

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

Εργαστήριο Αεροδυναμικής

Διπλωματική Εργασία

Αεροδυναμική και Αεροελαστική σχεδίαση
δρομέων Α/Γ με χρήση του εξελικτικού
αλγορίθμου *EASY*

Βασίλης Μιχαλόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλης Ριζιώτης

Ιούλιος 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Εργασία δε θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς τη βοήθεια και τη συνεχή καθοδήγηση του επιβλέποντος καθηγητή μου κ. Βασίλη Ριζιώτη. Παρά το μεγάλο φόρτο εργασίας που είχε όλη αυτή την περίοδο, ήταν πάντα πρόθυμος να λύσει τις απορίες μου και να συζητήσει τυχόν αμφιβολίες που είχα σχετικά με τη δομή της Εργασίας ανεξαρτήτου ώρας. Βέβαια, η καθοδήγηση που μου έδειξε δεν περιορίστηκε μόνο σε τεχνικά θέματα, αλλά και σε γενικότερες συμβουλές σχετικά με τα μελλοντικά σχέδιά μου. Οφείλω να σημειώσω πως αποτελεί το πρότυπό μου όχι μόνο για τις γνώσεις του, αλλά και για τον σπουδαίο τρόπο συμπεριφοράς του. Τον ευχαριστώ πολύ για το γεγονός ότι με εμπιστεύτηκε.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον καθηγητή μου κ. Σπύρο Βουτσινά για τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Εργασίας και για το ενδιαφέρον που έδειξε. Είναι περιττό να σημειώσω πως ότι γράφω για τον κ. Ριζιώτη ισχύει και για τον κ. Βουτσινά.

Δεδομένου ότι η Εργασία βασίζεται πάνω στον εξελικτικό αλγόριθμο *EASY*, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον καθηγητή της Σχολής μας κ. Κυριάκο Γιαννάκογλου για τη διάθεση του λογισμικού. Ο τρόπος λειτουργίας του έγινε αμέσως κατανοητός χάρη στις πολύτιμες οδηγίες της Διδάκτορος κ. Βαρβάρας Ασούτη. Χωρίς τις λεπτομερείς οδηγίες της σχετικά με τον τρόπο χρήσης του προγράμματος, όλη η διαδικασία θα ήταν πολύ χρονοβόρα.

Είναι απαραίτητο, επίσης, να αναφέρω τους κ. Γιώργο Κάραλη και κ. Αντώνη Σαλιάγκα, διότι συνέβαλαν και αυτοί στο να συνειδητοποιήσω πως ο τομέας της Αιολικής Ενέργειας είναι αυτό που με ενδιαφέρει.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Βασίλη Τζιμπλάκη και στο Νίκο Μπεμπεδέλη με τους οποίους μοιραζόμασταν όλη αυτή την περίοδο τον ίδιο χώρο και βοήθησαν στη δημιουργία ενός πολύ καλού κλίματος. Χωρίς αυτούς, ο χρόνος δε θα περνούσε τόσο ευχάριστα.

| | |
|---|----|
| 1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Σκοπός της Εργασίας | 1 |
| 1.2 Σύνοψη | 2 |
| 1.3 Διάρθρωση της Εργασίας | 3 |
| | |
| 2 Αεροδυναμική Σχεδίαση Α/Γ Οριζοντίου Άξονα | 5 |
| 2.1 Θεωρία Δίσκου Ενέργειας | 5 |
| 2.2 Διατηρητικοί Νόμοι | 7 |
| 2.2.1 Διατήρηση της μάζας | 7 |
| 2.2.2 Διατήρηση της ορμής | 7 |
| 2.2.3 Διατήρηση της ενέργειας | 8 |
| 2.2.4 Θεώρημα ροπής της ορμής | 10 |
| 2.3 Θεωρία Στοιχείων Πτερύγωσης (Blade Element Momentum theory) | 10 |
| 2.4 Διορθώσεις της θεωρίας του δίσκου ενέργειας | 13 |
| 2.4.1 Διόρθωση συντελεστή ώσης C_T | 13 |
| 2.4.2 Διόρθωση ακροπτερυγίου – Prandtl | 14 |
| | |
| 3 Δημιουργία της Εσωτερικής Δομής του Πτερυγίου Αναφοράς | 16 |
| 3.1 Εσωτερική δομή πτερυγίων Α/Γ | 16 |
| 3.1.1 Εισαγωγή | 16 |
| 3.1.2 Μορφή της δομής | 20 |
| 3.1.3 Υλικά κατασκευής | 24 |
| 3.1.4 Δυσκαμψία | 25 |
| 3.1.5 Κατανομή μάζας | 26 |
| 3.1.6 Συντελεστές ασφαλείας | 27 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2 | Προσέγγιση της δομής του πτερυγίου αναφοράς | 27 |
| 3.2.1 | Μοντελοποίηση της δομής και υπολογισμός μάζας και δυσκαμψίας | 28 |
| 3.2.2 | Διαδικασία προσαρμογής μέσω εξελικτικού αλγορίθμου | 29 |
| 3.2.3 | Παρουσίαση αποτελεσμάτων | 33 |
| 4 | Βελτιστοποίηση Πτερυγίου Αναφοράς | 37 |
| 4.1 | Εισαγωγή | 37 |
| 4.2 | Αεροδυναμική βελτιστοποίηση πτερυγίου <i>NREL 5MW</i> | 38 |
| 4.2.1 | Περιγραφή της διαδικασίας | 38 |
| 4.2.2 | Παρουσίαση των αποτελεσμάτων | 39 |
| 4.2.3 | Συμπεράσματα | 45 |
| 4.3 | Βελτιστοποίηση με <i>περιορισμούς</i> - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$ | 47 |
| 4.3.1 | Περιγραφή της διαδικασίας | 47 |
| 4.3.2 | Παρουσίαση των αποτελεσμάτων | 49 |
| 4.3.2.1 | 1 ^ο Στάδιο βελτιστοποίησης - 3 <i>περιορισμοί</i> | 50 |
| 4.3.2.2 | 2 ^ο Στάδιο βελτιστοποίησης - 4 <i>περιορισμοί</i> | 55 |
| 4.3.2.3 | 3 ^ο Στάδιο βελτιστοποίησης - 5 <i>περιορισμοί</i> | 61 |
| 4.3.3 | Συμπεράσματα | 67 |
| 4.4 | Βελτιστοποίηση με <i>περιορισμούς</i> - $\Omega R > 80 \text{ m/s}$ | 76 |
| 4.4.1 | Περιγραφή της διαδικασίας | 76 |
| 4.4.2 | Παρουσίαση των αποτελεσμάτων | 78 |
| 4.4.3 | Συμπεράσματα | 85 |
| 4.5 | Παραλλαγές του βέλτιστου πτερυγίου (Παρ. 4.4) | 88 |
| 4.6 | Υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων των δρομέων | 92 |
| 5 | Σχεδίαση Δρομέα Α/Γ 10 MW | 95 |
| 5.1 | Αύξηση μεγέθους Α/Γ και κανόνες ομοιότητας | 95 |
| 5.2 | Αύξηση μεγέθους του πτερυγίου αναφοράς <i>NREL 5MW</i> | 96 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 5.3 | Αύξηση μεγέθους του βέλτιστου πτερυγίου (Παρ. 4.4) | 103 |
| 5.4 | Σχεδίαση νέου πτερυγίου 10 MW | 104 |
| | Βιβλιογραφία | 113 |
| | Αναφορές | 114 |

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Καθώς οι περιβαλλοντολογικές ανησυχίες ολοένα και αυξάνονται και τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων φθίνουν, η αιολική ενέργεια κερδίζει συνεχώς έδαφος ως μία βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας του παρόντος αλλά και του μέλλοντος.

Προκειμένου οι εφαρμογές αιολικής ενέργειας να είναι ανταγωνιστικές προς τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ή ακόμη και προς τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας, ο βασικός στόχος οφείλει να είναι η μείωση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας. Μάλιστα, στις περισσότερες πρόσφατες μελέτες η προσπάθεια μείωσης του κόστους της παραγωγής ενέργειας από ανεμογεννήτριες έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης. Το σχήμα των πτερυγίων του δρομέα παίζει έναν καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό της γενικότερης αεροδυναμικής απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας. Για το λόγο αυτό η βελτιστοποίηση της μορφής ενός πτερυγίου αποτελεί ένα σημαντικό στάδιο κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής του.

Παράλληλα, δεδομένου ότι τα νέα μοντέλα ανεμογεννητριών αποδίδουν πολλά MW, τα αεροδυναμικά φορτία αυξάνονται και τα δομικά standards γίνονται αυστηρότερα λόγω της απαίτησης για κατασκευή μεγαλύτερων και ταυτόχρονα λεπτότερων πτερυγίων. Αυτό έχει ως συνέπεια, να είναι αναγκαία τόσο η χρήση καινοτόμων τεχνικών όσον αφορά την εσωτερική δομή η οποία δρα υποστηρικτικά, όσο και η χρήση σύγχρονων σύνθετων υλικών.

Το κατασκευαστικό κόστος ενός πτερυγίου αποτελεί περίπου το 15-20% του συνολικού κόστους μιας ανεμογεννήτριας, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί ίσως την κυριότερη παράμετρο απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας. Είναι προφανές, λοιπόν, πως τα κέρδη που ενδέχεται να προκύψουν από ένα πτερύγιο με αποδοτικότερη αεροδυναμική συμπεριφορά, με καλύτερο δομικό μοντέλο ή με κατάλληλο συνδυασμό σύνθετων υλικών καθιστούν τη βελτιστοποίηση του αναγκαία.

Κατά την εξέλιξη των μοντέρνων εμπορικών ανεμογεννητριών τα τελευταία χρόνια, η τάση που κυριαρχεί οδηγεί σταθερά σε δρομείς όλο και μεγαλύτερου μεγέθους. Παρά την ύπαρξη περιόδων στασιμότητας στην παγκόσμια ανάπτυξη και οικονομικών δυσχερειών, η συγκεκριμένη τάση παραμένει ανεπηρέαστη. Προφανώς, αυτό δεν είναι κάτι παράλογο, εφόσον η αύξηση του μεγέθους των πτερυγίων οδηγεί σε μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας. Άλλωστε αναφέρθηκε και προηγουμένως πως ο παράγοντας που μπορεί να καταστήσει την αιολική ενέργεια ως την περισσότερο ανταγωνιστική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι το κόστος παραγωγής της kWh. Συμπληρωματικά, ένας εναλλακτικός τρόπος παραγωγής περισσότερης ενέργειας και συνεπώς μείωση του κόστους είναι η βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης των υπάρχοντων μοντέλων μέσω καινοτόμου επανασχεδίασης των σημαντικότερων συνιστωσών τους, όπως ο δρομέας.

Στα πλαίσια αυτής της λογικής η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως θέμα την αεροδυναμική και αεροελαστική σχεδίαση δρομέων μέσω της τεχνικής της βελτιστοποίησης. Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται στο πτερύγιο *NREL 5MW*, το οποίο αποτελεί ουσιαστικά το πτερύγιο αναφοράς και ταυτόχρονα το «σημείο εκκίνησης» όχι μόνο για τη σχεδίαση βελτιστοποιημένων πτερυγίων 5 MW, αλλά και για τη σχεδίαση μεγαλύτερων δρομέων, όπως 10 MW. Ζητούμενο είναι να διερευνηθούν ποικίλες περιπτώσεις με διαφορετικό στόχο η κάθε μία. Τα όρια που τίθενται σε κάθε περίπτωση στόχο έχουν να συγκρατήσουν τη μορφή των πτερυγίων σε ρεαλιστικά πλαίσια, λαμβάνοντας υπόψη όσες περισσότερες παραμέτρους είναι δυνατόν. Μελετούνται, λοιπόν, διαφορετικοί συνδυασμοί *μεταβλητών σχεδιασμού* – *περιορισμών* – *συνάρτησης κόστους*, έτσι ώστε να καλυφθούν όσο το δυνατόν περισσότερα σενάρια βελτιστοποίησης.

1.2 Σύνοψη

Η παρούσα Εργασία έχει ως αντικείμενο την αεροδυναμική και αεροελαστική σχεδίαση δρομέων Α/Γ μέσω βελτιστοποίησης, η οποία πραγματοποιείται με χρήση του εξελικτικού αλγορίθμου *EASY*, ο οποίος έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών) [1]. Η Εργασία αποτελείται από τρία μέρη: στο πρώτο περιλαμβάνεται η μελέτη της εσωτερικής δομής των πτερυγίων και ειδικότερα αυτή του πτερυγίου *NREL 5MW*, στο δεύτερο η σχεδίαση δρομέων Α/Γ 5 MW και στο τρίτο η σχεδίαση δρομέων Α/Γ 10 MW.

Όσον αφορά την εσωτερική δομή, ζητούμενο είναι η δημιουργία της δομής του πτερυγίου *NREL 5MW*, το οποίο αποτελεί στη συνέχεια το πτερύγιο αναφοράς με βάση το οποίο πραγματοποιούνται οι διάφορες διαδικασίες βελτιστοποίησης. Έχοντας δεδομένες τις κατανομές δυσκαμψίας και μάζας του *NREL 5MW*, στόχος είναι η δημιουργία εκείνης της δομής και εκείνου του κελύφους που θα οδηγήσουν σε κατανομές που ταυτίζονται με αυτές του *NREL*

5MW. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μεταφράζεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης της απόκλισης των κατανομών. Έτσι, η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος επιτυγχάνεται με τον αλγόριθμο *EASY*.

Ο σχεδιασμός των πτερυγίων 5 MW περιλαμβάνει διάφορες περιπτώσεις βελτιστοποίησης, όπου λαμβάνονται υπόψη διαφορετικοί *περιορισμοί*, ενώ αλλάζουν και διάφορες άλλες παράμετροι του προβλήματος, όπως το ΩR . Με αυτό τον τρόπο μελετώνται ποικίλα σενάρια και προκύπτουν διάφορες μορφές πτερυγίων. Παράλληλα, ακολουθεί μία ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων σε ορισμένα από αυτά τα πτερύγια προκειμένου να μελετηθεί και η δυναμική συμπεριφορά τους.

Τέλος, στο τρίτο μέρος περιέχεται η σχεδίαση δρομέων μεγαλύτερης κλίμακας και πιο συγκεκριμένα Α/Γ 10 MW. Αρχικά, είναι εμφανές πως η αύξηση μεγέθους οδηγεί πράγματι σε μεγαλύτερη ισχύ, αλλά προκύπτει ένα ζήτημα. Αυτό το ζήτημα είναι η αύξηση των συνολικών τάσεων και είναι αυτό ο παράγοντας ο οποίος οδηγεί σε εκ νέου σχεδίαση ενός πτερυγίου τέτοιας κλίμακας. Η σχεδίαση βασίζεται και αυτή στο πτερύγιο αναφοράς των 5 MW με αυξημένο, όμως, μέγεθος προκειμένου να αποδίδει ισχύ 10 MW.

1.3 Διάρθρωση της Εργασίας

Η Διπλωματική Εργασία αποτελείται στο σύνολό της από 5 Κεφάλαια. Σε αυτή την παράγραφο περιγράφεται η διάρθρωσή της. Πιο συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στο θέμα του κάθε κεφαλαίου, καθώς και στο περιεχόμενο των παραγράφων αυτών.

Αρχικά, το Κεφάλαιο 1 (το παρών) αποτελεί το εισαγωγικό κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας: «Αεροδυναμική και Αεροελαστική σχεδίαση δρομέων Α/Γ με χρήση του εξελικτικού αλγορίθμου *EASY*». Αρχικά, καθορίζεται ο στόχος της Εργασίας, αφού αναφερθούν πρώτα οι παράγοντες που οδήγησαν σε αυτόν. Έπειτα, ακολουθεί η σύνοψη της Εργασίας, η οποία αναφέρει συνοπτικά τα ζητήματα που αναλύονται.

Στη συνέχεια ακολουθεί το Κεφάλαιο 2, όπου παρουσιάζονται συνοπτικά οι αεροδυναμικές αρχές σύμφωνα με τις οποίες μελετάται μία ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα. Παράλληλα, αυτές οι αρχές είναι εκείνες στις οποίες βασίζεται ο υπολογιστικός κώδικας που χρησιμοποιείται σε όλους τους υπολογισμούς, όπως η Μέθοδος Στοιχείων Πτερύγωσης (Blade Element Momentum theory) και οι διατηρητικοί νόμοι.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η μέθοδος με την οποία επιτυγχάνεται η προσομοίωση της εσωτερικής δομής του πτερυγίου αναφοράς, καθώς και τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης. Προκειμένου να εξασφαλιστεί πως όλα τα μεγέθη, καθώς και η γενικότερη μορφή του εσωτερικού τμήματος ενός πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας είναι στον αναγνώστη γνωστά, προηγείται μια λεπτομερής δομική ανάλυση, όπου καταγράφονται τα σημαντικότερα. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά σε όλα τα μεγέθη που εμπλέκονται στη διαδικασία προσομοίωσης, αλλά και στις μορφές των εσωτερικών δομών που έχουν παγκοσμίως επικρατήσει στη βιομηχανία.

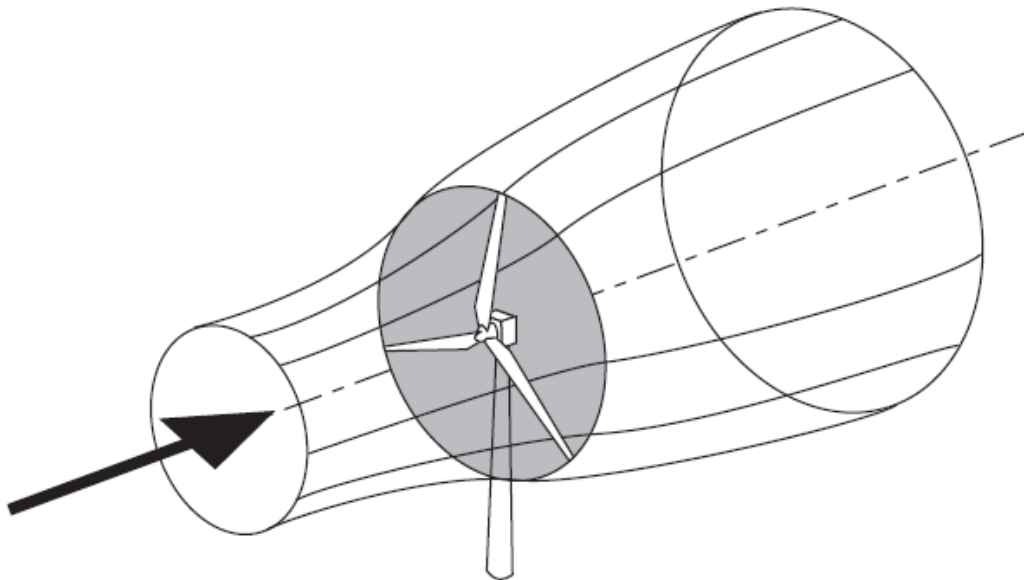
Έπειτα, ακολουθεί το Κεφάλαιο 4 στο οποίο περιλαμβάνεται η ανάλυση όλων των περιπτώσεων βελτιστοποίησης όσον αφορά τα πτερύγια 5MW. Σε κάθε τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται το εκάστοτε πρόβλημα, γίνεται αναφορά στους στόχους, στις μεταβλητές σχεδιασμού και στους περιορισμούς και καταγράφεται ο τρόπος επίλυσης του. Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα, τα οποία συνοδεύονται από τον αντίστοιχο σχολιασμό, ενώ τέλος καταγράφονται και τα συμπεράσματα που προκύπτουν. Παράλληλα, περιέχονται ορισμένες παραλλαγές των μορφών των πτερυγίων που προκύπτουν, καθώς και μία δυναμική ανάλυση ορισμένων από αυτά.

Στο Κεφάλαιο 5 περιέχεται η παρουσίαση του τρόπου σχεδίασης ενός πτερυγίου Α/Γ 10 MW με αύξηση μεγέθους, καθώς και την απαραίτητη διερεύνηση εναλλακτικών επιλογών σχεδίασης ενός τέτοιου δρομέα μέσω της διαδικασίας βελτιστοποίησης, προκειμένου να αντιμετωπιστούν ζητήματα που προκύπτουν από την αύξηση μεγέθους του δρομέα μιας Α/Γ.

Αεροδυναμική Σχεδίαση Α/Γ Οριζοντίου Άξονα

2.1 Θεωρία δίσκου ενέργειας

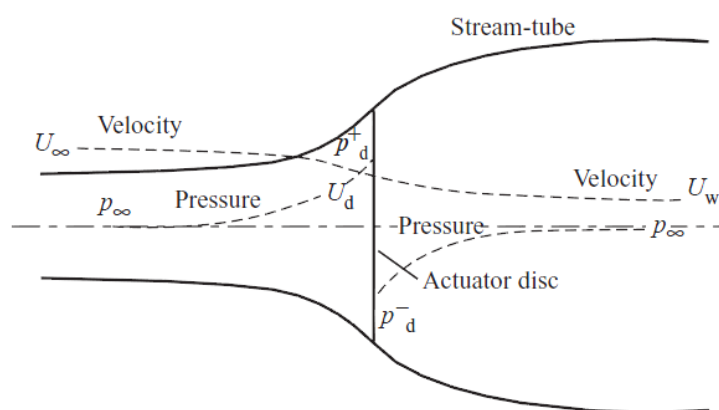
Η σχεδίαση και η πρόβλεψη της αεροδυναμικής απόδοσης των ελίκων πραγματοποιείται με βάση τη θεωρία του δίσκου ενέργειας. Η συγκεκριμένη θεωρία αναπτύχθηκε περίπου το 1870 από τους Froude, Rankine και Betz και χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα έχοντας υποστεί ορισμένες τροποποιήσεις και βελτιώσεις, οι οποίες βασίζονται στις νέες θεωρίες που αναπτύχθηκαν.



Σχήμα 2.1 Ροϊκός σωλήνας μιας ανεμογεννήτριας [*Wind Energy Handbook, WILEY 2001*]

Σύμφωνα με τη θεωρία δίσκου ενέργειας, ο δρομέας εξετάζεται ως ένας «δίσκος» δια μέσω του οποίου διέρχεται ο αέρας και υφίσταται μεταβολή της ενέργειάς του (Σχήμα 2.1). Αυτή η μεταβολή εκφράζεται ως πτώση πίεσης. Παράλληλα, ο δρομέας θεωρείται ως ένας δίσκος πάνω στον οποίο ενεργεί το ρευστό και για το λόγο αυτό δόθηκε σε αυτή τη μέθοδο η συγκεκριμένη

ονομασία. Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω και υποθέτοντας πως ο αέρας ανάντι του δίσκου (σε μεγάλη απόσταση) έχει ταχύτητα U_∞ και στατική πίεση p_∞ , κατόντι του δίσκου (σε μεγάλη απόσταση) ο αέρας θα έχει ταχύτητα U_w ($U_w < U_\infty$) και στατική πίεση πάλι p_∞ . Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2, η ταχύτητα μειώνεται, συνεπώς για λόγους διατήρησης της μάζας η διατομή του ροϊκού σωλήνα πρέπει να αυξάνεται. Ενώ η ταχύτητα είναι συνεχής και μάλιστα ακριβώς πριν και μετά το δίσκο θεωρείται πως παραμένει ίδια (επίσης λόγω διατήρησης της μάζας), η στατική πίεση του αέρα μετά το δίσκο θα είναι μικρότερη από αυτή πριν το δίσκο. Η συγκεκριμένη ασυνέχεια πίεσης είναι η πτώση πίεσης που περιγράφηκε προηγουμένως και αποτελεί το μηχανισμό δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από το δρομέα της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.2 Ροϊκός σωλήνας δρομέα ανεμογεννήτριας [*Wind Energy Handbook, WILEY 2001*]

Οι προσεγγίσεις που θα ακολουθήσουν στις επόμενες παραγράφους θα βασιστούν σε ορισμένες παραδοχές. Συνεπώς, κρίνεται σε αυτό το σημείο απαραίτητο να γίνει αναφορά σε αυτές τις παραδοχές:

- Η εναλλαγή ενέργειας μεταξύ ρευστού και δίσκου γίνεται χωρίς απώλειες
- Ο ροϊκός σωλήνας αποτελεί ένα ρεύμα ολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, το ρευστό μέσα στον σωλήνα έχει σταθερή ταχύτητα και πίεση πάνω στις διατομές κάθετα στον άξονά του, ενώ παράλληλα η επιφάνεια του ροϊκού σωλήνα αποτελεί επιφάνεια ασυνέχειας της ταχύτητας
- Η φόρτιση πάνω σε ολόκληρο το δίσκο είναι σταθερή
- Το ρεύμα αέρα μετά το δίσκο στερείται συστροφής. Πρακτικά, η συγκεκριμένη παραδοχή επιτυγχάνεται με την ύπαρξη δύο αντίθετα στρεφόμενων δρομέων

2.2 Διατηρητικοί Νόμοι

Για τη μελέτη του αεροδυναμικού πεδίου γύρω από τον δίσκο θα εφαρμοσθούν οι γνωστοί νόμοι της Μηχανικής των Ρευστών:

- Διατήρηση της μάζας
- Διατήρηση της ορμής
- Διατήρηση της ενέργειας
- Διατήρηση της ροπής της ορμής

2.2.1 Διατήρηση της μάζας

Η διατήρηση της μάζας που ρέει μέσα στο ροϊκό σωλήνα εκφράζεται με βάση το Σχήμα 2.2 ως εξής:

$$\dot{m} = \rho A_d U_d = \rho \pi R^2 U_d$$

όπου ρ : η πυκνότητα του ρευστού και A_d : η διατομή του ροϊκού σωλήνα πάνω στον δίσκο (επιφάνεια δίσκου) ακτίνας R .

2.2.2 Διατήρηση της ορμής

Το θεώρημα διατήρησης της ορμής εφαρμόζεται όχι στον ροϊκό σωλήνα, αλλά στον κυλινδρικό όγκο, ο οποίος περιβάλλει τον σωλήνα και έχει εμβαδό A_∞ ίσο με το εμβαδό του ροϊκού σωλήνα στο σημείο όπου αυτός έχει διασταλεί και η ταχύτητα του αέρα ισούται με U_∞ . Προκειμένου η στατική πίεση του ρευστού να ισούται με την πίεση περιβάλλοντος, οι παράπλευρες επιφάνειες τοποθετούνται μακριά από τον δίσκο. Η παροχή Q δια μέσω της παράπλευρης επιφάνειας ισούται με $Q = \rho A_\infty U_\infty - \rho A_d U_d$. Συνεπώς, σύμφωνα με το θεώρημα της διατήρησης της ορμής ισχύει:

$$\begin{aligned} T &= \rho U_\infty^2 A_\infty - \rho A_d U_d U_w - Q U_\infty \Rightarrow \\ T &= \rho A_d U_d (U_\infty - U_w) \end{aligned} \quad (2.1)$$

όπου T : η ωστική δύναμη που εφαρμόζει το ρευστό πάνω στο δρομέα. Δεδομένου ότι η διαφορά $U_\infty - U_w$ έχει θετικό πρόσημο, προκύπτει πως η συγκεκριμένη δύναμη έχει την κατεύθυνση κίνησης του ανέμου.

2.2.3 Διατήρηση της ενέργειας

Μία από τις παραδοχές που καταγράφτηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, αναφερόταν στη μη ύπαρξη συστροφής ανάντι του δρομέα, όπως και κατάντι. Αυτό έχει ως συνέπεια να υπάρχει η δυνατότητα να εφαρμόζεται ο νόμος διατήρησης της ενέργειας σε δύο υποτομήματα του ροϊκού σωλήνα. Το ένα από αυτά ορίζεται ως εξής: ανάντι του δρομέα (σε μεγάλη απόσταση) έως τον δρομέα και το άλλο: από τον δρομέα έως κατάντι του δρομέα (σε μεγάλη απόσταση). Με εφαρμογή, λοιπόν, του νόμου του Bernoulli σε αυτά τα δύο υποτομήματα προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$p_d^+ - p_d^- = \frac{\rho}{2}(U_\infty^2 - U_w^2)$$

Η διαφορά, όμως, $p_d^+ - p_d^-$ αποτελεί ουσιαστικά τη σταθερή φόρτιση του δίσκου T/A_d . Συνεπώς, με βάση την Εξίσωση 2.1 διαιρεμένη ως προς A_d , προκύπτει πως η ταχύτητα του ανέμου πάνω στον δίσκο ισούται με το άθροισμα των ταχυτήτων του ανέμου ανάντι και κατάντι του δίσκου (σε μεγάλη απόσταση), δηλαδή:

$$U_d = \frac{1}{2}(U_\infty + U_w) \quad (2.2)$$

Έτσι, ορίζεται ο συντελεστής αξονικής επαγωγής, ο οποίος εκφράζει την ποσοστιαία επιβράδυνση του αέρα πάνω στον δίσκο, ως εξής:

$$a = \frac{U_\infty - U_d}{U_\infty}$$

Με χρήση των Εξισώσεων 2.1 και 2.2, η ώση και η ισχύς που δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$T = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1 - a) \quad (2.3)$$

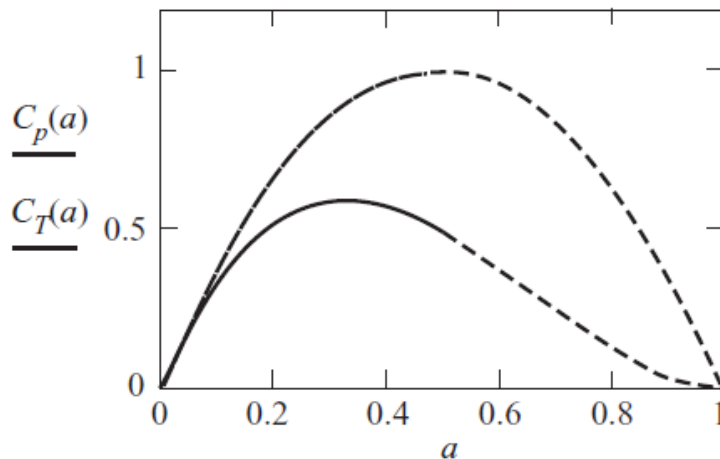
$$P = T U_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a)^2$$

με αποτέλεσμα να ορίζονται οι συντελεστές ισχύος και αντίστασης του δρομέα ως εξής:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_d U_\infty^3}$$

$$C_T = 4a(1 - a) = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_d U_\infty^2}$$

Ο πρώτος από τους παραπάνω συντελεστές περιγράφει το ποσοστό της ισχύος του ανέμου που πλησιάζει την ανεμογεννήτρια, το οποίο δεσμεύει ο δρομέας και ο δεύτερος εκφράζει τον συντελεστή αντίστασης που παρουσιάζει ο δρομέας στη ροή. Είναι προφανές πως η μέγιστη τιμή του C_p παρατηρείται για συντελεστή αξονικής επαγωγής $a = 1/3$ ($dC_p/da = 0$) και ισούται με $C_{p_{max}} = 0.59$, ή αλλιώς το όριο Betz. Όμοια, η τιμή του C_T μεγιστοποιείται για $a = 1/2$. Τα χαρακτηριστικά διαγράμματα $C_p - a$ και $C_T - a$ ακολουθούν στο Διάγραμμα 2.1.



Διάγραμμα 2.1 Καμπύλη C_p και C_T συνατήσεις του συντελεστή αξονικής επαγωγής [*Wind Energy Handbook, WILEY 2001*]

Μέχρι αυτό το σημείο, οι αναλύσεις έχουν βασιστεί στη θεώρηση πως ο ομόρρους του πεδίου ροής στερείται συστροφής. Η συγκεκριμένη παραδοχή, όμως, δεν αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα, όπου ο ομόρρους έχει μια μικρή συστροφή, η οποία μειώνει το συνολικό βαθμό απόδοσης της ανεμογεννήτριας. Σε αυτή την περίπτωση το μέγεθος $V_{\theta}r$ παραμένει σταθερό, δηλαδή η συστροφή διατηρείται στο υποτιμήμα κατάντι του δίσκου, με αποτέλεσμα η περιφερειακή ταχύτητα του ρευστού πάνω στον δίσκο να δίνεται από τον τύπο:

$$V_{\theta_s} = \frac{1}{2}V_{\theta_{\infty}}$$

και να ορίζεται ο συντελεστής περιφερειακής επαγωγής ως εξής:

$$a' = \frac{V_{\theta_s}}{\Omega r}$$

2.2.4 Θεώρημα της ροπής της ορμής

Σύμφωνα με το θεώρημα της ροπής της ορμής, το οποίο εκφράζει πως η μεταβολή της ροπής της ορμής του ρευστού που διέρχεται διά μέσω του όγκου ισολογισμού ισούται με τη ροπή των εξωτερικών δυνάμεων, προκύπτει:

$$dM = \rho 2\pi r dr V_s [(V_{\theta r})_{\infty} - (V_{\theta r})_{-\infty}] \quad (2.4)$$

και εν συνεχεία με ολοκλήρωση πάνω στην επιφάνεια του δίσκου προκύπτει πως η ροπή που αναπτύσσεται πάνω στον δίσκο δίνεται από τον τύπο:

$$M = \dot{m} V_s 2a' \Omega R^2$$

όπου \dot{m} : παροχή μάζας διά μέσω του δακτυλιοειδούς ροϊκού σωλήνα, δηλαδή $d\dot{m} = \rho 2\pi r dr U(1 - a)$.

Με βάση την Εξίσωση 2.3 η στοιχειώδης αξονική δύναμη που ενεργεί στο δίσκο υπολογίζεται ως εξής:

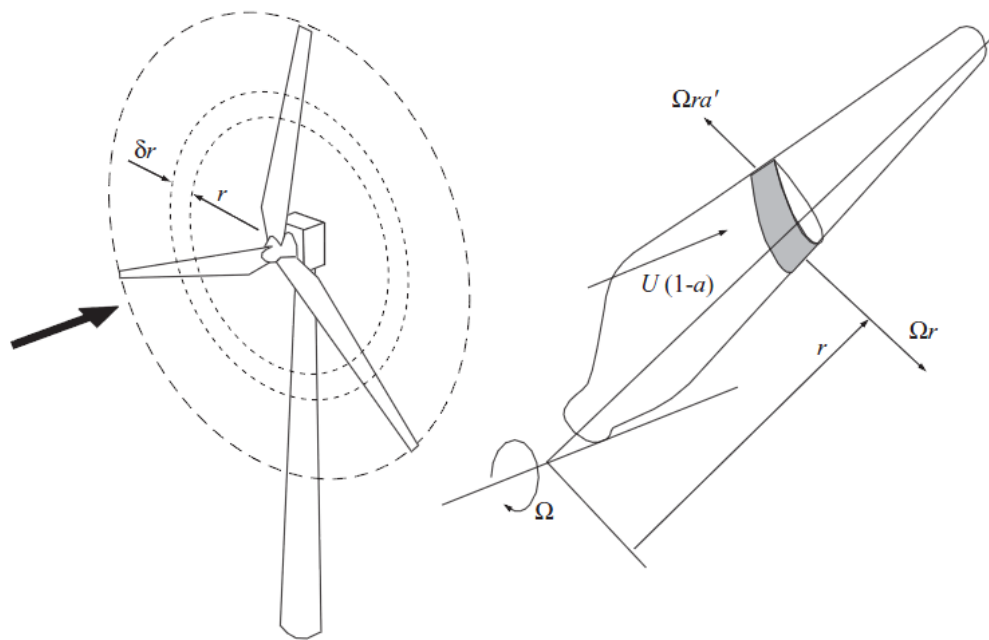
$$dT = \rho 4\pi r dr (1 - a)aU^2 = \rho C_T 2\pi r dr U^2$$

και έτσι ορίζεται και ο συντελεστής ροπής:

$$C_M = 4a'(1 - a)\frac{\Omega r}{U}$$

2.3 Θεωρία Στοιχείων Πτερύγωσης (Blade Element Momentum theory)

Η Θεωρία Στοιχείων Πτερύγωσης είναι η θεωρία με βάση την οποία υπολογίζονται η δύναμη, η ροπή, ο βαθμός απόδοσης (συντελεστής ισχύος) και πολλά άλλα μεγέθη. Το κάθε πτερύγιο του δρομέα χωρίζεται σε στοιχειώδεις λωρίδες και συνδέει τις δυνάμεις και τις ροπές που το ρευστό εξασκεί κατά τη διέλευσή του διά μέσω του δακτυλιοειδούς τμήματος του δίσκου πάχους δr πάνω στον δίσκο (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 Ένα στοιχείο περυγώσης αφήνει το αποτύπωμά του κατά την περιστροφή του περυγίου σε δακτυλιοειδή μορφή [Wind Energy Handbook, WILEY 2001]

Η τομή των περυγίων του δρομέα έχουν τη μορφή αεροτομής (Σχήμα 2.3). Κατά το επίπεδο του δρομέα, το περυγίο κινείται με ταχύτητα Ωr ενώ προστίθεται σε αυτό το μέγεθος και η περιφερειακή ταχύτητα V_{θ_s} (και οι δύο ταχύτητες έχουν την ίδια κατεύθυνση, ενώ το θετικό πρόσημο δηλώνει πως οι ταχύτητες έχουν αντίθετη φορά από την κατεύθυνση περιστροφής του δρομέα). Κατά την κατεύθυνση ταχύτητας του ανέμου, η ταχύτητα έχει ήδη υπολογιστεί σε προηγούμενη παράγραφο ως $U_d = U_{\infty}(1 - a)$. Από τις ταχύτητες U_d και $\Omega r + V_{\theta_s}$ προκύπτει και η συνισταμένη ταχύτητα W . Η γωνία α συμβολίζει τη γωνία πρόσπτωσης της συνισταμένης ταχύτητας στην αεροτομή, η γωνία β τη γωνία θέσης του περυγίου ως προς το επίπεδο περιστροφής του δρομέα και η γωνία φ ισούται με το άθροισμα $\alpha + \beta$. Όσον αφορά τις δυνάμεις που εφαρμόζονται πάνω στο στοιχείο περυγώσης, η αντίσταση έχει την ίδια κατεύθυνση με αυτή την συνισταμένης ταχύτητας, ενώ η άνωση είναι κάθετη σε αυτή. Στη συνέχεια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4, αυτές αναλύονται σε dF_n (κατά τον άξονα περιστροφής) και dF_t (κατά το επίπεδο περιστροφής). Έτσι, αν συμβολιστεί η χορδή της αεροτομής με c , αυτές υπολογίζονται:

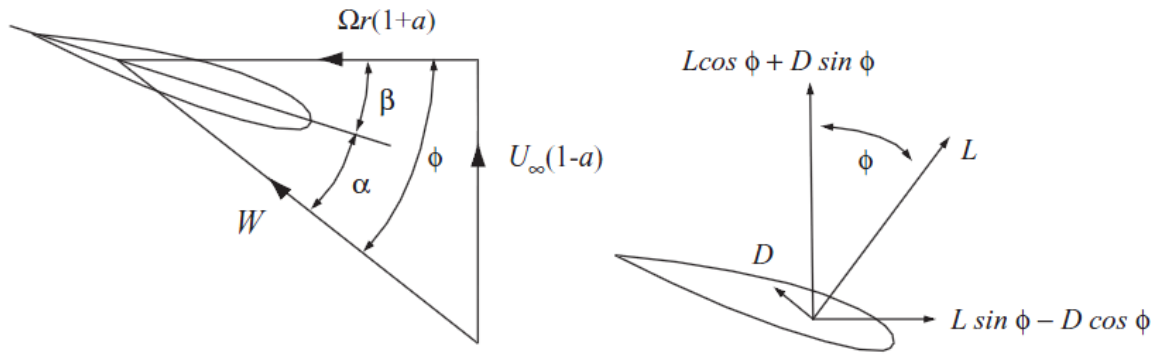
$$dF_n = C_n \frac{\rho}{2} W^2 c \delta r \quad (2.5)$$

$$dF_t = C_t \frac{\rho}{2} W^2 c \delta r \quad (2.6)$$

όπου:

$$C_n = C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi$$

$$C_t = C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi$$



Σχήμα 2.4 Τομή του πτερυγίου και εφαρμογή σε αυτή του τριγώνου ταχυτήτων [*Wind Energy Handbook, WILEY 2001*]

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις που έχουν μέχρι στιγμή γραφτεί για τη στοιχειώδη δύναμη (Εξίσωση 2.5 και 2.6) και για τη στοιχειώδη ροπή (Εξίσωση 2.4) και θεωρώντας πως το έργο της ανεμογεννήτριας δημιουργείται από τη στοιχειώδη ροπή:

$$dM = BdF_t r$$

όπου B: ο αριθμός των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, προκύπτουν οι σχέσεις για τους συντελεστές αξονικής και περιφερειακής επαγωγής:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{BcC_L}{8\pi r \tan\phi \sin\phi} (1 + \varepsilon \tan\phi)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{BcC_L}{8\pi r \cos\phi} (1 - \varepsilon \cot\phi)$$

$$\varepsilon = \frac{C_D}{C_L}$$

Οι λειτουργικές παράμετροι του δρομέα σε κάθε ακτινική θέση μπορούν να υπολογιστούν μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Σε κάθε στάδιο αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις, μέχρις ότου να συγκλίνουν οι τιμές των a και a' , έχοντας ξεκινήσει τη διαδικασία με αυθαίρετες αρχικές τιμές για αυτά τα μεγέθη. Οι συγκεκριμένες σχέσεις είναι οι εξής:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{BcC_L}{8\pi r \tan\phi \sin\phi} (1 + \varepsilon \tan\phi)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{BcC_L}{8\pi r \cos\phi} (1 - \varepsilon \cot\phi)$$

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

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

$$\alpha = \varphi - (\theta + \beta)$$

$$\varepsilon = \frac{C_D}{C_L}$$

Συνεπώς, η ώση και η ροπή περιστροφής του δρομέα δίνονται από τους τύπους:

$$T = B \sum_i F_{n_i}$$

$$M = B \sum_i F_{t_i} r$$

ενώ η ισχύς προκύπτει ως:

$$P = M\Omega$$

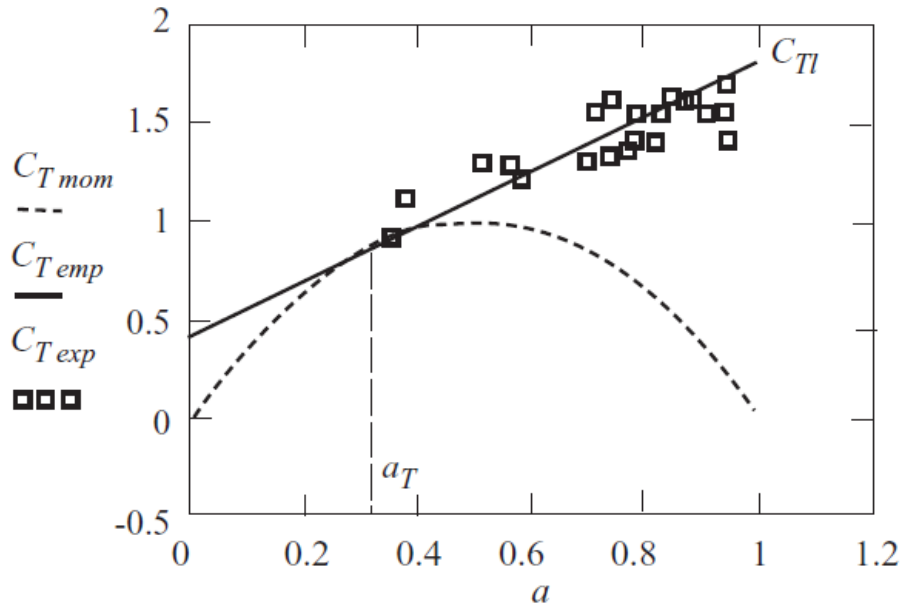
2.4 Διορθώσεις της θεωρίας του δίσκου ενέργειας

Όπως έχει ήδη σημειωθεί, από την ανάπτυξη της θεωρίας του δίσκου ορμής μέχρι και σήμερα έχουν προστεθεί σε αυτή διάφορες βελτιώσεις και τροποποιήσεις. Οι κυριότερες από αυτές είναι η διόρθωση του συντελεστή ώσης και η διόρθωση ακροπτερυγίων – Prandtl.

2.4.1 Διόρθωση συντελεστή ώσης C_T

Παρατηρήθηκε πως για μεγάλο συντελεστή αξονικής επαγωγής (μεγαλύτερο από 0.5), η ταχύτητα κατάντι του δρομέα (σε μεγάλη απόσταση) ενδέχεται να παίρνει αρνητικές τιμές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η θεωρία δίσκου ενέργειας αποτυγχάνει. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η διόρθωση του συντελεστή ώσης για $a > 0.5$, η οποία προτάθηκε από τον Glauert. Με βάση αυτή τη διόρθωση η σχέση του C_T που γράφτηκε προηγουμένως ισχύει μέχρι $a = 0.4$. Για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή αξονικής επαγωγής πρότεινε μία προσεγγιστική εξίσωση δευτέρου βαθμού. Έτσι, ο συντελεστής ώσης έχει πλέον την εξής μορφή:

$$C_T = \begin{cases} 4a(1 - a) & \text{για } a < 0.4 \\ 1 - 8a^2 - 0.65a + 0.84 & \text{για } 0.4 < a < 1 \end{cases}$$



Διάγραμμα 2.2 Σύγκριση καμπυλών $C_T - a$ με βάση τη θεωρία ορμής, τη θεωρία Glauert και πειραματικές τιμές [*Wind Energy Handbook, WILEY 2001*]

2.4.2 Διόρθωση ακροπτερυγίου - Prandtl

Οι πεπερασμένου πλήθους εκρέοντες στρόβιλοι από τα ακροπτερύγια της ανεμογεννήτριας προκαλούν απώλειες αεροδυναμικής φύσης, οι οποίες δε λαμβάνονται υπόψη από τη θεωρία που έχει υιοθετηθεί μέχρι στιγμής. Δεδομένου ότι η θεωρία δίσκου ενέργειας προϋποθέτει ομοιόμορφη ροή διά μέσω κάθε δακτυλίου του δίσκου, η εισαγωγή διορθώσεων είναι αναγκαία. Οι συγκεκριμένες διορθώσεις στόχο έχουν την περιγραφή της μείωσης της ροπής, μέσω μείωσης της περιφερειακής συνιστώσας της άνωσης, λόγω μικρότερης γωνίας πρόσπτωσης.

Η λύση προήλθε από τον Prandtl ο οποίος όρισε τον συντελεστή απωλειών ακροπτερυγίου ως εξής:

$$F_T = \frac{z}{\pi} \arccos(e^{-f_T})$$

όπου:

$$f_T = \frac{B}{z} \cdot \frac{r_T - r}{r_T \sin(\varphi_T)}$$

Σε περίπτωση που το αεροδυναμικό τμήμα του πτερυγίου τελειώνει πριν την πλύμνη, τότε ορίζεται και ο αντίστοιχος συντελεστής απωλειών για την πλύμνη, ως εξής:

$$F_H = \frac{B}{z} \cdot \frac{r - r_H}{r_H \sin(\varphi_H)}$$

Έτσι, ο συνολικός συντελεστής διόρθωσης Prandtl ισούται με το γινόμενο του συντελεστή ακροπτερυγίου επί αυτού των απωλειών πλύμνης:

$$F = F_T \cdot F_H$$

και χρησιμοποιείται στις εξισώσεις σύγκλισης της Παραγράφου 2.3, πολλαπλασιάζοντας τους όρους a και a' με F .

Δημιουργία της Εσωτερικής Δομής του Πτερυγίου Αναφοράς

3.1 Εσωτερική δομή πτερυγίων Α/Γ

Στη συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται, αρχικά, μία λεπτομερής αναφορά στη μορφή της εσωτερικής δομής ενός πτερυγίου, στις συνιστώσες αυτής της δομής και στον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει η κάθε μία από αυτές τη γενικότερη συμπεριφορά μιας Α/Γ. Με τον τρόπο αυτό είναι ευκολότερα κατανοητή η διαδικασία που παρουσιάζεται στην Παράγραφο 3.2 και στόχο έχει τη μοντελοποίηση αυτής της δομής για ένα πτερύγιο το οποίο αποτελεί κατά τις διαδικασίες βελτιστοποίησης των επόμενων κεφαλαίων το πτερύγιο αναφοράς.

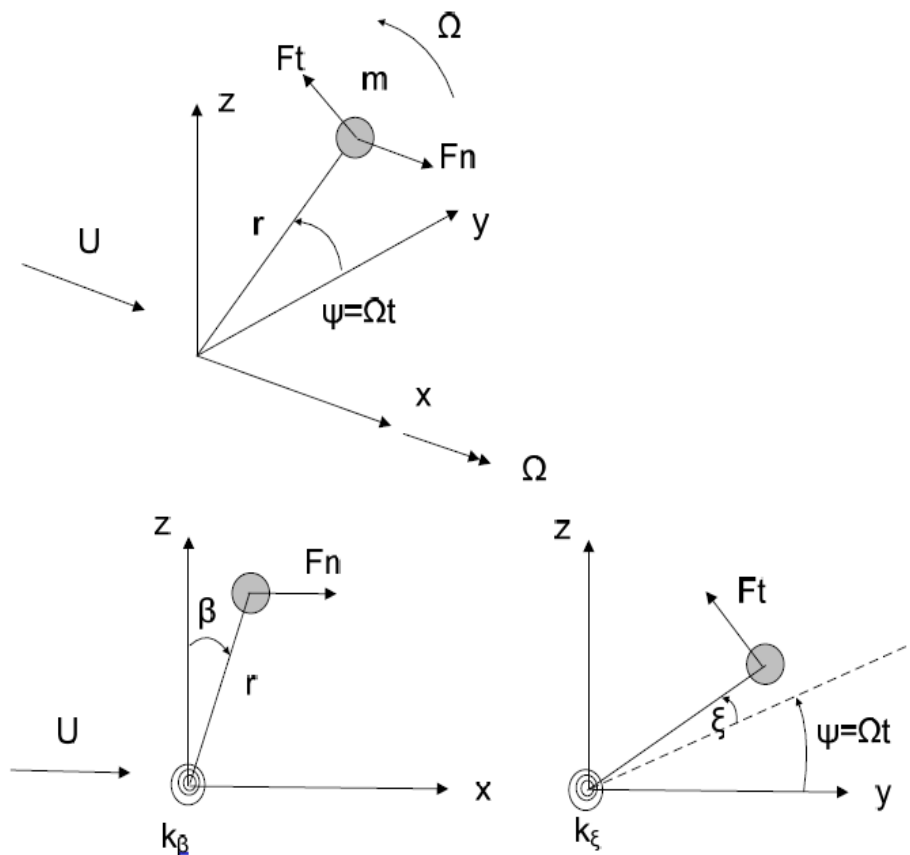
3.1.1. Εισαγωγή

Ένας επιτυχημένος σχεδιασμός ενός πτερυγίου πρέπει να ικανοποιεί έναν μεγάλο αριθμό κριτηρίων, ορισμένα από τα οποία είναι:

- Μεγιστοποίηση μέσης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας για συγκεκριμένη κατανομή ταχύτητας ανέμου
- Διατήρηση των φορτίσεων σε επιτρεπτά επίπεδα
- Ελαχιστοποίηση βάρους και κόστους

Όπως είναι ίσως προφανές αυτά τα κριτήρια ενδέχεται να είναι αντικρουόμενα. Για παράδειγμα, ένα πτερύγιο μικρότερου πάχους ενδέχεται να έχει αποδοτικότερη αεροδυναμική συμπεριφορά. Σε αυτή την περίπτωση, όμως, αυξάνονται κατά πολύ οι φορτίσεις με αποτέλεσμα να τίθεται θέμα αντοχής στις παραμορφώσεις στις οποίες υπόκειται μία Α/Γ (Σχήμα 3.1). Μία πιθανή λύση για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος θα ήταν τα εσωτερικά τοιχώματα μεγαλύτερου πάχους. Αυτή η επιλογή, όμως, δε θα είχε εξασφαλισμένη επιτυχία διότι θα οδηγούσε αναμφίβολα σε βαρύτερο (άρα μεγαλύτερα φορτία λόγω βαρύτητας) και κατά πάσα πιθανότητα ακριβότερο πτερύγιο, λόγω αύξησης της μάζας. Προκύπτει, λοιπόν, πως η διαδικασία σχεδιασμού ενός πτερυγίου είναι μία εξαιρετικά δύσκολη

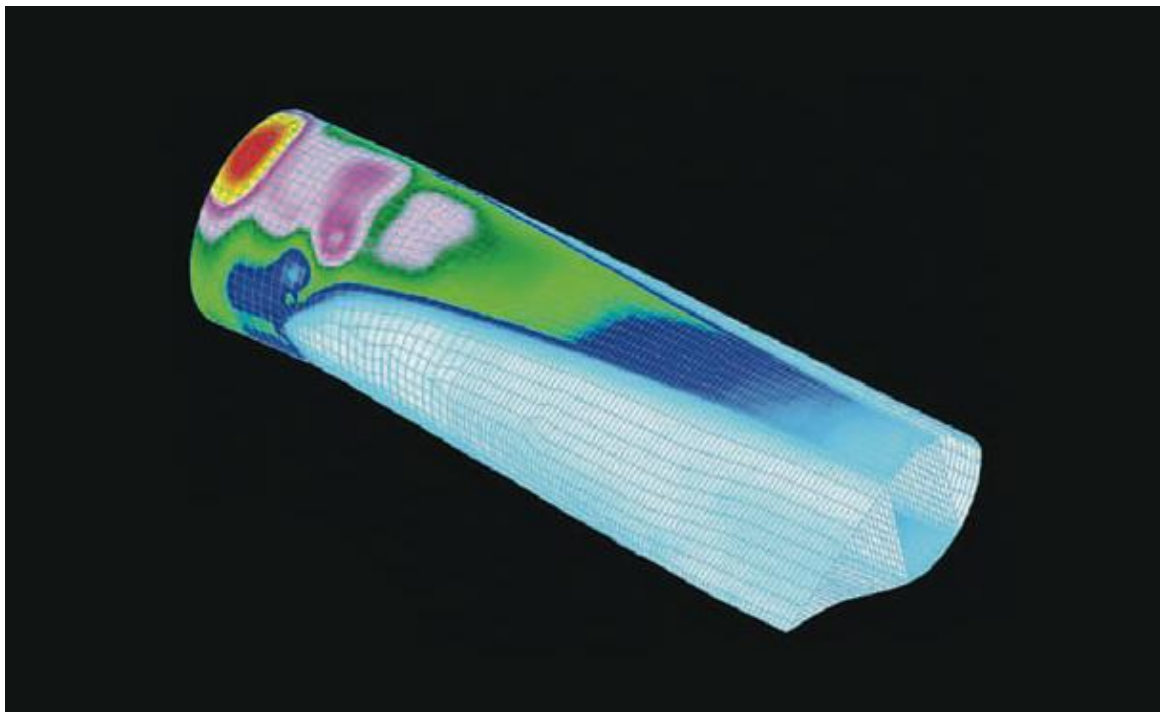
διαδικασία, λόγω του συμβιβασμού που πρέπει να επιτευχθεί μεταξύ της αεροδυναμικής απόδοσης και των δομικών απαιτήσεων. Εν γένει, ο σχεδιασμός ενός δρομέα μιας Α/Γ χωρίζεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αποτελείται από τον αεροδυναμικό σχεδιασμό με βάση τον οποίο καθορίζονται τα εξωτερικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως ο τύπος της αεροτομής κατά μήκος και οι κατανομές χορδής, πάχους, συστροφής και άλλων τέτοιων μεγεθών. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει το σχεδιασμό της εσωτερικής δομής και την επιλογή των κατάλληλων υλικών ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί που επιβάλλονται για λόγους αντοχής. Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται μία λεπτομερής ανάλυση του δεύτερου σταδίου.



Σχήμα 3.1 Απλοποιημένο πρότυπο δρομέα – Παραμόρφωση κατά flapwise (β), παραμόρφωση κατά edgewise (ξ) [Αεροελαστικότητα, Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας Ε.Μ.Π., Β. Ριζιώτης]

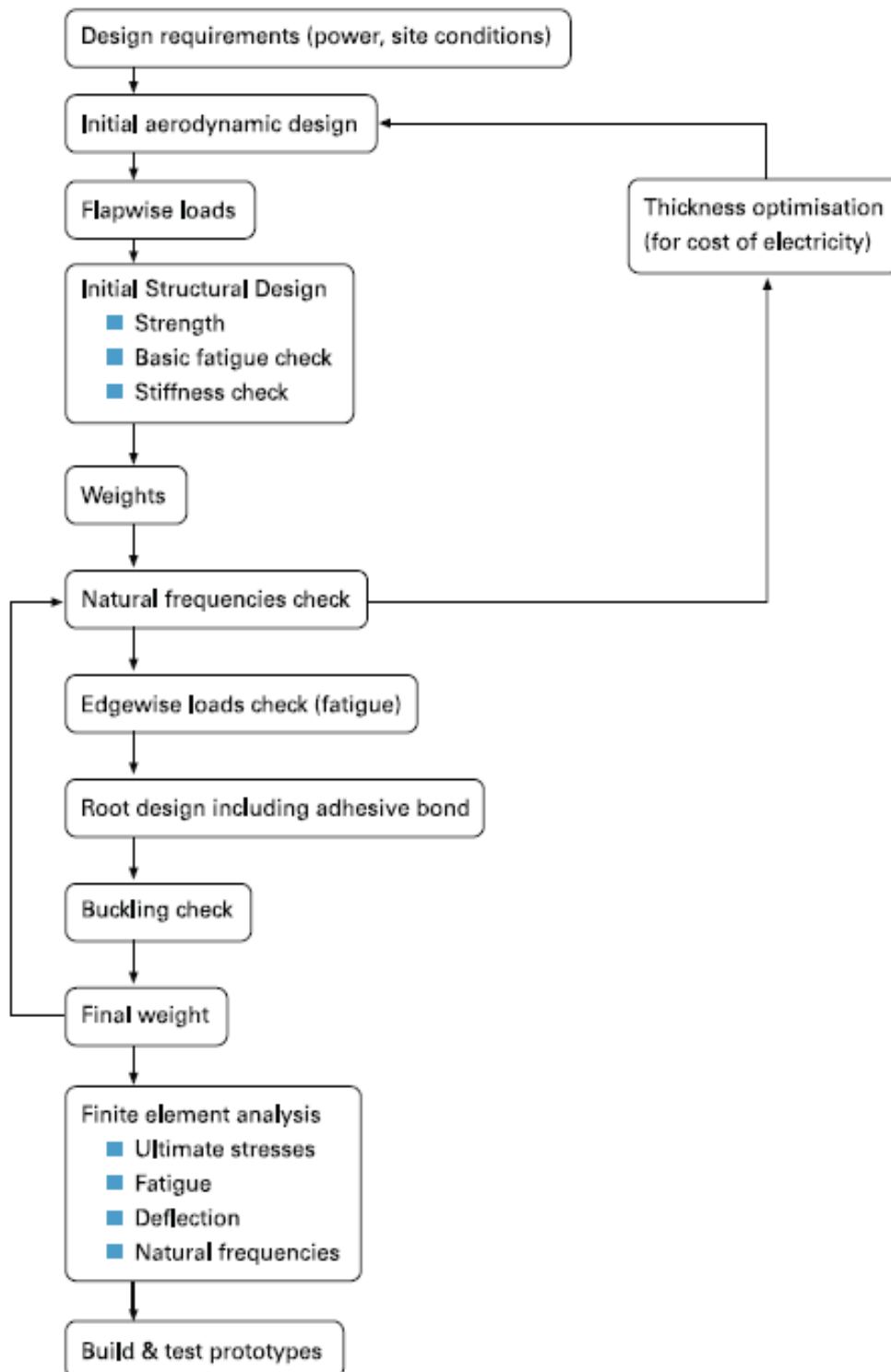
Λόγω του ότι η παραμόρφωση κατά την πτερύγιση (flapwise) είναι η κυριότερη φόρτιση ενός πτερυγίου μιας Α/Γ και παράλληλα μπορεί να προσεγγισθεί με επαρκή ακρίβεια στα αρχικά στάδια σχεδιασμού του πτερυγίου, η διαδικασία σχεδιασμού ξεκινά από τον υπολογισμό της απαιτούμενης μορφής της δομής προκειμένου να υποστηριχθούν τα φορτία σε αυτή την κατεύθυνση. Όπως σημειώνεται και προηγουμένως, απαιτείται ο καθορισμός όλων των πιθανών παραμέτρων έτσι ώστε να εξασφαλίζεται τόσο η αεροδυναμική όσο και η δομική αποδοτικότητα του πτερυγίου. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας λαμβάνουν χώρα

συνεχείς επαναλήψεις που οδηγούν σε επανακαθορισμό των υπολογιζόμενων μεγεθών (Σχήμα 3.3). Για παράδειγμα, η κόπωση κατά την κατεύθυνση περιστροφής (edgewise) εξαρτάται από τη μάζα του πτερυγίου. Δεδομένου ότι η μάζα του πτερυγίου δεν είναι γνωστή μέχρις ότου προκύψει η τελική μορφή, απαιτείται σε κάθε στάδιο μία προσέγγιση αυτής. Στη συνέχεια, αφού η τιμή της μάζας οριστικοποιηθεί ενδέχεται μερικές παράμετροι, όπως το είδος των υλικών ή ο τρόπος τοποθέτησης των στρώσεων του, να επανακαθοριστούν ή να επανασχεδιασθούν λαμβάνοντας υπόψη τις επιπρόσθετες φορτίσεις που προκύπτουν από την τελική τιμή της μάζας. Σε αυτό το στάδιο το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί θέτωντας μικρότερες τιμές των μέγιστων επιτρεπόμενων φορτίσεων. Μετά την ολοκλήρωση του παραπάνω σταδίου και έχοντας καθορισμένες τις δύο βασικές συνιστώσες κάμψης (κατά την πτερύγιση και κατά την κατεύθυνση περιστροφής), ελέγχεται η στρεπτική δυσκαμψία του κελύφους, καθώς και η αντίστασή του σε λυγισμό (buckling). Μέχρι αυτό το σημείο, η ανάλυση συνήθως πραγματοποιείται με απλά αναλυτικά μοντέλα, τα οποία οδηγούν σε προσεγγιστικά αποτελέσματα, αλλά επιτρέπουν γρήγορες επαναλήψεις της διαδικασίας στοχεύοντας προς το βέλτιστο αποτέλεσμα. Στην τελική ανάλυση απαραίτητη είναι η μέθοδος Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων. Με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο διαχωρίζεται το πτερύγιο σε πολλά επιμέρους στοιχεία. Έτσι, μέσω της μοντελοποίησης είναι δυνατή η ακριβής μελέτη της συμπεριφοράς κάθε στοιχείου για κάθε δυνατό σενάριο φόρτισης. Σε περίπτωση που παρατηρηθεί πως κάποιο τμήμα φορτίζεται μέχρι κάποιο κρίσιμο σημείο, μπορεί αυτό να απομονωθεί και να μελετηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια (Σχήμα 3.2). Σκοπός της διαδικασίας που περιγράφεται παραπάνω είναι ο έλεγχος για πιθανή πρόωμη αστοχία, καθώς και ο υπολογισμός της συσσωρευτικής κόπωσης του πτερυγίου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.



Σχήμα 3.2 Αποτέλεσμα Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων για τμήματα που ενδέχεται να αστοχήσουν κοντά στη ρίζα του πτερυγίου [Wind Turbine Blade Structural Engineering, WE Handbook, © Gurit]

Blade Structural Design Process



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας σχεδιασμού της δομής του πτερυγίου μιας Α/Γ
[Wind Turbine Blade Structural Engineering, WE Handbook, © Gurit]

3.1.2 Μορφή της δομής

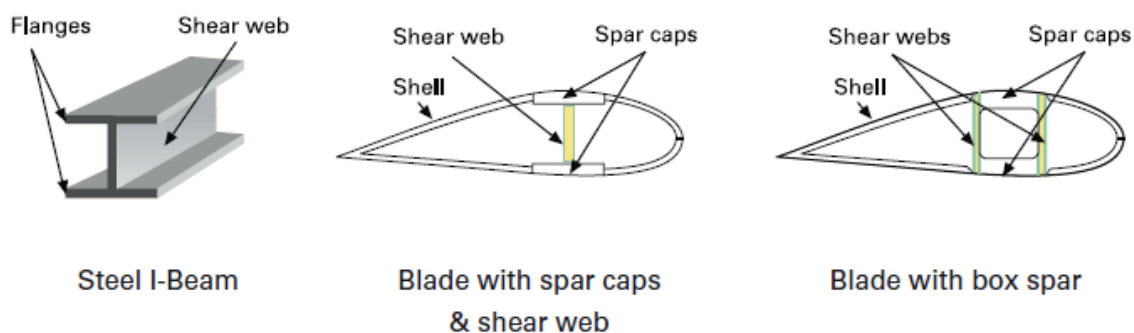
Οι κυριότερες απαιτήσεις από το πτερύγιο μιας Α/Γ, πέρα από την αεροδυναμική απόδοση, μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Υψηλή αντοχή
- Μεγάλη αντίσταση σε κόπωση
- Αξιοπιστία
- Χαμηλό βάρος
- Υψηλή δυσκαμψία

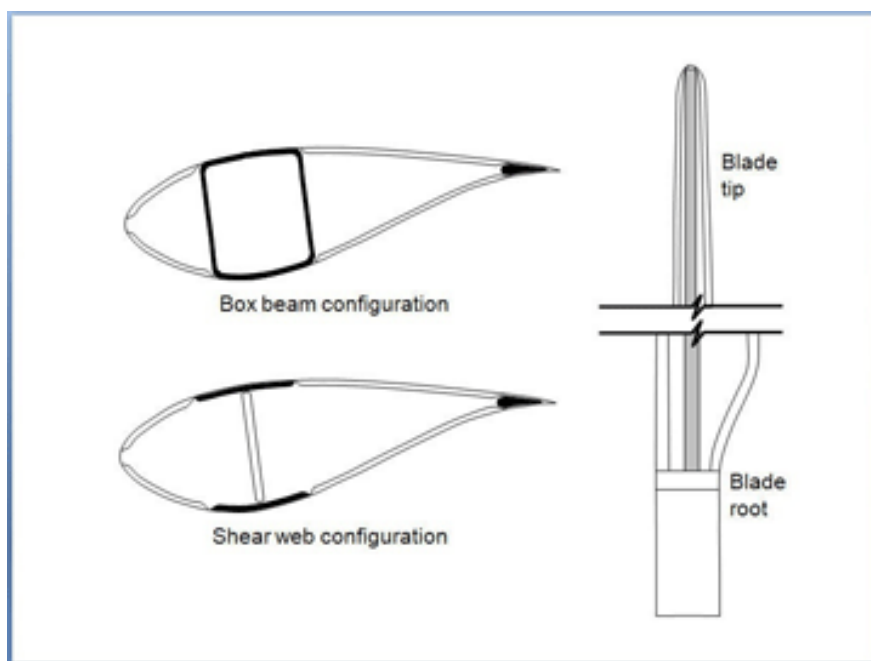
Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει μία ανάλυση της μορφής της εσωτερικής δομής του πτερυγίου και μία επεξήγηση της χρησιμότητας των επιμέρους τμημάτων του. Θα παρουσιαστούν, ακόμη, τα δύο μοντέλα που έχουν ευρέως επικρατήσει και στα οποία οι κατασκευαστές έχουν καταλήξει πως είναι τα αποδοτικότερα. Ζητούμενο σε κάθε περίπτωση είναι η δομή να πληροί τις απαιτήσεις που σημειώνονται παραπάνω.

Είναι δεδομένο πως το πτερύγιο δεν είναι ένα συμπαγές στερεό σώμα. Εάν το πτερύγιο ήταν συμπαγές, το απαιτούμενο πάχος σε κάθε σημείο κατά μήκος του πτερυγίου θα καθοριζόταν μόνο από τη καμπτική ροπή σε αυτό το σημείο. Έτσι, κατά την ανάλυση της συμπεριφοράς ενός τέτοιου υποθετικού πτερυγίου, προκύπτει πως όταν το πτερύγιο κάμπτεται κατάντι, το υλικό της ανάντι πλευράς του εφελκύεται, ενώ το υλικό στην κατάντι πλευρά του θλίβεται. Όσον αφορά το υλικό που βρίσκεται στα κεντρικά σημεία του πτερυγίου, αυτό δεν υπόκειται ούτε σε εφελκυσμό, ούτε σε θλίψη και ως εκ τούτου δεν έχει μεγάλη χρησιμότητα και μπορεί να παραληφθεί. Συνεπώς, τόσο για λόγους μείωσης του κόστους, όσο και για λόγους μείωσης του βάρους, ορισμένο από αυτό το υλικό αφαιρείται με αποτέλεσμα το πτερύγιο να μην είναι συμπαγές.

Στην ακραία περίπτωση όπου το πτερύγιο αποτελούταν από δύο λωρίδες υλικού, μία ανάντι (upwind airfoil face) και μία κατάντι (downwind airfoil face), ενωμένες μόνο μέσω του κελύφους το αποτέλεσμα δε θα ήταν αποδοτικό για λόγους αντίστασης σε διάτμηση. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό αν σκεφτεί κανείς τη συμπεριφορά που θα είχαν αυτές οι δύο λωρίδες. Πιο συγκεκριμένα, θα συμπεριφέρονταν σα δύο ανεξάρτητα, πολύ λεπτά πτερύγια, με συνέπεια να ολισθαίνουν (sliding) το ένα ως προς το άλλο. Το φαινόμενο της διάτμησης στα πτερύγια των Α/Γ περιγράφεται αναλυτικότερα στην Παράγραφο 3.1.3. Για να είναι λειτουργική η δομή, λοιπόν, απαιτείται να είναι ενωμένες και το τμήμα που πραγματοποιεί αυτή την ένωση ονομάζεται δοκός διάτμησης (shear web). Ο δομή αυτής της τεχνικής ονομάζεται I-beam.



Σχήμα 3.4 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Steel I-beam, [ΚΕΝΤΡΟ] Προσαρμογή της δομής I-beam στο εσωτερικό πτερυγίου Α/Γ, [ΔΕΞΙΑ] Box spar στο εσωτερικό πτερυγίου Α/Γ [*Wind Turbine Blade Structural Engineering, WE Handbook, © Gurit*]



Σχήμα 3.5 Πιθανές εσωτερικές δομές πτερυγίων (box spar και I-beam) [*Wind Turbine Blade Structural Engineering, WE Handbook, © Gurit*]

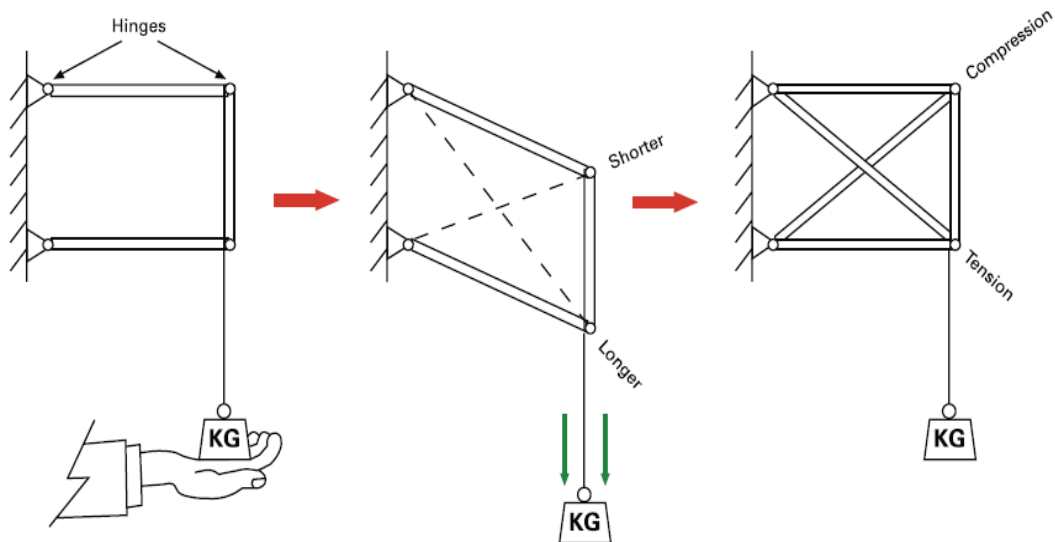
Ένα σημαντικό στοιχείο αυτής της δομής είναι το γεγονός ότι τα τμήματα στα οποία εφαρμόζονται κυρίως τα καμπτικά φορτία κατά την πτερύγιση (flapwise), δηλαδή οι δοκί- κάλυμα (spar caps), πρέπει να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, αλλά ενωμένα μέσω της δοκού διάτμησης (shear web). Η συγκεκριμένη διατομή ενός πτερυγίου Α/Γ έχει την ίδια συμπεριφορά με τη δομή “διπλού-T” ή I-beam, με τη μόνη διαφορά ότι συμπληρωματικά υπάρχει και το κέλυφος (shell) στην εξωτερική πλευρά. Αυτό, ουσιαστικά, συμβάλει στο σχηματισμό του αεροδυναμικού σχήματος. Το κέλυφος συνεισφέρει κυρίως στη δυσκαμψία κατά την περιστροφή (edgewise), αλλά και κατά ένα μικρό ποσοστό στην δυσκαμψία κατά την

πτερύγιση (flapwise). Η τελευταία, βέβαια, επιτυγχάνεται κυρίως μέσω των δοκών-κάλυμα (spar caps), που έχουν την ίδια χρησιμότητα με αυτή της φλάντζας στο I-beam. Υπάρχουν δύο τρόποι προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η ένωση μέσω δοκών διάτμησης: είτε οι δοκοί-κάλυμα (spar caps) κατασκευάζονται ως μέρος του κελύφους (shell) και η ξεχωριστή δοκός διάτμησης (shear web) τοποθετείται ανάμεσά τους, είτε οι δοκοί διάτμησης (shear webs) και οι δοκοί-κάλυμα (spar caps) είναι μία ενιαία κατασκευή σαν τμήμα τύπου «κουτιού» (box spar) και προσκολλάται εσωτερικά του κελύφους (Σχήμα 3.4 και Σχήμα 3.5).

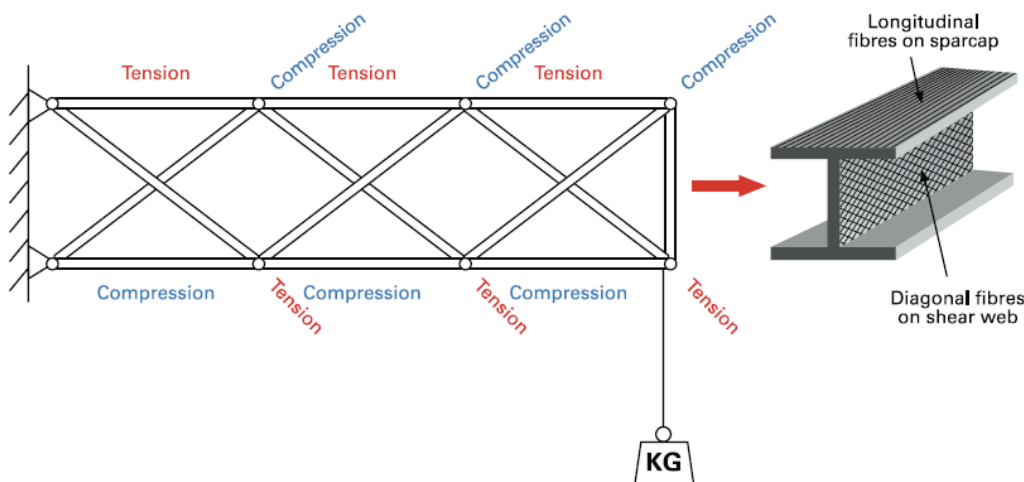
3.1.3 Υλικά κατασκευής

Οι ιδιότητες ενός πτερυγίου μιας Α/Γ συχνά καθορίζουν την απόδοση και τη διάρκεια ζωής της. Για το λόγο αυτό η αύξηση της αξιοπιστίας και της διάρκειας ζωής των πτερυγίων είναι ένα ζήτημα μείζονος σημασίας κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή μιας Α/Γ. Προκειμένου να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι χρησιμοποιούνται σε αυτή τη συνιστώσα της διάταξης σύνθετα υλικά.

Τα πτερυγία κατασκευάζονται από στρώσεις ενισχυμένων υαλονημάτων (glass fibre reinforced laminates) και ίνες ενισχυμένες με πολυεστέρα (fibre-reinforced plastics ή FRP) λόγω του μεγαλύτερου λόγου αντοχής προς βάρους αυτών των υλικών σε σύγκριση με τον αντίστοιχο λόγο διαφόρων άλλων υλικών [3]. Μάλιστα, το FRP είναι ιδιαίτερα αποδοτικό σε διαμήκεις και λεπτές δομές, όπως ένα πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας, επειδή μπορούν οι ίνες να έχουν τέτοιο προσανατολισμό, έτσι ώστε να ευθυγραμμίζονται με τη διεύθυνση των τάσεων. Είναι προφανές πως το μεγαλύτερο μέρος των ινών των δοκών-κάλυμα (spar caps) πρέπει να έχουν διεύθυνση κατά μήκος του πτερυγίου. Αυτό προκύπτει από την παραμόρφωση στην οποία υπόκειται το συγκεκριμένο τμήμα κατά την πτερύγιση (flapwise), δηλαδή εφελκυσμό upwind και συμπίεση downwind. Συχνά, όμως, οι δοκοί-κάλυμα (spar caps) μονής κατεύθυνσης κατασκευάζονται και με ορισμένες διαξονικές πτυχές. Όσον αφορά τη δοκό διάτμησης (shear web), οι ίνες πρέπει να είναι διαγώνιες και να σχηματίζουν γωνίες $\pm 45^\circ$ με τις δοκούς-κάλυμα (spar caps). Η συγκεκριμένη συμπεριφορά μπορεί να προσομοιωθεί από ένα απλό πλαίσιο τριών δοκών (Σχήμα 3.6). Εάν σε αυτό το πλαίσιο εφαρμοστεί μία δύναμη, αυτή θα το παραμορφώσει μετατρέποντάς το σε ρόμβο. Η μία διαγώνιος έχει γίνει μικρότερη και η άλλη διαγώνιος μεγαλύτερη. Για το λόγο αυτό ο καλύτερος τρόπος προκειμένου να γίνει περισσότερο στιβαρή η δομή είναι η προσθήκη δύο διαγώνιων δοκών. Το συγκεκριμένο πλαίσιο θα μπορούσε να επεκταθεί και να σχηματίσει μία διαμήκη δοκό προσθέτοντας κατά μήκος διαγώνιες δοκούς (Σχήμα 3.7). Κάθε τμήμα θα χρειάζεται ένα ζευγάρι διαγώνιων δοκών για να αποκτήσει αντίσταση ως προς τη διάτμηση. Μάλιστα απαιτούνται και οι δύο διαγώνιες δοκοί, δεδομένου ότι η μία προορίζεται για αντίσταση σε εφελκυσμό και η άλλη για αντίσταση σε θλίψη. Έτσι, αυτές οι δυνάμεις αλληλεπιδρούν με αποτέλεσμα να συγκρατούν τις δοκούς-κάλυμα (spar caps) σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Η συσσωρευτική τους επίδραση, τελικά, είναι να αποτρέψουν τις δοκούς-κάλυμα (spar caps) να ολισθήσουν (sliding) η μία ως προς την άλλη, δηλαδή να αποτρέψουν τη διάτμηση (shearing). Για το λόγο αυτό, άλλωστε, έχουν και αυτή την ονομασία (shear: διάτμηση).



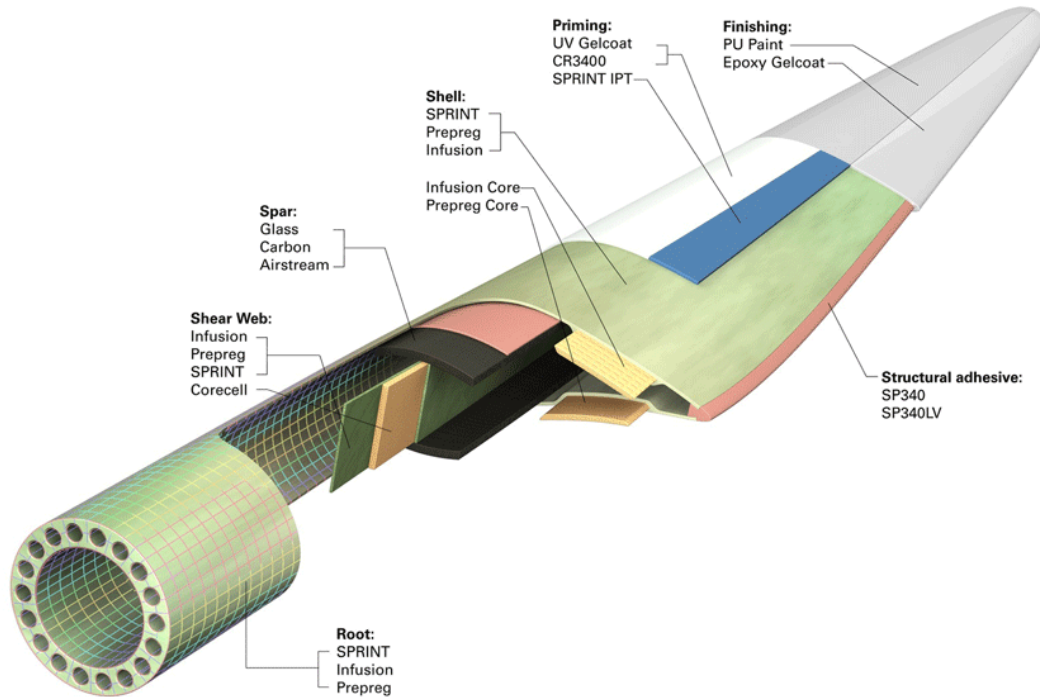
Σχήμα 3.6 Διάτμηση και ενίσχυση ως προς αυτή ενός απλού πλαισίου [Wind Turbine Blade Structural Engineering, WE Handbook, © Gurit]



Σχήμα 3.7 Προσομοίωση του εσωτερικού τμήματος ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας - Επέκταση του πλαισίου κατά μήκος, με ενίσχυση ως προς τη διάτμηση [Wind Turbine Blade Structural Engineering, WE Handbook, © Gurit]

Στόχος της εφαρμογής αυτής της τεχνικής είναι η εξασφάλιση μεγαλύτερης δυσκαμψίας. Η συγκεκριμένη τεχνική σύνθετων υλικών συχνά αποκαλείται τεχνική “sandwich”, σύμφωνα με την οποία τα υλικά τοποθετούνται αναμειγμένα ανά στρώσεις (Σχήμα 3.8). Στα μη-στηριζόμενα μέρη του κελύφους η χρήση της τεχνικής των στρώσεων είναι απαραίτητη ώστε να επιτευχθεί η ευστάθεια της μορφής του κελύφους. Τα κεντρικά στρώματα αυτού του συνδυασμού υλικών φέρουν το φορτίο διάτμησης, ενώ η σύνθετη επιφάνεια φέρει τις

καμπτικές φορτίσεις. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα επιμέρους τμήματα και οι τρόποι με τους οποίους συνεισφέρουν στη διατήρηση της μορφής του πτερυγίου.



Σχήμα 3.8. Πτερύγιο σε τομή - Απεικόνιση της δομής I-beam και της τεχνικής "sandwich" με χρήση στρώσεων διαφόρων υλικών [*Wind Turbine Blade Structural Engineering, WE Handbook, © Gurit*]

| Part | Function | Material used |
|--|--|---|
| Blade shell | Maintaining the blade shape, resisting the wind and gravitational forces | Strong, lightweight composites |
| Unsupported parts of the shell | Resisting the buckling load | Thickened sandwich structures with light core materials and multidirectional face laminates |
| Integral web, spars or box beam | Resisting the shell buckling/shear stresses due to flapwise bending | Biaxial lay-ups at +/- 45° |
| Adhesive layers between composite plies, and the web and the blade shell | Ensuring the out-of plane strength and stiffness of the blade | Strong and highly adhesive matrix |

Πίνακας 3.1. Τμήματα πτερυγίου Α/Γ, συνεισφορά τους στη διατήρηση του δομής και τύπος υλικού που χρησιμοποιείται σε αυτά

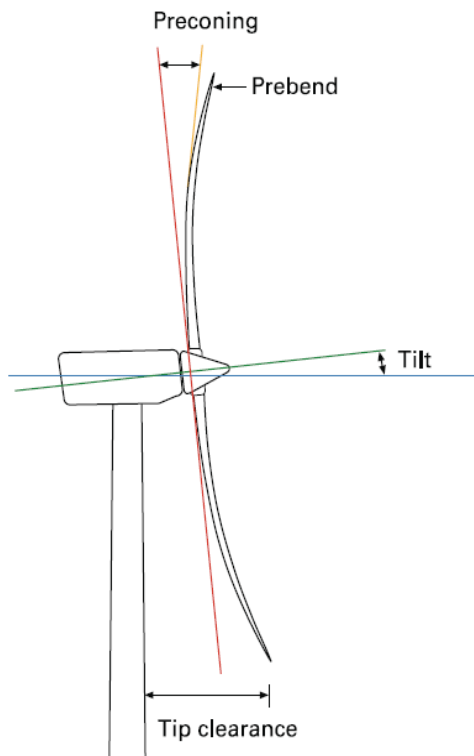
3.1.4 Δυσκαμψία

Πέρα από τη στερεότητα ενός πτερυγίου μιας Α/Γ, η δυσκαμψία αποτελεί ένα ακόμη βασικό χαρακτηριστικό του. Εάν ένας δρομέας δεν είναι αρκετά δύσκαμπτος, τότε προκύπτουν πολλά προβλήματα. Πιο συγκεκριμένα, στις ανεμογεννήτριες όπου ο ρότορας είναι τοποθετημένος ανάντι της ροής του ανέμου, δηλαδή στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η κάμψη των πτερυγίων τα μετακινεί προς τον πύργο (Σχήμα 3.9). Είναι προφανές, λοιπόν, πως τα πτερύγια πρέπει να είναι τόσο δύσκαμπτα, έτσι ώστε να μην έρθουν σε επαφή με τον πύργο, διότι οι συνέπειες σε μια τέτοια περίπτωση θα ήταν καταστροφικές για τη διάταξη της Α/Γ στο σύνολό της. Οι κατασκευαστές στοχεύουν στην εξασφάλιση μίας ελάχιστης απόστασης (clearance) κατά το χειρότερο δυνατό σενάριο από άποψη φορτίσεων. Συνήθως, αυτή η απόσταση είναι το 30% της απόστασης μεταξύ ακροπτερυγίου και πύργου όταν στην διάταξη δεν εφαρμόζονται φορτίσεις.



Σχήμα 3.9 Κάμψη πτερυγίων κατά flapwise [*Wind Turbine Blade Structural Engineering, WE Handbook, © Gurit*]

Είναι σωστό να υποθέσει κανείς πως μία απλή λύση αυτού του προβλήματος είναι η αύξηση της απόστασης του ακροπτερυγίου από τον πύργο (tip clearance), τοποθετώντας τον δρομέα σε ακόμη μεγαλύτερη απόσταση από τον πύργο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους, όπως με κλίση της νασέλας (tilt), με προένταση των πτερυγίων (preconing) ή με χρήση πτερυγίων με κάμψη εξαρχής (prebend) (Σχήμα 3.10). Όλες αυτές οι τεχνικές, πράγματι, εφαρμόζονται. Όλες, όμως, εφαρμόζονται μέχρι ένα επιτρεπτό όριο και φυσικά όχι χωρίς κόστος η κάθε μία. Αυτό το κόστος μπορεί να μεταφράζεται είτε ως αεροδυναμικές απώλειες, είτε ως αυξημένο κατασκευαστικό κόστος - για παράδειγμα, μία Α/Γ με μεγάλο tilt απαιτεί εδράσεις υψηλότερης αντοχής για τη στρέψη της νασέλας κατά την κατεύθυνση yaw.



Σχήμα 3.10 Μέθοδοι αύξησης της απόστασης των πτερυγίων από τον πύργο [*Wind Turbine Blade Structural Engineering, WE Handbook, © Gurit 2013*]

Ένα άλλο πρόβλημα που ενδέχεται να προκύψει λόγω μικρής δυσκαμψίας είναι ο πιθανός συγχρονισμός των ταλαντούμενων πτερυγίων, λόγω του γεγονότος ότι, εκτός των άλλων ταλαντώσεων, αυτά πάλλονται και εξ αιτίας της επίδρασης του αέρα που διέρχεται γύρω από τον πύργο. Έτσι, ο συντονισμός αυξάνει κατά πολύ την ένταση της ταλάντωσης, με συνέπεια να προκύπτουν μεγαλύτερες φορτίσεις άρα και μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας. Η αύξηση της δυσκαμψίας δεν είναι εύκολη υπόθεση, αν αναλογιστεί κανείς πως η προσθήκη υλικού, μέσω του οποίου θα επιτευχθεί αυτή η αύξηση, οδηγεί αναπόφευκτα σε αύξηση της μάζας.

Η δυσκαμψία μιας διατομής ως προς διεύθυνση x ορίζεται ως το γινόμενο της ροπής αδράνειας ως προς x I_x επί το μέτρο ελαστικότητας E . Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από το υλικό και όχι από τη γεωμετρία της διατομής. Τυπικές τιμές αυτού του μεγέθους για ορισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την κατασκευή πτερυγίων είναι: $(25-40) \cdot 10^9 Pa$.

3.1.5 Κατανομή μάζας

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του πτερυγίου, το οποίο είναι καθοριστικό σε ότι αφορά την αεροδυναμική συμπεριφορά του αλλά και το κόστος της ανεμογεννήτριας, είναι η κατανομή

μάζας. Έχει, άλλωστε, ήδη αναφερθεί πως η μάζα συνεισφέρει στα καμπτικά φορτία κατά την περιστροφή (edgewise). Ως εκ τούτου, η τιμή αυτού του μεγέθους παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στη διαδικασία σχεδιασμού των πτερυγίων.

3.1.6 Συντελεστές ασφαλείας

Όπως και σε άλλες εφαρμογές, έτσι και κατά τον σχεδιασμό της δομής ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται συντελεστές ασφαλείας για να ληφθεί υπόψη ο αστάθμιτος παράγοντας: ανακρίβεια στους υπολογισμούς κατά τα στάδια ανάλυσης, μεταβολή της γεωμετρίας, διαφορετική συμπεριφορά των υλικών και άλλα. Τέτοια φαινόμενα είναι όχι απλώς συνήθη, αλλά αναπόφευκτα στις εφαρμογές αιολικής ενέργειας. Γενικότερα, ένας συντελεστής ασφαλείας χρησιμοποιείται για να αυξήσει τις υπολογιζόμενες φορτίσεις κατά την ανάλυση που περιγράφεται στην Παράγραφο 3.1.1 ή για να μειώσει τα μέγιστα φορτία που οι σχεδιαστές επιβάλλουν. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η πιθανότητα αστοχίας.

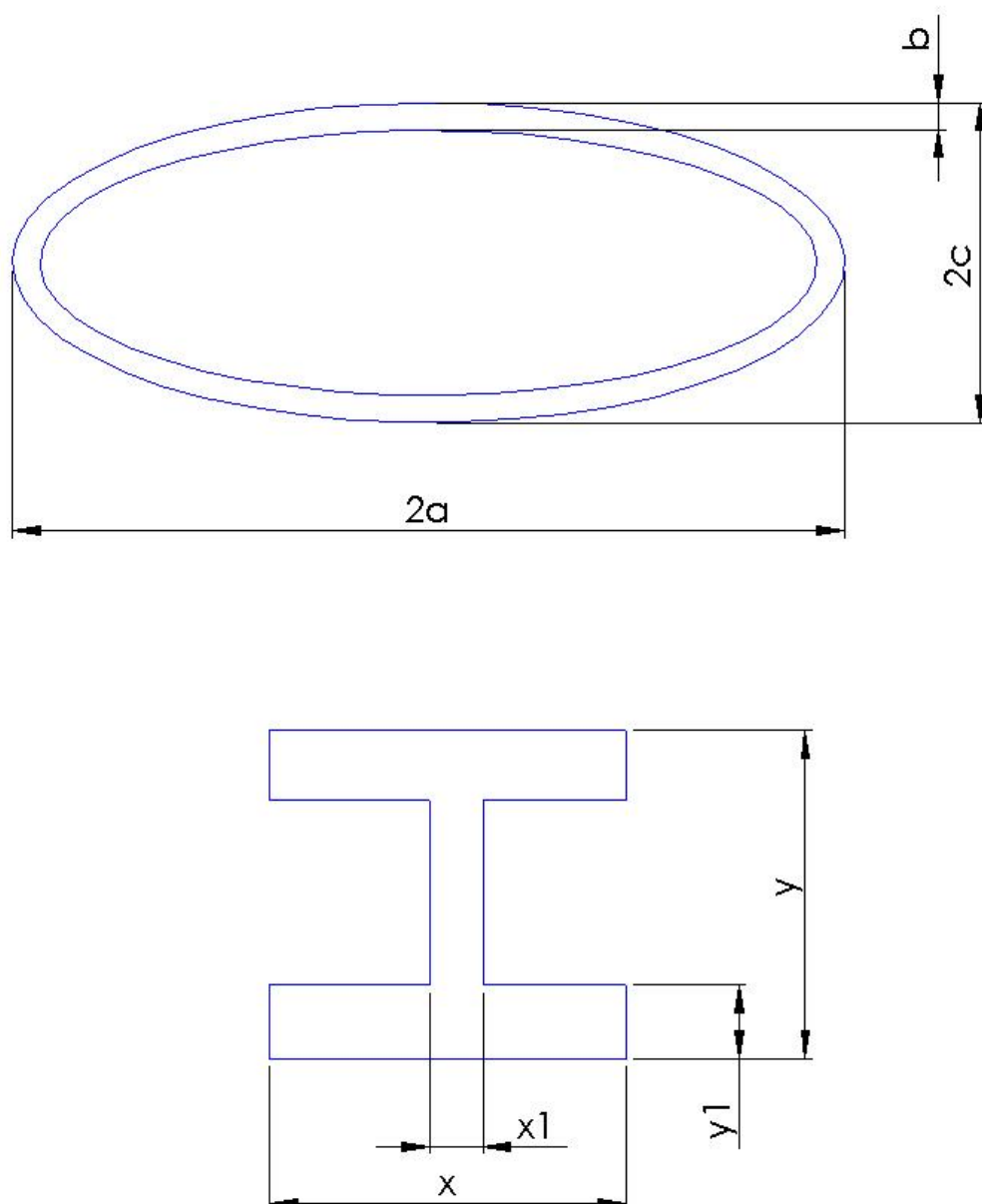
Τα πακέτα σχεδίασης (design codes) χρησιμοποιούν μία περισσότερο ακριβή μέθοδο, αυτή των «επι μέρους» συντελεστών ασφαλείας [4]. Με βάση αυτή τη μέθοδο, ο συνολικός συντελεστής προκύπτει ως το γινόμενο των «επι μέρους» συντελεστών. Ο καθένας προορίζεται για συγκεκριμένο φαινόμενο, όπως για παράδειγμα για την αβεβαιότητα των φορτίσεων, για τη γήρανση των υλικών, για τις κατασκευαστικές μεταβολές και άλλα. Έτσι, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με την ακρίβεια που θα προέκυπτε με χρήση ενός ολικού συντελεστή. Επίσης, ενδέχεται να επηρεάζεται και ένας άλλος συντελεστής ασφαλείας που σχετίζεται με τη συνέπεια της αστοχίας της κάθε συνιστώσας της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, εάν η ομαλή λειτουργία μιας συνιστώσας είναι βασικό προαπαιτούμενο για την συνολική διάταξη, τότε η τιμή αυτού του συντελεστή θα είναι υψηλότερη από τις άλλες, προκειμένου να εξασφαλιστεί η μείωση της πιθανότητας αστοχίας της και συνεπώς αστοχίας ολόκληρης της διάταξης.

3.2 Προσέγγιση της δομής του πτερυγίου αναφοράς

Στη συγκεκριμένη παράγραφο περιγράφεται λεπτομερώς ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται η εσωτερική δομή του πτερυγίου αναφοράς. Αρχικά, σχεδιάζεται το μοντέλο το οποίο θεωρείται πως μπορεί να αποδόσει με μεγάλη ακρίβεια την πραγματική μορφή του. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στη μέθοδο που ακολουθείται προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο στόχος και τέλος παρατίθενται τα σχετικά αποτελέσματα.

3.2.1 Μοντελοποίηση της δομής και υπολογισμός μάζας και δυσκαμψίας

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, η δομή που εξετάζεται είναι αυτή που προσομοιάζεται από το I-beam. Προκειμένου το αποτέλεσμα που θα προκύψει να προσεγγίζει όσο το δυνατόν ακριβέστερα την πραγματικότητα, απαιτείται η προσαρμογή όχι μόνο του I-beam αλλά και του κελύφους του πτερυγίου. Για να επιτευχθεί αυτό γίνεται η παραδοχή πως το κέλυφος μπορεί να αναπαρασταθεί ικανοποιητικά από μία έλλειψη, στην οποία εγγράφεται το I-beam. Συνεπώς, η διατομή συνολικά θεωρείται ως συνδυασμός των δύο σχημάτων και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11 [ΠΑΝΩ] Το κέλυφος του πτερυγίου σε τομή αντιπροσωπεύεται από μία έλλειψη της οποίας το πάχος b αντιστοιχεί στο πάχος του κελύφους, [ΚΑΤΩ] Δομή I-beam – Τα spar caps έχουν πάχος y_1 , το shear web x_1 και η βάση έχει μήκος x

Με δεδομένη την παραπάνω μορφή, το συνολικό εμβαδό και οι ροπές αδράνειας του πτερυγίου ορίζονται ως εξής:

$$I_{flap} = I_{flap}^{I-beam} + I_{flap}^{ell}$$

$$= \left(\frac{x \cdot y^3}{12} - \frac{(x - x_1) \cdot (y - 2y_1)^3}{12} \right) + \left(\pi \cdot \frac{c^3 \cdot a}{4} - \pi \cdot \frac{(c - b)^3 \cdot (a - b)}{4} \right)$$

$$I_{edge} = I_{edge}^{I-beam} + I_{edge}^{ell}$$

$$= \left(\frac{y \cdot x^3}{12} - \frac{(y - 2y_1) \cdot (x - x_1)^3}{12} \right) + \left(\pi \cdot \frac{a^3 \cdot c}{4} - \pi \cdot \frac{(a - b)^3 \cdot (c - b)}{4} \right)$$

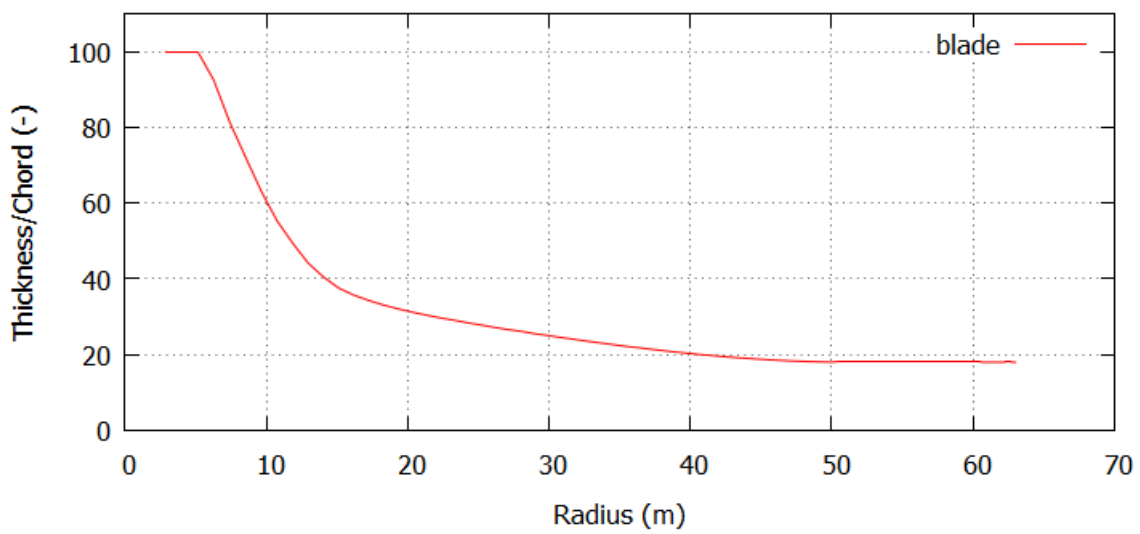
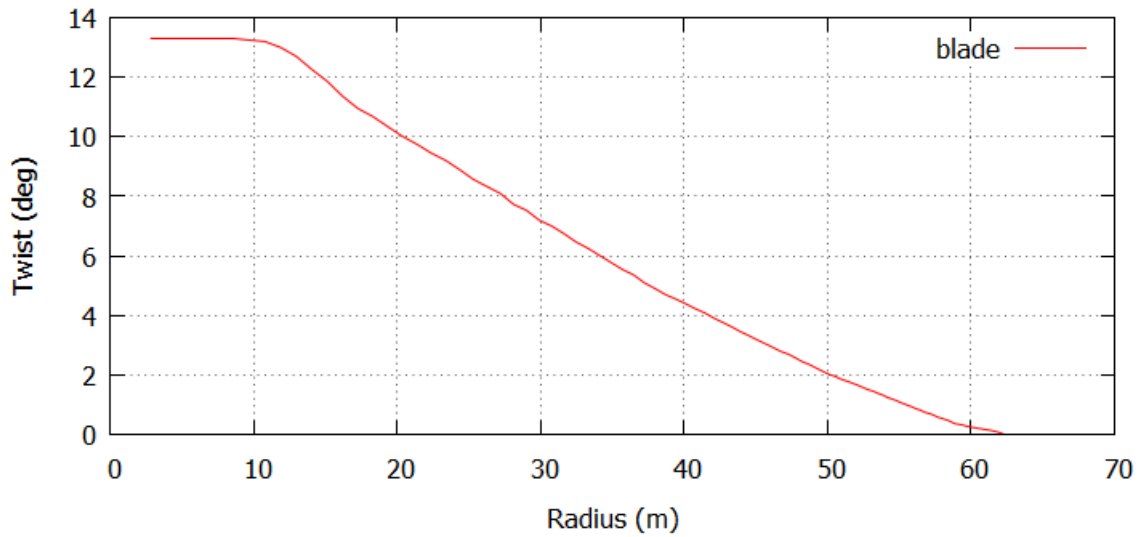
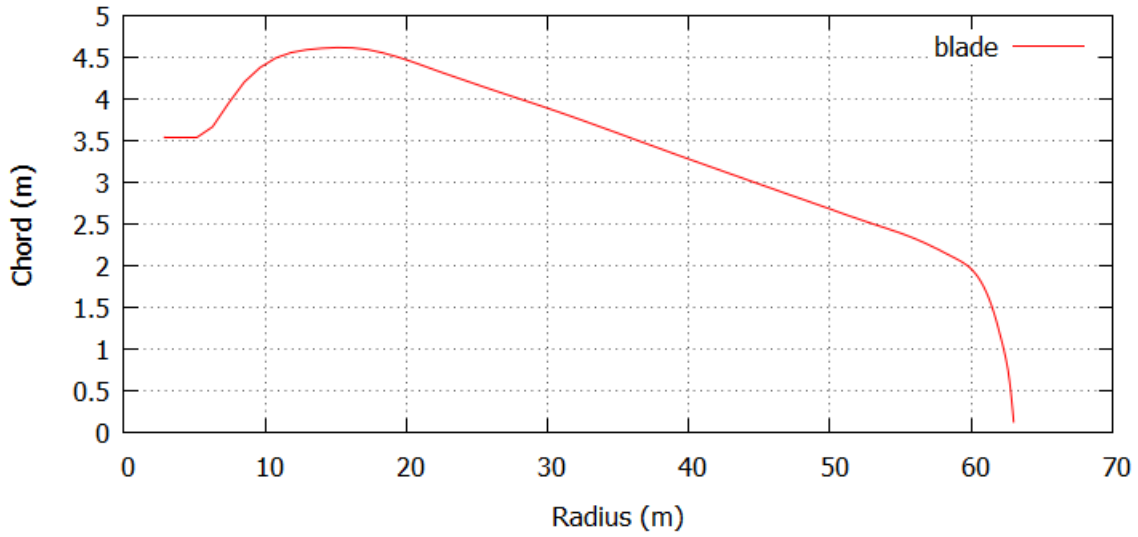
$$A = A^{I-beam} + A^{ell}$$

$$= \{x \cdot y - (x - x_1) \cdot (y - 2 \cdot y_1)\} + \{\pi \cdot c \cdot a - \pi \cdot (c - b) \cdot (a - b)\}$$

3.2.2 Διαδικασία προσαρμογής μέσω εξελικτικού αλγορίθμου

Στόχος αυτής της παραγράφου είναι η λεπτομερής περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται προκειμένου να δημιουργηθεί η μορφή της εσωτερικής δομής του πτερυγίου. Το συγκεκριμένο πτερύγιο χρησιμοποιείται στη συνέχεια της Διπλωματικής Εργασίας ως πτερύγιο αναφοράς, στο οποίο βασίζονται τα διάφορα σενάρια βελτιστοποίησης. Συνεπώς, δεδομένου ότι εκτός των άλλων και η μορφή του I-beam αποτελεί *μεταβλητή σχεδιασμού* (*design variable*) της διαδικασίας βελτιστοποίησης των Κεφαλαίων 4 και 5, απαιτείται η δημιουργία της δομής του πτερυγίου αναφοράς.

Όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί και συνεπώς όλη η διαδικασία βελτιστοποίησης σε αυτό το στάδιο βασίζονται σε δεδομένο πτερύγιο, του οποίου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (ακτίνα, κατανομή χορδής/πάχους/συστροφής), τα αεροδυναμικά (συντελεστής άνωσης/αντίστασης, τύπος αεροτομής και θέσεις της καθεμιάς) και τα δομικά (κατανομή μάζας, δυσκαμψίας) είναι γνωστά. Το πτερύγιο αυτό χρησιμοποιείται σε πολλές ερευνητικές εργασίες και έχει την ονομασία *NREL 5MW* (Διάγραμμα 3.1). Γνωρίζοντας, λοιπόν, την κατανομή μάζας m , δυσκαμψίας κατά την πτερύγιση (flapwise) EI_{flap} και δυσκαμψίας κατά την περιστροφή (edgewise) EI_{edge} , ζητούμενο είναι η εύρεση εκείνης της εσωτερικής δομής του πτερυγίου με βάση την οποία θα προσεγγίζονται αυτές οι τρεις καμπύλες ($m - R$, $EI_{flap} - R$, $EI_{edge} - R$) κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο.



Διάγραμμα 3.1 [ΠΑΝΩ] Κατανομή χορδής του πτερυγίου *NREL 5MW*, [ΚΕΝΤΡΟ] Αντίστοιχη κατανομή συστρώσης, [ΚΑΤΩ] Αντίστοιχη κατανομή σχετικού πάχους

Για να μπορέσουν να ταυτιστούν οι τρεις καμπύλες και να δημιουργηθεί η ζητούμενη εσωτερική δομή χρησιμοποιούνται 36 μεταβλητές σχεδιασμού, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3. Τα δεδομένα σημεία ακτίνας στα οποία αντιστοιχεί η εκάστοτε μεταβλητή σχεδιασμού είναι σταθερά και για τις τρεις ομάδες μεταβλητών. Επίσης σημειώνεται πως αυτές οι τιμές είναι διανεμημένες στο αεροδυναμικό τμήμα του πτερυγίου και όχι στο τμήμα όπου το πτερύγιο έχει μορφή κυλίνδρου, άρα από το Διάγραμμα 3.1 φαίνεται πως το αεροδυναμικό τμήμα του πτερυγίου ξεκινά από τα 11m. Παράλληλα, γίνεται η παραδοχή πως, με βάση το Σχήμα 3.11, η διάσταση 2α του κυλίνδρου αντιστοιχεί στην εκάστοτε χορδή, ενώ η διάσταση $y = 2c$ αντιστοιχεί στο 80% του πάχους της αεροτομής.

| | <i>Design Variable 1</i> | <i>Design Variable 2</i> | <i>Design Variable 3</i> | <i>Design Variable 4</i> |
|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| r_1 | $x_1/2\alpha_1$ | $y_{1-1}/2\alpha_1$ | $b_1/2\alpha_1$ | $x_{1-1}/2\alpha_1$ |
| r_2 | $x_2/2\alpha_2$ | $y_{1-2}/2\alpha_2$ | $b_2/2\alpha_2$ | $x_{1-2}/2\alpha_2$ |
| r_3 | $x_3/2\alpha_3$ | $y_{1-3}/2\alpha_3$ | $b_3/2\alpha_3$ | $x_{1-3}/2\alpha_3$ |
| r_4 | $x_4/2\alpha_4$ | $y_{1-4}/2\alpha_4$ | $b_4/2\alpha_4$ | $x_{1-4}/2\alpha_4$ |
| r_5 | $x_5/2\alpha_5$ | $y_{1-5}/2\alpha_5$ | $b_5/2\alpha_5$ | $x_{1-5}/2\alpha_5$ |
| r_6 | $x_6/2\alpha_6$ | $y_{1-6}/2\alpha_6$ | $b_6/2\alpha_6$ | $x_{1-6}/2\alpha_6$ |
| r_7 | $x_7/2\alpha_7$ | $y_{1-7}/2\alpha_7$ | $b_7/2\alpha_7$ | $x_{1-7}/2\alpha_7$ |
| r_8 | $x_8/2\alpha_8$ | $y_{1-8}/2\alpha_8$ | $b_8/2\alpha_8$ | $x_{1-8}/2\alpha_8$ |
| r_9 | $x_9/2\alpha_9$ | $y_{1-9}/2\alpha_9$ | $b_9/2\alpha_9$ | $x_{1-9}/2\alpha_9$ |

Πίνακας 3.3 Μεταβλητές σχεδιασμού κατά τη διαδικασία προσέγγισης της εσωτερικής δομής του πτερυγίου NREL 5MW

Παρ' όλα αυτά, η βέλτιστη σύγκλιση των καμπυλών απαιτεί μεγαλύτερη ακρίβεια, συνεπώς γίνεται χρήση υπορουτίνας (SUBROUTINE BSPLINES), η οποία πραγματοποιεί προσέγγιση με καμπύλες B-Splines. Οι B-Splines εφαρμόζονται και στις τέσσερις ομάδες μεταβλητών σχεδίασης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ικανοποιητικότερη προσέγγιση των κατανομών. Πιο συγκεκριμένα, οι B-Splines που εφαρμόζονται είναι 8^{ου} βαθμού και χρησιμοποιούν 9 σημεία ελέγχου (control points). Τα μεγέθη που καθορίζουν τη συνάρτηση κόστους, η οποία θα αναλυθεί στη συνέχεια, υπολογίζονται με βάση τις εξισώσεις της Παραγράφου 3.2.1.

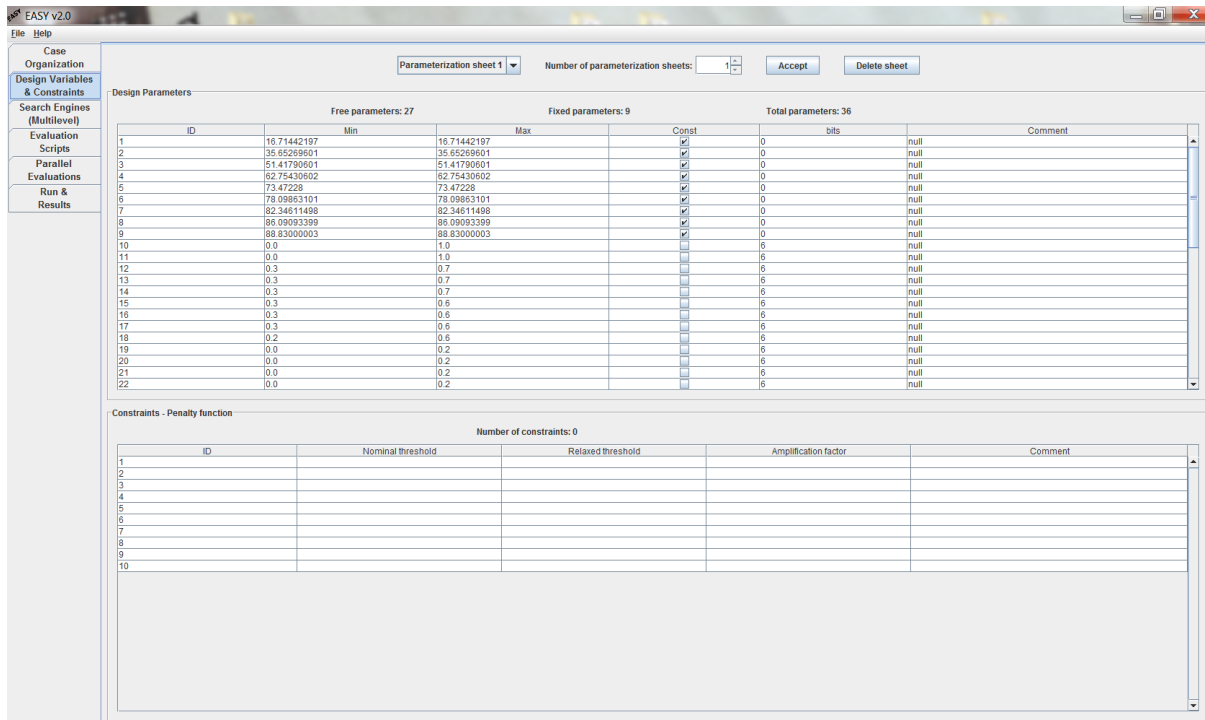
Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τη σύγκριση των τιμών των μεγεθών που προκύπτουν με τα αντίστοιχα μεγέθη του πτερυγίου *NREL 5MW* σε κάθε θέση. Η ζητούμενη ταύτιση των κατανομών μεταφράζεται ως ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτών των μεγεθών σε κάθε θέση κατά μήκος, οπότε είναι προφανές πως αυτό το άθροισμα αποτελεί τη *συνάρτηση κόστους* της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Για να αποφευχθεί τυχόν τμηματική σύγκλιση, δηλαδή η σύγκλιση σε ορισμένα σημεία να είναι ικανοποιητική και σε άλλα όχι, χρησιμοποιείται ο λογάριθμος των τιμών. Η προς ελαχιστοποίηση *συνάρτηση κόστους* υπολογίζεται από τον εξελικτικό αλγόριθμο συνεχώς μέχρις ότου η τιμή της ελαχιστοποιηθεί. Η συγκεκριμένη συνάρτηση έχει την εξής μορφή:

$$\sum_{i=1}^n \{ \log(m_i)_{NREL\ 5MW} - \log(m_i) \}^2$$

$$+ \sum_{i=1}^n \{ \log(EI_{flap\ i})_{NREL\ 5MW} - \log(EI_{flap\ i}) \}^2$$

$$+ \sum_{i=1}^n \{ \log(EI_{edge\ i})_{NREL\ 5MW} - \log(EI_{edge\ i}) \}^2 = cost\ function$$

Το λογισμικό βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για τη συγκεκριμένη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι ο αλγόριθμος *EASY* (Σχήμα 3.12). Τέλος, σημειώνεται πως δε λαμβάνεται υπόψη κάποιος *περιορισμός (constraint)*.



Σχήμα 3.12 Πεδίο καθορισμού των μεταβλητών σχεδιασμού και των περιορισμών στον *EASY*

3.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

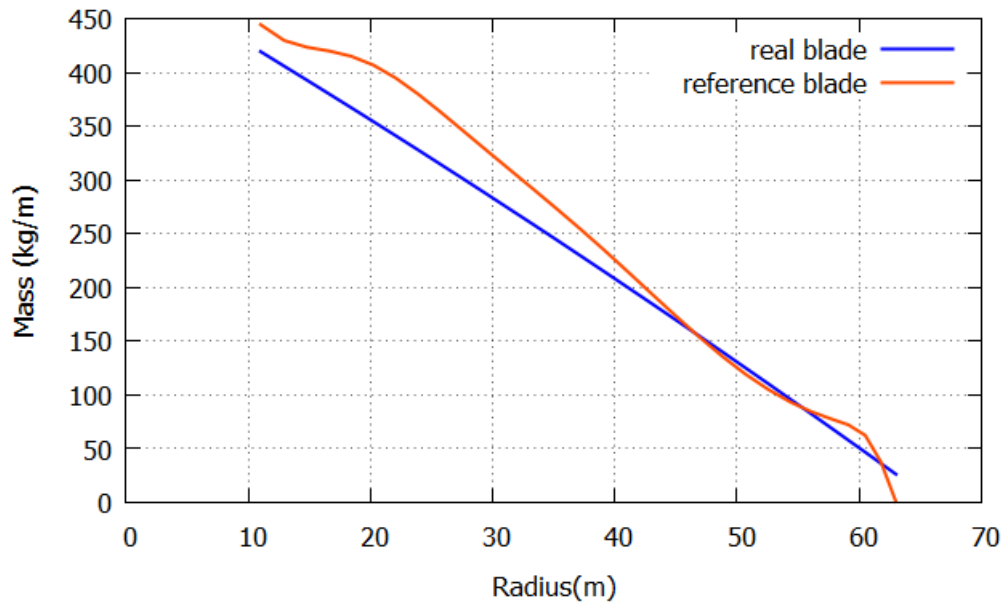
Προκειμένου να προκύψει το βέλτιστο αποτέλεσμα πραγματοποιούνται αρκετές δοκιμές με τις τιμές των παραμέτρων να παίρνουν τιμές από διαφορετικά εύρη η καθεμία. Στη συγκεκριμένη παράγραφο, όμως, παρουσιάζεται μόνο η καταλληλότερη δοκιμή, αφού γίνει πρώτα μία αναφορά σε ορισμένες δυσκολίες που προκύπτουν κατά τη διαδικασία.

Κατά τις πρώτες δοκιμές, το πάχος των τοιχωμάτων της δοκού διάτμησης (shear web) θεωρείται ίσο με αυτό το πάχος των δοκών-κάλυμα (spar caps). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μη μπορούν να προσεγγισθούν επαρκώς οι ζητούμενες κατανομές, λόγω του ότι οι συγκεκριμένες ομάδες μεταβλητών σχεδιασμού είναι αλληλοσυγκρουόμενα. Πιο συγκεκριμένα, οι διάφορες αυξομειώσεις του πάχους των τοιχωμάτων οδηγούν σε σύγκλιση των κατανομών δυσκαμψίας αλλά και σε ταυτόχρονη υπέρμετρη αύξηση της μάζας. Όμοια, σε περίπτωση που προσεγγιστεί ικανοποιητικά η κατανομή μάζας παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις στις κατανομές δυσκαμψίας. Με βάση το συγκεκριμένο γεγονός, προκύπτει το συμπέρασμα πως η επίλυση του δεδομένου προβλήματος με τις υπάρχουσες μεταβλητές, δηλαδή τους υπάρχοντες βαθμούς ελευθερίας, είναι αδύνατη.

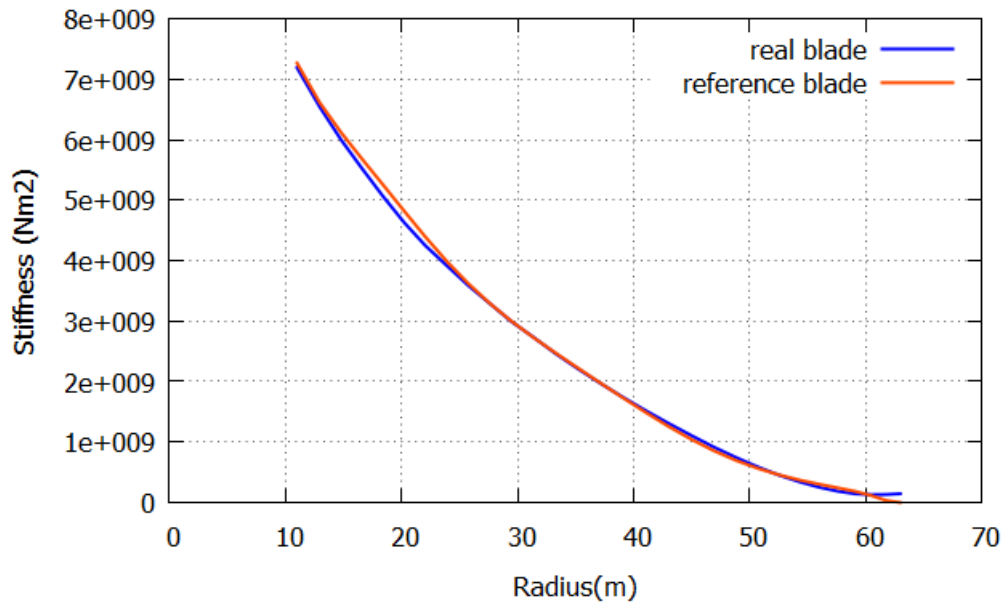
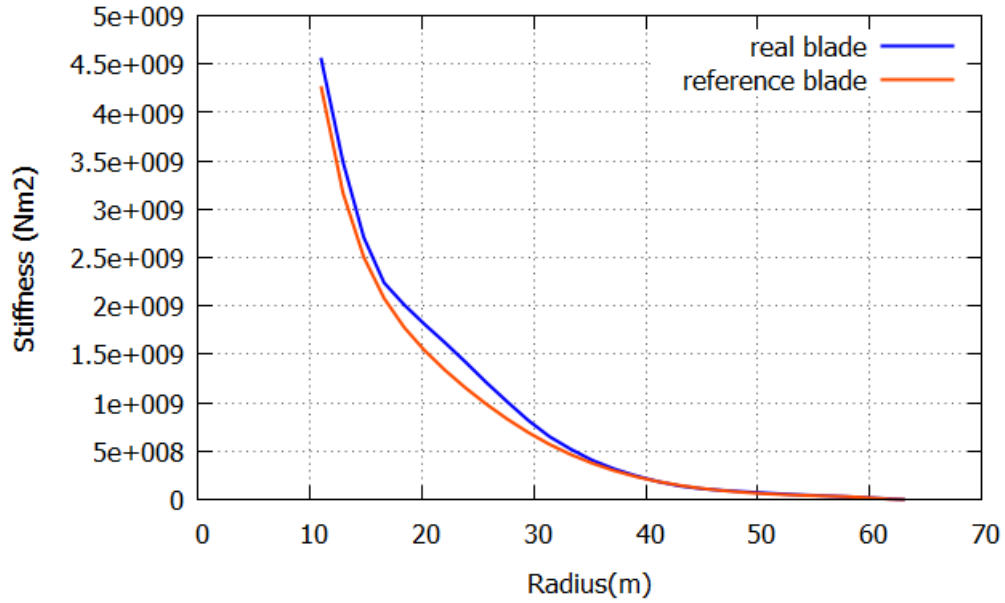
Η λύση επέρχεται με την προσθήκη ακόμα ενός βαθμού ελευθερίας στο πρόβλημα, δηλαδή του πάχους της δοκού διάτμησης (shear web) ως ανεξάρτητη μεταβλητή και όχι ίσο με το πάχος των δοκών-κάλυμα (spar caps). Έτσι στο πρόβλημα επεισέρχεται και η x_1 . Με αυτό τον τρόπο, η σύγκλιση επιτυγχάνεται ικανοποιητικά στις κατανομές και των τριών μεγεθών, m , EI_{flap} , EI_{edge} . Τέλος, είναι απαραίτητο να σημειωθεί πως όλα τα αποτελέσματα προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη έναν μέσο όρο των χαρακτηριστικών τιμών πυκνότητας υλικού και μέτρου ελαστικότητας. Παράλληλα, τα συγκεκριμένα μεγέθη έχουν σταθερές τιμές κατά μήκος του πτερυγίου, αλλά και ανά τμήμα της εσωτερικής δομής (δηλαδή δοκός διάτμησης, δοκός-κάλυμα και κέλυφος έχουν το ίδιο υλικό). Σημειώνεται, ακόμα, πως οι παρακάτω τιμές αυτών των μεγεθών χρησιμοποιούνται και στα Κεφάλαια 4 και 5, τα οποία περιλαμβάνουν τα περιπτώσεις βελτιστοποίησης. Οι τιμές είναι οι εξής:

- $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$
- $E = 30 \cdot 10^9 \text{ Pa}$

Η τελική σύγκλιση παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.2 και στο Διάγραμμα 3.3.

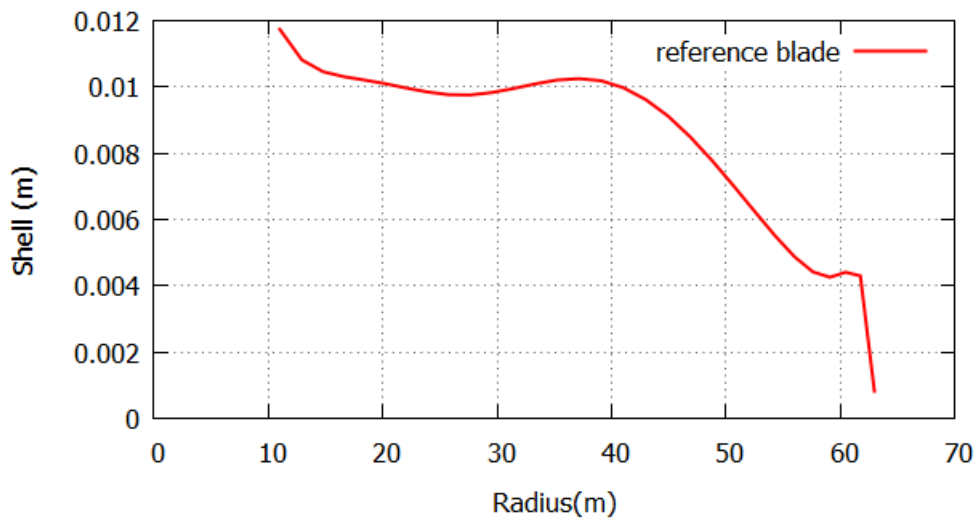
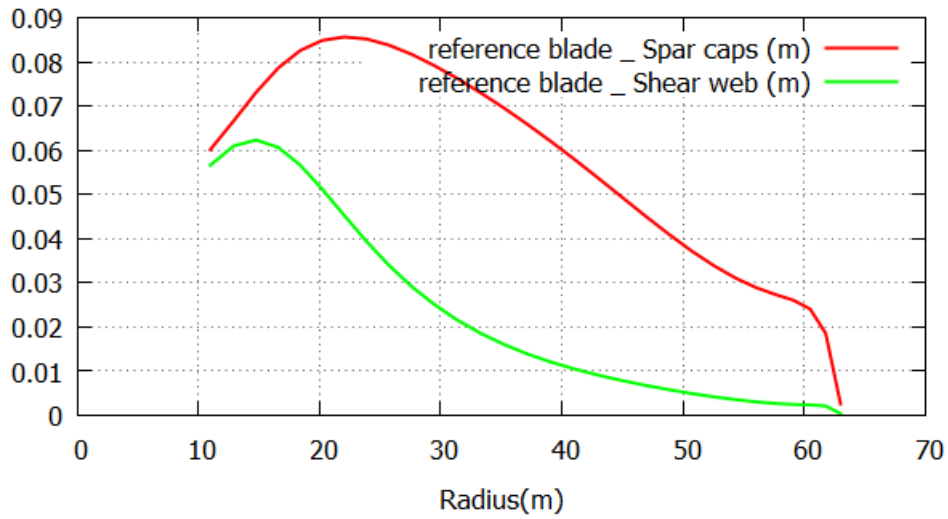
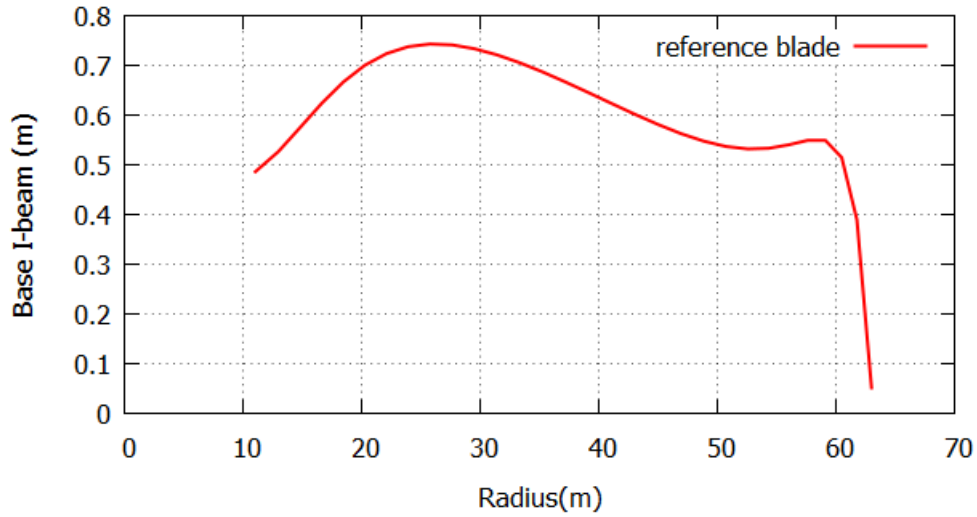


Διάγραμμα 3.2. Κατανομή μάζας m του πραγματικού πτερυγίου, το οποίο γίνεται προσπάθεια να προσεγγισθεί (real blade – *NREL 5MW*) και του πτερυγίου που χρησιμοποιείται σε επόμενα κεφάλαια ως πτερύγιο αναφοράς (reference blade)



Διάγραμμα 3.3. [ΠΑΝΩ] Κατανομή δυσκαμψίας κατά flapwise EI_{flap} του πραγματικού πτερυγίου (real blade - *NREL 5MW*) και του πτερυγίου που χρησιμοποιείται σε επόμενα κεφάλαια ως πτερύγιο αναφοράς (reference blade), [ΚΑΤΩ] Αντίστοιχη κατανομή για δυσκαμψία κατά edgewise EI_{edge}

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, ο τελικός στόχος της παραπάνω προσέγγισης είναι η δημιουργία των κατανομών εκείνων των μεγεθών, x, x_1, y_1, b που επιτρέπουν την δημιουργία ενός κατάλληλου I-beam, το οποίο αντιπροσωπεύει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το I-beam του πτερυγίου *NREL 5MW*. Με βάση τα αποτελέσματα της διαδικασίας προκύπτουν το Διάγραμμα 3.4.



Διάγραμμα 3.4 [ΠΑΝΩ] Μήκος της βάσης του I-beam του πτερυγίου αναφοράς συναρτήσει της ακτίνας του πτερυγίου, [ΚΕΝΤΡΟ] Αντίστοιχες κατανομές του πάχους των spar caps και του shear web, [ΚΑΤΩ] Αντίστοιχη κατανομή πάχους του κελύφους

Βελτιστοποίηση Πτερυγίου Αναφοράς

4.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός μιας ανεμογεννήτριας έχει ως στόχο την επίτευξη της μέγιστης παραγόμενης ενέργειας. Από τεχνικής άποψης, αυτό εξαρτάται από τη μορφή του πτερυγίου. Αλλαγές στη μορφή του, δηλαδή στη γεωμετρία του, επηρεάζουν μεν την ευστάθεια και τη δυσκαμψία του, αλλά επηρεάζουν ταυτόχρονα και την αεροδυναμική απόδοση της ανεμογεννήτριας. Ο επανακαθορισμός των “σύνθετων” υλικών, με τα οποία κατασκευάζεται ένα πτερύγιο, είναι μία άλλη μέθοδος ρύθμισης των δυναμικών και μηχανικών παραμέτρων. Η εύρεση της βέλτιστης μορφής ενός πτερυγίου, όπως και των κατάλληλων υλικών, είναι μία δύσκολη διαδικασία, καθώς η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος είναι σύνθετη και σε αυτή επηρεάζονται πολλαπλοί στόχοι (*objectives*) και ταυτόχρονα περιορισμοί (*constraints*).

Το Κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει τις διάφορες περιπτώσεις βελτιστοποίησης πτερυγίων 5MW. Η κάθε τέτοια περίπτωση καθορίζεται από διάφορες παραμέτρους, οι οποίες περιγράφονται στην αντίστοιχη ενότητα της κάθε περίπτωσης.

Το σύνολο των υπολογισμών και της γενικότερης διαδικασίας βελτιστοποίησης πραγματοποιείται από τον συνδυασμό δύο υπολογιστικών εργαλείων. Το πρώτο από αυτά αποτελεί ο κώδικας *RAFT (Rotor Analysis Fast Tool)* [5]. Ο συγκεκριμένος κώδικας είναι ένα πρότυπο αεροδυναμικής ανάλυσης, ο οποίος αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Αεροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών) και βασίζεται στη Θεωρία Στοιχείων Πτερύγωσης (*Blade Element Momentum theory*). Προκειμένου να συμπεριληφθεί και η δομική ανάλυση του πτερυγίου, απαιτούνται ορισμένες προσθήκες και τροποποιήσεις, οι οποίες περιγράφονται στην Παράγραφο 4.3. Το δεύτερο εργαλείο αποτελεί ο εξελικτικός αλγόριθμος *EASY*, ο οποίος έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 1.

4.2 Αεροδυναμική βελτιστοποίηση πτερυγίου *NREL 5MW*

4.2.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Στα πλαίσια αυτής της ενότητας πραγματοποιείται μία διαδικασία βελτιστοποίησης σε ένα δεδομένο πτερύγιο ανεμογεννήτριας (*NREL 5MW*), το οποίο αποτελεί το πτερύγιο αναφοράς. Η σκοπιά στην οποία είναι βασισμένη η συγκεκριμένη ανάλυση είναι αποκλειστικά αεροδυναμική και δεν περιλαμβάνει τη δομική ανάλυση, η οποία σε άλλη περίπτωση θα ήταν αναγκαία. Για το λόγο αυτό, δε λαμβάνεται υπόψη κανένας περιορισμός, ενώ συνάρτηση κόστους της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση του συντελεστή ισχύος C_p . Όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων από $V \approx 6.5 \text{ m/s}$ έως $V \approx 20.0 \text{ m/s}$. Δεδομένου ότι το πτερύγιο αναφοράς έχει ακτίνα $R_{tip} = 63\text{m}$, η οποία δεν αποτελεί μεταβλητή σχεδιασμού όπως και η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ($\Omega = 1.267\text{rad/s}$), οι παραπάνω ταχύτητες ανέμου αντιστοιχούν σε tip speed ratio από $\lambda = 4$ έως $\lambda = 12$. Ο στόχος της συγκεκριμένης βελτιστοποίησης είναι η πιστοποίηση του κώδικα, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν με ορισμένα αντίστοιχα από μία Διδακτορική Διατριβή [6].

Η αεροδυναμική βελτιστοποίηση πραγματοποιείται βάσει 3 διαφορετικών σεναρίων. Αυτό που αλλάζει σε κάθε ένα από αυτά είναι ο λόγος του συντελεστή άνωσης προς τον συντελεστή αντίστασης C_l/C_d καθε μίας από τις αεροτομές που συνθέτουν το πτερύγιο. Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει το προφίλ του πτερυγίου αναφοράς απaráλαχτο ως προς τις θέσεις και τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των αεροτομών (Σχήμα 4.1). Στο δεύτερο σενάριο υιοθετείται ο σταθερός λόγος $C_l/C_d=100$ κατα μήκος του πτερυγίου, ενώ στο τρίτο γίνεται η υπόθεση πως η αντίσταση είναι ίση με 0, δηλαδή $C_d=0$, ενώ παράλληλα διατηρούνται οι τιμές του συντελεστή άνωσης ανά γωνία πρόσπτωσης, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη και στο πρώτο σενάριο.

| 19 | ! NSPANB |
|--------|------------|
| r | profil |
| 0.000 | "cylinder" |
| 2.867 | "cylinder" |
| 5.600 | "cylinder" |
| 8.333 | "cylinder" |
| 11.750 | "du40_a17" |
| 15.850 | "du35_a17" |
| 19.950 | "du35_a17" |
| 24.050 | "du30_a17" |
| 28.150 | "du25_a17" |
| 32.250 | "du25_a17" |
| 36.350 | "du21_a17" |
| 40.450 | "du21_a17" |
| 44.550 | "na64_a17" |
| 48.650 | "na64_a17" |
| 52.750 | "na64_a17" |
| 56.167 | "na64_a17" |
| 58.900 | "na64_a17" |
| 61.633 | "na64_a17" |
| 63.001 | "na64_a17" |

Σχήμα 4.1 Προφίλ πτερυγίου αναφοράς (*NREL 5MW*) – Θέσεις κατά μήκος της ακτίνας όπου τοποθετούνται οι εκάστοτε αεροτομές

Ως μεταβλητές σχεδιασμού θεωρούνται οι κατανομές δύο γεωμετρικών μεγεθών του πτερυγίου, ως εξής:

| <i>Design variables</i> | Επεξήγηση |
|-------------------------|--------------------------------------|
| c/R_{tip} | Χορδή (αδιάστατη ως προς την ακτίνα) |
| tw | Συστροφή |

Πίνακας 4.1. Μεγέθη που θεωρούνται μεταβλητές σχεδιασμού κατά την αεροδυναμική βελτιστοποίηση χωρίς περιορισμούς

Τέλος, ο πίνακας που ακολουθεί συνοψίζει τα μεγέθη που παραμένουν σταθερά κατά τη συγκεκριμένη περίπτωση βελτιστοποίησης:

| Σταθερές | |
|-----------------------------|-------|
| R_{tip} (m) | 63 |
| Ω (rad/s) | 1.267 |
| ρ (kg/m ³) | 1.225 |

Πίνακας 4.2 Μεγέθη που θεωρούνται σταθερά κατά την αεροδυναμική βελτιστοποίηση χωρίς περιορισμούς

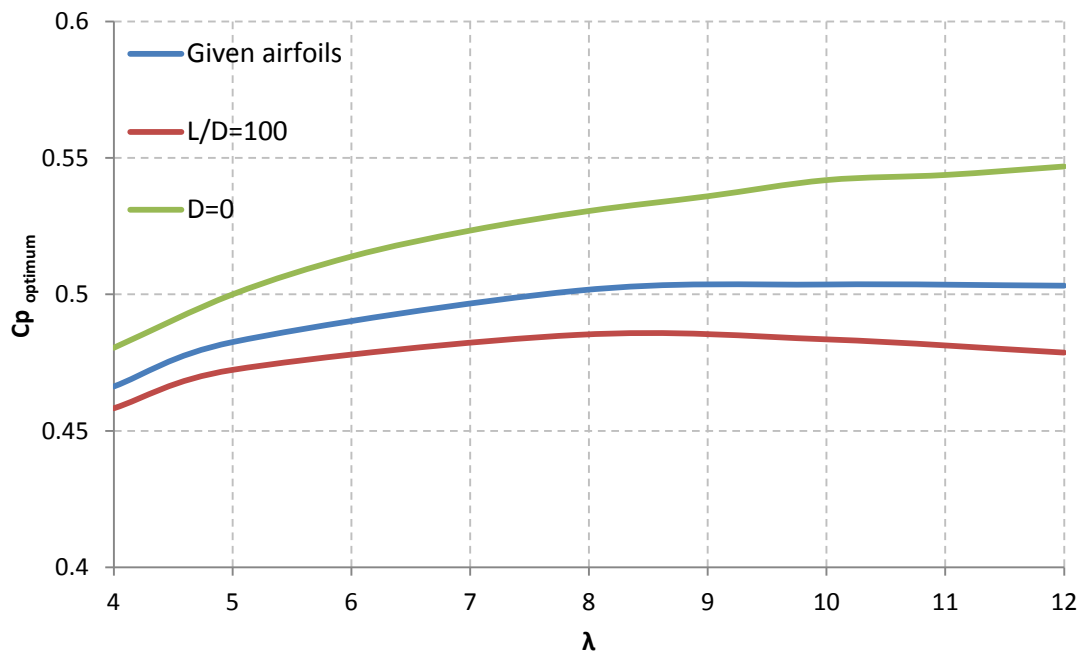
4.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Η παράγραφος των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει τις τελικές τιμές του συντελεστή ισχύος που προκύπτουν, καθώς και τα κυριότερα διαγράμματα τα οποία περιγράφουν την απαιτούμενη μορφή για τη δημιουργία ενός βέλτιστου πτερυγίου για διάφορα λ .

Ως σημείο αναφοράς χρησιμοποιείται στη συνέχεια μία Διδακτορική Διατριβή, της οποίας ένα τμήμα περιέχει την ανάλυση που πραγματοποιείται στα πλαίσια αυτής της παραγράφου της συγκεκριμένης Εργασίας [5]. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να εξακριβωθεί εάν οι καμπύλες ακολουθούν την ίδια ή όμοια τάση.

Τα πρώτα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σχετίζονται με τις βέλτιστες τιμές του C_p που προκύπτουν για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου ή λ (Διάγραμμα 4.1). Όπως γίνεται αναφορά και προηγουμένως, η διαδικασία πραγματοποιείται για 3 διαφορετικά σενάρια. Σημειώνεται, επίσης, πως δεδομένου ότι εφαρμόζεται η βελτιστοποίηση σε δεδομένο σημείο (single point

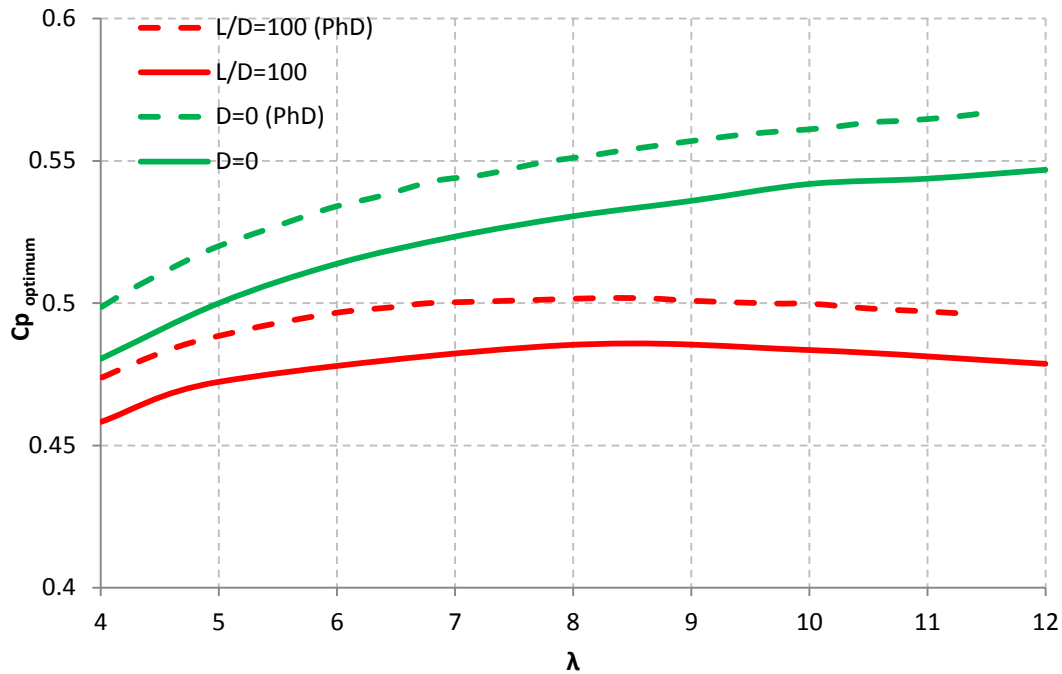
optimization), δηλαδή για διακριτές τιμές του λ , το αντίστοιχο διάγραμμα αντιπροσωπεύει πολλές μορφές πτερυγίων (μία για κάθε ταχύτητα ή κάθε λ), δηλαδή αντιπροσωπεύει το σχεδιασμό πολλών πτερυγίων. Τέλος, σε κάθε υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες ακροπτερυγίου (tip losses), σε αντίθεση με τις απώλειες στη ρίζα (hub losses) οι οποίες αμελούνται.



Διάγραμμα 4.1 Βέλτιστες τιμές του C_p συναρτήσει του tip speed ratio λ για τα 3 σενάρια: δεδομένες αεροτομές, $C_l/C_d=100$ και $C_d=0$

Όπως θα ανέμενε κανείς, στην ιδανική περίπτωση, όπου η αντίσταση θεωρείται μηδενική, ο συντελεστής ισχύος παίρνει τις μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Παρ' όλα αυτά, δεν πλησιάζει το όριο του *Betz*, δεδομένου ότι οι τιμές του συντελεστή άνωσης δεν είναι ελεύθερες προς επιλογή. Πιο συγκεκριμένα, οι αεροτομές είναι δεδομένες και είναι αυτές που συνθέτουν το προφίλ του *NREL 5MW* (π.χ. *du21_a17*, *du30_17*, *na64_a17*, κλπ.), με αποτέλεσμα η μοναδική ελευθερία που έχει ο κώδικας *RAFT* είναι η επιλογή εκείνης της γωνίας πρόσπτωσης (μέσω ρύθμισης της συστροφής), η οποία αντιστοιχεί στον μέγιστο συντελεστή άνωσης για κάθε αεροτομή. Οι τιμές, όμως, αυτών των συντελεστών είναι προκαθορισμένες. Άλλωστε, όπως και στην περίπτωση των δεδομένων αεροτομών, το προφίλ είναι καθορισμένο και δεν υπάρχει η δυνατότητα να τροποποιηθεί. Παράλληλα, είναι προφανές πως το πτερύγιο με τον σταθερό λόγο άνωσης προς αντίσταση έχει εμφανώς λιγότερο αποδοτική συμπεριφορά σε σχέση με την απόδοση που προκύπτει από τις δεδομένες αεροτομές. Αυτό το γεγονός δικαιολογείται στη συνέχεια αυτής της παραγράφου. Σημειώνεται, τέλος, πως η μέγιστη τιμή του C_p για το πτερύγιο αναφοράς παρατηρείται σε tip speed ratio $\lambda = 7.93$ και ισούται με $C_{p\max} = 0.49245$.

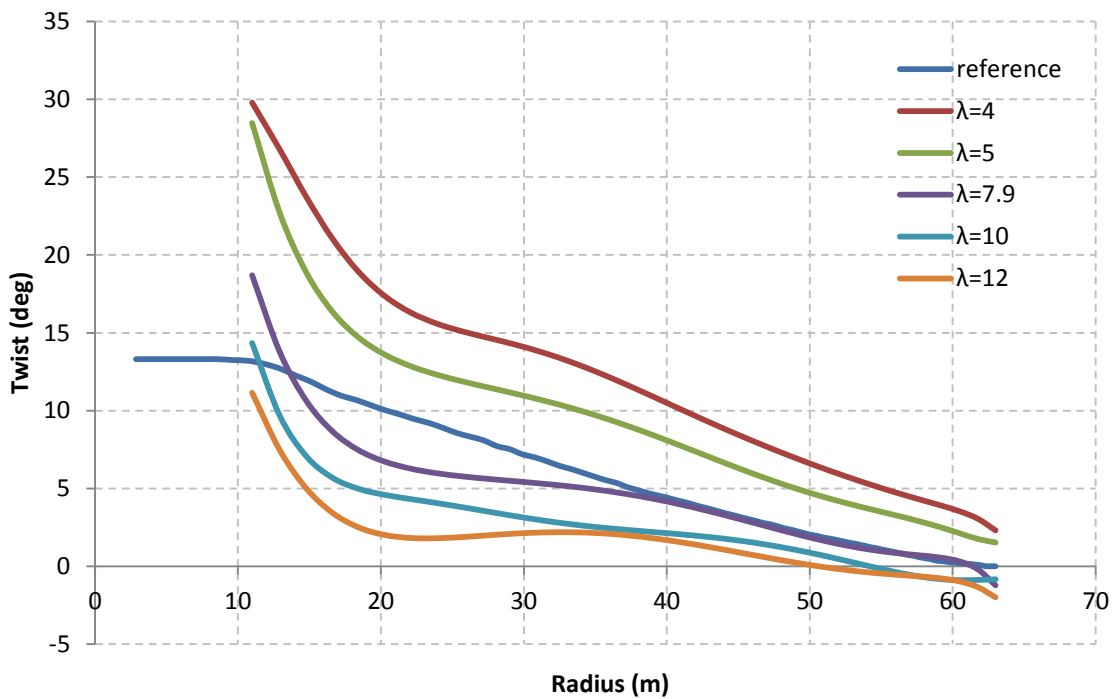
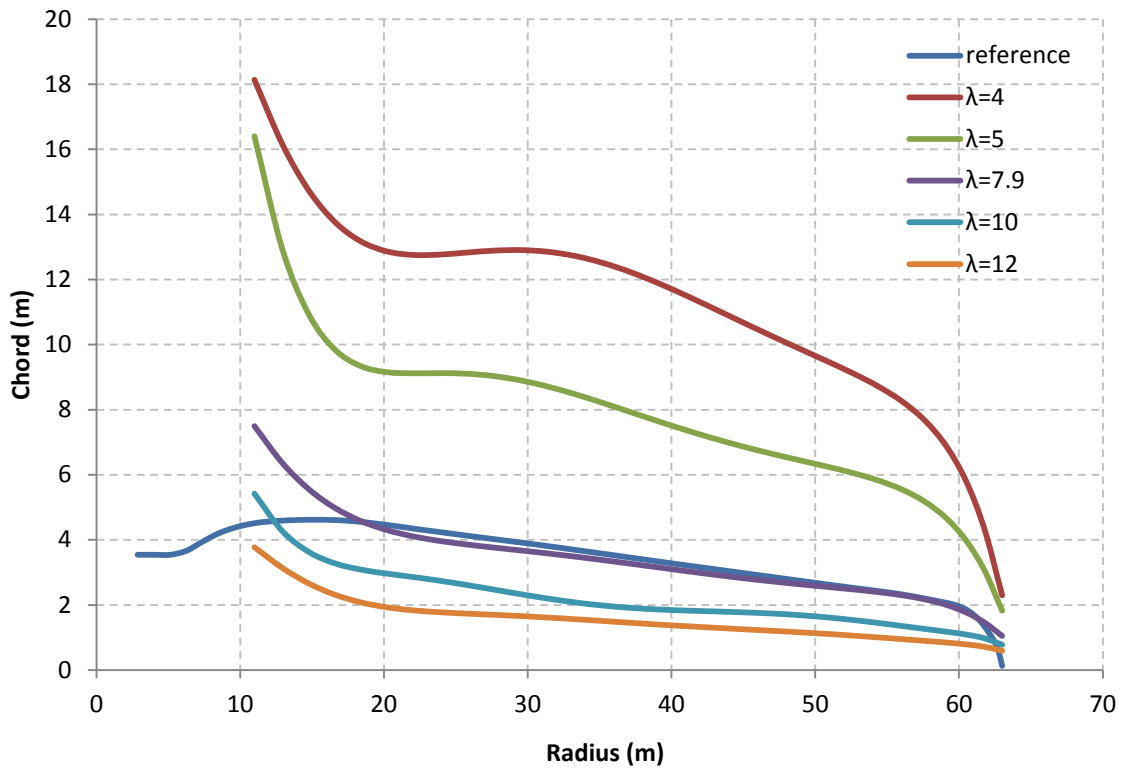
Σε αυτό το σημείο, έχει ενδιαφέρον να γίνει η σύγκριση της κάθε μίας καμπύλης με την αντίστοιχη που περιέχεται στη Διδακτορική Διατριβή [6]. Η συγκεκριμένη σύγκριση γίνεται στο Διάγραμμα 4.2.



Διάγραμμα 4.2 Βέλτιστες τιμές του C_p συναρτήσει του tip speed ratio για τα σενάρια: $C_l/C_d=100$ και $C_d=0$ – Σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν στη Διδακτορική Διατριβή [6]

Παρά το γεγονός πως δεν ταυτίζονται, είναι ξεκάθαρο πως οι καμπύλες έχουν την ίδια μορφή. Μάλιστα, οι καμπύλες της παρούσας Εργασίας φαίνεται πως είναι μετατοπισμένες προς τα κάτω τόσο για το ένα σενάριο ($C_l/C_d=100$), όσο και για το άλλο ($C_d=0$), όμως η συμπεριφορά τους είναι όμοια σε σχέση με τις αντίστοιχες της Διδακτορικής Διατριβής [6]. Για το λόγο αυτό, η απόκλιση των τιμών δεν αποτελεί σημείο ανησυχίας. Άλλωστε, αυτός ήταν και ο στόχος αυτού του ελέγχου. Στην επόμενη παράγραφο, όπου καταγράφονται τα συμπεράσματα, γίνεται αναφορά σε ορισμένους παράγοντες που οδηγούν σε αυτές τις αποκλίσεις.

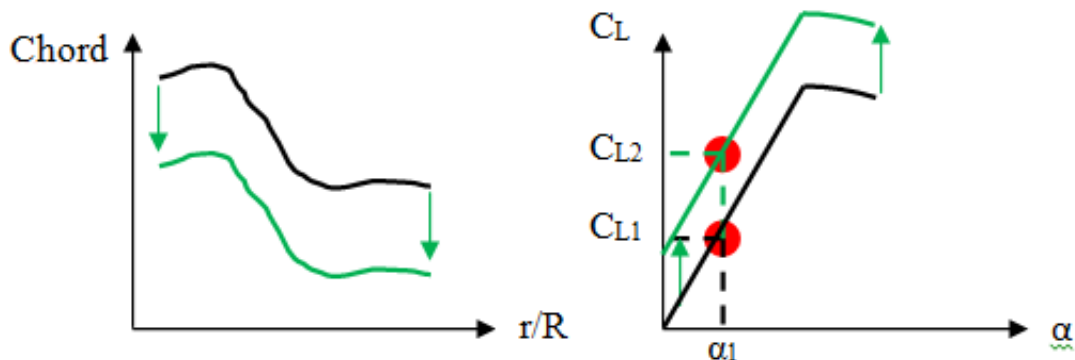
Όσον αφορά τις δεδομένες αεροτομές (given airfoils), ακολουθεί το Διάγραμμα 4.3 όπου παρουσιάζονται οι κατανομές της χορδής και της συστροφής, οι οποίες οδηγούν για διάφορες τιμές του tip speed ratio στις μέγιστες τιμές του C_p που παρατηρούνται στο Διάγραμμα 4.1. Ενδεχόμενες ακραίες τιμές αυτών επεξηγούνται πλήρως στην Παράγραφο 4.2.3.



Διάγραμμα 4.3 Οι κατανομές των μεταβλητών σχεδιασμού (χορδή και συστροφή) για μεγιστοποίηση του C_p για διαφορετικά tip speed ratio και για τη δεδομένη οικογένεια αεροτομών (given airfoils)

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές των μεταβλητές σχεδιασμού και για τα άλλα δύο σενάρια (Διάγραμμα 4.5). Είναι απαραίτητο να σημειωθεί πως δεδομένου ότι για τα

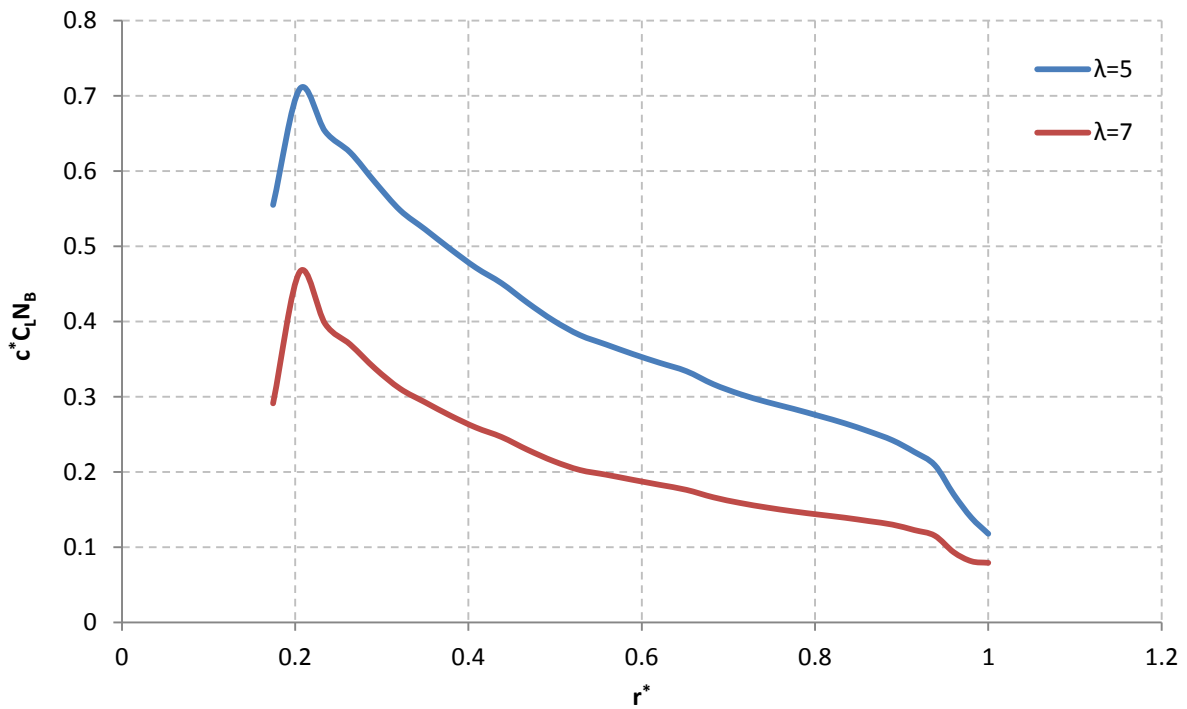
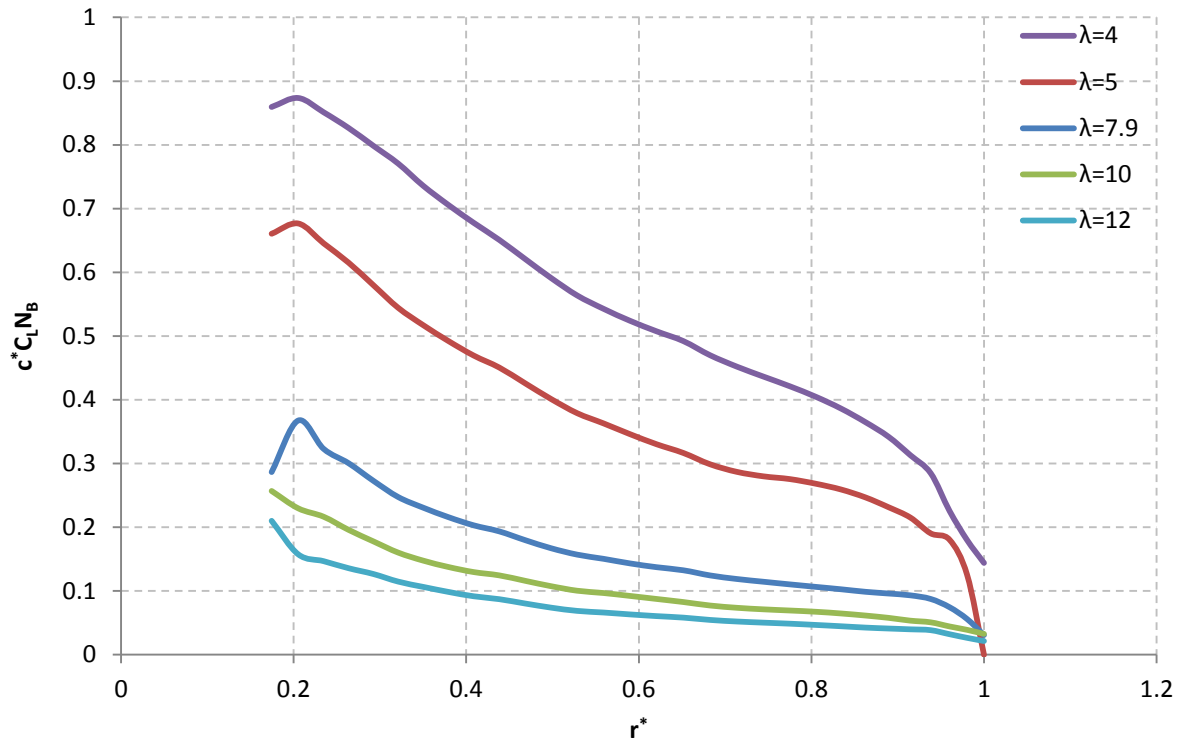
επόμενα δύο σενάρια δεν υπάρχουν προκαθορισμένες αεροτομές, δεν έχει νόημα η παρουσίαση της κατανομής της χορδής, αλλά του μεγέθους $c^*C_LN_B$, όπου c^* : αδιάστατη χορδή και N_B : αριθμός πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Με αυτό τον τρόπο, καταγράφεται το βέλτιστο γινόμενο, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλη προσαρμογή των δύο συνιστωσών c και C_L , αυτού του μεγέθους. Για παράδειγμα, μία ζητούμενη τιμή του γινομένου μπορεί να προκύψει με έναν δυνατό συνδυασμό τιμών των δύο μεγεθών (Διάγραμμα 4.4). Ένας αδύνατος συνδυασμός θα ήταν, για παράδειγμα, μία αρκετά χαμηλή τιμή της χορδής και μία εξαιρετικά υψηλή τιμή του συντελεστή άνωσης.



Διάγραμμα 4.4 Εύρεση κατάλληλου συνδυασμού των τιμών χορδής και συντελεστή άνωσης έτσι ώστε να επιτευχθεί η ζητούμενη του μεγέθους $c^*C_LN_B$ [Blade Optimization, Thomas Potentier - EUREC Master Student, 2013]

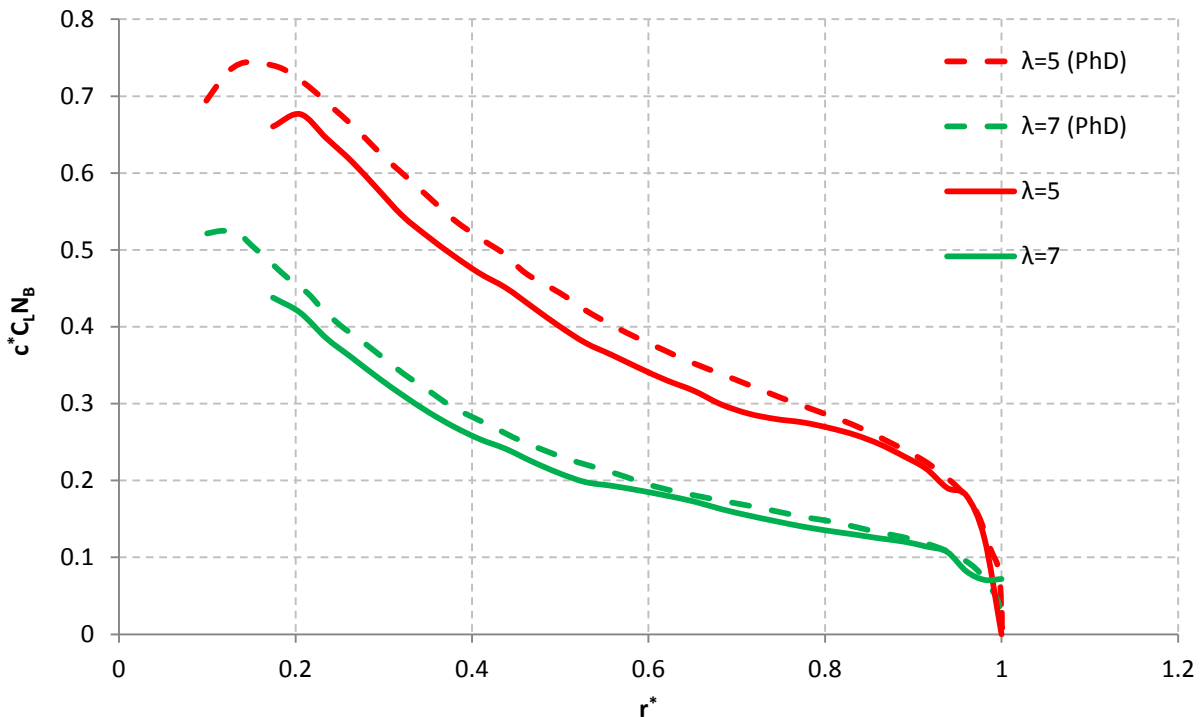
Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει πως η αναπαράσταση μόνο της χορδής δεν είναι ρεαλιστική. Πιο συγκεκριμένα, το λογισμικό EASY έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει μόνο τη χορδή προκειμένου να μεγιστοποιηθεί αυτό το γινόμενο. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι τιμές του C_L ανήκουν στην “οικογένεια” αεροτομών που παρουσιάζονται παραπάνω, συνεπώς δεν υπάρχει ελευθερία επιλογών σχετικά με αυτό το χαρακτηριστικό. Όσον αφορά το πρώτο σενάριο, θα ίσχυε το ίδιο σε περίπτωση που ζητούμενο ήταν να προσεγγισθούν οι βέλτιστες τιμές του C_p με διαφορετική “οικογένεια” αεροτομών και όχι με τις παραπάνω. Αυτός, άλλωστε, είναι και ο λόγος που προκύπτουν μεγάλες χορδές (οι συγκεκριμένοι συντελεστές άνωσης οδηγούν σε αυτές τις ακραίες τιμές των χορδών).

Έτσι, λοιπόν, η βελτιστοποίηση βάσει του 2^{ου} και του 3^{ου} σεναρίου έχει ενδεικτικά τα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.5.



Διάγραμμα 4.5 [ΠΑΝΩ] Κατανομή των βέλτιστων $c^*C_L N_B$ συναρτήσεϊ της αδιάστατης ακτίνας για $C_l/C_d=100$, [ΚΑΤΩ] Αντίστοιχη κατανομή συναρτήσεϊ της αδιάστατης ακτίνας για $C_d=0$

Η ομοιότητα μεταξύ των καμπυλών $c^*C_LN_B$ με τις αντίστοιχες της Διδακτορικής Διατριβής είναι προφανής, όπως φαίνεται παρακάτω (Διάγραμμα 4.6). Μάλιστα, σε σύγκριση με τις καμπύλες $C_p - \lambda$ του Διαγράμματος 4.2 οι λύσεις συγκλίνουν περισσότερο ικανοποιητικά. Τονίζεται για ακόμη μια φορά, όμως, πως δεν ταυτίζονται τα διαγράμματα μεταξύ τους. Προκειμένου να αποτυπωθεί αυτή η σύγκλιση, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κατανομές $c^*C_LN_B$ για δύο συγκεκριμένα tip speed ratio, $\lambda = 7$ και $\lambda = 5$ στο Διάγραμμα 4.6.



Διάγραμμα 4.6 Κατανομές $c^*C_LN_B$ για $\lambda = 5$ και $\lambda = 7$ για το σενάριο: $C_l/C_d=100$ – Σύγκριση με τις αντίστοιχες κατανομές της Διδακτορικής Διατριβής [6]

4.2.3 Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την αεροδυναμική βελτιστοποίηση του *NREL 5MW* χωρίς περιορισμούς, αυτό που είναι εμφανές είναι το γεγονός πως η καμπύλη $c^*C_LN_B$ μετατοπίζεται προς τα κάτω, καθώς οι τιμές των λ , ως παράμετροι, αυξάνονται. Αυτό, άλλωστε ήταν αναμενόμενο καθώς είναι γνωστό πως μικρότερες χορδές, με σταθερή ακτίνα και αριθμό πτερυγίων, οδηγούν σε μικρότερη στερεότητα (solidity) και μεγαλύτερα λ .

Μία τέτοια ανάλυση θα μπορούσε να αποτελέσει ένα πρώτο στάδιο σχεδίασης και κατασκευής ενός νέου, εξελιγμένου και όσο το δυνατόν βέλτιστου πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας.

Ανάλογα, λοιπόν, με την ενεργειακή κλάση για την οποία οι κατασκευαστές θα τη σχεδιάζαν, θα μπορούσε να υιοθετηθεί η αντίστοιχη κατανομή $c^*C_LN_B$. Με αυτό τον τρόπο θα εξασφαλιζόταν η βέλτιστη λειτουργία της ανεμογεννήτριας στο πεδίο ταχυτήτων όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη συχνότητα αέρα, σύμφωνα με την ενεργειακή κλάση. Για παράδειγμα, για μία μηχανή κλάσης I η κατάλληλη επιλογή θα ήταν οι κατανομές των μικρότερων λ , ενώ για μία μηχανή κλάσης III η επιλογή θα εστιαζόταν κυρίως στις καμπύλες των μεγαλύτερων, διατηρώντας τις τιμές όλων των άλλων παραμέτρων σταθερές.

Όσον αφορά το σενάριο με τις δεδομένες αεροτομές (*given airfoils*), είναι προφανές πως οι τιμές της χορδής για μικρά λ λαμβάνουν ακραίες τιμές. Αυτές οι καμπύλες, όπως είναι λογικό, δεν αντιπροσωπεύουν σε καμία περίπτωση την πραγματικότητα και δείχνουν πως προκειμένου να επιτευχθεί η τιμή του C_p που υπολογίζεται, απαιτείται να χρησιμοποιηθούν αεροτομές άλλες από αυτές που συμμετέχουν κατά την πραγματοποίηση αυτής της διαδικασίας. Οι αεροτομές που θα οδηγούσαν σε αυτό το αποτέλεσμα θα ήταν αεροδυναμικά περισσότερο αποδοτικές, δηλαδή με μεγαλύτερους συντελεστές άνωσης και μικρότερους συντελεστές αντίστασης, με αποτέλεσμα να απαιτούνται χορδές πολύ μικρότερης ακτίνας.

Έχοντας ως σημείο αναφοράς την ανάλυση της Διδακτορικής Διατριβής, ένα επιπρόσθετο ζητούμενο αυτού του σταδίου αποτελεί η καταγραφή της τάσης (trend) των αποτελεσμάτων [6]. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία του υπολογιστικού μοντέλου σύνολικά. Όπως σημειώνεται και στην προηγούμενη παράγραφο, οι καμπύλες δεν ταυτίζονται απόλυτα, αλλά αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς η τάση είναι εμφανώς όμοια. Οι λόγοι για τους οποίους θα μπορούσε να δικαιολογηθεί αυτή η απόκλιση είναι πολλοί. Ο κυριότερος είναι το γεγονός ότι, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα σύγκρισης, το αεροδυναμικό τμήμα του πτερυγίου που χρησιμοποιήθηκε στη Διδακτορική Διατριβή ξεκινάει περίπου από ακτίνα $r^* = 11\%$, σε αντίθεση με το αεροδυναμικό τμήμα του πτερυγίου της Διπλωματικής Εργασίας όπου η αντίστοιχη τιμή είναι $r^* = 18\%$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η επιφάνεια στην οποία εφαρμόζεται η θεωρία Στοιχείων Πτερύγωσης (Blade Element Momentum theory) να είναι μικρότερη στη δεύτερη περίπτωση συγκριτικά με την πρώτη και έτσι η προκύπτουσα ισχύς να είναι μικρότερη. Παράλληλα, ενδέχεται οι συντελεστές άνωσης των αεροτομών που συνθέτουν το πτερύγιο της Διδακτορικής Διατριβής να είναι ελαφρώς μεγαλύτεροι από αυτούς της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας [6]. Τέλος, υπάρχει ακόμη η πιθανότητα διαφορετικά λογισμικά βελτιστοποίησης να έχουν διαφορετική απόδοση, με συνέπεια οι τελικές τιμές να διαφέρουν κατά ένα ποσοστό ή οι παράμετροι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται να μη συμβάλλουν στην έρευνα της ολικής μέγιστης τιμής, αλλά μίας τοπικής με ελαφρώς μικρότερη τιμή από την ολική. Συνεπώς, ένας από αυτούς του παράγοντες ή ένας πιθανός συνδυασμός τους συμβάλλουν σε αυτή την απόκλιση που παρατηρείται. Παρ' όλα αυτά, η συσχέτιση των λύσεων είναι ικανοποιητική. Έτσι, η επιτυχής σύγκριση δίνει αρχικά τη δυνατότητα να επαληθευτεί η σωστή λειτουργία του κώδικα *RAFT*, να διαπιστωθεί στη συνέχεια εάν η «επικοινωνία» μεταξύ *RAFT* και *EASY* είναι σωστή και τέλος να ελεγχθεί η κατα το δυνατόν σωστότερη ρύθμιση των παραμέτρων βελτιστοποίησης στον εξελικτικό αλγόριθμο *EASY* [2], [5]. Με βάση πλέον τα παραπάνω, το πρόβλημα καθίσταται έτοιμο να επεκταθεί προκειμένου να μελετηθούν και άλλες περιπτώσεις βελτιστοποίησης, οι οποίες ακολουθούν σε επόμενες παραγράφους.

4.3 Βελτιστοποίηση με περιορισμούς - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$

4.3.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Στα πλαίσια αυτής της παραγράφου πραγματοποιείται μία διαδικασία βελτιστοποίησης στο ίδιο πτερύγιο (*NREL 5MW*) με αυτό της Παραγράφου 4.2, το οποίο αποτελεί το πτερύγιο αναφοράς. Προκειμένου να διερευνηθούν ποικίλα ζητήματα, η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται σε τρία στάδια, κατά τα οποία σκοπός είναι η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με τις παραμέτρους βελτιστοποίησης ενός δρομέα. *Συνάρτηση κόστους* όλων των σταδίων βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση του συντελεστή ισχύος, C_p . Είναι απαραίτητο, επίσης, να σημειωθεί πως και αυτή η βελτιστοποίηση λαμβάνει χώρα για μία δεδομένη ταχύτητα ανέμου (single point optimization), η οποία είναι εκείνη όπου ο συντελεστής ισχύος του πτερυγίου αναφοράς μεγιστοποιείται και ισούται με $V = 10.1 \text{ m/s}$. Δεδομένου ότι τόσο το μήκος του ($R_{tip} = 63 \text{ m}$), όσο και η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του ($\Omega_R = 1.267 \text{ rad/s}$) δεν αποτελούν *μεταβλητές σχεδιασμού*, προκύπτει πως η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται σε κάθε περίπτωση για σταθερό $\lambda_{opt} = 7.93$, καθώς γίνεται η παραδοχή πως η τροποποίηση της μορφής του πτερυγίου δεν είναι τόσο έντονη, έτσι ώστε να οδηγήσει σε μεγάλη αλλαγή στην τιμή του λ_{opt} .

Η βελτιστοποίηση περιέχει ως *μεταβλητές σχεδιασμού* όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου, αλλά και όλα τα χαρακτηριστικά του τμήματος που αποτελεί την εσωτερική δομή του (Κεφάλαιο 3). Πιο συγκεκριμένα, ως *μεταβλητές σχεδιασμού* λαμβάνονται υπόψη τα μεγέθη που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3, όπου πέρα από τους συμβολισμούς του Κεφαλαίου 4, προστίθενται και η συστροφή (tw) και το πάχος (th) Σε κάθε επανάληψη επιλέγονται 9 τιμές κάθε μεταβλητής, κατανομημένες σε σταθερές θέσεις κατά μήκος του πτερυγίου και στη συνέχεια εφαρμόζεται η τεχνική των καμπυλών B-Splines, έτσι ώστε να προκύψουν ομαλότερες κατανομές με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η συγκεκριμένη μέθοδος ακολουθείται και στην αεροδυναμική βελτιστοποίηση χωρίς *περιορισμούς* της Παράγραφου 4.2.

| Design Variable | Επεξήγηση |
|------------------------|--|
| $2a/R_{tip}$ | Χορδή (αδιάστατη ως προς ακτίνα) |
| tw | Συστροφή |
| $th/2a$ | Πάχος αεροτομής (αδιάστατη ως προς τη χορδή) |
| $x/2a$ | Βάση I-beam (αδιάστατη ως προς τη χορδή) |
| y_1/x | Πάχος των spar caps (αδιάστατο ως προς τη βάση του I-beam) |
| b/x | Πάχος του κελύφους (αδιάστατο ως προς τη βάση του I-beam) |
| x_1/y_1 | Πάχος του shear web (αδιάστατο ως προς το πάχος των spar caps) |

Πίνακας 4.3. Περιγραφή των *μεταβλητών σχεδιασμού* που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε στάδιο κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης του πτερυγίου

Οι περιορισμοί που τίθενται στις διαδικασίες βελτιστοποίησης που παρουσιάζονται στη συνέχεια σχετίζονται κυρίως με τις φορτίσεις του πτερυγίου. Όσον αφορά τις προσθήκες στον κώδικα *RAFT* που είναι απαραίτητες για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, αυτές σχετίζονται κυρίως με τον καθορισμό της εσωτερικής δομής κατά μήκος των πτερυγίων και με τον υπολογισμό των φορτίσεων και άλλων δομικών χαρακτηριστικών. Επιπρόσθετα, κρίνεται σκόπιμο να εισαχθεί και η έννοια της μάζας, καθώς αυτή συνεισφέρει όχι μόνο στη φόρτιση αλλά και στο κόστος κατασκευής. Ως περιορισμός του κάθε μεγέθους που εξετάζεται θεωρείται η αντίστοιχη τιμή που προκύπτει για το πτερύγιο αναφοράς. Αρχικά, λοιπόν, απαιτείται η προσθήκη του τμήματος το οποίο υπολογίζει την κατανομή της μάζας και της δυσκαμψίας με τον τρόπο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, ενώ η τιμή της συνολικής μάζας υπολογίζεται ως εξής:

$$m = \int_{R_{aero}}^{R_{tip}} m(r) dr$$

Στη συνέχεια, με δεδομένη την κατανομή μάζας, προκύπτει η φυγόκεντρος δύναμη, η οποία σε ακτίνα r^* δίνεται μέσω του παρακάτω τύπου:

$$F_{centrifugal}(r^*) = \Omega^2 \cdot \int_{r^*}^R m(r) \cdot r \cdot dr$$

όπου Ω : γωνιακή ταχύτητα δρομέα και $m(r)$: κατανομή μάζας. Παράλληλα, με βάση την κατανομή μάζας, προκύπτει και η κατανομή του βάρους του πτερυγίου από τον παρακάτω τύπο:

$$B(r) = m(r) \cdot g$$

όπου g : επιτάχυνση της βαρύτητας. Στη συνέχεια, προκειμένου να υπολογιστούν οι τάσεις τόσο κατά την πτερύγιση (flapwise), όσο και κατά την περιστροφή (edgewise), χρειάζεται ο υπολογισμός των αντίστοιχων ροπών κατά μήκος του δρομέα. Αυτά τα μεγέθη βρίσκονται σε ακτίνα r_0 ως εξής:

$$M_f(r_0) = \int_{r_0}^{R_{tip}} F_{norm} \cdot (r - r_0) \cdot dr$$

$$M_e(r_0) = \int_{r_0}^{R_{tip}} (F_{tang} + B) \cdot (r - r_0) \cdot dr$$

όπου F_{norm} : κατανομή της ώσης ανά μονάδα μήκους του πτερυγίου και F_{tang} : κατανομή εραπτομενικής δύναμης ανά μονάδα μήκους του πτερυγίου.

Παράλληλα, χρειάζεται να υπολογιστεί και η ροπή κατά την πτερύγιση (flapwise) στη ρίζα του πτερυγίου. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να αναφερθεί πως κατά τη συγκεκριμένη ανάλυση, εξετάζεται μόνο το αεροδυναμικό τμήμα του πτερυγίου, δηλαδή από R_{aero} μέχρι R_{tip} . Συνεπώς, η ροπή στη ρίζα του πτερυγίου προκύπτει χωρίς να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά του τμήματος του δρομέα που έχει τη μορφή κυλίνδρου (το ίδιο ισχύει και για την τιμή της

συνολικής μάζας). Το συγκεκριμένο μέγεθος υπολογίζεται, με βάση τους κανόνες μεταφοράς δύναμης και ροπής, ως εξής:

$$M_{f\text{ ROOT}} = M_f(R_{aero}) + F_{norm}(R_{aero}) \cdot (R_{aero} - R_{ROOT})$$

Έτσι, είναι πλέον δυνατό να υπολογιστούν και οι αντίστοιχες τάσεις μέσω των παρακάτω τύπων:

$$\sigma_{f,max} = \frac{M_f}{I_{flap}} \cdot y_{max}$$

$$\sigma_{e,max} = \frac{M_e}{I_{edge}} \cdot x_{max}$$

όπου I_{flap} : ροπή αδράνειας κατά την πτερύγιση (flapwise) (Κεφάλαιο 3), I_{edge} : ροπή αδράνειας κατά την περιστροφή (edgewise) (Κεφάλαιο 3), y_{max} : μέγιστη απόσταση κατά τον άξονα y και x_{max} : μέγιστη απόσταση κατά τον άξονα x . Η συνολική μέγιστη τάση θεωρείται για λόγους απλοποίησης του προβλήματος και υποθέτωντας πως η προσέγγιση είναι ικανοποιητική πως παρατηρείται στις μέγιστες αποστάσεις κατά τους δύο άξονες x, y , δηλαδή σε $0.8 \cdot th/2$ κατά y και $2\alpha/2$ κατά x , όπου th : πάχος και 2α : χορδή (Κεφάλαιο 3). Συνυπολογίζοντας, λοιπόν, και τις εφελκυστικές τάσεις λόγω φυγόκεντρου δύναμης, η συνολική μέγιστη τάση δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{max} = \frac{M_f}{I_{flap}} \cdot y_{max} + \frac{M_e}{I_{edge}} \cdot x_{max} + \frac{F_{centrifugal}}{A}$$

όπου A : εμβαδό διατομής του πτερυγίου (Κεφάλαιο 3). Τέλος, οι τιμές της δυσκαμψίας υπολογίζονται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ως το γινόμενο της ροπής αδράνειας επί το μέτρο ελαστικότητας.

4.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Σε αυτή την παράγραφο γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων όλων των σταδίων βελτιστοποίησης που πραγματοποιούνται με βάση τα παραπάνω. Η ανάλυση του κάθε σταδίου περιλαμβάνει μία περιγραφή των *περιορισμών*, καθώς και το σκεπτικό πάνω στο οποίο βασίζεται το καθένα. Εκτός από τις τελικές τιμές της *συνάρτησης κόστους* και των *εκάστοτε περιορισμών*, παρουσιάζεται και το πτερύγιο γεωμετρικά, δηλαδή οι κατανομές των *μεταβλητών σχεδιασμού* που οδηγούν στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Παράλληλα, μελετούνται οι προκύπτουσες φορτίσεις και συνοδεύονται από τα αντίστοιχα σχόλια.

4.3.2.1 1^ο Στάδιο βελτιστοποίησης- 3 περιορισμοί

Κατά το πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης επιλέγεται να ληφθούν υπόψη 3 περιορισμοί. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο αποτελεί η καμπτική ροπή στη ρίζα του πτερυγίου κατά την πτερύγιση (flapwise) $M_{f,ROOT}$, το δεύτερο η συνολική μάζα του πτερυγίου, m και τρίτο η μέγιστη συνολική τάση, σ_{max} (ανεξάρτητα της ακτινικής θέσης όπου εμφανίζεται αυτή). Σημειώνεται πως όλα τα μεγέθη υπολογίζονται στο αεροδυναμικό τμήμα του πτερυγίου (R_{aero} έως R_{tip}). Άρα, η τιμή τόσο της $M_{f,ROOT}$, όσο και της μάζας αντιπροσωπεύει μόνο αυτό το τμήμα.

Όπως γίνεται αναφορά και προηγουμένως, οι τιμές αυτών των περιορισμών είναι αυτές που προκύπτουν μετά από ανάλυση του πτερυγίου αναφοράς για $\lambda = 7.93$ ($V = 10.1 \text{ m/s}$) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

| Constraints | |
|-------------------------------------|-----------|
| m (kg) | 13,041.8 |
| $M_{f,ROOT}$ (kN · m) | 8,422.34 |
| σ_{max} (kN/m ²) | 81,746.45 |

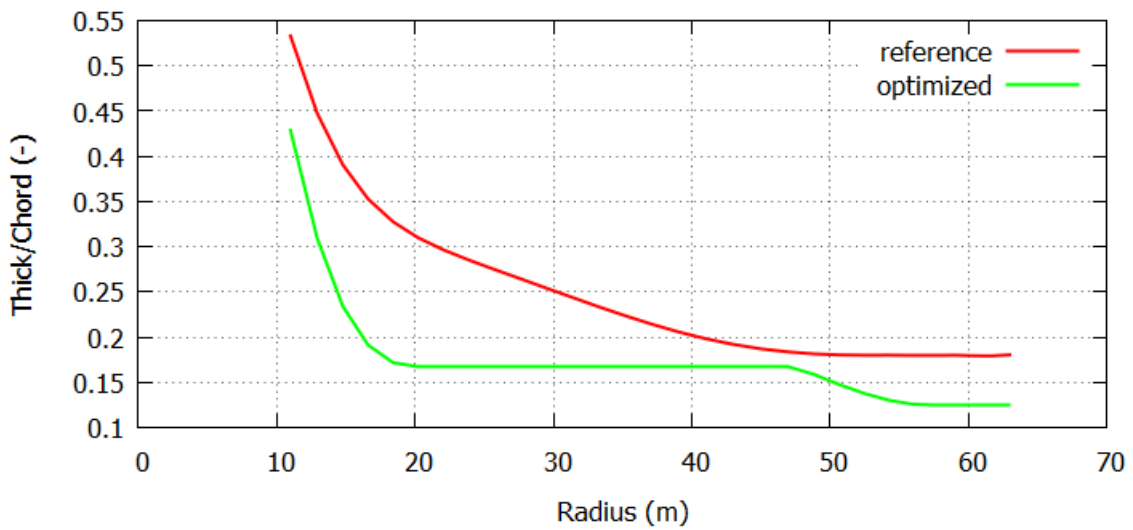
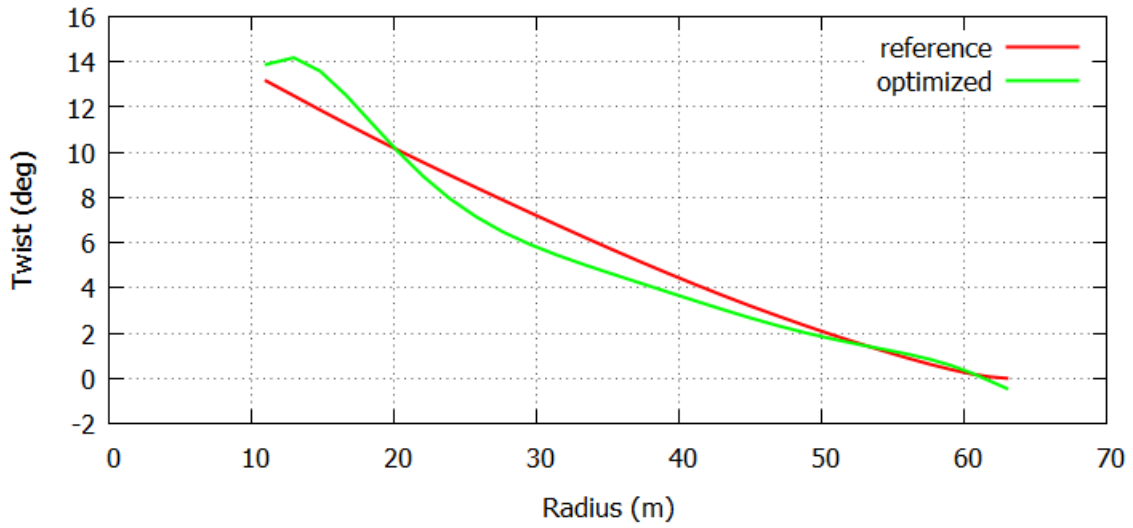
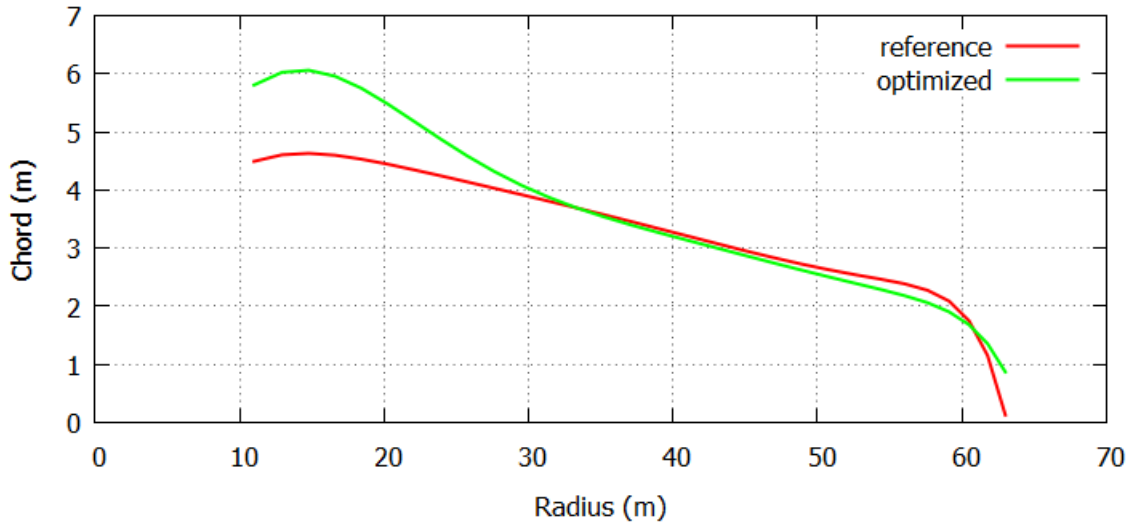
Πίνακας 4.4 Τιμές των περιορισμών που λήφθηκαν υπόψη κατά το 1^ο στάδιου βελτιστοποίησης (5 MW - 3 constraints - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$)

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, αποδुकνειεται πως υπάρχει η δυνατότητα μεγιστοποίησης του C_p διατηρώντας τα μεγέθη που προαναφέρθηκαν στα ίδια επίπεδα. Μάλιστα, τα αποτελέσματα δείχνουν πως η αύξηση δεν είναι αμελητέα (Πίνακας 4.5)

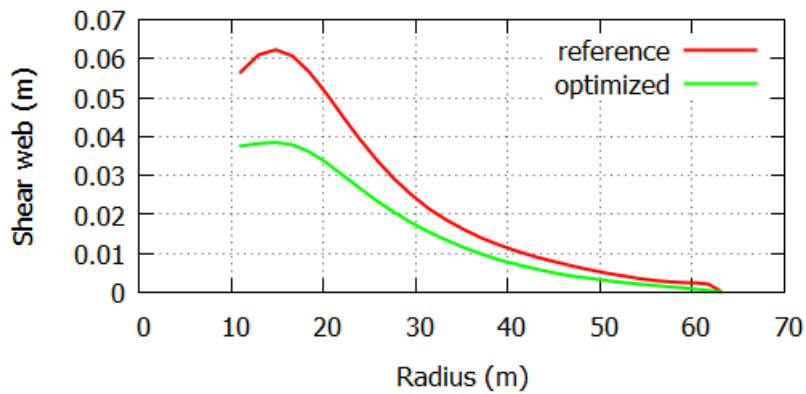
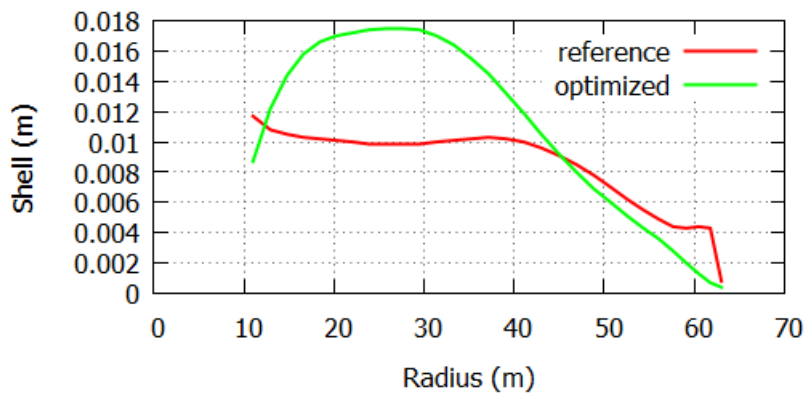
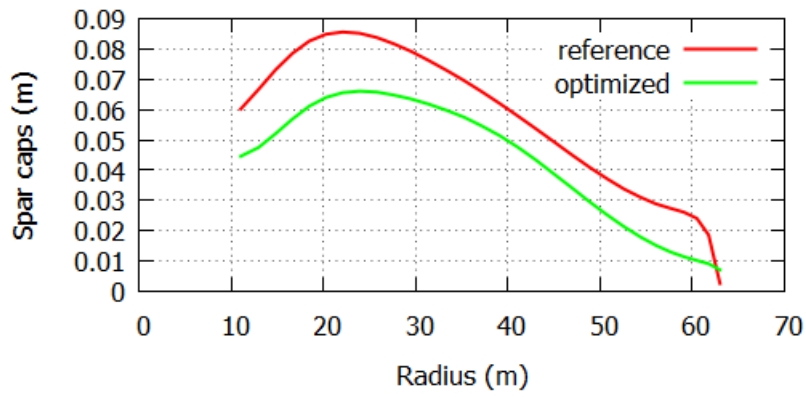
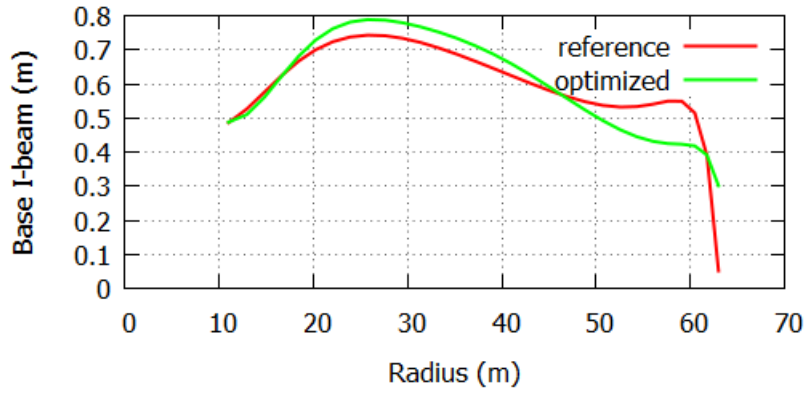
| | Cost Function | Constraints | | |
|-------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| | C_p | m (kg) | $M_{f,ROOT}$ (kN · m) | σ_{max} (kN/m ²) |
| Αναφοράς | 0.49245 | 13,041.8 | 8,422.34 | 81,746.45 |
| Βέλτιστο πτερύγιο | 0.50417 | 12,979.01 | 8,411.78 | 81,549.74 |

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα του 1^{ου} σταδίου βελτιστοποίησης (5 MW - 3 constraints - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$)

Αυτό που έχει ενδιαφέρον σε αυτό το σημείο είναι ο έλεγχος των τιμών των μεταβλητών σχεδιασμού, οι οποίες οδηγούν στο παραπάνω αποτέλεσμα. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατή μία αρχική αξιολόγηση αυτών των αποτελεσμάτων και μία καταγραφή της γενικής τάσης των μεταβολών. Για το λόγο αυτό, παρουσιάζονται στη συνέχεια τα διαγράμματα που περιγράφουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του βέλτιστου πτερυγίου, ενώ ταυτόχρονα γίνεται και η απαραίτητη σύγκριση με τα αντίστοιχα του πτερυγίου αναφοράς (Διάγραμμα 4.7 και Διάγραμμα 4.8).

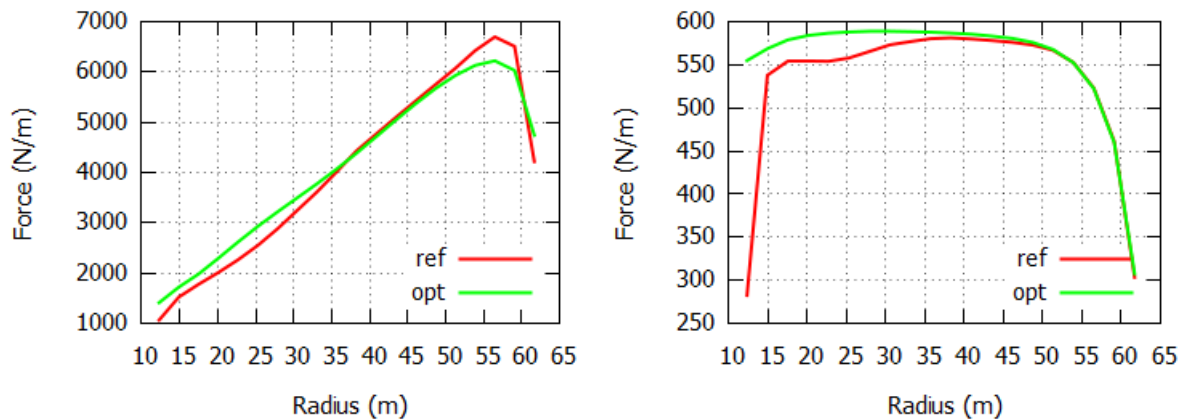


Διάγραμμα 4.7 [ΠΑΝΩ] Κατανομή χορδής βέλτιστου και πτερυγίου αναφοράς, [ΚΕΝΤΡΟ] Αντίστοιχη κατανομή συστροφής, [ΚΑΤΩ] Αντίστοιχη κατανομή αδιάστατου πάχους (5 MW - 3 constraints - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$)

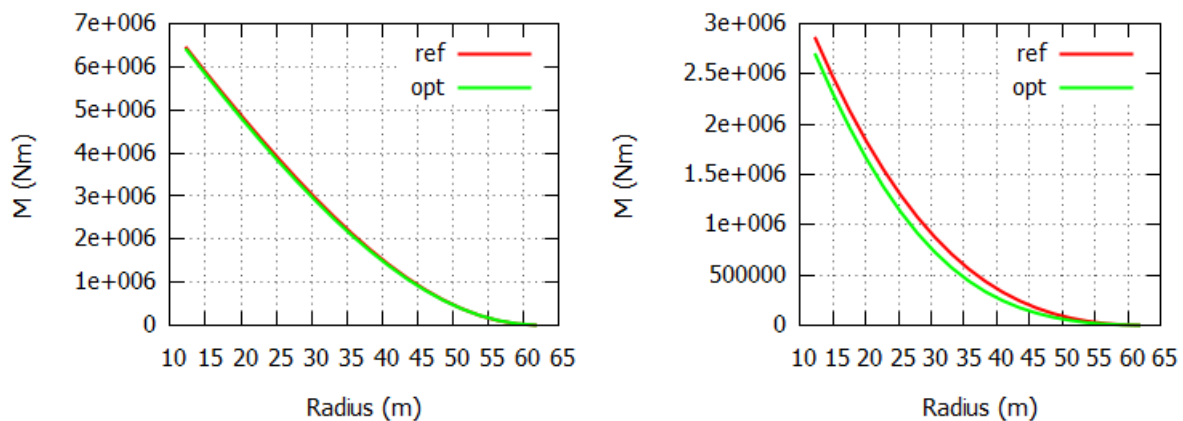


Διάγραμμα 4.8 [ΠΑΝΩ] Κατανομή του μήκους της βάσης του I-beam, [ΠΑΝΩ-KΕΝΤΡΟ] Κατανομή πάχους των Spar Caps, [ΚΑΤΩ-KΕΝΤΡΟ], Κατανομή πάχους του κελύφους, [ΚΑΤΩ] Κατανομή πάχους του Shear web (5 MW - 3 constraints - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$)

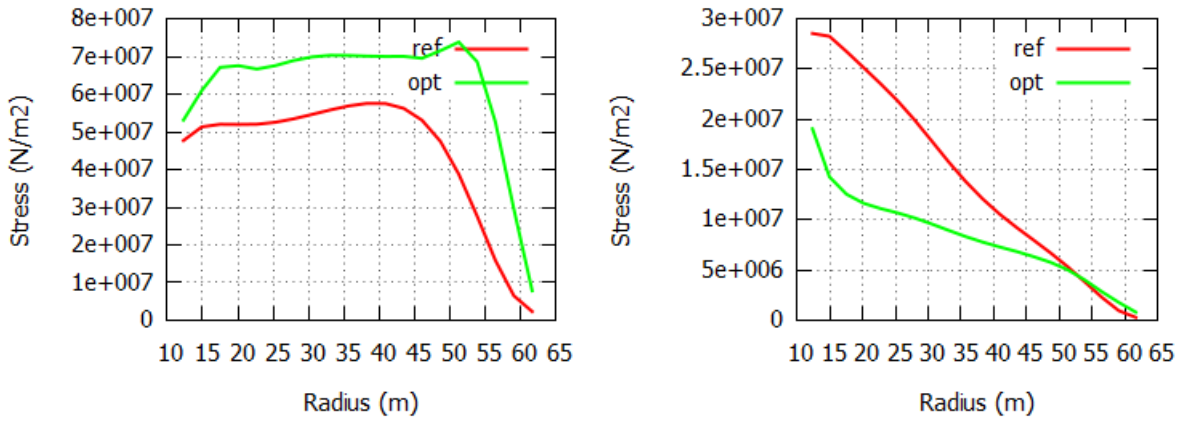
Παρά το γεγονός πως οι περιορισμοί που τίθενται συγκρατούν τη μορφή του πτερυγίου σε τέτοια πλαίσια, έτσι ώστε να αποφεύγονται ακραία επίπεδα φορτίσεων, είναι απαραίτητο να παρατηρήσει κανείς και τις υπόλοιπες φορτίσεις που προέκυψαν, σε σύγκριση πάντα με το πτερύγιο αναφοράς, καθώς και την δυσκαμψία και την κατανομή μάζας του. Στη συνέχεια, λοιπόν, παρατίθενται τα σημαντικότερα από αυτά τα διαγράμματα (Διάγραμμα 4.9 έως Διάγραμμα 4.13). Σημειώνεται άλλη μία φορά πως οι φορτίσεις αντιστοιχούν σε $\lambda = 7.93$, όπως και στα επόμενα στάδια βελτιστοποίησης.



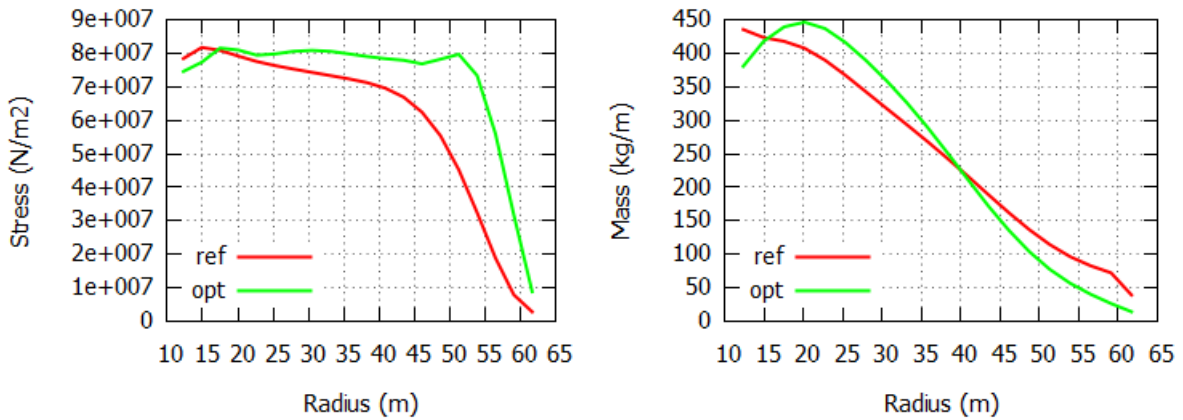
Διάγραμμα 4.9 [ΑΡΣΤΕΡΑ] Κατανομή της δύναμης κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή εφαπτομενικής δύναμης (5 MW - 3 constraints - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$)



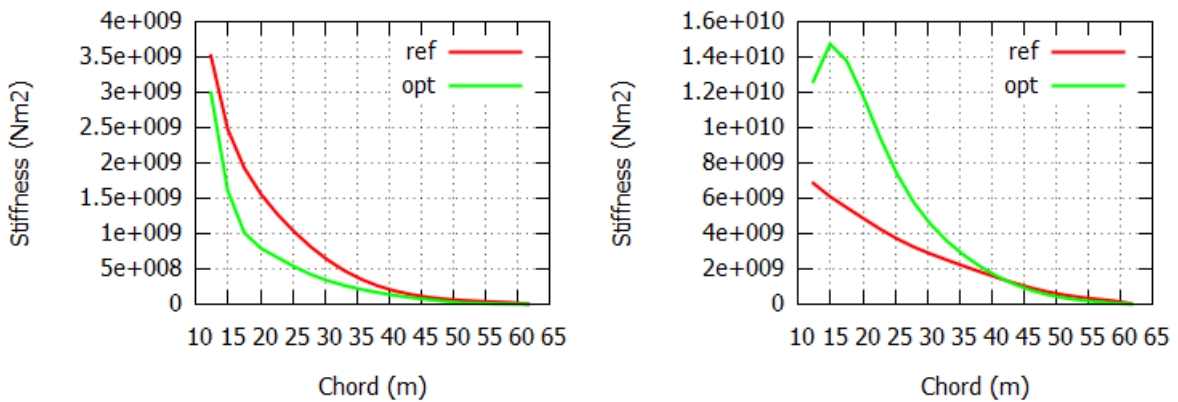
Διάγραμμα 4.10 [ΑΡΣΤΕΡΑ] Κατανομή της ροπής κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή ροπής κατά edgewise (5 MW - 3 constraints - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$)



Διάγραμμα 4.11 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Μέγιστη τάση κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Μέγιστη τάση κατά edgewise (5 MW - 3 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)



Διάγραμμα 4.12 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Συνολική μέγιστη τάση, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή μάζας (5 MW - 3 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)



Διάγραμμα 4.13 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Κατανομή δυσκαμψίας κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή δυσκαμψίας κατά edgewise (5 MW - 3 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)

Αυτό που είναι προφανές είναι το γεγονός πως η φόρτιση που υπερβαίνει κατά πολύ την αντίστοιχη φόρτιση του πτερυγίου αναφοράς είναι η μέγιστη τάση κατά την πτερύγιση (flapwise) $\sigma_{f,max}$. Αυτό, όμως, δεν δημιουργεί άμεσα πρόβλημα στον εξελικτικό αλγόριθμο *EASY*, καθώς δεν αποτελεί *περιορισμός*. Αντίθετα, η μέγιστη συνολική τάση σ_{max} , η οποία πράγματι λαμβάνεται υπόψη ως *περιορισμός*, διατηρείται στα επιτρεπτά πλαίσια.

4.3.2.2 2^ο Στάδιο βελτιστοποίησης- 4 περιορισμοί

Τα αποτελέσματα του 1^{ου} σταδίου βελτιστοποίησης δείχνουν πως η αύξηση του C_p είναι σημαντική. Η παρουσίαση των διαγραμμάτων των διαφόρων φορτίσεων, όμως, οδηγεί αναπόφευκτα στη διεξαγωγή ενός 2^{ου} σταδίου βελτιστοποίησης, στο οποίο υπάρχει μία προσθήκη. Ο στόχος αυτού του σταδίου παραμένει αμετάβλητος, με τη διαφορά πως κρίνεται σκόπιμο να θεωρηθεί και η μέγιστη τάση κατά την πτερύγιση (flapwise) $\sigma_{f,max}$ ως *περιορισμός*.

Με τη συγκεκριμένη επιλογή είναι δυνατόν, πλέον, να εξεταστεί η ύπαρξη μίας λύσης, η οποία να μην μεγιστοποιεί το C_p διατηρώντας τις τιμές των προηγούμενων *περιορισμών* στα επιθυμητά επίπεδα, αλλά ταυτόχρονα συγκρατεί και αυτό το μέγεθος που φαίνεται να υπερβαίνει σε μεγάλο βαθμό το αντίστοιχο μέγεθος του πτερυγίου αναφοράς. Έτσι, ο νέος πίνακας των τιμών των *περιορισμών* διαμορφώνεται ως εξής:

| Constraints | |
|---------------------------------------|-----------|
| m (kg) | 13,041.8 |
| $M_{f,ROOT}$ (kN · m) | 8,422.34 |
| σ_{max} (kN/m ²) | 81,746.45 |
| $\sigma_{f,max}$ (kN/m ²) | 57,546.81 |

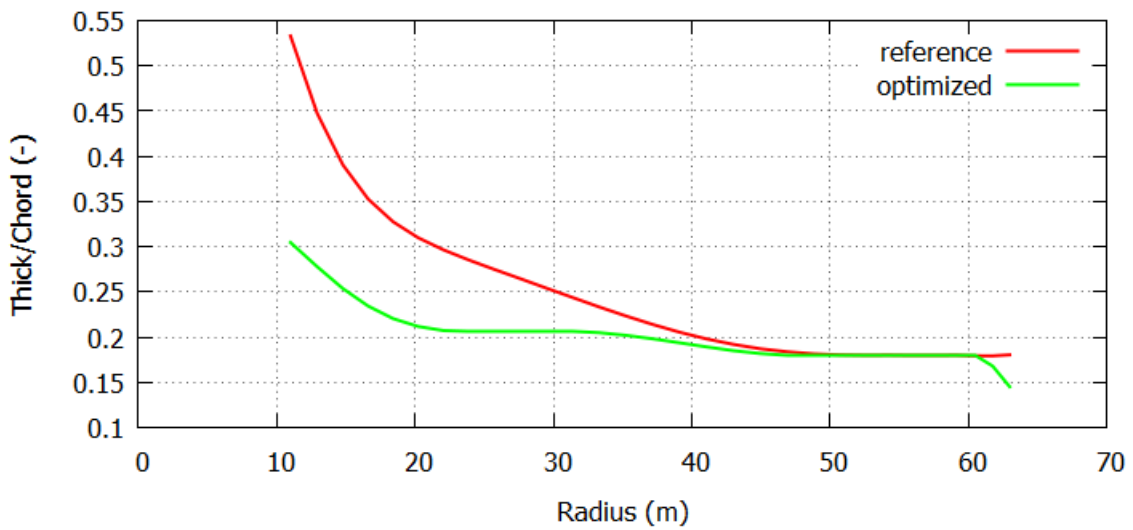
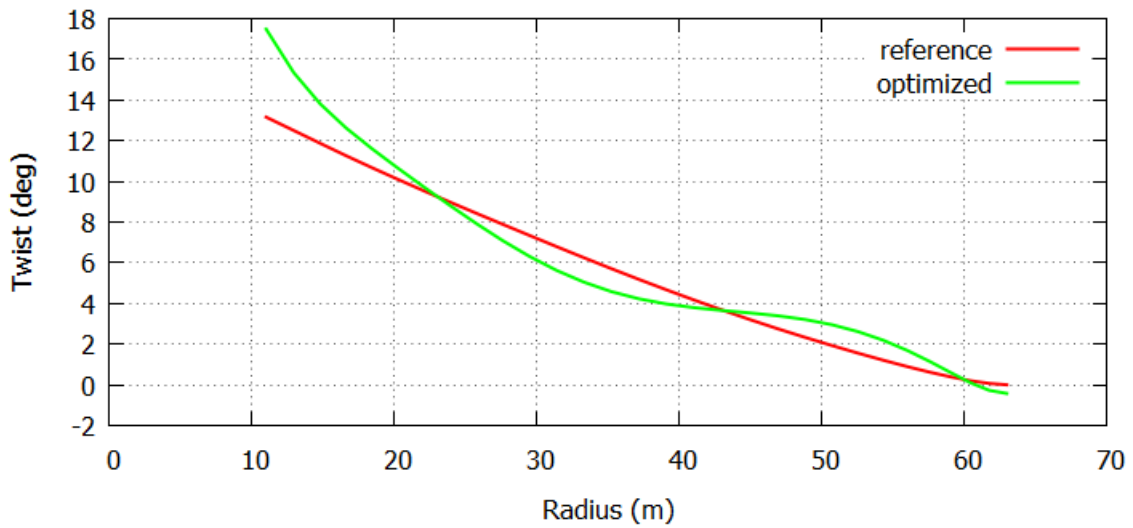
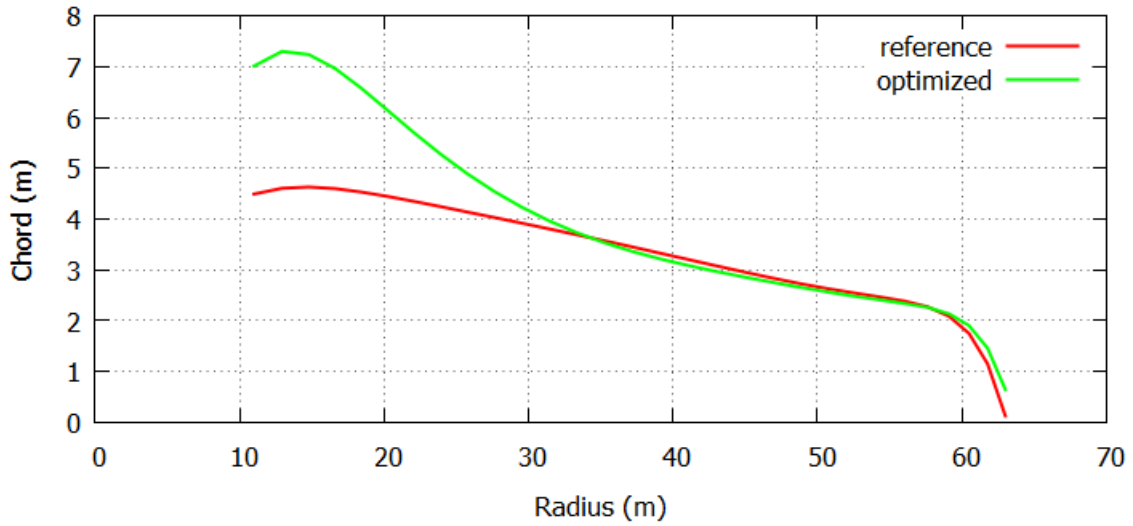
Πίνακας 4.6 Τιμές των *περιορισμών* που λήφθηκαν υπόψη κατά το 2^ο στάδιο βελτιστοποίησης (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)

Η διεξαγωγή της διαδικασίας βελτιστοποίησης δείχνει και πάλι πως η τιμή του C_p επιδέχεται τελικά βελτιστοποίησης, παρά την προσθήκη και ενός τέταρτου περιορισμού στο πρόβλημα. Μάλιστα, ο συγκεκριμένος περιορισμός δείχνει να επηρεάζει σχεδόν ελάχιστα τη μέγιστη τιμή του C_p , σε σύγκριση με το 1^ο στάδιο βελτιστοποίησης. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7.

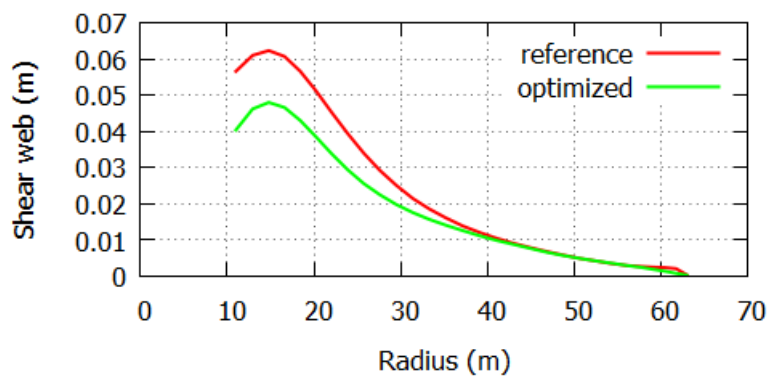
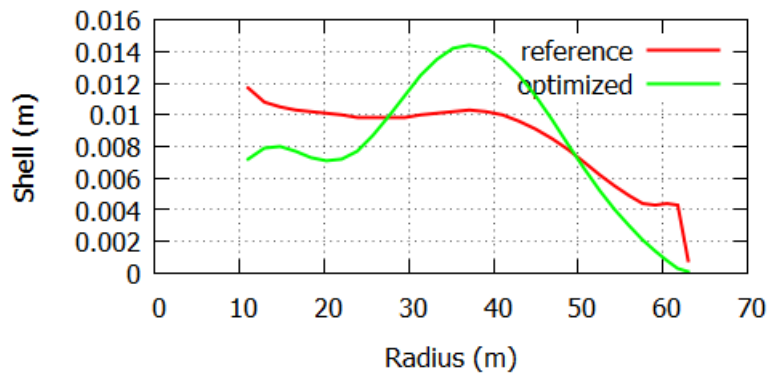
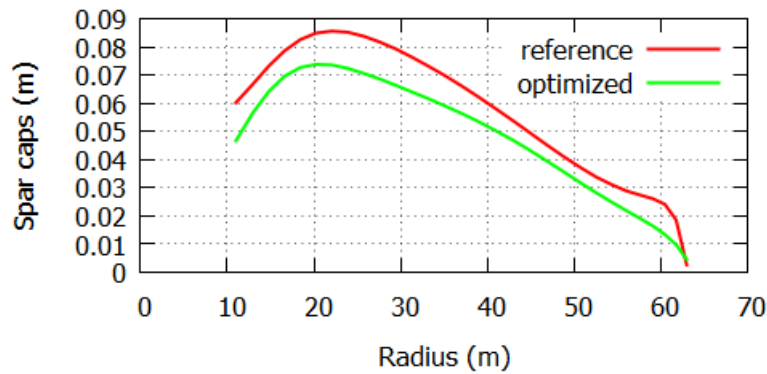
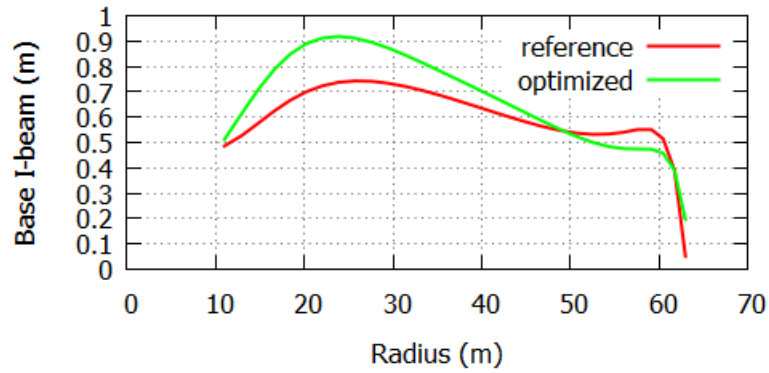
| | <i>Cost Function</i> | <i>Constraints</i> | | | |
|--------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| | C_P | m (kg) | $M_{f,ROOT}$ (kN · m) | σ_{max} (kN/m ²) | $\sigma_{f,max}$ (kN/m ²) |
| <i>Πτερύγιο αναφοράς</i> | 0.49245 | 13,041.8 | 8,422.34 | 81,746.45 | 57,546.81 |
| <i>Βέλτιστο πτερύγιο</i> | 0.50093 | 12,808.93 | 8,370.93 | 77,278.51 | 56,610.73 |

Πίνακας 4.7 Αποτελέσματα του 2^{ου} σταδίου βελτιστοποίησης (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)

Στην επόμενη σελίδα (Διάγραμμα 4.14 και Διάγραμμα 4.15) παρουσιάζονται οι κατανομές όλων των μεταβλητών σχεδιασμού που οδηγούν στο παραπάνω αποτέλεσμα, προκειμένου να αναπαρασταθεί γραφικά η γεωμετρία του πτερύγιου, καθώς και η μορφή της εσωτερικής δομής του.

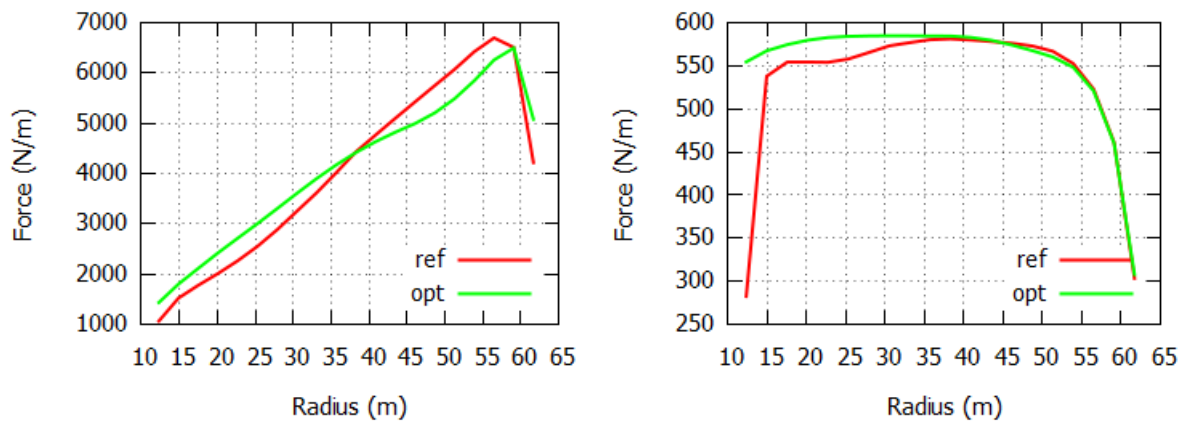


Διάγραμμα 4.14 [ΠΑΝΩ] Κατανομή χορδής βέλτιστου και πτερυγίου αναφοράς, [ΚΕΝΤΡΟ] Αντίστοιχη κατανομή συστρώσης, [ΚΑΤΩ] Αντίστοιχη κατανομή αδιάστατου πάχους (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$)

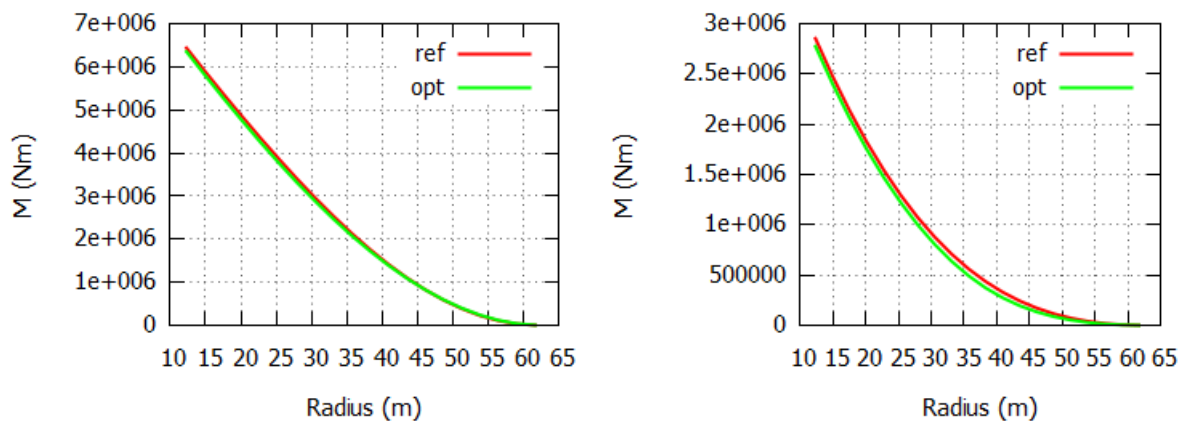


Διάγραμμα 4.15 [ΠΑΝΩ] Κατανομή του μήκους της βάσης του I-beam, [ΠΑΝΩ-KENTPO] Κατανομή πάχους των Spar Caps, [ΚΑΤΩ-KENTPO], Κατανομή πάχους του κελύφους, [ΚΑΤΩ] Κατανομή πάχους του Shear web (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$)

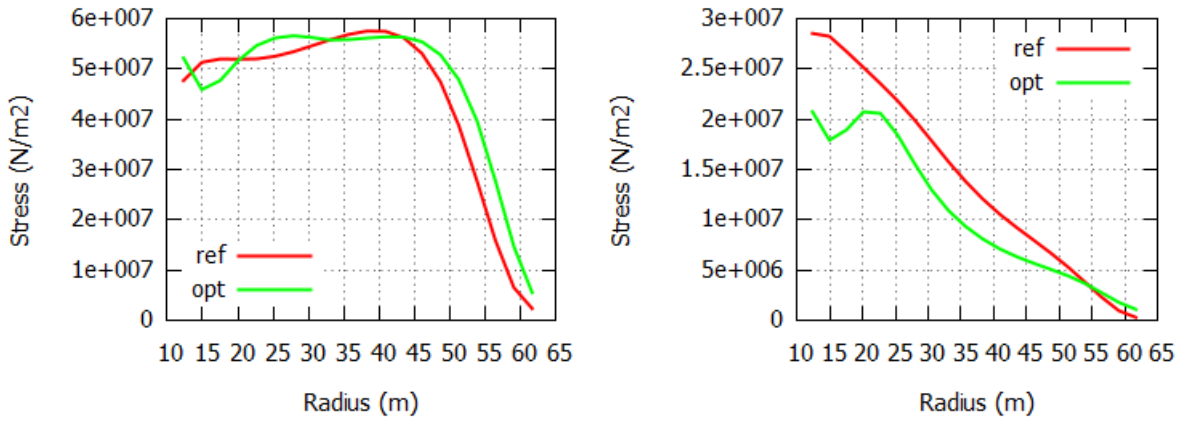
Όσον αφορά τις φορτίσεις που εφαρμόζονται σε ένα τέτοιο πτερύγιο με την παραπάνω μορφή, είναι εμφανές πως η προσθήκη του 4^{ου} περιορισμού ομαλοποιεί και τη μέγιστη τάση κατά την πτερύγιση (flapwise) κατεύθυνση $\sigma_{f,max}$. Οι υπόλοιπες φορτίσεις παραμένουν σε λογικά πλαίσια με βάση το πτερύγιο αναφοράς (Διάγραμμα 4.16 έως Διάγραμμα 4.20). Παράλληλα, από τις κατανομές δυσκαμψίας EI_{flap} και EI_{edge} και μάζας m , παρατηρεί κανείς πως και οι τρεις καμπύλες τείνουν πλέον να προσεγγίσουν τις αντίστοιχες του πτερυγίου αναφοράς, σε αντίθεση με το προηγούμενο στάδιο βελτιστοποίησης.



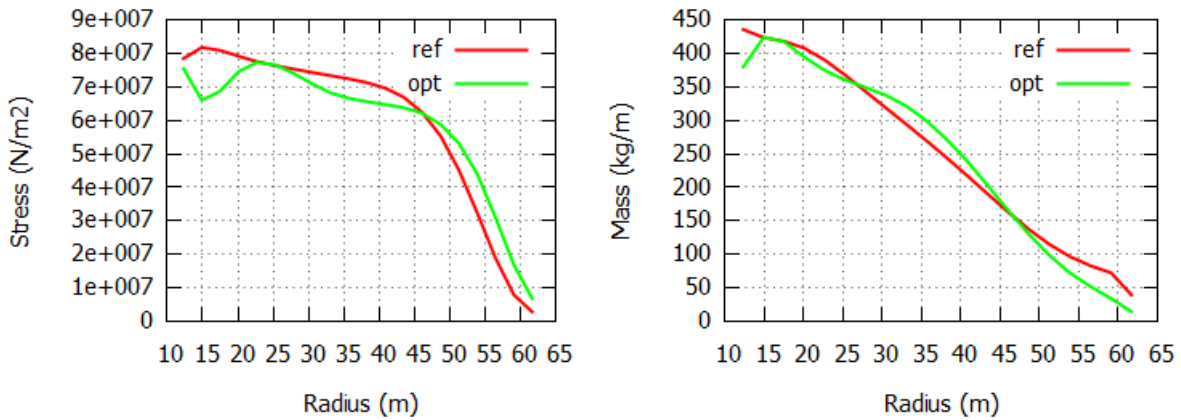
Διάγραμμα 4.16 [ΑΡΣΤΕΡΑ] Κατανομή της δύναμης κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή εφαπτομενικής δύναμης (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)



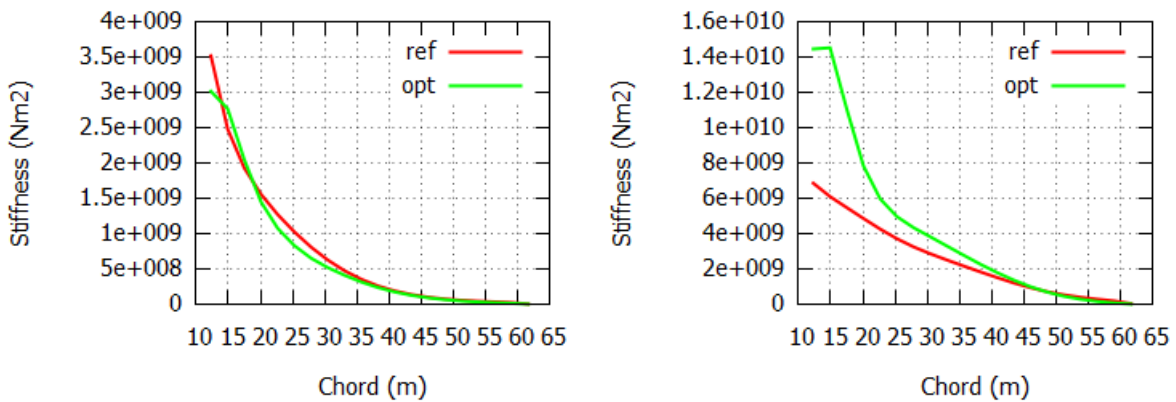
Διάγραμμα 4.17 [ΑΡΣΤΕΡΑ] Κατανομή της ροπής κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή ροπής κατά edgewise (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)



Διάγραμμα 4.18 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Μέγιστη τάση κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Μέγιστη τάση κατά edgewise (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)



Διάγραμμα 4.19 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Συνολική μέγιστη τάση, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή μάζας (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)



Διάγραμμα 4.20 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Κατανομή δυσκαμψίας κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή δυσκαμψίας κατά edgewise (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)

4.3.2.3 3^ο Στάδιο βελτιστοποίησης - 5 περιορισμοί

Η μορφή της προκύπτουσας χορδής από τα δύο προηγούμενα στάδια βελτιστοποίησης θέτει ένα επιπρόσθετο ζήτημα, το οποίο δεν έχει εξεταστεί μέχρι στιγμής. Λόγω του μεγαλύτερου εμβαδού του νέου πτερυγίου σε σύγκριση με το πτερύγιο αναφοράς, κρίνεται αναγκαίο να συμπεριληφθεί στη γενικότερη δομική ανάλυση του δρομέα και η ροπή στη ρίζα κατά την πτερύγιση (flapwise) υπό "Survival" συνθήκες, $M_{f\text{ ROOT-ULTIMATE}}$.

Εν συντομία, ως "Survival" συνθήκη θεωρείται η ριπή ανέμου που προσπίπτει σε Α/Γ της οποίας ο δρομέας βρίσκεται σε κατάσταση "parked". Σε μια τέτοια περίπτωση, εμφανίζεται η ακραία γωνία πρόσπτωσης 90° . Κάτω από αυτές τις συνθήκες, δημιουργούνται μεγάλες φορτίσεις, με άμεση συνέπεια να αυξάνεται η κόπωση της μηχανής και να τίθεται, επομένως, ζήτημα αντοχής της διάταξης. Το μέγεθος που εξετάζεται δίνεται από τον τύπο:

$$M_{f\text{ ROOT-ULTIMATE}} = \int_0^{R_{tip}} C_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot c \cdot r \cdot dr$$

Είναι γνωστό με βάση τη θεωρία των αεροτομών πως για γωνίες πρόσπτωσης $\alpha = 90^\circ$ η τιμή του συντελεστή αντίστασης C_D είναι σχεδόν ίδια, ανεξαρτήτως του τύπου της αεροτομής. Παράλληλα, θεωρείται πως η τιμή της πυκνότητας του αέρα παραμένει αμετάβλητη, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$. Επισημαίνεται ακόμη πως, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, λαμβάνεται υπόψη μόνο η φόρτιση που εμφανίζεται στο αεροδυναμικό τμήμα του δρομέα. Λόγω όλων των παραπάνω, στη διαδικασία επιλέγεται να εισαχθεί ως 5^{ος} περιορισμός το συγκεκριμένο μέγεθος με την εξής μορφή:

$$M_U^* = \int_{R_{aero}}^{R_{tip}} c \cdot r \cdot dr$$

Επομένως, το 3^ο στάδιο βελτιστοποίησης πραγματοποιείται πλέον σύμφωνα με ένα ακόμη μέγεθος ως περιορισμός, με αποτέλεσμα η τελική μορφή του πίνακα τιμών τους να παρουσιάζεται συνοπτικά στον Πίνακα 4.8.

| Constraints | |
|---------------------------------------|-----------|
| m (kg) | 13,041.8 |
| $M_{f,ROOT}$ (kN · m) | 8,422.34 |
| σ_{max} (kN/m ²) | 81,746.45 |
| $\sigma_{f,max}$ (kN/m ²) | 57,546.81 |
| M_U^* (m ³) | 5,808.44 |

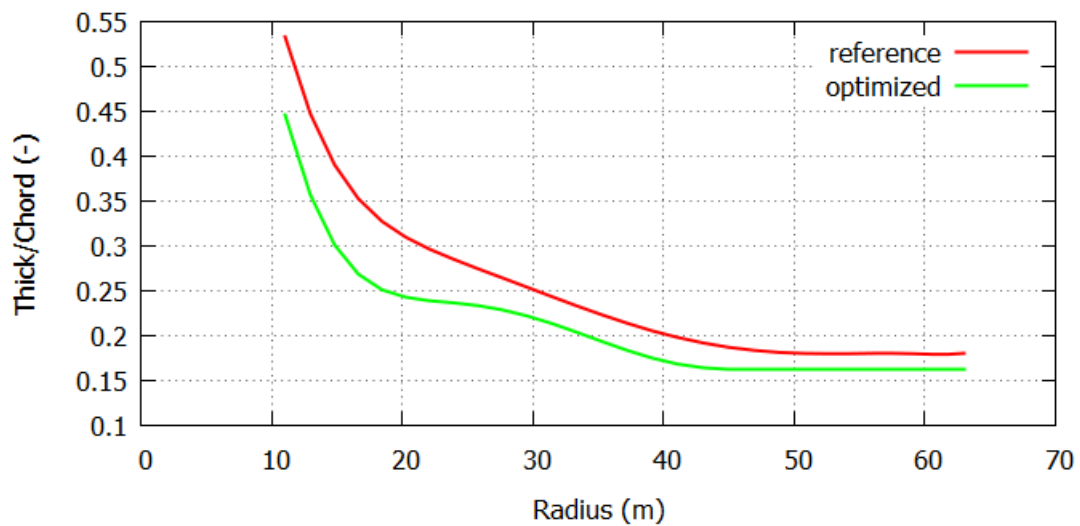
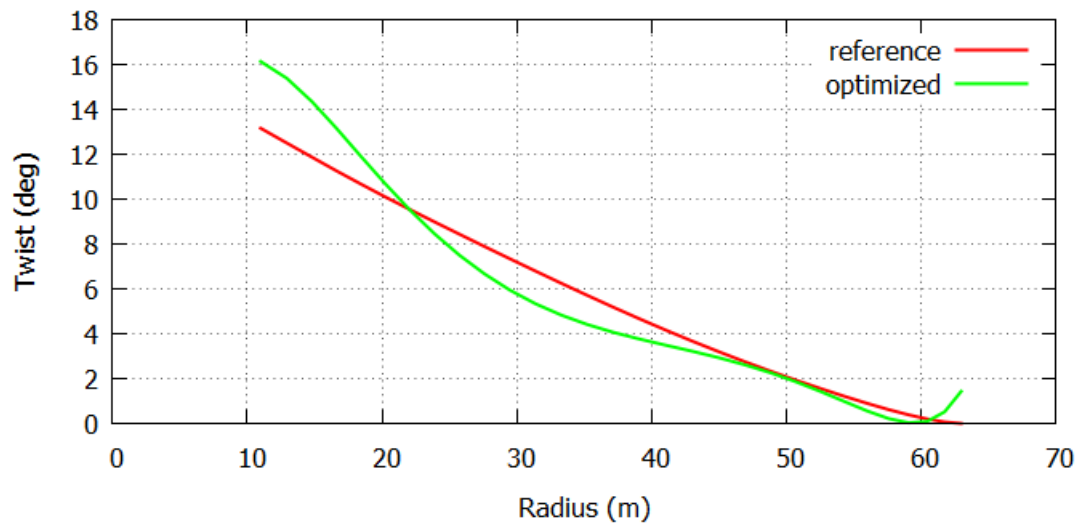
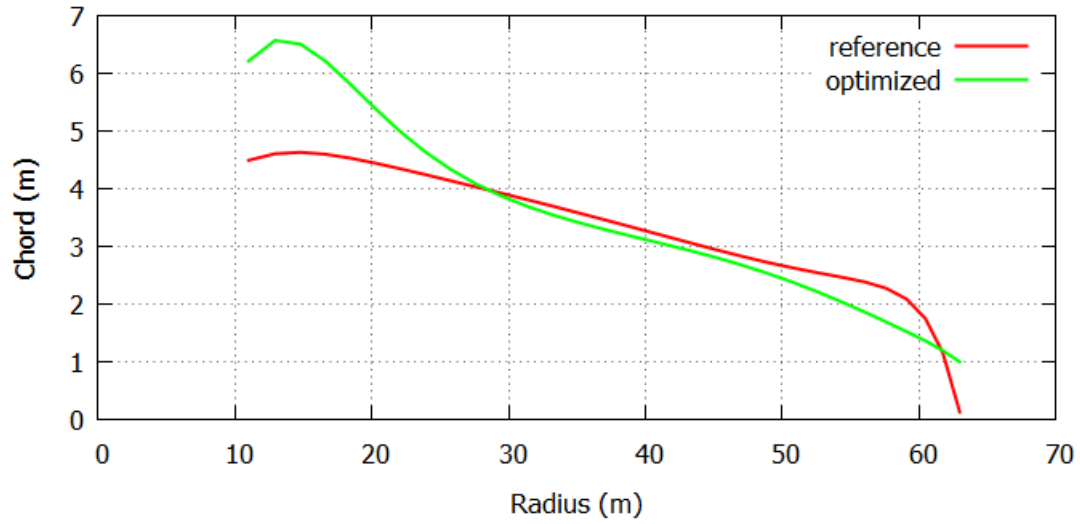
Πίνακας 4.8 Τιμές των περιορισμών που λαμβάνονται υπόψη κατά το 3^ο στάδιο βελτιστοποίησης (5 MW - 5 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης είναι και πάλι ικανοποιητικά, καθώς το C_p αυξάνεται σημαντικά, χωρίς να δεσμεύεται ούτε από τον συνδυασμό των 5 περιορισμών. Όπως θα περίμενε κανείς, η βέλτιστη τιμή του συντελεστή ισχύος είναι μικρότερη και από αυτή του 1^{ου}, αλλά και από αυτή του 2^{ου} σταδίου. Παρ' όλα αυτά, η αύξηση του κάθε άλλο παρά ασήμαντη είναι. Μάλιστα, θα μπορούσε να υποθέσει κανείς πως η διαφορά μεταξύ των 3 τιμών είναι από ελάχιστη έως αμελητέα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικότερα στον Πίνακα 4.9.

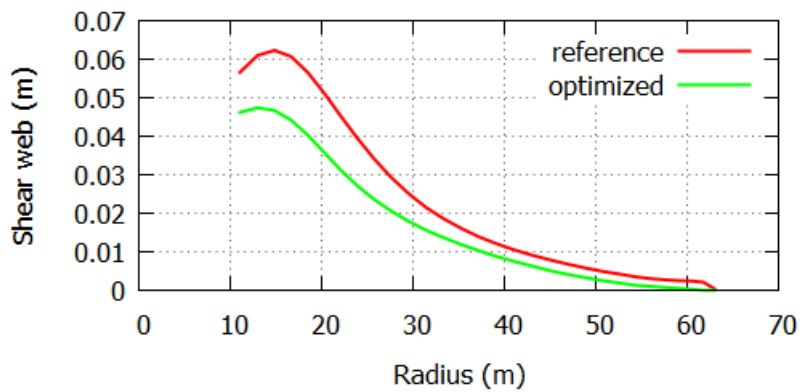
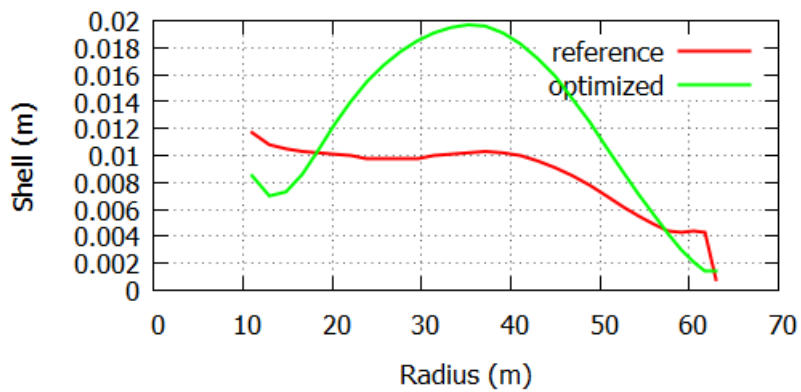
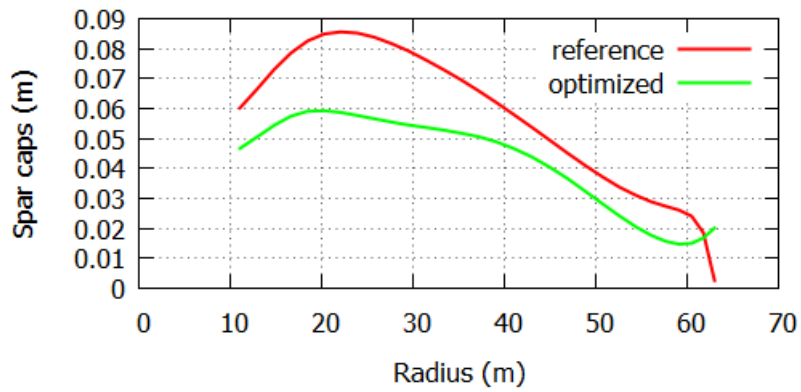
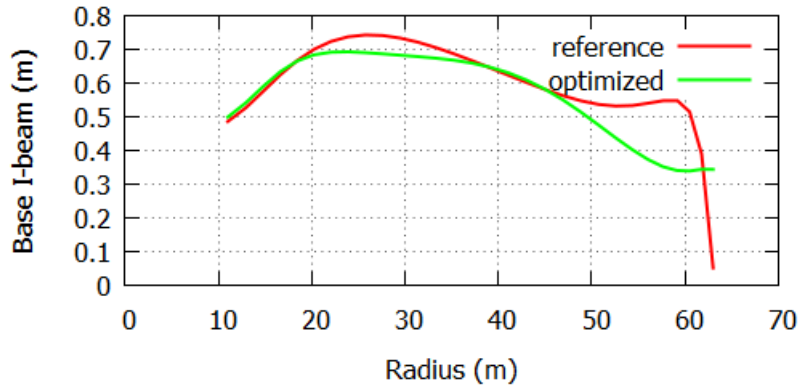
| | Cost Function | Constraints | | | | |
|-------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| | C_p | m (kg) | $M_{f,ROOT}$ (kN · m) | σ_{max} (kN/m ²) | $\sigma_{f,max}$ (kN/m ²) | M_U^* (m ³) |
| Πτερύγιο αναφοράς | 0.49245 | 13,041.8 | 8,422.34 | 81,746.45 | 57,546.81 | 5,808.44 |
| Βέλτιστο πτερύγιο | 0.50077 | 12,881.2 | 8,044.58 | 77,327.52 | 56,984.84 | 5,731.98 |

Πίνακας 4.9 Αποτελέσματα του 3^{ου} σταδίου βελτιστοποίησης (5 MW - 5 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)

Παρατηρώντας κανείς τις νέες τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού και ειδικότερα εκείνες της χορδής, είναι εμφανές πως πράγματι ο 5^{ος} περιορισμός οδηγεί σε ένα πτερύγιο με ελαφρώς μικρότερη επιφάνεια. Άλλωστε, αυτός είναι και ο σκοπός διεξαγωγής αυτού του 3^{ου} σταδίου. Με αυτό το τρόπο εξασφαλίζεται η αντοχή του δρομέα στις ακραίες συνθήκες που περιγράφονται προηγουμένως. Η γενικότερη μορφή, όμως, του πτερυγίου παραμένει σταθερή (Διάγραμμα 4.21 και Διαγραμμα 4.22).

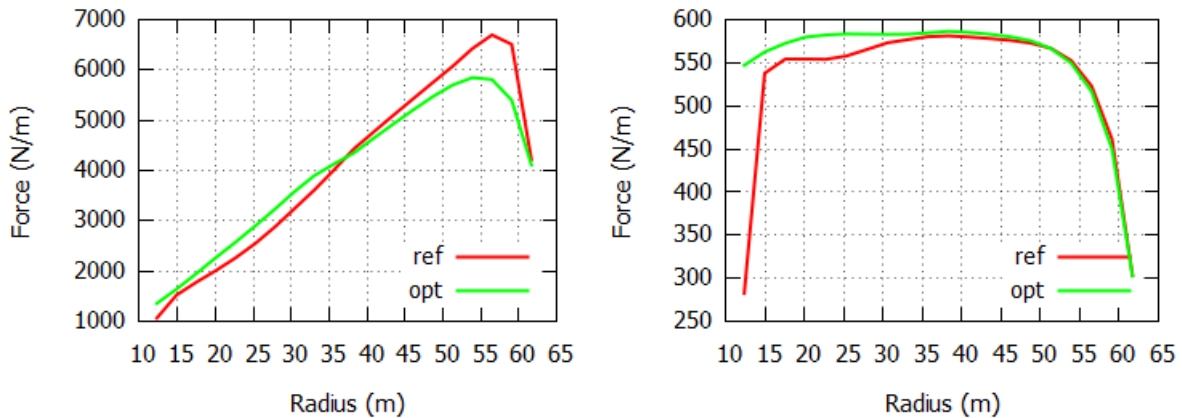


Διάγραμμα 4.21 [ΠΑΝΩ] Κατανομή χορδής βέλτιστου και πτερυγίου αναφοράς, [ΚΕΝΤΡΟ] Αντίστοιχη κατανομή συστροφής, [ΚΑΤΩ] Αντίστοιχη κατανομή αδιάστατου πάχους (5 MW - 5 constraints - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$)

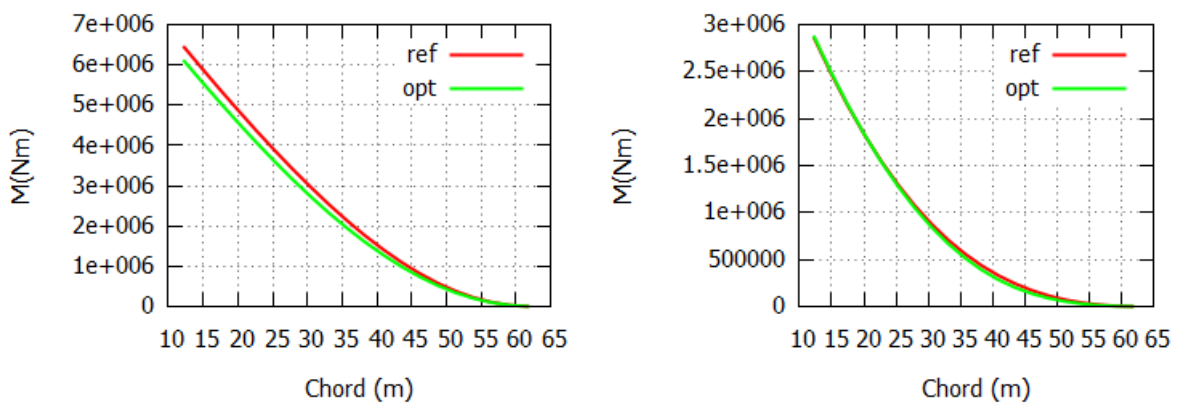


Διάγραμμα 4.22 [ΠΑΝΩ] Κατανομή του μήκους της βάσης του I-beam, [ΠΑΝΩ-KENTPO]
 Κατανομή πάχους των Spar Caps, [ΚΑΤΩ-KENTPO], Κατανομή πάχους του κελύφους, [ΚΑΤΩ]
 Κατανομή πάχους του Shear web (5 MW - 5 constraints - $\Omega R = 80 \text{ m/s}$)

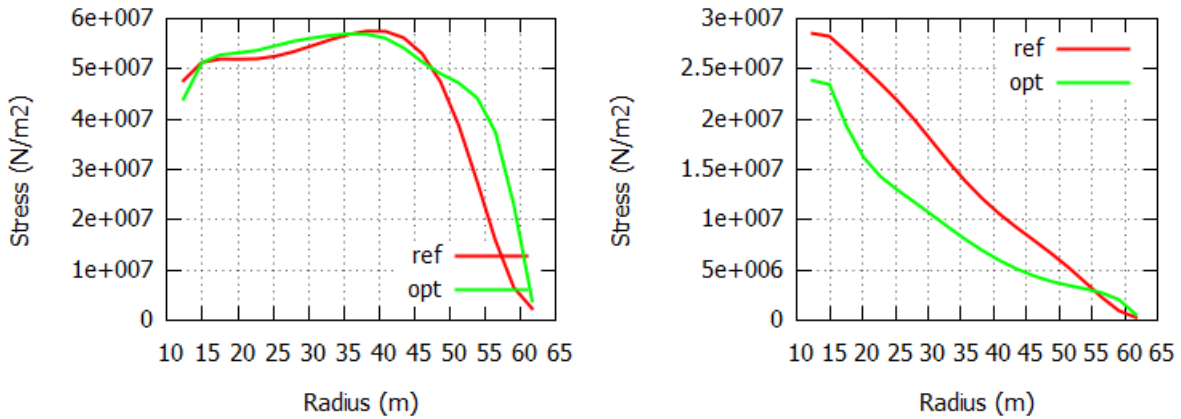
Τέλος, οι φορτίσεις αυτού του νέου περυγίου παρατηρείται να βρίσκονται στα ίδια φυσιολογικά επίπεδα με αυτές του περυγίου αναφοράς, όπως συμβαίνει και στο περύγιο που προκύπτει κατά το 2^ο στάδιο βελτιστοποίησης (Διάγραμμα 4.23 έως Διάγραμμα 4.27). Αυτό, άλλωστε, ήταν κάτι που αναμενόταν, με βάση τη μορφή του δρομέα, δεδομένου ότι αυτή δεν αλλάζει σημαντικά.



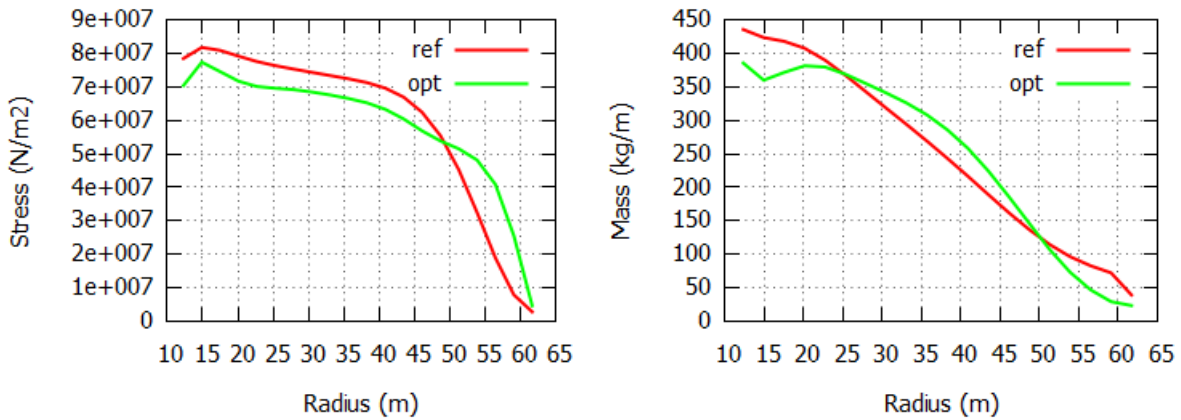
Διάγραμμα 4.23 [ΑΡΣΤΕΡΑ] Κατανομή της δύναμης κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή εφαπτομενικής δύναμης (5 MW - 5 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)



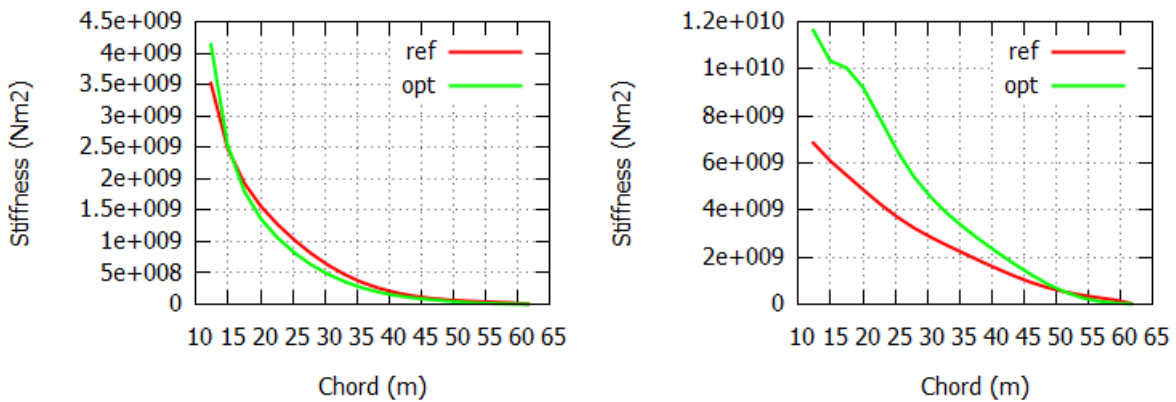
Διάγραμμα 4.24 [ΑΡΣΤΕΡΑ] Κατανομή της ροπής κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή ροπής κατά edgewise (5 MW - 5 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)



Διάγραμμα 4.25 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Μέγιστη τάση κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Μέγιστη τάση κατά edgewise (5 MW - 5 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)



Διάγραμμα 4.26 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Συνολική μέγιστη τάση, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή μάζας (5 MW - 5 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)



Διάγραμμα 4.27 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Κατανομή δυσκαμψίας κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή δυσκαμψίας κατά edgewise (5 MW - 5 constraints - $\Omega R = 80$ m/s)

4.3.3 Συμπεράσματα

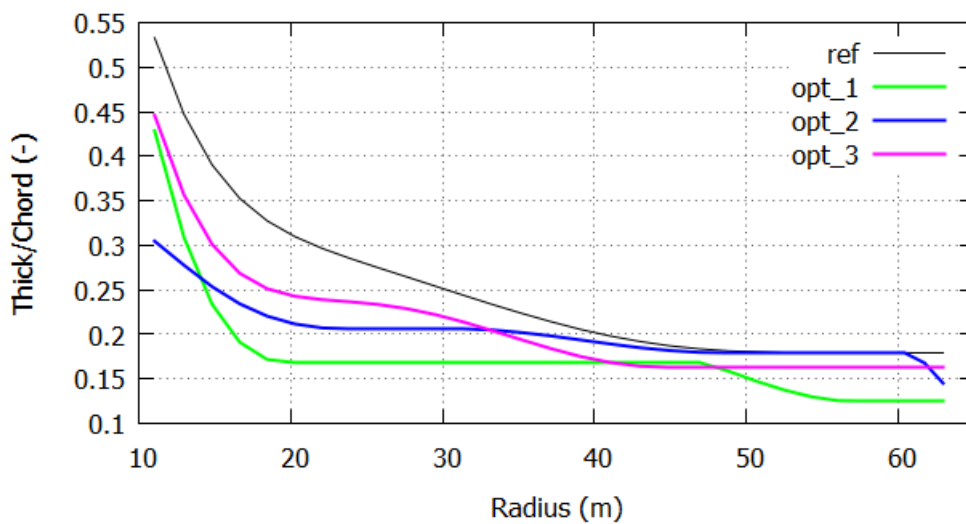
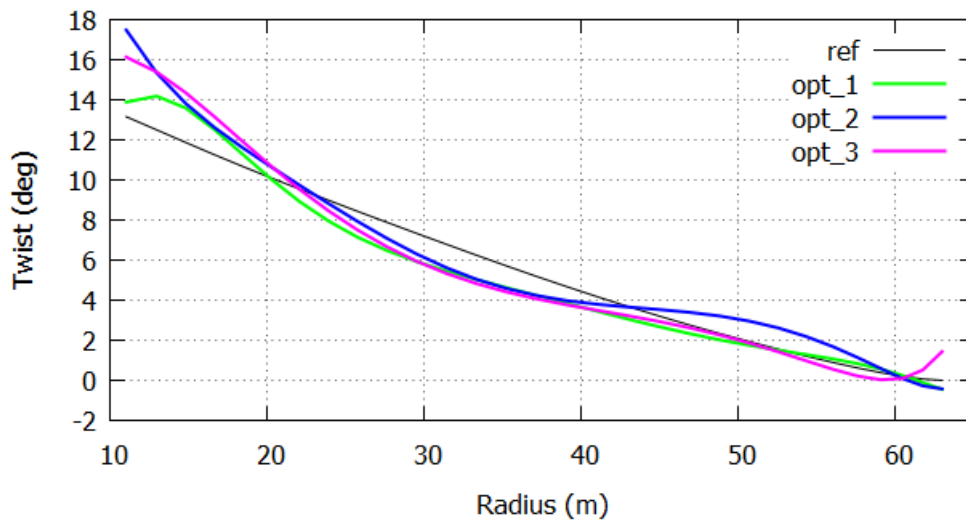
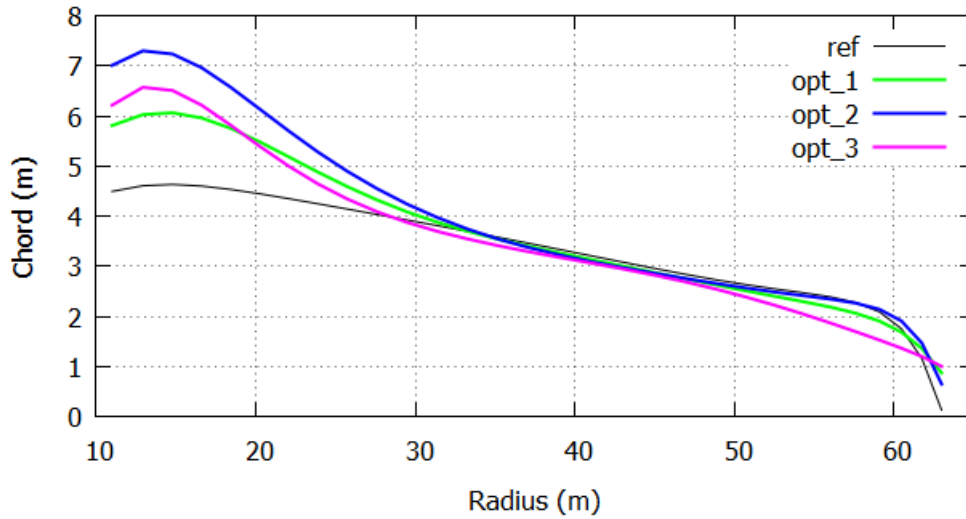
Η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προηγούμενης παραγράφου δίνει την δυνατότητα για εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την βελτιστοποίηση των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας και τις τάσεις οι οποίες ενδείκνυται να ακολουθούνται κατά τη διαδικασία σχεδιάσής τους. Για το λόγο αυτό, στη συγκεκριμένη παράγραφο καταγράφονται τα σημαντικότερα από αυτά.

Ο απώτερος σκοπός αυτής της μελέτης είναι η μεγιστοποίηση του C_p . Όπως, λοιπόν, αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται. Μία συνοπτική παρουσίαση της βελτιστοποίησης παρατίθεται στον Πίνακα 4.10.

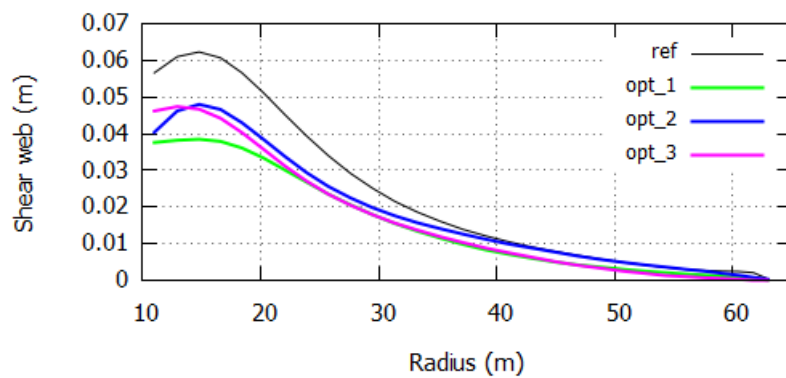
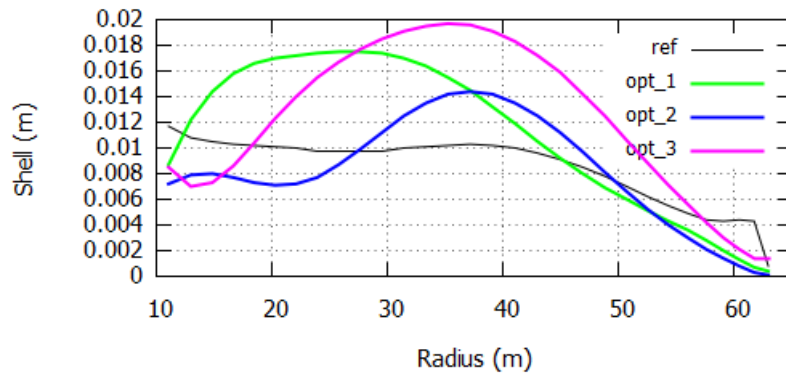
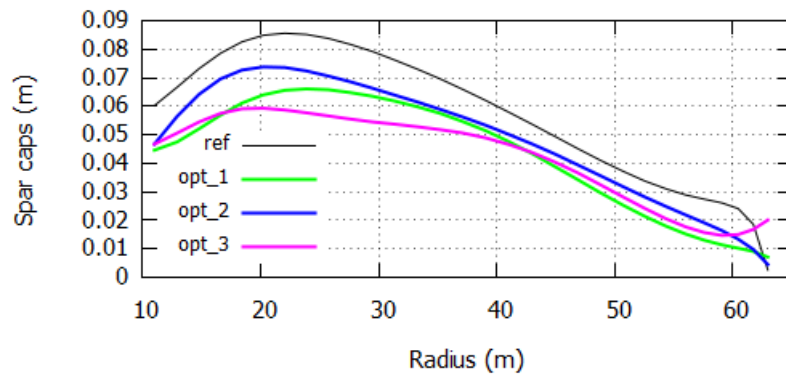
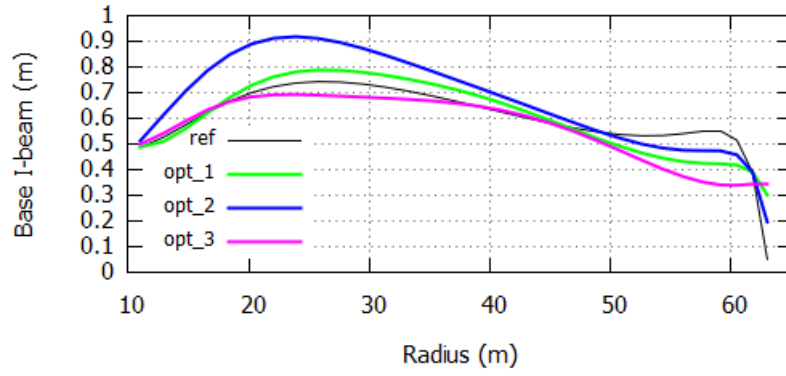
| Αποτελέσματα του <i>Cost Function</i> για κάθε στάδιο | | |
|--|---------|---------------------|
| <i>Πτερύγιο</i> | C_p | <i>Μεταβολή (%)</i> |
| Πτερύγιο αναφοράς | 0.49245 | - |
| 1 ^ο στάδιο βελτιστοποίησης | 0.50417 | 2.38 |
| 2 ^ο στάδιο βελτιστοποίησης | 0.50093 | 1.72 |
| 3 ^ο στάδιο βελτιστοποίησης | 0.50077 | 1.69 |

Πίνακας 4.10 Οι τιμές του συντελεστή ισχύος για κάθε στάδιο βελτιστοποίησης και οι αντίστοιχες ποσοστιαίες μεταβολές

Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα όλες οι κατανομές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που αποδίδουν τις βέλτιστες τιμές του C_p , προκειμένου να εξεταστεί η ενδεχόμενη ύπαρξη κοινών τάσεων (trend) των μεταβολών (Διάγραμμα 4.28 και Διάγραμμα 4.29).

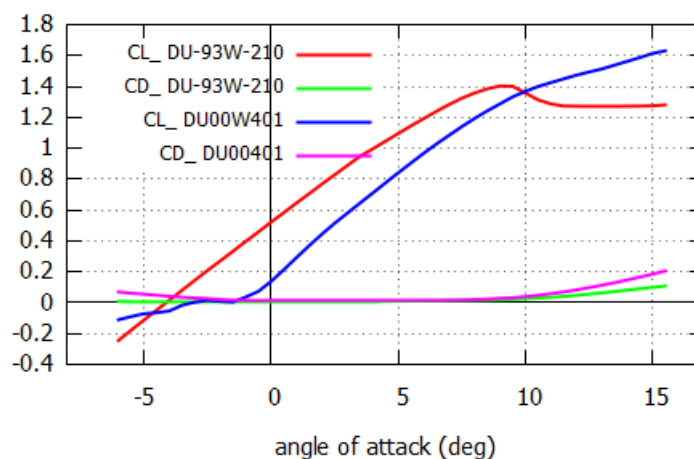


Διάγραμμα 4.28 [ΠΑΝΩ] Κατανομές χορδής βέλτιστων πτερυγίων και πτερυγίου αναφοράς [ΚΕΝΤΡΟ] Αντίστοιχες κατανομές συστρώσης, [ΚΑΤΩ] Αντίστοιχες κατανομές αδιάστατου πάχους



Διάγραμμα 4.29 [ΠΑΝΩ] Κατανομές του μήκους της βάσης του I-beam για βέλτιστα πτερύγια, [ΠΑΝΩ-ΚΕΝΤΡΟ] Αντίστοιχες κατανομές πάχους των Spar Caps, [ΚΑΤΩ-ΚΕΝΤΡΟ], Αντίστοιχες κατανομές πάχους του κελύφους, [ΚΑΤΩ] Αντίστοιχες κατανομές πάχους του Shear web

Η κυριότερη διαπίστωση, με βάση τα προηγούμενα διαγράμματα, σχετίζεται με το πάχος των αεροτομών. Είναι ξεκάθαρο πως και στα τρία στάδια βελτιστοποίησης οι τιμές του αδιάστατου πάχους του πτερυγίου (ως προς τη χορδή) είναι σημαντικά ελαττωμένες κατά μήκος της ακτίνας σε σχέση με αυτές του πτερυγίου αναφοράς. Αυτό, άλλωστε, ήταν αναμενόμενο. Πιο συγκεκριμένα, οι αεροτομές που αντιστοιχούν σε λεπτότερα πάχη έχουν μεγαλύτερους λόγους άνωσης προς αντίσταση C_L/C_D συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης α , άρα και βελτιωμένη αεροδυναμική απόδοση. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται στη συνέχεια οι καμπύλες C_L , C_D για δύο αεροτομές που αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικά πάχη (Διάγραμμα 4.30). Με τις νέες κατανομές πάχους, το προφίλ του δρομέα δημιουργείται πλέον με τις αποδοτικότερες αεροτομές διανεμημένες από μικρότερες ακτίνες και πέρα. Με αυτό τον τρόπο, ένα μεγάλο τμήμα του πτερυγίου συμβάλλει περισσότερο απ' ό,τι πριν κατά τον υπολογισμό της ισχύος μέσω της Θεωρίας Στοιχείων Πτερυγώσης (Blade Element Method). Γι' αυτό το λόγο, άλλωστε, είναι εμφανές πως η χορδή τείνει να μεγαλώσει κοντά στη ρίζα του πτερυγίου. Ο συνδυασμός αυτών των δύο οδηγεί στην αύξηση του C_p .



Διάγραμμα 4.30 Συντελεστής άνωσης και αντίστασης της αεροτομής *DU-93W-210* (για σχετικό πάχος 21%) και της αεροτομής *DU00401* (για σχετικό πάχος 40%)

Όσον αφορά την εσωτερική δομή του υπο-βελτιστοποίηση πτερυγίου, είναι εμφανές πως ενώ το μήκος της βάσης του I-beam και το πάχος των δοκών-κάλυμα (spar caps) παραμένουν σχεδόν στα ίδια επίπεδα, το πάχος της δοκού διάτμησης (shear web) μειώνεται. Παράλληλα, το πάχος του κελύφους (shell) αυξάνεται σημαντικά. Με αυτό τον τρόπο, άλλωστε, επιτυγχάνεται η αύξηση του I_{edge} , καθώς η κύρια συνιστώσα της δυσκαμψίας κατά την περιστροφή (edgewise) είναι το κέλυφος και όχι το I-beam. Η συγκεκριμένη αύξηση του I_{edge} αιτιολογείται στη συνέχεια.

Σε ότι έχει να κάνει με τις υπολογιζόμενες φορτίσεις, αυτό που είναι απαραίτητο να σημειωθεί είναι το γεγονός ότι η σημαντικότερη επίπτωση της δημιουργίας λεπτότερων πτερυγίων είναι η αύξηση των τάσεων. Αυτός είναι, άλλωστε, ο λόγος για τον οποίο 2 από τους *περιορισμούς* επιλέγεται να είναι τάσεις που εφαρμόζονται στο πτερύγιο. Αυτό που παρατηρεί κανείς είναι το γεγονός πως το λεπτότερο από τα 3 βέλτιστα πτερύγια (1^ο στάδιο) πράγματι οδηγεί σε

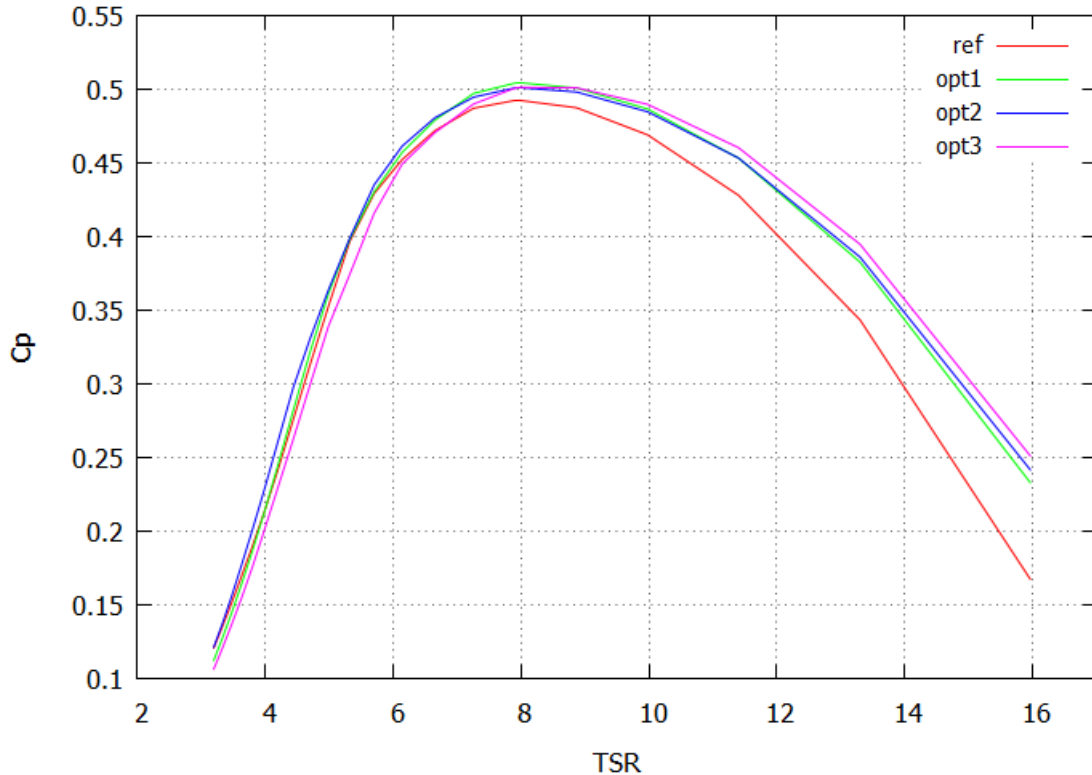
σημαντική αύξηση της μέγιστης τάσης κατά την πτερύγιση (flapwise) $\sigma_{f,max}$, παρ' ότι η μέγιστη συνολική τάση σ_{max} διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα. Τα αποτελέσματα, όμως, δείχνουν στη συνέχεια πως και η $\sigma_{f,max}$ μπορεί να διατηρηθεί στα ίδια επίπεδα παρά τα μικρότερα πάχη. Βέβαια, η μείωση του πάχους στο 2^ο και 3^ο στάδιο είναι μικρότερη σε σύγκριση με το 1^ο, αλλά η επίτευξη του στόχου, δηλαδή η μεγιστοποίηση του C_p , είναι εξισου ικανοποιητική.

Όσον αφορά τις δυσκαμψίες κατά την πτερύγιση (flapwise) και κατά την περιστροφή (edgewise), η τάση είναι προφανής. Με τις προκύπτουσες δομές παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστη η πρώτη (EI_{flap}), ενώ η δεύτερη (EI_{edge}) αυξάνεται σημαντικά. Αν συνυπολογίσει κανείς πως το μέτρο ελαστικότητας E θεωρείται σταθερό και ίσο με $30 \cdot 10^9 Pa$, προκύπτει πως η δυσκαμψία είναι ανάλογη μόνο της ροπής αδράνειας. Με βάση αυτό μπορεί να δικαιολογήσει κανείς αυτή τη μεγάλη αύξηση της EI_{edge} . Η ροπή αδράνειας κατά την περιστροφή (edgewise) I_{edge} είναι αναπόφευκτο να αυξάνεται διότι έτσι οδηγεί σε μικρότερες μέγιστες τάσεις κατά την περιστροφή (edgewise) $\sigma_{e,max}$, βάσει του τύπου:

$$\sigma_{e,max} = \frac{M_e}{I_{edge}} \cdot x_{max}$$

όπου M_e : η ροπή κατά την πτερύγιση (edgewise) και x_{max} : η μέγιστη απόσταση κατά τον άξονα των x . Προκειμένου, λοιπόν, να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί των δύο τάσεων $\sigma_{f,max}$ και σ_{max} και δεδομένου ότι τα πάχη είναι μικρότερα από αυτά του πτερυγίου αναφοράς, είναι αναγκαίο να μειωθεί η άλλη συνιστώσα της μέγιστης συνολικής τάσης, δηλαδή η $\sigma_{e,max}$. Διαφορετικά, θα ήταν αδύνατη η δημιουργία πτερυγίων μικρότερου πάχους. Με βάση τη θεωρία της αερολαστικότητας, αυτή η αύξηση της EI_{edge} οδηγεί σε μεγαλύτερες edge ιδιοσυχνότητες.

Η μεγιστοποίηση του συντελεστή ισχύος για tip speed ratio $\lambda = 7.93$ με δεδομένη γωνιακή ταχύτητα δρομέα $\Omega = 1.267 rad/s$, δε σημαίνει απαραίτητα πως τα πτερύγια που προκύπτουν εμφανίζουν το μέγιστο C_p σε όλο το εύρος ταχυτήτων για τη συγκεκριμένη γωνιακή ταχύτητα. Αυτό, άλλωστε, είναι εμφανές από το διάγραμμα καμπυλών $C_p - \lambda$, για γωνιακή ταχύτητα $\Omega = 1.267 rad/s$ (Διάγραμμα 4.31).

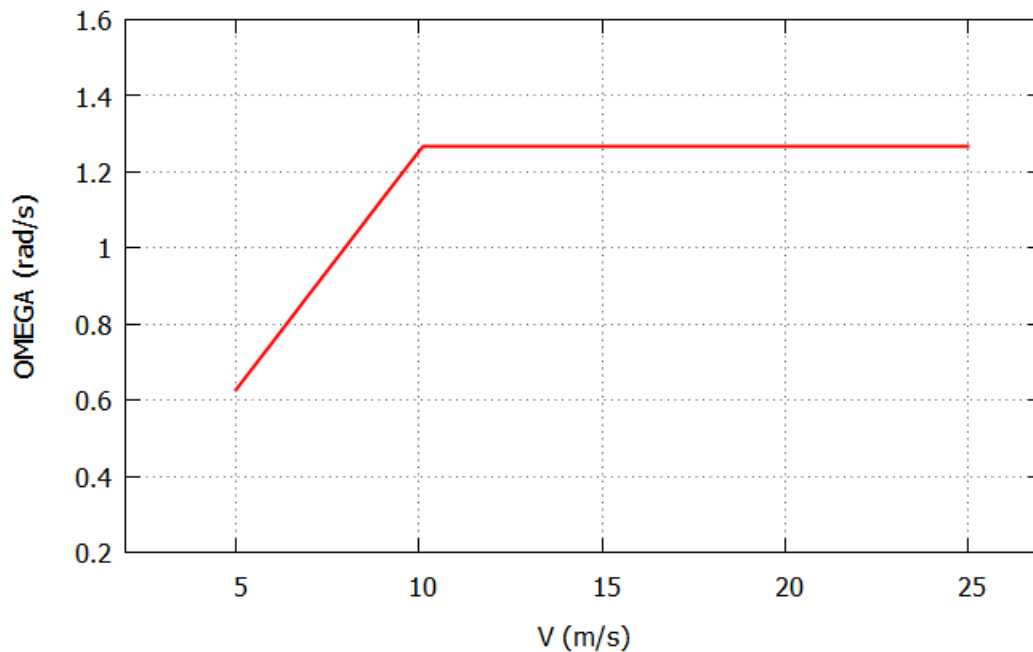


Διάγραμμα 4.31 Τιμές του συντελεστή ισχύος συναρτήσει του tip speed ratio των τεσσάρων πτερυγίων, για σταθερή γωνιακή ταχύτητα δρομέα $\Omega = 1.267 \text{ rad/s}$

Παρ' όλα αυτά, η ουσία της βελτιστοποίησης σε συγκεκριμένο σημείο (single point optimization) είναι να βρεθεί η μέγιστη τιμή του C_p έτσι ώστε η variable speed ανεμογεννήτρια να λειτουργεί μέχρι την ταχύτητα $V = 10.1 \text{ m/s}$, λόγω του περιορισμού με βάσει τους κανονισμούς για on-shore ανεμογεννήτριες $\omega R = 80 \text{ m/s}$, με μέγιστο C_p . Ο περιορισμός προκύπτει θεωρώντας πως $\Omega_R = 1.267 \text{ rad/s}$, όπως ισχύει και στο πτερύγιο αναφοράς. Ως εκ τούτου, η ανάλυση αυτή της βελτιστοποίησης στοχεύει σε αυτή την περίπτωση. Αναλυτικότερα, η αύξηση που διαπιστώνεται είναι σημαντική και άκρως υπολογίσιμη εάν υιοθετηθεί σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως για παράδειγμα σε ένα αιολικό πάρκο. Η καλύτερη απόδειξη αυτής της διαπίστωσης είναι ο υπολογισμός της μέσης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας (Annual Energy Production - AEP) κάθε variable speed ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιώντας σε κάθε μία ένα από τα τρία βέλτιστα πτερύγια και στη συνέχεια η σύγκριση αυτών των τιμών με την αντίστοιχη μέση παραγόμενη ενέργεια που αποδίδει η ανεμογεννήτρια με το πτερύγιο αναφοράς. Υποθέτοντας ότι όλες οι ανεμογεννήτριες είναι pitch-control από την ονομαστική ταχύτητα και πέρα (με ονομαστική ισχύ $P_R = 5,000 \text{ kW}$) και ότι το αιολικό δυναμικό είναι το ίδιο σε κάθε εφαρμογή (παράμετροι κατανομής Weibull: $k = 1,7$ και $c = 7$) προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.11.

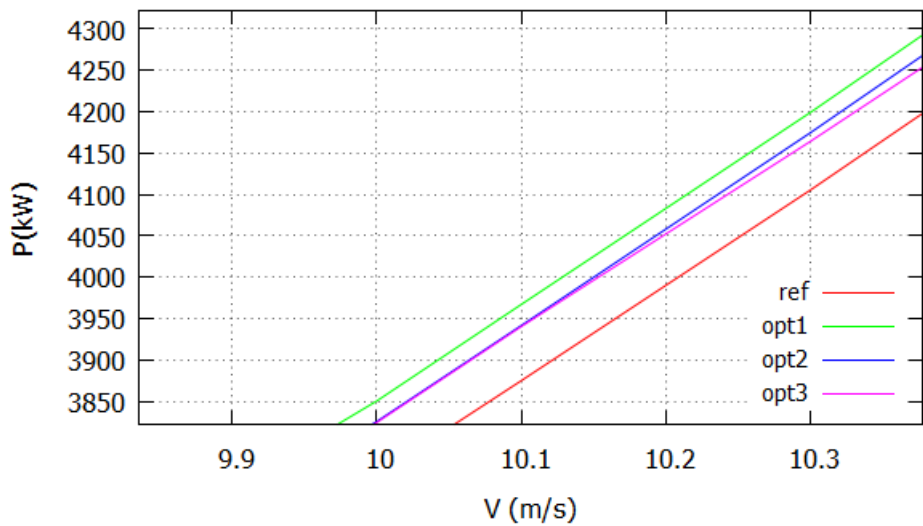
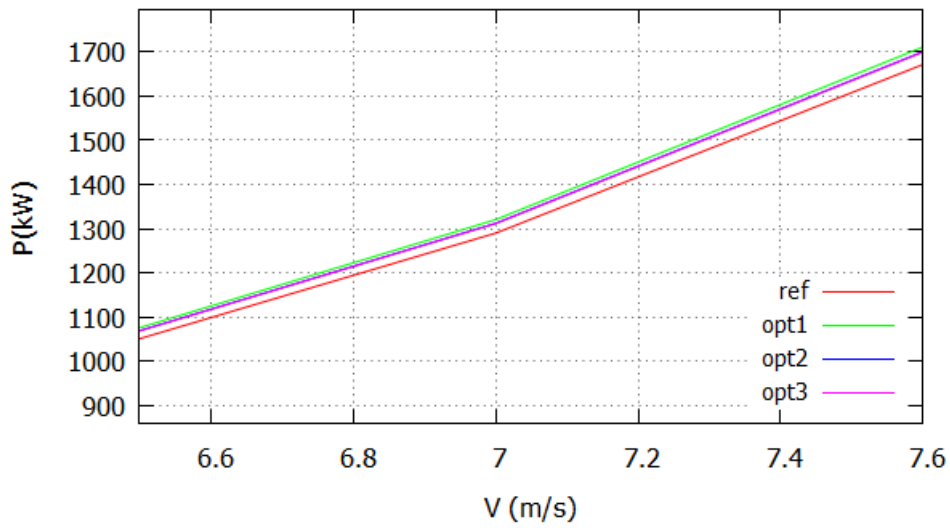
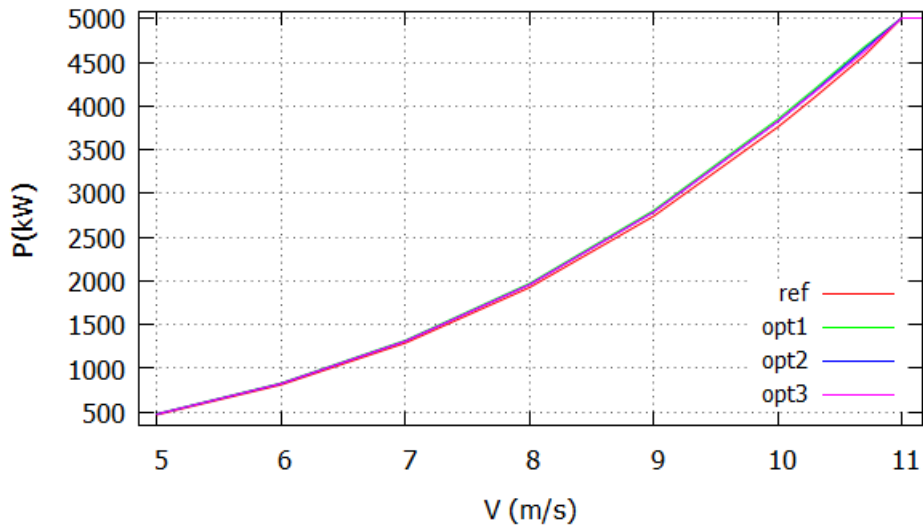
| Αποτελέσματα καμπύλης ισχύος ($V_{in} = 5 \text{ m/s}, V_{out} = 25 \text{ m/s}, \text{variable speed}$) | | | | |
|--|----------------|--------|------------|--------------|
| Πτερύγιο | \bar{P} (kW) | CF | E (kWh) | Μεταβολή (%) |
| Πτερύγιο αναφοράς | 1407.3 | 0.2815 | 12,327,638 | - |
| 1 ^ο στάδιο βελτιστοποίησης | 1426.0 | 0.2852 | 12,491,707 | 1.331 |
| 2 ^ο στάδιο βελτιστοποίησης | 1420.9 | 0.2842 | 12,446,696 | 0.953 |
| 3 ^ο στάδιο βελτιστοποίησης | 1420.1 | 0.2840 | 12,439,812 | 0.901 |

Πίνακας 4.11 Μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια ανά ώρα \bar{P} , συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας CF, μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια για ανεμογεννήτρια με τα παραπάνω πτερύγια E και αντίστοιχη ποσοστία αύξηση



Διάγραμμα 4.32 Γωνιακή ταχύτητα του δρομέα συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (κοινή για όλα τα πτερύγια)

Μάλιστα, τα τελικά νούμερα θα μπορούσαν να ήταν ακόμη μεγαλύτερα, εάν δεν υπήρχε ο περιορισμός του $\omega R = 80 \text{ m/s}$ με αποτέλεσμα το εύρος μεταβλητής ταχύτητας να επεκτείνεται μέχρι και την ονομαστική ταχύτητα. Οι καμπύλες ισχύος, που παρουσιάζονται παρακάτω, φαίνεται με μια πρώτη ματιά να μη διαφέρουν κατά πολύ. Με μία προσεκτικότερη, όμως, σύγκριση μπορεί κανείς να εντοπίσει τις διαφορές μεταξύ των καμπυλών στο διάστημα από τα 5 m/s μέχρι και την ονομαστική ταχύτητα (Διάγραμμα 4.33).



Διάγραμμα 4.33 Καμπύλη ισχύος για τα τέσσερα διαφορετικά πτερύγια (πτερύγιο αναφοράς και πτερύγια των 3 σταδίων) με μεταβλητή γωνιακή ταχύτητα δρομέα Ω

Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνει κανείς πως ακόμη και στη χειρότερη περίπτωση βελτιστοποίησης, όπου η αύξηση του ΑΕΡ είναι μόλις 0.9% (3^ο στάδιο βελτιστοποίησης) , τα οφέλη είναι υπολογίσιμα. Το σημαντικότερο στοιχείο είναι το γεγονός πως η μάζα διατηρείται στα ίδια επίπεδα, με αποτέλεσμα τα κόστη κατασκευής του πτερυγίου να μην αυξάνονται (εάν θεωρήσει κανείς πως ο μεγαλύτερος παράγοντας κόστους του πτερυγίου είναι η μάζα). Συνεπώς, αυτό το ποσοστό μπορεί να μεταφραστεί με οικονομικούς όρους ως εξής:

Έστω, λοιπόν, πως ένα αιολικό πάρκο αποτελείται από 10 όμοιες ανεμογεννήτριες, οι οποίες χρησιμοποιούν το πτερύγιο του 3^{ου} σταδίου. Τότε, αυτό το πάρκο παράγει 1,121,743 kWh περισσότερες σε σύγκριση με το ίδιο πάρκο, του οποίου οι ανεμογεννήτριες αποτελούνται από το πτερύγιο αναφοράς. Θεωρώντας ως τιμή πώλησης της ενέργειας 0.087 €/kWh, τότε τα ετήσια έσοδα μπορούν να ανέλθουν μέχρι και σε 100,000 €. Άρα με δεδομένη μία διάρκεια ζωής του πάρκου τουλάχιστον 15 ετών, είναι προφανές πως τα επιπρόσθετα οφέλη είναι σημαντικά.

Σημειώνεται, όμως, πως το παραπάνω παράδειγμα είναι ενδεικτικό και παράλληλα προσεγγιστικό, καθώς δε λαμβάνει υπόψη παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, όπως η επίδραση του ομόρρου στο πάρκο, η φορολόγηση του εισοδήματος κλπ.

4.4 Βελτιστοποίηση με περιορισμούς - $\Omega R > 80 \text{ m/s}$

4.4.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Θεωρώντας πως η ανάλυση που προηγήθηκε είναι αρκετή για την εξαγωγή των βασικότερων συμπερασμάτων σύμφωνα με τις προηγούμενες παραμέτρους βελτιστοποίησης, η συνέχεια της μελέτης οδηγεί στη διερεύνηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς ενός πτερυγίου με μεγαλύτερο ΩR . Μία τέτοια αλλαγή έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος, μεγαλύτερο λ_{opt} και μικρότερη στερεότητα (solidity) [7]. Μέχρι και την προηγούμενη παράγραφο, αυτό το μέγεθος παρέμενε σταθερό και ίσο με 80 m/s , δεδομένου ότι η ακτίνα του πτερυγίου δεν αποτελούσε μεταβλητή σχεδιασμού, ενώ και η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα θεωρούταν σταθερή και ίση με 1.267 rad/s . Σε αυτή την παράγραφο, όμως, εξετάζονται οι αλλαγές που προκύπτουν εάν θεωρηθεί ως ανώτατο όριο αυτού του μεγέθους η τιμή 90 m/s , διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα περιστροφής $\Omega = 1.267 \text{ rad/s}$. Συνεπώς, η αύξηση του ΩR προέρχεται μόνο από την αύξηση της ακτίνας.

Οι μεταβλητές σχεδιασμού της βελτιστοποίησης παραμένουν οι ίδιες με τη διαφορά ότι, πλέον, προστίθεται σε αυτές και η ακτίνα του πτερυγίου (Πίνακας 4.12). Όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις, ως είσοδο χρησιμοποιούνται 9 τιμές της κάθε μεταβλητής, διανεμημένες σε σταθερά σημεία κατά μήκος της ακτίνας και οι αντίστοιχες κατανομές κατασκευάζονται με χρήση καμπυλών B-Splines. Είναι προφανές πως για να διασφαλιστεί η τήρηση του ορίου των 90 m/s , το λογισμικό βελτιστοποίησης έχει ελευθερία επιλογής σε ότι αφορά την τιμή της ακτίνας από 63 m μέχρι και $90/1.267 = 71 \text{ m}$.

| <i>Design Variable</i> | Επεξήγηση |
|------------------------|--|
| $2a/R_{tip}$ | Χορδή (αδιάστατη ως προς ακτίνα) |
| tw | Συστροφή |
| $th/2a$ | Πάχος αεροτομής (αδιάστατη ως προς τη χορδή) |
| $x/2a$ | Βάση I-beam (αδιάστατη ως προς τη χορδή) |
| y_1/x | Πάχος των spar caps (αδιάστατο ως προς τη βάση του I-beam) |
| b/x | Πάχος του κελύφους (αδιάστατο ως προς τη βάση του I-beam) |
| x_1/y_1 | Πάχος του shear web (αδιάστατο ως προς το πάχος των spar caps) |
| R_{tip} | Ακτίνα πτερυγίου |

Πίνακας 4.12. Περιγραφή των μεταβλητών σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης του πτερυγίου

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες βελτιστοποιήσεις, η βελτιστοποίηση αυτή δεν είναι δεν πραγματοποιείται για δεδομένο σημείο. Δεδομένου ότι το ΩR δεν είναι σταθερό και πως η μορφή του πτερυγίου αλλάζει σημαντικά, δεν ισχύει η αρχή σύμφωνα με την οποία πραγματοποιήθηκαν αυτές οι περιπτώσεις βελτιστοποίησης, δηλαδή ότι ο μέγιστος συντελεστής ισχύος οδηγεί σε μέγιστη παραγωγή ισχύος, ενώ παράλληλα δεν είναι γνωστό το σημείο όπου εμφανίζεται το μέγιστο C_p . Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η εύρεση εκείνου του σημείου μέχρι το οποίο είναι επιτρεπτή η ρύθμιση στροφών (δηλαδή εκείνη η ταχύτητα μέχρι την οποία η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με μέγιστο C_p - η συγκεκριμένη ταχύτητα θα αποκαλείται από αυτό το σημείο της Εργασίας και πέρα ως «ταχύτητα σχεδιασμού») με $\Omega_R = 1.267 \text{ rad/s}$ και η καταγραφή του συντελεστή ισχύος σε αυτή την ταχύτητα. Στη συνέχεια, έχοντας το υπολογιστικό εργαλείο καταγράψει αυτές τις τιμές ($C_{p,max}$, λ_{opt}) στην ταχύτητα σχεδιασμού, είναι σε θέση να δημιουργήσει τη νέα καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών (με $\Omega_R = 1.267 \text{ rad/s}$). Η ρύθμιση μπορεί να πραγματοποιείται από την ταχύτητα έναρξης μέχρι την ταχύτητα σχεδιασμού που έχει ήδη βρεθεί, ενώ στη συνέχεια η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με μικρότερες τιμές συντελεστή ισχύος μέχρις ότου επιτευχθεί η ονομαστική ισχύς. Η ονομαστική ισχύς είναι σε κάθε περίπτωση 5000 kW, ενώ η κατανομή Weibull είναι η ίδια που χρησιμοποιείται και στην Παράγραφο 4.3. Συνεπώς, η ενέργεια που θα προκύψει από την καμπύλη ισχύος και την κατανομή Weibull (από 5 m/s έως 25 m/s) αποτελεί τη *συνάρτηση κόστους* της βελτιστοποίησης. Με αυτό τον τρόπο επιλύονται τα ζητήματα που αναφέρονται και στην αρχή, δηλαδή πρώτον: η ταχύτητα σχεδιασμού δεν είναι πλέον εξαρχής γνωστή και δεύτερον: λόγω της διαφορετικής ακτίνας που μπορεί να επιλεγεί, δε συναπάγεται πως το μέγιστο C_p κάθε λύσης (κάθε πτερυγίου) αποδίδει τη μέγιστη παραγόμενη ενέργεια. Τέλος, σημειώνεται πως χρησιμοποιείται η ίδια οικογένεια αεροτομών, με τα ίδια αεροδυναμικά χαρακτηριστικά, όπως και προηγουμένως.

Όσον αφορά τους *περιορισμούς*, αυτά επιλέγονται να είναι τα ίδια με αυτά του 2^{ου} σταδίου βελτιστοποίησης της Παραγράφου 4.3, δηλαδή m , $M_{f,ROOT}$, σ_{max} και $\sigma_{f,max}$ (Πίνακας 4.31). Σε αυτό το σημείο, όμως, ζητούμενο αποτελεί η επιλογή της ταχύτητας για την οποία θα ελέγχονται οι φορτίσεις. Μέχρι στιγμής δεν υπήρχε τέτοιο πρόβλημα λόγω της βελτιστοποίησης σε δεδομένο σημείο (single point optimization). Σε αρχικό στάδιο επιλέγεται να ερευνούνται οι φορτίσεις στην ταχύτητα σχεδιασμού του κάθε ενός πτερυγίου που δημιουργεί το λογισμικό βελτιστοποίησης. Η συγκεκριμένη σκέψη δεν ήταν άτοπη δεδομένου ότι οι τιμές των ορίων των *περιορισμών* θα προέκυπταν και αυτές από την ταχύτητα σχεδιασμού του πτερυγίου αναφοράς. Γρήγορα, όμως, διαπιστώθηκε πως η συγκεκριμένη τεχνική δεν ήταν η ενδεδειγμένη καθώς η αύξηση του ΩR οδηγούσε σε μικρότερες ταχύτητες σχεδιασμού. Με αυτό τον τρόπο, το λογισμικό βελτιστοποίησης λάμβανε υπόψη τις φορτίσεις σε μικρότερες ταχύτητες σχεδιασμού από την ταχύτητα σχεδιασμού του πτερυγίου αναφοράς (π.χ. 8m/s αντί για 11m/s), με αποτέλεσμα αυτές να είναι εκ φυσικού μικρότερες και η τελική μορφή του πτερυγίου να μην είναι ρεαλιστική ως προς τη δομική ανάλυσή του. Για να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο ζήτημα επιλέγεται η σύγκριση των φορτίσεων να πραγματοποιείται στις δύο ονομαστικές ταχύτητες, με το σκεπτικό πως εκεί μεγιστοποιούνται οι φορτίσεις, ενώ στη συνέχεια λόγω της ρύθμισης ισχύος ελαττώνονται. Άρα, οι τιμές των *περιορισμών* είναι οι φορτίσεις του πτερυγίου αναφοράς στην ονομαστική ταχύτητα του 11 m/s και για το λόγο αυτό είναι ελαφρώς μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές της Παραγράφου 4.2. Παράλληλα, ο *περιορισμός* της μάζας επιλέγεται να είναι κατά 10% μεγαλύτερο από τη μάζα

του πτερυγίου αναφοράς. Σε αυτή την περίπτωση βελτιστοποίησης δε θα είχε νόημα να θεωρηθεί η ίδια τιμή της μάζας ως *περιορισμός*, διότι όπως είναι λογικό αύξηση της ακτίνας οδηγεί κατά πάσα πιθανότητα σε αύξηση και της μάζας.

| <i>Constraints</i> | |
|---------------------------------------|-----------|
| m (kg) | 14,346 |
| $M_{f,ROOT}$ (kN · m) | 9,386.2 |
| σ_{max} (kN/m ²) | 89,371.05 |
| $\sigma_{f,max}$ (kN/m ²) | 63,210.18 |

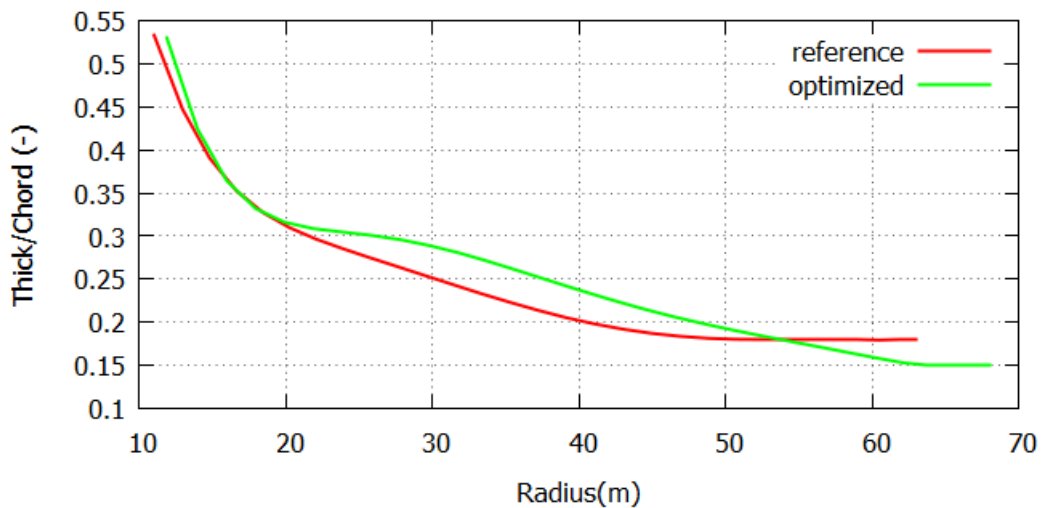
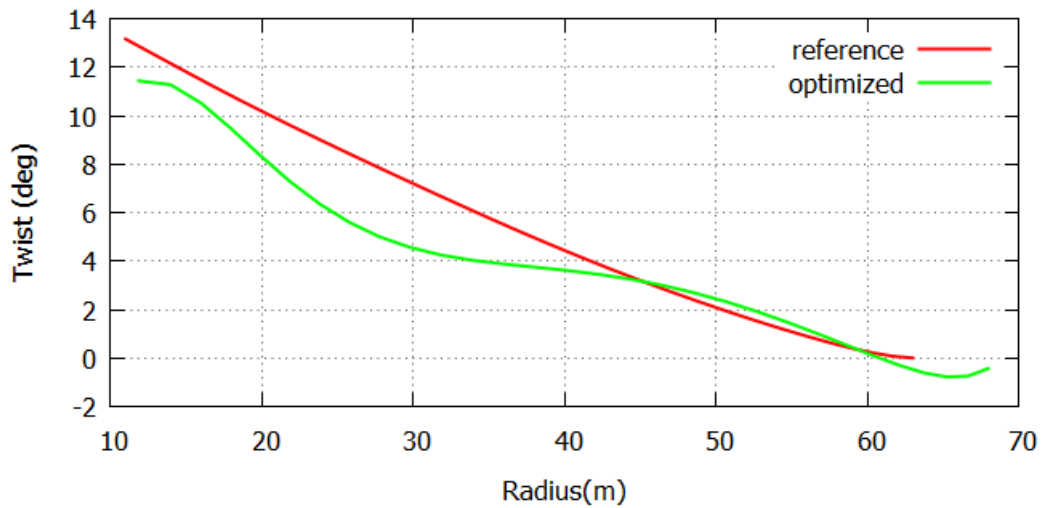
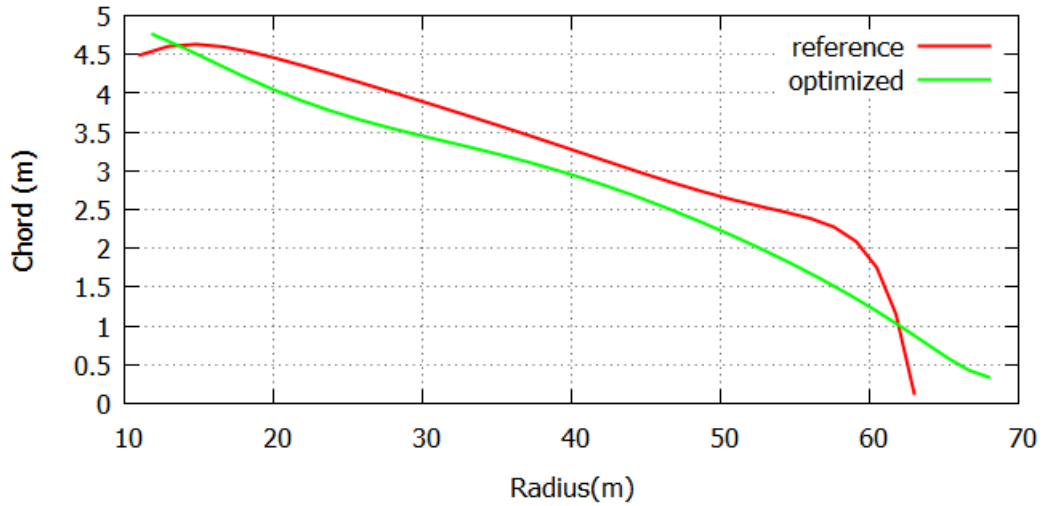
Πίνακας 4.13 Τιμές των *περιορισμών* που λαμβάνονται υπόψη κατά τη συγκεκριμένη περίπτωση βελτιστοποίησης (5 MW - 4 *constraints* - $\Omega R = 86.156$ m/s)

Τέλος, ισχύουν όλες οι παραδοχές που ισχύουν και στα στάδια βελτιστοποίησης της Παραγράφου 4.3, όπως για παράδειγμα η μελέτη του πτερυγίου και ο υπολογισμός όλων των εμπλεκόμενων μεγεθών μόνο στο αεροδυναμικό τμήμα του.

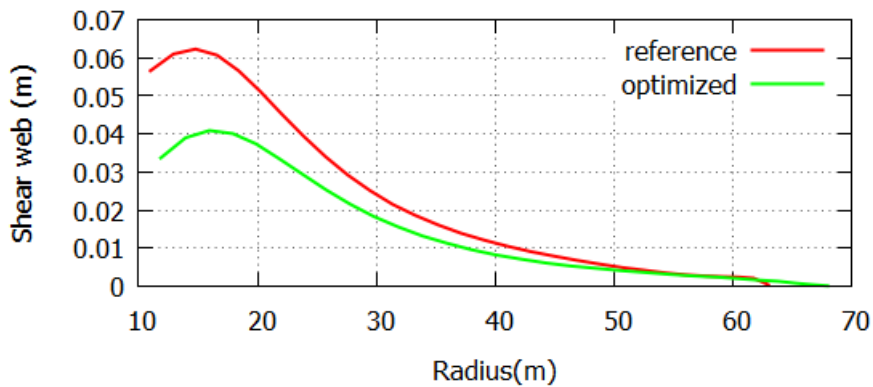
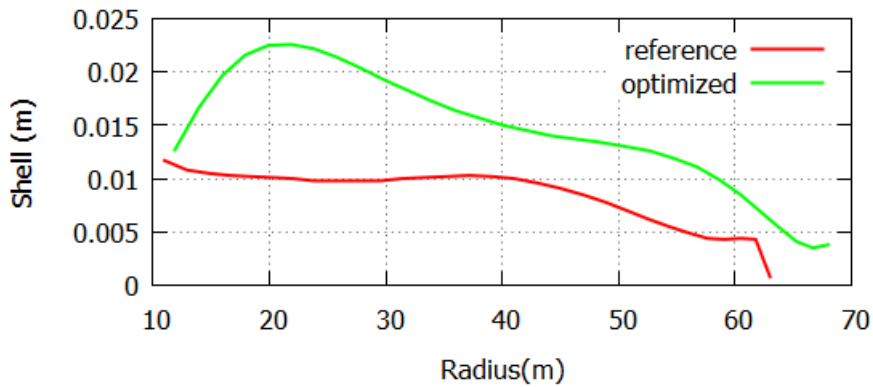
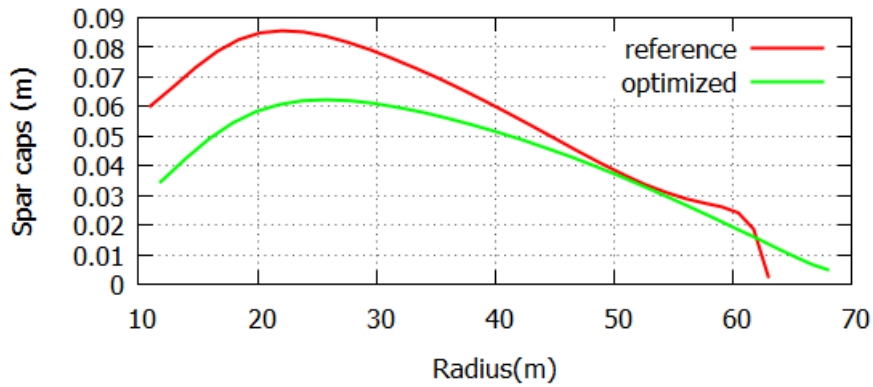
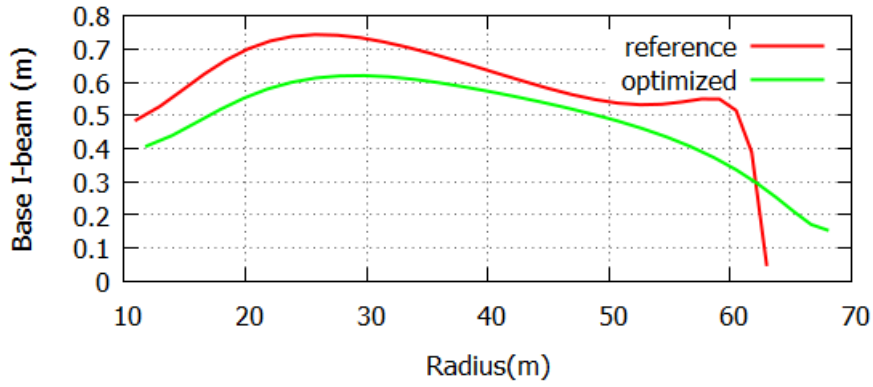
4.4.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Το λογισμικό βελτιστοποίησης οδηγεί όπως ήταν λογικό σε ένα πτερύγιο μεγαλύτερης ακτίνας, $R_{tip} = 68$ m, δηλαδή αύξηση της κατά 7.93%. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ΩR από 80 m/s σε 86.156 m/s. Παράλληλα, προκειμένου να διατηρηθεί η αύξηση της μάζας στο όριο του 10%, είναι προφανές πως χρειάζεται να προκύψει ένα πτερύγιο με μικρότερη χορδή. Συνεπώς, η αύξηση του πάχους του είναι αναγκαία έτσι ώστε να μην παρατηρηθούν ακραίες φορτίσεις. Όλες οι παραπάνω διαπιστώσεις είναι εμφανείς στα διαγράμματα που ακολουθούν και περιγράφουν την εξωτερική γεωμετρία του πτερυγίου (Διάγραμμα 4.34).

Όσον αφορά τη μορφή του I-beam, είναι ξεκάθαρο πως το πάχος του κελύφους του πτερυγίου αυξάνεται σημαντικά. Αντίθετα, όλες οι διαστάσεις του I-beam μειώνονται. Τόσο το μήκος της βάσης των spar caps και το πάχος τους, όσο και το πάχος του shear web είναι εμφανώς μικρότερα. Άλλωστε, δε θα μπορούσε να γίνει διαφορετικά αν υποθέσει κανείς πως η αύξηση του πάχους του πτερυγίου, σε συνδυασμό με την αύξηση του πάχους του κελύφους οδηγούν σε μία μεγάλη αύξηση της συνολικής μάζας. Για το λόγο αυτό, λοιπόν, το I-beam είναι απαραίτητο να μικρύνει σε τέτοιο βαθμό έτσι ώστε να μην αυξηθεί η τιμή της μάζας πάνω από αυτή του *περιορισμού*. Η νέα μορφή της εσωτερικής δομής, αλλά και του πάχους του κελύφους παρουσιάζονται στη συνέχεια (Διάγραμμα 4.35).

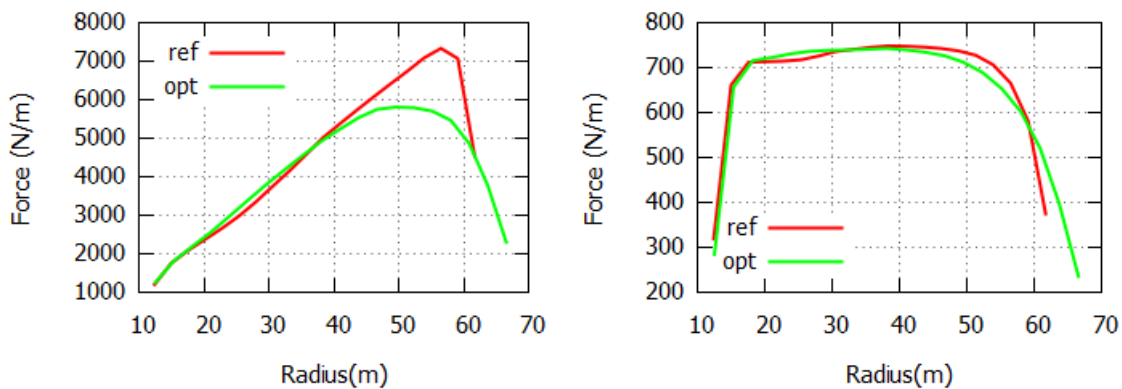


Διάγραμμα 4.34 [ΠΑΝΩ] Κατανομή χορδής βέλτιστου και πτερυγίου αναφοράς, [ΚΕΝΤΡΟ] Αντίστοιχη κατανομή συστροφής, [ΚΑΤΩ] Αντίστοιχη κατανομή αδιάστατου πάχους, (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$)

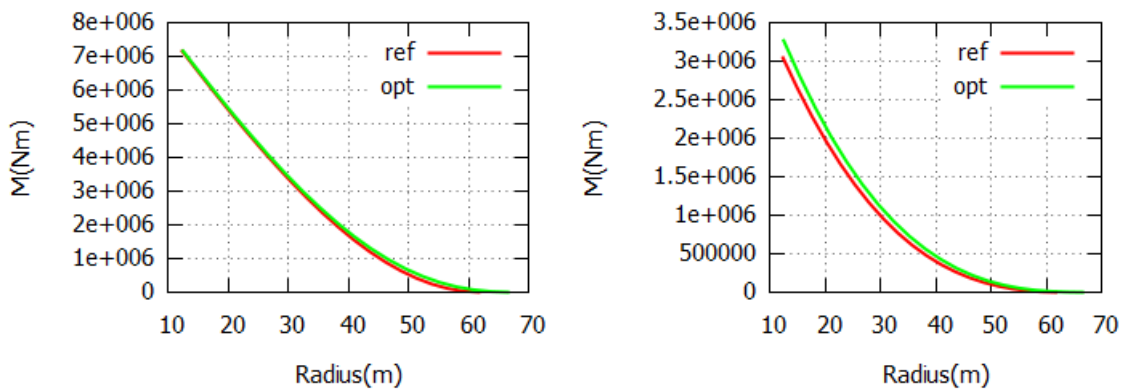


Διάγραμμα 4.35 [ΠΑΝΩ] Κατανομή του μήκους της βάσης του I-beam, [ΠΑΝΩ-ΚΕΝΤΡΟ] Κατανομή πάχους των Spar Caps, [ΚΑΤΩ-ΚΕΝΤΡΟ], Κατανομή πάχους του κελύφους, [ΚΑΤΩ] Κατανομή πάχους του Shear web (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$)

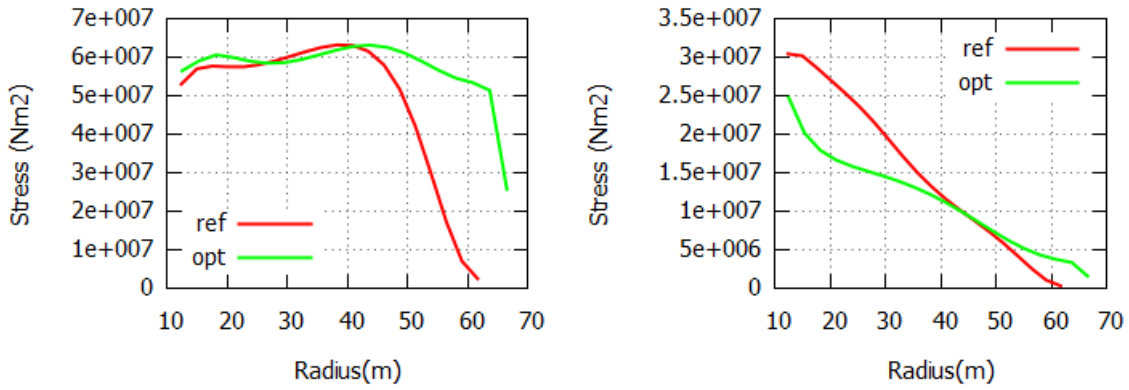
Με τη γεωμετρία που προκύπτει από το λογισμικό βελτιστοποίησης και παρουσιάστηκε προηγουμένως, οι φορτίσεις που υπολογίζονται διατηρούνται σε επιθυμητά πλαίσια, με βάση αυτές του πτερυγίου αναφοράς. Μάλιστα τόσο η ροπή στη ρίζα για την ονομαστική ταχύτητα είναι ελαφρώς μικρότερη από την αντίστοιχη του αναφοράς, 9,378.8 kNm έναντι 9,386.2 kNm, ενώ και η μάζα αυξάνεται κατά 4.73%, δηλαδή η ποσοστιαία αύξηση είναι αρκετά μικρότερη της μέγιστης επιτρεπτής 10% (νέα μάζα: 13,659.4 kg). Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα των φορτίσεων για $V = 11 \text{ m/s}$, δεδομένου ότι και τα δύο πτερύγια έχουν ονομαστική περίπου ίση με 11 m/s (Διάγραμμα 4.36 έως Διάγραμμα 4.40).



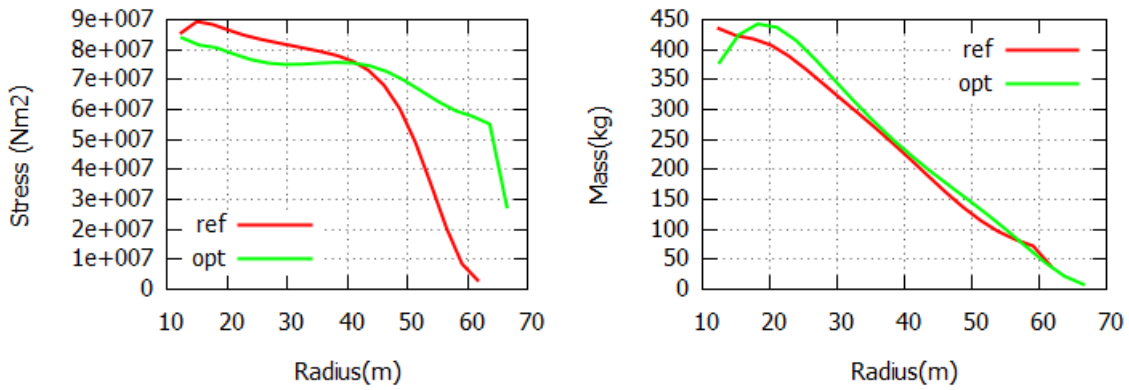
Διάγραμμα 4.36 [ΑΡΣΤΕΡΑ] Κατανομή της δύναμης κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή εφραπτομενικής δύναμης (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$ - $V = 11 \text{ m/s}$)



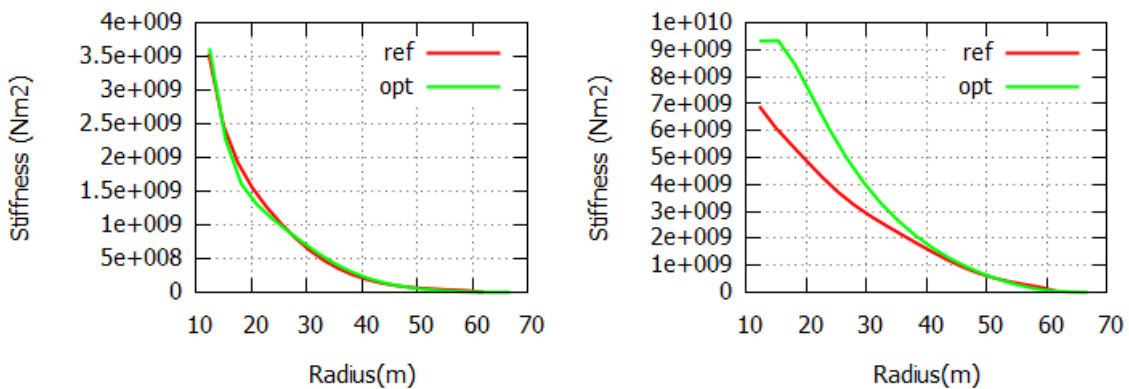
Διάγραμμα 4.37 [ΑΡΣΤΕΡΑ] Κατανομή της ροπής κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή ροπής κατά edgewise (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$ - $V = 11 \text{ m/s}$)



Διάγραμμα 4.38 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Μέγιστη τάση κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Μέγιστη τάση κατά edgewise (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$ - $V = 11 \text{ m/s}$)

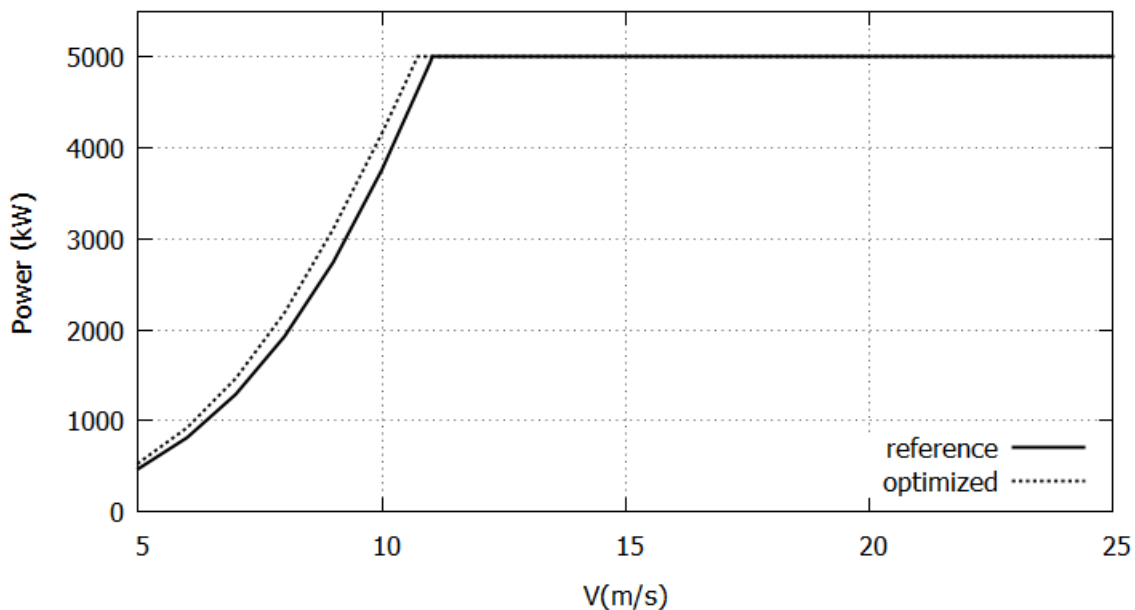


Διάγραμμα 4.39 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Συνολική μέγιστη τάση ($V = 11 \text{ m/s}$), [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή μάζας (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$)



Διάγραμμα 4.40 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Κατανομή δυσκαμψίας κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή δυσκαμψίας κατά edgewise (5 MW - 4 constraints - $\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$)

Όπως είναι φυσικό, η αύξηση του ΩR και κατά συνέπεια η αύξηση της ακτίνας οδηγεί σε μία αύξηση της μέσης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας (ΑΕΡ). Παρά το γεγονός αυτό, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την διαδικασία βελτιστοποίησης εξακολουθούν να είναι εντυπωσιακά ως προς την βελτίωση της απόδοσης του πτερυγίου αναφοράς. Παρακάτω παρουσιάζεται η απόδοση του βέλτιστου πτερυγίου σε σύγκριση με αυτή του πτερυγίου αναφοράς, μέσω των καμπυλών ισχύος (Διάγραμμα 4.41).



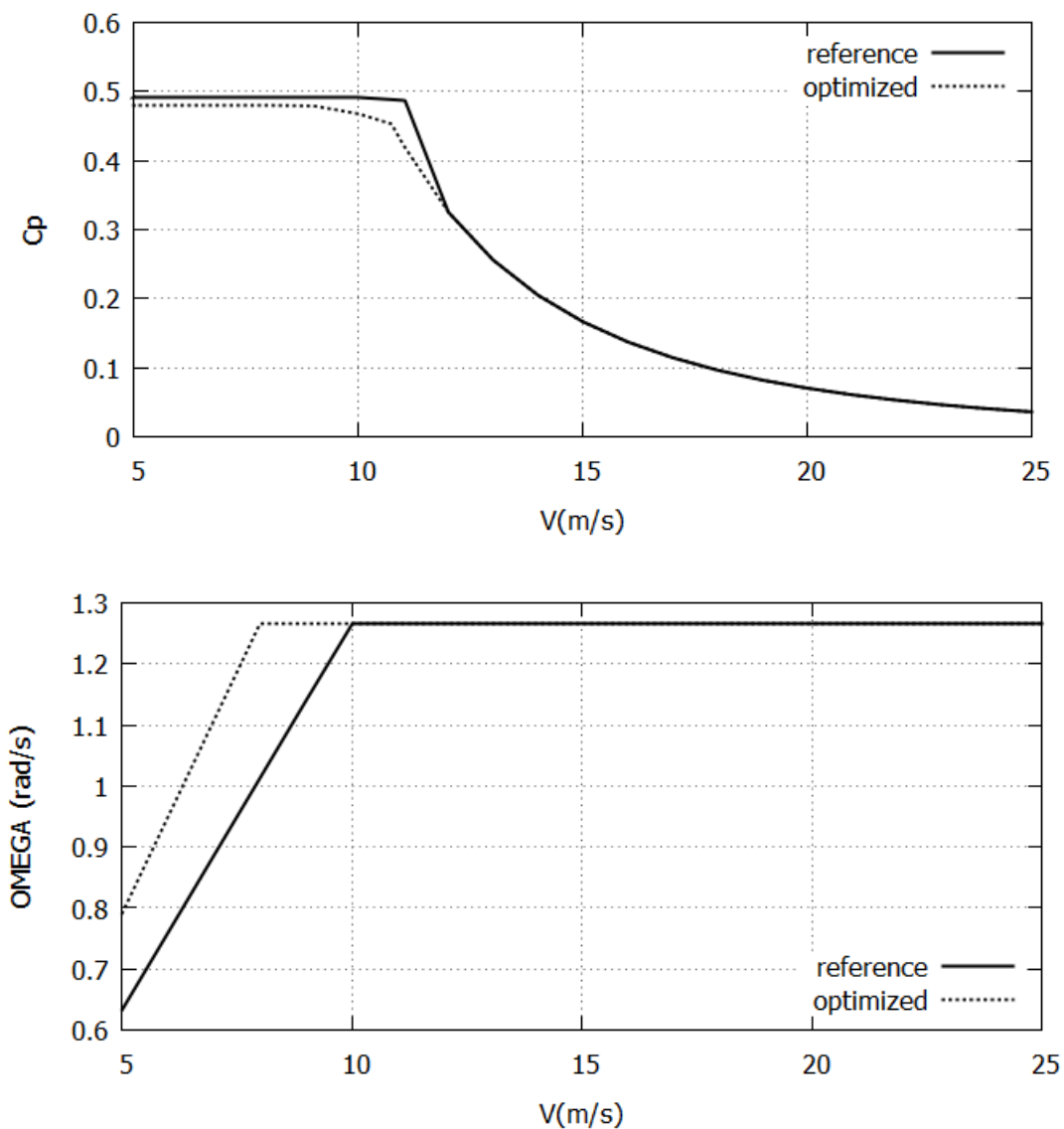
Διάγραμμα 4.41 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας με πτερύγιο αναφοράς και με βέλτιστο πτερύγιο (variable speed - $\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$)

Αναλυτικότερα, το νέο πτερύγιο αποδίδει κατά 6.942% περισσότερη ενέργεια ανά έτος ($V_{in} = 5 \text{ m/s}, V_{out} = 25 \text{ m/s}$) θεωρώντας την κατανομή Weibull που χρησιμοποιείται και προηγουμένως (παράμετροι κατανομής Weibull: $k = 1,7$ και $c = 7$). Η συγκεκριμένη αύξηση είναι θεαματική εάν ανατρέξει κανείς στην αντίστοιχη αύξηση που παρατηρείται από τις διαδικασίες βελτιστοποίησης της Παραγράφου 4.3, όπου το μέγεθος της ακτίνας δεν αποτελεί μεταβλητή σχεδιασμού και έτσι το tip speed παραμένει σταθερό $\Omega R = 80 \text{ m/s}$. Άλλωστε, αυτό είναι κάτι εμφανές και από τις καμπύλες ισχύος των περιπτώσεων βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, οι μετατοπισμένες προς τα πάνω καμπύλες της προηγούμενης περίπτωσης δεν είναι με την πρώτη ματιά ευδιάκριτες, σε αντίθεση με την τωρινή βέλτιστη καμπύλη ισχύος, όπου δεν απαιτείται η παραμικρή εστίαση σε συγκεκριμένο πεδίο ταχυτήτων προκειμένου να εντοπίσει ο αναγνώστης τη μεταβολή. Παρατηρείται, παράλληλα, πως η νέα ονομαστική ταχύτητα είναι ελαφρώς μικρότερη. Η αύξηση της ενέργειας περιγράφεται λεπτομερώς στον Πίνακα 4.14.

| Αποτελέσματα καμπύλης ισχύος ($U_{in} = 5 \text{ m/s}$, $U_{out} = 25 \text{ m/s}$, variable speed) | | | | |
|--|----------------|--------|------------|--------------|
| Πτερύγιο | \bar{P} (kW) | CF | E(kWh) | Μεταβολή (%) |
| Πτερύγιο αναφοράς | 1407.3 | 0.2815 | 12,327,638 | - |
| Βέλτιστο πτερύγιο | 1505.0 | 0.3010 | 13,183,800 | 6.942 |

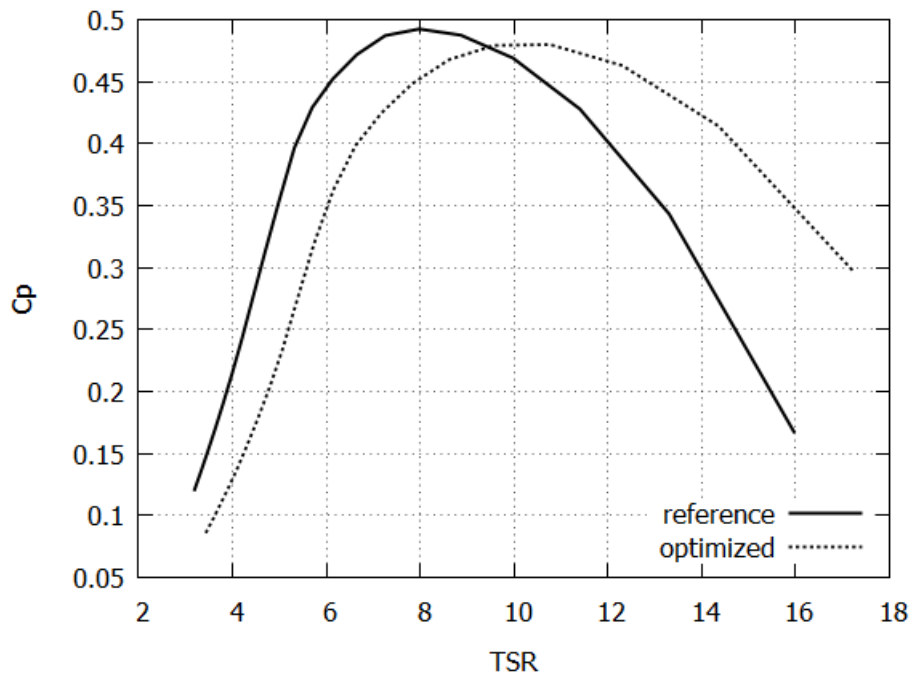
Πίνακας 4.14 Μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια ανα ώρα \bar{P} , συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας CF , μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια για ανεμογεννήτρια με τα παραπάνω πτερύγια και η αντίστοιχη ποσοστιαία αύξηση

Αντίστοιχα, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών με τα δύο αυτά πτερύγια, όπως οι στροφές τους και ο συντελεστής ισχύος τους, παρουσιάζονται παρακάτω (Διάγραμμα 4.42).



Διάγραμμα 4.42 Λειτουργικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας με βέλτιστο πτερύγιο και πτερύγιο αναφοράς - [ΠΑΝΩ] Καμπύλη $C_p - V$, [ΚΑΤΩ] Καμπύλη $\Omega - V$

Η μείωση του συντελεστή ισχύος αλλά και η λειτουργία της ανεμογεννήτριας με μέγιστο C_p μέχρι μικρότερες ταχύτητες (8 m/s έναντι 10 m/s) δεν αποτρέπει την αεροδυναμικά αποδοτικότερη συμπεριφορά του πτερυγίου. Μάλιστα, η δημιουργία ενός πτερυγίου με μεγαλύτερη ακτίνα (δηλαδή μεγαλύτερο tip speed) οδηγεί, όπως ήταν αναμενόμενο, σε μεγαλύτερο λ_{opt} (10.77 έναντι 7.93), αλλά με μικρότερο μέγιστο C_p (0.47993 έναντι 0.49245) (Διάγραμμα 4.43) [7]. Παράλληλα, το νέο πτερύγιο περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα για μικρές ταχύτητες αέρα, παρά το γεγονός πως η ονομαστική παραμένει σταθερή.



Διάγραμμα 4.43 Καμπύλη $C_p - \lambda$ για βέλτιστο πτερύγιο και πτερύγιο αναφοράς

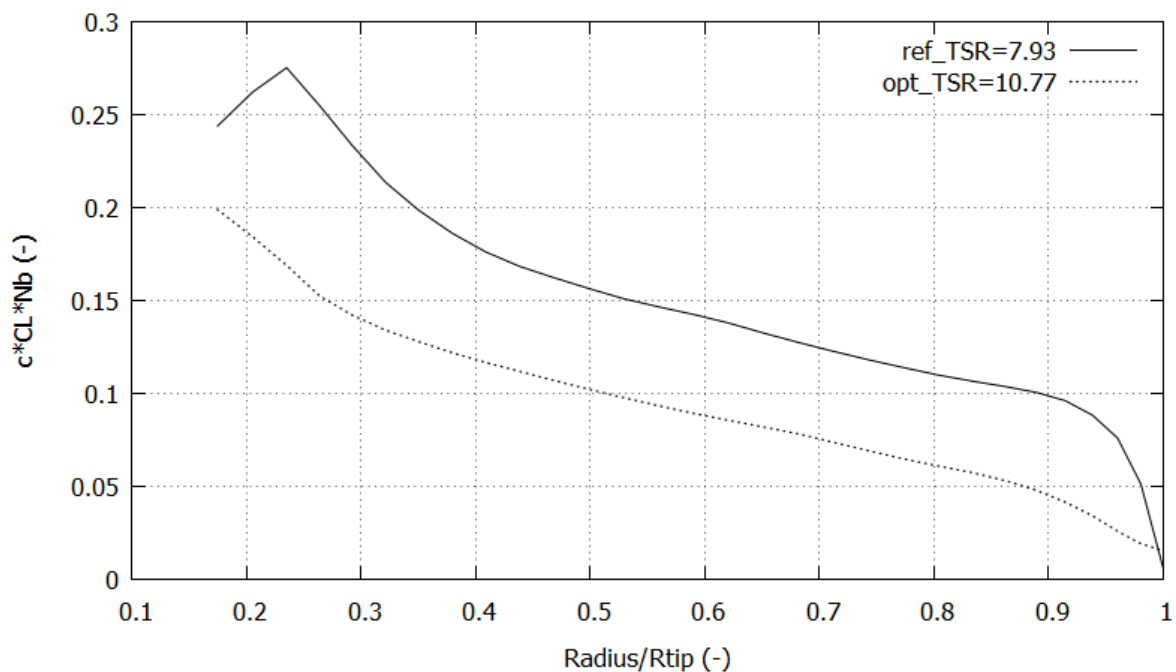
4.4.3 Συμπεράσματα

Εύκολα συμπεραίνει κανείς πως η δυνατότητα αύξησης της ακτίνας οδηγεί σε πολύ σημαντική βελτίωση της απόδοσης ενός πτερυγίου. Το παραπάνω σε συνδυασμό με το γεγονός πως οι φορτίσεις δεν ξεπερνούν τις φορτίσεις του μικρότερου πτερυγίου καθιστά τα αποτελέσματα άκρως αξιόλογα.

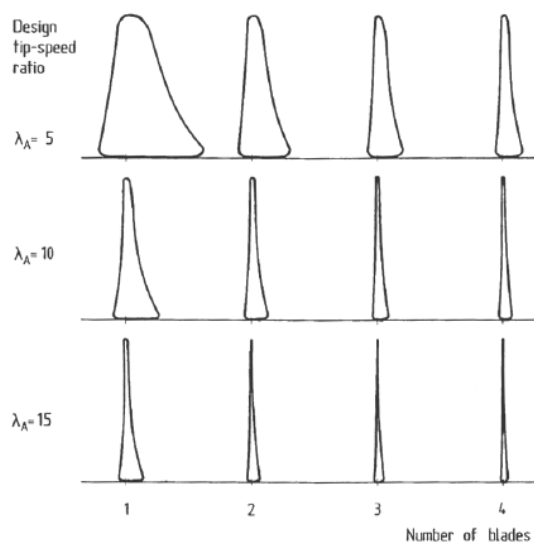
Με μία γρήγορη σύγκριση παρατηρείται πως η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας μιας ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιεί το πτερύγιο αυτής της βελτιστοποίησης και ένα από τα βέλτιστα πτερύγια της Παραγράφου 4.3 ($\Omega R = 80 \text{ m/s}$ και σταθερό) και παράλληλα λειτουργεί με ρύθμιση στροφών (με κοινή $\Omega_R = 1.267 \text{ rad/s}$ και στις δύο περιπτώσεις) είναι περίπου 7 φορές μεγαλύτερη. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως σε εφαρμογές όπου είναι δυνατή η αύξηση του ορίου της ταχύτητας ακροπτερυγίου ΩR τα οφέλη είναι μεγάλα.

Μάλιστα, αυτό το αποτέλεσμα προκύπτει με μία ταχύτητα ακροπτερυγίου $\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$, η οποία δεν είναι η μέγιστη δυνατή που έχει το λογισμικό βελτιστοποίησης τη δυνατότητα να επιλέξει. Υπενθυμίζεται πως υπήρχε η ελευθερία να προκύψει μέχρι και $\Omega R = 90 \text{ m/s}$, μέσω αύξησης της ακτίνας στα 71 m . Προφανώς, ο λόγος που υιοθετείται αυτή η λύση είναι ο περιορισμός της μάζας και των φορτίσεων. Όσον αφορά τη μάζα, θεωρείται κατά τον καθορισμό των *περιορισμών* πως το επιπρόσθετο κόστος από μία αύξηση της κατά 10% θα μπορούσε να αποτελεί συγκρίσιμο μέγεθος με τα οικονομικά οφέλη που θα προέκυπταν από την αποδοτικότερη λειτουργία της ανεμογεννητριας. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η τιμή του *περιορισμού* ίση με $14,346 \text{ kg}$.

Όπως είναι γνωστό οι μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας ακροπτερυγίου ΩR συνεπάγονται υψηλότερες τιμές λ και μειωμένο solidity [6]. Πράγματι, λοιπόν, η τιμή του λ που αντιστοιχεί σε $C_p \text{ max}$ είναι στο νέο πτερύγιο ίση με $\lambda_{opt} = 10.77$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκύψει για το συγκεκριμένο λ μία κατανομή $c^*C_L N_B$ μετατοπισμένη προς τα κάτω σε σύγκριση με την αντίστοιχη για το πτερύγιο αναφοράς, όπου $\lambda_{opt} = 7.93$ (Διάγραμμα 4.44 και Σχήμα 4.1). Αυτό είναι, άλλωστε, κάτι που παρατηρείται και στα αποτελέσματα της αεροδυναμικής βελτιστοποίησης χωρίς *περιορισμούς* (Παράγραφος 4.2).

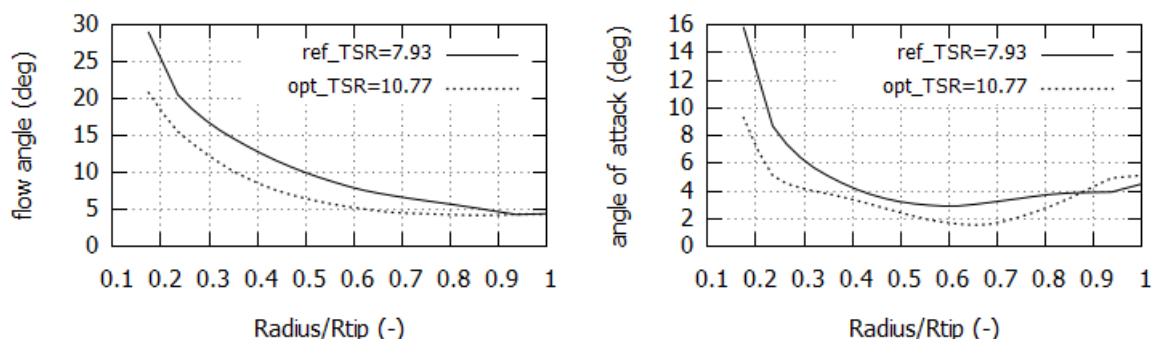


Διάγραμμα 4.44 Κατανομή $c^*C_L N_B$ συναρτήσει της αδιάστατης ακτίνας για το πτερύγιο αναφοράς και το βέλτιστο πτερύγιο ($\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$)

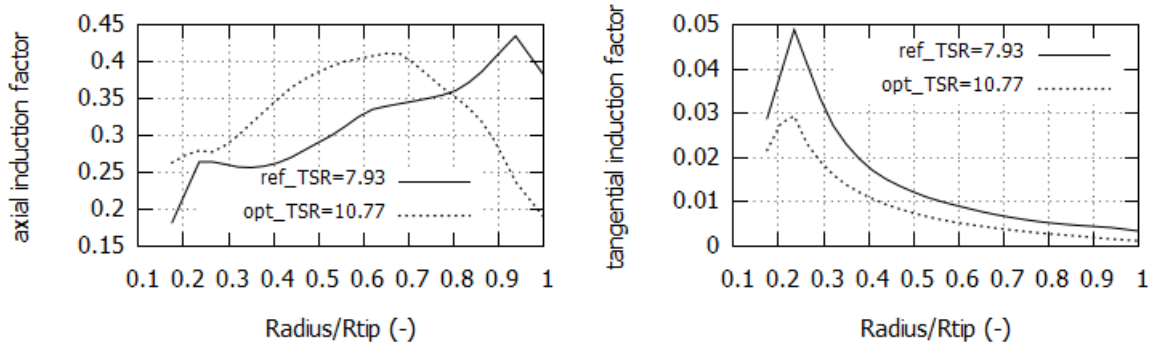


Σχήμα 4.1 Βέλτιστες μορφές πτερυγίων για διαφορετικά tip speed ratios και διαφορετικό αριθμό πτερυγίων [Wind Turbine Blade Design, P. Schubel and R. Crossley 2012]

Παράλληλα, τα διαγράμματα που ακολουθούν (Διάγραμμα 4.45 και Διάγραμμα 4.46) δείχνουν ότι οι γωνίες που σχηματίζονται κατά το τρίγωνο ταχυτήτων (Σχήμα 2.4) είναι εμφανώς μειωμένες. Πιο συγκεκριμένα, η γωνία φ , η οποία είναι η γωνία που σχηματίζεται από τη σχετική ταχύτητα και το επίπεδο περιστροφής, είναι μικρότερη σε όλο το μήκος του πτερυγίου, ενώ η γωνία πρόσπτωσης α είναι ελαφρώς μεγαλύτερη στο τμήμα του ακροπτερυγίου. Όσον αφορά τους συντελεστές επαγωγής, είναι ξεκάθαρο πως ο συντελεστής περιφερειακής επαγωγής a' είναι και αυτός μικρότερος. Αντίθετα, ο συντελεστής αξονικής επαγωγής a είναι μεγαλύτερος στο αρχικό τμήμα του πτερυγίου, ενώ στο τμήμα που βρίσκεται κοντά στο ακροπτερύγιο μειώνεται εντυπωσιακά. Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα πως η αύξηση της ακτίνας, σε συνδυασμό με όλες τις υπόλοιπες μεταβολές που έχουν ήδη παρουσιαστεί οδηγούν σε πτερύγιο με εμφανώς μειωμένες γωνίες πρόσπτωσης και ροής, με μικρότερο περιφερειακό συντελεστή επαγωγής και με συντελεστή αξονικής επαγωγής που από ένα σημείο και μετά μειώνεται κατακόρυφα.



Διάγραμμα 4.45 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Γωνία φ συναρτήσει της αδιάστατης ακτίνας για το πτερύγιο αναφοράς και το βέλτιστο πτερύγιο ($\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$), [ΔΕΞΙΑ] Αντίστοιχο διάγραμμα για τη γωνία πρόσπτωσης α



Διάγραμμα 4.46 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Συντελεστής αξονικής επαγωγής a συναρτήσει της αδιάστατης ακτίνας για το πτερύγιο αναφοράς και το βέλτιστο πτερύγιο ($\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$), [ΔΕΞΙΑ] Αντίστοιχο διάγραμμα για τον συντελεστή περιφερειακής επαγωγής a'

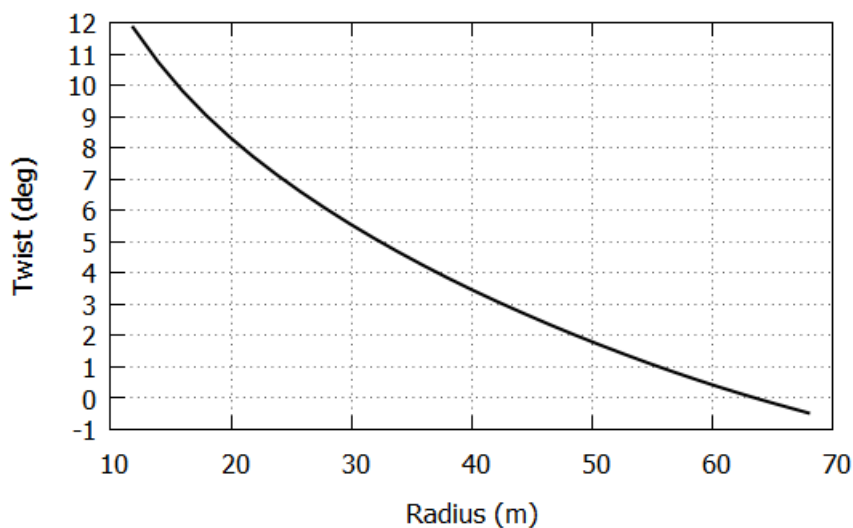
4.5 Παραλλαγές του βέλτιστου πτερυγίου (Παρ. 4.4)

Παρατηρώντας κανείς τις κατανομές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του βέλτιστου πτερυγίου (Παράγραφος 4.4), εύκολα διαπιστώνει τις έντονες αυξομειώσεις αυτών των μεγεθών, παρά το γεγονός ότι έχουν σχηματιστεί με τη μέθοδο των καμπυλών B-Splines. Πιο συγκεκριμένα, η κατανομή της συστροφής παρουσιάζει έντονες μεταβολές, ενώ τόσο η χορδή όσο και το πάχος δε σχηματίζουν ομαλή καμπύλη συγκριτικά με τις αντίστοιχες του πτερυγίου αναφοράς. Αυτό το φαινόμενο είναι κατά βάση αναμενόμενο και μάλιστα είναι εμφανές και στις βελτιστοποιήσεις των υπόλοιπων παραγράφων, δεδομένου ότι ο εξελικτικός αλγόριθμος επιλέγει εκείνες τις τιμές μέσα από το επιτρεπτό εύρος που δίνουν τη βέλτιστη λύση. Αυτό, όμως, δε σημαίνει πως όλοι οι συνδυασμοί τιμών είναι εφικτοί.

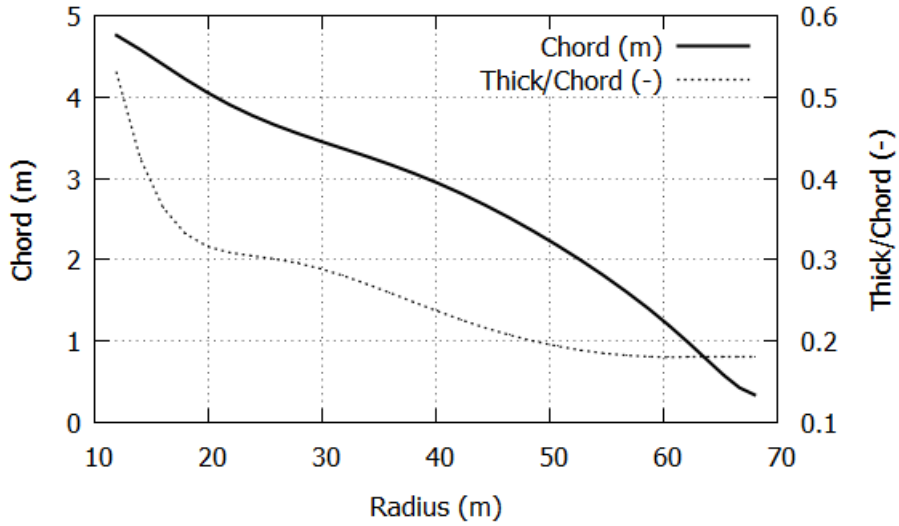
Οι μεγάλες αυξομειώσεις είναι ένα μη επιθυμητό στοιχείο κατά τον σχεδιασμό των πτερυγίων κυρίως για κατασκευαστικούς λόγους. Προκειμένου να είναι τεχνικά υλοποιήσιμος ένας σχεδιασμός οφείλει να έχει μια ομαλή κατανομή. Για το λόγο αυτό παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη παράγραφο ορισμένες παραλλαγές του βέλτιστου πτερυγίου, έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι περισσότερο ρεαλιστικό. Χρειάζεται όμως σε αυτό το σημείο να σημειωθεί πως η συγκεκριμένη τεχνική εξομάλυνσης (smoothing) οδηγεί αναμφίβολα σε μείωση της τιμής της *συνάρτησης κόστους*, δηλαδή της μέσης ετήσιας παραγόμενης ενέργειας. Συνεπώς, το ζητούμενο είναι η εύρεση της ρεαλιστικότερης δυνατής σχεδίασης με την μικρότερη απώλεια ενέργειας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται 3 παραλλαγές του βέλτιστου πτερυγίου. Στο καθένα από αυτά η κατανομή της συστροφής υπόκειται σε εξομάλυνση καθώς είναι εκείνο το μέγεθος όπου

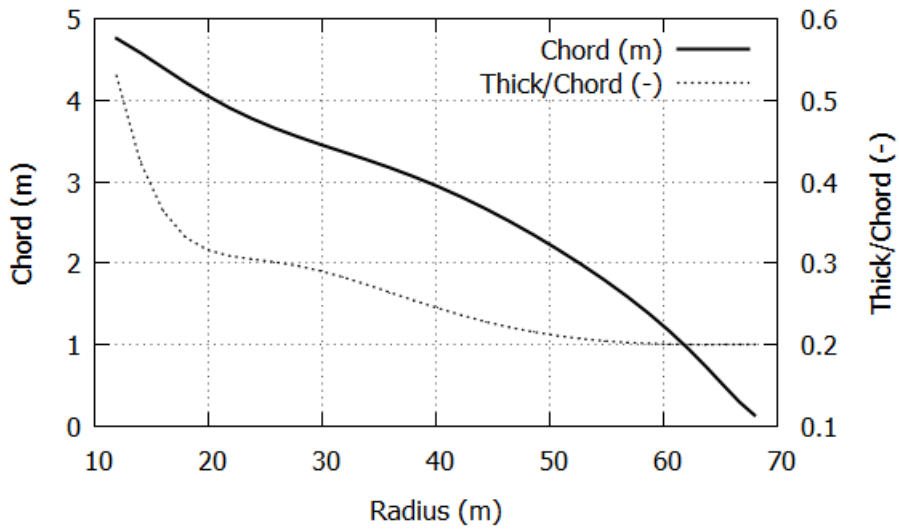
εντοπίζονται οι κυριότερες ανωμαλίες και για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη αλλαγή δε θα αναφέρεται στην περιγραφή της κάθε παραλλαγής ξεχωριστά (Διάγραμμα 4.47). Παράλληλα, η κάθε μία περιλαμβάνει και τις δικές της ξεχωριστές τροποποιήσεις. Αρχικά, στην πρώτη παραλλαγή (*Πτερύγιο i*) διατηρείται το αδιάστατο πάχος του πτερυγίου στο 18% από τα 56m έως και το ακροπτερύγιο, δεδομένου ότι σε όλα τα προβλήματα της Διπλωματικής Εργασίας χρησιμοποιείται μόνο μία αεροτομή για σχετικά πάχη μικρότερα του 18% και πιο συγκεκριμένα η *NACA 64618* (Διάγραμμα 4.48). Βέβαια, μια αύξηση του πάχους ενδέχεται να έχει συνέπειες όπως αύξηση της μάζας, αλλά οι τιμές των *περιορισμών* θα εξεταστούν αναλυτικότερα μετά την παρουσίαση των νέων πτερυγίων που υπόκεινται σε εξομάλυνση. Στη δεύτερη παραλλαγή (*Πτερύγιο ii*) το πάχος του ακραίου τμήματος αυξάνεται λίγο πάνω από 18% προκειμένου να συμβαδίζει με την κατανομή του πάχους στο μεσαίο τμήμα του πτερυγίου (Διάγραμμα 4.49). Παράλληλα, η χορδή ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνεται στο ακροπτερύγιο περισσότερο απ' ό τι πριν. Στην τρίτη και τελευταία παραλλαγή του βέλτιστου πτερυγίου (*Πτερύγιο iii*), διατηρείται η εξομάλυνση στη χορδή του ακροπτερυγίου, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται και το πάχος στο αρχικό τμήμα του πτερυγίου προκειμένου να προκύψει μία ομαλότερη κατανομή πάχους (Διάγραμμα 4.50).



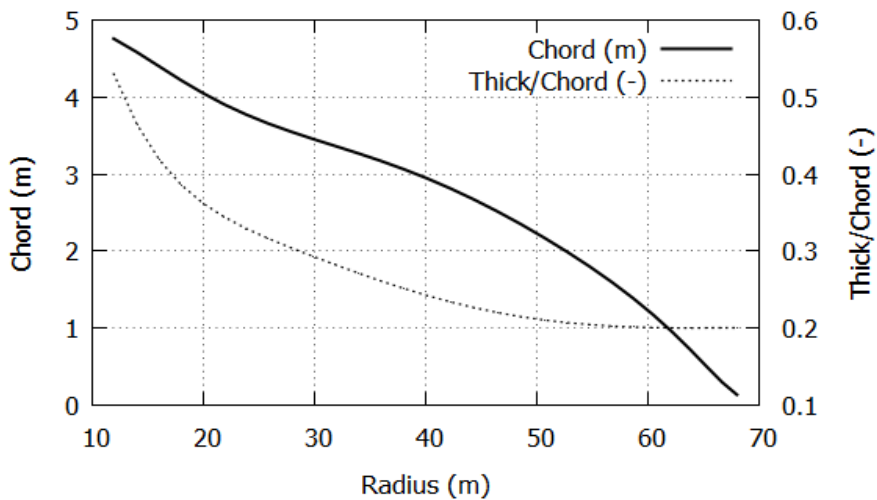
Διάγραμμα 4.47 Κατανομή συστροφής των *smoothened Πτερυγίων i, ii, iii*



Διάγραμμα 4.48 Κατανομή χορδής και αδιάστατου πάχους του smoothed Πτερυγίου *i*



Διάγραμμα 4.49 Κατανομή χορδής και αδιάστατου πάχους του smoothed Πτερυγίου *ii*



Διάγραμμα 4.50 Κατανομή χορδής και αδιάστατου πάχους του smoothed Πτερυγίου *iii*

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η συγκεκριμένη τεχνική επιφέρει μείωση στην τιμή της *συνάρτησης κόστους*. Παράλληλα, ενδέχεται οι τροποίσεις που παρουσιάζονται να επιφέρουν και αύξηση των τιμών των μεγεθών που λαμβάνονται υπόψη ως *περιορισμοί*. Το ζήτημα είναι να γίνει σωστή αξιολόγηση των τελικών μορφών και να καθοριστεί ποιες αυξήσεις των *περιορισμών* μπορούν να θεωρηθούν επιτρεπτές και ποια μείωση της τελικής ενέργειας μπορεί να γίνει αποδεκτή. Στη συνέχεια αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν έπειτα από ανάλυση του κάθε πτερυγίου από τα παραπάνω με τον υπολογιστικό κώδικα που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας Εργασίας, τον κώδικα *RAFT* [5]. Πρακτικά, η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί την αντίστροφη επίλυση που ακολουθείται στις προηγούμενες παραγράφους. Αντί το πτερύγιο να αποτελεί «έξοδο» του συστήματος επίλυσης, αποτελεί «είσοδο».

| | <i>Cost Function</i> | <i>Constraints (για V_R)</i> | | | |
|---------------------------------------|----------------------|---|------------------------------------|---|---|
| | <i>E (kWh)</i> | <i>m (kg)</i> | <i>M_{f,ROOT} (kN · m)</i> | <i>σ_{max} (kN/m²)</i> | <i>σ_{f,max} (kN/m²)</i> |
| | - | 14,346 | 9,386.2 | 89,371.0 | 63,210.2 |
| Βέλτιστο πτερύγιο (Παρ. 4.4.2) | 13,183,800 | 13,659 | 9,378.9 | 83,941.6 | 63,143.0 |
| Πτερύγιο i | 13,147,788 | 13,666 | 9,473.2 | 84,617.9 | 63,642.4 |
| Πτερύγιο ii | 13,077,043 | 13,665 | 9,520.5 | 84,587.1 | 61,739.7 |
| Πτερύγιο iii | 12,971,737 | 13,862 | 9,500.8 | 83,066.8 | 62,196.2 |

Πίνακας 4.15 Μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια (ΑΕΡ) που προκύπτει από το καθένα πτερύγιο, σε συνδυασμό με τις τιμές των μεγεθών που λαμβάνονται υπόψη στην Παρ. 4.4 ως *περιορισμοί* (με κόκκινο χρώμα συμβολίζονται εκείνες οι τιμές που ξεπερνούν τα όρια που έχουν τεθεί στην Παρ. 4.4)

Με βάση την προηγούμενη διαπίστωση σχετικά με τη μείωση της τιμής της *συνάρτησης κόστους*, είναι θετικό πως η απόδοση των πτερυγίων είναι σημαντικά βελτιωμένη συγκριτικά με το πτερύγιο αναφοράς και στις τρεις παραλλαγές, παρά τη σχετικά μειωμένη αύξηση του ΑΕΡ. Μάλιστα, ακόμη και στο *Πτερύγιο iii* παρατηρείται αύξηση της τάξης του 5.22% σχετικά με την ενέργεια που παράγεται από μία *variable speed* ανεμογεννήτρια με το πτερύγιο αναφοράς (12,327,638 kWh). Όσον αφορά τους *περιορισμούς*, είναι εμφανές πως η ροπή κατά την πτερύγιση (flapwise) ξεπερνά σε κάθε περίπτωση το επιτρεπτό μέγεθος, όχι όμως σε σημείο που αυτή η υπέρβαση των ορίων να είναι ακραία. Όμοια, και η μέγιστη τάση κατά την πτερύγιση (flapwise) του *Πτερυγίου i* υπερβαίνει το όριο. Δεν αποκλείεται, όμως, με μία περισσότερο εντοπισμένη τεχνική *smoothing* στις κατανομές αυτές οι υπερβάσεις να ομαλοποιηθούν. Τέλος σημειώνεται πως, όμοια με ότι προκύπτει στην Παράγραφο 4.4, οι ονομαστικές ταχύτητες είναι και στα νέα πτερύγια κοντά στα 11 m/s και για το λόγο αυτό οι τιμές των φορτίσεων του Πίνακα 4.15 αναφέρονται σε αυτή την ταχύτητα.

4.6 Υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων δρομέων

Μετά την καταγραφή των φορτίσεων στο πτερυγίο είναι απαραίτητο να ακολουθήσει μία ανάλυση ταλαντώσεων, μέσω της οποίας μελετούνται οι διάφορες περιπτώσεις κατά τις οποίες ενδέχεται να προκύψουν σημαντικές ταλαντώσεις. Αυτές είναι δυνατόν να έχουν επιρροή στη δυναμική συμπεριφορά του πτερυγίου και να οδηγήσουν σε ακραίες καταπονήσεις. Απαιτείται, λοιπόν, να υπολογιστούν οι ιδιοσυχνότητες έτσι ώστε να εξετάζεται η δυνατότητα αποφυγής του φαινομένων συντονισμού.

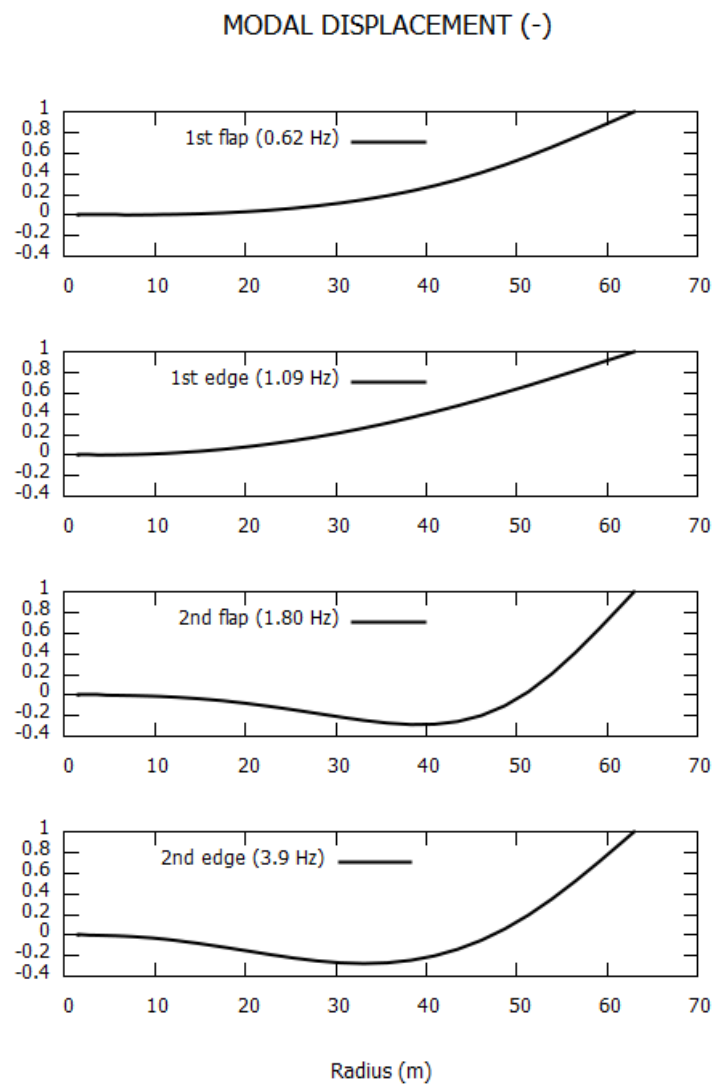
Για τις ιδιοσυχνότητες χρησιμοποιείται ο υπολογιστικός κώδικας *GAST*, ο οποίος αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών) [5]. Βασίζεται στη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method), δηλαδή το σώμα που εξετάζεται χωρίζεται σε πολλά στοιχεία στα οποία πραγματοποιείται η επίλυση του προβλήματος. Ο κώδικας *GAST* δέχεται ως αρχείο εισόδου ένα πίνακα με τα επιμέρους Πεπερασμένα Στοιχεία και τις ιδιότητές τους, όπως για παράδειγμα τη δυσκαμψία κατά την πτερύγιση (flapwise), κατά την περιστροφή (edgewise), την κατανομή μάζας κλπ [5].

Προκειμένου τα τελικά αποτελέσματα να είναι αντιπροσωπευτικά, κρίνεται αναγκαίο να προστεθεί στο πρόβλημα και το τμήμα της ρίζας του πτερυγίου που δεν αποτελεί αεροδυναμικό τμήμα, δηλαδή αυτό του κυλίνδρου. Δεδομένου ότι το συγκεκριμένο τμήμα δεν αποτελεί αντικείμενο βελτιστοποίησης, χρησιμοποιείται το τμήμα του πτερυγίου αναφοράς. Αν σκεφτεί κανείς πως οι τροποποιήσεις που απαιτούνται να γίνουν σε αυτό το τμήμα έτσι ώστε να είναι κατασκευαστικά συμβατό με το αεροδυναμικό τμήμα που προκύπτει στην Παράγραφο 4.4 είναι μικρές, τότε συνεπάγεται πως η προσθήκη του κυλίνδρου αναφοράς στα νέα πτερύγια αποτελεί παραδοχή μεγάλης ακρίβειας.

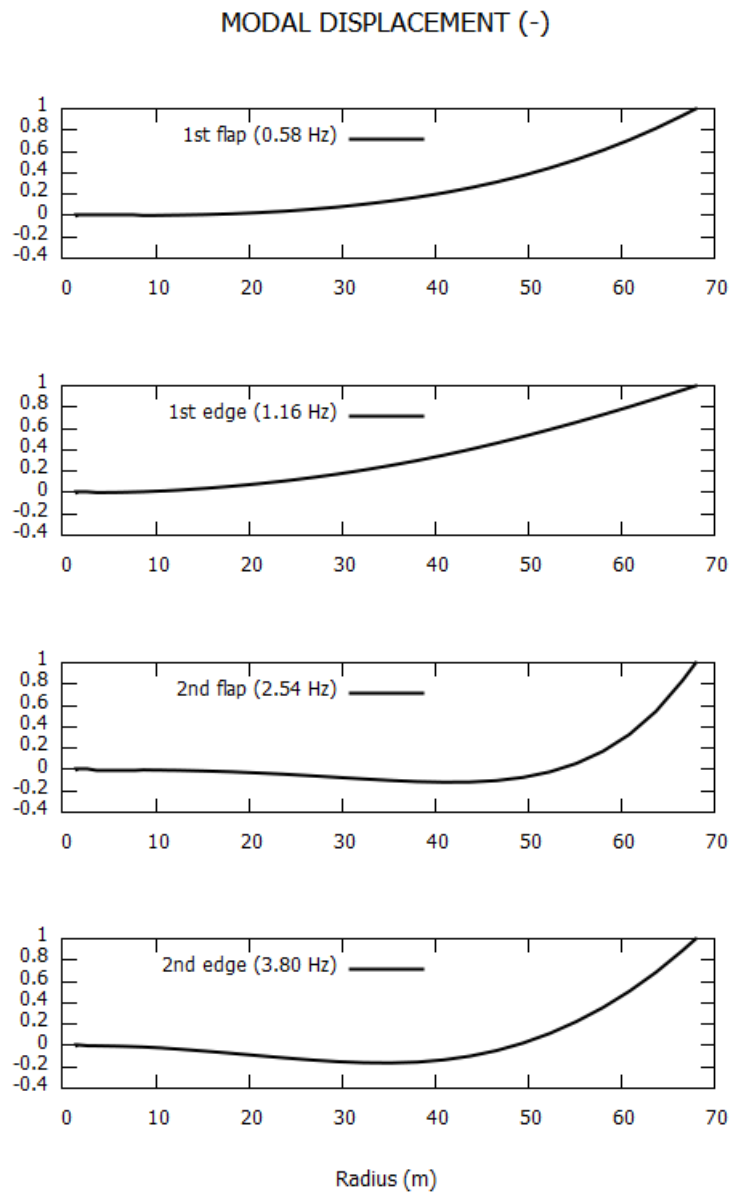
Τα πτερύγια, των οποίων καταγράφονται οι ιδιοσυχνότητες, είναι τα εξής: το βέλτιστο της Παραγράφου 4.4 και στη συνέχεια οι διάφορες παραλλαγές του, σε συνδυασμό με το πτερύγιο αναφοράς. Παράλληλα, μελετάται και το πτερύγιο *NREL 5MW* (το οποίο ουσιαστικά αποτελεί το πτερύγιο αναφοράς) με τις πραγματικές κατανομές μάζας και δυσκαμψίας. Παρά το γεγονός πως αυτές προσεγγίζονται όσο το δυνατόν καλύτερα στο Κεφάλαιο 3, αυτός ο υπολογισμός αποτελεί στην ουσία μία επαλήθευση της σωστής δημιουργίας της εσωτερικής δομής του πτερυγίου αναφοράς. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον Πίνακα 4.16, ενώ οι ιδιομορφές για πτερύγιση (flapwise) και περιστροφή (edgewise) απεικονίζονται στα Διαγράμματα 4.51 και 4.52. Σημειώνεται πως το πτερύγιο *NREL 5MW* αναφέρεται στον Πίνακα 4.16 ως *Αναφοράς**.

| Ιδιοσυχνότητες πτερυγίων (Hz) | | | | | | |
|-------------------------------|-----------|----------|--------------------|------------|-------------|--------------|
| | Αναφοράς* | Αναφοράς | Βέλτιστο (Παρ.4.2) | Πτερύγιο i | Πτερύγιο ii | Πτερύγιο iii |
| 1 st | 0.66 | 0.62 | 0.58 | 0.58 | 0.60 | 0.63 |
| 2 nd | 1.10 | 1.09 | 1.16 | 1.15 | 1.16 | 1.17 |
| 3 rd | 1.91 | 1.80 | 1.54 | 1.58 | 1.72 | 1.74 |
| 4 th | 4.10 | 3.90 | 2.88 | 3.04 | 3.41 | 3.42 |

Πίνακας 4.16 Ιδιοσυχνότητες 1^{ης}, 2^{ης}, 3^{ης} και 4^{ης} τάξης των υπό μελέτη πτερυγίων όπως προκύπτουν από τον κώδικα *GAST*



Διάγραμμα 4.51 Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες του πτερυγίου αναφοράς



Διάγραμμα 4.52 Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες του βέλτιστου πτερυγίου

Από τα αρχεία εξόδου του *GAST* προκύπτει πως, σε αντίθεση με το πτερύγιο αναφοράς, η 4^η ιδιοσυχνότητα του βέλτιστου δεν αποτελεί τη 2^η περιστροφής (edgewise) αλλά την 3^η πτερύγισης (flapwise). Η 2^η περιστροφής (edgewise), της οποίας η ιδιομορφή παρουσιάζεται στο Διαγράμμα 4.52, είναι πλέον η 5^η ιδιοσυχνότητα.

Σχεδίαση Δρομέα Α/Γ 10MW

5.1 Αύξηση μεγέθους σε Α/Γ και κανόνες ομοιότητας

Η αναγκαία διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα παγκοσμίως οδηγεί αναπόφευκτα σε μεγάλα αιολικά πάρκα, τόσο onshore όσο και offshore, στα οποία ζητούμενο είναι η χρήση όσο το δυνατόν αποδοτικότερων Α/Γ. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με την τάση της τεχνολογίας και της βιομηχανίας να στοχεύει σε όλο και μεγαλύτερα μεγέθη έτσι ώστε να μειώνεται το κόστος της παραγόμενης ενέργειας, καθιστά ως στόχο την κατασκευή ανεμογεννητριών πολλών MW. Ενώ στις χερσαίες εφαρμογές αιολικής ενέργειας ενδέχεται να προκύψουν σημαντικές δυσκολίες λόγω της τοποθέτησης τέτοιων Α/Γ, όπως για παράδειγμα δύσκολη μεταφορά και εγκατάσταση τους λόγω μεγέθους, στις υπεράκτιες οι δυσκολίες είναι λιγότερες και τα κέρδη από τη μείωση των λειτουργικών εξόδων μπορούν να ισοσκελίσουν τα κόστη λόγω της αύξησης του μεγέθους.

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας το πτερύγιο μιας Α/Γ 10MW κατασκευάζεται με αύξηση μεγέθους ενός μικρότερου δρομέα (upscaling). Αυτή η μέθοδος αποτελεί μία πρώτη προσέγγιση όλων των κρίσιμων λειτουργικών και δομικών ιδιοτήτων του πτερυγίου και συμβάλλει στον εντοπισμό των πιθανών τεχνικών αδυναμιών που μπορεί να προκύψουν κατά τον σχεδιασμό του upscaled πτερυγίου. Η αύξηση μεγέθους απαιτεί την ύπαρξη ενός πτερυγίου «εκκίνησης» με βάση το οποίο θα προκύψει το μεγαλύτερο, με την προϋπόθεση πως και τα δύο θα έχουν ίδια ταχύτητα ακροπτερυγίου (ΩR : σταθερό). Αν το πτερύγιο «εκκίνησης» έχει ονομαστική ισχύ P και ακτίνα πτερυγίου R και το νέο πτερύγιο έχει ονομαστική ισχύ P' και ακτίνα R' , τότε ισχύει:

$$\frac{P'}{P} = \frac{C_p \frac{\rho}{2} \pi R'^2 V^3}{C_p \frac{\rho}{2} \pi R^2 V^3} \Rightarrow \frac{P'}{P} = \left(\frac{R'}{R}\right)^2$$

και ο λόγος R'/R ονομάζεται συντελεστής scaling (scaling factor), ο οποίος από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως s .

Για τη συγκεκριμένη μέθοδο οι κανόνες ομοιότητας είναι πλήρως διατυπωμένοι [8]. Αυτοί οι κανόνες είναι οι εξής: όλες οι γεωμετρικές διαστάσεις είναι προφανώς ανάλογες του συντελεστή scaling s , ενώ η νέα ισχύς που προκύπτει είναι η P πολλαπλασιασμένη επί s^2 . Όλες οι αεροδυναμικές δυνάμεις πολλαπλασιάζονται επί s^2 και οι καμπτικές ροπές κατά την πτερύγιση (flapwise) επί s^3 . Όσον αφορά τις δυσκαμψίες τόσο κατά την πτερύγιση (flapwise) όσο και κατά την περιστροφή (edgewise), αυτές είναι ανάλογες του s^4 . Με βάση τα παραπάνω και με δεδομένο ότι η τάση κατά την πτερύγιση (flapwise) δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{f,max} = \frac{M_f}{I_{flap}} \cdot y_{max}$$

προκύπτει πως το συγκεκριμένο μέγεθος παραμένει σταθερό. Όμοια, οι ορθές τάσεις λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων, οι οποίες δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma = \frac{F_{centrifugal}}{A}$$

παραμένουν σταθερές, λόγω του ότι αυτές οι δυνάμεις είναι ανάλογες του μεγέθους $m\omega^2 R$, δηλαδή του s^2 (διότι η γωνιακή ταχύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του s) και επίσης το εμβαδό είναι ανάλογο του s^2 . Αντίθετα, επειδή κατά τον υπολογισμό της ροπής κατά την περιστροφή (edgewise) συμπεριλαμβάνεται και το βάρος πέρα από την εφαπτομενική δύναμη που εφαρμόζεται στο πτερύγιο (το βάρος και οι αεροδυναμικές δυνάμεις δε μεταβάλλονται με ανάλογο τρόπο), οι ορθές τάσεις κατά την περιστροφή (edgewise) δεν παραμένουν σταθερές, με αποτέλεσμα ούτε οι συνολικές τάσεις να παραμένουν στα ίδια επίπεδα.

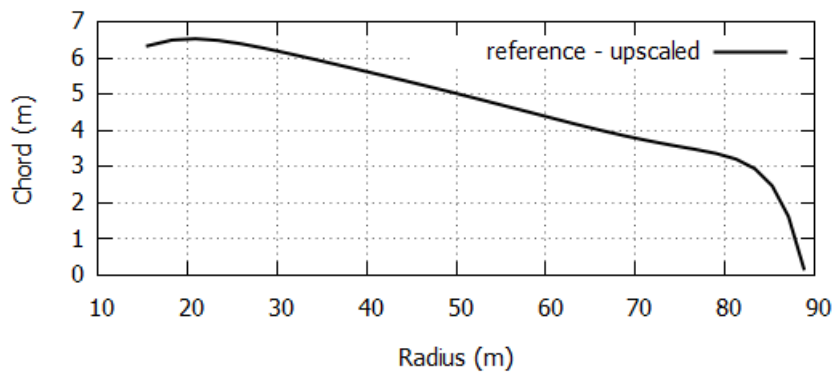
5.2 Αύξηση μεγέθους του πτερυγίου αναφοράς *NREL 5MW*

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης παραγράφου, σχεδιάζεται ένα νέο μεγαλύτερο πτερύγιο ονομαστικής ισχύος 10 MW, το οποίο διαπιστώνεται εάν πληρεί τις προϋποθέσεις προκειμένου να είναι αποδοτικό, τεχνικά υλοποιήσιμο και αξιόπιστο. Η καταλληλότερη αρχική προσέγγιση σχεδιασμού ενός τέτοιου πτερυγίου αποτελεί το πτερύγιο αναφοράς *NREL 5MW*, όπως αυτό παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5. Το πτερύγιο αναφοράς έχει ακτίνα $R = 63m$. Συνεπώς, με βάση τους κανόνες ομοιότητας που περιγράφονται στην Παράγραφο 5.1, ο συντελεστής scaling ισούται με $s = \sqrt{2} = 1.41$, διότι $P'/P = 2$, άρα το νέο πτερύγιο έχει ακτίνα $R' = 88.83 m$ και $\Omega'_R = 0.8986 rad/s$.

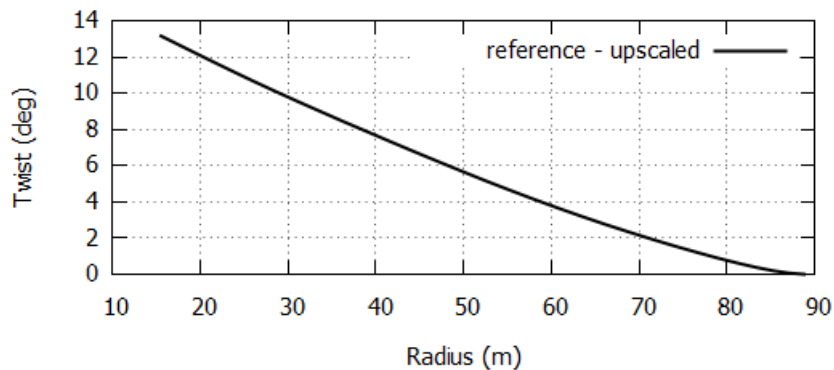
Το πτερύγιο των $88.83 m$ σχεδιάζεται ως εξής: εισάγεται στον κώδικα *RAFT* η εξωτερική γεωμετρία του πτερυγίου αναφοράς ως είσοδος, ακολουθούμενη από τις τιμές των μεγεθών που καθορίζουν την εσωτερική δομή του, όπως αυτή προσεγγίζεται στο Κεφάλαιο 4. Ο κώδικας βασίζεται στην ίδια «ιδέα» με αυτόν της Παραγράφου 5.4. Πιο συγκεκριμένα, βρίσκεται το λ για

το οποίο προκύπτει το $C_{P_{max}}$, δηλαδή το λ_{opt} και στη συνέχεια κατασκευάζεται η καμπύλη ισχύος για A/Γ μεταβλητής γωνιακής ταχύτητας δρομέα μέχρι και την ταχύτητα V όπου το γινόμενο $\lambda_{opt}V$ λαμβάνει την τιμή $\Omega'_R R'$. Τέλος, έλεγχος των φορτίσεων στην ταχύτητα αναφοράς. Λόγω της αύξησης του μεγέθους, όμως, τόσο το λ_{opt} όσο και το $C_{P_{max}}$ παραμένουν σταθερά, όπως και η ονομαστική ταχύτητα V_R . Παράλληλα, μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας υπολογίζονται εκτός από την απόδοση του νέου πτερυγίου, τα δομικά χαρακτηριστικά του, καθώς και οι φορτίσεις του. Συνεπώς, πέραν της σχεδίασης του νέου πτερυγίου, δίνεται η δυνατότητα να επαληθευτούν μέσω του κώδικα και οι θεωρητικοί κανόνες ομοιότητας που διέπουν την αύξηση μεγέθους μιας A/Γ. Από εδώ και στο εξής, το συγκεκριμένο πτερύγιο αποκαλείται ως *upscaled πτερύγιο αναφοράς (reference - upscaled)*.

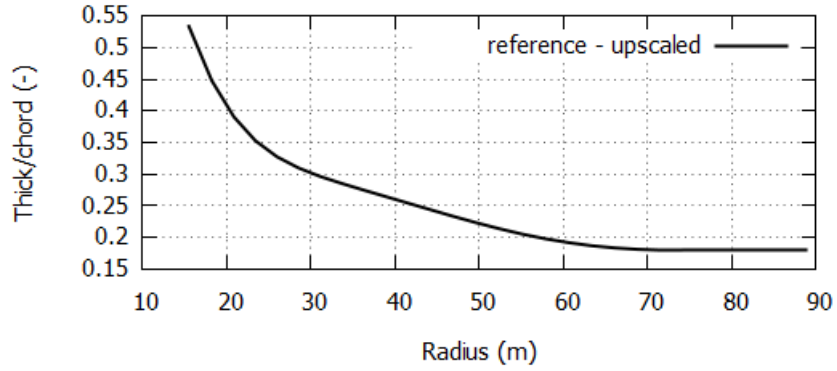
Τα αποτελέσματα ακολουθούν παρακάτω. Όπως είναι αναμενόμενο, το αδιάστατο πάχος παραμένει σταθερό, όπως και η συστροφή, ενώ η χορδή είναι ανάλογη του συντελεστή s . Όμοια, όλες οι διαστάσεις του I-beam είναι ανάλογες του s (Διάγραμμα 5.1 έως Διάγραμμα 5.7).



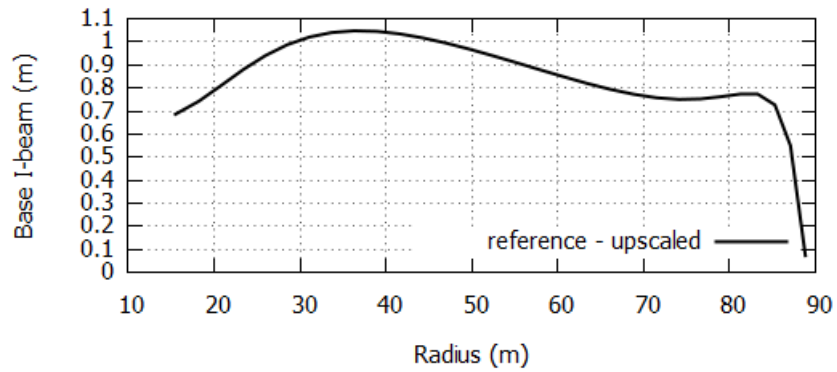
Διάγραμμα 5.1 Κατανομή χορδής του upscaled πτερυγίου αναφοράς



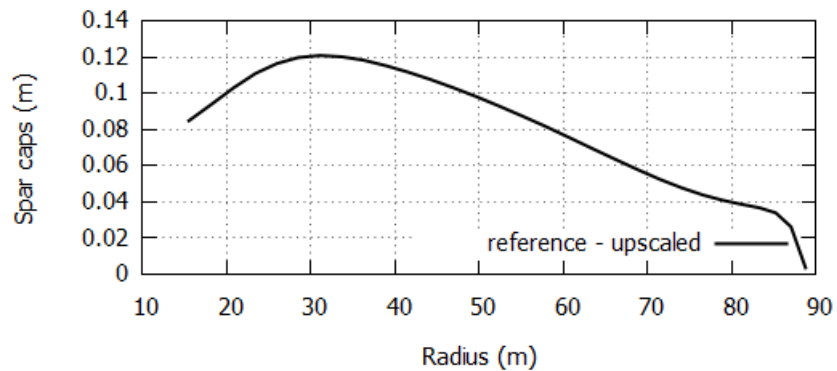
Διάγραμμα 5.2 Κατανομή συστροφής του upscaled πτερυγίου αναφοράς



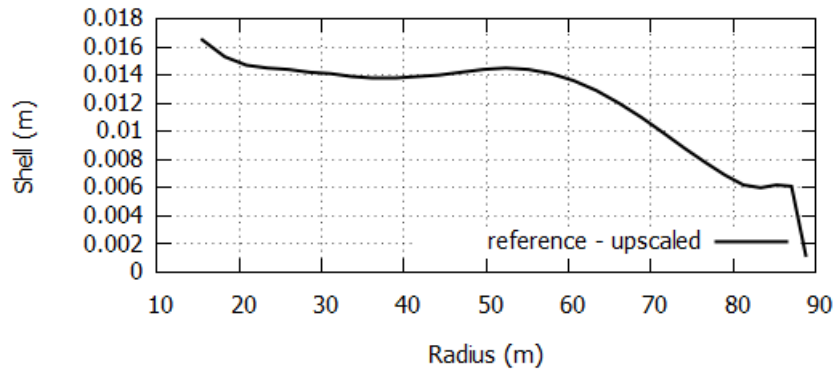
Διάγραμμα 5.3 Κατανομή αδιάστατου πάχους του upscaled πτερυγίου αναφοράς



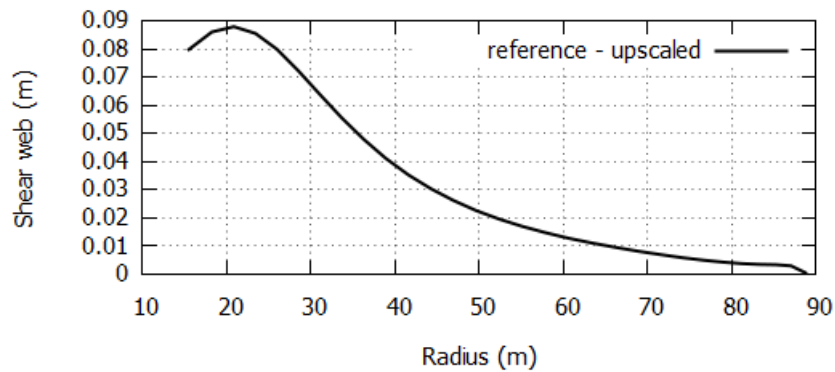
Διάγραμμα 5.4 Κατανομή του μήκους της βάσης του I-beam του upscaled πτερυγίου αναφοράς



Διάγραμμα 5.5 Κατανομή του πάχους των spar caps του upscaled πτερυγίου αναφοράς



Διάγραμμα 5.6 Κατανομή του πάχους του κελύφους του upscaled πτερυγίου αναφοράς



Διάγραμμα 5.7 Κατανομή του πάχους του shear web του upscaled πτερυγίου αναφοράς

Όπως φαίνεται και στους επόμενους πίνακες (Πίνακας 5.1 και Πίνακας 5.2), όλες οι νέες τιμές των φορτίσεων που προκύπτουν μέσω του κώδικα επαληθεύουν τους κανόνες της αύξησης μεγέθους, δεδομένου ότι:

$$s^2 = 2$$

$$s^3 = 2.8$$

$$s^4 = 3.95$$

Πέρα από την ταύτιση του λόγου της νέας τιμής προς την παλαιά (ο οποίος συμβολίζεται σε κάθε περίπτωση με k) με τον συντελεστή scaling υψομένο στην κατάλληλη δύναμη ανάλογα με το μέγεθος, αυτό που έχει αξία να παρατηρήσει κανείς στους Πίνακες 5.1 και 5.2, είναι η αύξηση των τάσεων κατά την περιστροφή (edgewise), σε αντίθεση με τις τάσεις κατά την πτερύγιση (flapwise), λόγω της επίδρασης του βάρους. Για τον ίδιο λόγο, άλλωστε, αυξάνεται η ροπή κατά την περιστροφή (edgewise) περισσότερο απ' ό τι αυτή κατά την πτερύγιση (flapwise). Αυτό, όπως είναι λογικό, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση και των συνολικών τάσεων. Τέλος, σημειώνεται πως η νέα μάζα είναι 36,559 kg, δηλαδή πράγματι $13,041 \cdot s^3$.

| Radius* | F _{norm} (N/m) | | | F _{tang} (N/m) | | | F _{centrifugal} (N) | | |
|---------|-------------------------|-----------|------|-------------------------|---------|------|------------------------------|-------------|------|
| | 5 MW | 10 MW | k | 5 MW | 10 MW | k | 5 MW | 10 MW | k |
| 0.18 | 1,199.275 | 1,691.01 | 1.41 | 318.744 | 449.44 | 1.41 | 602,180.8 | 1,197,244.8 | 1.99 |
| 0.22 | 1,755.786 | 2,475.672 | 1.41 | 661.307 | 932.44 | 1.41 | 577,823.4 | 1,148,817.8 | 1.99 |
| 0.26 | 2,087.645 | 2,943.596 | 1.41 | 712.102 | 1004.05 | 1.41 | 549,390.5 | 1,092,288.1 | 1.99 |
| 0.31 | 2,370.433 | 3,342.326 | 1.41 | 713.387 | 1005.86 | 1.41 | 517,023.2 | 1,027,936.1 | 1.99 |
| 0.35 | 2,659.26 | 3,749.569 | 1.41 | 714.693 | 1007.7 | 1.41 | 481,445.1 | 957,200.26 | 1.99 |
| 0.39 | 2,975.19 | 4,195.033 | 1.41 | 717.425 | 1011.55 | 1.41 | 443,570.1 | 881,897.95 | 1.99 |
| 0.43 | 3,340.512 | 4,710.137 | 1.41 | 725.787 | 1023.34 | 1.41 | 404,200.3 | 803,623.68 | 1.99 |
| 0.48 | 3,747.381 | 5,283.867 | 1.41 | 736.096 | 1037.88 | 1.41 | 363,976.4 | 723,651.13 | 1.99 |
| 0.52 | 4,146.919 | 5,847.242 | 1.41 | 740.76 | 1044.46 | 1.41 | 323,429.2 | 643,035.93 | 1.99 |
| 0.56 | 4,575.142 | 6,451.076 | 1.41 | 745.39 | 1050.99 | 1.41 | 283,103.7 | 562,861.59 | 1.99 |
| 0.6 | 5,017.873 | 7,075.348 | 1.41 | 748.577 | 1055.48 | 1.41 | 243,634.6 | 484,389.91 | 1.99 |
| 0.64 | 5,376.716 | 7,581.301 | 1.41 | 747.682 | 1054.21 | 1.41 | 205,715.4 | 408,999.6 | 1.99 |
| 0.69 | 5,728.67 | 8,077.558 | 1.41 | 745.879 | 1051.67 | 1.41 | 170,064 | 338,118.1 | 1.99 |
| 0.73 | 6,072.914 | 8,562.977 | 1.41 | 742.801 | 1047.33 | 1.41 | 137,297.9 | 272,973.11 | 1.99 |
| 0.77 | 6,409.709 | 9,037.958 | 1.41 | 737.49 | 1039.85 | 1.41 | 10,7787.4 | 214,300.91 | 1.99 |
| 0.81 | 6,739.542 | 9,503.006 | 1.41 | 727.726 | 1026.08 | 1.41 | 81,591.11 | 162,217.95 | 1.99 |
| 0.85 | 7,087.684 | 9,993.907 | 1.41 | 706.37 | 995.966 | 1.41 | 58,451.65 | 116,212.5 | 1.99 |
| 0.89 | 7,334.899 | 10,342.33 | 1.41 | 665.274 | 938.021 | 1.41 | 37,823.26 | 75,199.514 | 1.99 |
| 0.94 | 7,069.808 | 9,968.812 | 1.41 | 581.451 | 819.837 | 1.41 | 19,128.82 | 38,031.567 | 1.99 |
| 0.98 | 4,539.685 | 6,401.143 | 1.41 | 374.779 | 528.435 | 1.41 | 5,111.518 | 10,162.626 | 1.99 |

| Radius* | M _f (Nm) | | | M _e (Nm) | | | σ _{f,max} (N/m ²) | | |
|---------|---------------------|-------------|------|---------------------|-------------|------|--|-------------|---|
| | 5 MW | 10 MW | k | 5 MW | 10 MW | k | 5 MW | 10 MW | k |
| 0.18 | 7,157,366.3 | 20,064,132 | 2.80 | 3,043,986 | 11,032,222 | 3.62 | 53,023,970.9 | 53,025,166 | 1 |
| 0.22 | 6,555,954.8 | 18,378,210 | 2.80 | 2,650,867 | 9,580,979.9 | 3.61 | 56,998,851.2 | 57,000,153 | 1 |
| 0.26 | 5,966,222.6 | 16,725,028 | 2.80 | 2,290,104 | 8,252,771.9 | 3.60 | 57,696,142.8 | 57,697,479 | 1 |
| 0.31 | 5,390,561.3 | 15,111,290 | 2.80 | 1,961,783 | 7,047,304.9 | 3.59 | 57,592,235.6 | 57,593,589 | 1 |
| 0.35 | 4,830,929.3 | 13,542,486 | 2.80 | 1,665,247 | 5,961,927.8 | 3.58 | 57,592,934.6 | 57,594,309 | 1 |
| 0.39 | 4,289,296.8 | 12,024,138 | 2.80 | 1,399,346 | 4,992,083.6 | 3.57 | 58,088,728.6 | 58,090,137 | 1 |
| 0.43 | 3,767,818.3 | 10,562,287 | 2.80 | 1,162,631 | 4,132,019 | 3.55 | 59,033,623.9 | 59,035,076 | 1 |
| 0.48 | 3,268,956.8 | 9,163,836.8 | 2.80 | 953,546.9 | 3,375,525 | 3.54 | 60,250,242.4 | 60,251,745 | 1 |
| 0.52 | 2,795,421.4 | 7,836,381.9 | 2.80 | 770,522.5 | 2,716,319.2 | 3.53 | 61,483,756.4 | 61,485,310 | 1 |
| 0.56 | 2,349,943.4 | 6,587,579.2 | 2.80 | 611,967.6 | 2,148,074.4 | 3.51 | 62,564,839 | 62,566,440 | 1 |
| 0.6 | 1,935,405.6 | 5,425,510.5 | 2.80 | 476,260.1 | 1,664,344.8 | 3.50 | 63,210,180.6 | 63,211,822 | 1 |
| 0.64 | 1,554,717.7 | 4,358,332.5 | 2.80 | 361,713.2 | 1,258,441.3 | 3.48 | 63,051,545.4 | 63,053,211 | 1 |
| 0.69 | 1,210,370.7 | 3,393,027.6 | 2.80 | 266,559.7 | 923,382.51 | 3.46 | 61,543,098.1 | 61,544,751 | 1 |
| 0.73 | 904,742.88 | 2,536,263.2 | 2.80 | 188,978.8 | 651,986.11 | 3.45 | 57,991,409.2 | 57,992,986 | 1 |
| 0.77 | 640,161.7 | 1,794,563.9 | 2.80 | 127,171.6 | 437,166.92 | 3.43 | 51,736,616.7 | 51,738,035 | 1 |
| 0.81 | 418,904.27 | 1,174,314.1 | 2.80 | 79,439.03 | 272,252.55 | 3.43 | 42,165,297.2 | 42,166,476 | 1 |
| 0.85 | 243,221.62 | 681,823.89 | 2.80 | 44,249.38 | 151,271.56 | 3.42 | 29,997,131.2 | 29,998,008 | 1 |
| 0.89 | 115,366.43 | 323,407.99 | 2.80 | 20,249.79 | 69,050.627 | 3.41 | 17,206,935.9 | 17,207,489 | 1 |
| 0.94 | 36,662.258 | 102,775.58 | 2.80 | 6,229.125 | 21,144.298 | 3.39 | 7,023,302.67 | 7,023,519 | 1 |
| 0.98 | 3,836.0338 | 10,753.566 | 2.80 | 642.3321 | 2,174.8606 | 3.39 | 2,502,808.91 | 2,502,882.3 | 1 |

Πίνακας 5.1 Φορτίσεις του upscaled πτερυγίου αναφοράς (10 MW – 88.83 m - $V = 11$ m/s) και σύγκριση με τα αντίστοιχα του πτερυγίου αναφοράς (5 MW – 63m - $V = 11$ m/s)

| Radius* | $\sigma_{e,max}$ (N/m ²) | | | σ_{max} (N/m ²) | | | mass (kg/m) | | |
|---------|--------------------------------------|------------|------|------------------------------------|------------|------|-------------|----------|------|
| | 5 MW | 10 MW | k | 5 MW | 10 MW | k | 5 MW | 10 MW | k |
| 0.18 | 30,434,135 | 39,348,119 | 1.29 | 85,671,194 | 94,586,465 | 1.10 | 435.3597 | 865.5386 | 1.99 |
| 0.22 | 30,188,774 | 38,923,343 | 1.29 | 89,371,051 | 98,107,011 | 1.10 | 423.4251 | 841.8115 | 1.99 |
| 0.26 | 28,640,653 | 36,818,847 | 1.29 | 88,440,610 | 96,620,226 | 1.09 | 417.8245 | 830.6769 | 1.99 |
| 0.31 | 26,988,194 | 34,585,069 | 1.28 | 86,610,321 | 94,208,633 | 1.09 | 407.5277 | 810.2059 | 1.99 |
| 0.35 | 25,321,922 | 32,340,558 | 1.28 | 84,891,666 | 91,911,757 | 1.08 | 389.6745 | 774.7119 | 1.99 |
| 0.39 | 23,552,976 | 29,974,040 | 1.27 | 83,574,740 | 89,997,292 | 1.08 | 367.149 | 729.9289 | 1.99 |
| 0.43 | 21,554,188 | 27,327,178 | 1.27 | 82,475,082 | 88,249,601 | 1.07 | 342.6752 | 681.2726 | 1.99 |
| 0.48 | 19,357,020 | 24,444,460 | 1.26 | 81,438,773 | 86,527,790 | 1.06 | 317.9683 | 632.1528 | 1.99 |
| 0.52 | 17,139,829 | 21,554,831 | 1.26 | 80,386,589 | 84,803,216 | 1.05 | 293.5256 | 583.5583 | 1.99 |
| 0.56 | 15,060,402 | 18,858,195 | 1.25 | 79,311,199 | 83,110,662 | 1.05 | 268.6698 | 534.1424 | 1.99 |
| 0.6 | 13,207,923 | 16,465,553 | 1.25 | 78,022,652 | 81,281,989 | 1.04 | 242.9441 | 482.9972 | 1.99 |
| 0.64 | 11,574,988 | 14,365,866 | 1.24 | 76,147,961 | 78,940,567 | 1.04 | 216.3394 | 430.1043 | 1.99 |
| 0.69 | 10,137,383 | 12,527,249 | 1.24 | 73,120,872 | 75,512,450 | 1.03 | 188.9087 | 375.5693 | 1.99 |
| 0.73 | 8,777,170 | 10,802,456 | 1.23 | 68,125,009 | 70,151,928 | 1.03 | 161.9521 | 321.9769 | 1.99 |
| 0.77 | 7,385,706 | 9,057,157 | 1.23 | 60,383,667 | 62,056,589 | 1.03 | 136.7269 | 271.8268 | 1.99 |
| 0.81 | 5,874,226 | 7,181,767 | 1.22 | 49,178,488 | 50,487,256 | 1.03 | 114.6179 | 227.8718 | 1.99 |
| 0.85 | 4,223,187 | 5,150,306 | 1.22 | 35,190,396 | 36,118,432 | 1.03 | 96.40952 | 191.6674 | 1.99 |
| 0.89 | 2,527,958 | 3,075,103 | 1.22 | 20,465,554 | 21,013,281 | 1.03 | 82.83333 | 164.6652 | 1.99 |
| 0.94 | 1,055,014 | 1,277,518 | 1.21 | 8,501,768 | 8,724,506 | 1.03 | 72.27768 | 143.6952 | 1.99 |
| 0.98 | 314,994 | 380,466.8 | 1.21 | 3,025,990 | 3,091,544 | 1.02 | 39.2841 | 78.10073 | 1.99 |

| Radius* | EI _{flap} (Nm ²) | | | EI _{edge} (Nm ²) | | |
|---------|---------------------------------------|------------|------|---------------------------------------|----------|------|
| | 5 MW | 10 MW | k | 5 MW | 10 MW | k |
| 0.18 | 3.52E+09 | 1.39E+10 | 3.95 | 6.86E+09 | 2.71E+10 | 3.95 |
| 0.22 | 2.48E+09 | 9.8E+09 | 3.95 | 6.1E+09 | 2.41E+10 | 3.95 |
| 0.26 | 1.93E+09 | 7.62E+09 | 3.95 | 5.48E+09 | 2.16E+10 | 3.95 |
| 0.31 | 1.56E+09 | 6.15E+09 | 3.95 | 4.85E+09 | 1.92E+10 | 3.95 |
| 0.35 | 1.27E+09 | 5.02E+09 | 3.95 | 4.25E+09 | 1.68E+10 | 3.95 |
| 0.39 | 1.02E+09 | 4.05E+09 | 3.95 | 3.71E+09 | 1.47E+10 | 3.95 |
| 0.43 | 8.09E+08 | 3.2E+09 | 3.95 | 3.25E+09 | 1.28E+10 | 3.95 |
| 0.48 | 6.25E+08 | 2.47E+09 | 3.95 | 2.85E+09 | 1.13E+10 | 3.95 |
| 0.52 | 4.74E+08 | 1.87E+09 | 3.95 | 2.5E+09 | 9.88E+09 | 3.95 |
| 0.56 | 3.53E+08 | 1.4E+09 | 3.95 | 2.16E+09 | 8.54E+09 | 3.95 |
| 0.6 | 2.6E+08 | 1.03E+09 | 3.95 | 1.83E+09 | 7.23E+09 | 3.95 |
| 0.64 | 1.89E+08 | 7.47E+08 | 3.95 | 1.51E+09 | 5.96E+09 | 3.95 |
| 0.69 | 1.37E+08 | 5.42E+08 | 3.95 | 1.2E+09 | 4.75E+09 | 3.95 |
| 0.73 | 1E+08 | 3.96E+08 | 3.95 | 9.33E+08 | 3.69E+09 | 3.95 |
| 0.77 | 73,789,076 | 2.92E+08 | 3.95 | 7.07E+08 | 2.79E+09 | 3.95 |
| 0.81 | 55,929,996 | 2.21E+08 | 3.95 | 5.28E+08 | 2.09E+09 | 3.95 |
| 0.85 | 43,554,968 | 1.72E+08 | 3.95 | 3.91E+08 | 1.54E+09 | 3.95 |
| 0.89 | 34,163,362 | 1.35E+08 | 3.94 | 2.83E+08 | 1.12E+09 | 3.95 |
| 0.94 | 23,531,930 | 93,009,311 | 3.95 | 1.85E+08 | 7.31E+08 | 3.95 |
| 0.98 | 3,907,915 | 15,446,196 | 3.95 | 36,274,739 | 1.43E+08 | 3.95 |

Πίνακας 5.2 Φορτίσεις του upscaled πτερυγίου αναφοράς (10 MW – 88.83 m - $V = 11$ m/s) και σύγκριση με τα αντίστοιχα του πτερυγίου αναφοράς (5 MW – 63m - $V = 11$ m/s)

Από ενεργειακής άποψης και βασιζόμενοι στις αρχές της αύξησης μεγέθους Α/Γ είναι αναμενόμενο η ισχύς ανά ταχύτητα να διπλασιάζεται, καθώς και το ΑΕΡ να διπλασιάζεται επίσης, με την προϋπόθεση πως οι συντελεστές της κατανομής Weibull παραμένουν σταθεροί, όπως και συμβαίνει. Επιπρόσθετα, τόσο το $C_p max$ όσο και το λ_{opt} παραμένουν σταθερά. Όμοια, η ονομαστική ταχύτητα V_R και η ταχύτητα ακροπτερυγίου $\Omega_R 'R'$ παραμένουν σταθερά. Αυτά φαίνονται αναλυτικότερα στον Πίνακα 5.3. Η νέα τιμή του ΑΕΡ είναι 24,543,253 kWh και της μέσης ισχύος $\bar{P} = 2,802 kW$ ($V_{in} = 5 m/s$, $V_{out} = 25 m/s$).

| Καμπύλη ισχύος ($V_{in} = 5 m/s$, $V_R = 11.06 m/s$, variable speed) | | | | |
|---|----------|-----------|---------|------------------|
| $V (m/s)$ | $P (kW)$ | λ | C_p | $\Omega (rad/s)$ |
| 5 | 934.7 | 7.93 | 0.49245 | 0.4493 |
| 6 | 1,615.2 | 7.93 | 0.49245 | 0.5392 |
| 7 | 2,564.9 | 7.93 | 0.49245 | 0.6290 |
| 8 | 3,828.7 | 7.93 | 0.49245 | 0.7189 |
| 9 | 5,451.4 | 7.93 | 0.49245 | 0.8087 |
| 10 | 7,477.9 | 7.93 | 0.49245 | 0.8986 |
| 11 | 9,845.8 | 7.26 | 0.48452 | 0.8986 |
| 11.06 | 10,000 | 7.22 | 0.4862 | 0.8986 |

Πίνακας 5.3 Απόδοση Α/Γ με το upscaled πτερύγιο αναφοράς (10 MW – 88.83 m) έως τη V_R

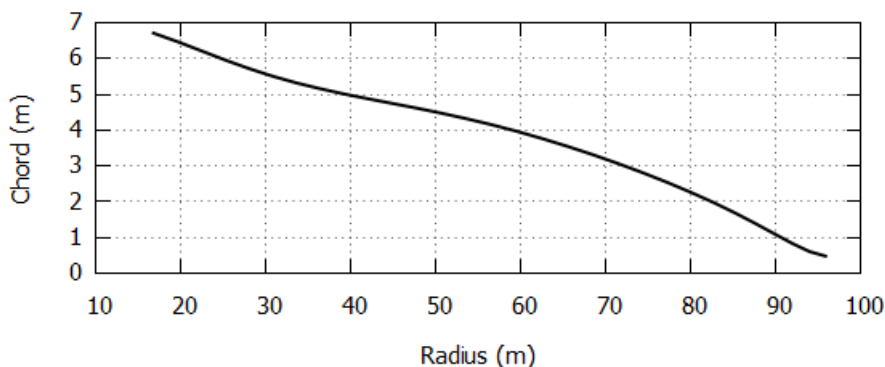
Παρατηρώντας κανείς τις τιμές της στήλης του C_p συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα και συγκρίνοντας αυτές τις τιμές με το Διάγραμμα 4.42 είναι προφανές πως οι καμπύλες ταυτίζονται. Μάλιστα αυτό συμβαίνει σε όλο το εύρος των ταχυτήτων και όχι μόνο έως την (κοινή) ονομαστική. Αντίστοιχα, οι τιμές της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα (5^η στήλη) είναι πράγματι οι τιμές της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα (Διάγραμμα 4.42) πολλαπλασιασμένες με $1/s$.

Ολοκληρώνοντας, προκύπτει πως στην συγκεκριμένη παράγραφο επαληθεύονται πλήρως όλοι οι κανόνες ομοιότητας που διέπουν την αύξηση μεγέθους, όχι μόνο ως προς τις φορτίσεις, αλλά και ως προς την απόδοση μιας Α/Γ [8]. Παράλληλα, πέρα από τη σχεδίαση του νέου πτερυγίου 10 MW, δίνεται ακόμη μία ευκαιρία να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία του υπολογιστικού κώδικα *RAFT*, συμπεριλαμβανομένων των τροποποιήσεων και των προσθηκών σε αυτόν των υπολογισμών των φορτίσεων και άλλων δομικών χαρακτηριστικών κατά την περίοδο εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

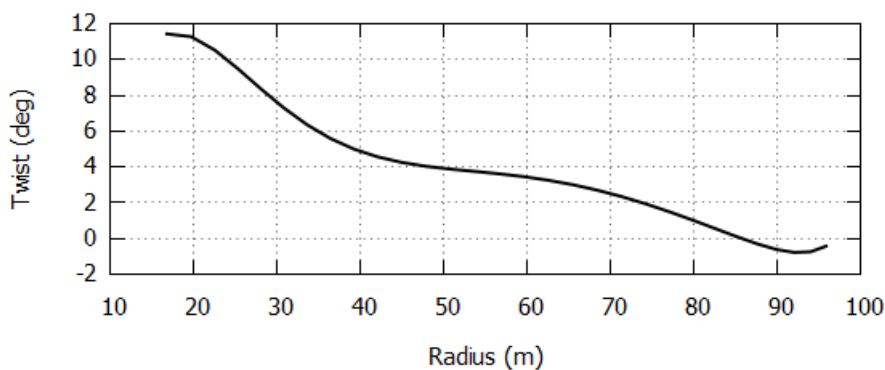
5.3 Αύξηση μεγέθους του βέλτιστου πτερυγίου (Παρ. 4.4)

Στα πλαίσια της Παραγράφου 4.4 η βελτιστοποίηση με επιτρεπόμενη αύξηση του ΩR οδηγεί σε ένα νέο πτερύγιο 68 m με νέο $\Omega R = 86.156\text{ m/s}$ και μάζα $m = 13,659.4\text{ kg}$. Προκειμένου να εξεταστεί και το συγκεκριμένο πτερύγιο αν αυξηθεί σε 10 MW , ακολουθείται ότι περιγράφεται και στην Παράγραφο 5.2. Συνοπτικά, σημειώνεται πως η νέα ακτίνα είναι $R' = 95.88\text{ m}$, ενώ η νέα γωνιακή ταχύτητα δρομέα $\Omega'_R = 0.8984\text{ rad/s}$.

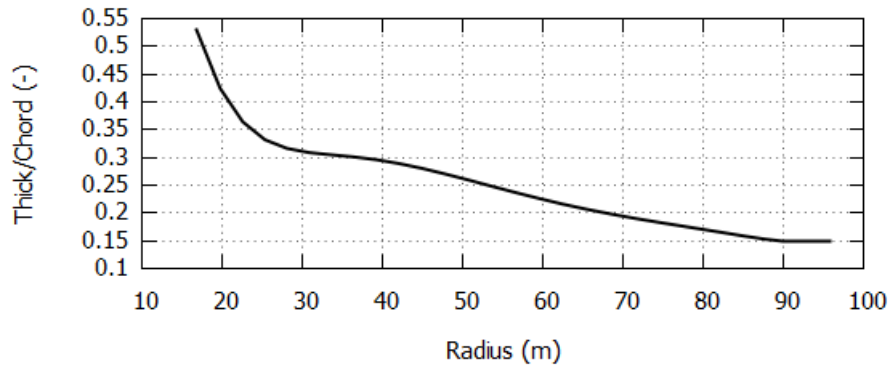
Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση της μορφής του νέου πτερυγίου (Διάγραμμα 5.8 έως Διάγραμμα 5.14). Αντίθετα, οι φορτίσεις καθώς και τα δομικά χαρακτηριστικά του δεν καταγράφονται σε κάποιον πίνακα ή διάγραμμα, καθώς με βάση τα παραπάνω είναι οι φορτίσεις που καταγράφονται στην Παράγραφο 4.4 πολλαπλασιασμένες με τον συντελεστή scaling υψομένο στην κατάλληλη δύναμη. Σχετικά με τις σχέσεις μεταξύ των τιμών των μεγεθών ισχύουν προφανώς τα ίδια. Ενδεικτικά, σημειώνεται πως η μάζα προκύπτει $38,290\text{ kg}$ και η ροπή κατά την πτερύγιση (flapwise) στην ταχύτητα αναφοράς $26,285\text{ kNm}$. Όμοια με προηγουμένως, παρατηρείται πως και σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη συνολική τάση, η οποία δεν παραμένει σταθερή, ξεπερνά αυτή του πτερυγίου αναφοράς των 5 MW ($91,149,086\text{ N/m}^2$ έναντι $89,371,051\text{ N/m}^2$).



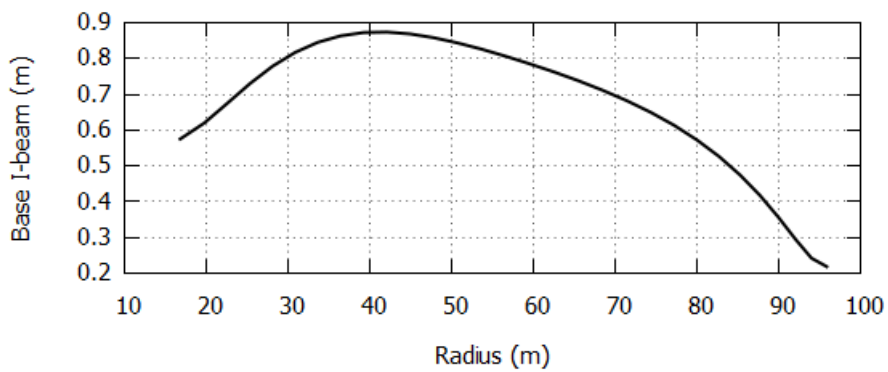
Διάγραμμα 5.8 Κατανομή χορδής του upscaled πτερυγίου (10 MW- 95.88 m)



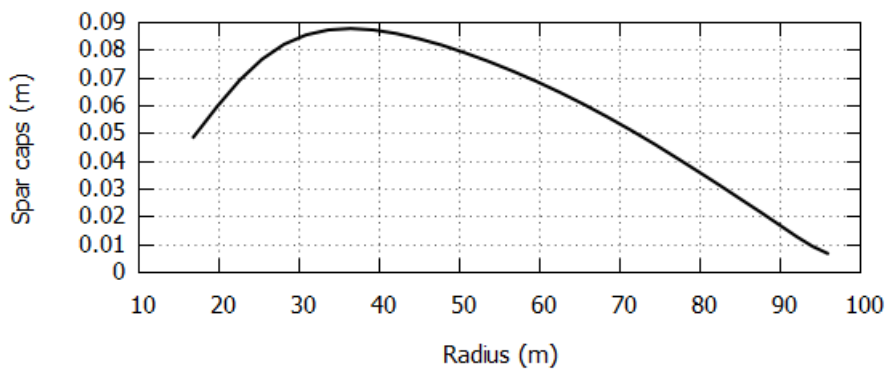
Διάγραμμα 5.9 Κατανομή συστροφής του upscaled πτερυγίου (10 MW- 95.88 m)



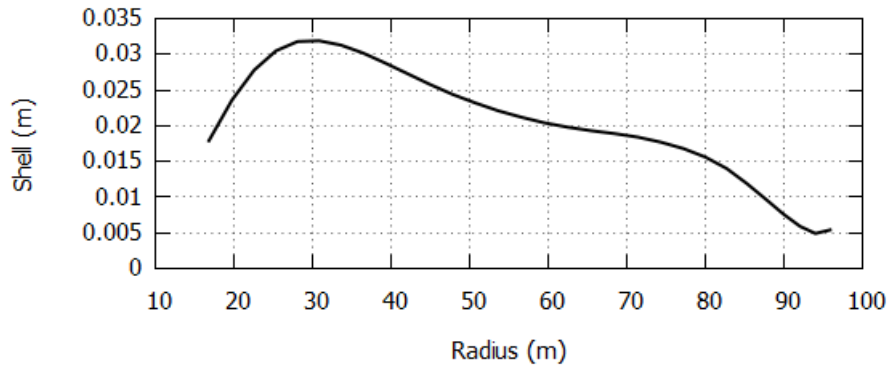
Διάγραμμα 5.10 Κατανομή αδιάστατου πάχους του upscaled πτερυγίου (10 MW- 95.88 m)



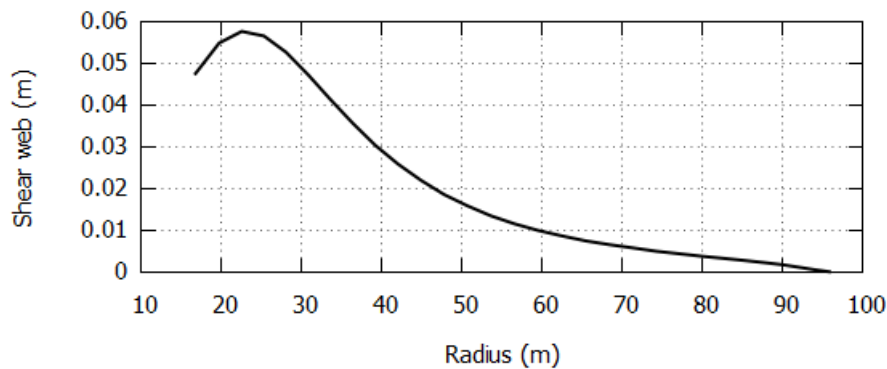
Διάγραμμα 5.11 Κατανομή του μήκους της βάσης του I-beam του upscaled πτερυγίου (10 MW- 95.88 m)



Διάγραμμα 5.12 Κατανομή του πάχους των spar caps του upscaled πτερυγίου (10 MW- 95.88m)



Διάγραμμα 5.13 Κατανομή του πάχους του κελύφους του upscaled πτερυγίου (10 MW-95.88m)



Διάγραμμα 5.14 Κατανομή του πάχους του shear web του upscaled πτερυγίου (10 MW-95.88m)

Η απόδοση αυτού του πτερυγίου είναι καλύτερη από αυτή του upscaled πτερυγίου αναφοράς, το οποίο είναι λογικό. Άλλωστε τόσο το συγκεκριμένο πτερύγιο, όσο και αυτό της Παραγράφου 5.2 έχουν τον ίδιο συντελεστή scaling. Η νέα τιμή του ΑΕΡ είναι 26,274,691 kWh και της μέσης ισχύος $\bar{P} = 2,999 \text{ kW}$ ($V_{in} = 5 \text{ m/s}$, $V_{out} = 25 \text{ m/s}$). Αναλυτικότερα η επίδοση του απεικονίζεται στον Πίνακα 5.4.

| Καμπύλη ισχύος ($V_{in} = 5 \text{ m/s}$, $V_R = 10.8 \text{ m/s}$, variable speed) | | | | |
|--|----------|-----------|---------|------------------|
| V (m/s) | P (kW) | λ | C_p | Ω (rad/s) |
| 5 | 1,061.2 | 10.77 | 0.47993 | 0.5615 |
| 6 | 1,833.8 | 10.77 | 0.47993 | 0.6738 |
| 7 | 2,912.0 | 10.77 | 0.47993 | 0.7861 |
| 8 | 4,346.8 | 10.77 | 0.47993 | 0.8984 |
| 9 | 6,180.0 | 9.57 | 0.47923 | 0.8984 |
| 10 | 8,273.5 | 8.61 | 0.46771 | 0.8984 |
| 10.8 | 10,000.0 | 8.00 | 0.45271 | 0.8984 |

Πίνακας 5.4 Απόδοση Α/Γ με το upscaled πτερύγιο (10 MW - 95.88 m) έως τη V_R

5.4 Σχεδίαση νέου πτερυγίου 10 MW

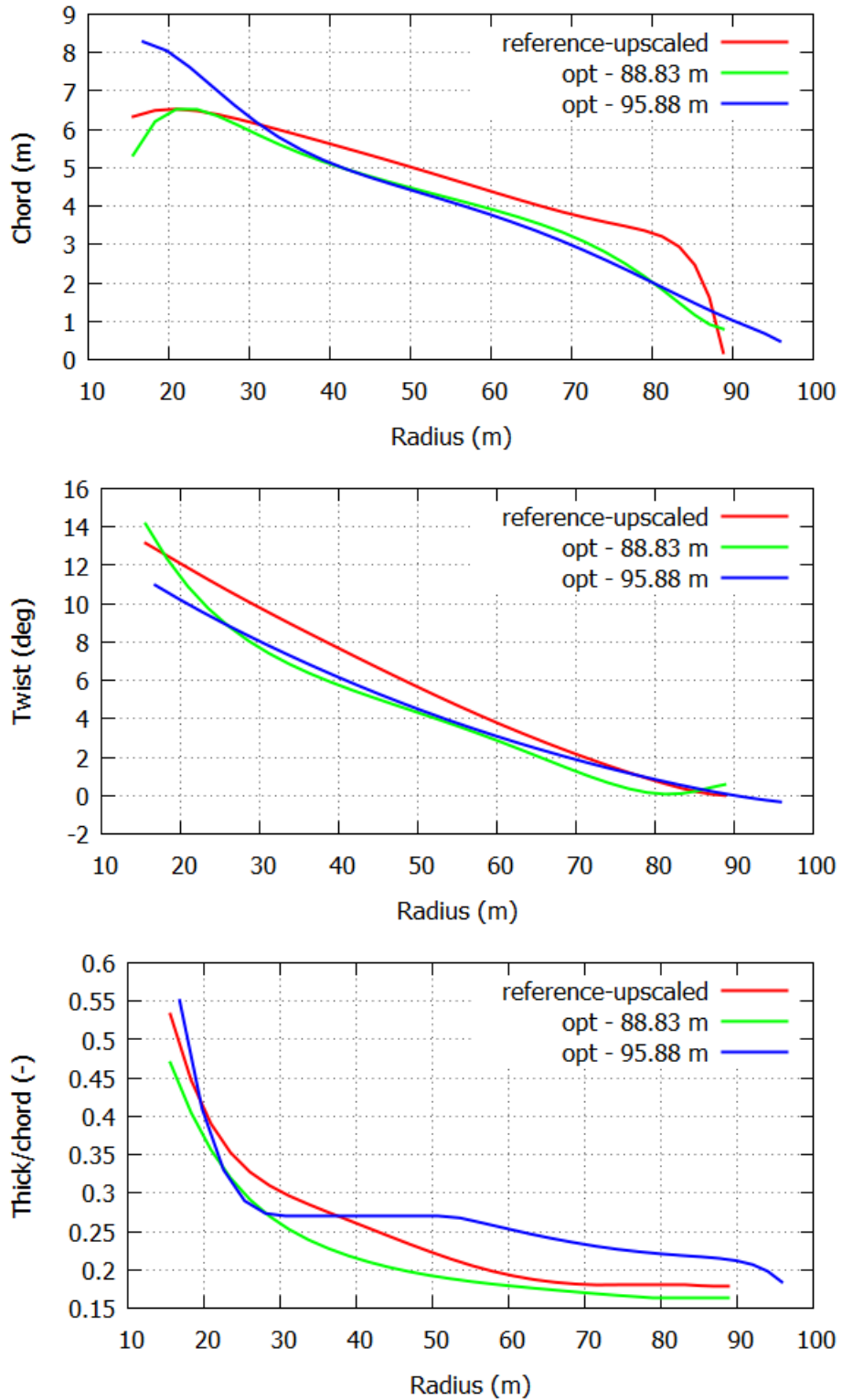
Αυτό που είναι προφανές από την Παράγραφο 5.2 και 5.3 είναι το γεγονός ότι η αύξηση μεγέθους στο πτερύγιο αναφοράς, καθώς και στο βέλτιστο της Παραγράφου 4.4 οδηγεί σε αύξηση των τάσεων κατά την περιστροφή (edgewise) και συνεπώς των συνολικών, σε αντίθεση με τις τάσεις κατά την πτερύγιση (flapwise) που δεν υπερβαίνουν αυτές του αναφοράς. Το ζητούμενο είναι, πλέον, η σχεδίαση ενός πτερυγίου αυτής της κλίμακας στο οποίο δε θα εφαρμόζονται μεγαλύτερες τάσεις από αυτές που εμφανίζονται στο πτερύγιο αναφοράς των 5MW. Σε πρώτη φάση, επιλέγεται η ακτίνα να θεωρηθεί σταθερή και ίση με 88.83 m, δηλαδή να βελτιστοποιηθεί το upscaled πτερύγιο αναφοράς (Παράγραφος 5.2), ενώ σε δεύτερη φάση να βελτιστοποιηθεί το πτερύγιο της Παραγράφου 5.3, δηλαδή με σταθερή ακτίνα 95.88 m. Επίσης, τα ΩR παραμένουν σταθερά (80 και 86.156 rad/s αντίστοιχα).

Η σχεδίαση ενός τέτοιου πτερυγίου βασίζεται στη μέθοδο βελτιστοποίησης που ακολουθείται και στο Κεφάλαιο 4. Όσον αφορά τους *περιορισμούς*, αυτοί είναι η μάζα του upscaled πτερυγίου αναφοράς, οι τάσεις κατά την πτερύγιση (flapwise) και οι συνολικές του πτερυγίου αναφοράς των 5 MW, ενώ ως *περιορισμός* θεωρείται και η ροπή του upscaled πτερυγίου αναφοράς κατά την πτερύγιση (flapwise) στη ρίζα. Η μόνη διαφοροποίηση των *περιορισμών* κατά τη δεύτερη βελτιστοποίηση, όπου $R = 95.88 m$, είναι το γεγονός ότι η τιμή του *περιορισμού* της μάζας είναι αυξημένη κατά 10%, για τους ίδιους λόγους που αυτή η αύξηση υιοθετείται και στην Παράγραφο 5.4. Αναλυτικότερα, των *περιορισμών* ανάλογα με το πτερύγιο που βελτιστοποιείται παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

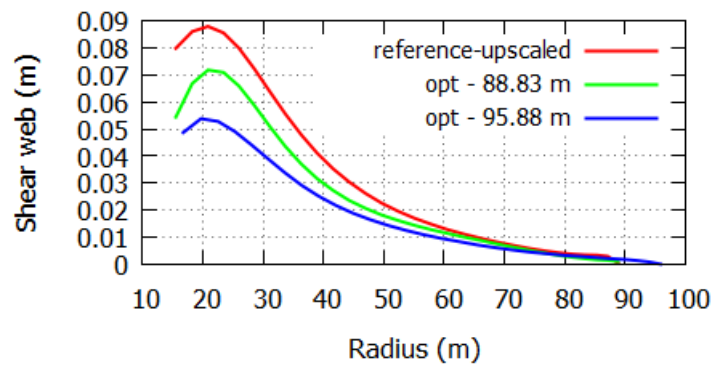
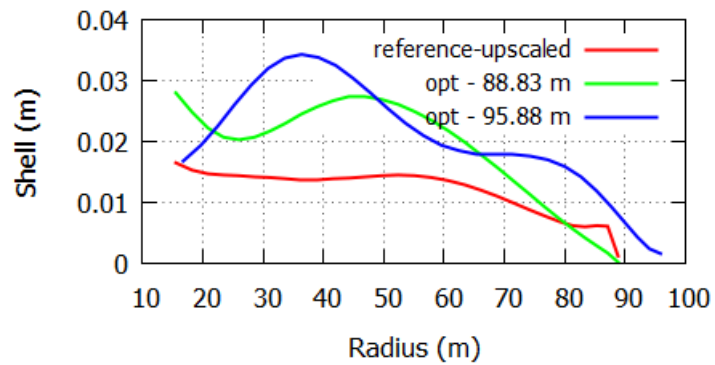
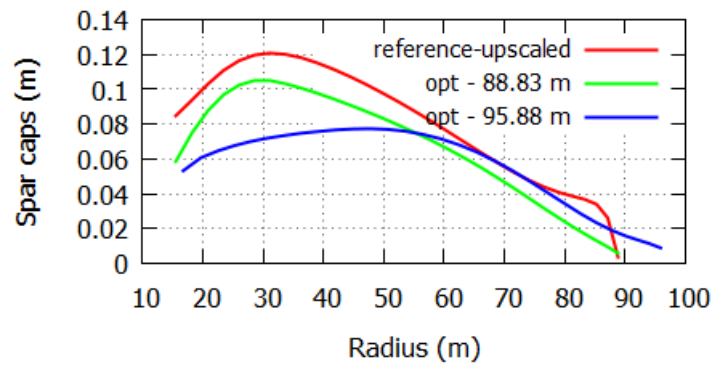
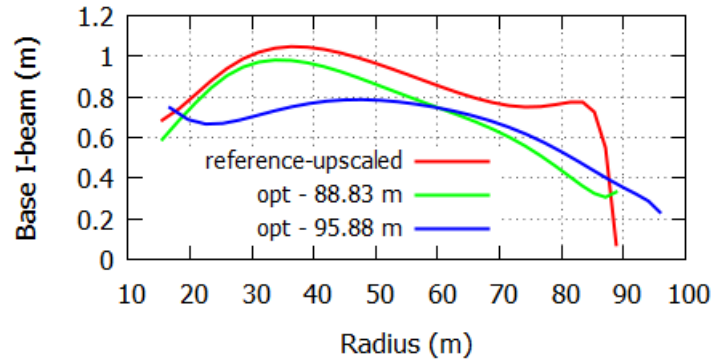
| Constraints | | |
|---------------------------|---------------|---------------|
| | $R = 88.83 m$ | $R = 95.88 m$ |
| $m (kg)$ | 36,559 | 40.215 |
| $M_{f, ROOT} (kNm)$ | 26,312 | 26,312 |
| $\sigma_{max} (kN/m^2)$ | 89,371 | 89,371 |
| $\sigma_{f,max} (kN/m^2)$ | 63,211 | 63,211 |

Πίνακας 5.5 Τιμές των *περιορισμών* που λαμβάνονται υπόψη κατά τη συγκεκριμένη βελτιστοποίηση (10 MW - 4 constraints)

Όπως είναι αναμενόμενο, η γενικότερη τάση που περιγράφει τη σχεδίαση μεγάλων πτερυγίων, δηλαδή οι μικρές χορδές, είναι κάτι παραπάνω από εμφανής από τα επόμενα διαγράμματα. Μάλιστα, οι συγκεκριμένες οι χορδές επιτυγχάνονται στην περίπτωση του πτερυγίου των 88.83 m με σχεδόν ίδια κατανομή πάχους, ελαφρώς μειωμένη. Αντίθετα, το πτερύγιο των 95.88 m έχει μεγαλύτερα πάχη. Οι τιμές της συστροφής είναι ξεκάθαρα μικρότερες και στις δύο περιπτώσεις, ενώ σχετικά με την εσωτερική δομή παρατηρείται μία αύξηση στο πάχος του κελύφους και μείωση στις διαστάσεις του I-beam. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία στα Διαγράμματα 5.14 και 5.15.

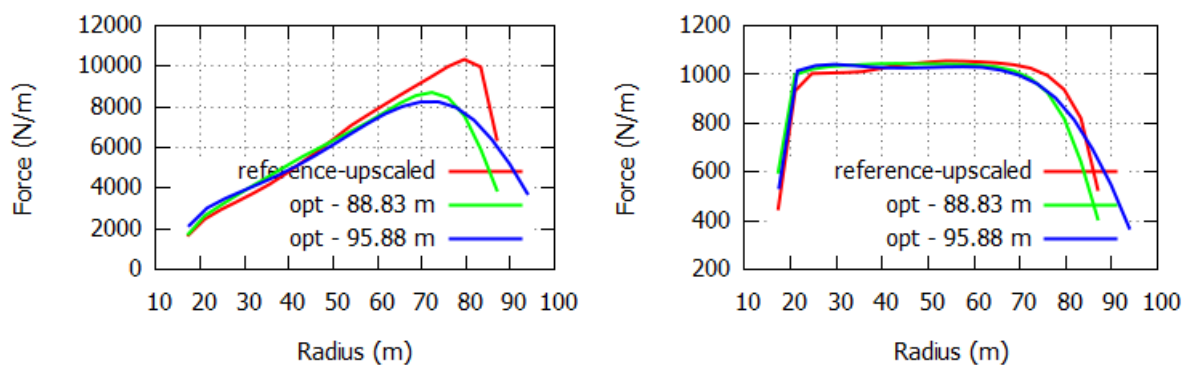


Διάγραμμα 5.15 [ΠΑΝΩ] Κατανομή χορδής βέλτιστων πτερυγίων και του upscaled αναφοράς, [ΚΕΤΡΟ] Αντίστοιχη κατανομή συστροφής, [ΚΑΤΩ] Αντίστοιχη κατανομή αδιάστατου πάχους, (10 MW - 4 constraints)

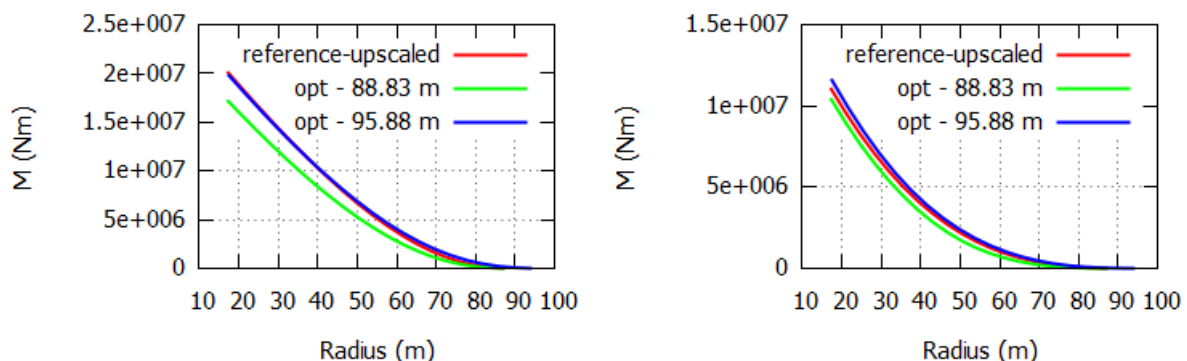


Διάγραμμα 5.16 [ΠΑΝΩ] Κατανομή του μήκους της βάσης του I-beam , [ΠΑΝΩ-KENTPO]
 Κατανομή πάχους των Spar Caps, [ΚΑΤΩ-KENTPO], Κατανομή πάχους του κελύφους, [ΚΑΤΩ]
 Κατανομή πάχους του Shear web (10 MW - 4 constraint s)

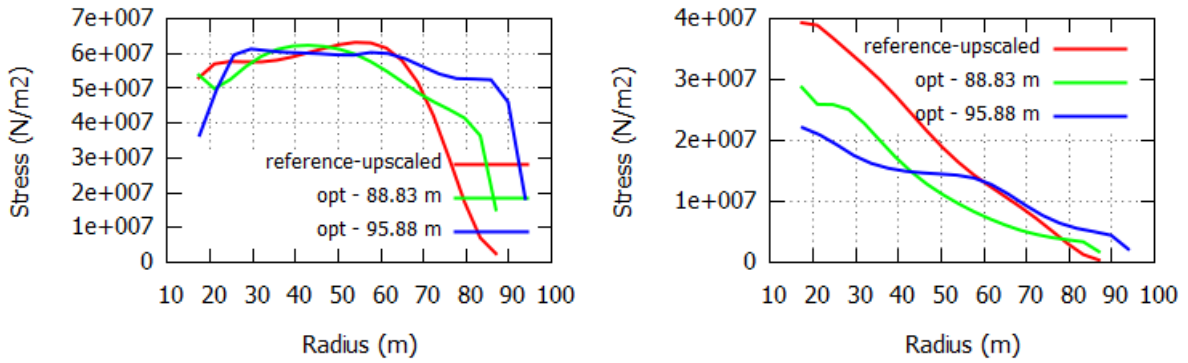
Όσον αφορά τις φορτίσεις, το ενδιαφέρον εστιάζεται στο διάγραμμα των συνολικών τάσεων και η διατήρηση του *περιορισμού* τους. Αυτός, άλλωστε, είναι και ο στόχος της συγκεκριμένης παραγράφου, δηλαδή η σχεδίαση ενός πτερυγίου 10 MW με σταθερές τάσεις σε σχέση με αυτές ενός 5 MW. Σημειώνεται πως όλες οι φορτίσεις είναι στην ταχύτητα 11 m/s η οποία προσεγγιστικά είναι για όλα η ονομαστική ταχύτητα. Σε συνδυασμό με την κατανομή της τάσης κατά την πτερύγιση (flapwise) και κατά την περιστροφή (edgewise), είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς πως η ζητούμενη διατήρηση των ορίων επιτυγχάνεται με μείωση των τάσεων κατά την περιστροφή (edgewise), ειδικότερα στο πρώτο τμήμα του πτερυγίου όπου εμφανίζεται ο κίνδυνος υπέρβασης των ορίων της συνολικής τάσης. Αντίθετα, στο ακραίο τμήμα, όπου δεν υπάρχει τέτοιος κίνδυνος, οι τάσεις κατά την πτερύγιση (flapwise) είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές του upscaled πτερυγίου αναφοράς, ενώ κατά την περιστροφή (edgewise) τείνουν να είναι ίσες. Παράλληλα, είναι εμφανές πως η δυσκαμψία του βελτιστοποιημένου πτερυγίου με 95.88 m είναι κατά πολύ μεγαλύτερη. Η νέα μάζα του βέλτιστου των 95.88 m είναι 38,391 kg δηλαδή σημειώνει αύξηση 5 %. Αντίθετα, όπως έχει καθοριστεί από τον Πίνακα 5.5, το βέλτιστο των 88.83 m έχει σχεδόν την ίδια μάζα, δηλαδή 36,447 kg.



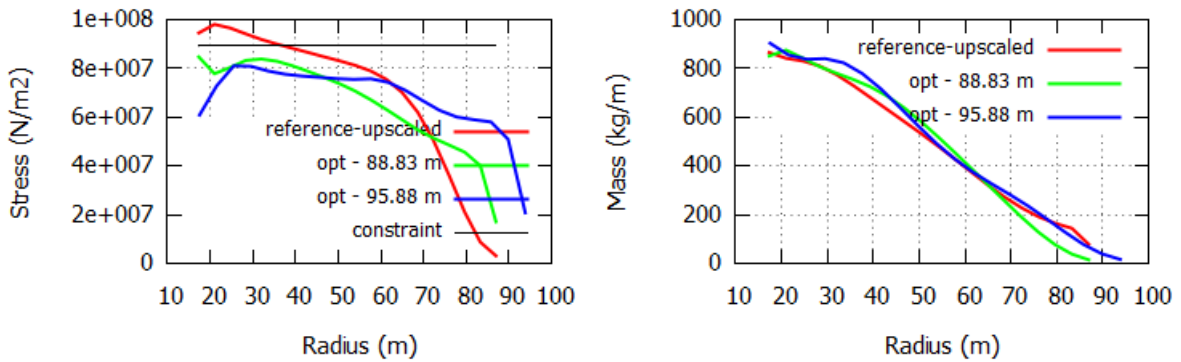
Διάγραμμα 5.17 [ΑΡΣΤΕΡΑ] Κατανομή της δύναμης κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή εφαπτομενικής δύναμης (10 MW - 4 constraints - $V = 11 \text{ m/s}$)



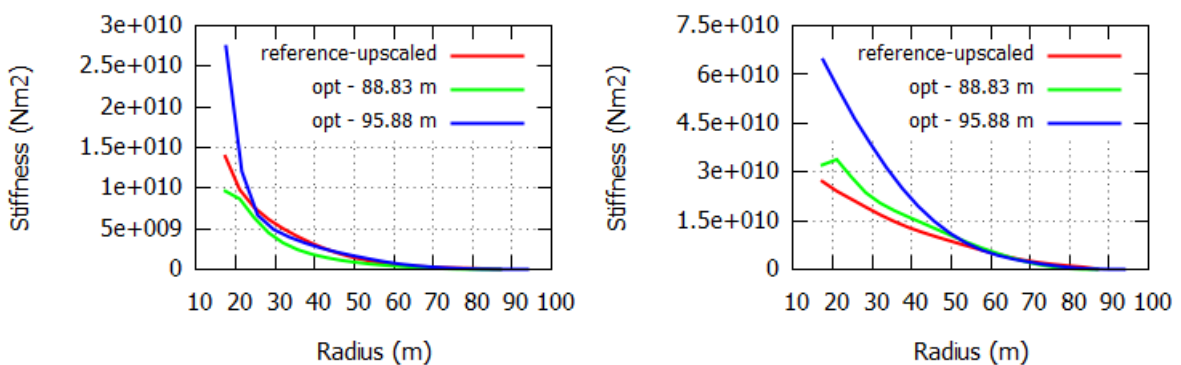
Διάγραμμα 5.18 [ΑΡΣΤΕΡΑ] Κατανομή της ροπής κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή ροπής κατά edgewise (10 MW - 4 constraints - $V = 11 \text{ m/s}$)



Διάγραμμα 5.19 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Μέγιστη τάση κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Μέγιστη τάση κατά edgewise (10 MW - 4 constraints - $V = 11 \text{ m/s}$)



Διάγραμμα 5.20 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Συνολική μέγιστη τάση ($V = 11 \text{ m/s}$), [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή μάζας (10 MW - 4 constraints)



Διάγραμμα 5.21 [ΑΡΙΣΤΕΡΑ] Κατανομή δυσκαμψίας κατά flapwise, [ΔΕΞΙΑ] Κατανομή δυσκαμψίας κατά edgewise (10 MW - 4 constraints)

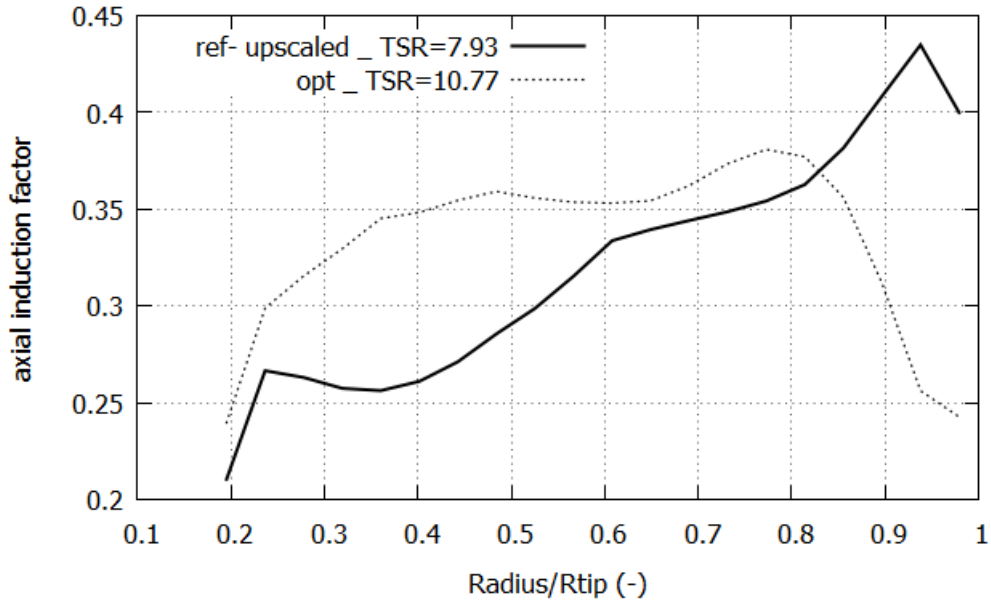
Παρά το γεγονός πως χωρίς να δίνεται περιθώριο στη μάζα να αυξηθεί πέρα από την τιμή της στο upscaled πτερύγιο αναφοράς και συγχρόνως τίθεται ένας αυστηρότερος περιορισμός στη συνολική τάση, το βέλτιστο πτερύγιο των 88.83 m καταφέρνει να έχει εξίσου αποδοτική συμπεριφορά με upscaled αναφοράς (Πίνακας 5.6). Αυτή η διαπίστωση είναι το σημαντικότερο συμπέρασμα της συγκεκριμένης παραγράφου, καθώς θα υπέθετε κανείς πως αυτός ο συνδυασμός των περιορισμών θα οδηγούσε σε αρκετά μειωμένη απόδοση. Όσον αφορά το μεγαλύτερο πτερύγιο, ήταν αναμενόμενο πως η παραγωγή ενέργειας του θα ήταν μεγαλύτερη από αυτή του upscaled πτερυγίου αναφοράς λόγω της μεγαλύτερης ακτίνας και συνεπώς μεγαλύτερου ΩR . Το ζητούμενο σε αυτή την περίπτωση είναι το εάν η αυξημένη μάζα που προκύπτει μπορεί να είναι αποδεκτή.

| Αποτελέσματα καμπύλης ισχύος ($V_{in} = 5 \text{ m/s}, V_{out} = 25 \text{ m/s}, \text{variable speed}$) | | |
|--|----------------|--------------|
| <i>Πτερύγιο</i> | \bar{P} (kW) | Μεταβολή (%) |
| <i>Upscaled πτερύγιο αναφοράς</i> | 2,802 | - |
| <i>Βέλτιστο - 88.83 m</i> | 2,790 | -0.43 |
| <i>Βέλτιστο - 95.88 m</i> | 2.986 | 6.56 |

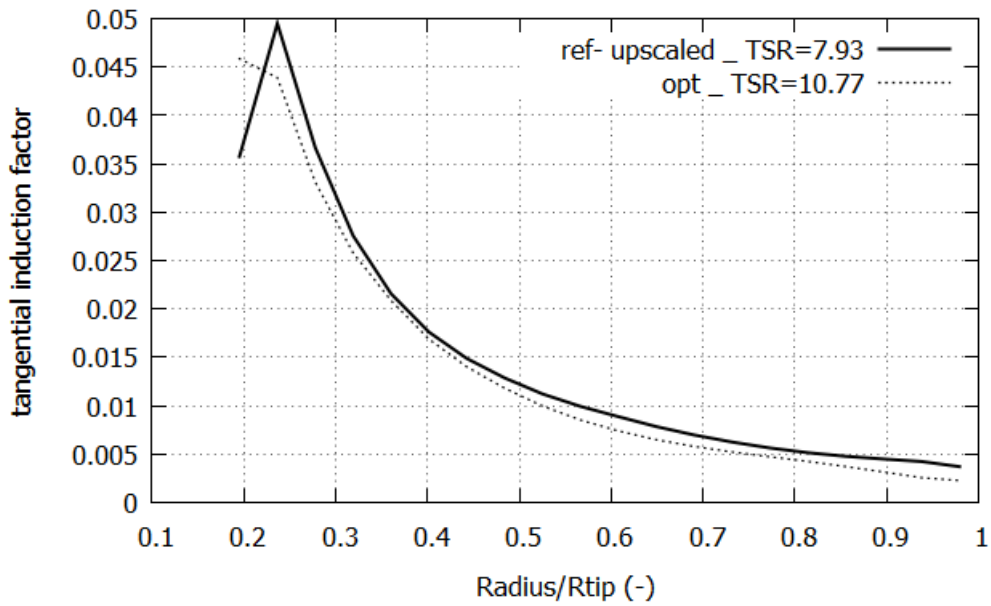
Πίνακας 5.6 Μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια ανα ώρα \bar{P} για ανεμογεννήτρια με τα παραπάνω πτερύγια και η αντίστοιχη ποσοστιαία αύξηση

Παράλληλα, παρατηρώντας κανείς το Διάγραμμα 5.15 και το Διάγραμμα 5.8 προκύπτει πως η μορφή του βέλτιστου πτερυγίου των 95.88 m δεν έχει αλλάξει δραματικά από αυτή του upscaled των 95.88 m. Αυτό, μάλιστα, επαληθεύεται από το γεγονός πως και το βέλτιστο έχει επίσης $\lambda_{opt} = 10.77$. Αντίθετα, το βέλτιστο των 88.83 m έχει πλέον $\lambda_{opt} = 8.87$, δηλαδή μεγαλύτερο από το $\lambda_{opt} = 7.93$ που εμφανίζει upscaled πτερύγιο αναφοράς.

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της μεταβολής των συντελεστών επαγωγής κατά την αύξηση του ΩR από 80 σε 86.156 m/s σε πτερύγια 5 MW και 10 MW αντίστοιχα. Σημειώνεται πως το βέλτιστο πτερύγιο με $\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$ που εξετάζεται δεν είναι το upscaled των 68 m, συνεπώς οι καμπύλες δεν είναι ίδιες. Παρ' όλα αυτά, φαίνεται από τα Διαγράμματα 5.22 και 5.23 πως ακολουθείται η ίδια τάση με αυτή που απεικονίζεται στο αντίστοιχο Διάγραμμα 4.46 της Παραγράφου 4.4. Πιο συγκεκριμένα, ο αξονικός συντελεστής επαγωγής του $\Omega R = 86.156 \text{ m/s}$ μειώνεται σημαντικά σε εκείνο το τμήμα όπου αυξάνεται αυτός του $\Omega R = 80 \text{ m/s}$, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα είναι μεγαλύτερος, ενώ ο νέος συντελεστής περιφερειακής επαγωγής είναι και εδώ ελαφρώς μικρότερος.



Διάγραμμα 5.22 Συντελεστής αξονικής επαγωγής a συναρτήσει της αδιάστατης ακτίνας για το upscaled πτερυγίου αναφοράς και του βέλτιστου πτερύγιο των 95.88 m



Διάγραμμα 5.23 Συντελεστής περιφερειακής επαγωγής a' συναρτήσει της αδιάστατης ακτίνας για το upscaled πτερυγίου αναφοράς και του βέλτιστου πτερύγιο των 95.88 m

1. Γ. Μπεργελές, “ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ”, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2005
2. Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, “WIND ENERGY HANDBOOK”, Wiley, 2001
3. J.F. Manwell, J.G. Mcgowan, A.L. Rogers, “WIND ENERGY EXPLAINED”, Wiley, 2009
4. Αρθούρος Ζερβός, “ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2008
5. Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Ι. Αναγνωστόπουλος, Γ. Μπεργελές, “Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2003
6. Σωκράτης Τσαγγάρης, “Μηχανική των Ρευστών”, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2005
7. Αναστάσιος Χ. Χρυσάκης, “ΣΤΑΤΙΚΗ – ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΟΥ ΑΠΑΡΑΜΟΡΦΩΤΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ”, 1999
8. Α. Κανάραχος, Ι. Αντωνιάδης, “ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΩΝ”, Παπασωτηρίου, 1998

-
- [1] David H. Wolpert, William G. Macready, "No Free Lunch Theorems for Optimization", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997
- [2] K.C. Giannakoglou, "Design of Optimal Aerodynamic Shapes using Stochastic Optimization Methods and Computational Intelligence", Progress in Aerospace Science, 2002
- [3] Leon Mishnaevsky Jr., "Composite Materials in Wind Energy Technology", UNESCO-EOLSS,
- [4] Henrik Stensgaard Toft, John Dalsgaard Sørensen, "Partial Safety Factors for Fatigue Design of Wind Turbine Blades", EWEC, 2010
- [5] Riziotis, V. A. , Voutsinas, S. G. (1997) "Gast: A General Aerodynamic and Structural Prediction Tool for Wind Turbines," Proceedings of the EWEC'97, Dublin, Ireland
- [6] Mads Døssing, "Optimization of Wind Turbine Rotors – using Advanced Aerodynamic and Aeroelastic Models and Numerical Optimization", DTU, 2011
- [7] P.K. Chaviaropoulos, H.J.M. Beurskens, S.G. Voutsinas, "Moving Towards Large(r) Rotors – Is that a good idea?", 2013
- [8] G. Sieros, P. Chaviaropoulos, J.D. Sørensen, B.H. Bulder, P. Jamieson, "Upscaling Wind Turbines: Theoretical and Practical Aspects and their Impact on the Cost of Energy", John Wiley & Sons, 2011