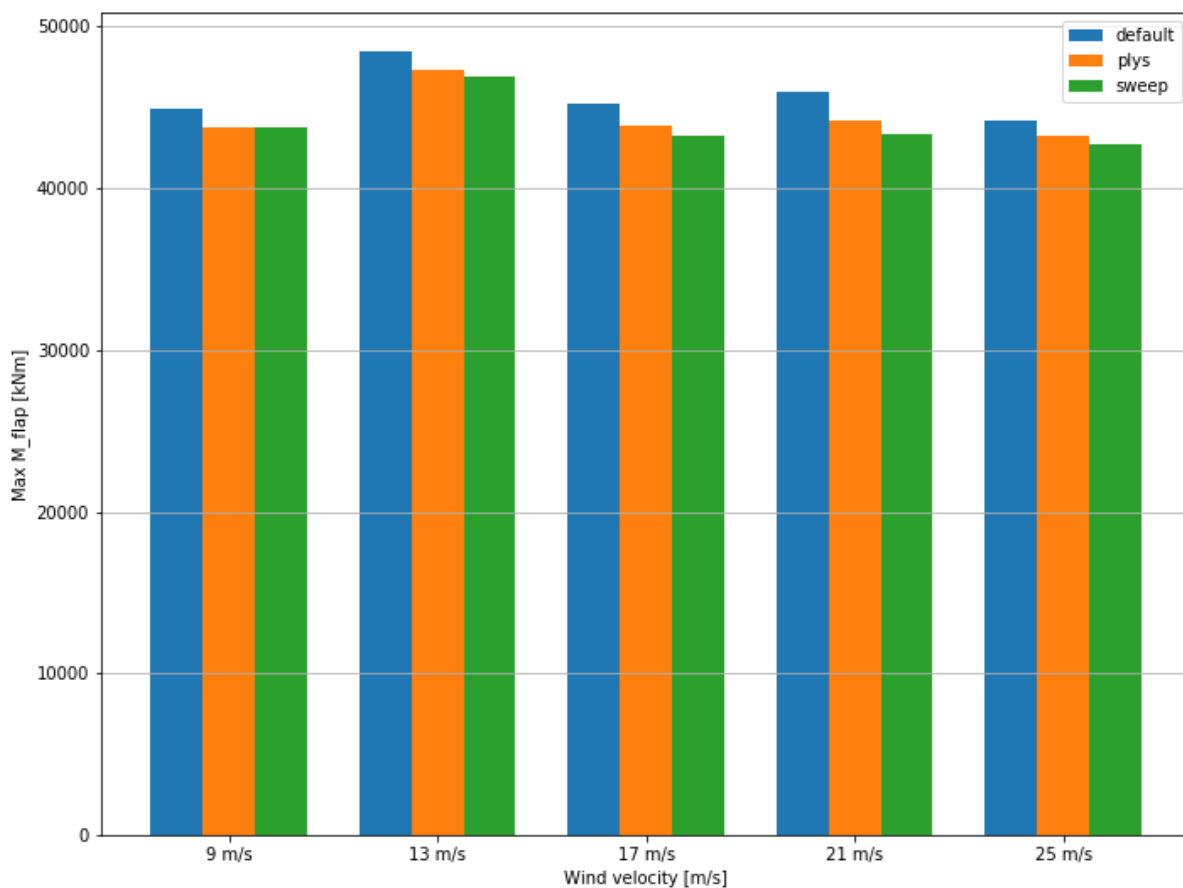
Γράφημα 5.3: Μέγιστες τιμές ροπής M_x στη βάση του πύργου



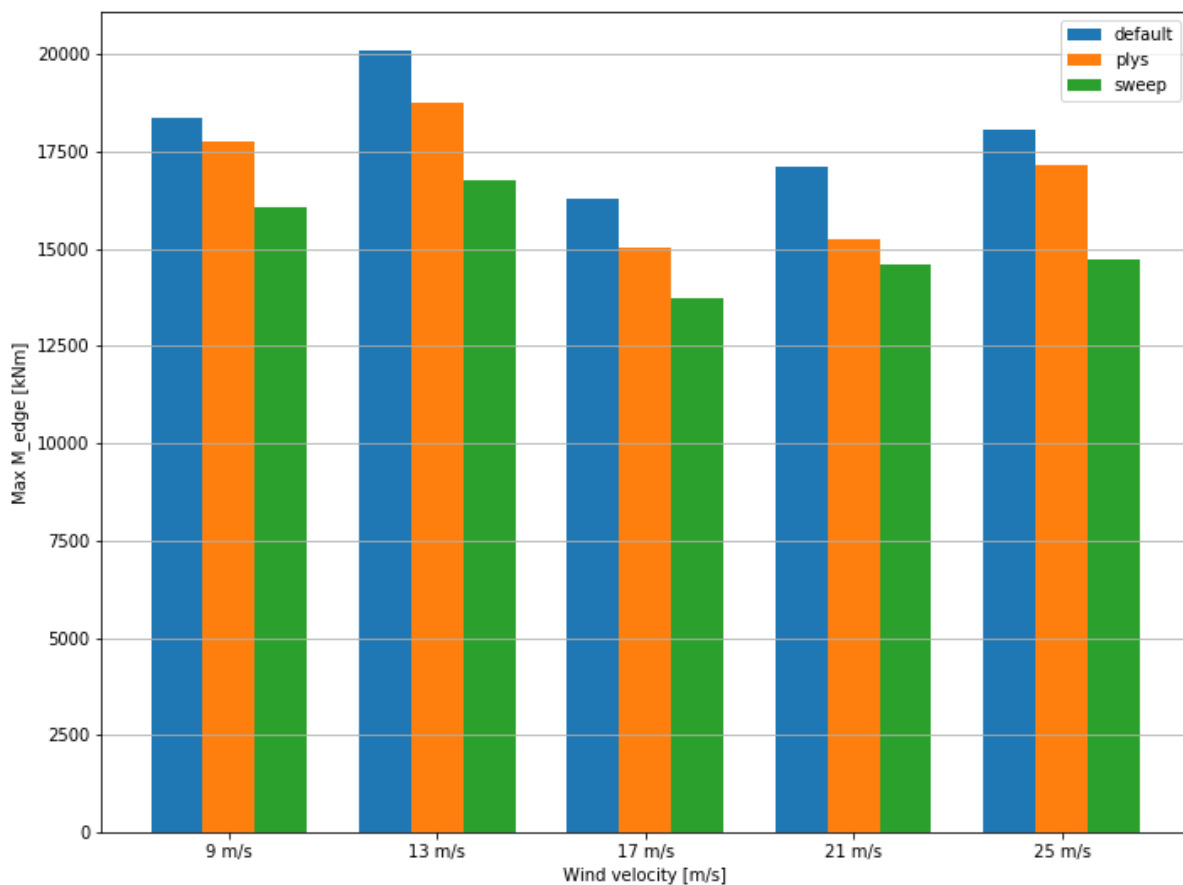
Γράφημα 5.4: Μέγιστες τιμές ροπής M_z στη βάση του πύργου



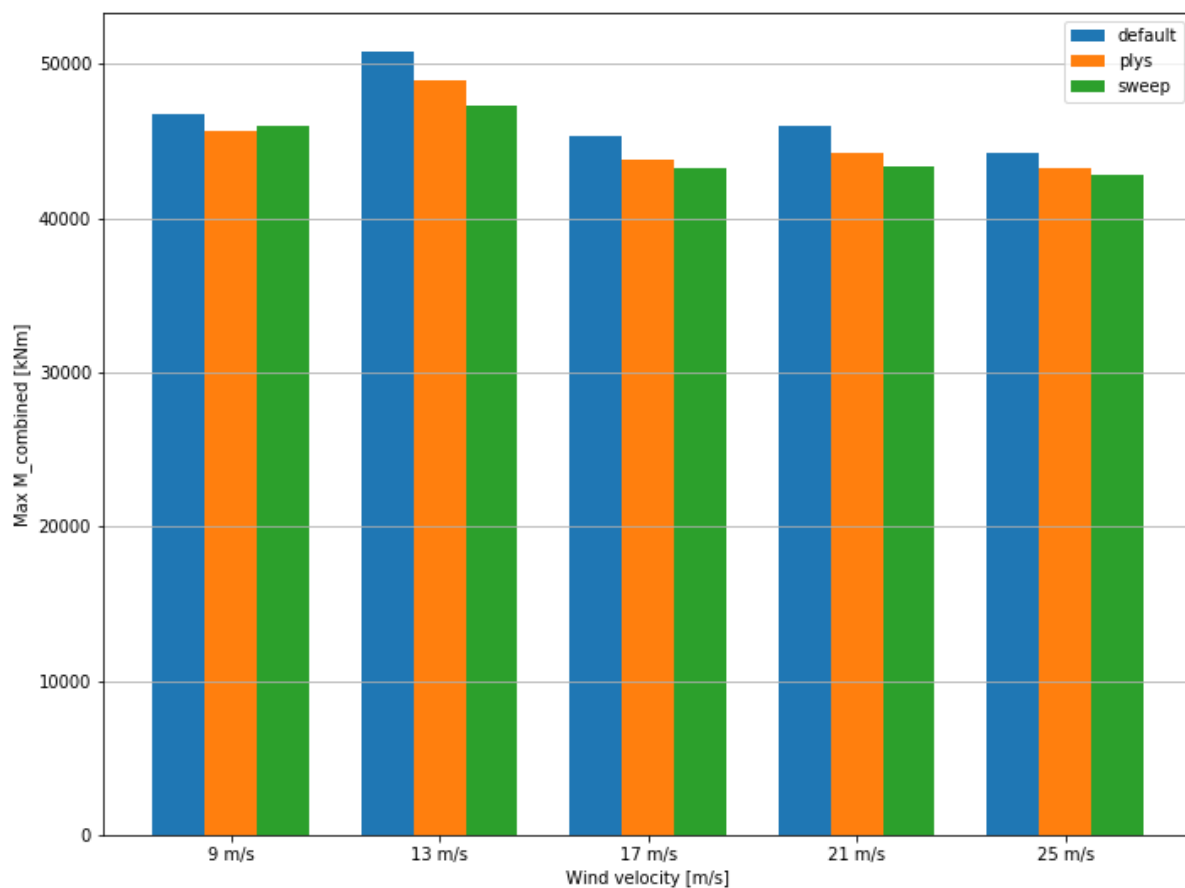
Γράφημα 5.5: Μέγιστες τιμές συνδυασμένης ροπής στη βάση του πύργου



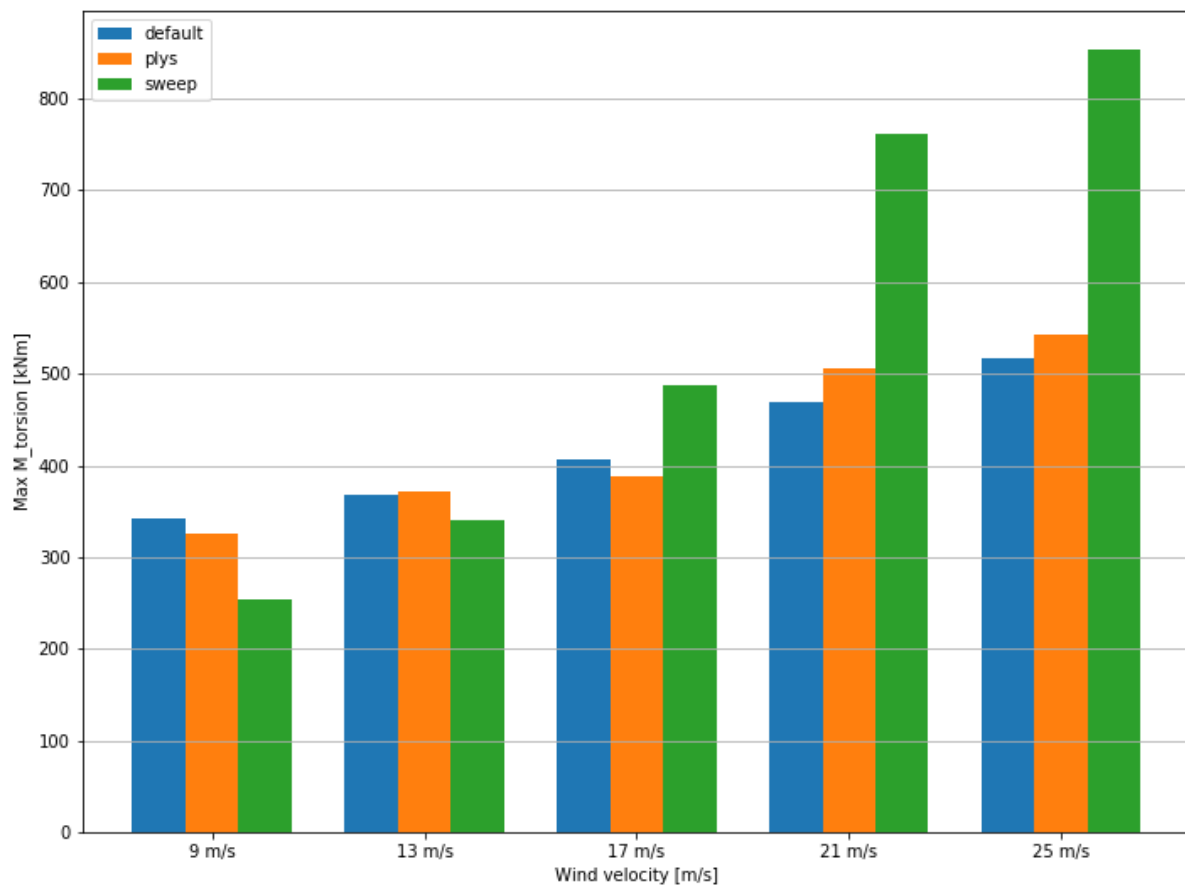
Γράφημα 5.6: Μέγιστες τιμές flapwise ροπής M_x στη ρίζα του πτερυγίου



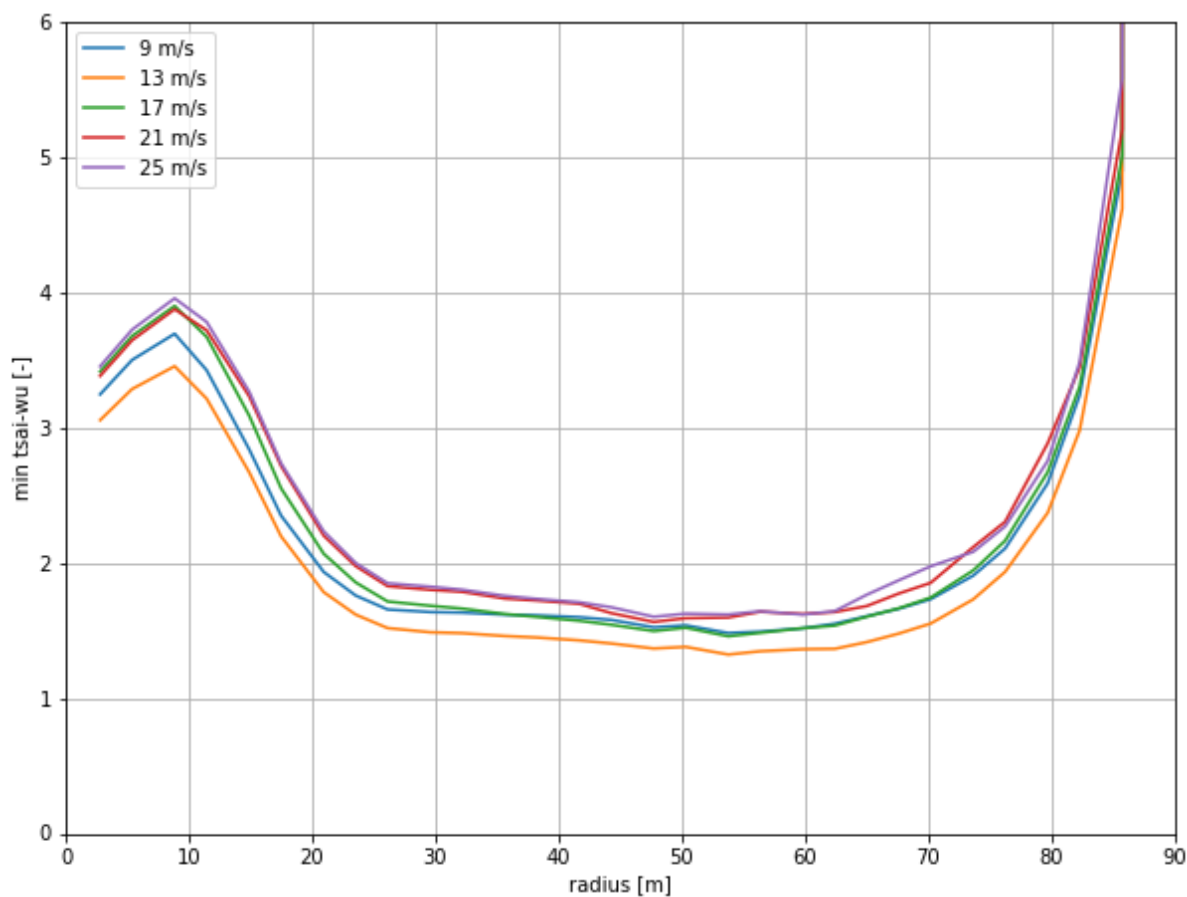
Γράφημα 5.7: Μέγιστες τιμές edgewise ροπής M_z στη ρίζα του πτερυγίου



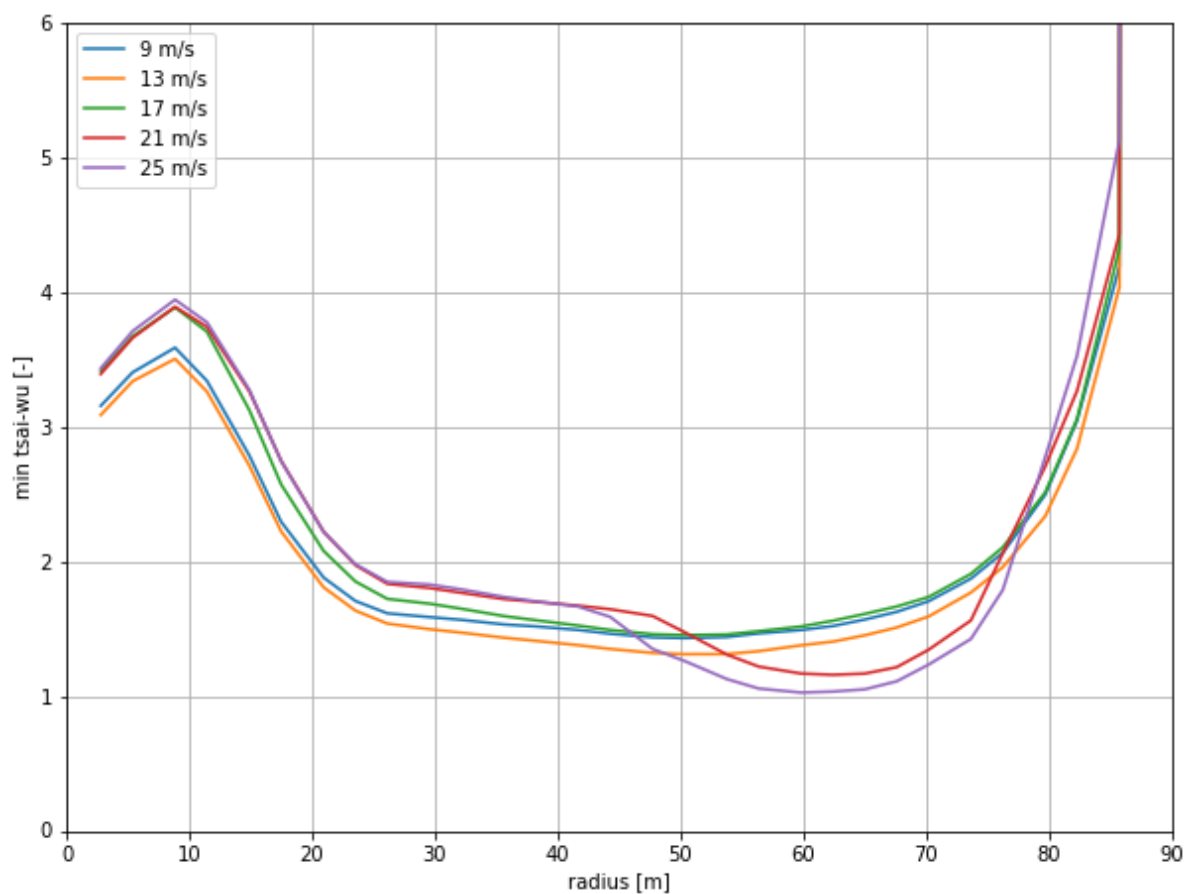
Γράφημα 5.8: Μέγιστες τιμές συνδυασμένης ροπής στη ρίζα του πτερυγίου



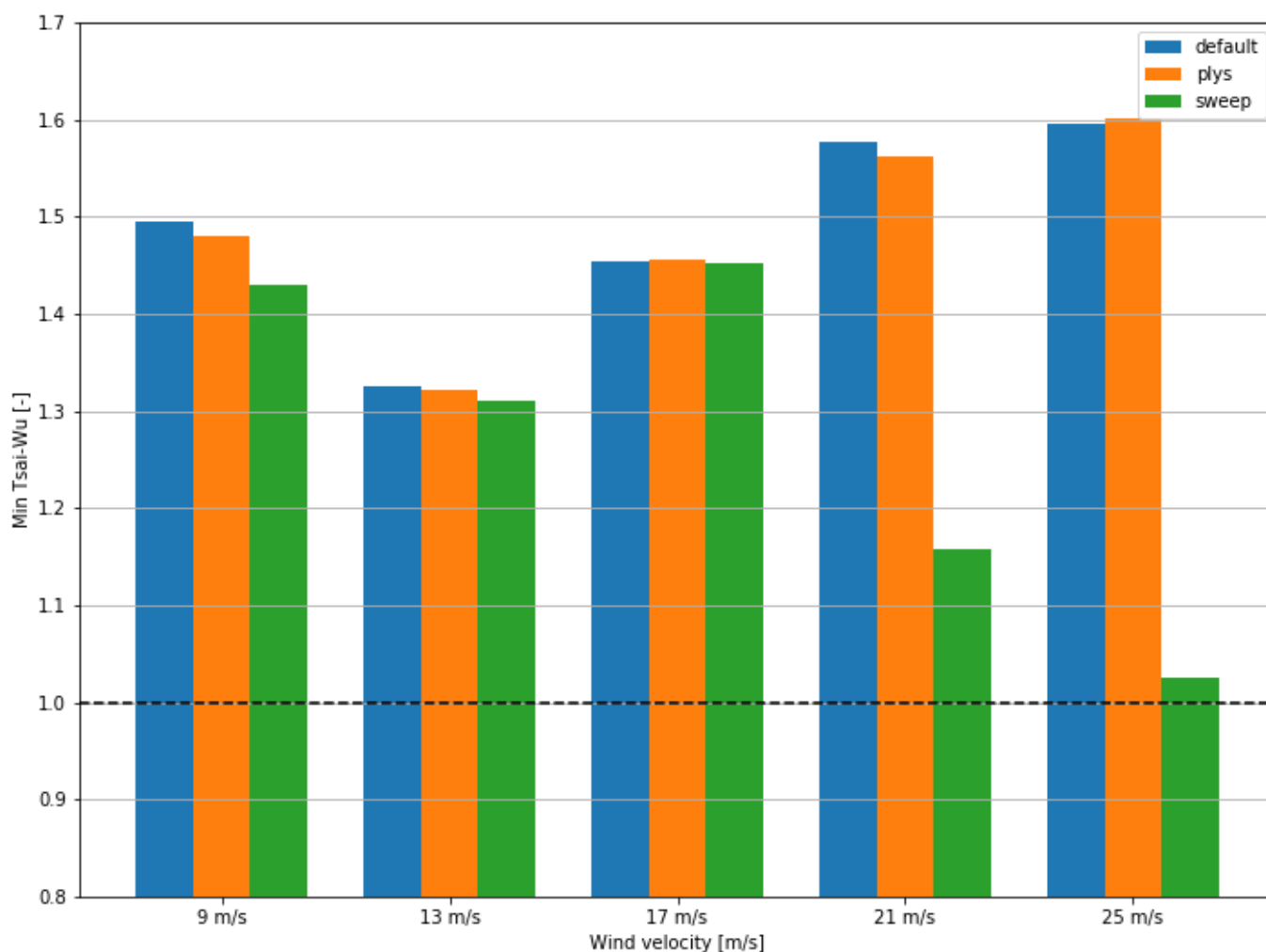
Γράφημα 5.9: Μέγιστες τιμές ροπής στρέψης M_y στη ρίζα του πτερυγίου



Γράφημα 5.10: Καμπύλες κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με plys



Γράφημα 5.11: Καμπύλες κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με sweep



Γράφημα 5.12: Σύγκριση της ελάχιστης τιμής του κριτηρίου αστοχίας που εμφανίζεται σε κάθε ταχύτητα ανέμου

5.3 Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους παθητικού ελέγχου φορτίων, που διερευνήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, συνάγεται ότι με την εισαγωγή κυρτότητας (sweep) στον ελαστικό άξονα του πτερυγίου μπορούμε να επιτύχουμε σημαντικά μεγαλύτερη μείωση της μάζας του (Πίνακας 5.1). Ως προς την εξοικονόμηση υλικού, λοιπόν, σαφέστερα λαμβάνουμε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα με αυτή τη μέθοδο. Παρ' όλα αυτά, δεν θα ήταν ασφαλές να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος του sweep θα επιφέρει κατ' ανάγκη μεγαλύτερη μείωση στο LCOE συγκριτικά με τη μέθοδο της εισαγωγής γωνίας (ply) προσανατολισμού στις ίνες των caps. Για την εξαγωγή ενός τέτοιου συμπεράσματος, απαιτείται μια πολύ πιο αναλυτική οικονομοτεχνική ανάλυση, στην οποία θα ληφθεί υπόψη και η πολυπλοκότητα των βέλτιστων διαμορφώσεων πτερυγίου που προτείνονται καθώς και το ενδεχόμενο αυξημένο κόστος σχεδιασμού/κατασκευής που μπορεί αυτή να προκαλέσει.

Όσον αφορά τα φορτία που αναπτύσσονται στις Α/Γ με τα νέα σχέδια πτερύγωσης, βλέπουμε ότι, σε γενικές γραμμές, διατηρούνται στα ίδια επίπεδα με αυτά του πτερυγίου αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, η ροπή στρέψης που ασκείται στον πύργο (Γράφημα 5.2) εμφανίζεται μειωμένη σε όλες τις ταχύτητες στην ανεμογεννήτρια με τη διαμόρφωση των plys και ακόμα πιο μειωμένη σε αυτήν με το pre-swept πτερύγιο, συγκριτικά με την Α/Γ αναφοράς. Την ίδια τάση παρατηρούμε και στις flapwise (Γράφημα 5.6) και edgewise ροπές (Γράφημα 5.7) που ασκούνται στα πτερύγια σε όλο το εύρος ταχυτήτων ανέμου που μελετάται. Ωστόσο, η ροπή στρέψης στη ρίζα του pre-swept πτερυγίου (Γράφημα 5.9) εμφανίζεται κάπως αυξημένη όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε συνθήκες υψηλής ταχύτητας ανέμου (άνω των 20 m/s). Να

σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η συνδυασμένη ροπή που απεικονίζεται στο *Γράφημα 5.5* για τον πύργο και στο *Γράφημα 5.8* για τα πτερύγια δίνεται από τον τύπο:

$$M_{combined} = \sqrt{M_x^2 + M_z^2}$$

Το κριτήριο αστοχίας Tsai – Wu ικανοποιείται επαρκώς σε κάθε ταχύτητα ανέμου κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με *plys* (*Γράφημα 5.10*). Η δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης σε αυτό εξακολουθεί να συμβαίνει για ταχύτητα ανέμου ίση με 13 m/s όπως και στο πτερύγιο αναφοράς. Αντίθετα, στο *swert* πτερύγιο βλέπουμε ότι η δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης λαμβάνει χώρα στη μέγιστη ταχύτητα ανέμου (25 m/s), όπου σημειώνονται οι ελάχιστες τιμές Tsai – Wu σε απόσταση περίπου 60 m από τη ρίζα του (*Γράφημα 5.11*). Ωστόσο, ακόμα και αν οι ελάχιστες τιμές του κριτηρίου μειώνονται αρκετά όταν επικρατούν συνθήκες υψηλής ταχύτητας ανέμου, παραμένουν μεγαλύτερες της μονάδας, άρα το πτερύγιο δεν αστοχεί (*Γράφημα 5.12*).

6 Μελλοντική Εργασία

Κλείνοντας αυτή τη Διπλωματική Εργασία, προτείνονται κάποιες προσθήκες/προεκτάσεις που μπορούν να εξελίξουν το περιεχόμενό της.

Αρχικά, κατά τη διάρκεια της διερεύνησης του πρώτου τρόπου περιορισμού των φορτίων (εισαγωγή γωνίας προσανατολισμού στις ίνες του σύνθετου υλικού των spar caps), ως μεταβλητές των διάφορων βελτιστοποιήσεων που διεξήχθησαν θεωρήθηκαν οι τιμές των γωνιών. Σε επόμενο στάδιο, πέρα από την τιμή της γωνίας, ως μεταβλητή θα μπορούσε να καθιερωθεί και το μήκος του τμήματος του πτερυγίου στο οποίο αυτή θα εισαχθεί. Μια τέτοια προσθήκη στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης θα αυξήσει σαφώς το υπολογιστικό κόστος, ωστόσο, θα δώσει στον αλγόριθμο μία παραπάνω ευελιξία, ικανή να αποδώσει καλύτερα τελικά αποτελέσματα.

Επιπλέον, κατά την εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου παθητικού ελέγχου φορτίων (pre-swept blades), για την καμπύλη του sweep έγινε χρήση της ακόλουθης εξίσωσης εκθετικής μορφής:

$$y = d_{tip} \left(\frac{x - x_{start}}{L_{blade} - x_{start}} \right)^{\gamma}$$

όπου y είναι η τοπική απόσταση από τον άξονα βήματος (pitch axis) έως την καμπύλη, d_{tip} είναι η απόσταση από τον άξονα βήματος έως την καμπύλη στο ακροπτερύγιο (tip), x είναι η τοπική απόσταση κατά μήκος του πτερυγίου που μετρείται από τη ρίζα του, x_{start} είναι η θέση όπου αρχίζει να εφαρμόζεται η καμπυλότητα, L_{blade} είναι το συνολικό μήκος του πτερυγίου και γ είναι ο εκθέτης του sweep [10]. Στη διαδικασία της βελτιστοποίησης μεταβλητές σχεδιασμού αποτέλεσαν τα γ και d_{tip} , ενώ για το x_{start} δοκιμάστηκαν δύο μόνο θέσεις, μία πολύ κοντά στη ρίζα του πτερυγίου και μία στο μέσο του. Σε επόμενο στάδιο, το x_{start} θα μπορούσε να προστεθεί ως ακόμα μία μεταβλητή στο πρόβλημα.

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής ήταν, με τη χρήση μεθόδων παθητικού ελέγχου φορτίων, να μειωθεί η μάζα του πτερυγίου και κατ'επέκταση το κόστος του, έτσι ώστε να επιτύχουμε μείωση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας. Ωστόσο, σε μείωση του LCOE μπορούμε να οδηγηθούμε και μέσω αύξησης της παραγόμενης ενέργειας. Επομένως, οι δύο μέθοδοι παθητικού ελέγχου που εξετάστηκαν μπορούν να εφαρμοστούν και για την αύξηση της διαμέτρου του δρομέα της Α/Γ. Πιο συγκεκριμένα, αφού περιοριστούν τα φορτία, αντί της εφαρμογής μιας κατανομής για τον συντελεστή μεταβολής του πάχους κατά μήκος του πτερυγίου, το πάχος του θα διατηρηθεί σταθερό και θα επιχειρήσουμε την αύξηση της ακτίνας του μέχρι το σημείο όπου τα αναπτυσσόμενα φορτία θα φτάσουν στο ίδιο επίπεδο με αυτά του πτερυγίου αναφοράς. Μια τέτοια εφαρμογή των στρατηγικών παθητικού περιορισμού των φορτίων θεωρείται ζωτικής σημασίας, λόγω της τάσης αύξησης του μεγέθους των Α/Γ που επιδιώκεται τα τελευταία χρόνια, καθώς οι off-shore σταθμοί καταλαμβάνουν ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο των εφαρμογών της αιολικής ενέργειας (Γράφημα 1.1).

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1.1: Εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε GW (χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων) κατά την δεκαετία 2009 – 9019 [4]	10
Γράφημα 1.2: Κεφαλαιουχικές δαπάνες σε € ανά MW για onshore και offshore εφαρμογές [4]	10
Γράφημα 1.3: Ανάλυση ευαισθησίας κύριων μεταβλητών που επηρεάζουν το LCOE από το NREL [12] ...	14
Γράφημα 1.4: Ανάλυση του κόστους επένδυσης χερσαίων αιολικών πάρκων [6]	15
Γράφημα 2.1: Ελάχιστες τιμές κριτηρίου Tsai – Wu κατά μήκος του πτερυγίου αναφοράς για διάφορες ταχύτητες ανέμου	29
Γράφημα 2.2: Διαδικασία βελτιστοποίησης με στόχο τη μείωση των φορτίων	29
Γράφημα 2.3: Διαδικασία βελτιστοποίησης με στόχο τη μείωση της μάζας	30
Γράφημα 2.4: Βελτιστοποίηση δύο βρόχων με διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις	30
Γράφημα 3.1: Καμπύλες ελάχιστων τιμών κριτηρίου αστοχίας κατά μήκος των πτερυγίων	33
Γράφημα 3.2: Κατανομή της γωνίας των ινών κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 1$	34
Γράφημα 3.3: Κατανομή της γωνίας των ινών κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 2$	35
Γράφημα 3.4: Κατανομή της γωνίας των ινών κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 3$	35
Γράφημα 3.5: Κατανομή της γωνίας των ινών κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 4$	36
Γράφημα 3.6: Συγκριτικό διάγραμμα κριτηρίου αστοχίας μεταξύ των νέων πτερυγίων και του πτερυγίου αναφοράς	37
Γράφημα 3.7: Κατανομή του συντελεστή μεταβολής του πάχους κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 2$	38
Γράφημα 3.8: Κατανομή του συντελεστή μεταβολής του πάχους κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση $n = 4$	38
Γράφημα 3.9: Κατανομή του συντελεστή μεταβολής του πάχους κατά μήκος του πτερυγίου – Περίπτωση καμπύλης Bezier	39
Γράφημα 3.10: Συγκριτικό διάγραμμα κριτηρίου αστοχίας μεταξύ των ελαφρύτερων πτερυγίων και του πτερυγίου αναφοράς	40
Γράφημα 3.11: Σύγκριση ελάχιστων τιμών κριτηρίου αστοχίας κατά μήκος των πτερυγίων – Περίπτωση καμπύλης Bezier	40
Γράφημα 3.12: Κατανομή του ply κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου	42
Γράφημα 3.13: Κατανομή του coefficient κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με $plys$	42
Γράφημα 3.14: Ελάχιστες τιμές του κριτηρίου Tsai – Wu κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με $plys$	43
Γράφημα 4.1: Καμπύλες sweep με το μοντέλο της εκθετικής εξίσωσης	47
Γράφημα 4.2: Καμπύλη sweep που αποδίδεται μέσω κυβικής Bezier	47
Γράφημα 4.3: Σύγκριση καμπύλων Tsai – Wu του πτερυγίου αναφοράς με τις 3 περιπτώσεις sweep πτερυγίων	48
Γράφημα 4.4: Καμπύλες sweep 3 περιπτώσεων	50
Γράφημα 4.5: Κατανομή του coefficient κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με sweep	50
Γράφημα 4.6: Ελάχιστες τιμές του κριτηρίου Tsai – Wu κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με sweep	51
Γράφημα 5.1: Σύγκριση ελάχιστων τιμών κριτηρίου αστοχίας των βέλτιστων διαμορφώσεων για ταχύτητα ανέμου 13 m/s	52
Γράφημα 5.2: Μέγιστες τιμές ροπής στρέψης M_y στη βάση του πύργου	54
Γράφημα 5.3: Μέγιστες τιμές ροπής M_x στη βάση του πύργου	54
Γράφημα 5.4: Μέγιστες τιμές ροπής M_z στη βάση του πύργου	55
Γράφημα 5.5: Μέγιστες τιμές συνδυασμένης ροπής στη βάση του πύργου	55
Γράφημα 5.6: Μέγιστες τιμές flapwise ροπής M_x στη ρίζα του πτερυγίου	56
Γράφημα 5.7: Μέγιστες τιμές edgewise ροπής M_z στη ρίζα του πτερυγίου	56

Γράφημα 5.8: Μέγιστες τιμές συνδυασμένης ροπής στη ρίζα του πτερυγίου	57
Γράφημα 5.9: Μέγιστες τιμές ροπής στρέψης M_y στη ρίζα του πτερυγίου	57
Γράφημα 5.10: Καμπύλες κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με plys	58
Γράφημα 5.11: Καμπύλες κριτηρίου αστοχίας Tsai – Wu κατά μήκος του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με sweep	58
Γράφημα 5.12: Σύγκριση της ελάχιστης τιμής του κριτηρίου αστοχίας που εμφανίζεται σε κάθε ταχύτητα ανέμου	59

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Κύρια χαρακτηριστικά DTU 10 MW RWT [14]	19
Πίνακας 3.1: Αρχική διερεύνηση με δοκιμές	33
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα των 4 βελτιστοποιήσεων του 1 ^{ου} σταδίου	36
Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα των 4 βελτιστοποιήσεων του 2 ^{ου} σταδίου	39
Πίνακας 3.4: Τιμές της γωνίας προσανατολισμού των ινών για τη βέλτιστη λύση	41
Πίνακας 3.5: Συντεταγμένες των σημείων ελέγχου της Bezier	41
Πίνακας 3.6: Τελικά αποτελέσματα για τη βέλτιστη λύση	41
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα των 3 βελτιστοποιήσεων του 1 ^{ου} σταδίου	46
Πίνακας 4.2: Σημεία ελέγχου (control points)	46
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα των 3 βελτιστοποιήσεων διπλού βρόχου	49
Πίνακας 4.4: Σημεία ελέγχου για τη Bezier που περιγράφει το sweep – Περίπτωση 3 ^η	49
Πίνακας 4.5: Σημεία ελέγχου των Bezier που καθορίζουν τις κατανομές του συντελεστή μεταβολής του πάχους	49
Πίνακας 5.1: Σύγκριση βέλτιστων διαμορφώσεων	53

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Brush, 1888, Η.Π.Α. [2]	7
Εικόνα 1.2: La Cour, 1897, Δανία [2]	7
Εικόνα 1.3: Smidth, 1940, Δανία [2]	8
Εικόνα 1.4: Smidth, 1942, Δανία [2]	8
Εικόνα 1.5: Εξέλιξη του μεγέθους των Α/Γ [3]	9
Εικόνα 1.6: Πρόβλεψη για τη συνεισφορά της αιολικής ενέργειας στη συνολική ζήτηση της Ευρώπης από την EWEA [5]	11
Εικόνα 1.7: Ανάπτυξη ροπής στρέψης καθώς το πτερύγιο κάμπτεται υπό την επίδραση του αεροδυναμικού φορτίου [7]	12
Εικόνα 2.1: Plots της ανεμογεννήτριας αναφοράς [14]	17
Εικόνα 2.2: Εσωτερική γεωμετρία πτερυγίου [14]	18
Εικόνα 2.3: Περιοχές πτερυγίου [14]	18
Εικόνα 2.4: Πραγματικές συνθήκες πρόσπτωσης της ροής του αέρα [15]	21
Εικόνα 2.5: Μοντέλο πολλαπλών σωμάτων με local και global συστήματα συντεταγμένων [15]	22
Εικόνα 2.6: Μοντέλο πολλαπλών σωμάτων σε επίπεδο υπό-σώματος [15]	23
Εικόνα 2.7: Διατομή πτερυγίου και τμήματα [8]	25
Εικόνα 2.8: Απεικόνιση του κριτηρίου Tsai – Wu [6]	25
Εικόνα 3.1: Εισαγωγή γωνίας προσανατολισμού στις ίνες του σύνθετου υλικού στα spar caps [6]	32
Εικόνα 4.1: Ευθύ πτερύγιο (αριστερά) και pre-swept πτερύγιο (δεξιά) [23]	44
Εικόνα 4.2: Σχεδιασμός πτερυγίου με κύρτωση [6]	45
Εικόνα 4.3: Εκθετική καμπύλη sweep [10]	45
Εικόνα 5.1: Σύστημα συντεταγμένων για τον πύργο της Α/Γ [15]	53
Εικόνα 5.2: Σύστημα συντεταγμένων για το πτερύγιο [15]	53

Βιβλιογραφία

- [1] Γ. Κάραλης, Α. Ζερβός, Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2018.
- [2] «DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.windpower.org.
- [3] «Windpower Engineering & Development,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.windpowerengineering.com.
- [4] «WindEurope,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.windeurope.org.
- [5] «The European Wind Energy Association | EWEA,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.ewea.org.
- [6] Θ. Α. Κάρκας, «Μέθοδοι Παθητικού Ελέγχου Φορτίων Πτερυγίων Ανεμογεννητριών,» Αθήνα, 2020.
- [7] D. I. Manolas, V. A. Riziotis, P. K. Chaviaropoulos, G. P. Serafeim, «Lightweight optimal rotor design of a 10MW-scale wind turbine using passive load control methods,» *Journal of Physics: Conference Series*, 2020.
- [8] Γ. Α. Μπαλόκας, «Ανάλυση Εσωτερικής Στηρίξεως Πτερυγίου Ανεμογεννήτριας από Σύνθετα Υλικά με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων,» Αθήνα, 2013.
- [9] P. S. Veers, D. W. Lobitz, «Load Mitigation with Bending/Twist-coupled Blades on Rotors Using Modern Control Strategies,» Sandia National Laboratories, Albuquerque, USA, 2003.
- [10] C. P. van Dam, D. Schow, S. Larwood, «Design studies of swept wind turbine blades,» *Renewable Energy*, pp. 563-571, 28 June 2014.
- [11] U.S. Energy Information Administration, «Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2021,» 2021.
- [12] P. Schwabe K. Cory, «Wind Levelized Cost of Energy: A Comparison of Technical and Financing Input Variables,» National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 2009.
- [13] S. Butterfield, W. Musial, G. Scott, J. Jonkman, «Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development,» National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 2009.
- [14] F. Zahle, R. Bitsche, T. Kim, A. Yde, L. C. Henriksen, A. Natarajan, M. Hansen, C. Bak, «Description of the DTU 10 MW Reference Wind,» DTU Wind Energy, Roskilde, Denmark, 2013.
- [15] D. Manolas, «Hydro-Aero-Elastic Analysis of Offshore Wind Turbines,» National Technical University of Athens, 2015.
- [16] S. G. Voutsinas, D. I. Manolas, E. S. Politis, P. K. Chaviaropoulos, V. A. Riziotis, «Aeroelastic Analysis of Pre-Curved Rotor Blades,» 2010.
- [17] Η. Ε. Μουρούτσος, «Σύνθετα Υλικά - Μελέτη Ιδιοτήτων Πολύστρωτου Υλικού».
- [18] C. T. Sun, «Strength Analysis of Unidirectional Composites and Laminates,» σε *Comprehensive Composite Materials Volume 1*, Pergamon, 2000, pp. 641-666.

- [19] «COSSAN,» COSSAN Working Group, Institute for Risk and Uncertainty, University of Liverpool, [Ηλεκτρονικό]. Available: www.cossan.co.uk.
- [20] M. J. D. Powell, «A Direct Search Optimization Method that Models the Objective and Constraint Functions by Linear Interpolation,» σε *Advances in Optimization and Numerical Analysis*, Kluwer Academic Publishers, 1994, pp. 51-67.
- [21] M. J. D. Powell, «A view of algorithms for optimization without derivatives,» 2007.
- [22] «SciPy.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available: www.scipy.org.
- [23] Ε. Γιαννόπουλος, «Αεροδυναμική και αεροελαστική ανάλυση κυρτών πτερυγίων,» Αθήνα, 2012.