



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**Δ.Π.Μ.Σ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΟΡΤΙΩΝ**  
**ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**



ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ : ΘΕΟΔΩΡΟΣ Α. ΚΑΡΚΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Δρ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΡΙΖΙΩΤΗΣ  
(ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΑΘΗΝΑ  
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020

(ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ)

# Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εφαρμογή του παθητικού ελέγχου φορτίων των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αναφοράς (DTU 10MW RWT) και η διερεύνηση της αντοχής τους, υπο συνθήκες πολυαξονικής φόρτισης.

Προς τη κατεύθυνση αυτή εξετάζεται η διερεύνηση του προβλήματος, επιλέγοντας ως στρατηγική του παθητικού ελέγχου, τη μεταβολή της γωνίας προσανατολισμού των ινών της πολύστρωτης πλάκας των spar caps και βάση αυτής, διερευνάται η μέγιστη δυνατή μείωση της μάζας των πτερυγίων. Η επιλογή της συγκεκριμένης στρατηγικής επιτρέπει αφενός την εισαγωγή της προσδοκώμενης σύζευξης κάμψης – συστροφής (BTC) και αφετέρου τη διερεύνηση μιας βέλτιστης προσαρμογής, χωρίς την απαίτηση σημαντικών αλλαγών στον κύριο σχεδιασμό των πτερυγίων, γεγονός που ενδεχομένως να επιφέρει αλλαγές και σε άλλους εμπλεκόμενους τομείς (π.χ. σε αυτοματισμούς/ελεγκτές).

Για την εξεύρεση της καλύτερης δυνατής λύσης, το εν λόγω πρόβλημα σχεδιασμού των πτερυγίων του δρομέα διατυπώθηκε ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, για την επίλυση του οποίου γίνεται χρήση πολύ-επιστημονικών πλαισίων βελτιστοποίησης (MDO) και συγκεκριμένα της πλατφόρμας OpenMDAO.

## Abstract

The aim of this thesis is to apply the Passive Load Control of the Reference Wind Turbine blades' (DTU 10MW RWT) and to investigate their strength under multi-axis loading conditions.

In this direction, the investigation of the problem is performed choosing as a passive control strategy the change of the orientation angle of the fibers of the laminated plate of the spar caps and based on this configuration is eventually sought the investigation of the maximum possible reduction of the blade mass. The choice of this strategy allows on the one hand the introduction of the expected Bend - Twist coupling (BTC) and on the other hand the investigation of an optimal solution, without requiring significant changes in the main design of the blades, which may bring changes to other stakeholders (i.e. in automation / controllers).

To find the best possible solution, this design problem of the rotor blades was formulated as a design optimization problem, which is solved using Multidisciplinary Design Optimization frameworks (MDO) and specifically the use of OpenMDAO framework.

(ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ)

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1. Η σημασία του γενικού προβλήματος	1
1.2. Πλαίσιο και κίνητρα	3
1.3. Σκοπός της έρευνας	5
1.4. Συνεισφορά της έρευνας	6
1.5. Δομή της εργασίας	8
<b>2. Το κόστος της αιολικής ενέργειας</b>	<b>10</b>
2.1. Η παραγωγή της ενέργειας	10
2.2. Το σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής στην αιολική ενέργεια	15
2.3. Το κόστος σχεδιασμού πτερυγίων και δρομέων Α/Γ	17
<b>3. Παθητικός έλεγχος φορτίων Α/Γ</b>	<b>21</b>
3.1. Μείωση φορτίων δρομέων για μείωση του κόστους ενέργειας	21
3.2. Μηχανισμοί παθητικού ελέγχου φορτίων	22
3.3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	26
3.3.1. Σχεδιασμός πτερυγίων με γωνιακή απόκλιση (βέλος)	27
3.3.2. Προσαρμογή της εσωτερικής εγκάρσιας διατομής των πτερυγίων	29
3.3.3. Αξιοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των πολύστρωτων πλακών	30
<b>4. Η εφαρμογή του παθητικού ελέγχου φορτίων στο σχεδιασμό των πτερυγίων</b>	<b>33</b>
4.1. Το σέρβο-αέρο-ελαστικό πλαίσιο	34
4.1.1. Περιγραφή των φορτίων σχεδιασμού	35
4.1.2. Η ανεμογεννήτρια αναφοράς	35
4.1.3. Η γεωμετρία των πτερυγίων	38
4.2. Δομικός σχεδιασμός των πτερυγίων	39
4.2.1. Ελαστικές Ιδιότητες μονοαξονικής στρώσης	39
4.2.2. Ελαστικές Ιδιότητες πολύστρωτων πλακών	42
4.2.3. Κριτήρια αστοχίας	43
4.3. Το πλαίσιο του πολύ-επιστημονικού σχεδιασμού και βελτιστοποίησης	46
4.3.1. Ο βελτιστοποιητής	47
<b>5. Αποτελέσματα και συμπεράσματα</b>	<b>49</b>
5.1. Αερο-ελαστική βελτιστοποίηση πτερυγίων με βάση τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών	52

5.2. Αερο-ελαστική βελτιστοποίηση του βάρους των πτερυγίων	57
5.3. Επαλήθευση του σχεδιασμού	66
<b>6. Βιβλιογραφία</b>	<b>69</b>

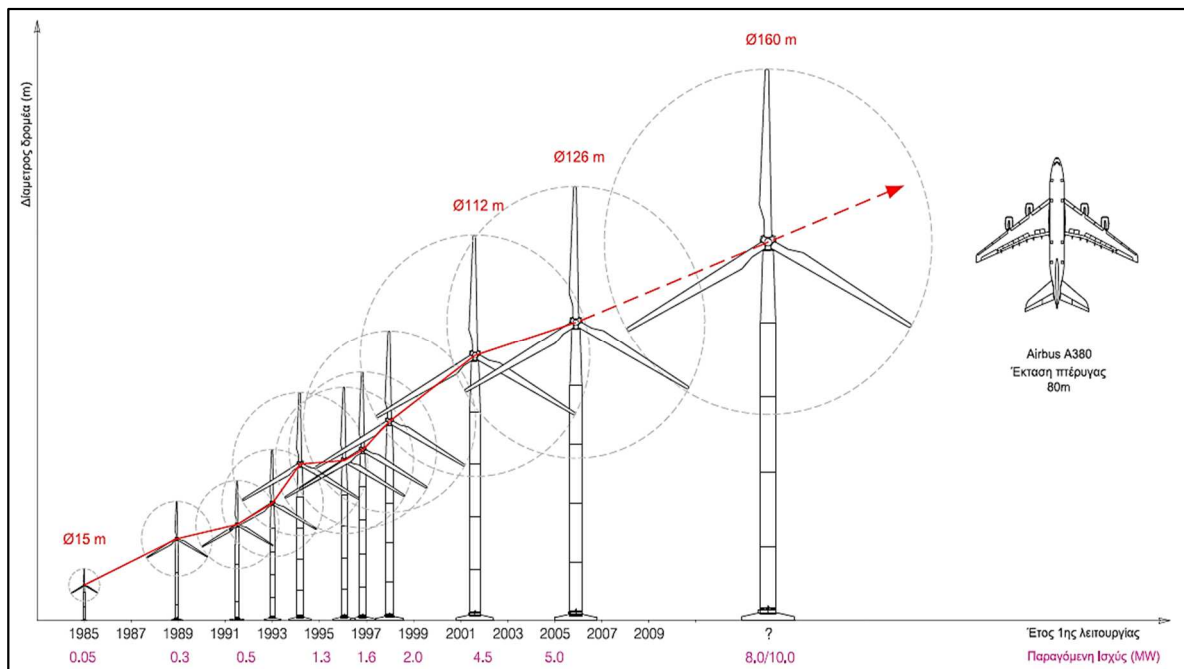
# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Η σημασία του γενικού προβλήματος

Η εξέλιξη των ανεμογεννητριών έχει δείξει ότι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και της απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται τελικά μέσω μεγάλων δρομέων, με νέα, μακρύτερα και πιο εύκαμπτα πτερύγια, κατασκευασμένα από πολύστρωτες πλάκες πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένα με ίνες και μήκους άνω των 60 μέτρων (**Εικόνα 1.1**).

Τα ινώδη σύνθετα πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται πλέον εκτενώς στη κατασκευή πτερυγίων σύγχρονων ανεμογεννητριών, αποτελούνται κατά κύριο λόγο από τους εξής συνδυασμούς ίνας μήτρας: Carbon/Εποxy και Glass/Εποxy.

Έχει λοιπόν αποδειχθεί ότι η εφαρμογή τέτοιων πολύστρωτων πλακών από σύνθετα πολυμερή υλικά ενισχυμένα με ίνες, βελτιώνει τους δείκτες δυσκαμψίας/μάζας και αντοχής/μάζας, εισάγοντας ταυτόχρονα και την επιθυμητή σύζευξη μεταξύ καμπτικών και στρεπτικών παραμορφώσεων, η οποία έχει αποδειχτεί ότι επιδρά ευεργετικά στον παθητικό έλεγχο των φορτίων (αέρο-ελαστικών φορτίων, ακουστικών φορτίων κλπ.).



**Εικόνα 1.1.** – Η εξέλιξη των δρομέων ανεμογεννητριών σε βάθος χρόνου.

Στη δομική μηχανική, ο χαρακτηρισμός και η πρόβλεψη των παραμέτρων συζεύξεως των σύνθετων υλικών σε τέτοιους δρομείς, υπερβαίνει το εύρος των γνωστών γραμμικών

μοντέλων. Επομένως η παρουσία μη γραμμικών επιδράσεων σε αναλυτικές και υπολογιστικές εκφράσεις του προβλήματος καθίσταται απαραίτητη για την ακριβή περιγραφή της ελαστο-δυναμικής συμπεριφοράς αυτών των σύνθετων, μεγάλης κλίμακας κατασκευών, όπως είναι τα πτερύγια των σύγχρονων ανεμογεννητριών. Παρά το γεγονός ότι η επίδραση των γεωμετρικών μη-γραμμικοτήτων σε ότι αναφορά στη δυσκαμψία και την ιδιοδιανυσματική ανάλυση προ-τεταμένων κιβωτοειδών λεπτότοιχων κατασκευών από σύνθετα υλικά είναι πλήρως κατανοητή, η αντίστοιχη επίδραση των όρων απόσβεσης και της εκτατικής διατμητικής συζεύξεως (extension-shear material coupling) παραμένει σχεδόν άγνωστη.

Κατά συνέπεια, η ανάπτυξη κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων που θα συμπεριλάβουν αυτούς τους όρους, για την κατανόηση και τη καλύτερη πρόβλεψη της μη γραμμικής αποσβενομένης δυναμικής συμπεριφοράς που εμφανίζουν αυτές οι μεγάλης κλίμακας πτέρυγες, κατασκευασμένες από πολύστρωτες πλάκες σύνθετων υλικών που υπόκεινται σε μεγάλες παραμορφώσεις είναι σημαντικά βήματα προς βελτίωση της ιξωδο-ελαστικής και αέρο-ελαστικής απόκρισης, των ταλαντώσεων και γενικότερα της δυναμικής συμπεριφοράς τους.

Τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικά ευρωπαϊκά έργα στον τομέα της διαρθρωτικής ανάλυσης των μεγάλης κλίμακας πτερυγίων ανεμογεννητριών. Μεταξύ αυτών, συγκαταλέγονται τα ολοκληρωμένα Ευρωπαϊκά έργα DAMBLADE (2006) και UPWIND (2011), τα οποία συνέβαλαν σημαντικά στην εισαγωγή προηγμένων εννοιών, με ενσωμάτωση παραμέτρων δομικού σχεδιασμού. Το ερευνητικό πρόγραμμα DAMPBLADE επέτρεψε την ανάπτυξη προηγμένων μοντέλων πτερυγίων ανεμογεννητριών για τη μελέτη της δομικής σύζευξης όσον αφορά στην προσαρμογή των ιδιοτήτων των πολύστρωτων πλακών από σύνθετα υλικά. Στις δραστηριότητές του εν λόγω έργου περιλαμβάνονταν η ανάπτυξη και ο χαρακτηρισμός κατάλληλων πολύστρωτων πλακών και η αξιολόγηση νέων τεχνολογικών τάσεων μέσω του σχεδιασμού και της κατασκευής μιας πλήρους κλίμακας πτέρυγας μήκους 19m.

Όσον αφορά το έργο UPWIND, αποτελεί ίσως το μεγαλύτερο έργο έρευνας και ανάπτυξης που χρηματοδοτήθηκε ποτέ από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) για την αιολική ενέργεια. Μεταξύ άλλων η κύρια συνεισφορά του εν λόγω έργου ήταν η αναβάθμιση των πτερυγίων ενός δρομέα μιας ανεμογεννήτριας αναφοράς 5MW και η σταδιακή εξέλιξη του σε έναν δρομέα μιας νέας ανεμογεννήτριας αναφοράς ισχύος 10MW, με απώτατο σκοπό μια ανεμογεννήτρια ισχύος 20MW, φτάνοντας σε διάμετρο δρομέων της τάξης των 150m και 250m, αντίστοιχα. Στο πλαίσιο των δραστηριοτήτων του UPWIND, αναπτύχθηκαν νέα εργαλεία σχεδίασης σχετικά με την αεροελαστική, αεροδυναμική συμπεριφορά και τη μηχανική ακεραιότητα δρομέων πολλαπλών MW, ώστε να αντιμετωπιστεί τελικά η πρόκληση της μη γραμμικής συμπεριφοράς που εισάγει η χρήση εξελιγμένων πολύστρωτων πλακών από ινώδη σύνθετα πολυμερή υλικά στη κατασκευή των πτερυγίων των σύγχρονων ανεμογεννητριών.



## 1.2. Πλαίσιο και κίνητρα

Έχει αποδειχθεί ότι το κόστος της παραγόμενης ενέργειας αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό κριτήριο για τον καθορισμό της αξίας της έρευνας και ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας.

Η μείωση του κόστους της ενέργειας αποτελεί βασικό μέλημα στην έρευνα της αιολικής ενέργειας τόσο για τον ακαδημαϊκό όσο και για τον κατασκευαστικό κλάδο. Ένας αποτελεσματικός δρόμος για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι να μειωθεί η συνολική μάζα των πτερυγίων, καθόσον σχεδιάζουμε δρομείς μεγαλύτερου μεγέθους και απόδοση ενέργειας [1]. Σε αυτό το πλαίσιο, η ικανότητα περιορισμού των φορτίων της κατασκευής κατά τη διάρκεια της λειτουργίας γίνεται ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού των σύγχρονων πτερυγίων [2].

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχει αξιοποιηθεί μια ποικιλία τεχνικών για την επίτευξη της μείωσης των φορτίων στους δρομείς των σύγχρονων ανεμογεννητριών. Γενικά οι τεχνικές αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριους κλάδους: 1) στις μεθόδους του ενεργού ελέγχου των φορτίων και 2) στις μεθόδους του παθητικού ελέγχου των φορτίων. Ο πρώτος κλάδος αποτελείται από τεχνολογίες ικανές να μειώσουν τα φορτία, επιδρώντας ενεργά μέσω της χρήσης του συστήματος ελέγχου της ανεμογεννήτριας, π.χ. με χρήση ενεργοποιητών μεταβολής του βήματος των πτερυγίων [3], με κινούμενα πτερύγια [4] κλπ. Ο δεύτερος κλάδος βασίζεται στην ιδέα του σχεδιασμού μιας δομής που χωρίς πρόσθετα εξαρτήματα, θα προκαλεί μείωση των φορτίων καθόσον παραμορφώνεται [5]. Από δεκαετίες πριν, οι ερευνητές γοητεύτηκαν από τη δυνατότητα να ενσωματώσουν μια μορφή απευθείας ελέγχου στο δομικό σχεδιασμό των πτερυγίων ανεμογεννητριών [5, 6, 7, 8, 9]. Έτσι ένας δρομέας ανεμογεννήτριας που μπορεί να περιορίσει παθητικά τα φορτία, μπορεί σίγουρα να θεωρηθεί και ως μια οικονομικά αποδοτική λύση [10], καθώς επιτρέπει τη χρήση ελαφρύτερων δομών, λόγω του γεγονότος ότι για τη μείωση των φορτίων δεν απαιτείται η προσθήκη ενεργοποιητών ή/και άλλων μηχανικά ενεργά ελεγχόμενων εξαρτημάτων.

Η ιδέα λοιπόν πίσω από τον παθητικό έλεγχο των φορτίων πτερυγίων σύγχρονων ανεμογεννητριών είναι η δημιουργία μιας απαραίτητης δομικής σύζευξης μεταξύ κάμψης και συστροφής. Αυτός ο σύνδεσμος περιορίζει δυναμικά τα φορτία, επιδρώντας απευθείας στη δομή των πτερυγίων λόγω της μείωσης που επιφέρει τελικά στη γωνία προσβολής [5].

Για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, το θεωρητικό μοντέλο σύζευξης τάσεων - παραμορφώσεων σε κατασκευές από σύνθετα υλικά, (το οποίο ήταν γνωστό από τη δεκαετία του '70 [11]), θεωρήθηκε αρκετά περίπλοκο και υπολογιστικά “δαπανηρό” για τα υπάρχοντα υπολογιστικά εργαλεία, ώστε να προσομοιώσει ανεμογεννήτριες εν λειτουργία. Στην πραγματικότητα, ο υπολογισμός των φορτίων σε μια ανεμογεννήτρια είναι ένα πεδίο που περιλαμβάνει αλληλένδετους κλάδους όπως η αεροδυναμική, η δομική μηχανική και η θεωρία των συστημάτων ελέγχου (σέρβο-αέρο-ελαστικότητα). Παρόλα αυτά, τα εργαλεία που είναι ικανά να εκτελέσουν αυτούς τους υπολογισμούς πρέπει να ενσωματώνουν

απλουστεύσεις σχετικά με τη μοντελοποίηση, ώστε να μπορούν να διατηρήσουν τον υπολογιστικό χρόνο σε ένα λογικό εύρος.

Πρόσφατα, η ανάπτυξη καταλληλότερων μοντέλων για ενσωμάτωση στους σύγχρονους σέρβο-αέρο-ελαστικούς κώδικες [12, 13], και η δυνατότητα πρόσβασης σε συστοιχίες υπολογιστών υψηλής απόδοσης, άνοιξε το δρόμο για τη μοντελοποίηση του παθητικού ελέγχου των φορτίων. Τα οφέλη αυτού είναι διπλά: πρώτον, η δυνατότητα χρήσης αυτού του τύπου ελέγχου μπορεί να διερευνηθεί χρησιμοποιώντας πιο ακριβή και κατάλληλα υπολογιστικά εργαλεία, δεύτερον το πρόβλημα του σχεδιασμού μιας παθητικά ελεγχόμενης πτέρυγας μπορεί να προσεγγιστεί με πιο συστηματικό τρόπο, χρησιμοποιώντας εργαλεία ικανά να χειριστούν τα αλληλοσυνδεδεμένα επιστημονικά πεδία που εμπλέκονται, σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα.

Η εφαρμογή μεθοδολογιών παθητικού ελέγχου φορτίων για τον σχεδιασμό σύγχρονων πτερυγίων ανεμογεννητριών είναι ένα πρόβλημα που μπορεί επιτέλους να αντιμετωπιστεί πλήρως. Τα θετικά αποτελέσματα της χρήσης μιας προσαρμοσμένης δομικής σύζευξης σε δρομείς ανεμογεννητριών εν λειτουργία, έχουν ήδη καταδειχθεί [8, 14, 15] αλλά το πλήρες δυναμικό τους δεν διερευνήθηκε ποτέ. Ο λόγος είναι η προαναφερθείσα πολυπλοκότητα και η πολύ-επιστημονικότητα του προβλήματος σχεδιασμού της πτέρυγας.

Αυτό το πρόβλημα μπορεί πλέον να αντιμετωπιστεί σωστά, όχι μόνο επισημαίνοντας περαιτέρω τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων κλάδων που εμπλέκονται (χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα αναπτυχθέντα αεροδυναμικά ελαστικά μοντέλα), αλλά χρησιμοποιώντας σύγχρονα πλαίσια, ικανά να εξορθολογήσουν το σχεδιασμό της πτέρυγας λαμβάνοντας υπόψη όλες τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς του σχεδιασμού [16, 17, 18, 19]. Αυτά τα πλαίσια περιλαμβάνουν όλα τα αναγκαία βήματα για τον προκαταρκτικό και εννοιολογικό σχεδιασμό μιας πτέρυγας ανεμογεννήτριας. Η διαδικασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και ένα εργαλείο βελτιστοποίησης μπορεί να συμπεριληφθεί στη ροή εργασίας του πλαισίου, έτσι ώστε η διαδικασία σχεδιασμού της πτέρυγας να μπορεί να διατυπωθεί τελικά ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Τα διεπιστημονικά πλαίσια βελτιστοποίησης σχεδιασμού είναι το κλειδί για την παροχή ενός σχεδιασμού πτερυγίων ικανών να επωφεληθούν πλήρως από τις έννοιες του παθητικού ελέγχου φορτίων, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλαπλές διαμορφώσεις και πολλαπλούς συνδυασμούς. Η διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ο καλύτερος τρόπος να ληφθούν πλήρως υπόψη οι αλληλένδετοι κλάδοι που εμπλέκονται στη διαδικασία σχεδιασμού των πτερυγίων και οι αντικρουόμενοι στόχοι στους οποίους πολλές φορές υπόκειται ο σχεδιασμός ενός τέτοιου δρομέα.

### **1.3. Σκοπός της έρευνας**

Ο σκοπός της έρευνας πάνω στην οποία βασίζεται και η συγκεκριμένη εργασία, είναι η ανάπτυξη μεθόδων που θα μπορέσουν να εφαρμοστούν στο πλαίσιο των στρατηγικών του παθητικού ελέγχου φορτίων τόσο για τον προκαταρκτικό, όσο και για τον εννοιολογικό σχεδιασμό πτερυγίων σύγχρονων ανεμογεννητριών. Για λόγους περιορισμού του πεδίου εργασίας αναφέρουμε ότι, δεν λαμβάνονται υπόψη λεπτομερείς υπολογισμοί δομικής μηχανικής και ρευστομηχανικής, καθώς και λεπτομέρειες σχετικά με τις εφαρμοζόμενες διαδικασίες κατασκευής των πτερυγίων.

Τα δύο κεντρικά ερευνητικά ερωτήματα που εξετάζονται, και βάσει των οποίων προκύπτει ένας αριθμός δευτερευόντων ερευνητικών ενεργειών είναι:

#### **I. Μπορούν να εκτιμηθούν αρκετά καλά τα αποτελέσματα των στρατηγικών του παθητικού ελέγχου των φορτίων;**

Η αντιμετώπιση αυτής της ερώτησης απαιτεί να εξεταστούν οι πολλαπλές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιστημονικών κλάδων που εμπλέκονται κατά τη διαδικασία σχεδιασμού των πτερυγίων ανεμογεννητριών. Οι μεθοδολογίες που μελετήθηκαν όσο αναφορά τον σχεδιασμό παθητικά ελεγχόμενων δρομέων πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τον τρόπο με τον οποίο οι όποιες προσαρμοσμένες αλλαγές στη δομή μιας πτέρυγας επηρεάζουν τελικά την αεροδυναμική της απόδοση, τη δομική της συμπεριφορά ως και τη δυναμική του ελεγκτή της ανεμογεννήτριας. Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις αλληλεπιδράσεις, μπορεί τελικά να προκύψει και μια ακριβέστερη εκτίμηση των θετικών και αρνητικών επιπτώσεων που απορρέουν από τη χρήση των στρατηγικών παθητικού ελέγχου των φορτίων.

#### **II. Μπορεί να διερευνηθεί το πλήρες δυναμικό του παθητικού ελέγχου των φορτίων ανεμογεννητριών;**

Μόλις επισημανθεί ο διεπιστημονικός χαρακτήρας του σχεδιασμού των παθητικά ελεγχόμενων δρομέων, συμπεριλαμβανομένης και της υψηλής πολυπλοκότητά που τον χαρακτηρίζει, πρέπει να διερευνηθεί μια μέθοδος ώστε να συμπεριληφθεί ο παθητικός έλεγχος των φορτίων στη διαδικασία σχεδιασμού, διατηρώντας παράλληλα μια πλήρη εικόνα των απαιτήσεων σχεδιασμού των πτερυγίων ανεμογεννητριών. Οι στρατηγικές παθητικού ελέγχου φορτίων δεν μπορούν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά σε έναν υπάρχοντα σχεδιασμό, μιας και οι ιδιότητες της πτέρυγας πρέπει να προσαρμοστούν ώστε να ενσωματώνουν την επιλεγμένη μέθοδο παθητικού ελέγχου των φορτίων. Εάν ο σχεδιασμός της πτέρυγας βελτιστοποιηθεί σύμφωνα με την επιλεγμένη στρατηγική παθητικού ελέγχου, τότε μόνο μπορεί να διερευνηθεί το πλήρες δυναμικό αυτών των μεθοδολογιών ελέγχου και να μεταφραστεί στη συνέχεια σε μείωση του βάρους των υλικών κατασκευής, αύξηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας κλπ.

#### 1.4. Συνεισφορά της έρευνας

Τα πτερύγια των σύγχρονων ανεμογεννητριών είναι ιδιαίτερες κατασκευές, αποτελούμενες από πολύστρωτες πλάκες σύνθετων πολυμερών υλικών, που χαρακτηρίζονται από μεγάλο μέγεθος και χαμηλή δυσκαμψία, ώστε να παρέχουν την επιθυμητή αύξηση της αποδιδόμενης ενέργειας. Ένεκα του ιδιαίτερου τρόπου κατασκευής τους θα πρέπει να επισημάνουμε ότι τα πτερύγια αυτά χαρακτηρίζονται και από ένα σημαντικό υψηλό κόστος υλικών.

Λόγω του ότι καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους τα πτερύγια υποβάλλονται σε μεγάλες παραμορφώσεις και περιστροφές, πρέπει να μην υπερβαίνουν και το ειδικό ελαστικό τους όριο. Για τον ακριβή υπολογισμό αυτών των παραμορφώσεων, έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα δομικά μοντέλα ικανά να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα σέρβο-αέρο-ελαστικά πλαίσια.

Ο στόχος της εισαγωγής στρατηγικών παθητικού ελέγχου φορτίων σε πτερύγια σύγχρονων ανεμογεννητριών είναι ο περιορισμός των φορτίων στη δομή της όλης κατασκευής. Η χρήση του παθητικού ελέγχου φορτίων στο σχεδιασμό μιας σύγχρονης πτέρυγας προσθέτει πολυπλοκότητα σε ένα πρόβλημα που ήδη χαρακτηρίζεται από τις πολλαπλές αλληλεπιδράσεις των επιστημονικών κλάδων, όπως η αεροδυναμική, η δομική μηχανική και τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Λόγω αυτών των αλληλεπιδράσεων, μια αλλαγή σε μια παράμετρο του σχεδιασμού, μπορεί να επιφέρει αλλαγές στη δυναμική του ελεγκτή της ανεμογεννήτριας η οποία με τη σειρά της, μπορεί να προκαλέσει επίδραση στη φόρτιση της ανεμογεννήτριας κοκ, ή/και στην απόδοση όλου του συστήματος.

Στο πλαίσιο ανάπτυξης της ανεμογεννήτρια αναφοράς έγιναν πολλές παραμετρικές μελέτες με σκοπό να διερευνηθούν σε βάθος οι δυνατότητες του παθητικού ελέγχου των φορτίων. Ελήφθησαν υπόψη αλλαγές στη δυναμική του ελεγκτή και την απόδοση της ανεμογεννήτριας, προσφέροντας έτσι μια καλή σύγκριση των επιπτώσεων της εφαρμογής μιας στρατηγικής παθητικού ελέγχου φορτίων σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό. Για να αντισταθμίσουμε τις αρνητικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή μιας μεθόδου παθητικού ελέγχου των φορτίων, πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική μελέτη που περιλαμβάνει συνδυασμένες τεχνικές παθητικού ελέγχου φορτίων. Επισημαίνουμε λοιπόν ότι, παρόλο που ορισμένα αρνητικά αποτελέσματα μπορούν να μετριαστούν, η παραμετρική υλοποίηση δεν ελέγχει τελικά εάν όλες οι τυπικές απαιτήσεις σχεδιασμού μπορούν να ικανοποιηθούν ή όχι. Επιπλέον, οι παραμετρικές μελέτες προσφέρουν μόνο μια εκτίμηση των επιπτώσεων στη μείωση του φορτίου, αλλά δεν είναι κατάλληλες για τη μετατροπή της μείωσης των φορτίων σε παράγοντες που έχουν άμεση επίδραση στο κόστος της ενέργειας, όπως η μείωση της μάζας των πτερυγίων ή η αύξηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας. Ο σχεδιασμός ενός παθητικά ελεγχόμενου δρομέα είναι ένα πολύ-επιστημονικό πρόβλημα και πρέπει να αντιμετωπιστεί αυστηρά με τον τρόπο αυτό.

Ο πολύ-επιστημονικός χαρακτήρας του σχεδιασμού των σύγχρονων πτερυγίων αποτελεί μια πολύπλοκη πρόκληση που δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί απόλυτα με παραμετρικές

μελέτες, διότι αναγκάζει τελικά τον μελετητή μηχανικό να ικανοποιεί ταυτόχρονα πολλούς περιορισμούς, που τις περισσότερες φορές βρίσκονται μεταξύ αντικρουόμενων στόχων. Σε αυτό το πλαίσιο, χρησιμοποιούνται πολύ-επιστημονικά πλαίσια βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, για την ανάπτυξη των σύγχρονων πτερυγίων ανεμογεννητριών. Οι παράμετροι σχεδιασμού βελτιστοποιούνται σε σχέση με τη συνάρτηση κόστους και υπόκεινται σε περιορισμούς που περιλαμβάνουν τυπικές απαιτήσεις. Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού είναι η μέθοδος που έχει είδη χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη του σχεδίου του πτερυγίου αναφοράς και βάση της οποίας μπορεί να διερευνηθούν οι δυνατότητες διαφορετικών τεχνικών παθητικού ελέγχου φορτίων.

Η κύρια συνεισφορά της έρευνας σε σχέση με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μιας πτέρυγας είναι η εφαρμογή του παθητικού ελέγχου των φορτίων ως μεταβλητή σχεδιασμού. Η επιστημονική δραστηριότητα σχετικά με τη χρήση παραμέτρων σχεδιασμού ικανών να ενεργοποιήσουν τον παθητικό έλεγχο φορτίων ως μεταβλητή σχεδιασμού σε ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης είναι γενικώς ελλιπής. Ο λόγος είναι ότι η εφαρμογή μιας στρατηγικής παθητικού ελέγχου των φορτίων έχει μεγάλο αντίκτυπο στη φόρτιση των ανεμογεννητριών. Απαιτείται λοιπόν ένας σημαντικός αριθμός σέρβο-αέρο-ελαστικών προσομοιώσεων για τη σωστή καταγραφή του αποτελέσματος των μεθοδολογιών αυτών στα φορτία της κατασκευής. Το κύριο ζήτημα είναι ότι ο μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων οδηγεί σε μια υπερβολικά δαπανηρή υπολογιστική προσπάθεια για ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης.

Ως τελική σημείωση, πρέπει να επισημάνουμε ότι οι μέθοδοι που διερευνήθηκαν στα πλαίσια της έρευνας σχετικά με την ανεμογεννήτρια αναφοράς, περιλαμβάνουν τόσο τον προκαταρκτικό όσο και τον εννοιολογικό σχεδιασμό των πτερυγίων. Στα διαδοχικά βήματα της διαδικασίας σχεδιασμού των πτερυγίων, περιλαμβάνεται ο λεπτομερής δομικός και ρευστοδυναμικός σχεδιασμός τους, αλλά δεν περιλαμβάνεται η κατασκευή και η παραγωγή μοντέλου αναφοράς.

## 1.5. Η δομή της εργασίας

Στο Κεφάλαιο 1. της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται μια σύντομη αναφορά στη σημασία που κατέχει το γενικό πρόβλημα της εξέλιξης των δρομέων και κατ' επέκταση των πτερυγίων των σύγχρονων Α/Γ, καθώς και μια ανασκόπηση στις βασικότερες συνεισφορές της έρευνας σχετικά με την εξέλιξη των διαφόρων μεθοδολογιών ελέγχου των φορτίων και πως τελικά αυτές μπορούν να συνεισφέρουν στην ανάπτυξη του χώρου της αιολικής ενέργειας.

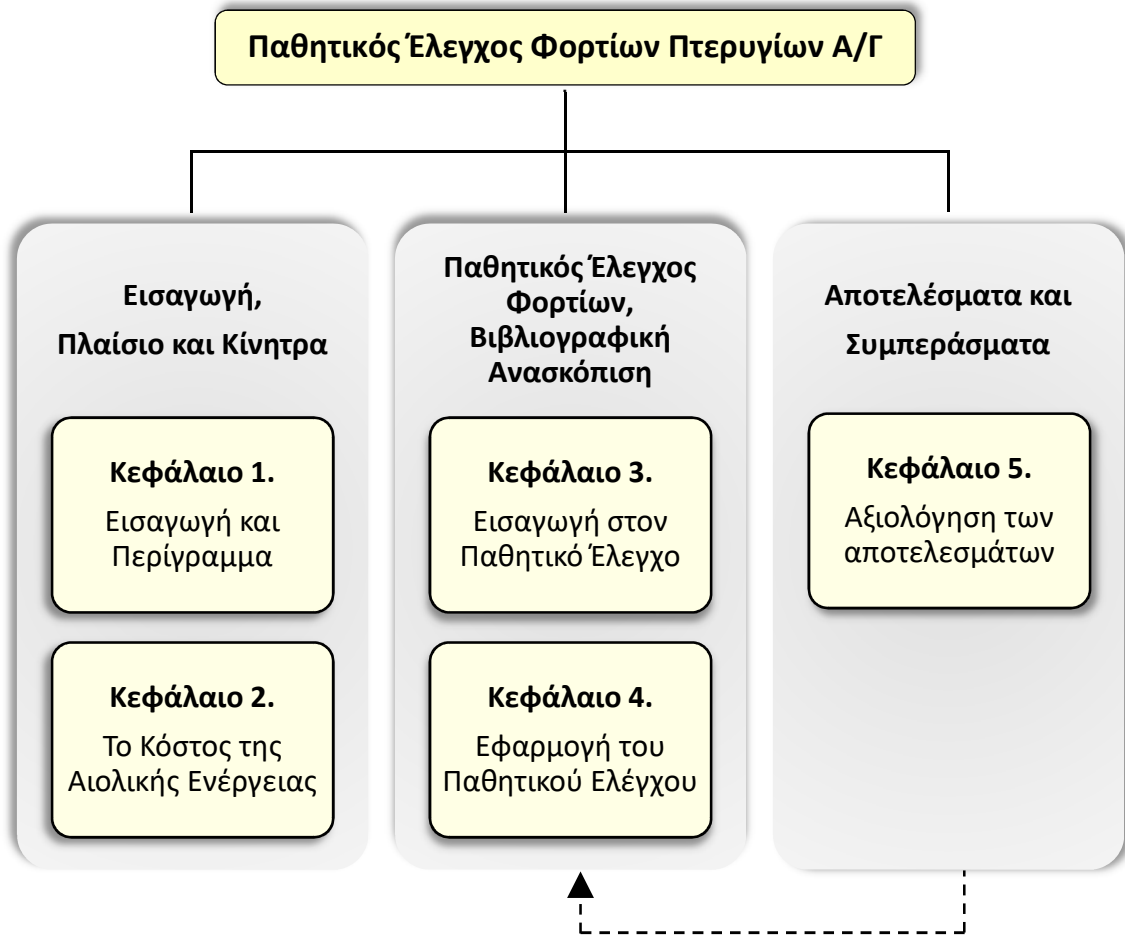
Στο Κεφάλαιο 2. γίνεται εισαγωγή στις διάφορες έννοιες του κόστους της αιολικής ενέργειας και στον τρόπο που οι διάφορες τεχνολογικές βελτιώσεις του σχεδιασμού των πτερυγίων των σύγχρονων ανεμογεννητριών επιδρούν τελικά στο σταθμισμένο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (LCEO).

Στο Κεφάλαιο 3. γίνεται αρχικά μια αναφορά στις δυο κύριες μεθοδολογίες που επικρατούν γύρω από τον έλεγχο των φορτίων των πτερυγίων ανεμογεννητριών και πέραν αυτού γίνεται η εισαγωγή στην έννοια του παθητικού ελέγχου των φορτίων. Στη συνέχεια γίνεται μια πλήρη αναφορά στις κύριες τρεις κατηγορίες/στρατηγικές που γενικώς ακολουθούνται σχετικά με τον παθητικό έλεγχο και παρατίθεται μια πλούσια αλλά όχι πλήρης ερευνητική ανασκόπηση ανά κατηγορία.

Στο Κεφάλαιο 4. γίνεται πλέον αναφορά στους τρόπους εφαρμογής του παθητικού ελέγχου των φορτίων, στο πρόβλημα σχεδιασμού των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αναφοράς. Για την πλήρη κατανόηση της εφαρμογής του παθητικού ελέγχου δίνεται αρχικά μια αναλυτική αναφορά στο χρησιμοποιούμενο σέρβο-αέρο-ελαστικό πλαίσιο, με βάση το οποίο εξελίσσεται η ανάλυση της ανεμογεννήτριας αναφοράς. Επιπλέον γίνονται σύντομες παραπομπές σχετικά με τα στοιχεία σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας αναφοράς, καθώς και τον φορτίων σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της ανάλυσης. Εν συνεχεία γίνεται μια σύντομη παρουσίαση του σχεδιασμού των πτερυγίων και μια πλήρης περιγραφή των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής τους ως και των κριτηρίων που τελικώς αυτά πρέπει να ικανοποιούν στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης. Τελειώνοντας γίνεται αναφορά και στο χρησιμοποιούμενο πλαίσιο του πολύ-επιστημονικού σχεδιασμού και βελτιστοποίησης (MDO) το οποίο ίσως αποτελεί το κύριο εργαλείο ανάλυσης στην παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 5. γίνεται αναφορά στην στρατηγική παθητικού ελέγχου που τελικά επιλέχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας καθώς και στα επιλεγμένα αποτελέσματα και συμπεράσματα που τελικώς εξάγονται.

Συνοπτικά η δομή της παρούσας εργασίας απεικονίζεται και παρακάτω στην **Εικόνα 1.3**.



**Εικόνα 1.3.** – Σχηματική απεικόνιση / διάγραμμα ροής της εργασίας.

## 2. Το κόστος της Αιολικής Ενέργειας

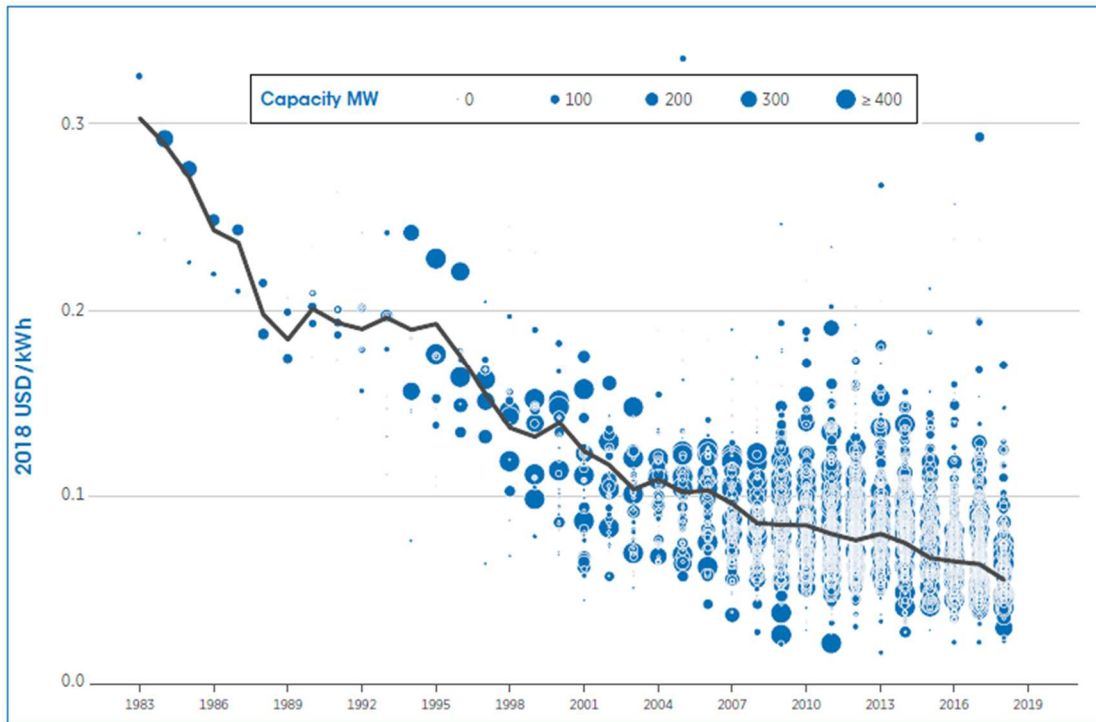
### 2.1. Η παραγωγή της ενέργειας

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια από τις παλαιότερες πηγές ενέργειας που είναι γνωστή στην ανθρωπότητα. Από τότε που ξεκίνησε η μαζική παραγωγή ανεμογεννητριών (στη Δανία το 1979), οι τεχνολογίες γύρω από την αιολική ενέργεια γνώρισαν απίστευτη ανάπτυξη. Αυτή η τεσσαρακονταετής επιτυχημένη πορεία, οφείλεται στην έρευνα αιχμής και στην προσπάθεια ανάπτυξης των καλύτερων δυνατών τρόπων παραγωγής ενέργειας από τον άνεμο.

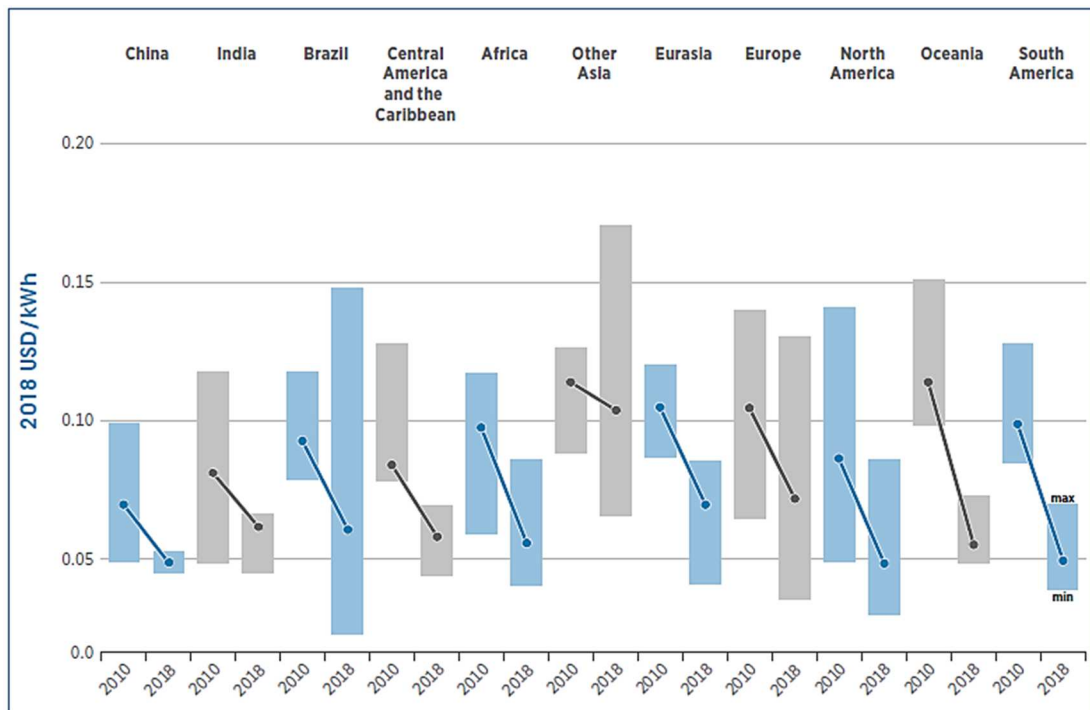
Όταν μιλάμε για τεχνολογικές βελτιώσεις στην αιολική ενέργεια, τις ζυγίζουμε πάντα έναντι των δυνατοτήτων τους για μείωση του κόστους ενέργειας (COE). Γενικά το κόστος της ενέργειας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα. Η ανάλυση των διαφόρων τάσεων είναι ζωτικής σημασίας για να διαπιστωθεί εάν αξίζει να ακολουθηθούν καινοτόμες ιδέες για την παραγωγή αιολικής ενέργειας. Αν κοιτάξουμε τα στατιστικά στοιχεία, της προηγούμενης 20-ετίας, το κόστος παραγωγής της αιολικής ενέργειας φαίνεται να έχει σταθεροποιηθεί, δείχνοντας μια εξασθενημένη ικανότητα για περαιτέρω μειώσεις του [1, 20]. Σε παγκόσμια κλίμακα, χρησιμοποιώντας το σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (LCOE) σαν κριτήριο σύγκρισης, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για τη προηγούμενη 10-ετία το κόστος ενέργειας των έργων αιολικής ενέργειας ακολούθησε μια σχεδόν σταθερή πορεία (περίοδος 2010 με 2014), ενώ τη τελευταία 5-ετία το κόστος φαίνεται να ακολουθεί μια ελαφρώς μειούμενη πορεία (βλέπε **Εικόνα 2.1.**).

Σύμφωνα με στοιχεία από τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA), ο σταθμισμένος μέσος όρος του δείκτη LCOE, των χερσαίων αιολικών πάρκων έχει μειωθεί κατά 82% μεταξύ 1983 και 2018, με μόλις 7% να αντιστοιχεί στην περίοδο από 2010 ως το 2014 [1], αλλά αυτή η μείωση δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στις τεχνολογικές βελτιώσεις. Στην πραγματικότητα, το σταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCOE), έχει μειωθεί κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους εγκατάστασης που χαρακτηρίζει τις μεγάλες και ταχέως αναπτυσσόμενες αγορές όπως η Κίνα και η Ινδία, όπου η διαθεσιμότητα φθηνού εργατικού δυναμικού και υλικών δημιουργεί σημαντικό αντίκτυπο στη διαμόρφωση του δείκτη LCOE (βλέπε **Εικόνα 2.2.**).





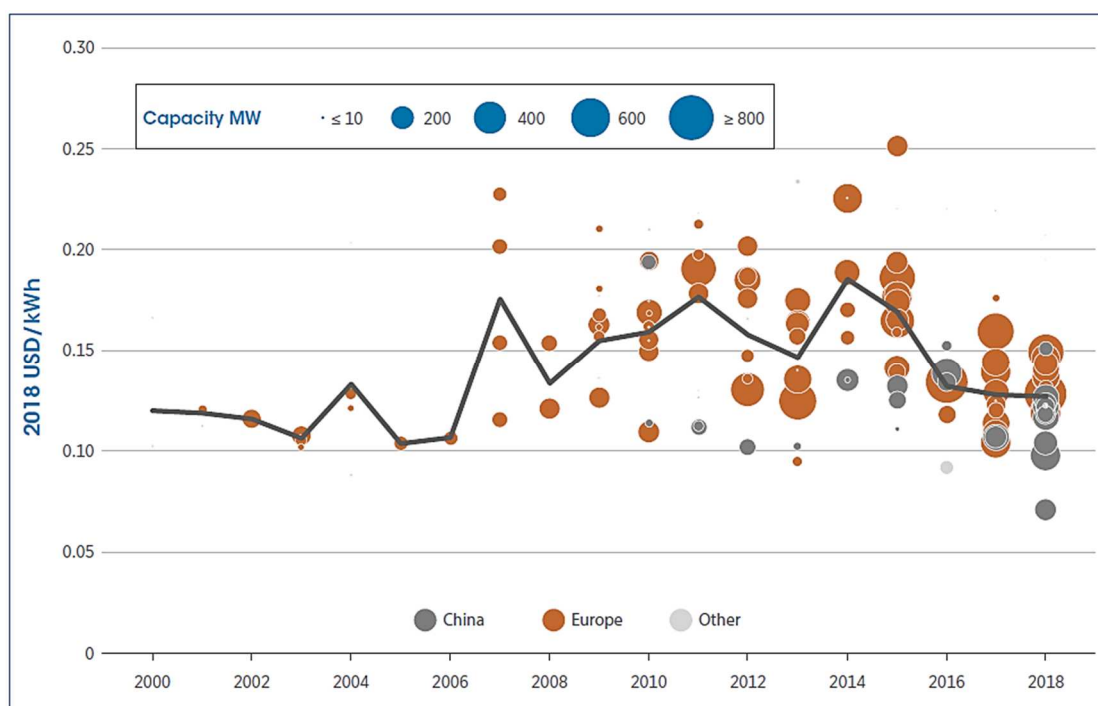
**Εικόνα 2.1.** – Ο σταθμισμένος μέσος όρος του κόστους ενέργειας (LCOE) για τα χερσαία αιολικά πάρκα.



**Εικόνα 2.2.** – Τοπικά σταθμισμένος μέσος όρος του κόστους ενέργειας (LCOE) και το εύρος των χερσαίων αιολικών πάρκων.

Ο σταθμισμένος μέσος όρος του κόστους της ενέργειας (LCOE), μιας χώρας ή περιοχής κυμαίνεται εντός του εύρους 0,05 ÷ 0,07 USD/kWh για το 2018, μη συμπεριλαμβανομένης της υπόλοιπης Ασίας. Ο σταθμισμένος μέσος όρος του κόστους ενέργειας (LCOE) των νέων έργων που έλαβαν χώρα το 2018 για την Κίνα, τη Βόρεια Αμερική και τη Νότια Αμερική (εκτός της Βραζιλίας) κυμάνθηκε γύρω στο 0,05 USD/kWh.

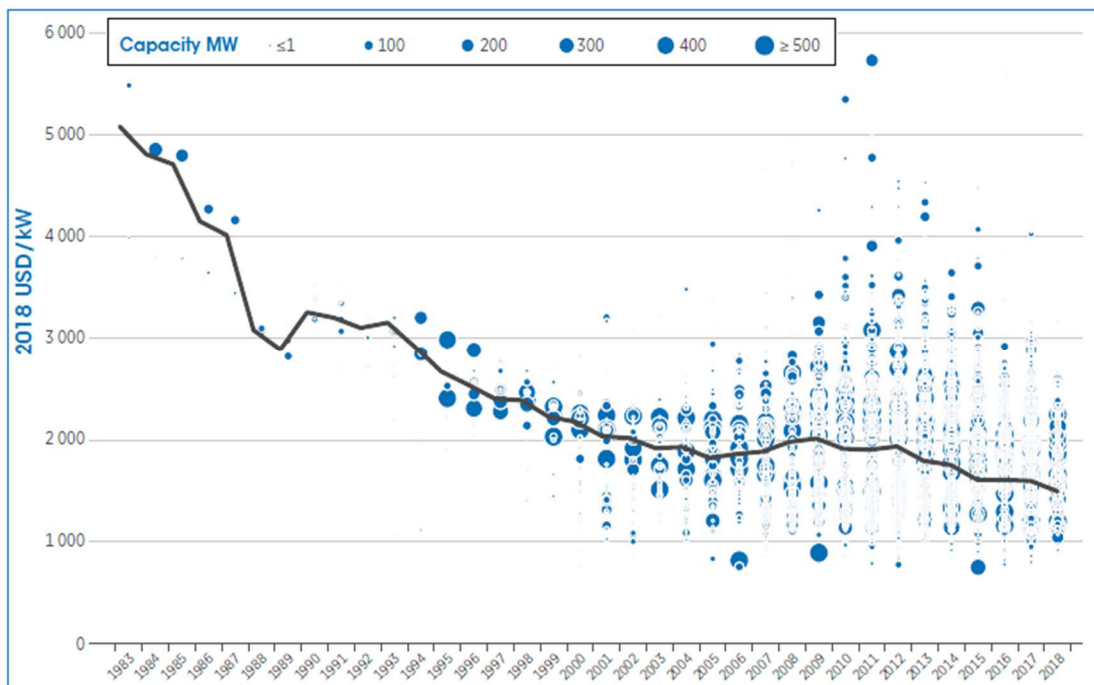
Αυτή η παρατήρηση σχετίζεται με τον συνδυασμό χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Αν κοιτάξουμε αποκλειστικά τον τομέα των υπεράκτιων πάρκων, όπου οι ταχέως αναπτυσσόμενες οικονομίες δεν έχουν ακόμη αφήσει το στίγμα τους, μπορούμε να παρατηρήσουμε μια δραματική αύξηση του σταθμισμένου μέσου όρου του δείκτη LCOE κατά τη δεκαετία 2002 έως 2014 (βλέπε **Εικόνα 2.3**). Αυτή η αύξηση οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης των αιολικών πάρκων, στις μεγάλες επενδύσεις κεφαλαίων για υπεράκτια καλώδια διασύνδεσης, στις θεμελιώσεις ως και τις αναγκαίες υπεράκτιες μεταφορές για την εγκατάσταση του εξοπλισμού (πυλώνων, δρομέων, κελύφους κ.λπ.).



**Εικόνα 2.3.** – Το συνολικό κόστος εγκατάστασης υπεράκτιων έργων αιολικής ενέργειας και ο σταθμισμένος μέσος όρος LCEO ανά έτος έναρξης λειτουργίας.

Έτσι λοιπόν, αν κοιτάξουμε σε παγκόσμιο επίπεδο τα κόστη του τομέα των χερσαίων αιολικών πάρκων παρατηρούμε ότι το συνολικό κόστος εγκατάστασης έχει μειωθεί κατά 71% σε διάστημα 35 χρόνων, από περίπου 5.000 USD/kW που ήταν το 1983 σε 1.500 USD/kW το 2018.

Αυτό οφείλεται αφενός στη μείωση του κόστους αγοράς των ανεμογεννητριών αλλά και των υπολοίπων δικαστικών εξόδων που απαιτεί η υλοποίηση ενός τέτοιου έργου (βλέπε **Εικόνα 2.4.**).



**Εικόνα 2.4.** – Το συνολικό κόστος εγκατάστασης χερσαίων έργων αιολικής ενέργειας και ο παγκόσμια σταθμισμένος μέσος όρος LCOE ανά έτος έναρξης λειτουργίας.

Ας έχουμε λοιπόν υπόψη ότι τα περισσότερα έργα αιολικής ενέργειας που λαμβάνουν χώρα σήμερα χαρακτηρίζονται από το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο πρέπει να κυμαίνεται εντός του εύρους ( $0,045 \div 0,14$  USD/kWh) [1] της αντίστοιχης παραγωγής με χρήση μονάδων ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον αναμένεται ότι στα υπεράκτια αιολικά πάρκα, που έχουν προγραμματιστεί να γίνουν έως το 2020, να επιτευχθεί ακόμη χαμηλότερο μέσο επενδυτικό κόστος. Ωστόσο, ανακύπτει ένα ερώτημα: πώς μπορούμε να συνεχίσουμε να κατεβάζουμε το κόστος ενέργειας (COE), απελευθερώνοντας παράλληλα τον χερσαίο τομέα από τη βραχυπρόθεσμη εξάρτηση που έχει από τις αναδυόμενες αγορές και μειώνοντας το κόστος παραγωγής του υπεράκτιου τομέα της αιολικής ενέργειας;

Διαπιστώσαμε λοιπόν ότι η ανάλυση του δείκτη LCOE είναι μια εξαιρετικά χρήσιμη παράμετρος ικανή να παρέχει τις απαραίτητες εκείνες πληροφορίες για να διακρίνει κανείς τους παράγοντες που οδηγούν στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας. Τώρα θα δείξουμε ότι ένας πιο λεπτομερής και προσαρμοσμένος ορισμός του κόστους της ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επικυρώσει τον αντίκτυπο της έρευνας και των τεχνολογικών βελτιώσεων στην παραγωγή αιολικής ενέργειας.

Ο τελικός στόχος είναι να αναδείξουμε πώς συγκεκριμένες πτυχές στην έρευνα και ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας μπορούν να μειώσουν το κόστος ενέργειας (COE) ανεξάρτητα από παράγοντες όπως η φθηνή εργασία και η διαθεσιμότητα υλικών.

## 2.2. Το σταθμισμένο κόστος της ηλεκτρικής στην αιολική ενέργεια

Ο γενικός ορισμός του σταθμισμένου κόστους ενέργειας (LCOE), συσχετίζει το κόστος μιας γενικής μονάδας παραγωγής ενέργειας με την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η Δανέζικη κοινοπραξία Megavind2 εισήγαγε έναν πιο συγκεκριμένο ορισμό του σταθμισμένου κόστους ενέργειας (LCOE) ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα αιολικά πάρκα: Έτσι Το LCOE εκφράζει το σταθμισμένο μοναδιαίο κόστος του 1 MWh κατά τη διάρκεια ζωής του αιολικού πάρκου, λαμβάνοντας το άθροισμα του μειωμένου κόστους ζωής σε σχέση με το άθροισμα της μειωμένης παραγωγής ενέργειας κατά τη στιγμή της απόφασης χρηματοοικονομικής επένδυσης [21].

Για λόγους σαφήνειας, θα αναφέρουμε τις βασικές μαθηματικές εκφράσεις πίσω από αυτό το μοντέλο. Ο σκοπός είναι να έχει ο αναγνώστης μια πιο σαφή, αλλά και απλοποιημένη, επισκόπηση των οικονομικών παραγόντων που οδηγούν την έρευνα που παρουσιάζεται στη παρούσα εργασία.

Ο προσαρμοσμένος στην αιολική ενέργεια ορισμός του δείκτη LCOE περιγράφεται από μια πολύ απλή εξίσωση:

$$LCEO = \frac{C_{t0}}{P_{t0}} \quad (2.1)$$


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

Ειδικότερα:

$$C_{t0} = \sum_{year=kc}^T \frac{I_{year} + O_{year} + A_{year}}{(1 + W_n)^{year}} = \frac{I_0 + O_0 + A_0}{(1 + W_n)^0} + \dots + \frac{I_T + O_T + A_T}{(1 + W_n)^T} \quad (2.2)$$

$$P_{t0} = \sum_{year=kp}^T \frac{AEP_{year}}{(1 + W_r)^{year}} = \frac{AEP_0}{(1 + W_r)^0} + \frac{AEP_1}{(1 + W_r)^1} + \dots + \frac{AEP_T}{(1 + W_r)^T} \quad (2.3)$$

Το κόστος και η παραγωγή ενέργειας αθροίζονται ετησίως για μια περίοδο ζωής  $T$ , η οποία ξεκινά από το πρώτο έτος με τις ταμειακές ροές  $k_c$  ή την πρώτη χρονιά με την παραγωγή ενέργειας  $k_p$ , αντίστοιχα. Η παρούσα αξία των δαπανών περιλαμβάνει:

  $I_{year}$ , εκφράζει το αρχικό κόστος επένδυσης συμπεριλαμβανομένων:

- των αναπτυξιακών δαπανών (DEVEX), δηλαδή όλων των εξόδων που δαπανώνται από την σύλληψη της ιδέας, την ανάπτυξη και το σχεδιασμό του έργου.
  - τις κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX), δηλαδή το κόστος «πρώτης ισχύος» που δαπανάται από την κατασκευή έως την προμήθεια του εξοπλισμού.
- ✚  $O_{\text{year}}$ , εκφράζει τις λειτουργικές δαπάνες (OPEX), οι δαπάνες που σχετίζονται με τη λειτουργία και τη συντήρηση του αιολικού πάρκου.
- ✚  $A_{\text{year}}$ , εκφράζει το κόστος παροπλισμού (ABEX), οι δαπάνες που σχετίζονται με τον παροπλισμό του αιολικού πάρκου.

Η  $AEP_{\text{year}}$  εκφράζει τη ετήσια παραγωγή ενέργειας του αιολικού πάρκου, η οποία αντιπροσωπεύει τελικά τα ετήσια έσοδα από το έργο.

Τέλος, το  $W_n$  είναι το ονομαστικό μέσο σταθμικό κόστος κεφαλαίου και το  $W_r$  είναι το πραγματικό σταθμισμένο μέσο κόστος κεφαλαίου, που συνδέεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$W_r = \frac{1 + W_n}{1 + I} - 1$$

όπου,  $I$  αντιπροσωπεύει το ποσοστό πληθωρισμού

Οι εξισώσεις 2.1 έως και 2.3 μας βοηθούν να κατανοήσουμε ποιοι παράγοντες επηρεάζουν το κόστος της ενέργειας και πώς τελικά επηρεάζοντας αυτούς τους παράγοντες μπορούμε να μειώσουμε το δείκτη LCOE.

Προηγουμένως, θέσαμε μια ερώτηση σχετικά με το πώς συγκεκριμένες πτυχές της έρευνας και ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας μπορούν να μειώσουν το κόστος της ενέργειας ανεξάρτητα από τη φθηνή εργασία και τη φθηνή διαθεσιμότητα υλικών. Συγκεκριμένα, είναι πλέον καιρός να συζητήσουμε τη σχεδίαση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, μια από τις «πτυχές στην έρευνα και ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας» και πώς μπορούμε να συσχετίσουμε το σχεδιασμό τους με το μοντέλο κόστους που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο.

### 2.3. Το κόστος σχεδιασμού πτερυγίων δρομέων ανεμογεννητριών

Πώς τελικά επηρεάζει ο σχεδιασμός των πτερυγίων του δρομέα τις εξισώσεις 2.1 και 2.2;

Αν κοιτάξουμε την παρούσα τιμή του όρου της παραγωγής ενέργειας  $P_{t0}$ , η απάντηση είναι σαφής: τα χαρακτηριστικά και η απόδοση του δρομέα συνδέονται αυστηρά με την ενέργεια που εξάγεται από την γεννήτρια. Ο σχεδιασμός των δρομέων για ένα αιολικό πάρκο πρέπει να συμμορφώνεται με διάφορες απαιτήσεις που υπαγορεύονται, από τα διεθνή πρότυπα ως και τον επιλεγμένο χώρο και τη διαθεσιμότητα των αιολικών πόρων. Ακόμα κι αν αυτές οι απαιτήσεις περιορίζουν την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παραχθεί, η ιδέα παραμένει ακόμα απλή: όσο υψηλότερη είναι η τιμή της ετήσιας παραγωγής ενέργειας (ΑΕΡ), κατά τη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας, τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή του δείκτη LCOE (υποθέτοντας, φυσικά, ότι οι δαπάνες  $C_{t0}$  δεν αυξάνονται καθώς αυξάνεται το ΑΕΡ).

Η αξιολόγηση των επιπτώσεων του σχεδιασμού του δρομέα στις δαπάνες  $C_{t0}$  είναι πιο περίπλοκη. Ο σχεδιασμός των πτερυγίων ανεμογεννητριών, επηρεάζει το αρχικό κόστος της επένδυσης ( $I_{year}$ ) και μπορεί να έχει αντίκτυπο στις λειτουργικές δαπάνες ( $O_{year}$ ) και στις δαπάνες του παροπλισμού του έργου ( $A_{year}$ ). Σε αυτό το κεφάλαιο, θα δώσουμε έναν ποσοτικό προσδιορισμό αυτής της επιρροής στις κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) και στις αναπτυξιακές δαπάνες (DEVEX). Ο αντίκτυπος στις λειτουργικές δαπάνες (OPEX) και στις δαπάνες παροπλισμού του έργου (ABEX) δεν λαμβάνεται υπόψη, λόγω της πολυπλοκότητας που έχει η λεπτομερής εκτίμηση του κόστους λειτουργίας, συντήρησης και παροπλισμού, στο οποίο αφιερώνονται πιο εξειδικευμένοι κλάδοι της έρευνας της αιολικής ενέργειας.

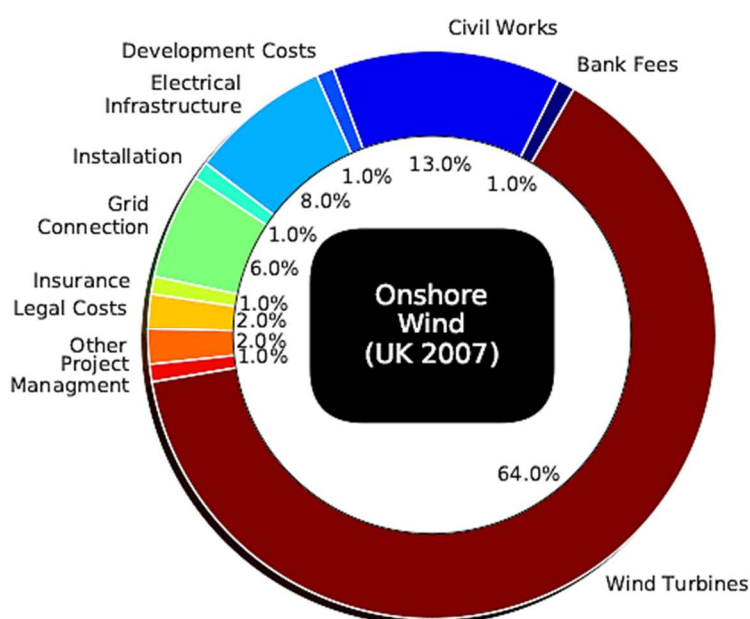
Στο κόστος επένδυσης των αιολικών πάρκων λαμβάνονται υπόψη διάφορες πτυχές. Μπορούμε να πάρουμε μια ιδέα για το κόστος που εκφράζει ο παράγοντας  $I_{year}$ , εξετάζοντας για παράδειγμα τη σύγκριση μεταξύ της κατανομής των τυπικών αρχικών επενδύσεων για έργα χερσαίων και υπεράκτιων πάρκων που έλαβαν χώρα στο Ηνωμένο Βασίλειο πριν από το 2007 (βλέπε **Εικόνα 2.5.** και **Εικόνα 2.6.**, αντίστοιχα).

Τα δεδομένα, που παρέχονται από το Υπουργείο Εμπορίου και Βιομηχανίας της Αγγλίας [22], δείχνουν πως συνήθως κατανέμονται οι συνολικές επενδύσεις ανά είδος εργασίας των έργων αιολικής ενέργειας. Παρόλο που το κόστος των θεμελίων για χερσαία αιολικά πάρκα αντιπροσωπεύει σημαντικό μέρος του κόστους, το μεγαλύτερο μέρος της επένδυσης αντιπροσωπεύει το κόστος αγοράς των ανεμογεννητριών. Αυτή η παρατήρηση υποστηρίζεται από πιο πρόσφατες μελέτες, που συνοψίζονται στον **Πίνακα 2.1.** [1, 20, 23, 24, 25]. Το μερίδιο κόστους των ανεμογεννητριών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 65 και 84% για χερσαία έργα και 30 και 50% για υπεράκτια έργα. Εάν αναλύσουμε περαιτέρω το μερίδιο των ανεμογεννητριών στο επενδυτικό κόστος, μπορούμε να δούμε ότι τα πτερύγια αντιπροσωπεύουν περίπου το 20% αυτού του μεριδίου (**Σχήμα 2.6.**). Ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης του μεριδίου αυτού του επενδυτικού κόστους είναι η μείωση του κόστους

ή της ποσότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων ανεμογεννητριών [26].

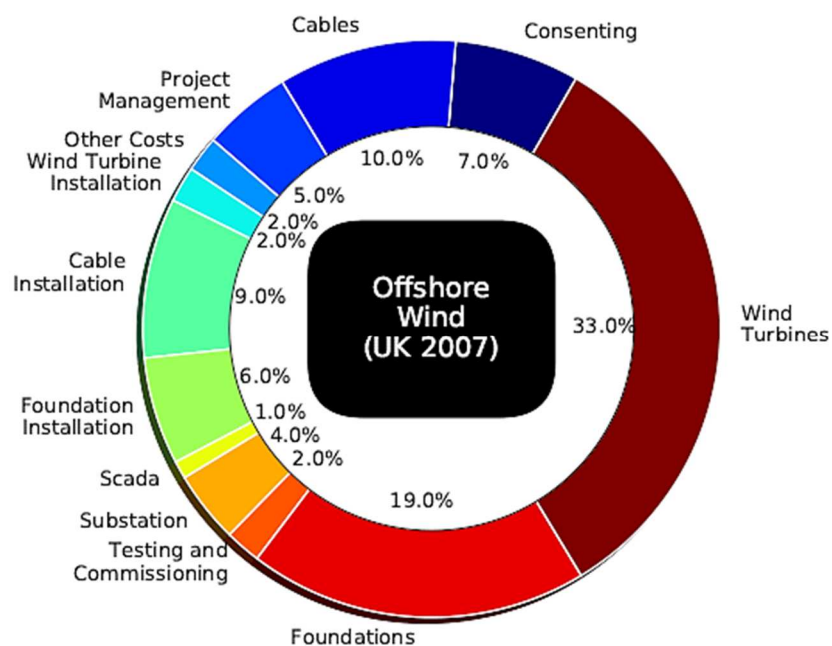
Η ανάλυση που παρουσιάζεται εδώ βασίζεται σε δεδομένα από αναφορές που είναι διαθέσιμες στο κοινό. Οι οικονομικές πτυχές μιας πραγματικής επιχείρησης αιολικών πάρκων είναι πιο περίπλοκες από αυτές που περιγράφονται εδώ, αλλά οι πληροφορίες που παρουσιάζονται στις **Εικόνες 2.5., 2.6.** και **2.7.** και στον **Πίνακα 2.1.** παρέχουν μια σαφή ποσοτικοποίηση της επίδρασης που μπορεί να έχει ο σχεδιασμός των πτερυγίων ενός δρομέα στα επενδυτικά έξοδα.

Πρέπει να επισημάνουμε ένα κρίσιμο σημείο προτού συνεχίσουμε τη συζήτησή μας: ενώ ο σχεδιασμός των πτερυγίων του δρομέα έχει άμεσο αντίκτυπο στο δείκτη LCOE, μέσω της ετήσιας παραγωγής ενέργειας, μπορεί να επηρεάσει μόνο τις συνολικές δαπάνες ενεργώντας σε ποσοστό του ποσοστού ενός εκ των τριών παραμέτρων (αρχικό κόστος επένδυσης, κόστος λειτουργίας και κόστος παροπλισμού).



**Εικόνα 2.5.** – Συγκριτική παρουσίαση των αναλυτικών δαπανών επένδυσης χερσαίων έργων αιολικής ενέργειας στην Αγγλία πριν το 2007.

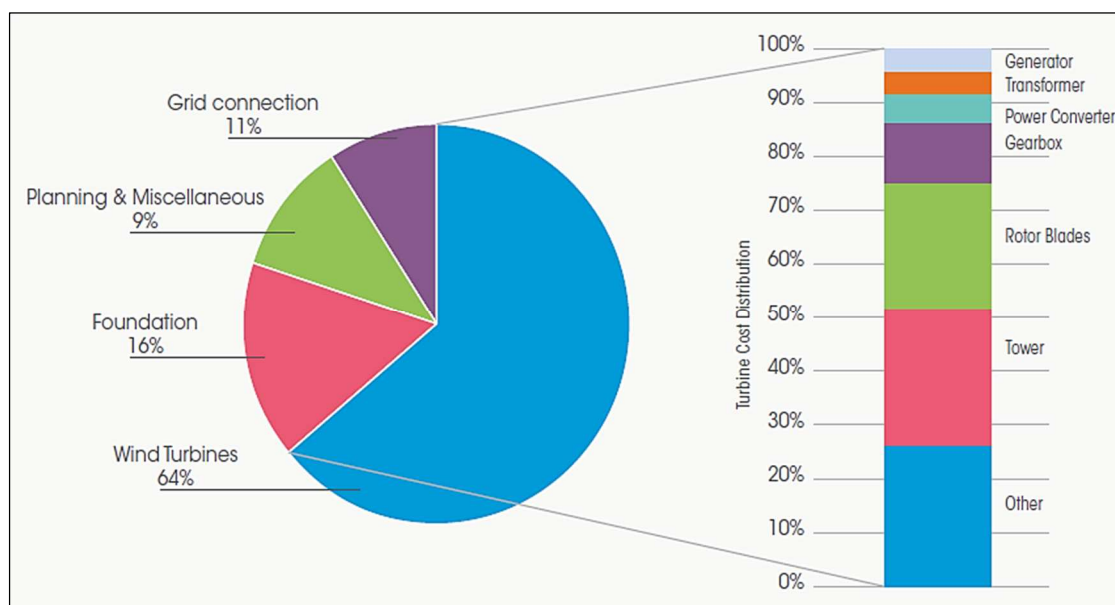




**Εικόνα 2.6.** – Συγκριτική παρουσίαση των αναλυτικών δαπανών επένδυσης υπερράκτιων έργων αιολικής ενέργειας στην Αγγλία πριν το 2007.

	ΧΕΡΣΑΙΕΣ	ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ
Κόστος επένδυσης (USD/kW)	1700 - 2450	3300 - 5000
Κόστος ανεμογεννήτριας <sup>(Α)</sup> (%)	65 - 84	30 - 50
Κόστος διασύνδεσης <sup>(Β)</sup> (%)	9 - 14	15 - 30
Κόστος κατασκευής <sup>(Γ)</sup> (%)	4 - 16	15 - 25
Άλλα κεφαλαιουχικά κόστη <sup>(Δ)</sup> (%)	4 - 10	8 - 30
<p><b>(Α)</b> Το κόστος ανεμογεννητριών περιλαμβάνει την παραγωγή, μεταφορά και εγκατάσταση μόνο της γεννήτριας και του δρομέα.</p> <p><b>(Β)</b> Το κόστος διασύνδεσης δικτύου περιλαμβάνει τη καλωδίωση, τους υποσταθμούς και τα κτίρια.</p> <p><b>(Γ)</b> Το κόστος κατασκευής περιλαμβάνει τη μεταφορά και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών και των πυλώνων στο τόπο εγκατάστασης, την κατασκευή θεμελιώσεων και των λοιπών απαραίτητων υποδομών για την πλήρη εγκατάσταση των ανεμογεννητριών.</p> <p><b>(Δ)</b> Άλλα επενδυτικά κόστη περιλαμβάνουν κόστος ανάπτυξης και υποστήριξης, διαδικασίες αδειοδότησης του έργου, συμβουλευτικές υπηρεσίες και άδειες, SCADA (Εποπτικός Έλεγχος και Λήψη Δεδομένων) ως και λοιπά συστήματα παρακολούθησης.</p>		

**Πίνακας 2.1.** – Γενική κατανομή μεταξύ του κόστους επένδυσης χερσαίων και υπερράκτιων αιολικών πάρκων σε ανεπτυγμένες χώρες το 2011.



**Σχήμα 2.7.** – Ανάλυση του κόστους επένδυσης χερσαίων αιολικών πάρκων. Κατατμημένο αναλυτικό κόστος ανεμογεννητριών [1, 20].

Στο επόμενο κεφάλαιο, περιγράφονται οι δράσεις εκείνες που μπορούν να λάβουν χώρα στο σχεδιασμό των πτερυγίων ανεμογεννητριών για μείωση του κόστους της ενέργειας (LCOE). Η κατανόηση των παραγόντων που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαδικασία σχεδιασμού των πτερυγίων και οι οποίες μπορούν τελικά να επηρεάσουν ως προς τη μείωση του δείκτη LCOE, είναι ζωτικής σημασίας.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι η μοντελοποίηση του κόστους της ενέργειας που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο και που στην πραγματικότητα αποτελεί βασική παράμετρο του σχεδιασμού των σύγχρονων δρομέων, δεν θα μας απασχολήσει ως παράμετρος στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, όπου μελετάται η επίδραση των ιδιοτήτων των υλικών στο σχεδιασμό πτερυγίων ανεμογεννητριών.

### 3. Παθητικός Έλεγχος Φορτίων Ανεμογεννήτριων

Στο παρόν κεφάλαιο, περιγράφουμε την βασική ιδέα που, όταν εφαρμοστεί σωστά κατά τη φάση σχεδιασμού μιας πτέρυγας ανεμογεννήτριας, μπορεί να μειώσει το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

Έτσι λοιπόν εισάγουμε την έννοια του **παθητικού ελέγχου φορτίων**.

#### 3.1. Μείωση των αναπτυσσόμενων φορτίων ανεμογεννητριών για μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας (LCOE)

Όπως επισημάνθηκε και στο προηγούμενο Κεφάλαιο, έχει αποδειχθεί ότι το κόστος της παραγόμενης ενέργειας αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό κριτήριο για τον καθορισμό της αξίας της έρευνας και ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας.

Δίνοντας μια πιο λεπτομερή περιγραφή του συντελεστή LCOE, είδαμε πώς ο σχεδιασμός δρομέων ανεμογεννητριών μπορεί να έχει μια θετική επίδραση στη μείωση του κόστους της αιολικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός δρομέων ανεμογεννητριών μπορεί: να αυξήσει την ετήσια παραγωγή ενέργειας χωρίς αύξηση του κόστους της ανεμογεννήτριας και κατ' επέκταση των εξαρτημάτων της, να μειώσει το κόστος επένδυσης παρέχοντας πτερύγια χαμηλότερης μάζας χωρίς μείωση της παραγόμενης από την ανεμογεννήτρια ενέργειας, ή/και των δύο παραπάνω [1, 7, 10, 26, 27, 28, 29]. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται έλεγχος και περιορισμός των φορτίων που δρουν στη κατασκευή. Με την πάροδο των ετών έχουμε δει διάφορες εξελίξεις στα συστήματα ρύθμισης των φορτίων ανεμογεννητριών (ένα παράδειγμα είναι η μετάβαση από ανεμογεννήτριες με ρύθμιση ισχύος με απώλεια στήριξης / stall-regulated, σε ανεμογεννήτριες με ρύθμιση μεταβλητής ταχύτητας της γωνίας βήματος / variable-speed pitch-regulated), αλλά για να συνεχίσει να μειώνεται το κόστος της παραγόμενης ενέργειας (LCOE), πρέπει οι χρησιμοποιούμενες στρατηγικές που αφορούν τον έλεγχο των φορτίων ~~που~~ να βρίσκονται στο επίκεντρο της έρευνας.

Οι μέθοδοι ελέγχου για τον περιορισμό των φορτίων ανεμογεννητριών μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε δύο κύριους κλάδους:

- **ενεργητικές μέθοδοι**, ασχολούνται με τεχνολογίες που στόχο έχουν τη μείωση των φορτίων ελέγχοντας ενεργά ορισμένα εξαρτήματα του δρομέα. Ο επιμέρους έλεγχος της γωνία βήματος/κλίσης των πτερυγίων [3], η χρήση ακροπτερυγίων στη πλευρά εκφυγής [4, 30] εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία.

- **παθητικές μέθοδοι**, βασίζονται στην ιδέα του σχεδιασμού μιας δομής που, χωρίς πρόσθετα εξαρτήματα, καθόσον φορτίζεται, θα οδηγεί σε μείωση των φορτίων δια μέσου των παραμορφώσεων της [5, 8].

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται αποκλειστικά στο δεύτερο κλάδο των μεθοδολογιών περιορισμού των φορτίων.

### **3.2. Μηχανισμοί παθητικού ελέγχου των φορτίων**

Ο όρος “παθητικός” περιγράφει την ιδέα της σύλληψης μιας δομής που περιορίζει τα αναπτυσσόμενα φορτία, καθώς παραμορφώνονται με έναν συγκεκριμένο τρόπο. Η πτέρυγα της ανεμογεννήτριας έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μειώνει τα φορτία "από μόνη της". Παρά το γεγονός ότι οι πτέρυγες των σύγχρονων ανεμογεννητριών αποτελούνται από πολύπλοκες πλάκες σύνθετων υλικών, η ιδέα πίσω από τον παθητικό έλεγχο των φορτίων είναι απλή: εισάγοντας κατάλληλες δομικές αλλαγές στο πτερύγιο, ώστε όταν αυτό φορτίζεται και κάμπτεται εκτός του επιπέδου περιστροφής (flapwise bending), να στρέφεται και κατά τέτοιο τρόπο ώστε τελικά να μειώνει τη γωνία προσβολής.

Η μείωση της γωνίας προσβολής οδηγεί σε μείωση των αναπτυσσόμενων αεροδυναμικών φορτίων που δρουν δυναμικά στον δρομέα. Το πώς κατανέμονται τα φορτία αυτά στον δρομέα και πώς η γωνία προσβολής ποικίλλει κατά μήκος της πτέρυγας, κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας είναι ένα περίπλοκο ζήτημα και δεν θα ασχοληθούμε περαιτέρω με αυτό. Το σημαντικότερο κομμάτι είναι ότι με εισαγωγή κατάλληλων δομικών αλλαγών στη πτέρυγα και “ελέγχοντας” τις παραμορφώσεις επιτυγχάνεται τελικά περιορισμός των φορτίων, μέσω προσαρμοσμένων αλλαγών της γωνίας προσβολής κατά μήκος της πτέρυγας. Εάν λοιπόν αυτές οι δομικές αλλαγές εισαχθούν σωστά, τα φορτία που δρουν στην ανεμογεννήτρια μπορούν να περιοριστούν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της.

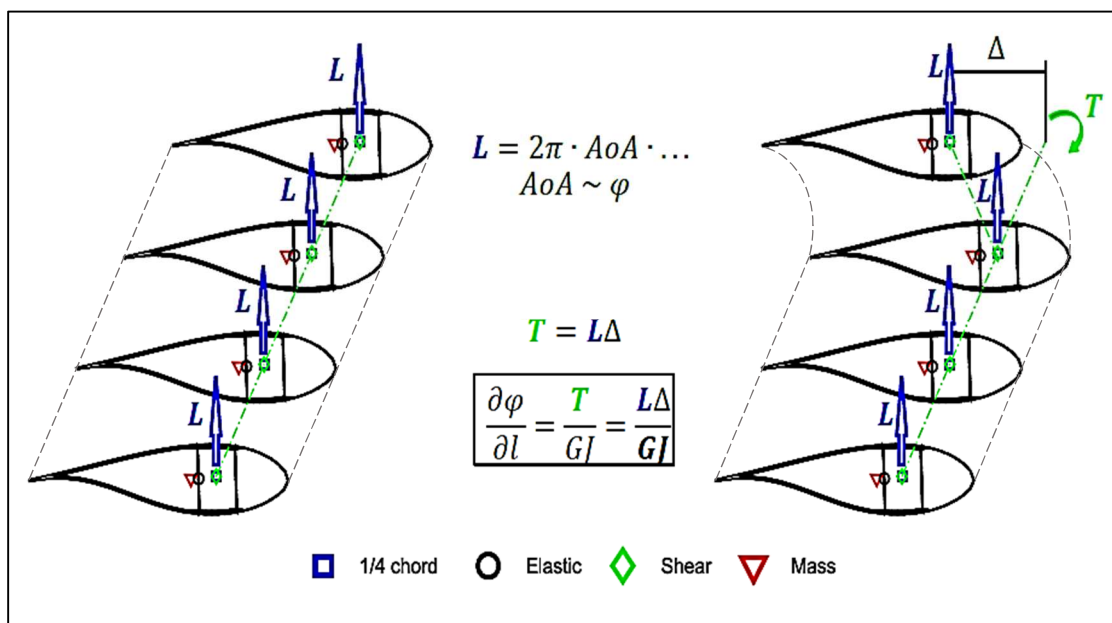
Στους δρομείς των σύγχρονων πολλαπλών μεγαβάτ ανεμογεννητριών, οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια, ο παθητικός έλεγχος φορτίων επιτυγχάνεται κάνοντας τα πτερύγια να στρέφονται στην κατεύθυνση αύξησης της γωνίας προσβολής, όταν κάμπτονται προς την κατεύθυνση του πύργου. Αυτή η συμπεριφορά της πτέρυγας δημιουργείται από τη λεγόμενη δομική σύζευξη, η οποία πιο συγκεκριμένα αναφέρεται και ως σύζευξη κάμψης – συστροφής (BTC). Οι δομικές αλλαγές που είναι απαραίτητες για την επίτευξη αυτού του είδους σύζευξης μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους.

Στο παρόν κείμενο, επιλέξαμε να τις χωρίσουμε σε τρεις κατηγορίες με βάση τον τύπο αλλαγής που πρέπει να εφαρμοστεί κατά τη φάση του σχεδιασμού της πτέρυγας, ώστε να επιτευχθεί τελικά ο επιθυμητός παθητικός έλεγχος των φορτίων.

Αυτές οι τρεις κατηγορίες παρατίθενται παρακάτω μαζί με μια σύντομη περιγραφή.

### I. Σχεδιασμός πτερυγίων με κύρτωση (βέλος), κοινώς blade sweep:

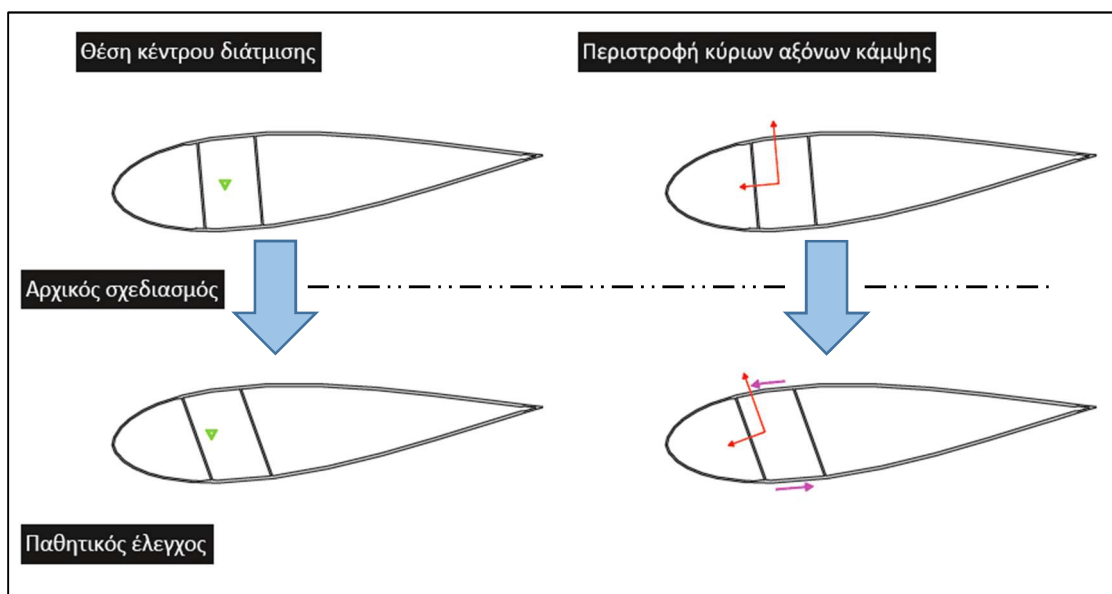
Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην εισαγωγή γωνιακής απόκλισης / κύρτωσης στο σχήμα της πτέρυγας στο επίπεδο του δρομέα. Μια τέτοια αλλαγή στη γεωμετρία της πτέρυγας παράγει μια κατανομή αεροδυναμικών δυνάμεων κατά μήκος της, η οποία περιορίζει μέρος της πτέρυγας να στρέφεται, στην κατεύθυνση αύξησης της γωνίας προσβολής (δλδ. μείωση της γωνίας προσβολής, κύρτωση προς τα πίσω /backward sweep). Η **Εικόνα 3.1** παρέχει μια οπτική περιγραφή της έννοιας της γωνιακής απόκλισης / κύρτωσης πτερυγίων. Η αεροδυναμική δύναμη ανύψωσης  $L$  που εφαρμόζεται κατά μήκος της πτέρυγας είναι ανάλογη με τη γωνία προσβολής (AoA), η οποία, με τη σειρά της, είναι ανάλογη με τη γωνία της εισερχόμενης ροής του ανέμου ( $\phi$ ). Όταν ένα μέρος του πτερυγίου “αποκλίνει” από την ευθεία, δημιουργείται μια ροπή ( $T$ ), η οποία είναι ανάλογη της δύναμης ανύψωσης και της “ποσότητας” του βέλους ( $\Delta$ ), λόγω της διακύμανσης που παρατηρείται στο κέντρο διάτμησης της διατομής. Αυτή η ροπή θα προκαλέσει τοπική μεταβολή της γωνίας της εισερχόμενης ροής ( $\phi$ ), κατά μήκος ενός τμήματος ( $l$ ) της πτέρυγας. Αυτή η αλλαγή στη γωνία της εισερχόμενης ροής θα εξαρτηθεί επίσης από τις δομικές ιδιότητες της πτέρυγας, κάτι που σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να προσεγγιστεί από τον όρο της στρεπτικής δυσκαμψίας ( $GJ$ ). Η ποσότητα  $\partial\phi/\partial l$ , εάν η κύρτωση εφαρμοστεί προς τα πίσω δλδ. προς την ακμή εκφυγής της πτέρυγας (backward sweep), προκαλεί μείωση της γωνίας προσβολής (AoA) με τελικό αποτέλεσμα τον περιορισμό των φορτίων.



**Εικόνα 3.1.** – Σχεδιασμός πτερυγίων με κύρτωση (βέλος), για σκοπούς παθητικού ελέγχου των φορτίων.

## II. Προσαρμογή της εσωτερικής διατομής των πτερυγίων για επίτευξη μηχανικών ιδιοτήτων που συνεισφέρουν στη σύζευξη κάμψης - στέψης (BTC):

Είδαμε ήδη από η **Εικόνα 3.1.**, ότι η διακύμανση της γωνίας της εισερχόμενης ροής / γωνίας προσβολής εξαρτάται επίσης από τις δομικές ιδιότητες της πτέρυγας. Κατά συνέπεια, ο παθητικός έλεγχος φορτίων μπορεί να επιτευχθεί με αλλαγή της εσωτερικής διάταξης της κλειστής πολυκυψελικής διατομής της πτέρυγας, του πάχους των στρώσεων και των υλικών. Ένα παράδειγμα αποτελεί η κατάλληλη προσαρμογή των χαρακτηριστικών της εσωτερικής διατομής του πτερυγίου, ώστε να οδηγήσουν στη μείωση του όρου της στρεπτικής δυσκαμψίας ( $GJ$ ), επιτρέποντας έτσι στη πτέρυγα να στρέφεται περισσότερο όταν κάμπτεται προς την κατεύθυνση του πύργου. Μια άλλη περίπτωση που εμπίπτει σε αυτήν την κατηγορία είναι και η αλλαγή της θέσης του κέντρου διάτμησης, μέσω κατάλληλης προσαρμογής της θέσης των spar caps και των shear webs. Η **Εικόνα 3.2.** παρέχει μια οπτική περιγραφή της έννοιας της προσαρμογής της εσωτερικής διατομής των πτερυγίων. Μέσω κατάλληλης προσαρμογής της θέσης των spar caps και των shear webs μπορεί επίσης να προσαρμοστεί και η θέση των κύριων αξόνων κάμψης, των οποίων η περιστροφή εισάγει μια σύζευξη μεταξύ των δύο κατευθύνσεων κάμψης, καθόσον η πτέρυγα παραμορφώνεται.



**Εικόνα 3.2.** - Προσαρμογή της εσωτερικής διατομής της πτέρυγας για σκοπούς παθητικού ελέγχου των φορτίων.

## III. Αξιοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των πολύστρωτων πλακών:

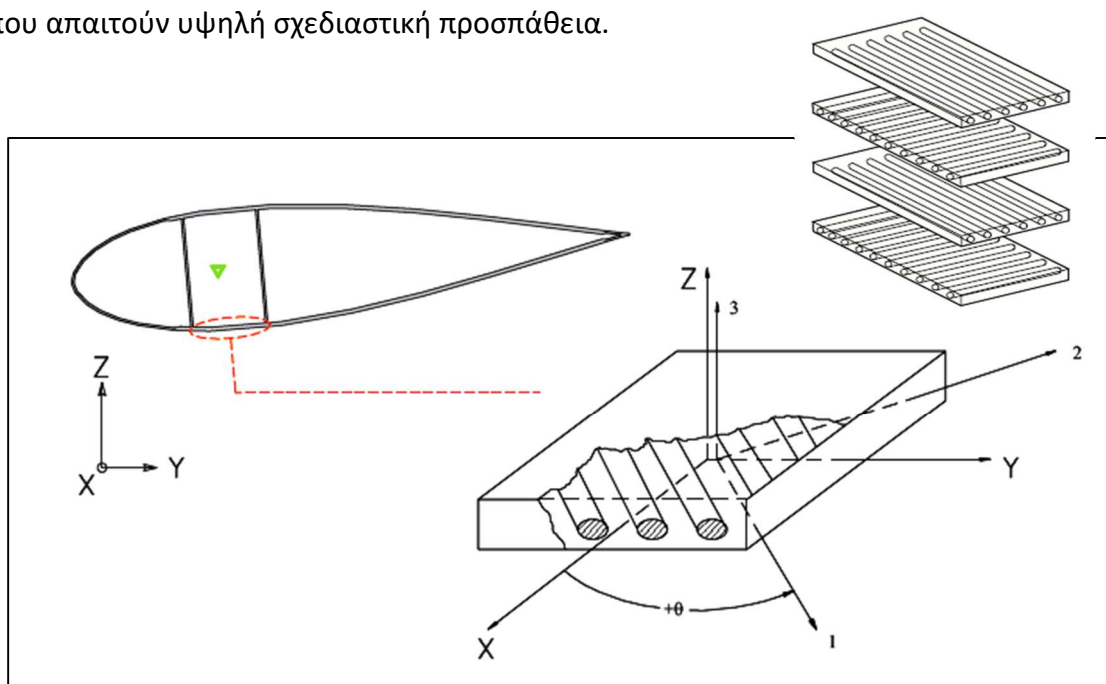
Η προσαρμογή του τρόπου διαδοχής των στρώσεων του ινώδους σύνθετου υλικού που αποτελεί την πολύστρωτη πλάκα, από την οποία είναι κατασκευασμένα τα πτερύγια μπορεί να εφαρμοστεί κατάλληλα ώστε να εισάγει τελικά μια σύζευξη μεταξύ κάμψης και συστροφής. Συγκεκριμένα, η διεύθυνση προσανατολισμού των ινών κάθε στρώσης μπορεί να προσαρμοστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργήσει μια δομική σύζευξη

ικανή για να οδηγήσει στον περιορισμό των αναπτυσσόμενων φορτίων (βλέπε **Εικόνα 3.3**). Στις πολύστρωτες πλάκες παρουσιάζεται σύζευξη φορτίσεως και μηχανικής αποκρίσεως όχι μόνον λόγω ανισοτροπίας των στρώσεων (σύζευξη μεταξύ ορθών τάσεων και διατμητικών παραμορφώσεων και αντιστρόφως, σε γενικώς ορθότροπο μέσο) αλλά και λόγω της ανομοιογένειάς των εκατέρωθεν του μέσου επιπέδου της πλάκας. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιβάλλοντας μια μονοαξονική εφελκυστική δύναμη, π.χ. κατά την  $x$ -διεύθυνση, η γενικού τύπου πολύστρωτη πλάκα εκτός των ορθών παραμορφώσεων κατά την διεύθυνση της φόρτισης και την κάθετη προς αυτή, λόγω του φαινομένου του Poisson, θα παρουσιάσει επίσης διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο της, ενώ ταυτοχρόνως θα συστραφεί και θα καμφθεί.

Όπως και στην περίπτωση της προσαρμογής της εσωτερικής διατομής που είδαμε προηγουμένως, έτσι και η προσέγγιση της κατάλληλης προσαρμογής της διεύθυνσης προσανατολισμού των ινών κάθε στρώσης και του τρόπου διαδοχής των στρώσεων, έχει αποδειχθεί ότι έχει σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες της πτέρυγας.

Επειδή λοιπόν η διεύθυνση προσανατολισμού των ινών κάθε στρώσης της πλάκας και ο τρόπος διαδοχής των διαφόρων στρώσεων από τις οποίες αποτελείται, μπορούν να εισαχθούν χωρίς να επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στον όλο σχεδιασμό της πτέρυγας, κρατήσαμε αυτές τις δύο μεθοδολογίες ξεχωριστές.

Κατά τη φάση μοντελοποίησης των πτερυγίων, η διεύθυνση προσανατολισμού των ινών κάθε στρώσης της πολύστρωτης πλάκας δεν αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση, αφού μπορεί να εισαχθεί χωρίς ιδιαίτερες αλλαγές στο κύριο σχεδιασμό της πτέρυγας και με σχετικά χαμηλή σχεδιαστική προσπάθεια. Αντίθετα, η προσαρμογή της εσωτερικής διατομής (θέση και πλήθος εσωτερικών ενισχυτικών δοκών / webs), το πάχος των στρώσεων των επιμέρους τμημάτων του πτερυγίου (spar caps, webs, etc.) καθώς και ο τρόπος διαδοχής των στρώσεων της πολύστρωτης πλάκας, αποτελούν πρόκληση αφού είναι ενέργειες που απαιτούν υψηλή σχεδιαστική προσπάθεια.



**Εικόνα 3.3.** - Προσαρμογή του τρόπου διαδοχής των στρώσεων της πολύστρωτης πλάκας, για σκοπούς παθητικού ελέγχου των φορτίων.

### **3.3. Σχεδόν 30 χρόνια ερευνητικής δραστηριότητας: μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας**

Οι μεθοδολογίες του παθητικού ελέγχου φορτίων που εφαρμόζονται στις ανεμογεννήτριες δεν είναι ούτε νέες ούτε καινοτόμες σαν ιδέες. Όπως αναφέρει ο τίτλος αυτής της ενότητας, πολλά χρόνια έρευνας και πόρων έχουν αφιερωθεί στο θέμα. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε μια ανασκόπηση των πιο σχετικών ερευνητικών έργων που έχουν ασχοληθεί με το θέμα.

Όπως φαίνεται πιο κάτω, υπάρχει ένα σημαντικό έργο που ήδη έχει αφιερωθεί στο ζήτημα του παθητικού ελέγχου φορτίων. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι αυτό δεν ακυρώνει το έργο που υπάρχει στην παρούσα εργασία. Αντίθετα, στην παρούσα εργασία θα προσπαθήσουμε να αναδείξουμε ότι οι πρόοδοι που σημειώθηκαν στην ανάπτυξη πιο εξελιγμένων εργαλείων και μοντέλων για την ανάλυση και το σχεδιασμό ανεμογεννητριών έχουν καταστήσει την έννοια του παθητικού ελέγχου φορτίων πιο ώριμη και εφαρμόσιμη στα σύγχρονα αεροελαστικά πάρκα.

Έχουμε χωρίσει τις στρατηγικές του παθητικού ελέγχου των φορτίων σε τρεις κατηγορίες: σχεδιασμός πτερυγίων με κύρτωση (βέλος), κατάλληλη προσαρμογή της εσωτερικής διατομής των πτερυγίων και αξιοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών, με χρήση κατάλληλης διαδοχής των στρώσεων. Πριν από την εμβάθυνση σε καθμία από τις τρεις διαφορετικές κατηγορίες, πρέπει να αναφέρουμε ότι η τεράστια βιβλιογραφία σχετικά με την αεροελαστική προσαρμογή στην αεροναυπηγική, λειτούργησε ως πρόδρομος για την ανάπτυξη του παθητικού ελέγχου φορτίων σε πτερύγια ανεμογεννητριών.

Σύμφωνα με τους Shirk et al. [31], η πρώτη μελέτη για την αεροελαστική προσαρμογή χρονολογείται από το 1949, όταν ο Munk [32] διερεύνησε τις αλλαγές στον προσανατολισμό του κόκκου των πτερυγίων της ξύλινης έλικας του, για τη δημιουργία επιθυμητής σύζευξης των παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, μια έρευνα σχετικά με την αεροελαστική σύζευξη τροφοδοτήθηκε από μελέτες σχετικά με τα εμπρόσθια φτερά του X-29 [33] στα πλαίσια του έργου Active Aeroelastic Wing [34]. Στο πλαίσιο της ίδιας έρευνας, το έργο των Weisshaar [35, 36, 37, 38, 39] και Librescu [40, 41, 42] αντιπροσωπεύει μια μεγάλη συμβολή στη μελέτη των ελαστικών συζεύξεων μεταξύ καμπτικών και στρεπτικών παραμορφώσεων πτερυγίων, μέσω της χρήσης πολύστρωτων πλακών από σύνθετα υλικά. Δεν μπορούμε να διερευνήσουμε λεπτομερώς όλη αυτή την τεράστια ερευνητική βιβλιογραφία, αλλά ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στον Jutte [43] για μια πλήρη και διεξοδική ανασκόπηση σχετικά με την αεροελαστική σύζευξη στην αεροναυπηγική.



Στη συνέχεια αυτής της ενότητας, από τις τρεις προαναφερθείσες κατηγορίες του παθητικού ελέγχου φορτίων, θα ασχοληθούμε με αυτή της αξιοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών της πτέρυγας, προσδίδοντας τη κατάλληλη προσαρμογή στον τρόπο διαδοχής των στρώσεων του ινώδους σύνθετου υλικού που αποτελεί την πολύστρωτη πλάκα και θα εξετάσουμε βήμα προς βήμα τις πιο σχετικές ερευνητικές συνεισφορές που δημοσιεύθηκαν τις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Η ανασκόπηση των δημοσιεύσεων που παραθέτουμε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας απέχει πολύ από το να είναι ολοκληρωμένη.

Στόχος μας δεν είναι να παρέχουμε μια πλήρη λεπτομερή λίστα όλων των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν και συνεχίζουν να πραγματοποιούνται όσο αναφορά τον παθητικό έλεγχο φορτίων ανεμογεννητριών, αλλά να παρουσιάσουμε τις δημοσιεύσεις που ενέπνευσαν την εργασία που παρατίθεται σε αυτές τις σελίδες.

### **3.3.1. Σχεδιασμός πτερυγίων με κύρτωση (βέλος)**

Στη δεκαετία του 2000, μπορούμε να βρούμε μία από τις πληρέστερες μελέτες που διεξήχθησαν και δημοσιεύθηκαν σε πτερύγια ανεμογεννητριών. Αυτό το έργο που ονομάζεται Sweep-Twist Adaptive Rotor Blade (STAR) και πραγματοποιήθηκε από την ομάδα Knight & Craver Wind στα Εθνικά Εργαστήρια SANDIA, κατά την περίοδο 2004 και 2010 [8, 44, 45]. Το έργο ξεκίνησε έπειτα από δύο αρχικές μελέτες σκοπιμότητας:

Η μια από τους Ashwill et al. [6] και η άλλη από τον Zuteck [46]. Αυτές οι μελέτες αποδεικνύουν ότι η καμπυλότητα του σχήματος μιας πτέρυγας μπορεί να προκαλέσει σημαντική συστροφή, μειώνοντας έτσι τα φορτία κόπωσης. Αυτή η ικανότητα μείωσης των φορτίων επιτρέπει τη χρήση μεγαλύτερων πτερυγίων στο ίδιο φάσμα κόπωσης. Ως μέρος του έργου STAR, οι Larwood και Zuteck [44] χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο πτέρυγας μήκους 28m (STAR6) με 2,2m κύρτωση (βέλος) αντίθετα στη διεύθυνση περιστροφής, για να εκτελέσουν τις αερο-ελαστικές προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με ένα βασικό μοντέλο.

Ο νέος δρομέας με κύρτωση, είχε περίπου 25% περιθώριο σε σύγκριση με το βασικό μοντέλο για να αντισταθμίσει την απώλεια ισχύος κάτω από την ονομαστική τιμή που προκαλείται λόγω της εισαχθείσας κύρτωσης. Η μελέτη δείχνει επίσης ότι η νέα αυτή ανεμογεννήτρια αυξάνει την ετήσια παραγωγή ενέργειας κατά 5 με 10%. Η πτέρυγα με κύρτωση εμφανίζει να έχει παρόμοιες ή υψηλότερες καμπτικές ροπές στη ρίζα (flapwise) σε σχέση πάντα με την αρχική ευθεία πτέρυγα των 25m λόγω της σύζευξης. Για το τελικό μέρος του προγράμματος STAR, οι Ashwill et al. [45] σχεδίασαν, κατασκεύασαν και δοκίμασαν μια καινούργια πτέρυγα μήκους 27,1m, με κύρτωση. Έδειξαν με αυτό τον τρόπο, την δυνατότητα που έχει ένα πτερύγιο με κατάλληλη κύρτωση να μειώνει παθητικά τα αναπτυσσόμενα λειτουργικά του φορτία. Παρατηρήθηκε λοιπόν αύξηση της παραγόμενης ενέργειας συγκρίνοντας το μοντέλο, με

το πρωτότυπο βασικό μοντέλο μήκους 23,5m που ήταν τοποθετημένο σε μια ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 750 kW, με διάμετρο δρομέα 48m.

Ο νέος δρομέας εμφάνισε μια αύξηση της τάξης του 10 με 12% στην ετήσια παραγωγή ενέργειας, χωρίς ιδιαίτερη αύξηση των καμπτικών ροπών στη ρίζα του πτερυγίου. Μια ολοκληρωμένη επισκόπηση του έργου STAR, δόθηκε απο μια τελική έκθεση του έργου των Knight & Craver Wind Group [8].

Μια πρώτη λεπτομερή παραμετρική μελέτη που περιλάμβανε την εισαγωγή γεωμετρικών παραμέτρων σε πτερύγια με κύρτωση πραγματοποιήθηκε από τους Verelst και Larsen [14]. Αυτή η μελέτη βασίστηκε σε αρκετές διαμορφώσεις πτερυγίων που περιλάμβαναν παραλλαγές τόσο ως προς την καμπυλότητα του βέλους, όσο και της απόστασης αυτού από την άκρη/κορυφή του πτερυγίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα εκτός επιπέδου φορτία κόπωσης και τα ακραία φορτία μπορούν να μειωθούν από 10% ως και 15%, αντιστοίχως σε πτερύγια με προς τα πίσω κύρτωση, ενώ τα εντός επιπέδου φορτία κόπωσης και τα ακραία φορτία μπορούν να αυξηθούν έως και 6%. Οι Verelst και Larsen χαρτογράφησαν επίσης και τη ροπή στρέψης στη ρίζα του πτερυγίου, η οποία σημείωσε αύξηση έως και 400%. Αυτή η παραμετρική μελέτη βασίστηκε σε μια απλή περίπτωση φόρτισης (χρονοσειρές των 10 min, με σταθερή ένταση τύρβης 0,18 και χωρίς διάτμηση ανέμου).

Ο Hansen [47] διερεύνησε τις αερο-ελαστικές ιδιότητες πτερυγίων με προς τα πίσω κύρτωση, χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό μοντέλο που προήλθε από τη διατύπωση ενός μη γραμμικού πεπερασμένου στοιχείου δοκού με περιστροφή, σε συνδυασμό με τη μέθοδο των στοιχείων στροβιλότητας με ελεύθερο ομόρρου (BEM), σε συνθήκες μη μόνιμης ροής. Υπολόγισε έτσι συχνότητες, απόσβεση και ιδιομορφές των πτερυγίων. Ο Hansen κατέληξε στο συμπέρασμα ότι πτερύγια με προς τα πίσω κύρτωση δημιουργούν συστροφή κατά τη διάρκεια της πρώτης καμπτικής ιδιομορφής (flapwise). Αυτό η συστροφή, προκαλεί αύξηση στη συχνότητα της πρώτης καμπτικής ιδιομορφής σε σύγκριση με την φυσική συχνότητα της κατασκευής, και αυτή η αύξηση είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η “ποσότητα” του βέλους. Επιπλέον, ο Hansen διαπίστωσε ότι η συχνότητα της εκτός επιπέδου καμπτικής ροπής στη ρίζα του πτερυγίου μειώνεται σε σύγκριση με την αυξημένη ιδιοσυχνότητα της πρώτης εκτός επιπέδου κάμψης.

Αυτή η μείωση της καμπτικής ροπής εξηγεί τα μειωμένα φορτία που παρατηρήθηκαν σε άλλες έρευνες που διεξήχθησαν σε πτερύγια με προς τα πίσω κύρτωση. Ο Hansen παρείχε επίσης μια επισκόπηση της ανεμογεννήτριας με πτερύγια που έχουν κύρτωση προς τα πίσω σε συνθήκες μόνιμης ροής, δείχνοντας την απόκλιση της γωνίας του βήματος πέρα της ονομαστικής της τιμής και την αναπόφευκτη αύξηση της στρεπτικής ροπής στη ρίζα του πτερυγίου. Οι παρατηρήσεις που τελικά προκύπτουν για τη μόνιμη κατάσταση φαίνεται να δείχνουν θετικά και αρνητικά αποτελέσματα όσο αναφορά το σχεδιασμό δρομέων με πτερύγια προς τα πίσω κύρτωσης, για τον παθητικό έλεγχο των φορτίων.

Σημαντικές συνεισφορές στο θέμα του σχεδιασμού πτερυγίων με κύρτωση, δόθηκαν επίσης και από Ευρωπαϊκά προγράμματα όπως το Urwind, που χρηματοδοτήθηκαν από το Πρόγραμμα του 6<sup>ου</sup> Πλαισίου της Ε.Ε. (FP6), κατά την περίοδο 2006 έως 2011 [48]. Υπο το πλαίσιο του “Work Package 2–Task 1 Structural Dynamics–Large Deflections and non-linear effects” [49], πραγματοποιήθηκαν διάφορες προσομοιώσεις και έρευνες για την περίπτωση ομοιόμορφα εισερχόμενης ροής και με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης που επιφέρει η κύρτωση της πτέρυγας στα φορτία και τη σταθερότητα.

Οι αναλύσεις επικεντρώθηκαν κυρίως σε προ-κεκαμένα (pre-bent) πτερύγια παρά σε πτερύγια με κύρτωση. Όσον αφορά τα πτερύγια με κύρτωση, η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι πτερύγια με κύρτωση προς τα εμπρός δεν εμφανίζουν επαρκή σταθερότητα και ότι τελικά μπορεί να υπάρξει ένας βέλτιστος σχεδιασμός του βέλους, ώστε τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας αναφοράς να παρέχουν περιορισμό των φορτίων και ταυτόχρονα επαρκή σταθερότητα.

### **3.3.2. Προσαρμογή της εσωτερικής διατομής των πτερυγίων για την δημιουργία σύζευξης κάμψης - στέψης**

Ο παθητικός έλεγχος φορτίων που σχετίζεται με την κατάλληλη προσαρμογή της εσωτερικής διατομής της πτέρυγας ήταν ανέκαθεν γνωστός και εφαρμόστηκε στη διαδικασία σχεδιασμού ανεμογεννητριών. Οι κατασκευαστές είχαν πάντα την τεχνογνωσία για τη δημιουργία μιας πτέρυγας με προσαρμοσμένες μηχανικές ιδιότητες ικανές να αντέχουν σε συγκεκριμένες απαιτήσεις. Παρ' όλα αυτά, τα τελευταία χρόνια, ο σχεδιασμός μιας πτέρυγας με ιδιότητες ιδιαίτερα επιρρεπείς στον περιορισμό των φορτίων έχει αποκτήσει μεγαλύτερη προσοχή. Μια σειρά από βασικά ερευνητικά έργα περιγράφονται εδώ για να ενημερώσουν τον αναγνώστη σχετικά με τις σημαντικές προόδους στον τομέα αυτό.

Οι Zahle et al. [18, 19] πραγματοποίησε ταυτόχρονα αεροδυναμική και δομική βελτιστοποίηση ενός δρομέα ανεμογεννήτριας 10 MW σε σχέση τόσο με την εσωτερική διατομή, όσο και με το εξωτερικό σχήμα των πτερυγίων. Η εργασία αυτή παρά το γεγονός ότι δεν σχετίζεται άμεσα με τον παθητικό έλεγχο των φορτίων, αλλά με τη κατανομή του υλικού και κατά συνέπεια με τις μηχανικές ιδιότητες της πτέρυγας που λαμβάνονται μέσα από τη διαδικασία βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, τείνουν προς τη κατεύθυνση μετριασμού των φορτίων. Για παράδειγμα, ο τελικός σχεδιασμός παρουσιάζει μικρότερη στρεπτική δυσκαμψία, πράγμα που επιτρέπει στη πτέρυγα να είναι πιο επιρρεπής στο ευεργετικό αποτέλεσμα της σύζευξης κάμψης-συστροφής. Επιπλέον, η θέση των spar caps μπορεί να διαφοροποιείται, μετακινώντας το κέντρο διάτμησης και περιστρέφοντας τους κύριους άξονες της κάμψης, με συνέπεια την προσαρμοσμένη μείωση της γωνίας προσβολής (AoA) που έχει ως επακόλουθο αποτέλεσμα τη μείωση των φορτίων σε ορισμένα τμήματα κατά μήκος της πτέρυγας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ανεξάρτητα η μάζα των πτερυγίων μπορεί να μειωθεί έως και 20%, και η ετήσια παραγωγή ενέργειας (ΑΕΡ) μπορεί να αυξηθεί έως και 1,7%.

Τόσο το εξωτερικό σχήμα, όσο και η εσωτερική διατομή των πτερυγίων επανασχεδιάστηκαν, αλλά είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η επιλογή ορισμένων βασικών παραμέτρων όσο αναφορά την εσωτερική διατομή συνέβαλε σημαντικά στον έλεγχο της φόρτισης της ανεμογεννήτρια, επιτρέποντας τη μείωση της μάζας των πτερυγίων και την αύξηση του συντελεστή ΑΕΡ.

Το έργο των Caruzzi et al. [50, 51] παρέχει άλλο ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα στρατηγικών παθητικού ελέγχου φορτίων, που εφαρμόζονται μέσω της προσαρμογής των μηχανικών ιδιοτήτων της πτέρυγας. Έτσι λοιπόν φαίνεται ότι η σωστή προσαρμογή της ελαστικής απόκρισης της πτέρυγας μέσω της μετατόπισης των spar caps κατά μήκος της χορδής, μπορεί να αυξήσει το ενεργειακό περιεχόμενο της ανεμογεννήτριας ενώ μετριάζει τις συνθήκες ακραίας φόρτισης λόγω των ριπών του ανέμου. Η μεθοδολογία του παθητικού ελέγχου των φορτίων που χρησιμοποιείται εδώ, είναι στην πραγματικότητα ένας συνδυασμός πτερυγίων με προς τα πίσω κύρτωση και μιας κατάλληλης προσαρμογής της διατομής αυτών με μετατόπιση των spar caps.

Παρ' όλα αυτά, οι συγγραφείς καταδεικνύουν τη δυνατότητα που έχει η προσαρμογή των χαρακτηριστικών της διατομής των πτερυγίων στις μηχανικές ιδιότητες τους, για την επίτευξη μιας επιθυμητής απόδοσης, περιορίζοντας ταυτόχρονα και τα αναπτυσσόμενα φορτία.

### **3.3.3. Αξιοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των πολύστρωτων πλακών**

Η τελευταία από τις τρεις κατηγορίες παθητικού ελέγχου φορτίων, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, είναι η εφαρμογή τεχνικών περιορισμού των φορτίων, εκμεταλλευόμενοι τις μηχανικές ιδιότητες των πολύστρωτων πλακών από τις οποίες αποτελούνται τα πτερύγια. Συγκεκριμένα, η προσαρμογή του τρόπου διαδοχής των στρώσεων του ινώδους σύνθετου υλικού που αποτελεί την πολύστρωτη πλάκα, από την οποία είναι κατασκευασμένα τα πτερύγια μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα, ώστε να εισάγει τελικά μια επιθυμητή σύζευξη μεταξύ κάμψης και συστροφής.

Ο Kooijman [5] δημοσίευσε μια από τις πρώτες και πληρέστερες μελέτες σχετικά με τη σύζευξη κάμψης και συστροφής, ως μια μέθοδος παθητικού ελέγχου των φορτίων σε πτερύγια ανεμογεννητριών. Ανέπτυξε έτσι ένα μοντέλο βασισμένο στη θεωρία σύζευξης μιας λεπτότοιχης διατομής, που περιγράφεται από τον Kargaolis [52, 53], δείχνοντας ότι μια πτέρυγα ανεμογεννήτριας μπορεί να αναπτύξει σύζευξη μεταξύ ορθών τάσεων και διατμητικών παραμορφώσεων ή διατμητικών τάσεων και ορθών παραμορφώσεων του υλικού, κατά προτίμηση χρησιμοποιώντας μια υβριδική πολύστρωτη πλάκα αποτελούμενη από στρώσεις ινώδων σύνθετων υλικών με μήτρα από εποξική ρητίνη και ίνες γυαλιού και άνθρακα. Οι προκαταρκτικοί υπολογισμοί του δείχνουν ότι η σύζευξη

μεταξύ κάμψης και συστροφής μπορεί να βελτιώσει τη σταθερότητα της πτέρυγας μέσω κατάλληλων δυναμικών μειώσεων της γωνίας προσβολής των στοιχείων της πτέρυγας.

Οι Lobitz, Veers, et al. διενήργησαν αρκετές μελέτες σχετικά με τη σύζευξη ορθών τάσεων και διατμητικών παραμορφώσεων του υλικού των πτερύγιων [54, 55, 56, 57] ή αντιστρόφως. Αυτές οι μελέτες κυμαίνονται από προκαταρκτικές μελέτες σχετικά με τη δυνατότητα χρήσης πτερυγίων με σύζευξη κάμψης και συστροφής σε ανεμογεννήτριες [54], έως τεχνικές έρευνες που περιλαμβάνουν τον υπολογισμό της σταθερότητας τέτοιων πτερυγίων με σύζευξη [55] και τις δυνατότητές τους για περιορισμό των φορτίων [56], ακόμη και σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα χρησιμοποιώντας τις σύγχρονες στρατηγικές ελέγχου [57]. Πρώτον, οι Lobitz, Veers, et al. έδειξαν ότι μια κατάλληλα προσαρμοσμένη συστροφή που επιτυγχάνεται μέσω της σύζευξης του υλικού έχει μια επίδραση στην αύξηση της παραγωγή ισχύος ή στον περιορισμό των ταλαντώσεων ή/και στα δύο [54]. Ακόμη και αν οι ταχύτητες περιστροφής του δρομέα υπερέβαιναν το όριο σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας, δείχνουν ότι τα εξεταζόμενα συζευγμένα πτερύγια είναι λιγότερο σταθερά καθώς πλησιάζουν στις ακρότατες τιμές του συντελεστή σύζευξης [55]. Να σημειώσουμε ότι η βελτίωση στην παραγωγή ισχύος και η δυναμική μείωση των ταλαντώσεων, δεν αποτέλεσαν στόχο των μελετών τους. Για την εκτέλεση των απαιτούμενων αναλύσεων των φορτίων της ανεμογεννήτριας, οι συγγραφείς σχεδίασαν ένα μοντέλο δρομέα με κατάλληλα προσαρμοσμένη σύζευξη κάμψης και συστροφής. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί σημαντικός περιορισμός των φορτίων σε όλο το φάσμα ισχύος του ανέμου [56]. Εξετάζοντας λοιπόν τις αεροδυναμικές προσομοιώσεις των περιπτώσεων τυρβώδους ροής ανέμου, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η σύζευξη κάμψης και συστροφής, οδηγεί σε σημαντική μείωση του φορτίου κόπωσης ιδίως σε δρομείς που είναι εξοπλισμένοι με ελεγκτές γωνίας βήματος, μεταβλητής ταχύτητας [57].

Στα Εθνικά Εργαστήρια της SANDIA, το έργο των Lobitz, Veers, et al. κατέληξε σε μια σειρά από αριθμητικές και πειραματικές μελέτες σχεδιασμού σχετικά με τη σύζευξη κάμψης και συστροφής και την κατασκευή βιομηχανικής κλίμακας πτερυγίων.

Ο Ashwill [45] παρείχε μια πλήρη περιγραφή του βασικού σχεδιασμού και της απαιτούμενης κατασκευαστικής εργασίας που πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια της SANDIA, σχετικά με τις “παθητικά ελεγχόμενες” πτέρυγες. Η έρευνα του Ashwill δείχνει όχι μόνο τη δυνατότητα χρήσης τέτοιων πτερυγίων, αλλά και τη σκοπιμότητα της διαδικασίας κατασκευής και την ακρίβεια του μοντέλου που αναπτύχθηκε για τη μελέτη του θέματος.

Η επικύρωση των εργαλείων που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια για τη μοντελοποίηση της σύζευξης μεταξύ κάμψης και συστροφής σε πτερύγια ανεμογεννητριών παρέχεται επίσης από τις εργασίες των Berring [58], Branner [59] και Fedorov [9]. Οι δύο πρώτοι χρησιμοποίησαν ένα τμήμα 8m από μια πτέρυγα συνολικού μήκους 23m της Vestas Wind Systems A/S, για δυναμικές και στατικές δοκιμές. Το αρχικό τμήμα της πτέρυγας δοκιμάστηκε και στη συνέχεια τροποποιήθηκε με τέσσερις στρώσεις

UD1200 (μονοαξονικές ίνες γυαλιού, 1200gr – 2), τα οποία ενώθηκαν προς σχηματισμό μιας πολύστρωτης πλάκας για να τοποθετηθούν στην περιοχή της ακμής προσβολής, από την πλευρά χαμηλής πίεσης, με γωνία  $25^\circ$  ως προς τον άξονα της πτέρυγας ώστε να μπορέσουν τελικά να δημιουργήσουν μια μετρήσιμη σύζευξη κάμψης και συστροφής. Τα αποτελέσματα των δοκιμών και η σύγκριση με τις αριθμητικές αναλύσεις έδειξαν ότι μια σύζευξη μπορεί εύκολα να εισαχθεί και να ποσοτικοποιηθεί προσθέτοντας απλά υπο γωνία μονοαξονικές στρώσεις σύνθετου υλικού σε τμήματα της πτέρυγας [58, 59].

Ο Fedorov [9] χρησιμοποίησε το ίδιο τμήμα πτέρυγας της Vestas για να παρουσιάσει μια μέθοδο αξιολόγησης του μεγέθους της σύζευξης του υλικού. Η μέθοδος δοκιμάστηκε και επιβεβαιώθηκε τόσο με πειραματικά αποτελέσματα όσο και με μοντελοποίηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, αποδεικνύοντας τη σημασία που έχει η ακριβής εκτίμησης της σύζευξης κάμψης και συστροφής, στα πτερύγια των ανεμογεννητριών.

Η διεύθυνση προσανατολισμού των ινών ως μέθοδος παθητικού ελέγχου των φορτίων έχει επίσης ενσωματωθεί μαζί με μεθόδους ενεργητικού ελέγχου.

Οι Bottasso et al. [15] παρουσίασαν μια εκτενή ανάλυση της επίδρασης που έχει ο συνδυασμός τεχνικών παθητικού ελέγχου, με τεχνικές ενεργητικού έλεγχου των φορτίων σε πτερύγια ανεμογεννητριών. Δημιούργησαν έτσι ένα σύνολο σχεδιαστικών εργαλείων παθητικά ελεγχόμενων πτερυγίων μέσω της διεπιστημονικής βελτιστοποίησης, παρουσιάζοντας πώς διαφορετικοί τύποι σύζευξης κάμψης και συστροφής του υλικού, μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση των ακραίων φορτίων και τα φορτίων κόπωσης των πτερυγίων.

Η ενοποίηση μεθόδων παθητικού και του ενεργητικού ελέγχου των φορτίων μελετάται χρησιμοποιώντας έναν κυκλικό ελεγκτή της γωνίας βήματος (cyclic pitch controller), ο οποίος διαθέτει δύο διαφορετικά σύνολα κερδών: το πρώτο έχει χαμηλότερα κέρδη και μέτριο κύκλο λειτουργίας του ενεργοποιητή, ενώ το δεύτερο έχει υψηλότερα κέρδη και πιο επιθετική συμπεριφορά. Κατέληξαν τελικά στο συμπέρασμα ότι ο συνδυασμός παθητικών και ενεργητικών μεθόδων ελέγχου, οδηγεί σε υψηλότερες μειώσεις των φορτίων από ότι θα μπορούσε να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ξεχωριστά μόνο μία από τις δύο κατηγορίες.

Αυτή η βιβλιογραφική ανασκόπηση στόχο έχει να επισημάνει τα ευεργετικά αποτελέσματα της χρήσης τεχνικών παθητικού ελέγχου φορτίων σε πτερύγια ανεμογεννητριών, που έχουν ήδη αποδειχθεί σε μεγάλο βαθμό χρησιμοποιώντας διάφορα αριθμητικά εργαλεία και πειραματικά δεδομένα. Ωστόσο, το ποσό των πόρων που δαπανήθηκε από ερευνητές και μηχανικούς τις τελευταίες τρεις δεκαετίες σχετικά με το ζήτημα του παθητικού ελέγχου των φορτίων, υποδηλώνει ένα σημαντικό πράγμα: ο σχεδιασμός των σύγχρονων πτερυγίων ανεμογεννητριών είναι ένα εξαιρετικά περίπλοκο πρόβλημα, το οποίο μπορεί να προσεγγιστεί από πολλές διαφορετικές οπτικές. Ένα τόσο περίπλοκο πρόβλημα δεν έχει μια μοναδική λύση και σχεδόν 30 χρόνια αφοσιωμένης προσπάθειας μπορεί να μην είναι αρκετό.

## 4. Η Εφαρμογή του Παθητικού Ελέγχου Φορτίων στο Σχεδιασμό Πτερυγίων Ανεμογεννητριών

Η θεωρία πίσω από τη μοντελοποίηση λεπτότοιχων κυβωτισοειδών δοκών μεγάλου μήκους, κατασκευασμένες από πολλές στρώσεις σύνθετων υλικών (πολύστρωτες πλάκες) με σύζευξη κάμψης-συστροφής, αναπτύχθηκε για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '70 [11].

Γιατί λοιπόν η εφαρμογή του παθητικού ελέγχου φορτίων σε πτερύγια ανεμογεννητριών εξακολουθεί να είναι σχετική;

Το πρόβλημα είναι σέρβο-αέρο-ελαστικό, καθώς η ανεμογεννήτρια πρέπει να ρυθμίζεται με χρήση ελεγκτών ενώ εκτίθεται σε συνθήκες στοχαστικής, τυρβώδους εισερχόμενης ροής ανέμου (φορτίσεις) καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας της. Για τη σωστή καταγραφή όλων των επιπτώσεων έκθεσης σε μια τυρβώδη ροή αέρα και για πολλές διαφορετικές καταστάσεις που δύναται να αντιμετωπίσει η ανεμογεννήτρια αφότου εγκατασταθεί (εκκίνηση, τερματισμός λειτουργίας, σφάλματα ελεγκτή, συνθήκες καταιγίδας κ.λπ.), τα διεθνή πρότυπα σχεδιασμού απαιτούν χιλιάδες ώρες προσομοίωσης [60, 61].

Έτσι λοιπόν γίνεται κατανοητό ότι για την ακριβή προσομοίωση της σέρβο-αέρο-ελαστικής συμπεριφοράς ανεμογεννητριών για το σχεδιασμό των δρομέων, οι οποίοι αποτελούνται από εξαιρετικά εύκαμπτα πτερύγια, κατασκευασμένα από πολύστρωτες πλάκες σύνθετων υλικών, απαιτείται υψηλή υπολογιστική προσπάθεια. Αυτή η υπολογιστική προσπάθεια μπορεί να είναι ανέφικτη για έναν σχεδιαστή μηχανικό, καθώς απαιτεί τη λύση ενός ισχυρά μη γραμμικού προβλήματος σε χιλιάδες συνθήκες φόρτισης.

Για να μειωθεί ο χρόνος που δαπανάται για την εκτέλεση πολλών και συνάμα “ακριβών” υπολογισμών, απαιτείται η χρήση απλούστερων υπολογιστικών σέρβο-αέρο-ελαστικών μοντέλων.

Γενικά τα διαθέσιμα σέρβο-αέρο-ελαστικά πρότυπα χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο πολλαπλά στοιχεία βασισμένα στη θεωρία δοκού κατά Timoshenko [62, 63], ικανά να υπόκεινται μεγάλες μετατοπίσεις και στροφές με ικανοποιητική ακρίβεια [64, 65].

Πρέπει να επισημάνουμε ότι αυτό που διατήρησε ζωντανή την έρευνα γύρω από τον παθητικό έλεγχο φορτίων σε πτερύγια ανεμογεννητριών, είναι η κατά βάση αστείρευτη βελτίωση αυτών των σέρβο-αέρο-ελαστικών εργαλείων, που μπορούν να μοντελοποιήσουν τέτοιες εξελιγμένες κατασκευές με σχετικά υψηλή ακρίβεια και με ιδιαίτερα χαμηλό υπολογιστικό κόστος.

Η κοινότητα της αιολικής ενέργειας, έχει καταβάλλει κάθε δυνατή προσπάθεια να συμπεριλάβει αυτές τις στρατηγικές ελέγχου ως κοινό χαρακτηριστικό σχεδιασμού στις

πτέρυγες των σύγχρονων ανεμογεννητριών. Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα σέρβο-αέρο-ελαστικά εργαλεία έχουν αναβαθμιστεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να μπορούν πλέον να συμπεριλάβουν σωστά από την αρχική κιάλας φάση του σχεδιασμού μιας πτέρυγας, όλες τις απαραίτητες δομικές συζεύξεις. Επιπλέον, σε σύγκριση με πριν από 30 χρόνια, πολλές περισσότερες εταιρείες και ακαδημαϊκά ιδρύματα έχουν πρόσβαση σε συμπλέγματα υπολογιστών υψηλών επιδόσεων (HPCC). Η δυνατότητα χρήσης υψηλών επιδόσεων υπολογιστών διευκόλυνε τη διαδικασία σχεδιασμού των πτερυγίων, επειδή οι πολλές μη γραμμικές προσομοιώσεις που απαιτούνται από τα πρότυπα σχεδιασμού μπορούν να εκτελεστούν σε “λογικό” υπολογιστικό χρόνο.

#### 4.1. Το σέρβο-αέρο-ελαστικό πλαίσιο

Το σέρβο-αέρο-ελαστικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της εφαρμογής των μεθόδων παθητικού ελέγχου φορτίων σε πτερύγια ανεμογεννητριών είναι ο κώδικας hGAST που αναπτύχθηκε από το Ε.Μ.Π [66, 67]. Ο κώδικας αυτός απαρτίζεται από τρία επι μέρους πλαίσια που είναι το αεροδυναμικό, το ελαστο-δυναμικό και του αυτόματου ελέγχου, τα οποία στη συνέχεια συντίθενται επιβάλλοντας κατάλληλη μη-γραμμική σύζευξη στα σημεία αλληλεπίδρασης τους.

Γενικά το hGAST αποτελεί έναν ύδρο-σέρβο-αέρο-ελαστικό κώδικα προσομοίωσης, που προορίζεται για τον υπολογισμό της απόκρισης υπεράκτιων ανεμογεννητριών, πραγματοποιώντας μη-γραμμικούς υπολογισμούς στο πεδίο του χρόνου καθώς και ιδιοδιανυσματική ανάλυση και ανάλυση ευστάθειας στη βάση συνεπούς διαδικασίας γραμμικοποίησης. Στη συνέχεια και για λόγους πληρότητας αναφέρουμε μια γενική περιγραφή των μοντέλων που αποτελούν τον κώδικα για την αποσαφήνιση της ικανότητας ανάλυσης που παρέχεται.

Τα αεροδυναμικά φορτία υπολογίζονται είτε με τη μέθοδο του δίσκου ορμής, είτε με τη λεπτομερέστερη μέθοδο των στοιχείων στροβιλότητας με ελεύθερο ομόρρου (BEMT).

Οι κύριες διαφορές των δυο αυτών θεωριών εμφανίζονται σε συνθήκες ασύμμετρης εισερχόμενης ροής, όπου διαπιστώνεται ότι η θεωρία του δίσκου ορμής βρίσκεται από την ασφαλή πλευρά (πιο συντηρητική), όσον αφορά τον υπολογισμό των φορτίων κόπωσης.

Το ελαστο-δυναμικό πρότυπο βασίζεται στη σύνθεση πολλών σωμάτων [12]. Κάθε διακριτό ελαστικό τμήμα της προσομοιούμενης ανεμογεννήτριας ή μέρος αυτής μοντελοποιείται με βάση τη θεωρία δοκού Timoshenko και επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το hGAST μπορεί και μοντελοποιεί τις γεωμετρικές μη-γραμμικότητες εξαιτίας των μεγάλων παραμορφώσεων του πτερυγίου, συγκρίνοντας ένα τυπικό, πρώτης τάξης μοντέλο δοκού με ένα δεύτερης τάξης μοντέλο δοκού και ένα βασισμένο στην υποδιαίρεση των πτερυγίων σε “υποσώματα” (sub-bodies), όπου τα δύο τελευταία διαχειρίζονται τις γεωμετρικές μη-γραμμικότητες.



Συμπεραίνεται πως το γραμμικό μοντέλο δοκού παραμένει αξιόπιστο με μοναδική εξαίρεση την πρόβλεψη της στρέψης του πτερυγίου. Η κύρια αιτία διαφοροποίησης μεταξύ του γραμμικού (πρώτης τάξης) μοντέλου και των δύο ανώτερης τάξης μοντέλων είναι το μη-γραμμικό φαινόμενο της σύζευξης μεταξύ κάμψης και συστροφής που δεν λαμβάνεται υπόψη στο πρώτης τάξης μοντέλο δοκού.

#### **4.1.1 Περιγραφή των φορτίων σχεδιασμού**

Η υπο διερεύνηση ανεμογεννήτρια αναφοράς προορίζεται για υπεράκτια εγκατάσταση και ως εκ τούτου έχει σχεδιαστεί με βάση την κατηγορία ανέμων 1A, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-1 Ed.3 [68]. Το πρότυπο αυτό περιγράφει διάφορες περιπτώσεις φορτίσεων, σύμφωνα με τις οποίες θα πρέπει να επαληθεύτε ο σχεδιασμός της ανεμογεννήτριας, ώστε τελικά να αντέχει σε όλες εκείνες τις καταστάσεις φορτίσεων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της (20 χρόνια).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάστηκε μόνο η γενική περίπτωση σχεδιασμού DLC1.3, κατά την οποία η μηχανή λειτουργεί κανονικά και χωρίς σφάλματα για ταχύτητες ανέμου σε όλο το εύρος λειτουργίας, ενσωματώνοντας όμως όλες εκείνες τις απαιτήσεις της ακραίας τυρβώδους ροής (ETM).

Λοιπές περιπτώσεις σχεδιασμού που εμπλέκουν τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου (π.χ. DLC1.4, DLC2.2, DLC3.1, DLC3.2, DLC3.3), μεταφορά, συναρμολόγηση ως και συντήρηση (π.χ. DLC8.1) δεν εξετάζονται στο πλαίσιο της παρούσας.

#### **4.1.2 Η ανεμογεννήτρια αναφοράς**

Η υπο εξέταση ανεμογεννήτρια αναφοράς που είναι μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια, αποτελεί μέρος του μεγάλου Ευρωπαϊκού προγράμματος INNWIND, είχε ονομαστική ισχύ 10MW και σχεδιάστηκε για υπεράκτια τοποθέτηση σε περιοχές όπου η ένταση των ανέμων είναι κατηγορίας 1A.

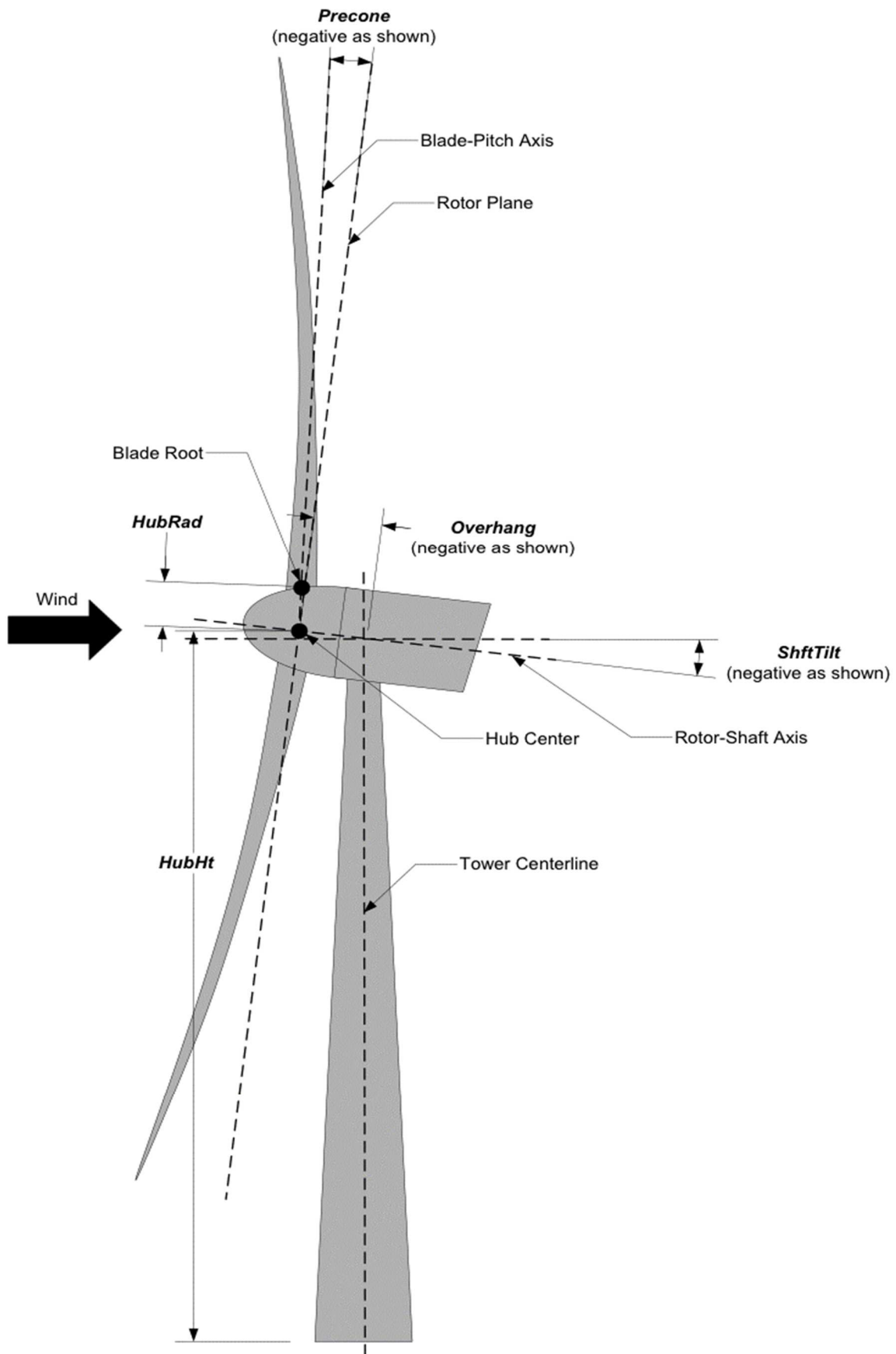
Να σημειωθεί ότι οι ανεμογεννήτριες αναφοράς αποτελούν ανοιχτά σημεία αναφοράς, που επιτρέπουν τη συνεργασία μεταξύ βιομηχανικού και ερευνητικού τομέα. Επιπλέον, μέσω της χρήσης τους, η βιομηχανία μπορεί να προστατεύσει την πνευματική της ιδιοκτησία, εξακολουθώντας να διερευνά την ανάπτυξη προηγμένης τεχνολογίας με τρίτους. Επιπρόσθετα, οι ανεμογεννήτριες αναφοράς προσφέρουν και ένα σημείο εισόδου στους νεοεισερχόμενους στο πεδίο της αιολικής ενέργειας, δίνοντας τους τη δυνατότητα να κατανοήσουν τα βασικά στοιχεία σχεδίασης και τις ανταλλαγές συστημάτων.

Στον **Πίνακα 4.1**, που ακολουθεί, συνοψίζονται τα βασικών λειτουργικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών της εν λόγω ανεμογεννήτριας αναφοράς:

Περιγραφή	Τιμή
Rated Power	10 MW
Wind Regime	IEC Class 1A
Rotor Orientation	Clockwise rotation - Upwind
Number of Blades	3
Control	Variable Speed, Collective Pitch
Drivetrain	Medium Speed, Multiple-Stage Gearbox
Gearbox Ratio	50
Rotor Diameter	178,3 m
Airfoil series	FFA-W3
Hub Diameter	5,6 m
Hub Height	119,0 m
Cut in Wind Speed	4,0 m/s
Rated Wind Speed	11,4 m/s
Cut out Wind Speed	25,0 m/s
Minimum Rotor Speed	6,0 RPM
Maximum Rotor Speed	9,6 RPM
Maximum Tip Speed	90 m/s
Hub Overhang	7,07 m
Shaft Tilt Angle	5,0°
Rotor Pre-cone Angle	2,5°
Blade Pre-bend	3,0 m
Rotor Mass	229.000 Kg (each blade ~41.000 Kg)
Nacelle Mass	446.000 Kg
Tower Mass	605.000 Kg

**Πίνακας 4.1.** – Βασικά στοιχεία σχεδιασμού Α/Γ αναφοράς (datasheet).

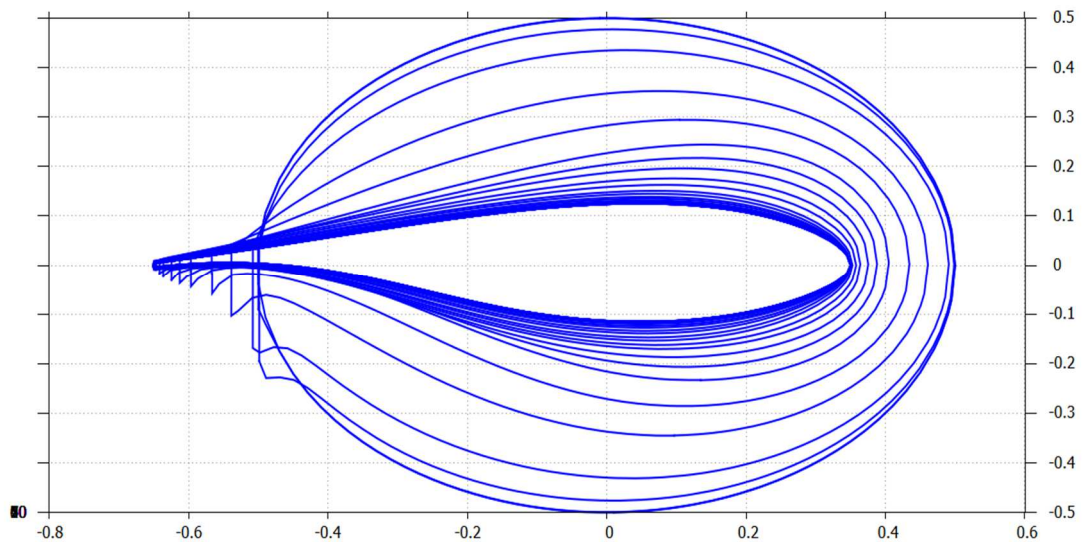
Για την καλύτερη κατανόηση των βασικών αυτών χαρακτηριστικών της υπο εξέταση ανεμογεννήτριας αναφοράς, η **Εικόνα 4.1.** που ακολουθεί, παρέχει την οπτική περιγραφή τους.



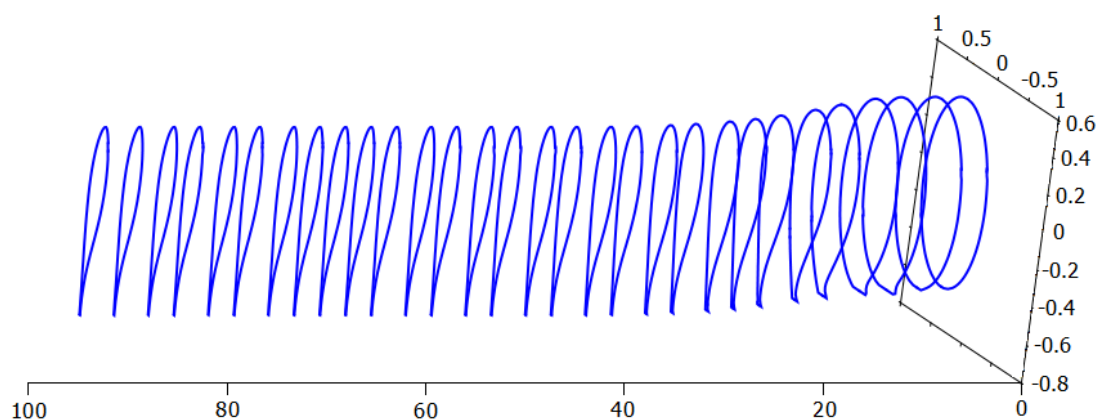
Εικόνα 4.1. – Βασικά γεωμετρικά στοιχεία Α/Γ αναφοράς.

### 4.1.3 Η γεωμετρία των πτερυγίων

Το τρισδιάστατο σχήμα του πτερυγίου αναφοράς παραμετροποιήθηκε με τη χρήση των συντεταγμένων  $x, z$ , των σημείων ελέγχου (control points), σε συνολικά 30 εγκάρσιες διατομές κατά μήκος  $y$ , από τα 2,8 m έως 89,2 m, όπως παρουσιάζεται και από τις **Εικόνες 4.2.** και **4.3.**



**Εικόνα 4.2.** – Εγκάρσιες διατομές πτερυγίου αναφοράς.



**Εικόνα 4.3.** – Εγκάρσιες διατομές κατά μήκος του πτερυγίου αναφοράς.

## 4.2. Δομικός σχεδιασμός πτερυγίων

Ο σχεδιασμός των πτερυγίων, δρομέων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα αποτελείται από κλειστές κοίλου προφίλ πολυκυψελικές διατομές. Προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή και η δυσκαμψία τέτοιων διατομών, τα shear webs κολλούνται με το άνω και κάτω τμήμα του κελύφους, εσωτερικά της πτέρυγας. Τα spar caps και τα shear webs είναι αυτά που φέρουν όλο το διατμητικό φορτίο και ένα μέρος των καμπτικών φορτίων. Επιπλέον, τα shear webs συγκρατούν τη διατομή έναντι εγκάρσιας παραμόρφωσης, ενώ τα spar caps έναντι του λυγισμού. Τα shear webs σε συνδυασμό με τα spar caps σχηματίζουν μια κιβωτοειδή διατομή, η οποία ενεργεί ως δομή μεταφοράς των φορτίων του πτερυγίου.

Δομές τύπου sandwich χρησιμοποιούνται συχνά σε τέτοιου είδους κατασκευές όπου το βάρος και η δυσκαμψία των στοιχείων αποτελούν κύριες παραμέτρους. Δομές τύπου sandwich χρησιμοποιούνται κυρίως στα shear webs, στα trailing edge panels και στα leading edge panels [69, 70]. Μια δομή τύπου sandwich αποτελείται από τον πυρήνα που είναι κατασκευασμένος συνήθως από ελαφρύ υλικό (ξύλο balsa) και τα επιστρώματα που είναι κατασκευασμένα από πολύστρωτες πλάκες ινώδων σύνθετων υλικών. Προορισμός του πυρήνα είναι να παραλαμβάνει εγκάρσια διατμητικά φορτία και να απομακρύνει τα επιστρώματα από το μέσο επίπεδο της πλάκας έτσι ώστε να παραλαμβάνουν μεγαλύτερα καμπτικά φορτία κατ' αναλογία με την φιλοσοφία της δοκού διατομής I.

Γενικά, η γεωμετρία του πτερυγίου απαρτίζεται από ένα μείγμα μεταξύ διαφόρων δομικών παραμέτρων και αεροδυναμικών ιδιοτήτων. Τα προφίλ των διατομών του πτερυγίου αποτελούνται συνήθως από ένα ενισχυμένο κυκλικό τμήμα στην περιοχή της ρίζας, ικανό για να αντέχει τα υψηλά φορτία. Απομακρυνόμενοι από τη ρίζα παρατηρούμε ότι τα προφίλ των διατομών γίνονται λεπτότερα, εξαιτίας του γεγονότος ότι τα φορτία είναι σαφώς μικρότερα και το αεροδυναμικό σχήμα κατέχει πλέον ιδιαίτερη σημασία.

Κάθε πολύστρωτη πλάκα καθορίζεται με βάση τον τρόπο διαδοχής των επιμέρους στρώσεων (stacking sequence) που την αποτελούν. Οι διάφορες στρώσεις του ινώδους συνθέτου υλικού που αποτελούν την πλάκα είναι εν γένει διαφορετικού προσανατολισμού ινών. Στην παρούσα ενότητα, οι ελαστικές ιδιότητες των σύνθετων πολύστρωτων πλακών υπολογίζονται με βάση των ιδιοτήτων των επι μέρους συστατικών τους, χρησιμοποιώντας απλές εξισώσεις μικρο-μηχανικής και στοιχείων της γενικής θεωρίας λεπτότοιχων πλακών. Αυτή η προσέγγιση διευκολύνει τη γενικότερη διερεύνηση που έχει η επίδραση της χρήσης τέτοιων υλικών στη συμπεριφορά των σύγχρονων δρομέων. Εάν, για παράδειγμα, αλλάξει το μέτρο ελαστικότητας των ινών, αμέσως λαμβάνεται ένα νέο σύνολο ελαστικών ιδιοτήτων της πλάκας.

### 4.2.1. Ελαστικές ιδιότητες μονοαξονικής στρώσης

Δύο μονοαξονικές στρώσεις σύνθετου υλικού από εποξική μήτρα, ενισχυμένες με ίνες γυαλιού τύπου E, θεωρούνται ως τα βασικά δομικά στοιχεία που συντίθενται για τον

σχηματισμό της πολύστρωτης πλάκας. Οι δύο μονοαξονικές στρώσεις διαφέρουν ως προς την κατ' όγκο περιεκτικότητα τους σε ίνες. Οι ελαστικές ιδιότητες των στρώσεων προήλθαν με βάση τις τυπικές ιδιότητες των επιμέρους συστατικών υλικών, ινών, μήτρας και χρησιμοποιώντας απλές εξισώσεις μικρο-μηχανικής [71].

Το μέτρο ελαστικότητας της μονοαξονικής στρώσης του συνθέτου υλικού, κατά τη διεύθυνση των ινών θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_f V_f + E_m V_m \\ E_1 &= E_{f1} V_f + E_m (1 - V_f) \end{aligned} \quad (4.1)$$

όπου,

$V_f$  και  $V_m$  είναι οι κατ' όγκο περιεκτικότητες ίνας και μήτρας αντίστοιχα και  $E_f$  και  $E_m$  είναι μέτρα ελαστικότητας ίνας και μήτρας αντίστοιχα.

Το μέτρο ελαστικότητας της μονοαξονικής στρώσης του συνθέτου υλικού κατά την εγκάρσια διεύθυνση των ινών θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{E_{f2} E_m}{E_{f2} V_m + E_m V_f} \\ E_2 &= \frac{E_f E_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_{f2}}\right)} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Το μέτρο διάτμησης της μονοαξονικής στρώσης του συνθέτου υλικού, θα δίνεται από την εξίσωση:

$$G_{12} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_{f12}}\right)} \quad (4.3)$$

όπου,

$G_{f12}$  είναι το μέτρο διάτμησης των ινών και

$G_m$  είναι το μέτρο διάτμησης της μήτρας

Το κατά το πάχος μέτρο διάτμησης της μονοαξονικής στρώσης του συνθέτου υλικού, θα δίνεται από την εξίσωση:

$$G_{23} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{G_m}{G_{f23}}\right)} \quad (4.4)$$

Ο λόγος Poisson's της μονοαξονικής στρώσης του συνθέτου υλικού, θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\nu_{12} = \nu_{f12}V_f + \nu_m V_m \quad (4.5)$$

Ο κατά το πάχος λόγος Poisson's της μονοαξονικής στρώσης του συνθέτου υλικού, θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\nu_{23} = \frac{E_2}{2G_{23}} \quad (4.6)$$

Η πυκνότητα της μονοαξονικής στρώσης του συνθέτου υλικού, κατά τη διεύθυνση των ινών θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (4.7)$$

όπου,

$\rho_f$  είναι η πυκνότητα των ινών και

$\rho_m$  είναι η πυκνότητα της μήτρας

Τελειώνοντας, οι υπόλοιπες ελαστικές ιδιότητες της μονοαξονικής στρώσης του συνθέτου υλικού καθορίζονται από τις συνθήκες συμμετρίας:

$$E_2 = E_3 \quad (4.8)$$

$$G_{13} = G_{12} \quad (4.9)$$

$$\nu_{13} = \nu_{12} \quad (4.10)$$

Σύμφωνα με τις ανωτέρω εξισώσεις, περιγράψαμε πλήρως τις ελαστικές ιδιότητες μιας μονοαξονικής στρώσης σύνθετου υλικού.

Για λόγους πληρότητας παρατίθενται και οι σχέσεις που συνδέουν τις διαμήκειες με τις εγκάρσιες ελαστικές ιδιότητες ίνας και μήτρας:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (4.11)$$

$$G_{f12} = \frac{E_{f1}}{2(1 + \nu_{f12})} \quad (4.12)$$

$$G_{f23} = G_{f12} \quad (4.13)$$

Στους **Πίνακες 4.1.** και **4.2.** που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες της εποξειδικής μήτρας και των ινών γυαλιού τύπου E, αντίστοιχα.

Property	Uniax	
$\rho_m$	1140.000	$Kg/m^3$
$E_m$	4.000	$GPa$
$\nu_m$	0.350	-
$G_m$	1.482	$GPa$

**Πίνακας 4.1.** – Μηχανικές ιδιότητες εποξειδικής μήτρας [72].

Property	Uniax	
$\rho_f$	2550.000	$Kg/m^3$
$E_{f1}$	75.000	$GPa$
$E_{f2}$	75.000	$GPa$
$\nu_{f12}$	0.200	-
$G_{f12}$	31.250	$GPa$
$G_{f23}$	31.250	$GPa$

**Πίνακας 4.2.** – Μηχανικές ιδιότητες ινών γυαλιού τύπου E [72].

#### 4.2.2. Ελαστικές ιδιότητες πολύστρωτων πλακών

Όπως είδαμε προηγουμένως, οι συν επίπεδες (in-plane) ελαστικές ιδιότητες  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$  και  $\nu_{12}$  των διαφορετικού προσανατολισμού στρώσεων, απορρέουν από την κλασική θεωρία πλακών.



Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται οι μηχανικές ιδιότητες (ελαστική συμπεριφορά) πολύστρωτων πλακών οι οποίες αποτελούνται από στρώσεις ινωδών συνθέτων υλικών, διαφορετικού προσανατολισμού ινών, τέλεια συνδεδεμένων μεταξύ τους έτσι ώστε η πλάκα να συμπεριφέρεται τελικά ως μία ενιαία στρώση.

Στον **Πίνακα 4.3.** που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των πολύστρωτων αυτών πλακών από τις οποίες αποτελούνται τα διάφορα τμήματα του πτερυγίου.

Property	Uniax	Biax	Triax	Balsa	
$V_f$	0.55	0.50	0.50	-	-
$\rho$	1915.550	1845.000	1845.000	110.000	$Kg/m^3$
$E_{11}$	41.600	13.920	21.790	0.050	$GPa$
$E_{22}$	14.930	13.920	14.670	0.050	$GPa$
$E_{33}$	13.426	12.099	12.099	2.730	$GPa$
$\nu_{12}$	0.241	0.533	0.478	0.500	-
$\nu_{13}$	0.268	0.275	0.275	0.013	-
$\nu_{23}$	0.330	0.333	0.333	0.013	-
$G_{12}$	5.047	11.500	9.413	0.017	$GPa$
$G_{13}$	5.047	4.539	4.539	0.150	$GPa$
$G_{23}$	5.470	4.539	4.539	0.150	$GPa$

**Πίνακας 4.3.** – Μηχανικές ιδιότητες πολύστρωτων πλακών πτερυγίου αναφοράς [73, 74].

#### 4.2.3. Κριτήρια αστοχίας

Ο προσδιορισμός της αντοχής και η μελέτη συμπεριφοράς αστοχίας, ορθότροπου υλικού χρησιμοποιώντας μακροσκοπικά κριτήρια, στηρίζονται γενικά στις υποθέσεις του ομογενούς υλικού το οποίο συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά μέχρι την αστοχία. Τα κριτήρια αστοχίας μας παρέχουν τις απαραίτητες αναλυτικές σχέσεις για τον προσδιορισμό της αστοχίας σε συνθήκες σύνθετης καταπόνησης συναρτήσει των ιδιοτήτων αστοχίας του μέσου στις ανωτέρω απλές μονοαξονικές καταπονήσεις. Φυσικά υπάρχουν και άλλοι τρόποι προσέγγισης του προβλήματος πρόβλεψης της αστοχίας των υλικών, π.χ., με εφαρμογή μεθόδων της μηχανικής των θραύσεων που όμως δεν θα μας απασχολήσουν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας [75].

Τελική παράμετρος για την επιλογή μιας θεωρίας αστοχίας αποτελεί η συμφωνία των προβλέψεων της, με τα πειραματικά δεδομένα για το συγκεκριμένο υλικό το οποίο προτίθεται να χρησιμοποιήσει ο σχεδιαστής μηχανικός.

Για τη μελέτη αστοχίας της πολύστρωτης πλάκας από την οποία αποτελούνται τα spar caps, έχει εφαρμοστεί η προσέγγιση αστοχίας της πρώτης στρώσης (first-ply-failure), σύμφωνα με την οποία θεωρείται ότι η πολύστρωτη πλάκα αστοχεί μόλις αστοχήσει η πρώτη στρώση της, ακόμη και αν οι υπόλοιπες στρώσεις μπορούν να αντέξουν το επανειλημμένο φορτίο, αφότου συμβεί η αστοχία της πρώτης στρώσης [76]. Η μελέτη αστοχίας που περιγράφεται με αυτή την προσέγγιση, αποτελεί έναν αρκετά συντηρητικό τρόπο προσδιορισμού της αστοχίας.

Σε συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης, το τετραγωνικό κριτήριο αστοχίας των Tsai-Wu, ως προς το σύστημα συμμετρίας του μέσου απλοποιούμενο σημαντικά γράφεται ως εξής:

$$I_F \mathbf{w}_u = F_1 \sigma_{11} + F_2 \sigma_{22} + F_{11} \sigma_{11}^2 + F_{22} \sigma_{22}^2 + 2F_{12} \sigma_{11} \sigma_{22} + F_{66} \sigma_{12}^2 < 1.0 \quad (4.14)$$

Οι συντελεστές του κριτηρίου δίνονται:

$$F_1 = \frac{1}{X_T} + \frac{1}{X_C}$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_T} + \frac{1}{Y_C}$$

$$F_{11} = -\frac{1}{X_T \cdot X_C}$$

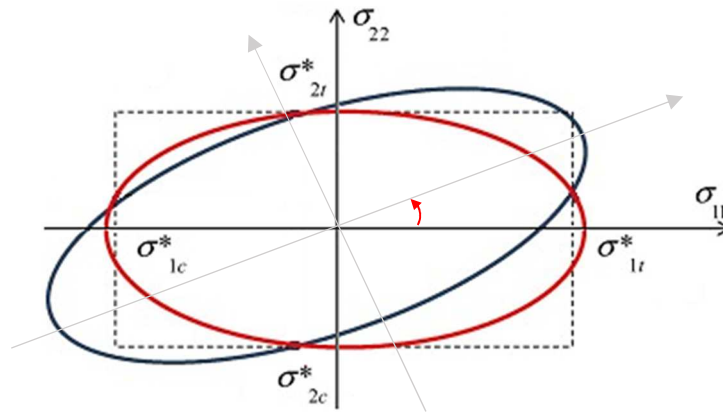
$$F_{22} = -\frac{1}{Y_T \cdot Y_C}$$

$$F_{66} = \frac{1}{S^2}$$

$$F_{12} = f^* \sqrt{F_{11} F_{22}}$$

Όπου  $f^*$  είναι μια βαθμωτή ποσότητα, η τιμή της οποίας κυμαίνεται  $-1.0 \leq f^* \leq 1.0$ .

Θέτοντας τη τιμή του  $f^* = 0$  εξαλείφεται οποιαδήποτε αλληλεπίδραση μεταξύ των ορθών τάσεων στις δυο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Η βαθμωτή ποσότητα  $f^*$  επηρεάζει σημαντικά την επιφάνεια του τόπου αστοχίας του κριτηρίου, σε τέτοιο βαθμό μάλιστα ώστε να αποτελεί παράμετρο για την προσαρμογή της καμπύλης.



**Εικόνα 4.4.** – Απεικόνιση τόπου αστοχίας του κριτηρίου Tsai-Wu.

Έτσι λοιπόν θέτοντας τη ποσότητα  $f^* = 0.45$ , το ελλειψοειδές θα περιστραφεί αριστερόστροφα, γύρω από τους  $\tau_{12}$  άξονες. Όπως περιγράφεται και από την **Εικόνα 4.4.** η παράμετρος  $F_{12}$  αποτελεί μια πολύ ευαίσθητη, κρίσιμη ποσότητα που επηρεάζει σημαντικά το κριτήριο αστοχίας και ως τέτοια θα πρέπει να μεταχειρίζεται με ιδιαίτερη προσοχή [77].

Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι γενικά το κριτήριο αστοχίας Tsai-Wu που περιγράφεται από τη σχέση (4.14), θα μπορούσε να εκφρασθεί και συναρτήσει των συνιστωσών του "επιπέδου" διανύσματος παραμόρφωσης, εφ' όσον έχουμε ήδη κάνει την υπόθεση ότι τα ινώδη σύνθετα υλικά ψαθυρής πολυμερικής μήτρας παραμένουν γραμμικώς ελαστικά μέχρι τη πλήρη αστοχία τους. Ο λόγος που επιζητείται κάτι τέτοιο είναι ότι βάσει της κλασικής θεωρίας των πολύστρωτων πλακών, οι παραμορφώσεις θεωρούνται σταθερές ή γραμμικά μεταβαλλόμενες στις διάφορες στρώσεις κατά το πάχος της πλάκας και έτσι είναι σχετικά εύκολο να προσδιορισθεί η παραμόρφωση της κάθε στρώσης και να χρησιμοποιηθεί έτσι το κριτήριο αστοχίας, άμεσα στον χώρο των παραμορφώσεων.

### **4.3. Πλαίσιο του πολύ-επιστημονικού σχεδιασμού και βελτιστοποίησης (Multidisciplinary Design and Optimization Framework)**

Μέσα από μια σειρά παραμετρικών μελετών, έχει πλέον επιβεβαιωθεί ότι ο σχεδιασμός πτερυγίων που ενσωματώνουν στρατηγικές παθητικού ελέγχου των φορτίων, είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, που απαιτεί βαθιά κατανόηση των εμπλεκόμενων κλάδων. Ο πολυ-επιστημονικός χαρακτήρας του σχεδιασμού των πτερυγίων αποτελεί πρόκληση από το πρώτο κιόλας στάδιο της διαδικασίας, καθώς αναγκάζει τον σχεδιαστή μηχανικό να ικανοποιεί ταυτόχρονα πολλούς περιορισμούς, ενώ αξιολογεί και αντισταθμίζει διάφορους αντικρουόμενους στόχους. Σε αυτή τη φάση του σχεδιασμού και της ανάπτυξης των πτερυγίων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ειδικά μοντέλα βελτιστοποίησης. Οι παράμετροι σχεδιασμού μπορούν να είναι πολλές και γενικά αναφέρονται σε διαφορετικά επιμέρους στοιχεία και λειτουργικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας.

Εάν το επίκεντρο της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι αποκλειστικά ο δρομέας των ανεμογεννητριών, τότε μεταβλητές σχεδιασμού δύναται να αποτελούν η εσωτερική δομή, τα υλικά κατασκευής και οι ιδιότητες αυτών, το βάρος και το εξωτερικό σχήμα των πτερυγίων.

Το πλαίσιο μιας σέρβο-αερο-ελαστικής διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι πολύπλοκο και απαιτεί ένα σύνθετο σύνολο υπολογιστικών εργαλείων διασύνδεσης που χαρακτηρίζεται γενικά από δαπανηρές υπολογιστικά διαδικασίες. Συγκεκριμένα, η ανάγκη εκτέλεσης ενός μεγάλου αριθμού μη γραμμικών σέρβο-αερο-ελαστικών προσομοιώσεων αποτελεί πρακτικό ζήτημα για την επιτυχή εκτέλεση μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης [78].

Αυτή η πρόκληση αντιμετωπίστηκε με την ανάπτυξη μιας διαδικασίας πολλαπλών σταδίων που εναλλάσσεται μεταξύ ενός καθαρά αεροδυναμικού βρόχου βελτιστοποίησης, και ενός βρόχου δομικού σχεδιασμού, ώστε να επιτευχθεί τελικά η βέλτιστη λύση απο τον συνδυασμό των δύο [16].

Παρά το γεγονός ότι τα διαθέσιμα πλαίσια βελτιστοποίησης είναι αρκετά εξελιγμένα και παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα, δεν υπάρχει καμία προηγούμενη εργασία, κατά την οποία ο παθητικός έλεγχος των φορτίων να έχει χρησιμοποιηθεί ως μεταβλητή εντός μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η έννοια του σχεδιασμού πτερυγίων ανεμογεννητριών που να ενσωματώνουν στρατηγικές παθητικού ελέγχου των φορτίων έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν [15], στη μοντελοποίηση πτερυγίων των οποίων η αναπτυσσόμενη φόρτιση μετριοζόταν μέσω της δημιουργίας σύζευξης μεταξύ κάμψης και συστροφής (προσαρμόζοντας κατάλληλα τη γωνία προσανατολισμού των ινών των στρώσεων της σύνθετης πλάκας), αλλά ποτέ δεν είχε χρησιμοποιηθεί ως μεταβλητή στο πλαίσιο μια διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Γενικά η έννοια της πολύ-επιστημονικής βελτιστοποίησης του σχεδιασμού (MDO) προέκυψε από την ανάγκη προσομοίωσης και σχεδιασμού σύνθετων μηχανολογικών συστημάτων που εμπλέκουν πολλούς και διαφορετικούς κλάδους. Ένα πλαίσιο πολύ-επιστημονικής βελτιστοποίησης εξυπηρετεί αυτήν την ανάγκη με δύο τρόπους: Πρώτον, εκτελεί την προσομοίωση του μηχανολογικού συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις

διεπιστημονικές αλληλεπιδράσεις και δεύτερον, εκτελεί την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση όλων των μεταβλητών σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη τη σύζευξη και τους συμβιβασμούς που επιβάλλουν οι διάφορες διεπιστημονικές αλληλεπιδράσεις.

#### 4.3.1. Βελτιστοποιητής

Η διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολουθείται στο πλαίσιο της παρούσας εργασία, γίνεται με χρήση της πλατφόρμας OpenMDAO που αναπτύχθηκε και χρηματοδοτήθηκε από το ερευνητικό κέντρο Glenn της NASA κατά την περίοδο του 2008 [79, 80, 81, 82].

Το OpenMDAO είναι μια ανοικτή, υπολογιστική πλατφόρμα υψηλών επιδόσεων που χρησιμοποιείται για ανάλυση και πολύ-επιστημονική βελτιστοποίηση σύνθετων συστημάτων και είναι γραμμένη σε γλώσσα προγραμματισμού Python. Το έργο ανάπτυξης του OpenMDAO επικεντρώνεται κυρίως στην υποστήριξη διαδικασιών βελτιστοποίησης βασισμένες στην κλίση (gradient-based optimization) με αναλυτικές παραγώγους, πράγμα που επιτρέπει στο σχεδιαστή μηχανικό την ανάλυση εξαιρετικά σύνθετων μηχανολογικών συστημάτων με εκατοντάδες ή/και χιλιάδες μεταβλητές σχεδιασμού. Παρόλα αυτά το OpenMDAO διαθέτει και μια σειρά από παράλληλες υπολογιστικές δυνατότητες που μπορούν να υποστηρίξουν διαδικασίες βελτιστοποίησης μη βασισμένες στην κλίση (gradient-free optimization), μικτού-ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (mixed-integer nonlinear programming) κλπ.

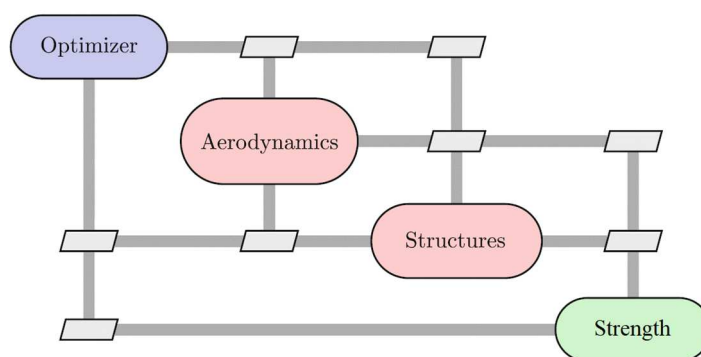
Το πλαίσιο OpenMDAO έχει σχεδιαστεί στο να εξυπηρετεί τη σύνδεση μεταξύ ξεχωριστών τμημάτων λογισμικού με σκοπό την επίτευξη συνδυασμένων αναλύσεων, επιτρέποντας έτσι στους χρήστες να συνδυάζουν εργαλεία ανάλυσης από διάφορους κλάδους, σε πολλά επίπεδα πιστότητας και να διαχειρίζονται την αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Το OpenMDAO έχει σχεδιαστεί ειδικά για τη διαχείριση της ροής δεδομένων (πραγματικά δεδομένα) και της ροής εργασίας (σε ποιον κώδικα εκτελείται όταν) σε συνδυασμό με αλγόριθμους βελτιστοποίησης και άλλες προηγμένες τεχνικές επίλυσης [83]. Επίσης παρέχει τη δυνατότητα διασύνδεσης με το PyOpt, βιβλιοθήκη για διάφορους αλγόριθμους βελτιστοποίησης [84].

Γενικά η πλατφόρμα OpenMDAO έχει χρησιμοποιηθεί για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων σχεδιασμού σε ανεμογεννήτριες [85, 86, 87, 88], δορυφόρους [89], πτέρυγες αεροσκαφών [90, 91, 92] ως και κινητήρες αεροσκαφών [93, 94].

Κατά τη φάση της διαδικασίας βελτιστοποίησης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αναφοράς, που λαμβάνει χώρας στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, έχει επιλεγεί ο μη βασισμένος στην κλίση (gradient-free optimization) βελτιστοποιητής προγραμματισμού COBYLA, με ικανότητα υποστήριξης ανισοτικών περιορισμών [95]. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του βελτιστοποιητή COBYLA είναι ότι διαθέτει καλύτερη ικανότητα αναζήτησης τιμών στο πεδίο ορισμού του προβλήματος, διασφαλίζοντας ότι η λύση δεν θα πέσει σε τοπικά ελάχιστα (ακρότατες τιμές).

Στην **Εικόνα 4.5.** που ακολουθεί παρέχεται μια οπτική απεικόνιση της γενικής ροής εργασιών χρησιμοποιώντας τη λεγόμενη “εκτατική μήτρα δομής σχεδιασμού” (Extended Design Structure Matrix ή XD<sub>SM</sub>) [96, 97] και στην οποία επισημαίνονται οι συνδέσεις μεταξύ των διαφόρων υπολογιστικών εργαλείων.

Ο βελτιστοποιητής επιλέγει μεταβλητές (γωνία προσανατολισμού των ινών, συντελεστής μάζας) με βάση μια συνάρτηση που εκφράζει το αδιαστατοποιημένο εμβαδό που περικλείεται κάτω από την καμπύλη του διαγράμματος αντοχής Tsai-Wu και η οποία υπόκειται σε περιορισμούς που ελέγχονται από τον αερο-ελαστικό επιλύτη, σε κάθε επανάληψη και για κάθε διατομή του πτερυγίου.



**Εικόνα 4.5.** – Γενική απεικόνιση του πλαισίου βελτιστοποίησης (XD<sub>SM</sub>).

Το πλαίσιο της πολύ-επιστημονικής βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του πτερυγίου αναφοράς που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο και περιγράφεται στην **Εικόνα 4.5.** είναι χτισμένο σαν Μονολιθική Αρχιτεκτονική. Ο αέρο-ελαστικός κώδικας συνδέεται με το βελτιστοποιητή σαν ένα μαύρο κουτί, για την αποφυγή οποιασδήποτε περίπλοκης εργασίας παρέμβασης στον πηγαίο κώδικα του και την απαίτηση προσαρμογής του σε πιο πολύπλοκες αρχιτεκτονικές πολύ-επιστημονικής βελτιστοποίησης.

## 5. Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνάται η δυνατότητα μείωσης της μάζας του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας αναφοράς 10MW DTU μέσω της δημιουργίας σύζευξης κάμψης-συστροφής του υλικού (BTC). Για να επιτευχθεί αυτό εισάγουμε μια γωνία προσανατολισμού των ινών των στρώσεων του μονο-αξονικού υλικού των spar caps του πτερυγίου.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός του πτερυγίου επιτυγχάνονται μέσω ενός ολοκληρωμένου πλαισίου βελτιστοποίησης που συνδυάζει έναν αερο-ελαστικό επιλύτη για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων δομικών φορτίων του πτερυγίου και ενός εργαλείου ανάλυσης των εγκάρσιων διατομών, που παρέχει τις δομικές ιδιότητες του τύπου του πτερυγίου και τις κατανομές των τάσεων. Ο τελικός σχεδιασμός επαληθεύεται με βάση ένα υποσύνολο των φορτίων σχεδιασμού σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-1.

Κατά την αρχική διερεύνηση του αερο-ελαστικού προβλήματος του πτερυγίου αναφοράς ( $\rho_{ly} = 0^\circ$ ), έγινε προσομοίωση της ανεμογεννήτριας για τη περίπτωση της κανονικής και χωρίς σφάλματα λειτουργίας (περίπτωση σχεδιασμού DLC1.3), σε όλο το εύρος ταχυτήτων ανέμου.

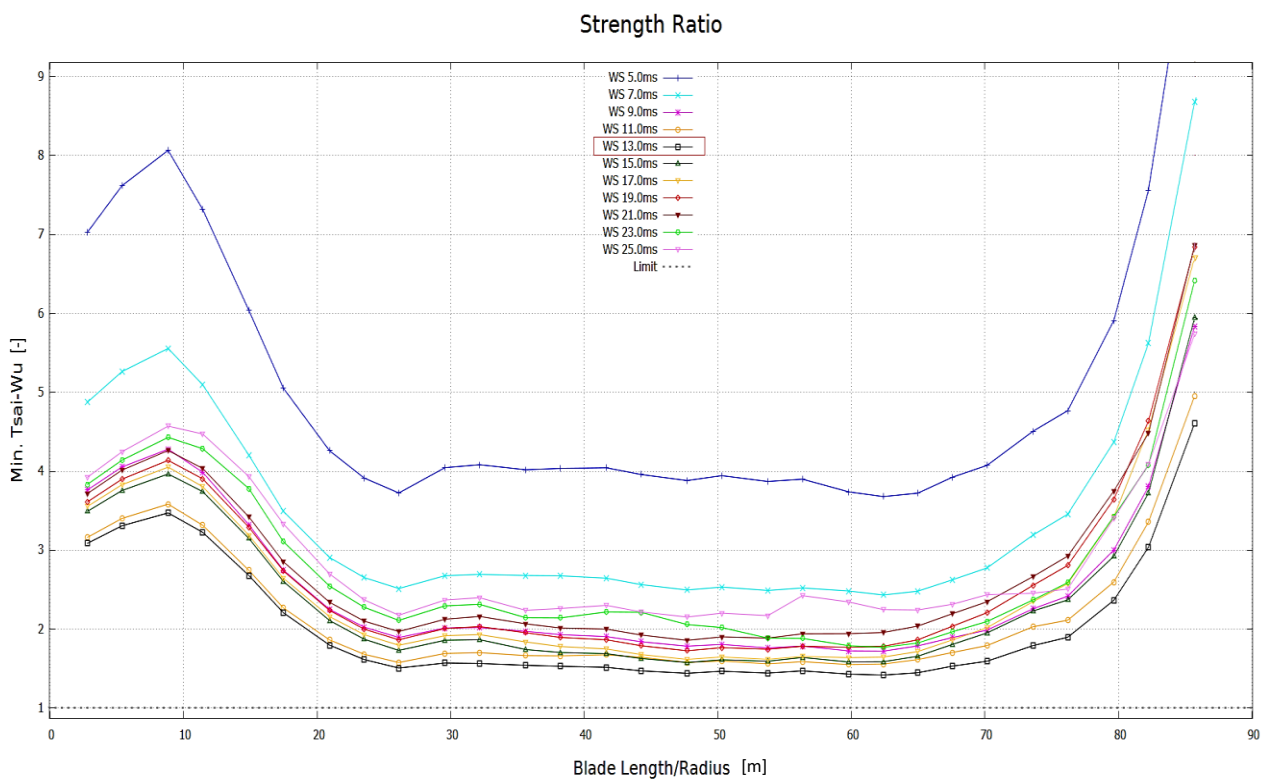
Να σημειωθεί ότι η σε αυτή την αρχική φάση διερεύνησης, η διαμόρφωση της ανεμογεννήτρια αναφοράς δεν χρησιμοποιεί κάποια παθητική ή/και ενεργητική μέθοδο ελέγχου για τον περιορισμό των φορτίων.

Τα αποτελέσματα αυτού του προκαταρκτικού ελέγχου παρουσιάζονται συνολικά, για κάθε μια ταχύτητα ανέμου, στο **Διάγραμμα 5.1**.

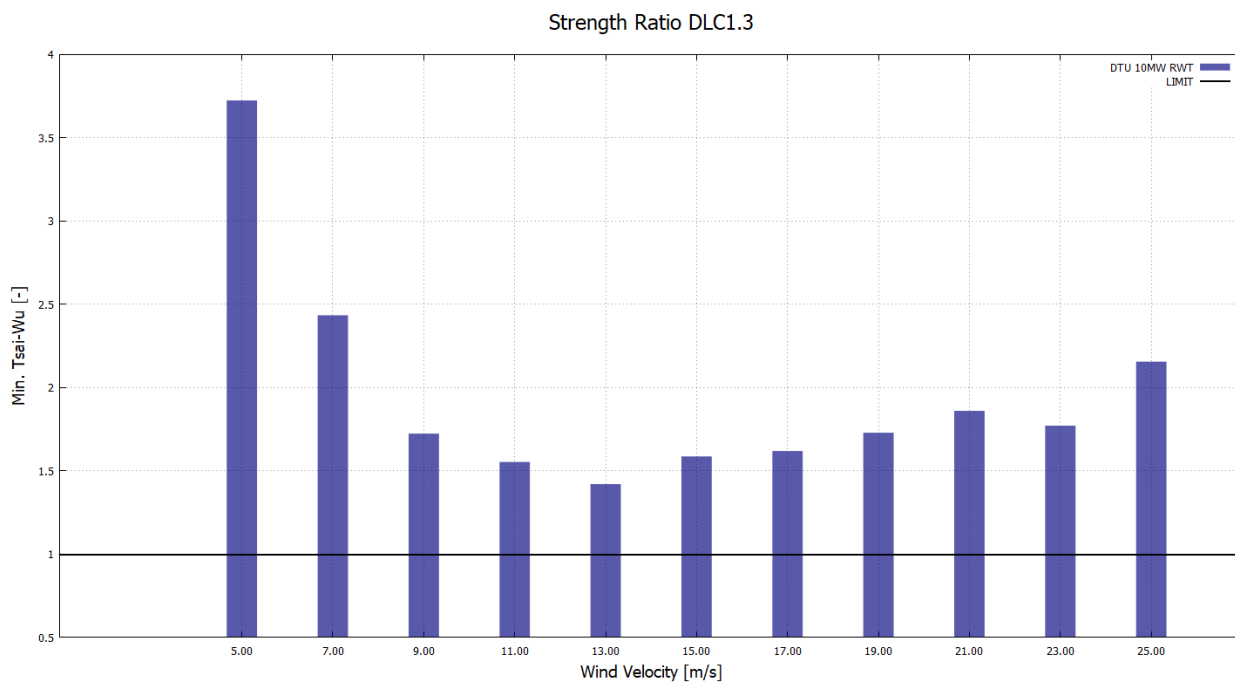
Στο **Διάγραμμα 5.2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ελάχιστης τιμής του κριτηρίου Tsai-Wu για κάθε μια από τις υπο εξέταση ταχύτητες ανέμου, υπο τη μορφή ιστογράμματος.

Με βάση τις τιμές του κριτηρίου αστοχίας Tsai-Wu, είναι φανερό ότι στην ταχύτητα ανέμου των 13.0m/s, ο δρομέας και κατ' επέκταση τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας αναφοράς δέχονται τη μεγαλύτερη φόρτιση.

Συνεπώς γίνεται αντιληπτό ότι η ταχύτητα ανέμου των 13.0m/s αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης του δρομέα αφού επιφέρει τα μέγιστα αναπτυσσόμενα φορτία στα πτερύγια.



**Διάγραμμα 5.1.** – Ελάχιστη τιμή κριτηρίου Tsai-Wu ανά διατομή, για όλες τις υπο διερεύνηση ταχύτητες ανέμου.



**Διάγραμμα 5.2.** – Ελάχιστη τιμή κριτηρίου Tsai-Wu ανά ταχύτητα ανέμου.



Μας είναι γνωστό ότι το πιο χρονοβόρο μέρος της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η εκτίμηση των φορτίων σχεδιασμού δια μέσω της σέρβο-αερο-ελαστικής ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου.

Με σκοπό να διατηρήσουμε το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας βελτιστοποίησης όσο γίνεται χαμηλότερα, στην συνέχεια της παρούσας εργασίας εξετάζεται η συνθήκη φορτίων σχεδιασμού DLC1.3 και προσομοιώνεται μόνο η περίπτωση της ταχύτητας ανέμου των 13m/s. Επιπλέον, και προκειμένου να μειωθεί περαιτέρω το υπολογιστικό κόστος προς όφελος της διαδικασίας βελτιστοποίησης, κάθε προσομοίωση πραγματοποιείται για διάρκεια 25 sec. Η εν λόγω διάρκεια των 25 sec επικεντρώνεται στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο παρατηρείται το τελικό φορτίο του πτερυγίου αναφοράς.

## 5.1. Αερο-ελαστική βελτιστοποίηση πτερυγίων, με βάση τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών

Όπως έχουμε είδη αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, η δημιουργία σύζευξης κάμψης – συστροφής με παραλλαγή της γωνίας προσανατολισμού των ινών των caps (δημιουργία off-axis στρώσεων) χρησιμοποιήθηκε ως η αρχική περίπτωση εφαρμογής, διότι αποτελεί ενδιαφέρουσα εφαρμογή μεθόδων παθητικού ελέγχου των φορτίων και συγχρόνως δεν απαιτεί υψηλή σχεδιαστική προσπάθεια.

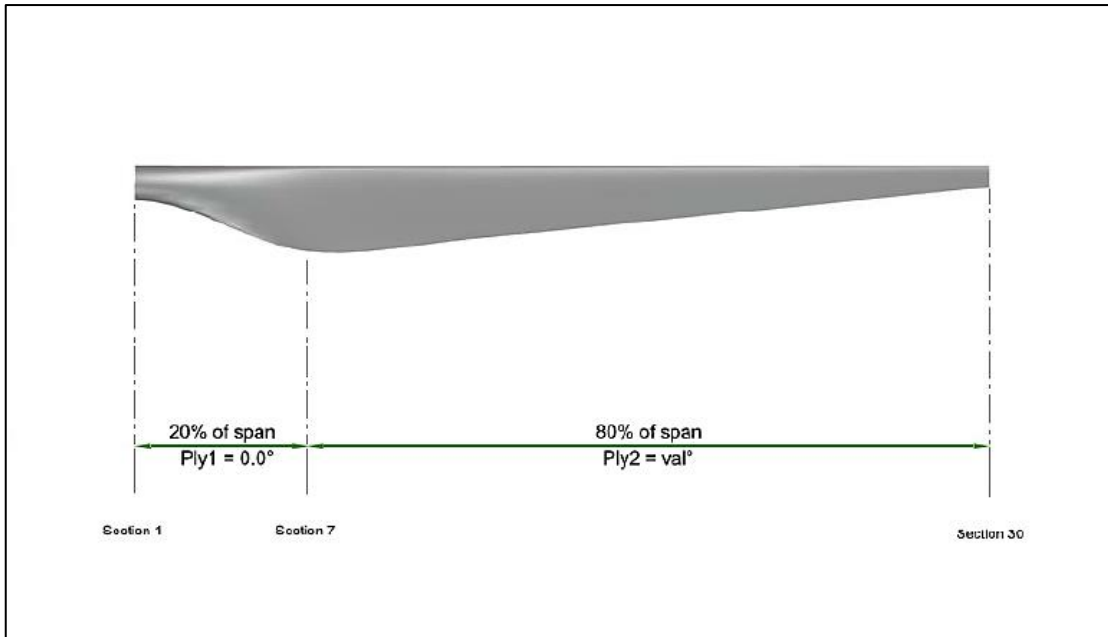
Μια πρώτη εκτίμηση των δυνατοτήτων μείωσης της μάζας των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αναφοράς προκύπτει θέτοντας σταθερές τιμές της γωνίας προσανατολισμού των ινών (τυπικές τιμές αποτελούν οι 5°, 7.5° και 10°). Επιπλέον, για να εκτιμηθεί η επίδραση που έχει στην όλη διαδικασία η επιλογή της αρχικής θέσης εισαγωγής της γωνίας προσανατολισμού των ινών (μερικώς συζευγμένα πτερύγια) κατά μήκος του πτερυγίου γίνονται δοκιμές σε διάφορες θέσεις εκκίνησης από τη ρίζα του πτερυγίου.

Παραμετρικές μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με το θέμα παραλλαγής της γωνίας προσανατολισμού των ινών των spar caps [98, 99], αναφέρουν ότι πτερύγια που ενσωματώνουν σχεδιαστικά την εφαρμογή πολύστρωτων δομών με off-axis στρώσεις, τοπικά (outer spar) και όχι καθ' όλο το μήκος τους (full spar), τόσο στα skins όσο και στα spar caps, τείνουν να εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά ως προς τον περιορισμό των φορτίων κόπωσης και τη μείωση της μάζας.

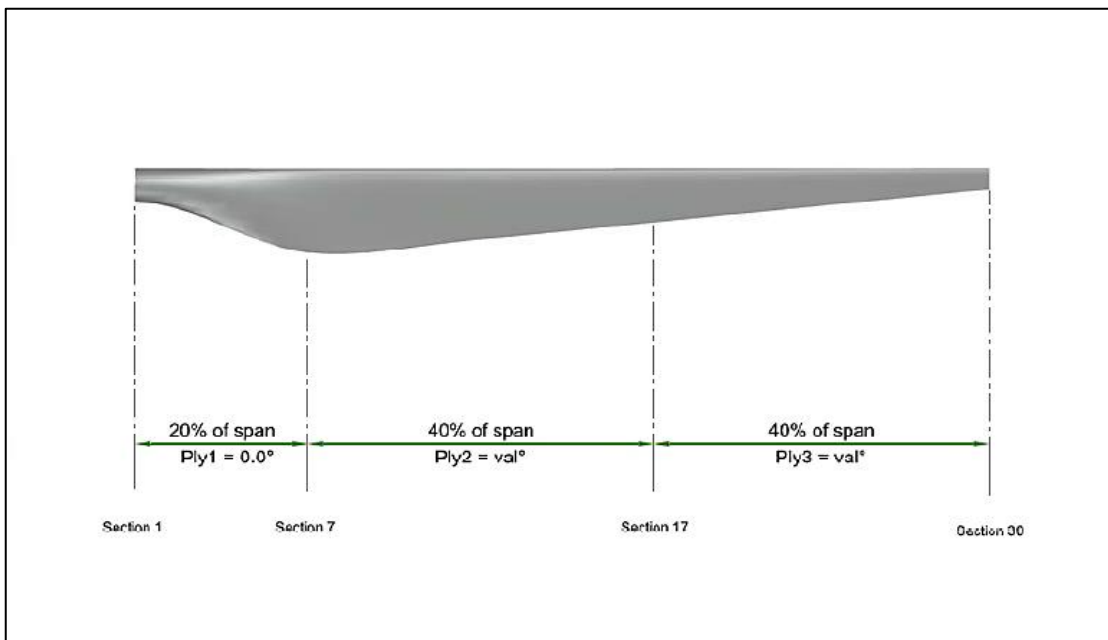
Για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή διαμόρφωση του “παραλλαγμένου” πτερυγίου στο πλαίσιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης (MDO), οι τιμές της γωνίας προσανατολισμού των ινών των spar caps, θα αποτελέσουν μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος. Λαμβάνονται υπόψη τρεις περιπτώσεις σχετικά με την κατανομή των γωνιών. Σε αυτές τις περιπτώσεις το πτερύγιο χωρίζεται σε 2, 3 και 4 τμήματα αντίστοιχα (το σύμβολο N υποδηλώνει τον αριθμό των τμημάτων), κάθε ένα εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από σταθερή γωνία προσανατολισμού των ινών. Οι θέσεις εισαγωγής της γωνίας προσανατολισμού των ινών, για κάθε τμήμα, κατά τη διεύθυνση της ακτίνας / μήκους θεωρούνται σταθερές και ανά περίπτωση διαφέρουν. Τέλος σε όλες τις υπο εξέταση περιπτώσεις, η γωνία του πρώτου τμήματος (που αντιστοιχεί στο 20 % της συνολικής ακτίνας / μήκους του πτερυγίου) είναι μηδενική.

Πιο συγκεκριμένα η πρώτη περίπτωση (N = 2) είναι η τυπική επιλογή πτερυγίου με σύζευξη κάμψης – συστροφής, που αναφέρεται στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, με ομοιόμορφη προσσαρμογή της γωνίας προσανατολισμού των ινών, ξεκινώντας από το 20% του μήκους. Η δεύτερη (N = 3) και τρίτη (N = 4) περίπτωση, αφορούν πιο σύνθετες σχεδιαστικά διαμορφώσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από μικρότερη γωνία προσανατολισμού των ινών στο εσωτερικό μέρος του πτερυγίου και υψηλότερη στο εξωτερικό. Γενικά η κατασκευή και των τριών περιπτώσεων θεωρείται εφικτή.

Στα **Σχήματα 5.2.** που ακολουθούν παρατίθενται οι τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν κατά τη φάση του συγκεκριμένου πλαισίου βελτιστοποίησης.



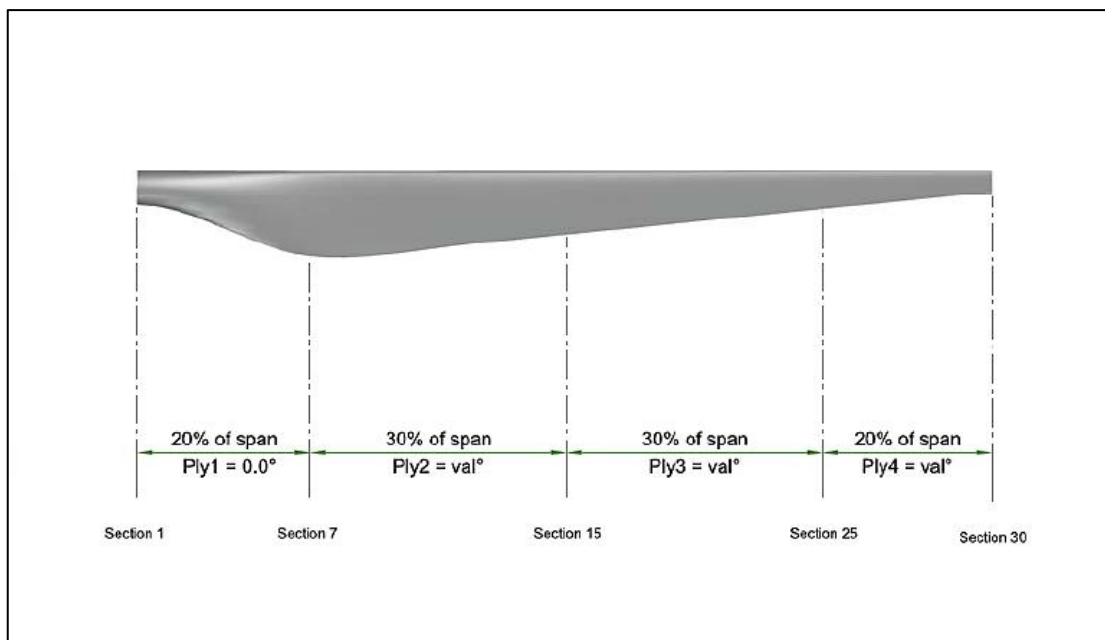
**Σχήμα 5.2a.** – (N = 2), διάταξη “παραλλαγμένου” πτερυγίου, πρόβλημα μιας μεταβλητής.



**Σχήμα 5.2b.** – (N = 3), διάταξη “παραλλαγμένου” πτερυγίου, πρόβλημα δύο μεταβλητών.

Στόχος του πλαισίου βελτιστοποίησης αποτελεί η μεγιστοποίηση του εμβαδού της καμπύλης αντοχής που προκύπτει με βάση τις τιμές του κριτηρίου αστοχίας Tsai-Wu του “παραλλαγμένου” πτερυγίου, έναντι του εμβαδού της αντίστοιχης καμπύλης αντοχής του πτερυγίου αναφοράς.

Οι δυνατότητες αύξησης της αντοχής του “παραλλαγμένου” πτερυγίου μέσω επαναπροσανατολισμού της γωνίας των ινών, αντιμετωπίστηκε χωρίς να ληφθεί υπόψη οποιαδήποτε τροποποίηση στη μάζα του πτερυγίου.



**Σχήμα 5.2c.** – ( $N = 4$ ), διάταξη “παραλλαγμένου” πτερυγίου, πρόβλημα τριών μεταβλητών.

Επιπλέον, στον **Πίνακα 5.1.** που ακολουθεί παρατίθενται και τα αριθμητικά αποτελέσματα των τριών περιπτώσεων που τελικά μελετήθηκαν.

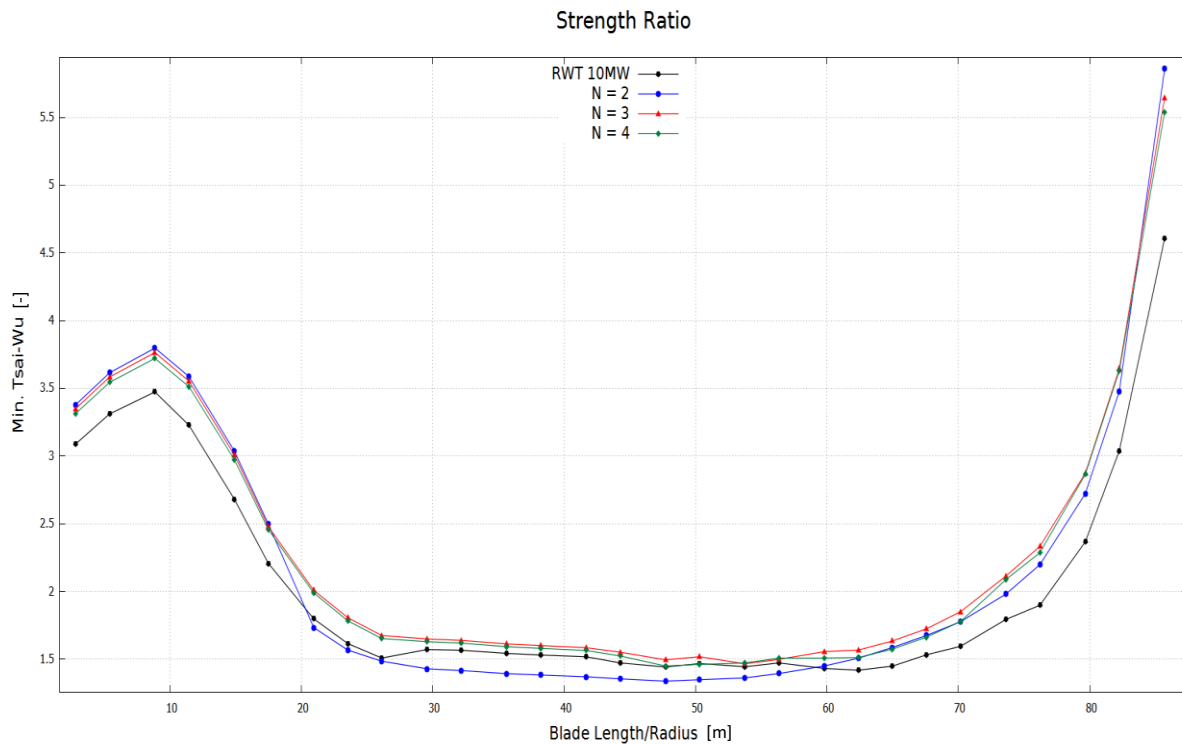
<i>Cases</i>	<i>Ply1</i>	<i>Ply2</i>	<i>Ply3</i>	<i>Ply4</i>	<i>Area</i>
$N = 2$	0.000	10.000	N/A	N/A	3.202367038
$N = 3$	0.000	5.191	7.560	N/A	4.254487920
$N = 4$	0.000	5.171	6.919	7.444	6.576153225

**Πίνακας 5.1.** – Αριθμητικά αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Στο **Διάγραμμα 5.3.** που ακολουθεί παριστάνονται οι καμπύλες αντοχής του πτερυγίου για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια του εν λόγω πλαισίου βελτιστοποίησης σε σχέση με την αντοχή του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας αναφοράς.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αριθμητικά αποτελέσματα του πλαισίου βελτιστοποίησης για την περίπτωση πολύστρωτων δομών με off-axis στρώσεις, προκύπτει ότι ο διαχωρισμός του

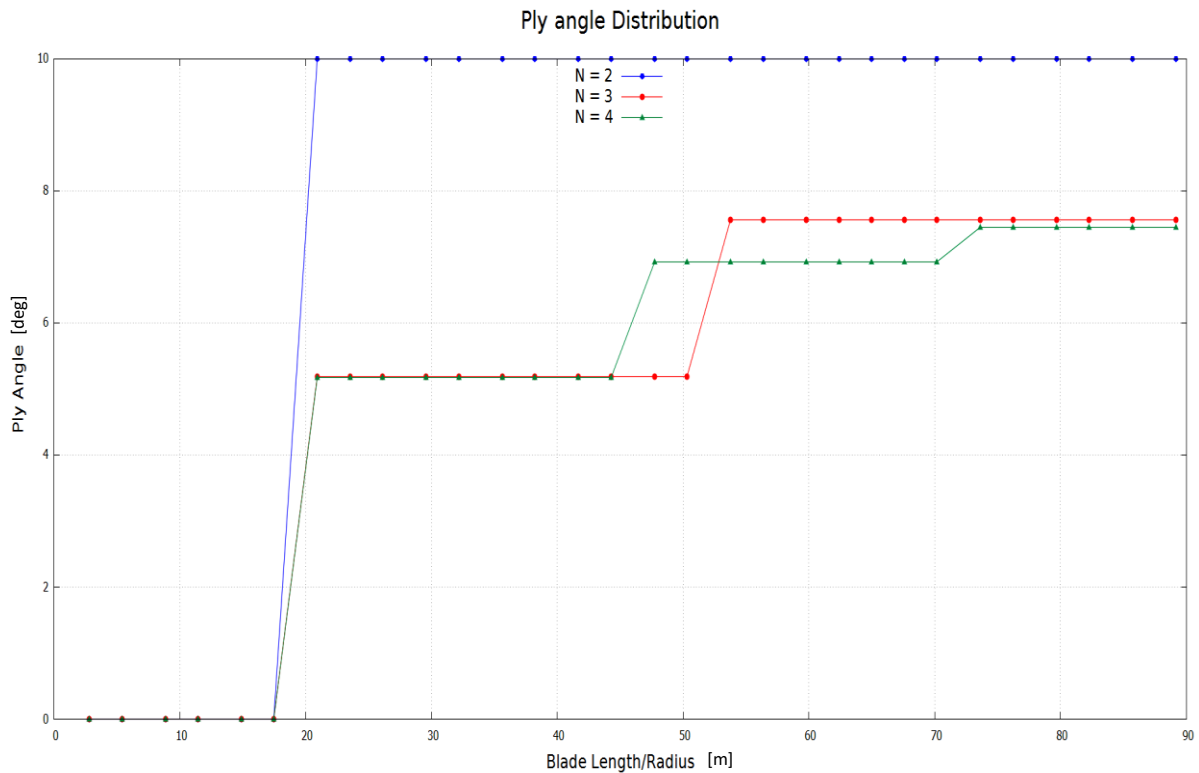
πτερυγίου σε περισσότερα των τριών τμημάτων (δλδ σε  $N=4$ ) κατά μήκος του, φαίνεται να μην επιφέρει καμιά περαιτέρω σημαντική βελτίωση στην αντοχή του.



**Διάγραμμα 5.3.** – Ελάχιστη τιμή κριτηρίου Tsai-Wu ανά διατομή, για όλες τις υπο διερεύνηση περιπτώσεις παραλλαγής της γωνίας ( $\rho_l$ ).

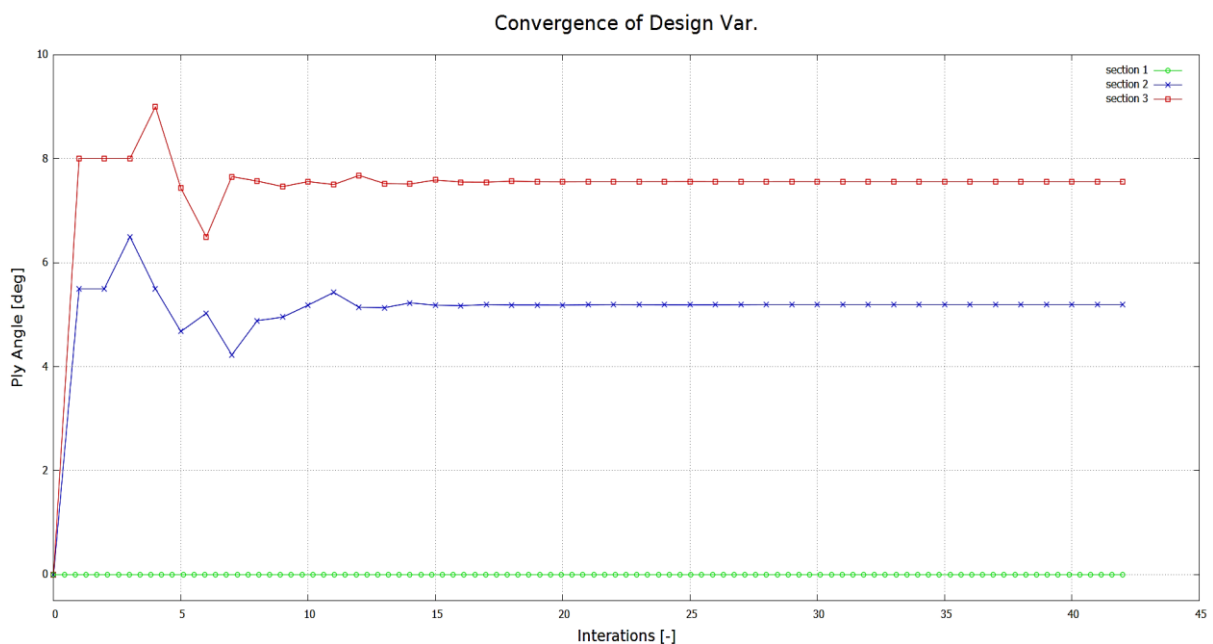
Στο **Διάγραμμα 5.4.** που ακολουθεί παριστάνονται οι βέλτιστες γωνίες προσανατολισμού των ινών των στρώσεων του μονο-αξονικού υλικού των caps, κατά μήκος του πτερυγίου, ανά περίπτωση.

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι η διαμόρφωση του “παραλλαγμένου” πτερυγίου με  $N = 3$ , πλησιάζει το μέγιστο θεωρητικό όριο. Η διάταξη του “παραλλαγμένου” πτερυγίου για την περίπτωση όπου  $N = 3$  φαίνεται στο **Σχήμα 5.2b.**



**Διάγραμμα 5.4.** – Βέλτιστη τιμή της γωνίας προσανατολισμού των ινών (ply), για όλες τις υπο διερεύνηση περιπτώσεις.

Στη συνέχεια και για σκοπούς πληρότητας παρουσιάζουμε τη σύγκλιση του προβλήματος βελτιστοποίησης για την περίπτωση N = 3, **Διάγραμμα 5.5**. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι απαιτούνται 25 επαναλήψεις για τη λήψη των βέλτιστων παραμέτρων σχεδίασης.



**Διάγραμμα 5.5.** – Σύγκλιση των παραμέτρων σχεδιασμού (ply angle)

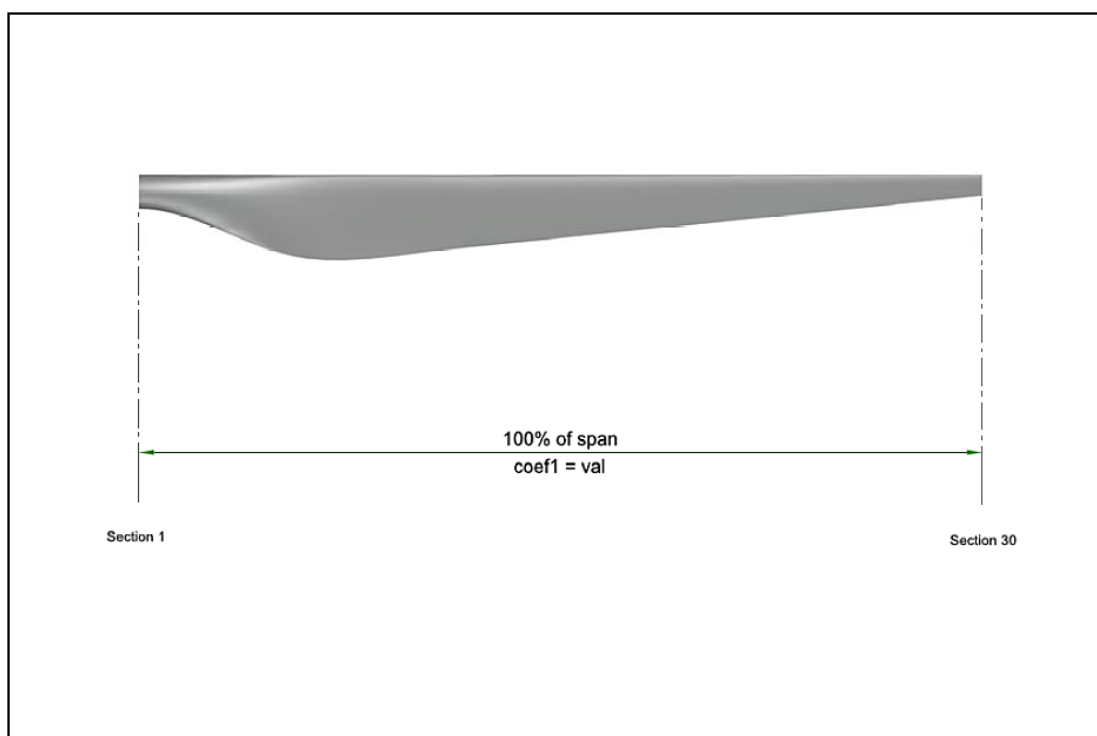
## 5.2. Αερο-ελαστική βελτιστοποίηση της συνολικής μάζας του πτερυγίου

Στη συνέχεια, και με βάση τη βέλτιστη διαμόρφωση της πολύστρωτης δομής των spar caps με off-axis στρώσεις ( $N = 3$ ), όπως προέκυψε από την εφαρμογή του προηγούμενου πλαισίου βελτιστοποίησης θα διερευνηθεί η δυνατότητα μείωσης της μάζας.

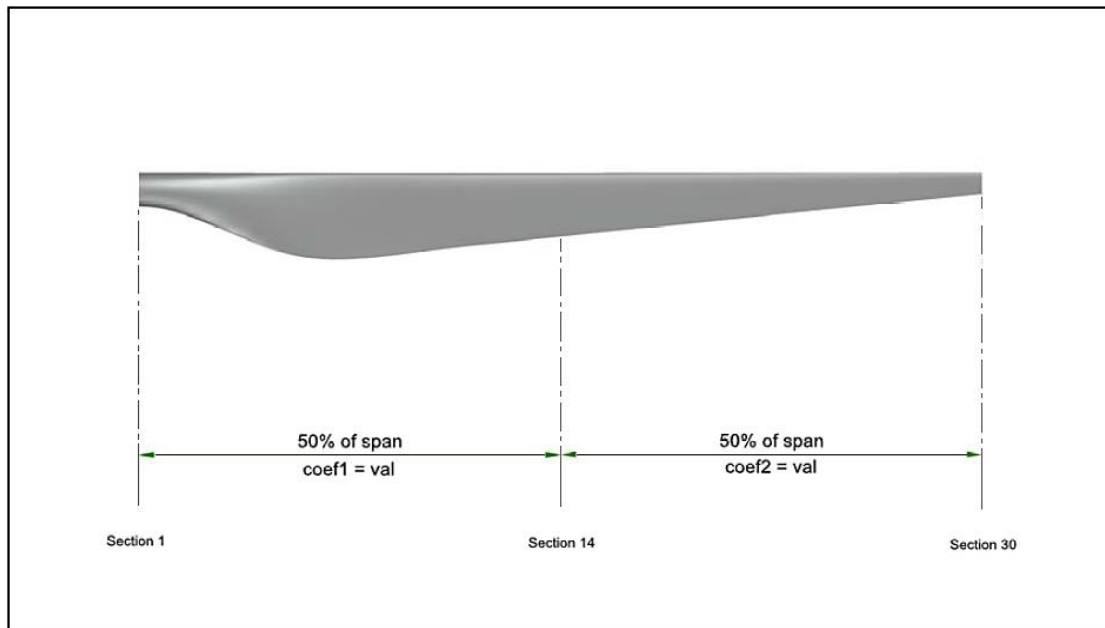
Για το σκοπό αυτό λαμβάνονται υπόψη πέντε περιπτώσεις σχετικά με την κατανομή του συντελεστή μάζας. Στις τέσσερις πρώτες περιπτώσεις το πτερύγιο χωρίζεται σε 1, 2, 3 και 4 ίσα τμήματα αντίστοιχα, κάθε ένα εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από σταθερή τιμή του συντελεστή. Η τέταρτη περίπτωση εξετάζει μια θεωρητική, συνεχή κατανομή του συντελεστή μάζας η οποία βασίζεται στην εφαρμογή κυβικών καμπυλών bezier.

Στόχος του παρόντος πλαισίου βελτιστοποίησης αποτελεί η ελαχιστοποίηση του εμβαδού της καμπύλης αντοχής που προκύπτει με βάση τις τιμές του κριτηρίου αστοχίας Tsai-Wu του “παραλλαγμένου” πτερυγίου, έναντι του εμβαδού της αντίστοιχης καμπύλης αντοχής του πτερυγίου με τη βέλτιστη διαμόρφωση ( $N = 3$ ). Το μέγιστο επίπεδο μείωσης της μάζας αξιολογείται, εφόσον οι μέγιστες τάσεις κατά μήκος του πτερυγίου διατηρούνται στα ίδια επίπεδα με αυτά του πτερυγίου αναφοράς.

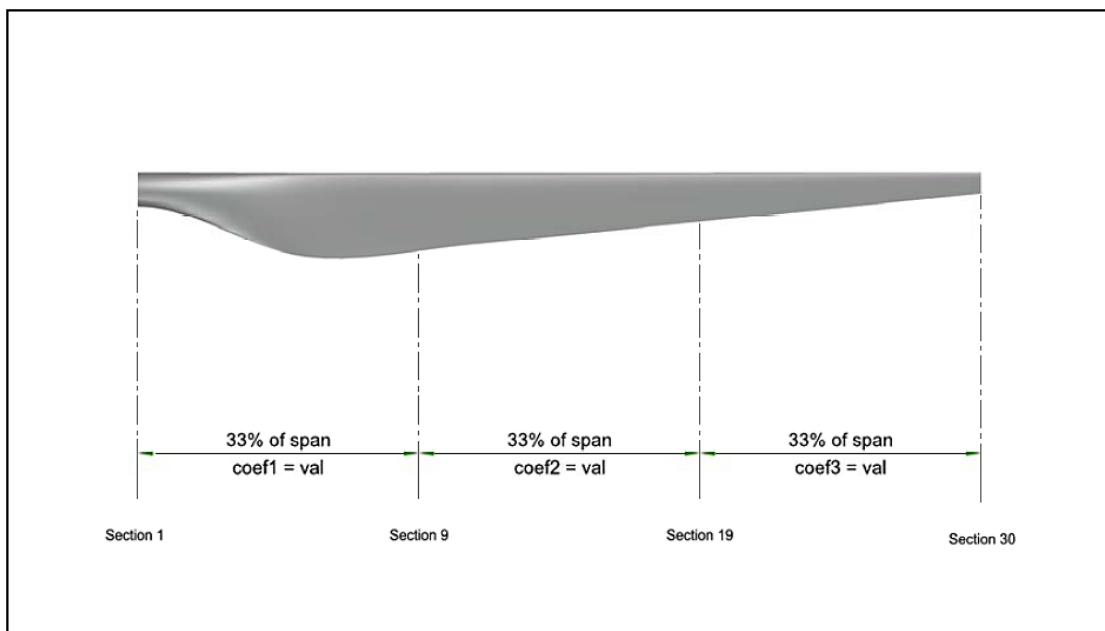
Στα **Σχήματα 5.3**, που ακολουθούν παρατίθενται οι τέσσερις περιπτώσεις που εξετάστηκαν κατά τη φάση του συγκεκριμένου πλαισίου βελτιστοποίησης.



**Σχήμα 5.3a.** – Case #1, πρόβλημα μιας μεταβλητής.

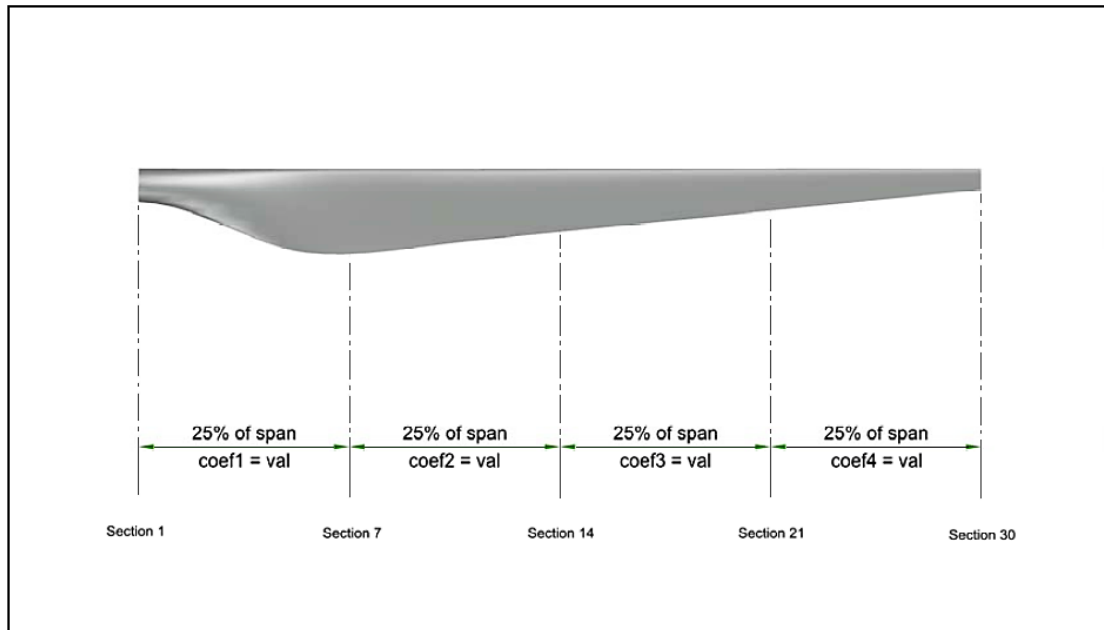


**Σχήμα 5.3b.** – Case #2, πρόβλημα δύο μεταβλητών.



**Σχήμα 5.3c.** – Case #3, πρόβλημα τριών μεταβλητών.





Σχήμα 5.3d. – Case #4, πρόβλημα τεσσάρων μεταβλητών.

Επιπλέον, στον Πίνακα 5.2. που ακολουθεί παρατίθενται και τα αριθμητικά αποτελέσματα των τεσσάρων περιπτώσεων που μελετήθηκαν.

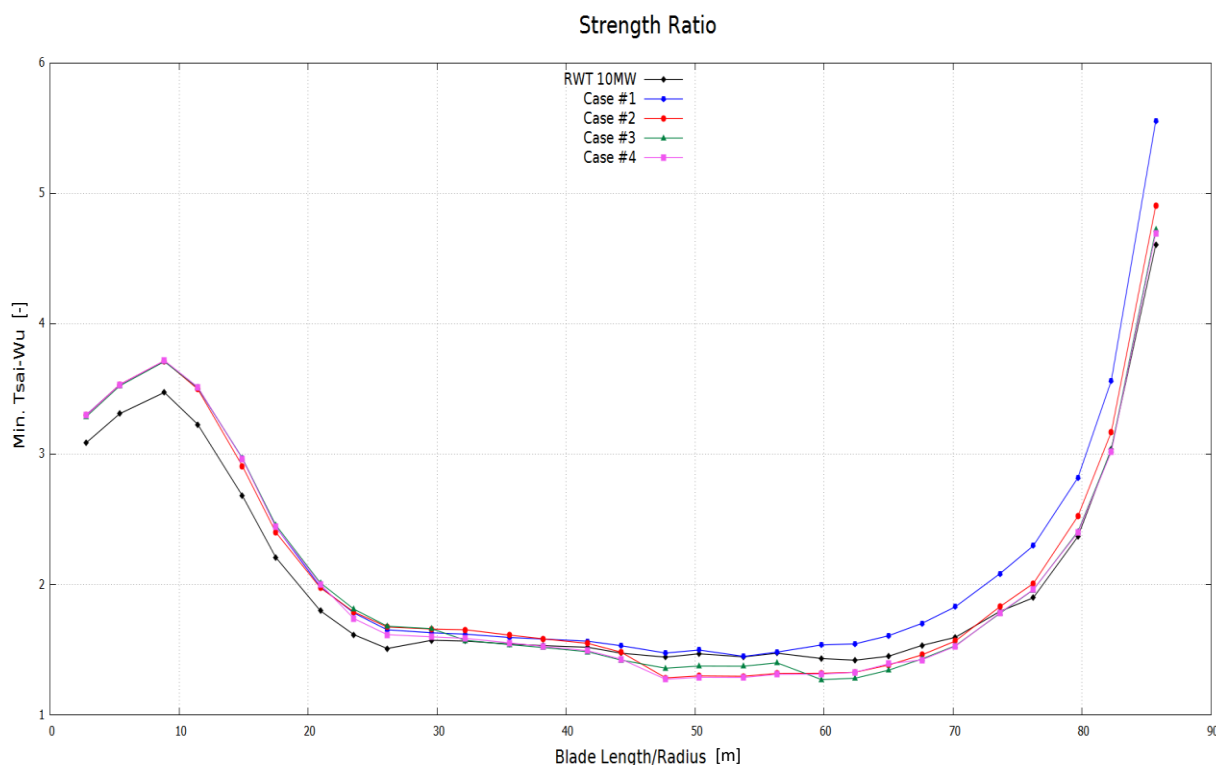
Cases	coef1	coef2	coef3	coef4	Area
1	0.981	N/A	N/A	N/A	0.1534705293
2	0.971	0.871	N/A	N/A	0.0824994274
3	0.949	0.902	0.805	N/A	0.0659573643
4	0.947	0.907	0.839	0.805	0.0631334220

Πίνακας 5.2. – Αριθμητικά αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Στον Πίνακα 5.3. που ακολουθεί παρατίθενται και τα αριθμητικά αποτελέσματα των τριών περιπτώσεων που τελικά μελετήθηκαν.

Cases	Mass (Kg)	maximum Mass Reduction			
RWT 10MW	42044,4858355268				
1	41245,6406046518	1,900 %			
2	39935,4530964796		5,016 %		
3	38682,3487663240			7,996 %	
4	38416,9635957135				8,628 %

Πίνακας 5.3. – Αριθμητικά αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης.



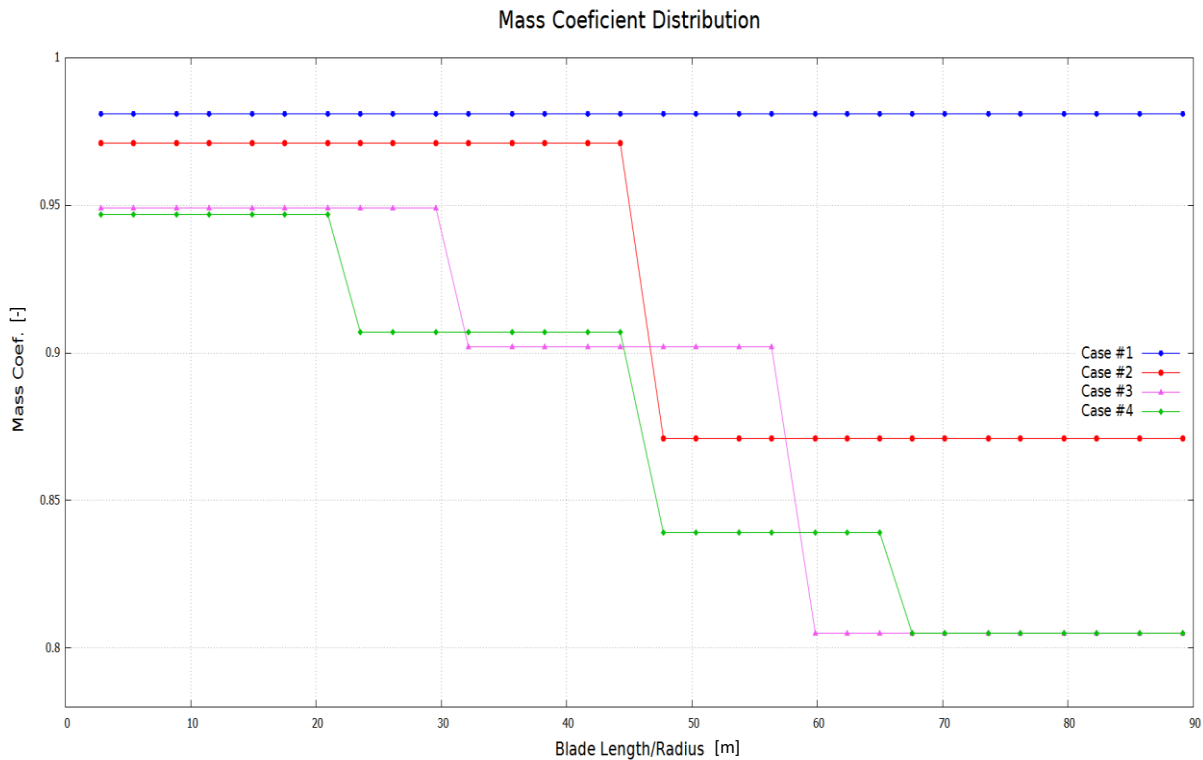
**Διάγραμμα 5.6.** – Ελάχιστη τιμή κριτηρίου Tsai-Wu ανά διατομή, για όλες τις υπο διερεύνηση περιπτώσεις παραλλαγής του συντελεστή μάζας (*coef*).

Με βάση λοιπόν τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από το πλαίσιο βελτιστοποίησης όσο αναφορά το συντελεστή μάζας της πολύστρωτης δομής με off-axis στρώσεις (**Διάγραμμα 5.6.**), προκύπτει ότι για την 1<sup>η</sup> περίπτωση ( $N = 1$ ) η μέγιστη μείωση της μάζας του πτερυγίου αντιστοιχεί σε περίπου 2 %, για τη 2<sup>η</sup> περίπτωση ( $N = 2$ ) η μέγιστη μείωση της μάζας αντιστοιχεί σε 5 %, για την 3<sup>η</sup> περίπτωση ( $N = 3$ ) η μέγιστη μείωση της μάζας αντιστοιχεί σε περίπου 8 % και τέλος για την 4<sup>η</sup> περίπτωση ( $N = 4$ ) η μέγιστη μείωση της μάζας αντιστοιχεί σε 8.6 %.

Σε όλες τις υπο διερεύνηση περιπτώσεις η γωνία προσανατολισμού των ινών ήταν ίση με  $5.19^\circ$  και  $7.56^\circ$ , ξεκινώντας από το 20% και το 60% του μήκους αντίστοιχα.

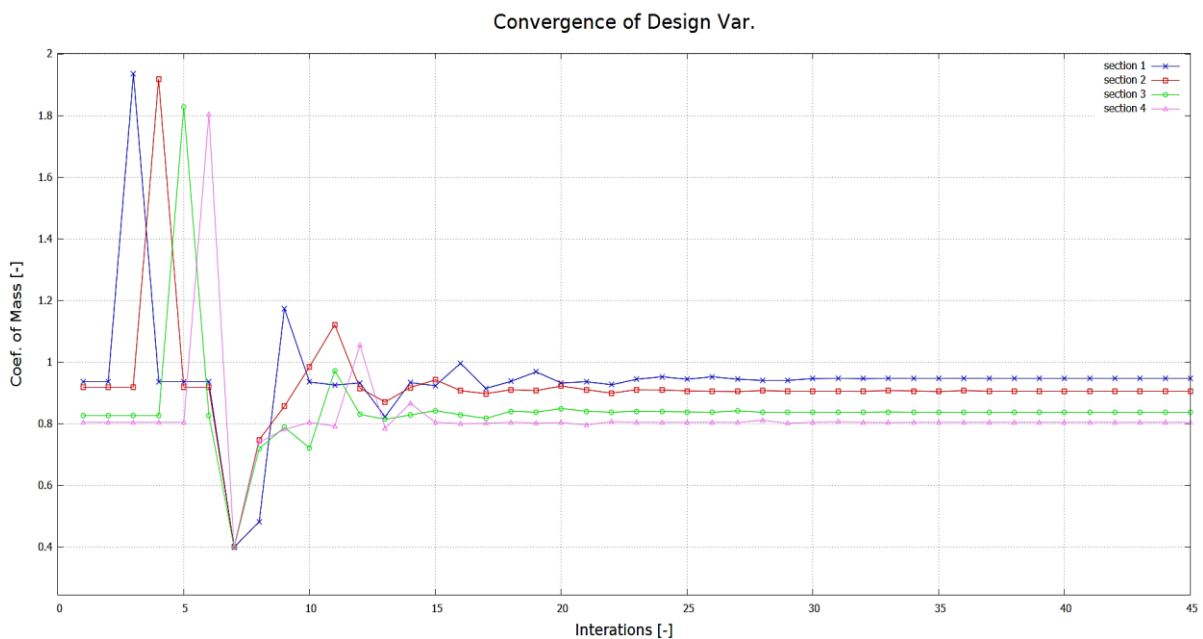
Να σημειωθεί ότι η μέγιστη μείωση της μάζας που παρατηρείται στην 4<sup>η</sup> περίπτωση φαίνεται να μην παρουσιάζει περαιτέρω σημαντική βελτίωση.

Στο **Διάγραμμα 5.7.** που ακολουθεί παρατίθενται γραφικά οι βέλτιστες τιμές των συντελεστών μάζας κατά μήκος του πτερυγίου, ανά περίπτωση.



**Διάγραμμα 5.7.** – Βέλτιστη τιμή του συντελεστή μάζας (coef), για όλες τις υπο διερεύνηση περιπτώσεις.

Εν συνεχεία και για σκοπούς πληρότητας παρουσιάζουμε τη σύγκλιση του προβλήματος βελτιστοποίησης για την περίπτωση  $N = 4$ , **Διάγραμμα 5.8**. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι απαιτούνται 35 επαναλήψεις για τη λήψη των βέλτιστων παραμέτρων σχεδίασης.

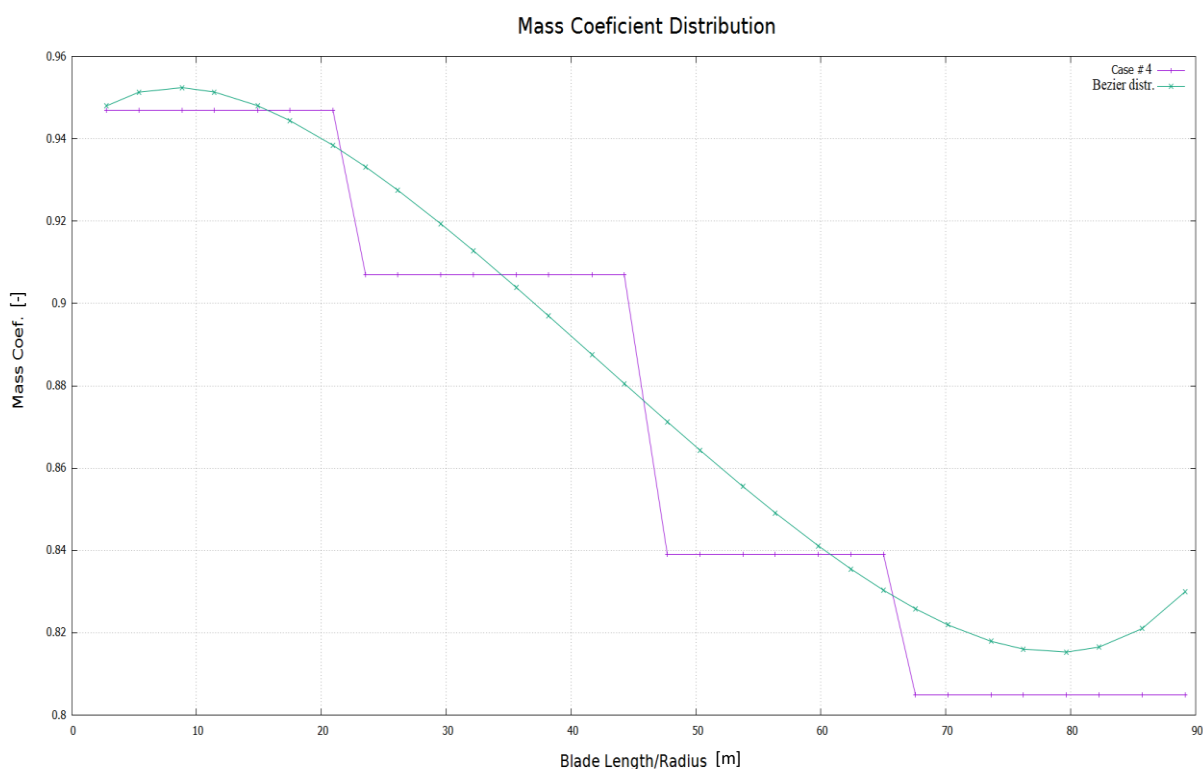


**Διάγραμμα 5.8.** – Σύγκλιση των παραμέτρων σχεδιασμού (mass coef.)

Για την περαιτέρω μείωση της μάζας του πτερυγίου και μελετώντας την περίπτωση διαχωρισμού του πτερυγίου σε τέσσερα ίσα τμήματα (περίπτωση  $N = 4$ ), επιδιώκετε με χρήση καμπυλών Bezier η εξεύρεση μιας θεωρητικής συνεχούς κατανομής του συντελεστή μάζας που θα οδηγήσει σε ακόμη χαμηλότερα επίπεδα το βάρος του πτερυγίου.

Η συνεχής θεωρητική κατανομή είναι αυτή που καθορίζει το ανώτερο όριο μείωσης μάζας των “παραλλαγμένων” πτερυγίων.

Στο **Διάγραμμα 5.9**, που ακολουθεί απεικονίζεται γραφικά η πρώτη προσέγγιση της θεωρητικής κατανομής των συντελεστών μάζας κατά μήκος του πτερυγίου, για την περίπτωση  $N = 4$ .



**Διάγραμμα 5.9.** – Συνεχής (θεωρητική) κατανομή των συντελεστών μάζας (coef), για την υπο εξέταση περίπτωση διαχωρισμού του πτερυγίου σε 4 τμήματα.

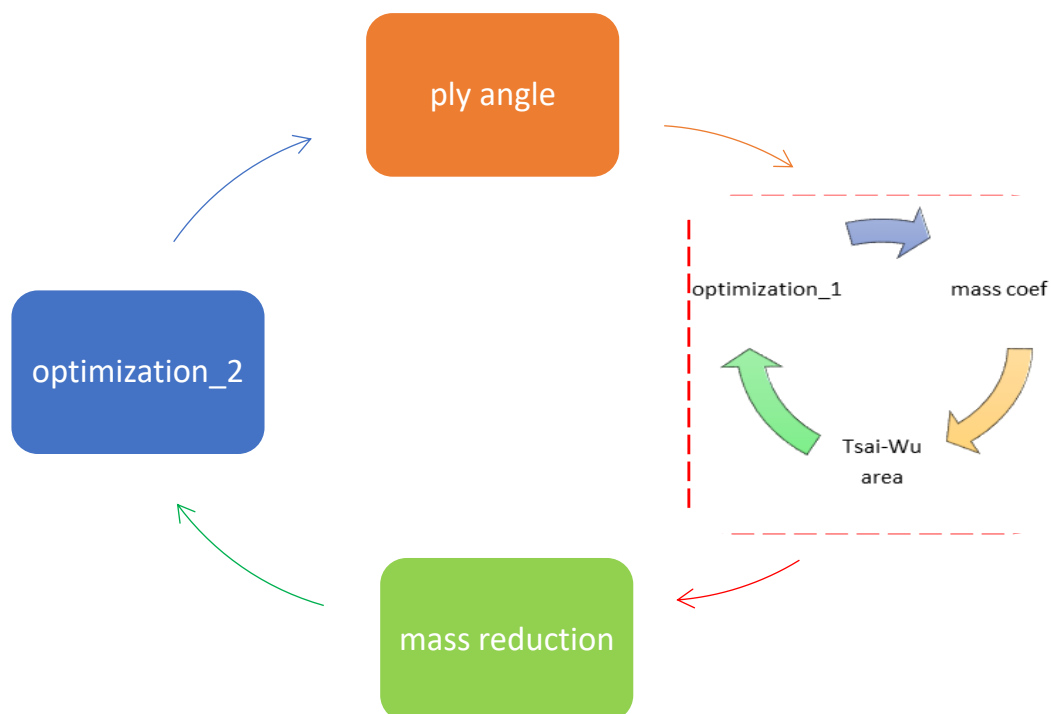
Από τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από αυτό, το ευρύτερα εξελιγμένο πλαίσιο βελτιστοποίησης με την ενσωμάτωση της καμπύλης Bezier, η μέγιστη μείωση της μάζας του πτερυγίου αντιστοιχεί σε περίπου 8.59 %.

Τελειώνοντας για να εκτιμηθεί η βέλτιστη δυνατή διαμόρφωση του πτερυγίου όσο αναφορά τη δυνατότητα μείωσης της μάζας του, γίνεται εφαρμογή ενός πλήρους πλαισίου βελτιστοποίησης, κατά τη διάρκεια της οποίας μεταβλητές του προβλήματος αποτελούν

πλέον τόσο οι τιμές της γωνίας προσανατολισμού των ινών των επιμέρους τμημάτων του πτερυγίου, όσο και οι τιμές των συντελεστών μάζας ανά διατομή, ακολουθώντας μια κατανομή Bezier και υπό την προϋπόθεση πάντα να διατηρείται η ελάχιστη τιμή του κριτηρίου Tsai-Wu της ανεμογεννήτριας αναφοράς.

Για την καλύτερη δυνατή ακρίβεια των αποτελεσμάτων, το εν λόγω πλαίσιο βελτιστοποίησης διαφοροποιήθηκε κάπως σε σχέση με αυτό που έως τώρα εφαρμόστηκε. Πιο συγκεκριμένα οι γωνίες προσανατολισμού των ινών ( $N = 3$ ) θεωρήθηκαν μεταβλητές ενός εξωτερικού βρόχου του πλαισίου, ενώ οι τιμές των συντελεστών μάζας των επιμέρους τμημάτων του θεωρήθηκαν μεταβλητές του εσωτερικού βρόχου του πλαισίου.

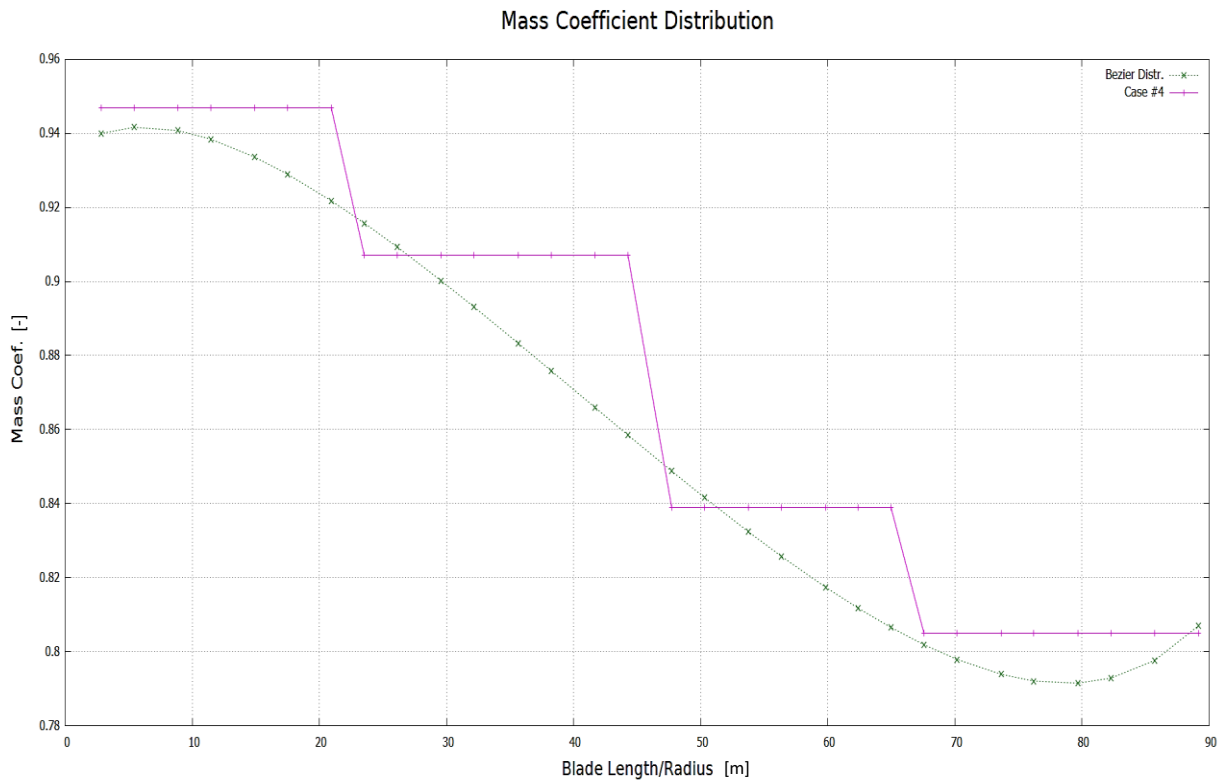
Η σχηματική αναπαράσταση του πλήρους πλαισίου βελτιστοποίησης δίνεται παρακάτω στο **Σχήμα 5.4**.



**Σχήμα 5.4.** – Απλοποιημένο διάγραμμα ροής του πλήρους πλαισίου βελτιστοποίησης.

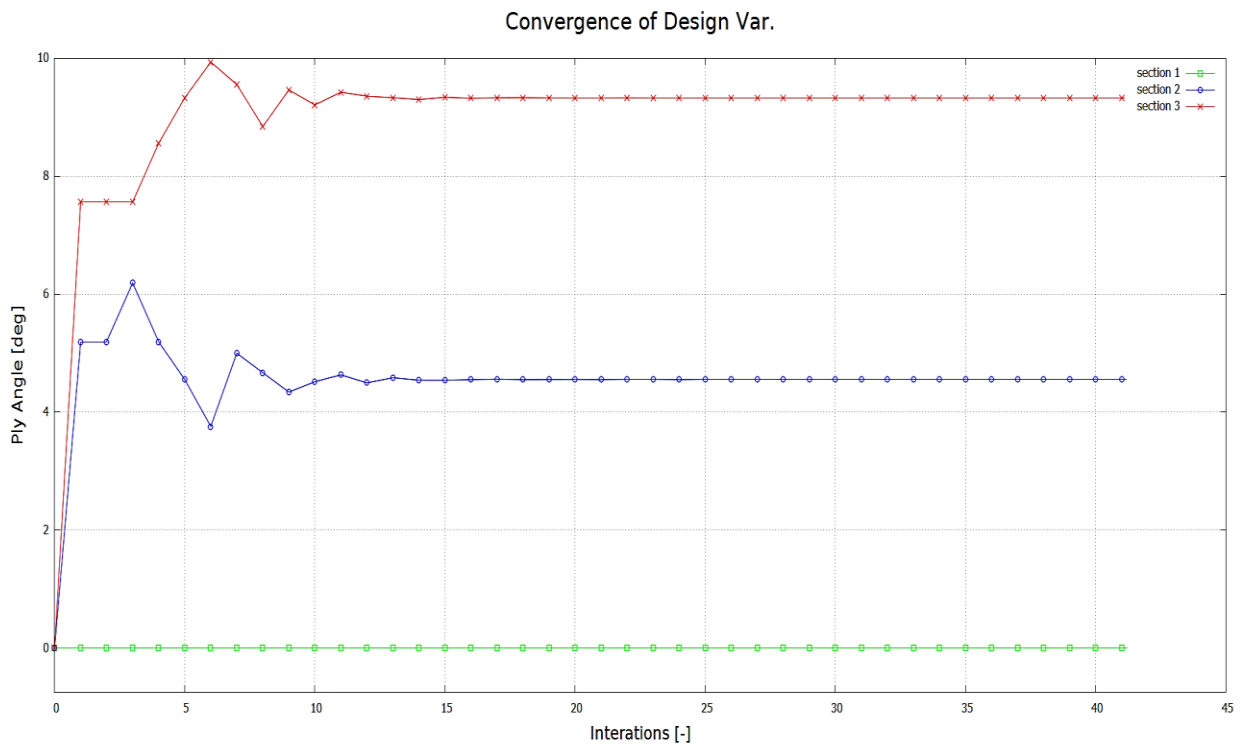
Με βάση τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την εφαρμογή του πλήρους πλαισίου βελτιστοποίησης, προκύπτει ότι η μέγιστη μείωση της μάζας του πτερυγίου αντιστοιχεί τελικά σε 10.31 %.

Στο **Διάγραμμα 5.10**, που ακολουθεί απεικονίζεται γραφικά η προσέγγιση της θεωρητικής κατανομής των συντελεστών μάζας κατά μήκος του πτερυγίου, σε σχέση την περίπτωση διαχωρισμού του πτερυγίου σε τέσσερα ίσα τμήματα ( $N = 4$ )



**Διάγραμμα 5.10.** – Συνεχής (θεωρητική) κατανομή των συντελεστών μάζας (coef), βάσει του πλήρους πλαισίου βελτιστοποίησης.

Τελειώνοντας στο **Διάγραμμα 5.11.** που ακολουθεί, παρατίθεται η σύγκλιση του εξωτερικού βρόχου του προβλήματος βελτιστοποίησης για την περίπτωση  $N = 3$ . Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι απαιτούνται περίπου 20 επαναλήψεις για τη λήψη των βέλτιστων παραμέτρων σχεδίασης (ply).



**Διάγραμμα 5.11.** – Σύγκλιση εξωτερικού βρόχου πλαισίου βελτιστοποίησης (ply angle)

### 5.3. Επαλήθευση του σχεδιασμού

Η επαλήθευση του σχεδιασμού πτερυγίων ανεμογεννητριών που ενσωματώνουν σύζευξη κάμψης – συστροφής (BTC) δια μέσω αέρο-ελαστικών προσομοιώσεων, αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας παραγράφου.

Η επαλήθευση πραγματοποιείται μέσω προσομοιώσεων για την περίπτωση σχεδιασμού DLC1.3, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-1 [68] και χρησιμοποιώντας το σέρβο-αέρο-ελαστικό πλαίσιο hGAST.

Πραγματοποιούνται τρεις 10-λεπτες προσομοιώσεις τόσο για την “παραλλαγμένη” πτέρυγα όσο και για την πτέρυγα της ανεμογεννήτριας αναφοράς, για κάθε μια από τις ακόλουθες ταχύτητες ανέμου: 5.0, 9.0, 13.0, 17.0, 21.0 και 25.0m/s, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται.

Όπως προέκυψε προηγουμένως σχετικά με τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας αναφοράς (DTU 10MW RWT), η γωνία προσανατολισμού των ινών στο εύρος από 5° ως 7.5°, ξεκινώντας από το 20% του μήκους τους, ακολουθώντας παράλληλα και μια συνεχή κατανομή των συντελεστών μάζας τους κατά μήκος, μπορεί να οδηγήσει τελικά σε μια συνολική μείωση της μάζας τους κατά περίπου 10%.

Στα **Διαγράμματα 5.11.** και **5.13.** που παρατίθενται παρακάτω, παριστάνονται οι ελάχιστες τιμές του κριτηρίου Tsai-Wu (αστοχία εμφανίζεται για τιμές του κριτηρίου < 1) του πτερυγίου, η μέγιστη συνδυασμένη ροπή κάμψης στη ρίζα του πτερυγίου καθώς και η μέγιστη συνδυασμένη ροπή κάμψης στη βάση του πύργου.

Οι ελάχιστες τιμές του κριτηρίου Tsai-Wu, τόσο για το πτερύγιο αναφοράς όσο και το “παραλλαγμένο” πτερύγιο, που λαμβάνονται για την περίπτωση σχεδιασμού DLC1.3 αντιστοιχούν στην ταχύτητα ανέμου των 13m/s. Η ελάχιστη τιμή Tsai-Wu για όλο το εύρος του πτερυγίου εμφανίζεται στο **Διαγράμματα 5.11.**

Wind Speed (m/s)	Min. Tsai-Wu [-]	Max. M <sub>c</sub> blade [ kNt·m ]	Max. M <sub>c</sub> tower [ kNt·m ]
5.00	2.88477	25.77004	109.51210
9.00	1.48068	46.89216	242.82830
13.00	1.37617	50.90785	258.94670
17.00	1.44024	45.30457	210.52660
21.00	1.57590	45.95363	194.41340
25.00	1.59759	44.24575	222.93750

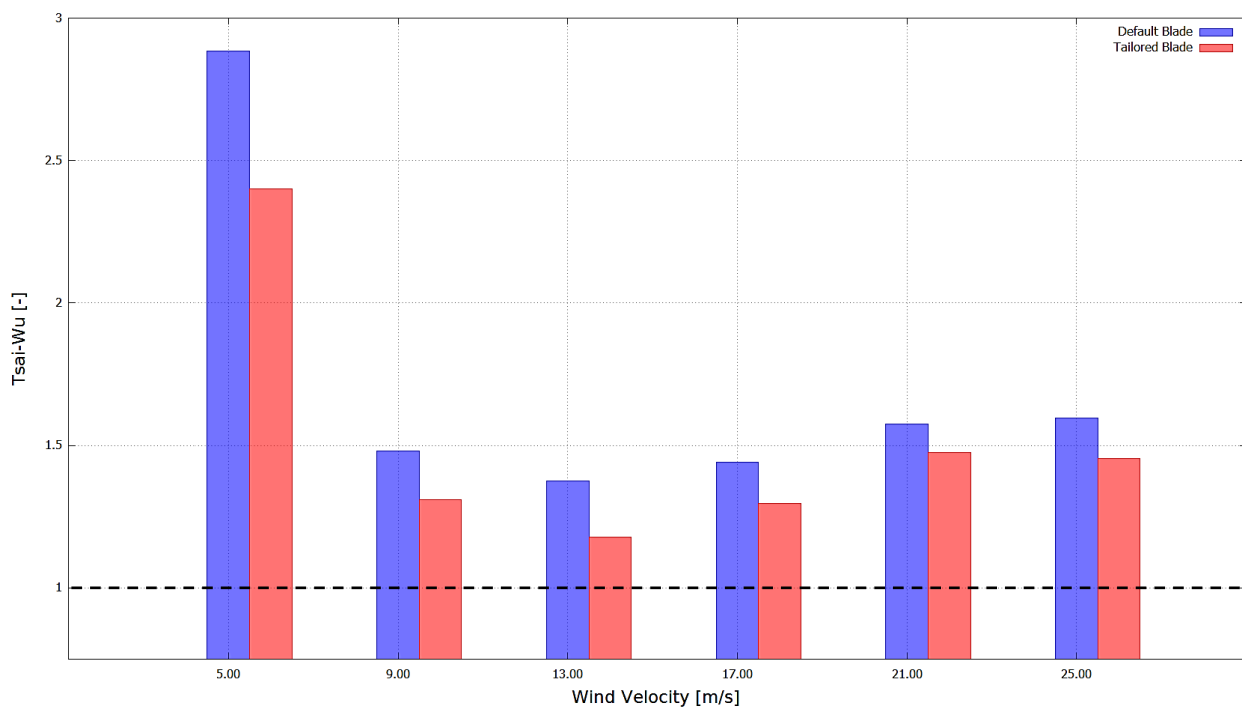
**Πίνακας 5.4.** – Αριθμητικά αποτελέσματα αναπτυσσόμενων φορτίσεων πτερυγίου Α/Γ αναφοράς (DTU 10MW RWT).



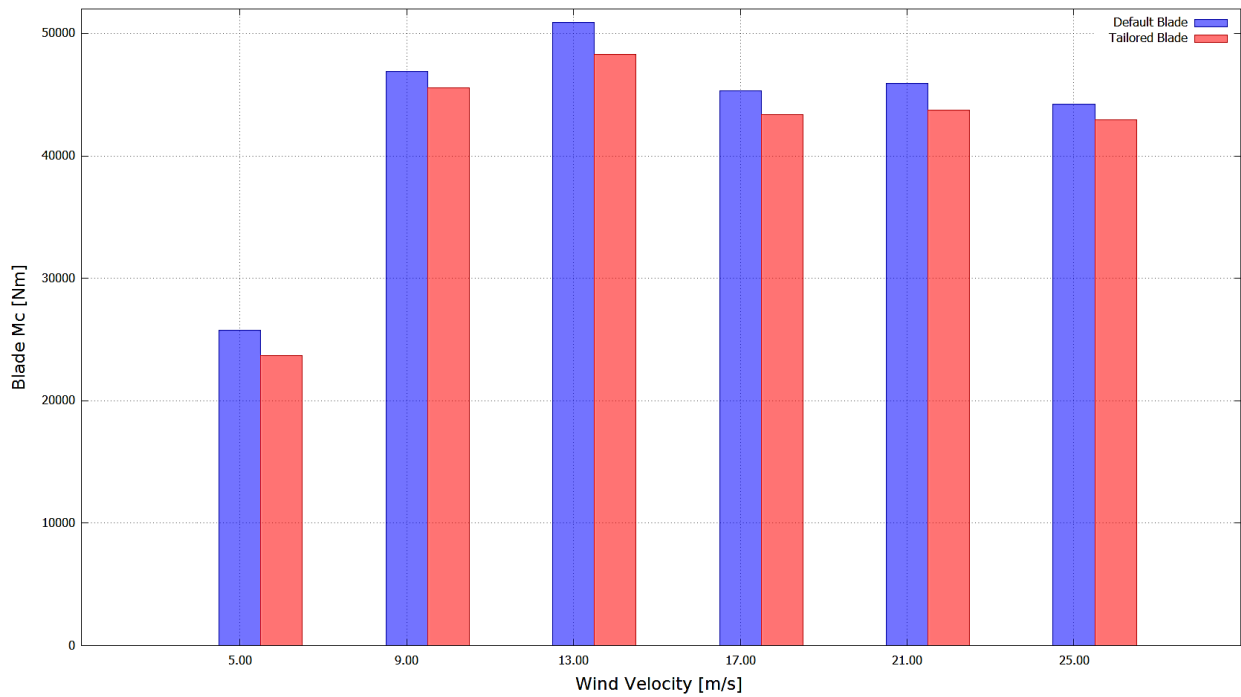
Wind Speed (m/s)	Min. Tsai-Wu [-]	Max. $M_c$ blade [ kNt·m ]	Max. $M_c$ tower [ kNt·m ]
5.00	2.40006	23.70795	108.30600
9.00	1.31049	45.54228	241.41850
13.00	1.17910	48.29665	250.20410
17.00	1.29617	43.39607	206.32880
21.00	1.47593	43.72874	198.55550
25.00	1.45513	42.97601	230.47600

**Πίνακας 5.5.** – Αριθμητικά αποτελέσματα αναπτυσσόμενων φορτίσεων “παραλλαγμένου” πτερυγίου (BTC σχεδιασμός).

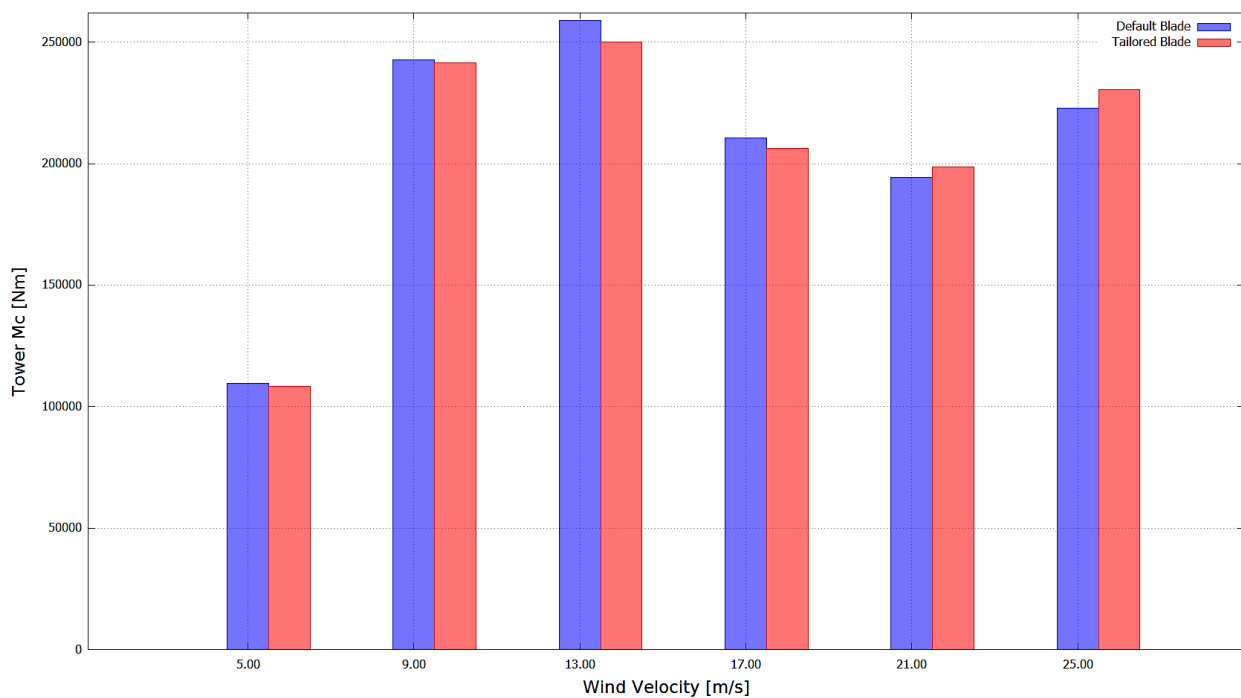
Συγκρίνοντας τα αριθμητικά στοιχεία που παρατίθενται στους **Πίνακες 5.4.** και **5.5.** σχετικά με το πτερύγιο αναφοράς και το “παραλλαγμένο” πτερύγιο, προκύπτει ότι η τελική διαμόρφωση του σχεδιασμού οδηγεί σε μείωση της συνδυασμένη ροπής στη ρίζα του πτερυγίου ( $M_c$ -blade) κατά περίπου 8% και τη συνδυασμένη ροπή στη βάση του του πύργου ( $M_c$ -tower) κατά 3.4%.



**Διάγραμμα 5.11.** – Ελάχιστες τιμές του κριτηρίου Tsai-Wu, ανά ταχύτητα ανέμου.



**Διάγραμμα 5.12.** – Μέγιστες τιμές της συνδυασμένης ροπής (Mc) στη ρίζα του πτερυγίου, ανά ταχύτητα ανέμου.



**Διάγραμμα 5.13.** – Μέγιστες τιμές της συνδυασμένης ροπής (Mc) στη βάση του πύργου, ανά ταχύτητα ανέμου.

## 6. Βιβλιογραφία

- [1] Taylor M, Daniel K, Ilas A and So E Y 2015 Renewable Power Generation Costs in 2014 (Bonn, Germany: IRENA - International Renewable Energy Agency) URL [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications)
- [2] Ashwill T D 2009 Materials and Innovations for Large Blade Structures: Research Opportunities in Wind Energy Technology 50th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference vol. Palm Springs (AIAA) ISSN AIAA-2009-2407
- [3] Bossanyi E A 2003 Individual Blade Pitch Control for Load Reduction Journal of Wind Energy vol. 6 nr 2 (John Wiley and Sons, Ltd.) pp 119–128 URL <http://dx.doi.org/10.1002/we.76>
- [4] Barlas T K and Kiuk G V 2003 Review of State of the Art in Smart Rotor Control Research for Wind Turbines Progress in Aerospace Sciences vol. 46 nr 1 (Pergamon) pp 1–27 ISSN 0376-0421 URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2009.08.002>
- [5] Kooijman H December 1996 Bending-torsion Coupling of a Wind Turbine Rotor Blade (Petten, Netherlands: ECN) ISBN ECN report 527 I-96-060
- [6] Ashwill T, Veers P S, Locke J, Griffin I C D and Zuteck M D 2010 Concepts for Adaptive Wind Turbine Blades Reno, Nevada, USA, 14–17 January 2002 vol. Paper No. WIND2002-28 (ASME 2002 Wind Energy Symposium) URL 10.1115/WIND2002-28
- [7] Ashwill T D 2009 Developments in Large Blades for Lower Cost Wind Turbines 50th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference vol. Palm Springs (AIAA) ISSN AIAA-2009-2407
- [8] Knight and Carver Wind Group 2010 Sweep-Twist Adaptive Rotor Blade: Final Project Report (Albuquerque, New Mexico, USA: Sandia National Laboratories, SAND2009-8037)
- [9] Fedorov V and Berggreen C 2014 Bend-twist Coupling Potential of Wind Turbine Blades Journal of Physics: Conference Series - The Science of Making Torque from Wind 2014 vol. 524 (IOP Publishing) p 12035 URL <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012035>
- [10] Ashwill T D 2004 Developments in Large Blades for Lower Cost Wind Turbines Proceeding (AWEA 2004) URL <http://windpower.sandia.gov/other/041605C.pdf>
- [11] Hodges D H and Dowell E 1974 Nonlinear Equations of Motion for the Elastic Bending and Torsion of Twisted Non-uniform Rotor Blades (Ames Research Center and U.S. Army Air Mobility RandD Laboratory, Moffett Field, California 94035: NASA)

- [12] Kim T, Hansen A M and Branner K 2013 Development of an Anisotropic Beam Finite Element for Composite Wind Turbine Blades in Multibody System Journal of Renewable Energy vol. 59 (Elsevier) pp 172–183 URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.03.033>
- [13] Wang Q, Johnson N, Sprague M A and Jonkman J 2015 Beamdyn: A High-fidelity Wind Turbine Blade Solver in the Fast Modular Framework (Proceedings of the 33rd Wind Energy Symposium, AIAA 2015, Kissimmee, Florida)
- [14] Verelst D R S and Larsen T J 2010 Load Consequences when Sweeping Blades - A Case Study of a 5 MW Pitch Controlled Wind Turbine (Roskilde, Denmark: Risø-DTU, Technical Report Risø-R-1724)
- [15] Bottasso C, Campagnolo F, Croce A and Tibaldi C 2013 Optimization-Based Study of Bend-twist Coupled Rotor Blades for Passive and Integrated Passive and Active Load Alleviation Wind Energy vol. 16 nr 8 (John Wiley and Sons, Ltd.) pp 1149–1166 ISSN 1095-4244 URL <http://dx.doi.org/10.1002/we.1543>
- [16] Bottasso C L, Campagnolo F and Croce A 2012 Multi-disciplinary Constrained Optimization of Wind Turbines Multibody System Dynamics vol. 27 (Springer) pp 21 – 53 ISSN 1573-272X URL <http://dx.doi.org/10.1007/s11044-011-9271-x>
- [17] Ning S A, Damiani R and Moriarty P J 2014 Objectives and Constraints for Wind Turbine Optimization Solar Energy Engineering vol. 136 (ASME) URL <http://dx.doi.org/10.1115/1.4027693>
- [18] Zahle F, Tibaldi C, Verelst D R, Bak C, Bitche R and Blasques J P A A 2015 Aero-elastic Optimization of a 10 MW Wind Turbine Proceedings - 33rd Wind Energy Symposium vol. 1 (American Institute of Aeronautics and Astronautic) pp 201–223
- [19] Zahle F, Tibaldi C, Verelst D R, Bak C, Bitche R and Blasques J P A A 2015 Rotor Design Optimization Tools and Cost Models (Bremen, Germany: IQPC Workshop for Advances in Rotor Blades for Wind Turbines) URL [http://orbit.dtu.dk/files/115528875/iqpc\\_hawtopt2.pdf](http://orbit.dtu.dk/files/115528875/iqpc_hawtopt2.pdf)
- [20] Blanco M I 2009 The Economics of Wind Energy Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 13 nr 6–7 (Elsevier) pp 1372 – 1382 ISSN 1364-0321 URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.004>
- [21] Megavind Megavind Lcoe Model – Guidelines and Documentation URL [http://megavind.windpower.org/megavind/lcoe\\_calculator\\_model.html](http://megavind.windpower.org/megavind/lcoe_calculator_model.html)
- [22] Department of Trade and Industry - DTI 2007 Study of the Costs of Offshore Wind Generation - A Report to the Renewable Advisory Board (RAB) and DTI (UK: URN Number 07/779)
- [23] Krohn S, Morthorst P and Awerbuch S March 2009 The Economics of Wind Energy - A Report by the European Wind Energy Association (EWEA - European Wind Energy

Association) URL [http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics\\_of\\_Wind\\_Energy.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics_of_Wind_Energy.pdf)

[24] Douglas-Westwood 2010 Offshore Wind Assessment in Norway (Oslo: The Research Council of Norway)

[25] Consulting M 2011 Wind Turbine Trends (UK: MAKE Consulting) URL <http://www.consultmake.com/>

[26] Griffith D T and Johanns W April 2013 Large Blade Manufacturing Cost Studies Using the Sandia Blade Manufacturing Cost Tool and Sandia 100-meter Blades (Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550: Sandia National Laboratories) ISBN SAND2013-2734

[27] Paquette J and Veers P 2009 Increased Rotor Size Through Passive Load Control and Weight Reduction Concepts EWEC Proceedings (European Wind Energy Conference and Exhibition)

[28] McKenna R, Hollnaicher S, P Ostman P, Leye V D and Fichtner W 2015 Cost-potentials for Large Onshore Wind Turbines in Europe Energy vol. 83 (Elsevier) pp 217–229 URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.016>

[29] INNWIND Consortium Innovative Wind Conversion Systems (10-20mw) for Offshore Applications URL <http://www.innwind.eu/>

[30] Bergami L, Gaunaa M, Poulsen N and Buhl T 2013 Adaptive Trailing Edge Flaps for Active Load Alleviation in a Smart Rotor Configuration (Denmark: DTU Wind Energy) ISBN DTU Wind Energy PhD-0020(EN), DTU Wind Energy PhD-0020

[31] Shirk M, Hertz T and Weisshaar T A 1986 Aeroelastic tailoring – Theory, Practice, Promise Journal of Aircraft vol. 23 (AIAA) pp 6–18

[32] Munk M 1949 Propeller Containing Diagonally Disposed Fibrous Material (U.S. Patent 2,484,308,1111)

[33] NASA X-29 Forward Swept Wing Technology Demonstrator URL <https://www.nasa.gov/centers/Dryden/history/pastprojects/X29/index.html>

[34] NASA Active Aero-elastic Wing (AAW) URL <https://www.nasa.gov/centers/Dryden/history/pastprojects/AAW/index.html>

[35] Weisshaar T A 1978 Aeroelastic Stability and Performance Characteristics of Aircraft with Advanced Composite Swept forward Wing Structures (AFFDL-TR-78-116, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson AFB, Ohio)

[36] Weisshaar T A 1979 Forward Swept Wing Static Aero-elasticity (AFFDLTR-79-3087, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson AFB, Ohio)

- [37] Weisshaar T A 1980 The Influence of Aero-elasticity on Swept Composite Wings, Volume I Analysis (AFWAL-TR-80-3137, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson AFB, Ohio)
- [38] Weisshaar T A 1980 Divergence of Forward Swept Composite Wings Journal of Aircraft vol. 17 (AIAA) pp 442–448
- [39] Weisshaar T A 1980 Aeroelastic Tailoring of Forward Swept Composite Wings AIAA/ASME/ASCE/AHS 21st Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Seattle, Washington vol. 17 (AIAA 80-0795) pp 442–448
- [40] Librescu L and Thangjitham S 1988 The static Aero-elastic Behavior of Swept Forward Composite Wing Structures taking into account their Warping Restraint Effect Proc. 4th Japan-U.S. Conf. on Composite Materials, Washington, DC (Technomic, Lancaster-Basel) pp 914–922
- [41] Librescu L and Thangjitham S 1991 Analytical Studies on Static Aeroelastic Behavior of Forward-swept Composite Wing Structures Journal of Aircraft vol. 28 (AIAA) pp 151–157
- [42] Librescu L and Song O 1992 On the Static Aero-elastic Tailoring of Composite Aircraft Swept Wings Modelled as Thin-walled Beam Structure Composites Engineering vol. 2 (Elsevier) pp 497–512
- [43] Jutte C V and Stanford B K 2014 Aeroelastic Tailoring of Transport Aircraft Wings: State-of-the-Art and Potential Enabling Technologies (NASA/TM–2014-218252, Langley Research Center, Hampton, Virginia)
- [44] Larwood S and Zuteck M 2006 Swept Wind Turbine Blade Aeroelastic Modeling for Loads and Dynamic Behavior Pittsburgh, USA, 4-7 June 2006 (Windpower 2006) p 17
- [45] Ashwill T D, Kanaby G, Jackson K and Zuteck M 2010 Development of the Swept Twist Adaptive Rotor (star) Blade Orlando, Florida, 4-7 January 2010 (Proceedings of the 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting)
- [46] Zuteck M 2002 Adaptive Blade Concept Assessment: Curved Planform Induced Twist Investigation (Albuquerque, New Mexico, USA: Sandia National Laboratories, SAND2002-2996)
- [47] Hansen M H 2011 Aeroelastic Properties of Backward Swept Blades, 49<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando, Florida (AIAA)
- [48] Upwind Consortium 2011 UpWind, Design limits and solutions for very large wind turbines (EUPD - Sixth Framework Programme)
- [49] Jensen P H 2010 UpWind Activity Report year 4 (EUPD - Sixth Framework Programme)

- [50] M Capuzzi A Pirrera P W 2014 A novel adaptive blade concept for largescale wind turbines. part i: Aeroelastic behavior Energy vol. 73 (Elsevier) pp 15-24 URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.044>
- [51] M Capuzzi A Pirrera P W 2014 A novel adaptive blade concept for largescale wind turbines. part ii: Structural design and power performance Energy vol. 73 (Elsevier) pp 25-32 URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.073>
- [52] Karaolis N 1989 The design of fiber reinforced composite blades for passive and active wind turbine aerodynamic control dissertation (University of Reading, Department of Engineering)
- [53] Karaolis N 1989 The design of fiber reinforced composite blades for passive and active wind turbine aerodynamic control EWEC proceedings (European Wind Energy Conference and Exhibition)
- [54] Veers PS Bir G and Lobitz D 1998 Aeroelastic tailoring in wind-turbine blade applications Proceedings (Windpower '98 Meeting)
- [55] Lobitz D and Veers P 1998 Aeroelastic behavior of twist-coupled HAWT blades ASME/AIAA proceedings (ASME/AIAA Wind Energy Symposium, Reno, NV)
- [56] Lobitz D and Laino D 1999 Load mitigation with twist-coupled HAWT blades ASME/AIAA proceedings (ASME/AIAA Wind Energy Symposium, Reno, NV)
- [57] Lobitz D W and Veers P S 2003 Load mitigation with bending/twist coupled blades on rotors using modern control strategies Wind Energy vol. 6 nr 2 (John Wiley and Sons, Ltd.) pp 105–117 ISBN 1099-1824 URL <http://dx.doi.org/10.1002/we.74>
- [58] Berring P, Branner K and Berggreen C 2007 Torsional performance of wind turbine blades: Part i: Experimental investigation Proceedings of the 16th International conference on composite materials vol. 2 (Japan Society for Composite Materials) pp 1118–1119 ISBN 978-4-931136-06-9
- [59] Berring P, Branner K and Berggreen C 2007 Torsional performance of wind turbine blades: Part ii: Numerical validation Proceedings of the 16<sup>th</sup> International conference on composite materials vol. 2 (Japan Society for Composite Materials) p 1432 ISBN 978-4-931136-06-9
- [60] International Electrotechnical Commission 2005 International Standard, IEC 61400-1 Third Edition 2005-08, Wind Turbines - Part 1: Design Requirements (Reference Number IEC 61400-1:2005(EN))
- [61] Germanischer Lloyd 2010 Guideline for the Certification of Wind Turbines (Standard)
- [62] Timoshenko S and Goodier J N 1951 Theory of Elasticity (McGraw-Hill Book Company Inc.)

- [63] Petersen J T 1990 Kinematically Nonlinear Finite Element Model of a Horizontal Axis Wind Turbine (Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark)
- [64] Larsen T J and Hansen A M 2015 How 2 HAWC2, the user's manual DTU Wind Energy Risø-R-1597(ver.4.6)(EN), Roskilde, Denmark
- [65] DNV-GL Bladed wind turbine simulation tool URL <https://www.dnvgl.com/services/bladed-3775>
- [66] Vasilis, Riziotis 2003, Αεροδυναμική και Αεροελαστική Ανάλυση της Απώλειας Στήριξης σε Δρομείς Α/Γ
- [67] Dimitris, Manolas 2015, Hydro-Aero-Elastic Analysis of Offshore Wind Turbines
- [68] IEC. IEC 61400-1: Wind Turbines - Part 1: Design Requirements. Standard, Aug 2005
- [69] Cook, L. W., Jarrett, J. P., and Willcox, K. E., "Horsetail Matching for Optimization Under Probabilistic, Interval and Mixed Uncertainties," 19th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference, 2017, p. 0590.
- [70] DNV/Risø. Guidelines for Design of Wind Turbines. DNV/Risø, 2009.
- [71] C. C. Chamis. Simplified Composite Micromechanics Equations for Hygral, Thermal, and Mechanical Properties. *Sampe Quarterly*, 15:14–23, 1984.
- [72] M. Hinton, P. Soden, and Abdul-Salam Kaddour. *Failure Criteria in Fibre-Reinforced-Polymer Composites*. Elsevier, 2004.
- [73] Michael F. Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier, Forth Edition 2011.
- [74] K. E. Easterling, R. Harrysson, L. J. Gibson, and M. F. Ashby. On the Mechanics of Balsa and other Woods. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 383(1784):31–41, 1982. doi: 10.1098/rspa.1982.0118.
- [75] DOE / MSU Composite Material Fatigue Database, Mar. 2010. Version 19.
- [76] S. Laustsen, E. Lund, L. Kühlmeier, and O. T. Thomsen. Inter-fiber Failure Characterization of Unidirectional and Triax Glass Fiber Non-Crimp Fabric Reinforced Epoxy Laminates. *Applied Composite Materials*, 22(1):51–79, 2014.
- [77] S. W. Tsai and E. M. Wu. A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. *Journal of Composite Materials*, 5(1):58–80, 1971.
- [78] Merz K. O. 2015 Rapid Optimization of Stall-regulated Wind Turbine Blades using a Frequency-domain Method: Part 1, loads analysis *Wind Energy* vol. 18 (John/Wiley and Sons Ltd.) pp 1703–1723 ISSN 1099-1824 doi: 10.1002/we.1786
- [79] NASA Glenn Research Center OpenMDAO URL <http://openmdao.org>



- [80] Moore K, Naylor B and Gray J 2008 The development of an Open Source Framework for Multidisciplinary Analysis and Optimization 10<sup>th</sup> AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Victoria, Canada (AIAA)
- [81] Gray J S, Moore K T and Naylor B A 2010 OpenMDAO: An Open Source Framework for Multidisciplinary Analysis and Optimization 13<sup>th</sup> AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Fort Worth, Texas (AIAA)
- [82] Heath C M and Gray J S 2012 OpenMDAO: Framework for Flexible Multidisciplinary Design, Analysis and Optimization Methods 8th AIAA Multidisciplinary Design Optimization Specialist Conference (MDO), Honolulu, Hawaii (AIAA)
- [83] J. S. Gray, J. T. Hwang, J. R. R. A. Martins, K. T. Moore, and B. A. Naylor. OpenMDAO: An Open-source Framework for Multidisciplinary Design, Analysis, and Optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019. doi:10.1007/s00158-019-02211-z.
- [84] Perez R E, Jansen P W and Martins J R R A 2012 pyOpt: A Python Based Object-Oriented Framework for Nonlinear Constrained Optimization Structures and Multidisciplinary Optimization vol. 45 (Springer) pp 101–118 URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-011-0666-3>
- [85] Gray, J., Hearn, T., Moore, K., Hwang, J. T., Martins, J. R. R. A., and Ning, A., “Automatic Evaluation of Multidisciplinary Derivatives Using a Graph-Based Problem Formulation in OpenMDAO,” Proceedings of the 15th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Atlanta, GA, June 2014. doi:10.2514/6.2014-2042.
- [86] Graf, P., Dykes, K., Scott, G., Fields, J., Lunacek, M., Quick, J., and Rethore, P.-E., “Wind Farm Turbine Type and Placement Optimization,” Journal of Physics: Conference Series, Vol. 753, IOP Publishing, 2016, p. 062004.
- [87] Ning, A. and Petch, D., “Integrated Design of Downwind Land-based Wind Turbines using Analytic Gradients,” Wind Energy, 2016.
- [88] Barlas, A. K., Tibaldi, C., Zahle, F., and Madsen, H. A., “Aeroelastic Optimization of a 10MW Wind Turbine Blade with Active Trailing Edge Flaps,” 34th Wind Energy Symposium, 2016, p. 1262.
- [89] Hwang, J. T., Lee, D. Y., Cutler, J. W., and Martins, J. R. R. A., “Large-scale Multidisciplinary Optimization of a Small Satellite’s Design and Operation,” Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 51, No. 5, September 2014, pp. 1648–1663. doi:10.2514/1.A32751.
- [90] Hwang, J. T. and Martins, J. R. R. A., “Allocation-mission-design Optimization of Next-generation Aircraft using a Parallel Computational Framework,” 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, San Diego, CA, Jan 2016.
- [91] Leal, P. B., Hartl, D. J., and Bertagne, C. L., “Aero-structural Optimization of Shape Memory Alloy-based Wing Morphing via a Class/Shape Transformation Approach,” 23rd AIAA/AHS Adaptive Structures Conference, 2015, p. 0731.

- [92] Friedman, S., Ghoreishi, S. F., and Allaire, D. L., "Quantifying the Impact of Different Model Discrepancy Formulations in Coupled Multidisciplinary Systems," 19th AIAA Non Deterministic Approaches Conference, 2017, p. 1950.
- [93] Hearn, T. A., Hendricks, E., Chin, J., and Gray, J. S., "Optimization of Turbine Engine Cycle Analysis with Analytic Derivatives," 17th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2016, p. 4297.
- [94] Gray, J. S., Chin, J., Hearn, T., Hendricks, E. S., Lavelle, T. M., and Martins, J., "Thermodynamics For Gas Turbine Cycles With Analytic Derivatives in OpenMDAO," 57<sup>th</sup> AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2016, p. 0669.
- [95] Gill P E, Murray W and Saunders M A 2002 Snopt: An Sqp Algorithm for Large-scale Constrained Optimization Journal on Optimization vol. 12 (SIAM) pp 979–1006 URL <http://www.siam.org/journals/sirev/47-1/44609.html>
- [96] Lambe A B and Martins J R R A 2012 Extensions to the Design Structure Matrix for the Description of Multidisciplinary Design, Analysis, and Optimization Processes Structural and Multidisciplinary Optimization vol. 46 (Springer) pp 273–284 URL doi:10.1007/s00158-012-0763-y
- [97] Zahle F, Tibaldi C, Pavese C, McWilliam M K, Blasques J P A A and Hansen M H 2016 Design of an Aero-elastically Tailored 10 MW Wind Turbine Rotor Journal of Physics: Conference Series - The Science of Making Torque from Wind 2016 vol. 753 (IOP Publishing) URL <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/753/6/062008/pdf>
- [98] Bagherpour T, Li X, Manolas D and Riziotis V 2017 Modeling of material bend-twist coupling on wind turbine blades J. Composite Structures 193 (2018) 237-246 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.071>)
- [99] Manolas D, Serafeim G, Chaviopoulos P, Riziotis V and Voutsinas S 2018 Assessment of load reduction capabilities using passive and active control methods on a 10MW-scale wind turbine, J. Phys.: Conf. Ser. 1037 (2018) 032042 DOI:10.1088/1742-6596/1037/3/032042