



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΗΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

**Στατική ανάλυση πτερυγίων με σύζευξη κάμψης/στρέψης με
χρήση μεθόδου 3D πεπερασμένων στοιχείων – Εφαρμογή στο
λογισμικό ANSYS (APDL)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΛΙΟΥΣΣΕΦ ΙΟΥΣΣΕΦ

Επιβλέπων : ΡΙΖΙΩΤΗΣ ΒΑΣΙΛΗΣ
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΕΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

**Στατική ανάλυση πτερυγίων με σύζευξη κάμψης/στρέψης με
χρήση μεθόδου 3D πεπερασμένων στοιχείων – Εφαρμογή στο
λογισμικό ANSYS (APDL)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΛΙΟΥΣΣΕΦ ΙΟΥΣΣΕΦ

Επιβλέπων : ΡΙΖΙΩΤΗΣ ΒΑΣΙΛΗΣ
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31 Οκτωβρίου 2019.

(Υπογραφή)

.....

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτωβρίου 2019

(Υπογραφή)

.....

ΑΛΙΟΥΣΣΕΦ ΙΟΥΣΣΕΦ

Διπλωματούχος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

© 2019 – All rights reserved

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, αξιολογείται η πιθανότητα ανακούφισης των φορτίων των ανεμογεννητριών μέσω της μεθόδου παθητικού ελέγχου που πραγματοποιείται μέσω της ζεύξης κάμψης-στρέψης. Η σύζευξη υλοποιείται με την αλλαγή της γωνίας του προσανατολισμού των ινών των στρώσεων του μονοαξονικού (UD) υλικού στα Καπάκια (Caps) του πτερυγίου. Επίσης, διερευνάται ο λυγισμός του πτερυγίου, είτε αυτός προκαλείται λόγω των κρίσιμων φορτίων (Buckling Analysis) ή λόγω των κρίσιμων ιδιοσυχνοτήτων (Modal Analysis). Επιπλέον, η μείωση του κόστους διερευνάται μέσω της μείωσης της μάζας των πτερυγίων, διατηρώντας παράλληλα τα ίδια επίπεδα τάσεων στις διατομές κατά μήκος της ακτίνας των πτερυγίων σε σύγκριση με την βασική διαμόρφωση. Η ανάλυση βασίζεται σε αεροελαστικές προσομοιώσεις της ανεμογεννήτριας αναφοράς 10MW DTU για την εκτίμηση των φορτίων τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τάσεων στο λογισμικό Ansys (APDL). Για τον υπολογισμό των φορτίων σχεδιασμού προσομοιώνεται ένα υποσύνολο των αντιπροσωπευτικών τελικών περιπτώσεων φορτίου σχεδιασμού του IEC. Εκτελείται προκαταρκτική εκτίμηση των επιπέδων μείωσης φορτίου και μάζας σε σχέση με την αρχική διαμόρφωση πτερυγίου χωρίς σύζευξη κάμψης-στρέψης.

Λέξεις Κλειδιά: Σύζευξη Κάμψης-Στρέψης, Πτερύγιο μεγάλης κλίμακας ανεμογεννήτριας, Φορτίο, Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, Ελαφρύς Σχεδιασμός πτερυγίου, Ανάλυση λυγισμού, ιδιοσυχνότητες, Ίνες σε μονοαξονικό υλικό, Κατανομή τάσεων, Λυγισμός.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Ευχαριστίες

Στο μικρό μου Άχμεντ που φώτισε την ζωή μου πριν λίγες μέρες

...

Στην σύζυγό μου που πάντα με υποστηρίζει με κάθε τρόπο

...

Στους γονείς μου που είναι ο λόγος της κάθε επιτυχίας μου

...

Στα αδέρφια μου

...

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή Ριζιώτη Β. που με τίμησε δίνοντας την ευκαιρία να πραγματοποιήσω αυτήν την έρευνα υπό την επίβλεψή του.
Επίσης, ευχαριστώ τον Σεραφείμ Γ. για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη του.



**He said "My Lord for the favor You bestowed upon me
I will never be an assistant to the criminals"**

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	7
1.1	Γενική περιγραφή του προβλήματος.....	7
1.2	Αντικείμενο διπλωματικής.....	8
1.3	Οργάνωση κειμένου της εργασίας.....	9
2	Ερευνητική κατάσταση του πτερυγίου με BTC	11
2.1	Εφαρμογή της BTC.....	11
2.2	Μέθοδος σχεδιασμού της δοκού.....	12
2.3	Επιδρώντες παράγοντες στο πτερόγιο με BTC.....	13
2.4	Εφαρμογή του πτερυγίου με BTC.....	14
3	Ελαστική σύζευξη σε σύνθετα υλικά	16
3.1	Υπολογισμός Φορτίου σε πτερόγιο ανεμογεννήτριας.....	18
3.2	Υπολογισμός Φορτίων βάση το λογισμικό hGAST.....	19
3.3	Υπολογισμός αεροδυναμικού φορτίου στην ονομαστική ταχύτητα του αέρα.....	19
3.4	Υπολογισμός μέγιστου φορτίου.....	21
4	Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της DTU 10 MW	23
4.1	Γεωμετρία πτερυγίου.....	23
4.2	Παράμετροι υλικών.....	25
4.3	Μοντέλο δομικής μηχανικής πτερυγίου ανεμογεννήτριας.....	28
5	Εγκυρότητα μοντέλου	31
5.1	Έλεγχος μάζας και κέντρο βαρύτητας.....	31
5.2	Έλεγχος της φυσικής συχνότητας του μοντέλου.....	32
5.3	Σύγκριση με τα αποτελέσματα της Ζιβεν.....	32
5.4	Ανάλυση χαρακτηριστικών πτερυγίου.....	33
5.5	Μελέτη λυγισμού πτερυγίου.....	36
5.5.1	Ορισμός.....	36
5.5.2	Λυγισμός λόγω φορτίου (<i>Eigen value Buckling</i>).....	36
5.5.3	Λυγισμός λόγω δόνησης (<i>Modal Analysis</i>).....	39
5.6	Ελαφρύς σχεδιασμός πτερυγίου με BTC.....	40
5.7	Ελαχιστοποίηση πάχους πτερυγίου.....	41

5.7.1	Ανάλυση τάσεων σε διατομή.....	41
	<i>Διάγραμμα 34: Οι ορθές τάσεις κόμβων κατά τον άξονα Z της μονοαξονικής στρώσης της διατομής της απόστασης 26.199 m από την ρίζα.....</i>	<i>42</i>
5.7.2	Ανάλυση τάσεων κατά μήκος καπακιών πτερυγίου.....	46
5.8	Δυσκαμψία πτερυγίου και έλεγχος μοντέλου μειωμένου μάζας.....	49
6	Βιβλιογραφία.....	54

Λίστα των διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Η ανταπόκριση του συζευγμένο με κάμψη-στρέψη πτερυγίου ανεμογεννήτριας σε φορτίο κάμψης.....	12
Διάγραμμα 2: Ορθές και διατμητικές τάσεις μιας στρώσης.....	17
Διάγραμμα 3: Συζευγμένη ανταπόκριση μιας πλάκας με γωνιακές ίνες.....	18
Διάγραμμα 4: Μηχανισμός σύζευξης σε σύνθετη δοκό.....	18
Διάγραμμα 5: Τα αεροδυναμικά φορτία κατά την περιστροφή (Flap-wise).....	20
Διάγραμμα 6: Τα αεροδυναμικά φορτία κατά την πτερύγιση (Edge-wise).....	20
Διάγραμμα 7: Τα αεροδυναμικά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου.....	20
Διάγραμμα 8 Η αεροδυναμική ροπή γύρω από τον άξονα Z.....	21
Διάγραμμα 9: Δομικά φορτία σύμφωνα με DLC1.3.....	22
Διάγραμμα 10: Η κατανομή των διατομών κατά μήκος του πτερυγίου.....	23
Διάγραμμα 11: Η κατανομή της γωνίας της αρχικής στρέψης του πτερυγίου σε μοίρες.....	24
Διάγραμμα 12: Η κατανομή του μήκους χορδής κατά μήκος του πτερυγίου.....	24
Διάγραμμα 13: Η κατανομή της αρχικής κάμψης κατά μήκος του πτερυγίου.....	25
Διάγραμμα 14: Το πτερύγιο με αρχική κάμψη.....	25
Διάγραμμα 15: Οι 11 βασικές περιοχές μιας αεροτομής του πτερυγίου.....	26
Διάγραμμα 16: Οι σύνθετες στρώσεις των περιοχών του πτερυγίου.....	27
Διάγραμμα 17: Η κατανομή του συνολικού πάχους των τμημάτων του πτερυγίου.....	27
Διάγραμμα 18: Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων του πτερυγίου.....	29
Διάγραμμα 19: Ένας περιορισμός πολλαπλών σημείων (MPC) με τους δικούς του ακόλουθους κόμβους.....	30
Διάγραμμα 20: Σύγκριση του βέλους κάμψης της παρούσας εργασίας με το αντίστοιχο βέλος της [].....	33
Διάγραμμα 21: Η γωνία των ινών της στρώσης σε πτερύγια με σύζευξη κάμψης-στρέψης....	33
Διάγραμμα 22: Το βέλος κάμψης κατά τον άξονα Y σε διάφορες γωνίες στρώσεων.....	34
Διάγραμμα 23: Κατανομή της γωνίας στροφής γύρω από τον άξονα Z σε διάφορες γωνίες στρώσεων.....	35
Διάγραμμα 24: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου σε διάφορες γωνίες στρώσεων και με αρχικό πάχος.....	37
Διάγραμμα 25: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου σε διάφορες γωνίες στρώσεων και με μειωμένο πάχος κατά 5 %.....	37
Διάγραμμα 26 Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου σε διάφορες γωνίες στρώσεων και με μειωμένο πάχος κατά 10 %.....	37
Διάγραμμα 27: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου της γωνίας 0 σε διάφορα πάχη στρώσεων.....	38

Διάγραμμα 28: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου της γωνίας 5 σε διάφορα πάχη στρώσεων.	38
Διάγραμμα 29: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου της γωνίας 10 σε διάφορα πάχη στρώσεων.	38
Διάγραμμα 30: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου της γωνίας 15 σε διάφορα πάχη στρώσεων.	39
Διάγραμμα 31: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου της γωνίας 20 σε διάφορα πάχη στρώσεων.	39
Διάγραμμα 32: Οι πρώτες οκτώ φυσικών συχνοτήτων του πτερυγίου σε διαφορετικές γωνίες στρώσεων.	40
Διάγραμμα 33: Τα πεπερασμένα στοιχεία της διατομής της θέσης $Z=26.199$	42
Διάγραμμα 34: Οι ορθές τάσεις κόμβων κατά τον άξονα Z της μονοαξονικής στρώσης της διατομής της απόστασης 26.199 m από την ρίζα.	42
Διάγραμμα 35: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων της διατομής $r =26.199$ m σε διάφορες γωνίες στρώσης χωρίς μείωση πάχους.....	43
Διάγραμμα 36: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων της διατομής $r =26.199$ m σε διάφορες γωνίες στρώσης με μειωμένο πάχους κατά 5%	43
Διάγραμμα 37: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων της διατομής $r =26.199$ m σε διάφορες γωνίες στρώσης με μειωμένο πάχους κατά 10%	43
Διάγραμμα 38: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων της διατομής $r =26.199$ m σε γωνία 0° αλλά με διαφορετικά πάχη.....	44
Διάγραμμα 39: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων της διατομής $r =26.199$ m σε γωνία 5° αλλά με διαφορετικά πάχη.....	44
Διάγραμμα 40: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων της διατομής $r =26.199$ m σε γωνία 10° αλλά με διαφορετικά πάχη.....	44
Διάγραμμα 41: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων της διατομής $r =26.199$ m σε γωνία 15° αλλά με διαφορετικά πάχη.....	45
Διάγραμμα 42: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων της διατομής $r =26.199$ m σε γωνία 20° αλλά με διαφορετικά πάχη.....	45
Διάγραμμα 43: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων των κάτω καπακιών σε διαφορετικές γωνίες στρώσης σε αρχικό πάχος.	46
Διάγραμμα 44: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων των κάτω καπακιών σε διαφορετικές γωνίες στρώσης σε μειωμένο πάχος κατά 5%.....	46
Διάγραμμα 45: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων των κάτω καπακιών σε διαφορετικές γωνίες στρώσης σε μειωμένο πάχος κατά 10%.....	47
Διάγραμμα 46: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z , κόμβων των κάτω καπακιών σε μηδενική γωνία στρώσης σε διάφορα πάχη.....	47

Διάγραμμα 47: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω καπακιών σε γωνία στρώσης 5° σε διάφορα πάχη.....	47
Διάγραμμα 48: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω καπακιών σε γωνία στρώσης 10° σε διάφορα πάχη.....	48
Διάγραμμα 49: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω καπακιών σε γωνία στρώσης 15° σε διάφορα πάχη.....	48
Διάγραμμα 50: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω καπακιών σε γωνία στρώσης 20° σε διάφορα πάχη.....	48
Διάγραμμα 51: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα X της πρώτης στρώσης του πτερυγίου.....	51
Διάγραμμα 52: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Y της πρώτης στρώσης του πτερυγίου.....	51
Διάγραμμα 53: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Z της πρώτης στρώσης του πτερυγίου.....	51
Διάγραμμα 54: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα X της δεύτερης στρώσης του πτερυγίου.....	51
Διάγραμμα 55: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Y της δεύτερης στρώσης του πτερυγίου.....	52
Διάγραμμα 56: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Z της δεύτερης στρώσης του πτερυγίου.....	52
Διάγραμμα 57: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα X της τέταρτης στρώσης του πτερυγίου.....	52
Διάγραμμα 58: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Y της τέταρτης στρώσης του πτερυγίου.....	52
Διάγραμμα 59: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Z της τέταρτης στρώσης του πτερυγίου.....	53
Διάγραμμα 60: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα X της πέμπτης στρώσης του πτερυγίου.....	53
Διάγραμμα 61: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Y της πέμπτης στρώσης του πτερυγίου.....	53
Διάγραμμα 62: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Z της πέμπτης στρώσης του πτερυγίου.....	53

Λίστα των πινάκων

Πίνακας 4-1: Οι ιδιότητες των υλικών του πτερυγίου DTU 10 MW	25
Πίνακας 5-1: Σύγκριση της μάζας και του κέντρου βαρύτητας του υπολογιστικού μοντέλου με το πραγματικό μοντέλο.....	31
Πίνακας 5-2: Σύγκριση των φυσικών συχνοτήτων του πτερυγίου.....	32
Πίνακας 5-4: Η αντοχή των υλικών του πτερυγίου.....	49
Πίνακας 5-5: Οι μέγιστες ορθές τάσεις των γωνιών 5, 10, 15, και 20 μοιρών αφού μειώθηκε το πάχος του πτερυγίου κατά 10%.	50

1

Εισαγωγή

1.1 Γενική περιγραφή του προβλήματος

Με την διαρκή μείωση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων και την ανάγκη κάλυψης της απαίτησης της μείωσης των εκπομπών CO₂ του περιβάλλοντος, έχει γίνει κοινή συνείδηση ότι πρέπει να επιταχυνθεί η ανάπτυξη καθαρών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αιολική ενέργεια, η οποία προέρχεται από τη ροή του αέρα, είναι ανεξάντλητη και έχει μικρή επίδραση στο περιβάλλον. Την τελευταία δεκαετία, η τεχνολογία αιολικής ενέργειας έχει κάνει σημαντικό άλμα. Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία του Παγκόσμιου Συνδέσμου [1], η ισχύς που παρήγαγε το 2018 από την αιολική ενέργεια μπορεί να καλύψει μέχρι 6% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τεχνολογία της αιολικής ενέργειας γνώρισε ταχεία ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία και συνεχώς ωριμάζει και καινοτομεί. Προκειμένου να δεσμευτεί περισσότερη αιολική ενέργεια, η ονομαστική ισχύς των ανεμογεννητριών αυξάνεται. Η Vestas 9.5 MW υπεράκτια ανεμογεννήτρια, Siemens 8MW υπεράκτια ανεμογεννήτρια και άλλες ανεμογεννήτριες έχουν τεθεί στην αγορά. Εκτός από την ανάπτυξη νέων ανεμογεννητριών, έχει προχωρήσει και η επιστημονική έρευνα. Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Urwind [2] έχει προβεί σε ανάλυση σκοπιμότητας για ανεμογεννήτρια 20MW. Η υλοποίηση ανεμογεννητριών 10-20MW απαιτεί τεχνικές καινοτομίες και καινοτόμες ιδέες που συνδυάζουν νέα προηγμένα υλικά, μεθόδους υβριδικών κατασκευών, νέα σχέδια εσωτερικών δομών, νέες παχιές αεροτομές υψηλών επιδόσεων και τεχνικές ενεργού ή παθητικού αεροελαστικού ελέγχου [3]. Μεταξύ των παραπάνω, οι μέθοδοι παθητικού ελέγχου έχουν αποδειχθεί πολύ ελπιδοφόρες για τη μείωση των φορτίων των πτερυγίων των ανεμογεννητριών [4].

Η αύξηση της ισχύος της ανεμογεννήτριας συνοδεύεται από την αύξηση του μεγέθους των πτερυγίων. Η διάμετρος των προαναφερθέντων πτερυγίων μεγάλων ανεμογεννητριών είναι μεταξύ 140 και 260 m. Με την αύξηση του μεγέθους των πτερυγίων, η δυσκαμψία, η μάζα και τα φορτία του πτερυγίου γίνονται επίσης μεγαλύτερα. Η μείωση του φορτίου κόπωσης και του ακραίου φορτίου είναι απαραίτητη για την αύξηση της αξιοπιστίας και της διάρκειας ζωής των πτερυγίων. Επιπλέον, η μείωση του φορτίου παρέχει επίσης τη δυνατότητα να μειωθεί η χρήση υλικών υψηλής απόδοσης και να πραγματοποιηθεί μεγάλη κλίμακας ανεμογεννήτρια, η οποία έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή. Γενικά, με σκοπό τη μείωση των φορτίων χρησιμοποιούνται ενεργές και παθητικές τεχνικές. Στο ενεργητικό έλεγχο, το πτερύγιο ελέγχεται ενεργά αλλάζοντας το βήμα του πτερυγίου ή χρησιμοποιώντας ενεργές συσκευές όπως τα μεταπτερύγια της ακμής εκφυγής (Trailing-edge Flaps). Σε αντίθεση με την ενεργή μέθοδο, η παθητική μέθοδος είναι πιο ελκυστική καθώς εκμεταλλεύεται τον δομικό χαρακτήρα σύζευξης κάμψης-στρέψης (Bind-Twist Coupling BTC) του σύνθετου υλικού, επομένως είναι πιο απλή από κατασκευαστική άποψη και πιο οικονομική. Η σύζευξη κάμψης-στρέψης BTC περιγράφει τη συμπεριφορά με την οποία το σύνθετο πτερύγιο θα στρέψει καθώς κάμπτεται κάτω από το αεροδυναμικό φορτίο που δίνει μια αλλαγή στη γωνία προσβολής, μειώνοντας έτσι το φορτίο άνεσης [5].

Η παρούσα έρευνα θα μελετήσει την παθητική μείωση φορτίου και πάχους του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας 10 MW DTU. Η σύζευξη κάμψης-στρέψης πραγματοποιείται αλλάζοντας την γωνία του προσανατολισμού των ινών των στρώσεων των μονοαξονικών υλικών στα Καπάκια (Caps) της δοκού και θα προσομοιωθεί, υπολογιστικά, η συμπεριφορά της μέσω του λογισμικού Ansys-APDL.

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής

Με την αύξηση του μεγέθους των πτερυγίων ανεμογεννητριών, η μάζα και τα φορτία των πτερυγίων αυξάνονται επίσης. Το πτερύγιο το οποίο έχει σχεδιαστεί για να ενεργοποιεί τη σύζευξη μεταξύ κάμψης και στρέψης (το αποκαλούμενο Bend-Twist Coupling BTC) θα στρέψει καθώς κάμπτεται κάτω από το φορτίο ανέμου, γεγονός που ανακουφίζει την αεροδυναμική δύναμη ως αποτέλεσμα της αλλαγής της γωνίας προσβολής. Τα χαρακτηριστικά του BTC ερευνώνται από τη σκοπιά της υπολογιστικής ανάλυσης και η μάζα του πτερυγίου μειώνεται σε αυτή τη βάση, γεγονός που συμβάλλει στην υλοποίηση της μεγάλης κλίμακας ανεμογεννήτριας και στη μείωση του επιπέδου κόστους της ενέργειας. Η κύρια έρευνα και τα αποτελέσματα της εργασίας έχουν ως εξής:

(1) Οι μη γραμμικές αεροδυναμικές προσομοιώσεις της πλήρους ανεμογεννήτριας στο χρόνο πραγματοποιούνται με τη χρήση του servo-aero-elastic solver hGAST. Στον επιλύτη hGAST, η πλήρης ανεμογεννήτρια θεωρείται ότι έχει, ως κύρια συνιστώσα, τα πτερύγια, το

αξονικό σύστημα και τον πύργο. Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται στο πλαίσιο της μεθόδου των πολλαπλών σωμάτων. Τα αεροδυναμικά φορτία του BTC πτερυγίου υπολογίζονται με βάση τη θεωρία της δοκού. Τα παραπάνω φορτία έγιναν δεδομένα εισαγωγής για το σχεδιασμό ενός πτερυγίου μειωμένης μάζας.

(2) Η πολύπλοκη γεωμετρία του πτερυγίου σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα παραμετρικού σχεδιασμού του APDL (Το κλασικό Ansys) η οποία διευκολύνει τη διαδικασία σχεδιασμού μέσω εκτέλεσης λίγων, σχετικά, εντολών. Αυτή η μέθοδος ενισχύει τη ταχύτητα σχεδιασμού και αντανακλά λεπτομερώς τις παραμορφώσεις και τις τάσεις της δομής. Στη συνέχεια, επαληθεύεται το μοντέλο μέσω σύγκρισης μάζας, φυσικής συχνότητας και βέλους κάμψης.

(3) Η BTC επιτυγχάνεται εισάγοντας μία αλλαγή γωνίας του προσανατολισμού των ινών στις στρώσεις του υλικού στα Καπάκια της δοκού του πτερυγίου. Εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής γωνίας των στρώσεων. Στη συνέχεια αναλύεται η επίδραση της παραπάνω σύζευξης στη φυσική συχνότητα ταλάντωσης και στον λυγισμό.

(4) Η μείωση της μάζας με τη μείωση του πάχους του υλικού με ομοιόμορφο συντελεστή διερευνάται, ενώ καταγράφονται τα επίπεδα τάσης του πτερυγίου με BTC. Ο τελικός έλεγχος αντοχής πραγματοποιείται στο πτερύγιο μετά τη μείωση του υλικού ώστε να εξασφαλιστεί ότι το πτερύγιο πληροί τις τελικές απαιτήσεις αντοχής και δεν θα υπάρξει ατύχημα συντονισμού.

Το περιεχόμενο της παρούσας έρευνας συμβάλει στη μείωση και της μάζας και των τάσεων του πτερυγίου ανεμογεννήτριας τα οποία είναι αρκετά σημαντικά στη πραγματοποίηση της μεγάλης κλίμακας ανεμογεννήτριας.

1.3 Οργάνωση κειμένου της εργασίας

Η μελέτη βασίζεται στο πτερύγιο της ανεμογεννήτριας της αναφοράς και τα χαρακτηριστικά της BTC αναλύονται με αριθμητική μέθοδο προσομοίωσης μέσω του λογισμικού Ansys (APDL). Σε αυτή τη φάση, η μάζα των πτερυγίου μειώνεται και αυτό σημαίνει μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας. Τα περιεχόμενα της έρευνας είναι τα εξής:

Στο κεφαλαίο 2 παρουσιάζεται η ιδέα της σύζευξης κάμψης-στρέψης και την εισαγωγή της στο σχεδιασμό των πτερυγίων των ανεμογεννητριών. Επίσης αναφέρθηκαν όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός πτερυγίου με σύζευξη κάμψης-στρέψης.

Το κεφαλαίο 3 παρουσιάζει εν συντομία, την θεωρητική γνώση που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα περιλαμβάνοντας την ελαστική σύζευξη στα σύνθετα υλικά, την θεωρία της δυναμικής των πολλαπλών σωμάτων (Multi-bodies) που χρησιμοποιείται στο λογισμικό hGAST, την θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται στο λογισμικό ANSYS και την θεωρία ορμής στοιχείων πτερυγίου (BEM) που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς των αεροδυναμικών φορτίων. Αυτές οι θεωρητικές γνώσεις είναι η βάση για την ακόλουθη οικοδόμηση του μοντέλου

και για τους ακόλουθους υπολογισμούς φορτίων.

Στο κεφαλαίο 4, χτίζεται το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων της ανεμογεννήτριας της αναφοράς αφού παρουσιάζονται τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά και τα βήματα σχεδιασμού μέσω λογισμικού Ansys (APDL). Παρουσιάζονται οι παράμετροι των υλικών που χρησιμοποιούνται στις διάφορες περιοχές και στις διάφορες στρώσεις της κάθε περιοχής.

Στο κεφαλαίο 5, μελετήθηκε η εγκυρότητα του μοντέλου, ύστερα ελέγχθηκε το σύνολο του μοντέλου αναλύοντας όλα τα χαρακτηριστικά του πτερυγίου, μελετήθηκε η επίδραση των φυσικών συχνοτήτων και πως επηρεάζουν την διαδικασία σχεδιασμού. Επίσης, μελετήθηκε ο λυγισμός είτε αυτός που παράγεται από τα κρίσιμα φορτία είτε αυτός που προκαλείται λόγω των συχνοτήτων συντονισμού. Εξετάστηκε η πιθανότητα σχεδιασμού πτερυγίου με μικρότερο πάχος το οποίο σημαίνει μικρότερη μάζα και μικρότερο κόστος. Αναλύονται τα επίπεδα τάσης και η κατανομή τους στο κανονικό πτερύγιο και στο πτερύγιο που έχει BTC. Εν τέλει, ερευνάται η κατανομή τάσεων κατά μήκος των καπακιών, που είναι το βασικό μέρος που δέχεται τα αεροδυναμικά φορτία, κατά μήκος όλου του πτερυγίου.

Το πτερύγιο με σύζευξη κάμψης-στρέψης ολοκληρώθηκε εισάγοντας την αλλαγή της γωνίας των ινών στις στρώσεις των υλικών των καπακιών (Caps) της δοκού. Επίσης, έχουν μελετηθεί οι παραμορφώσεις του πτερυγίου με διαφορετικές γωνίες (0° , 5° , 10° , 15° και 20°) στις στρώσεις του υλικού και η επίδραση της BTC στις φυσικές συχνότητες του πτερυγίου.

2

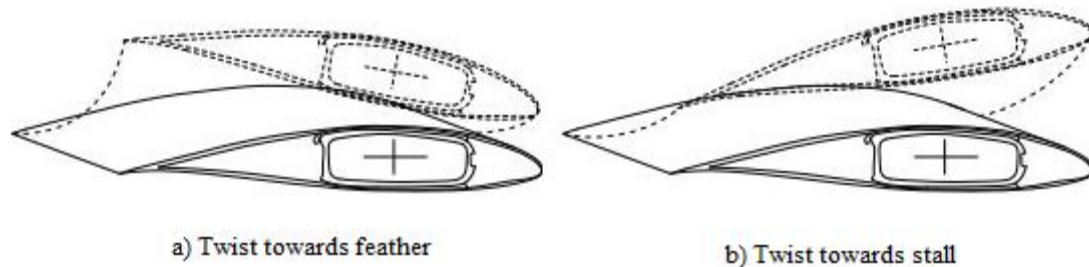
Ερευνητική κατάσταση του πτερυγίου με BTC

2.1 Εφαρμογή της BTC

Η ιδέα της σύζευξης κάμψης-στρέψης (Bend-Twist Coupling BTC) προέρχεται από την αεροναυπηγική βιομηχανία και χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία στο σχεδιασμό του Saber F-86 και του Boeing B-47 Stratojet για να μετριάσει το αεροδυναμικό φορτίο [6]. Μια επιθυμητή BTC μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση οπισθοκλινούς (sweep-geometry) πτερυγίου ή / και με προσαρμογή υλικών με μεταποιημένες σύνθετες στρώσεις. Το πτερύγιο με οπισθόκλιση εκμεταλλεύεται την γεωμετρική σύζευξη [7], και το προφίλ του πτερυγίου είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να εκτρέπεται από τον δικό του άξονα πρόνευσης (Pitch axis) και να κάμπτεται στην αντίθετη κατεύθυνση της περιστροφής. Με αυτόν τον τρόπο, όταν το πτερύγιο υποστεί αεροδυναμικό φορτίο, τότε θα στρίβει καθώς κάμπτεται. Όμως, Ο σχεδιασμός και η ανάλυση πτερυγίου με οπισθόκλιση είναι ένα αποθαρρυντικό έργο και η κατασκευή του είναι δυσλειτουργική και αντιοικονομική. Από την άλλη, τα μοντέρνα πτερύγια των μεγάλων ανεμογεννητριών είναι βασικώς κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά με μεγάλη αναλογία ειδικής αντοχής (Specific Stiffness). Στη βιομηχανία, τα ενισχυμένα με ίνες σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε πολυστρωματική μορφή όπου οι δομές χτίζονται σε στρώματα το ένα πάνω από το άλλο. Έτσι, η συνολική δομή των μοντέρνων πτερυγίων ανεμογεννητριών είναι χτισμένη από στρώματα, το ένα πάνω από το άλλο και οι ιδιότητες του υλικού του πτερυγίου προσδιορίζονται από τις ιδιότητες του υλικού του συνολικού στρώματος. Για αυτό, ο σχεδιασμός ενός προσαρμοστικού πτερυγίου που χρησιμοποιεί την ανισοτροπία του σύνθετου υλικού, μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικό και πιο οικονομικό.

Ένα προσαρμοστικό πτερύγιο μπορεί να σχεδιαστεί για να στρέψει είτε προς την

αποκόλληση (Stall), δηλαδή προς την περιοχή με μεγαλύτερη γωνία προσβολής και αποκόλληση ροής, ή προς πτερύγιση (Feather), δηλαδή προς την περιοχή με μικρότερη γωνία προσβολής για να μειώνει την άντωση. Οι δύο περιπτώσεις φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 1: Η ανταπόκριση του συζευγμένο με κάμψη-στρέψη πτερυγίου ανεμογεννήτριας σε φορτίο κάμψης.

Η πρόσφατη έρευνα επικεντρώνεται στη BTC με στρέψη προς πτερύγιση λόγω της γρήγορης αντίδρασής της στους κυματισμούς των ανέμων και του αποτελεσματικού μετριασμού του φορτίου κόπωσης [8].

2.2 Μέθοδος σχεδιασμού της δοκού

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι κατασκευές με μεγάλο μήκος και μικρών διαστάσεων εγκάρσιες τομές. Συνήθως προσομοιώνονται με τη μορφή μονοδιάστατης δοκού συνδυασμένη με ανάλυση δισδιάστατων διατομών. Το εν λόγω μοντέλο υποθέτει ότι η δοκός είναι κατασκευασμένη από ομογενή και ισότροπα υλικά για αυτό δε καταφέρνει να λάβει υπ' όψιν τις ανισότροπες επιδράσεις και τις επιδράσεις της στρέβλωσης που προκαλούνται από τα σύνθετα υλικά. Για να νικηθούν αυτά τα προβλήματα, ο Giavotto et al.[13] πρότεινε μια δισδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για να υπολογιστούν οι συναρτήσεις στρέβλωσης και οι ιδιότητες των δομών της δοκού. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, ο Blasques et al.[10] ανέπτυξε το λογισμικό BECAS, που είναι εργαλείο ανάλυσης των χαρακτηριστικών των διατομών των ανεμογεννητριών, σε συνδυασμό με την θεωρία του Saint-Venant. Για τη μοντελοποίηση μονοδιάστατης δοκού, ο Kim et al. [11] προτείνει την μοντελοποίηση της ανισότροπης δοκού με βάση τη θεωρία της δοκού του Timoshenko και την προαναφερθείσα γενικευμένη ανάλυση δισδιάστατης διατομής με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η απλοποιημένη μέθοδος μοντελοποίησης μπορεί να επιτύχει ικανοποιητική ακρίβεια για ένα πτερύγιο με απλή κατασκευή.

Η συνολική δομή ενός σύγχρονου πτερυγίου ανεμογεννήτριας είναι χτισμένη από πολυστρωματικά σύνθετα υλικά. Οι παράμετροι όπως το υλικό, το πάχος και το πλάτος των στρώσεων είναι πολύπλοκοι και μεταβλητοί. Προκειμένου να βελτιωθεί η αεροδυναμική συμπεριφορά, το πτερύγιο μπορεί να κατασκευαστεί / διαμορφωθεί από τη ρίζα μέχρι το άκρο με εκατοντάδες αεροτομές. Σε σύγκριση με το μοντέλο της δοκού, το τριδιάστατο στοιχείο τύπου

shell μπορεί να προσομοιώσει την παραπάνω σύνθετη δομή με μεγαλύτερη ακρίβεια και ρεαλισμό. Επιπλέον, το τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να παρέχει περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις τάσεις και τις καταπονήσεις. Η διαδικασία μοντελοποίησης με τρισδιάστατα στοιχεία τύπου shell, καθώς δεν έχουν εισαχθεί υποθέσεις, έχει υψηλή ακρίβεια μοντελοποίησης.

Στη παρούσα έρευνα και με πεπερασμένα στοιχεία τύπου *shell281* σχεδιάστηκε το τρισδιάστατο μοντέλο του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας της αναφοράς με σύνθετα υλικά στο λογισμικό ANSYS (συγκεκριμένα στο APDL) όπου αυτή η παραμετρική γλώσσα προγραμματισμού ενισχύει την αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού. Επίσης, μελετήθηκε η δυνατότητα ελαχιστοποίησης του πάχους κατά μήκος του πτερυγίου έτσι ώστε να μειωθεί όσο γίνεται η συνολική μάζα του πτερυγίου πράγμα που άμεσα σημαίνει μείωση του κόστους παραγωγής. Καθώς επίσης μελετήθηκε η επίδραση της BTC στην ασφάλεια της δομής του πτερυγίου μέσω υπολογισμού των τάσεων και της ιδιοανυσματικής ανάλυση (Modal Analysis).

2.3 *Επιδρώντες παράγοντες στο πτερύγιο με BTC*

Το μέγεθος σύζευξης μεταξύ της κάμψης της πτερύγισης και της στρέψης αξιολογείται με βάση έναν αδιάστατο συντελεστή BTC όπως τον ορίζει ο Lobitz [12]:

$$a = \frac{g}{\sqrt{EIGJ}} \quad (2-1)$$

Στην σχέση (2-1), a είναι ο συντελεστής της σύζευξης, g είναι η δυσκαμψία της σύζευξης κάμψης-στρέψης της διατομής, EI είναι η δυσκαμψία της διατομής, GJ είναι η δυστρεψία της διατομής.

Προκειμένου να σχεδιαστεί ένα πτερύγιο με μεγαλύτερο συντελεστή της BTC, οι ερευνητές διεξήγαγαν πολλές αναλύσεις πάνω στους παράγοντες που επηρεάζουν την BTC. Ong and Tsai [13] αξιολόγησαν την επίδραση της ασυμμετρίας της γωνίας των στρώσεων και των υλικών των στρώσεων της δοκού. Η μεγαλύτερη σύζευξη πραγματοποιήθηκε στο διάστημα γωνίας από 15 μέχρι 30 μοιρών με χρήση ινών άνθρακα μεγάλης δυσκαμψίας. Η τιμή της σύζευξης για τον άνθρακα και για τον ύαλο ήταν 0.6 και 0.4 αντίστοιχα.

Στα εργαστήρια του Sandia σχεδιάστηκε ένα πολυστρωματικό πτερύγιο με μονοαξονικό υλικό των ινών του άνθρακα μήκους 9 μέτρα και εξετάστηκε η συμπεριφορά της πειραματικώς και συγκρίθηκε με πολυστρωματικό πτερύγιο με μονοαξονικό υλικό και ίνες του υάλου [21-23]. Τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι κάτω από την ίδια σκόπιμη μείωση φορτίου, η μάζα του πτερυγίου με ίνες από άνθρακα είναι πιο ελαφριά και η στιβαρότητά της είναι μεγαλύτερη.

Ο Hayat et al. [14] μελέτησε την επίδραση του πάχους της στρώσης στην BTC. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν προστίθεται στρώση με ασύμμετρο πάχος στις εξωτερικές στρώσεις, μαζί με τα ήδη υπάρχοντα υλικά και γωνίες, αυξάνεται ο μέσος όρος του μεγέθους της σύζευξης περίπου κατά 51% κατά μήκος του πτερυγίου και μειώνεται το φορτίο κόπωσης κατά 1.6-2.9%.

Ο Griffin [15] εκτέλεσε παραμετρική μελέτη για να βρει τη σχέση μεταξύ του μεγέθους ζεύξης και του κόστους υλικού εφαρμόζοντας διάφορους τύπους υλικών, διάφορες γωνίες ινών και διάφορες δομικές διαμορφώσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι δομικές διαμορφώσεις που

σχετίζονται με τα Καπάκια (Caps) της δοκού είναι ακριβές αλλά παρέχουν μεγαλύτερη σύζευξη λόγω το ότι τα καπάκια αυτά δέχονται κυρίως τα φορτία κάμψης.

2.4 Εφαρμογή του πτερυγίου με BTC

Ο πρώτοι που μελέτησαν τη πιθανότητα να μειωθούν, παθητικώς, τα φορτία μέσω υλικών με BTC ήταν ο Lobitz και ο Veers[11] από την ομάδα του εργαστηρίου του SANDIA όπου πρότειναν την υλοποίηση της BTC μέσω του επαναπροσανατολισμού των ινών του μονοαξονικού υλικού (UD) στα Καπάκια (Caps) της δοκού. Παρόλο που δεν αφορούσαν άμεσα τις γωνίες των υλικών ούτε τη σχέση τους με τις επιτευχθείσες γωνίες συστροφής, αξιολόγησαν τις δυνατότητες μείωσης του φορτίου ως συνάρτηση του συντελεστή σύζευξης BTC. Για τις τιμές του συντελεστή σύζευξης μέχρι 60% της θεωρητικής μέγιστης επιβαλλόμενης από τις έννοιες σταθερότητας υλικών, επιτεύχθηκε, μείωση φορτίου κόπωσης κατά 10-20% για τα συζευγμένα πτερύγια. Επίσης, έχουν διαπιστώσει ότι η BTC οδηγεί σε ελαφριά μείωση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας (AEP) της ανεμογεννήτριας και αντισταθμίζει την απώλεια ισχύος μέσω καθορισμού της γραμμικής ελαστικής στρέψης και εφαρμογής της ως αρχική στρέψη στο πτερύγιο.

Η ολοκληρωμένη βελτιστοποίηση των πτερυγίων με υλικά BTC αντιμετωπίστηκε πρώτον από τον Bottasso et al. [9]. Στην εργασία τους, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση της εσωτερικής δομής για διαφορετικές γωνίες ινών και για διαφορετικές θέσεις κατά μήκος του πτερυγίου εκκινήσεως από τις οποίες εφαρμόζεται η μετατόπιση των στρώσεων (μερικώς συζευγμένα πτερύγια). Έχουν δείξει ότι, για το πλήρες συζευγμένο πτερύγιο και για μερικώς συζευγμένο πτερύγιο ξεκινώντας από απόσταση 30% από τη ρίζα του πτερυγίου μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση όσον αφορά τη δυνατότητα μείωσης του φορτίου. Ολοκληρωμένες εργασίες βελτιστοποίησης των πτερυγίων με BTC έχουν, επίσης, πραγματοποιηθεί από το DTU. Ο Zahle et al [16] ανέπτυξε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον σχεδιασμού βασισμένο σε εργαλεία βελτιστοποίησης ανοιχτού κώδικα και πραγματοποίησε ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του εξωτερικού σχήματος του πτερυγίου και της εσωτερικής γεωμετρίας. Σημαντική ανακούφιση από το παθητικό φορτίο αναφέρεται από τους συγγραφείς που επιτρέπουν το σχεδιασμό ενός μεγαλύτερου πτερυγίου κατά 9% με αύξηση της AEP κατά 8.7%.

Επί του παρόντος, οι περισσότερες μελέτες σχετικά με τη συζευγμένη συμπεριφορά του πτερυγίου που έχει η BTC, υιοθετούν το συνδυασμό του μοντέλου της μονοδιάστατης δοκού με δισδιάστατη διατομή. Αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να δώσει τη λεπτομερή δομική απόκριση και τις πληροφορίες τάσεων-παραμορφώσεων του πτερυγίου. Στη παρούσα εργασία, δημιουργείται ένα πλήρες λεπτομερές μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του πτερυγίου ανεμογεννήτριας DTU 10MW. Επίσης, η επίδραση της BTC στην ασφάλεια της κατασκευής αναλύεται μέσω της εξαγωγής των τάσεων των κόμβων. Εκτός αυτού, η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται κυρίως στη μελέτη των επιδόσεων μείωσης του φορτίου του πτερυγίου με BTC και δίνει λιγότερη προσοχή στο κόστος. Ο σχεδιασμός του πτερυγίου πρέπει να εξασφαλίζει τη δύναμη και τη δυσκαμψία της δομής, ώστε να εξασφαλίζει ότι δεν θα προκληθεί βλάβη στο πτερύγιο κατά τη διάρκεια ζωής της κάτω από τις περιπτώσεις σχεδιασμού. Επιπλέον, το πτερύγιο πρέπει να είναι ελαφρύ, δηλαδή η μάζα πρέπει να είναι μικρή. Οι δομικές απαιτήσεις του σχεδιασμού των πτερυγίων είναι κυρίως: η

αντοχή, η δυσκαμψία, η σταθερότητα και η μάζα. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό της δομής των πτερυγίων είναι το τελικό φορτίο, οι ιδιότητες των υλικών και η κατασκευή. Στη παρούσα έρευνα, με βάση την εξασφάλιση της αντοχής, της δυσκαμψίας και της σταθερότητας του πτερυγίου, χρησιμοποιούνται τα χαρακτηριστικά της BTC για τη μείωση της μάζας του πτερυγίου μεταβάλλοντας τη κατασκευή του πτερυγίου, δηλ. μειώνοντας το υλικό.

3

Ελαστική σύζευξη σε σύνθετα υλικά

Με την αύξηση του μεγέθους του περυγίου, αυξάνονται επίσης οι απαιτήσεις των υλικών του περυγίου. Τα υλικά του περυγίου της ανεμογεννήτριας έχουν προχωρήσει από ξύλο σε μέταλλο και ύστερα σε σύνθετα υλικά που τώρα χρησιμοποιούνται ευρέως. Τα υλικά πρέπει να διαλέγονται έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μάζα με την προϋπόθεση να εξασφαλίσει την αντοχή και την δυσκαμψία. Επίσης, λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της διάβρωσης, του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας.

Τα σύνθετα υλικά είναι ένα είδος πολυφασικών στερεών υλικών που αποτελούνται από δύο ή περισσότερες ουσίες με διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες σε μικροσκοπικό επίπεδο. Αποτελούνται, βασικά, από σώμα ενισχυμένο με ίνες και σχετικά μαλακό υλικό μήτρας. Και οι ίνες και η μήτρα συνδέονται με ρητίνη, πράγμα που αυξάνει την ανθεκτικότητα και μεταδίδει τάση.

Τα σύνθετα υλικά μπορεί να αντιμετωπίζονται ως ορθοτροπικά υλικά περίπου λόγω της συμμετρίας των μηχανολογικών τους ιδιοτήτων σε κάθε κατεύθυνση. Η σχέση μεταξύ των εσωτερικών τάσεων και παραμορφώσεων του ορθοτροπικού υλικού εκφράζεται με την εξής σχέση:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3-1)$$

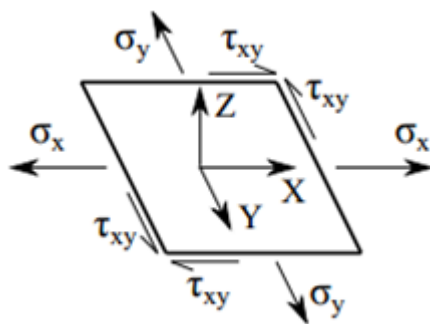
Στην παραπάνω σχέση, σ_1 , σ_2 και σ_3 είναι οι συνιστώσες της ορθής τάσης; τ_{12} , τ_{23} και τ_{31} είναι οι συνιστώσες της διατμητικής τάσης; C_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, 6$) είναι ο συντελεστής δυσκαμψίας; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ και ε_3 είναι οι συνιστώσες της ορθής παραμόρφωσης; γ_{12}, γ_{23} και γ_{31} είναι οι συνιστώσες της διατμητικής παραμόρφωσης.

Από την σχέση

(3-1), παρατηρείται ότι υπάρχει σύζευξη μεταξύ των ορθών τάσεων και των διατμητικών παραμορφώσεων και μεταξύ διατμητικών τάσεων και των ορθών παραμορφώσεων σε ανισοτροπικό σώμα. Οι ορθές τάσεις θα παράγουν διατμητικές παραμορφώσεις και οι διατμητικές τάσεις θα παράγουν ορθές παραμορφώσεις.

Η βασική μονάδα της ανεμογεννήτριας είναι πολυστρωματικό υλικό που αποτελείται από ανισότροπα υλικά [18], τα οποία είναι δομές χτισμένα από στρώματα, το ένα πάνω από το άλλο. Οι ίνες σε κάθε στρώση είναι τοποθετημένες στον ίδιο προσανατολισμό και η σχέση τάσης-παραμόρφωσής τους φαίνεται στο Διάγραμμα 2, η οποία μπορεί να εκφραστεί με την σχέση

(3-2).



Διάγραμμα 2: Ορθές και διατμητικές τάσεις μιας στρώσης

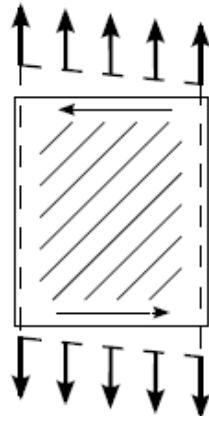
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Στην εξίσωση

(3-2), σ_x και σ_y είναι οι συνιστώσες της ορθής τάσης στις κατευθύνσεις x , y αντίστοιχα; τ_{xy} είναι η διατμητική τάση; ε_x και ε_y είναι οι ορθές παραμορφώσεις; γ_{xy} είναι η διατμητική παραμόρφωση; Q_{ij} ($i = 1, 2, 6; j = 1, 2, 6$) είναι ο συντελεστής δυσκαμψίας.

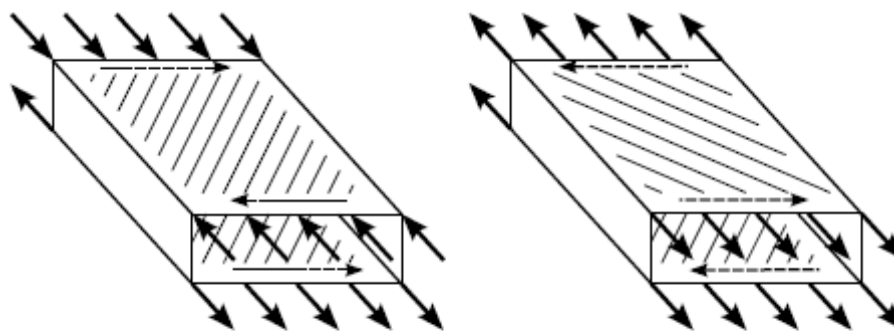
Όταν οι ίνες είναι προσανατολισμένες παράλληλα με τους άξονες X και Y τότε οι συντελεστές δυσκαμψίας Q_{16} και Q_{26} είναι μηδενικοί και τότε η διατμητική τάση και η διατμητική παραμόρφωση αποζευγαρώνονται εντελώς από την ορθή τάση και την ορθή παραμόρφωση κατά μήκος του κύριου προσανατολισμού των στρώσεων. Από την άλλη πλευρά, αν οι ίνες είναι εκτός του κύριου άξονα, τότε οι διατμητικές τάσεις και παραμορφώσεις

ζευγαρώνονται με την ορθή τάση σ_x ή με την ορθή τάση σ_y στους κύριους προσανατολισμούς των δύο τους. Για παράδειγμα, όταν μία σύνθετη πλάκα με προκατειλημμένες ίνες από τον διαμήκη άξονα έλκεται κατά μήκος ενός κύριου άξονα όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3, θα δώσει όχι μόνο επέκταση αλλά και παραμόρφωση διάτμησης, η οποία οδηγεί σε πλευρική κίνηση της τραβηγμένης ακμής, όπως δείχνουν τα βέλη στο σχήμα.



Διάγραμμα 3: Συζευγμένη ανταπόκριση μιας πλάκας με γωνιακές ίνες

Οι ιδιότητες των σύνθετων στρώσεων καθορίζονται από τον τρόπο της στρώσης. Συνεπώς, η επίδραση σύζευξης μεταξύ διαφορετικών παραμορφώσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του σχεδιασμού της δομικής στρώσης. Δύο τυπικά παραδείγματα σχεδίων συζευγμένης δοκού είναι η συζευγμένη με κάμψη-στρέψη και η συζευγμένη με επιμήκυνση-στρέψη, βλέπε Διάγραμμα 4. Στη συζευγμένη με κάμψη-στρέψη, οι ίνες στην άνω και κάτω επιφάνεια είναι μετατοπισμένες συμμετρικά, έτσι ώστε η ροπή κάμψης να προκαλεί συμπίεση στην άνω επιφάνεια και επιμήκυνση στη κάτω επιφάνεια. Παρομοίως, στη συζευγμένη με επιμήκυνση-στρέψη οι ίνες τοποθετούνται ασύμμετρα και έτσι εμφανίζεται στρέψη όταν η δοκός υποβάλλεται σε φορτίο εφελκυσμού.



a) Bend-twist coupling

b) Extension-twist coupling

Διάγραμμα 4: Μηχανισμός σύζευξης σε σύνθετη δοκό

3.1 Υπολογισμός Φορτίου σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας

Το περιβάλλον στο οποίο τοποθετούνται οι ανεμογεννήτριες είναι πολύπλοκο και είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί το φορτίο πριν να σχεδιαστεί η δομή του πτερυγίου. Σύμφωνα με την προδιαγραφή 61400-1 της διεθνούς ηλεκτροτεχνικής επιτροπής IEC [17], τα φορτία πάνω σε ανεμογεννήτριες μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

- Αεροδυναμικά φορτία (λόγω της ροής του αέρα)
- Φορτίο βαρύτητας (λόγω του βάρους της δομής του πτερυγίου)
- Φορτίο αδράνειας (λόγω των ταλαντώσεων, περιστροφών, κτλ)
- φορτίο λειτουργίας (λόγω της πρόνευσης, πλαγιολίσθησης κτλ)

Σύμφωνα με τη κατάσταση λειτουργίας και το εξωτερικό περιβάλλον που μπορεί να αντιμετωπίζει μια ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια της ζωής της, η προδιαγραφή IEC 61400 δίνει οχτώ προϋποθέσεις σχεδιασμού και αντίστοιχες καταστάσεις φορτίων της ανεμογεννήτριας [17].

3.2 Υπολογισμός Φορτίων βάση του λογισμικού hGAST

Σε αυτήν την έρευνα, η μη γραμμική εξαρτώμενη από το χρόνο προσομοίωση του ελαστικού φορτίου της ανεμογεννήτριας θα εκτελεστεί στο λογισμικό hGAST που αναπτύχθηκε από το Εθνικό Τεχνικό Πανεπιστήμιο Αθηνών [18].

Στον επιλύτη του hGAST, η ολοκληρωμένη ανεμογεννήτρια θεωρείται ως πολύ-σωματικό δυναμικό σύστημα που αποτελείται από: (1) Πτερύγια (2) Οδήγηση (3) Πύργο; όλα αυτά προσεγγίζονται ως δομές δοκού του Timoshenko. Η συναρμολόγηση των παραπάνω εξαρτημάτων στο πλήρες σύστημα πραγματοποιείται στο πλαίσιο της λεγόμενης πολύ-σωματικής προσέγγισης.

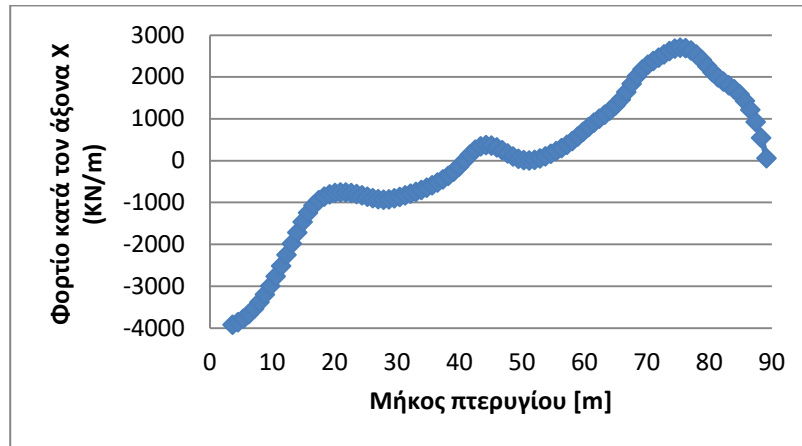
Η σύνθεση πολλών σωμάτων επεκτείνεται επίσης στο επίπεδο των συνιστώσεων. Τα εξαιρετικά εύκαμπτα εξαρτήματα, όπως τα πτερύγια, μπορούν να χωριστούν σε ένα αριθμό διασυνδεδεμένων "υπο-σωμάτων" που θεωρούνται ως σύνθεση στοιχείων γραμμικής δοκού. Αυτή η προσέγγιση, επιτρέπει τη καταγραφή των γεωμετρικών μη γραμμικών αποτελεσμάτων που οφείλονται σε μεγάλες εκτροπές και περιστροφές χρησιμοποιώντας τη θεωρία γραμμικής δοκού σε επίπεδο στοιχείου, αλλά θεωρώντας τα μη γραμμικά αποτελέσματα στο επίπεδο του υποσώματος.

3.3 Υπολογισμός αεροδυναμικού φορτίου στην ονομαστική ταχύτητα του

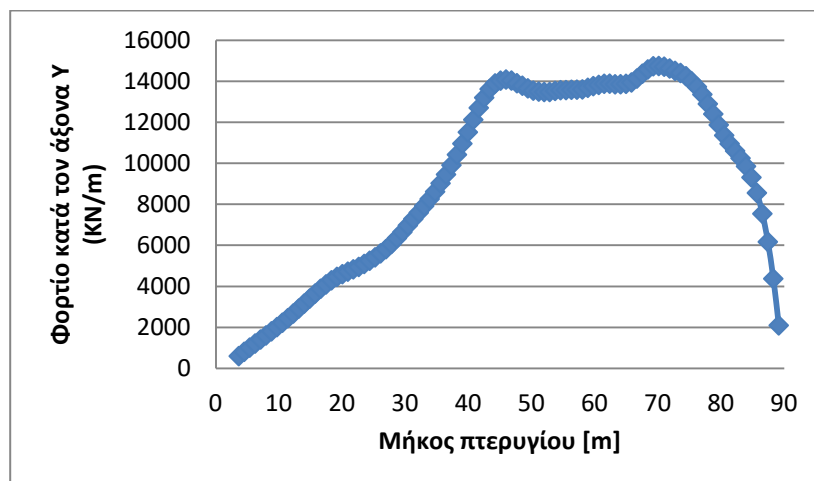
αέρα

Το πτερύγιο με BTC θα στρέψει καθώς κάμπτεται κάτω από το φορτίο του ανέμου, γεγονός που ανακουφίζει την αεροδυναμική δύναμη ως αποτέλεσμα της μείωσης της γωνίας προσβολής. Επομένως, το αεροδυναμικό φορτίο του πτερυγίου με BTC είναι μικρότερο από αυτό του

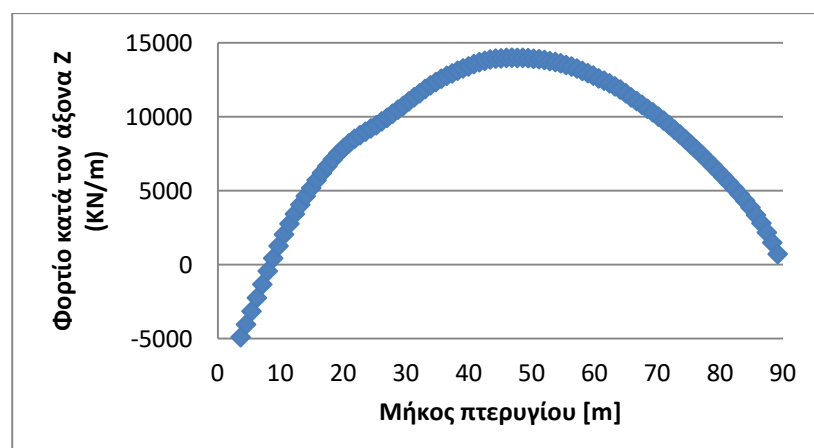
κανονικού πτερυγίου. Σε αυτήν την έρευνα, η BTC επιτυγχάνεται με την εισαγωγή μιας γωνίας του προσανατολισμού των ινών των στρωμάτων του υλικού στα Καπάκια της δοκού του πτερυγίου. Στη συνέχεια, τα αεροδυναμικά φορτία του πτερυγίου υπολογίζονται στο hGAST υπό ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα εξής διαγράμματα.



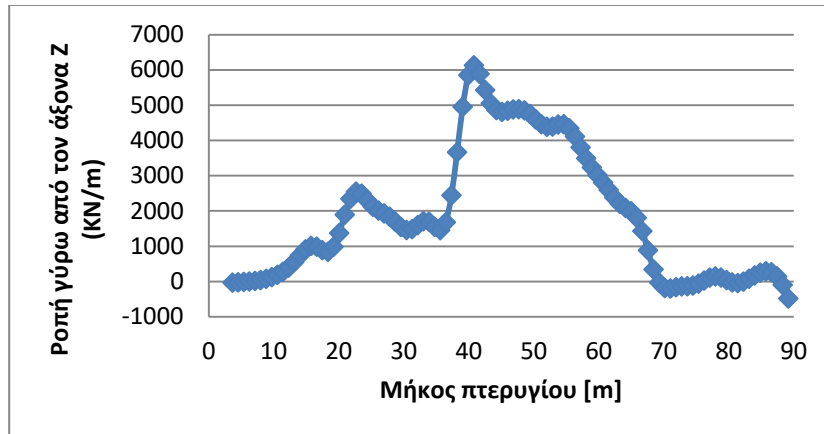
Διάγραμμα 5: Τα αεροδυναμικά φορτία κατά την περιστροφή (Flap-wise)



Διάγραμμα 6: Τα αεροδυναμικά φορτία κατά την περύγιση (Edge-wise)



Διάγραμμα 7: Τα αεροδυναμικά φορτία κατά μήκος του πτερυγίου

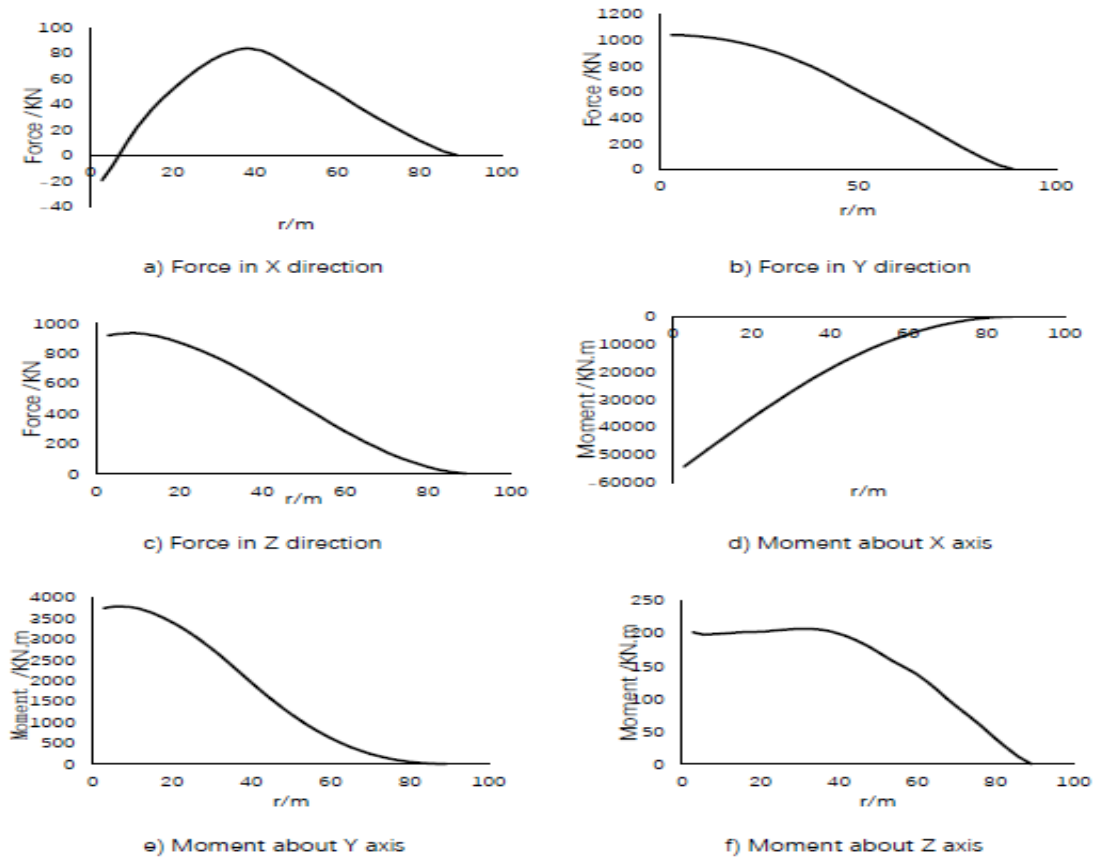


Διάγραμμα 8 Η αεροδυναμική ροπή γύρω από τον άξονα Z

Το πτερύγιο αποτελείται από τη ρίζα, τη περιοχή μετάβασης και την αεροδυναμική περιοχή. Η ρίζα του πτερυγίου έχει μια κυκλική διατομή και συνδέεται με την πλήμνη με μπουλόνια για να μεταφέρει το φορτίο των πτερυγίων στο αξονικό σύστημα της ανεμογεννήτριας και έπειτα στο πύργο. Η περιοχή μετάβασης και η αεροδυναμική περιοχή αποτελούν σημαντικά τμήματα του πτερυγίου για μετατροπή ενέργειας. Η γωνία προσβολής της αεροτομής καθορίζει το αεροδυναμικό φορτίο που επενεργεί επί του πτερυγίου. Από τα παραπάνω σχήματα των φορτίων φαίνεται ότι τα αεροδυναμικά φορτία κατανέμονται, κατά κύριο λόγο, κατά την κατεύθυνση πτερύγισης (Flap-wise) και περιστροφής (Edge-wise), όπου το φορτίο στη πρώτη κατεύθυνση είναι σχετικά μεγάλο και είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τη συζευγμένη παραμόρφωση του πτερυγίου. Το φορτίο στη ρίζα του πτερυγίου είναι μικρό και αυξάνεται βαθμιαία από την περιοχή μετάβασης και στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά κοντά στο άκρο του πτερυγίου λόγω του μικρού μήκους της χορδής της αεροτομής σε αυτή τη περιοχή. Καθώς αυξάνεται η γωνία στρώσης, το αεροδυναμικό φορτίο κατά πτερύγιση μειώνεται σταδιακά, πράγμα που συμβαδίζει με την προσδοκία. Το φορτίο κατά περιστροφής είναι σχεδόν ανεπηρέαστο από τη γωνία του στρώματος.

3.4 Υπολογισμός μέγιστου φορτίου

Αναφερόμενοι στις συνθήκες λειτουργίας που περιγράφονται στο IEC61400, υπολογίζονται προκαταρκτικά τα φορτία του πτερυγίου που περιλαμβάνουν τα αεροδυναμικά φορτία, τα φορτία βαρύτητας και τα αδρανειακά φορτία. Με τον υπολογισμό όλων των συνθηκών λειτουργίας από το λογισμικό hGAST, μπορεί να εξαχθεί το απόλυτο φορτίο, δηλαδή το φορτίο που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή των FX, FY, FZ, MX, MY και MZ σε κάθε διατομή του πτερυγίου.



Διάγραμμα 9: Δομικά φορτία σύμφωνα με DLC1.3

Σύμφωνα με το αρχείο σχεδιασμού του περυγίου, η ρίζα του περυγίου δέχεται το μέγιστο απόλυτο φορτίο. Συνεπώς, ο έλεγχος αντοχής και ο σχεδιασμός του ελαφρύ περυγίου με BTC θα πραγματοποιηθούν εφαρμόζοντας το φορτίο που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή M_X στην ρίζα του περυγίου.

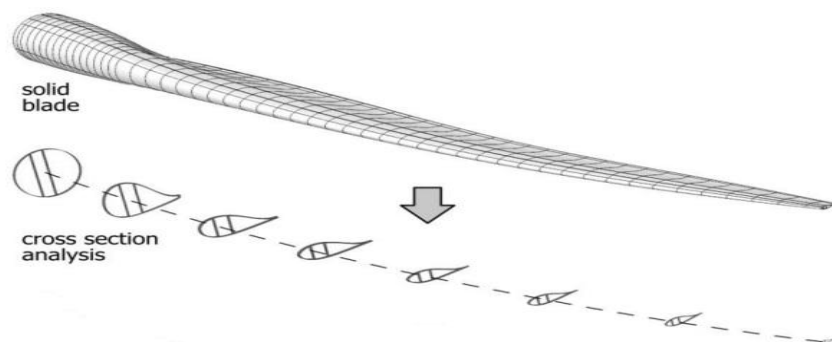
4

Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της DTU 10 MW

4.1 Γεωμετρία πτερυγίου

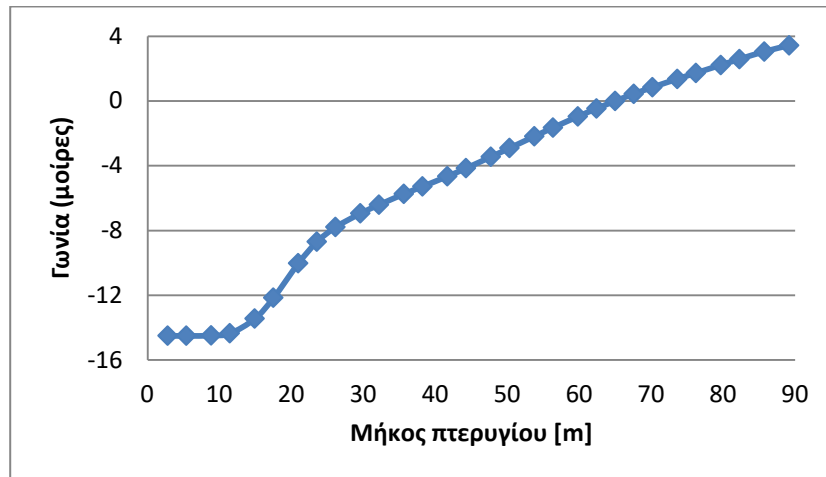
Με την αύξηση του μεγέθους των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, αυξάνεται η ελαστικότητα και η αεροελαστική επίδραση γίνεται πιο σαφή. Σε αυτήν την έρευνα, μελετάται το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας DTU 10 MW και χτίζεται το τρισδιάστατο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων για καλύτερη ανάλυση των χαρακτηριστικών του και λεπτομερή δομική ανταπόκριση.

Το μήκος του πτερυγίου είναι 89.166 m. Το πτερύγιο έχει χωριστεί σε 101 διαφορετικές διατομές της οικογένειας FFA-W3-XXX. Οι διατομές της περιοχής της ρίζας είναι κυκλικές. Όμως, από την περιοχή μετάβασης μέχρι το άκρο του πτερυγίου, οι διατομές παίρνουν το αεροδυναμικό τους σχήμα και μικραίνουν σταδιακά όπως δείχνει το Διάγραμμα 10.



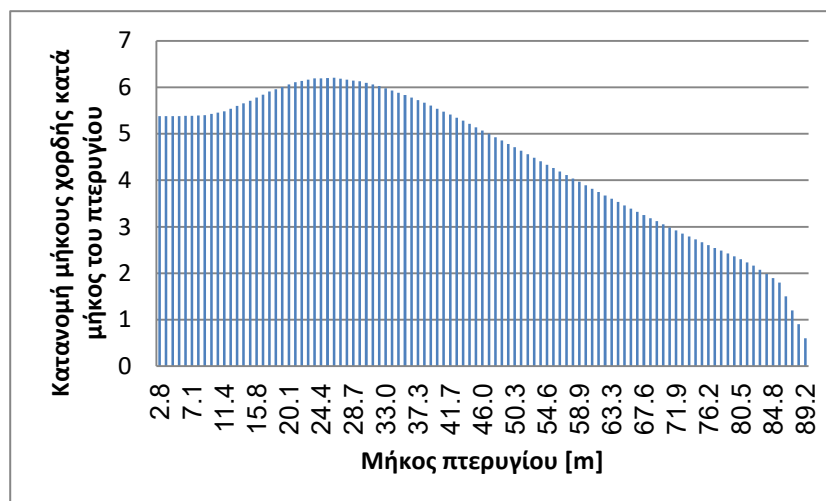
Διάγραμμα 10: Η κατανομή των διατομών κατά μήκος του πτερυγίου.

Το πτερύγιο έχει τρία δίκτυα (Webs) A, B, και C όπως δείχνει το Διάγραμμα 15. Το πτερύγιο έχει, κατά μήκος του, μια αρχική γωνία στρέψης η οποία είναι αρνητική στη περιοχή της ρίζας, ύστερα μικραίνει μέχρι να γίνει μηδενική στην απόσταση 60 μέτρα από τη ρίζα και παίρνει τη μέγιστη θετική τιμή της (περίπου 4 μοίρες) στο άκρο του πτερυγίου. Η κατανομή της αρχικής γωνίας στρέψης παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 11.



Διάγραμμα 11: Η κατανομή της γωνίας της αρχικής στρέψης του πτερυγίου σε μοίρες.

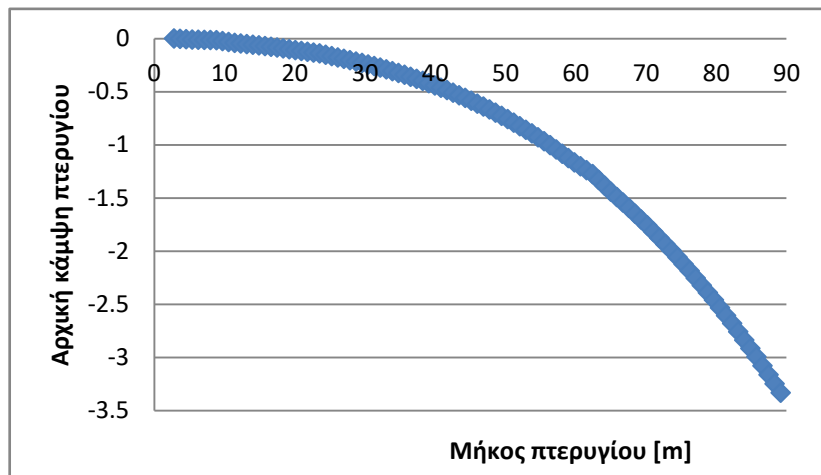
Το Διάγραμμα 12 παρουσιάζει την κατανομή του μήκους χορδής της διατομής κατά μήκος του πτερυγίου. Όπου στην περιοχή της ρίζας το μήκος της χορδής παραμένει σταθερό, αυξάνεται σταδιακά μέχρι να πάρει τη μέγιστη τιμή του στο σημείο που απέχει περίπου 26 m και ύστερα μειώνεται μέχρι να πάρει την ελάχιστη τιμή στο άκρο του πτερυγίου.



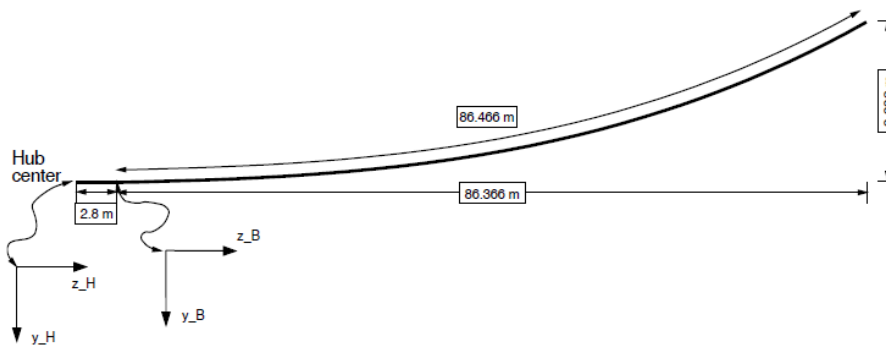
Διάγραμμα 12: Η κατανομή του μήκους χορδής κατά μήκος του πτερυγίου.

Για να υπάρξει μια ικανοποιητική απόσταση ασφάλειας μεταξύ του πτερυγίου και του πύργου, θα πρέπει να δοθεί μια αρχική κάμψη στο πτερύγιο [19]. Η αρχική κάμψη θα προκαλέσει κάποιες αλλαγές στη δυσκαμψία, για αυτό θα επηρεάσει τη παραμόρφωση της BTC και τον υπολογισμό των αεροδυναμικών φορτίων. Για αυτό, το πτερύγιο που θα χρησιμοποιηθεί

σε αυτήν την έρευνα θα είναι με μια αρχική κάμψη η οποία κατανέμεται ομαλά κατά μήκος του πτερυγίου όπως δείχνει το Διάγραμμα 13 και το Διάγραμμα 14.



Διάγραμμα 13: Η κατανομή της αρχικής κάμψης κατά μήκος του πτερυγίου.



Διάγραμμα 14: Το πτερόγιο με αρχική κάμψη

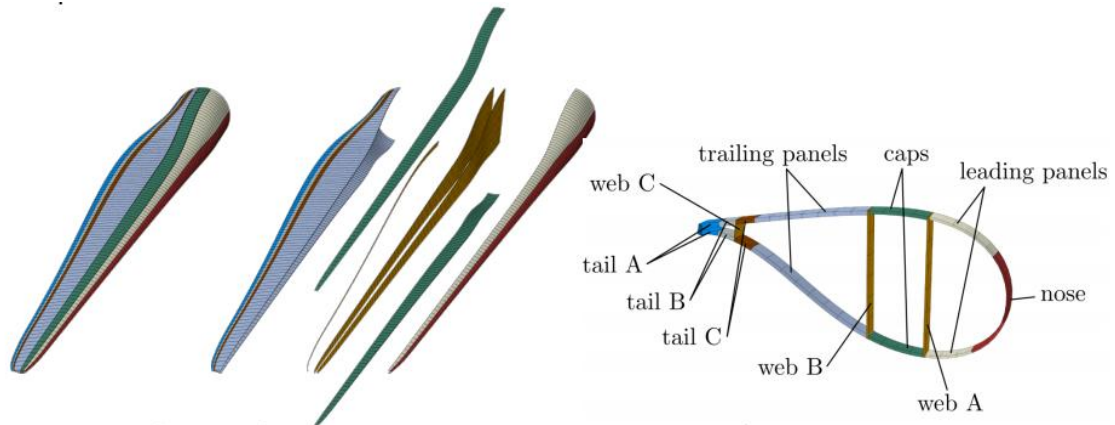
4.2 Παράμετροι υλικών

Επί του παρόντος, σχεδόν όλα τα μεγάλα πτερόγια ανεμογεννητριών είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά με υψηλή ειδική δύναμη και μέτρο, πράγμα που μειώνει αποτελεσματικά την πυκνότητα μάζας των πτερυγίων. Το πτερόγιο της ανεμογεννήτριας DTU 10 MW είναι κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες υάλου, συμπεριλαμβάνοντας: μονοαξονικό (uniax), διαξονικό (biax), τριαξονικό (triax) και μάλσα (balsa). Οι ιδιότητες των υλικών φαίνονται στο Πίνακα 4-1, Η δομή του πτερυγίου αποτελείται από διαφορετικούς συνδυασμούς και αλληλουχίες υπέρθεσης των τεσσάρων υλικών.

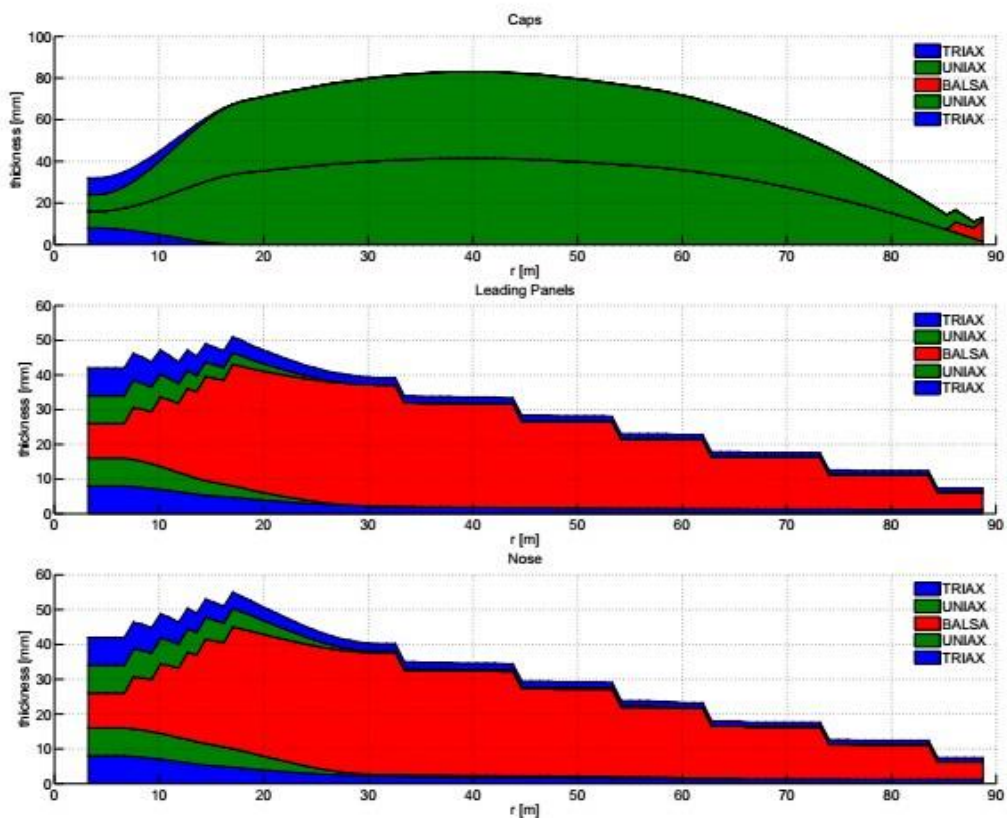
Πίνακας 4-1: Οι ιδιότητες των υλικών του πτερυγίου DTU 10 MW

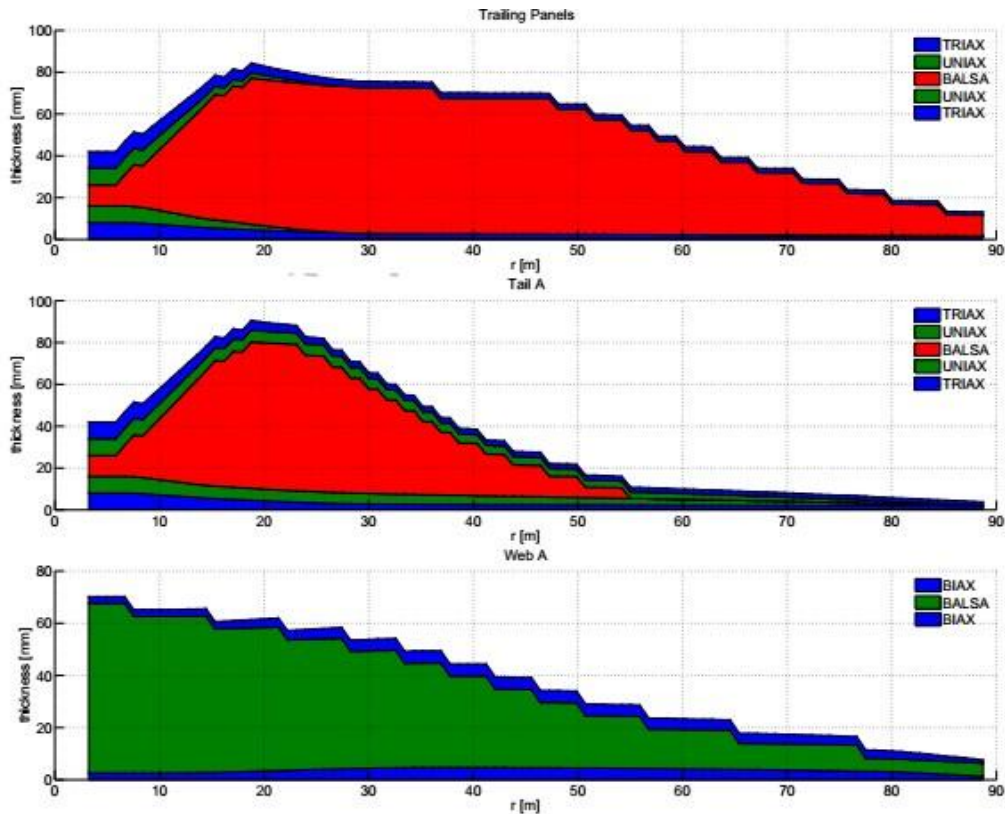
Type	Young's modulus (GPa)			Shear modulus (GPa)			Poisson's ratio			Density (kg/m ³)
	EX	EY	EZ	GXY	GYZ	GXZ	VXY	VYZ	VXZ	
Uniax	41.63	14.93	13.43	5	5	5	0.24	0.27	0.33	1915.5
Biax	13.92	13.92	12.1	11.5	4.54	4.54	0.53	0.27	0.33	1845
Triax	21.79	14.67	12.1	9.41	4.54	4.54	0.48	0.28	0.33	1845
Balsa	0.05	0.05	2.73	0.016	0.15	0.15	0.5	0.013	0.013	110

Για το σκοπό του προσδιορισμού της σύνθετης στρώσης, το πτερύγιο έχει χωριστεί περιφερειακά σε 11 βασικές περιοχές (μέρη εκφυγής, μέρη προσβολής, και Καπάκια) όπως δείχνει το Διάγραμμα 15. Οι στρώσεις των σημαντικών περιοχών του πτερυγίου εμφανίζονται στο Διάγραμμα 16.



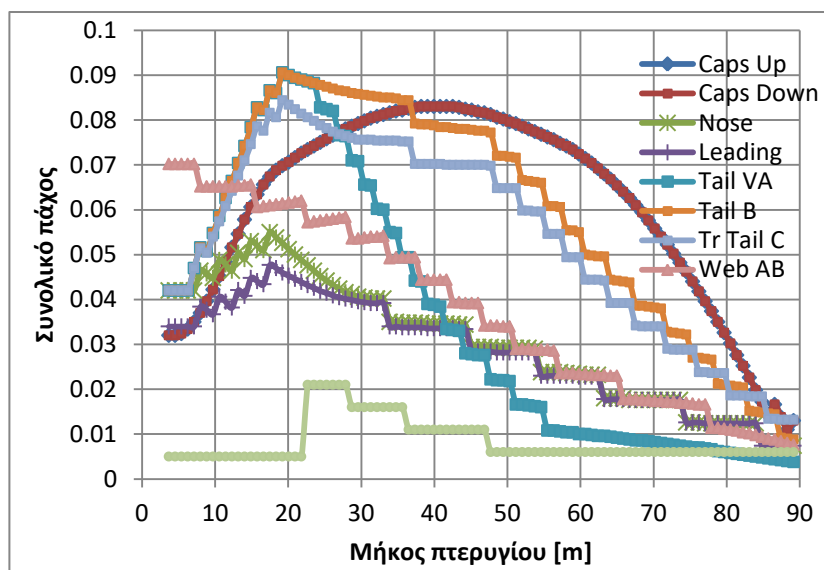
Διάγραμμα 15: Οι 11 βασικές περιοχές μιας αεροτομής του πτερυγίου





Διάγραμμα 16: Οι σύνθετες στρώσεις των περιοχών του περυγίου.

Στο Διάγραμμα 17 παρουσιάζονται οι κατανομές του συνολικού πάχους των σύνθετων υλικών της κάθε περιοχής από τις 11 περιοχές του περυγίου. Παρατηρείται ότι, το συνολικό πάχος σε όλες τις περιοχές παίρνει τη μέγιστη τιμή στην περιοχή της μετάβασης. Επίσης, παρατηρείται ότι, τα μέρη εκφυγής (Tail B, Tail C και Trailing) έχουν το μεγαλύτερο πάχος υλικού. Τέλος, η πιο ομαλή κατανομή πάχους την έχουν τα Καπάκια.



Διάγραμμα 17: Η κατανομή του συνολικού πάχους των τμημάτων του περυγίου.

Τα Καπάκια (Caps) είναι το μέρος του πτερυγίου που δέχεται το βασικό φορτίο. Τοποθετούνται μεταξύ των δύο κεντρικών δικτύων (Α και Β) και έχουν μεγάλο πάχος. Αποτελούνται από μονοαξονικά υλικά. Υποβάλλονται, κυρίως, από τα φορτία κατά πτερύγιση. Πιο μετά, με την αλλαγή της γωνίας των ινών του μονοαξονικού υλικού σε αυτή τη θέση, η BTC θα ενταχθεί στο πτερύγιο.

Τα μέρη της προσβολής και εκφυγής χρησιμοποιούνται για να διατηρηθεί το αεροδυναμικό σχήμα του πτερυγίου. Η ελαφριά σε βάρος δομή σάντουιτς υιοθετείται εδώ και χρησιμοποιείται κυρίως για να αντέξει σε μερικά φορτία διάτμησης και κάμψης και να βελτιώσει την ακαμψία.

Τα δίκτυα (Α και Β) αποτελούνται από διαξονικά υλικά και από Μπάλσα ως υλικό πυρήνας που το πάχος της οποίας μειώνεται σταδιακά κατά μήκος του πτερυγίου. Τα δίκτυα φέρουν κυρίως τη δύναμη διάτμησης που παράγεται από τη κάμψη του πτερυγίου και τη μεταδίδουν στα συνδεδεμένα Καπάκια (caps), τα οποία και με τη σειρά τους τη μεταδίδουν στον εφελκυσμό και θλίψη των καπακιών (caps), διατηρώντας τη συνολική σταθερότητα του πτερυγίου.

Στο τμήμα της εκφυγής, το αεροδυναμικό σχήμα του πτερυγίου έχει μεγάλη μεταβολή καμπυλότητας, το οποίο είναι εύκολο να προκαλέσει συγκέντρωση τάσης. Προκειμένου να διατηρηθεί η αντοχή του, η στρώση είναι πιο παχιά στη θέση αυτή και αποτελείται από τριαξονικό, μονοαξονικό και Μπάλσα υλικό. Το πάχος του Μπάλσα φτάνει στη μεγαλύτερη τιμή του, 90.6 χιλιοστό, στην χορδή με το μεγαλύτερο μήκος.

4.3 Μοντέλο δομικής μηχανικής πτερυγίου ανεμογεννήτριας

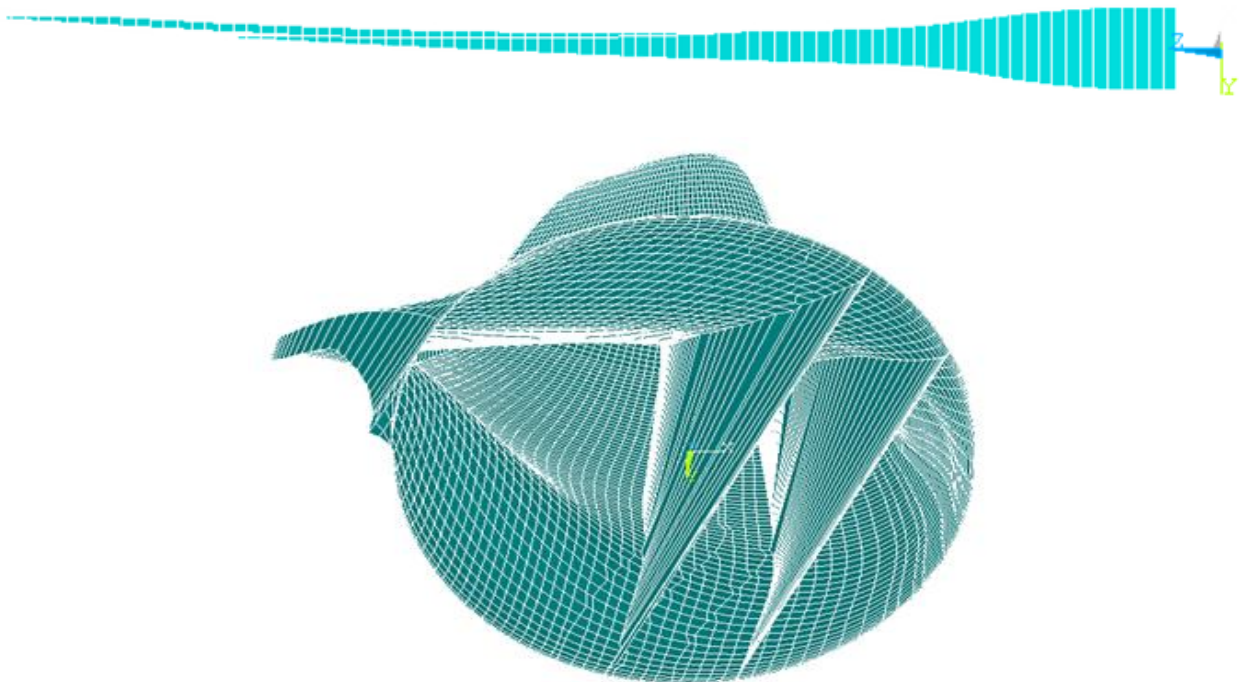
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πτερύγιο που μελετάται σε αυτήν την έρευνα έχει πολύπλοκο σχήμα και διάφορες μορφές στρωμάτων. Για αυτό, το χτίσιμο του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων θα είναι το καλύτερο για την ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων. Συνήθως, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της δομής κατασκευάζεται με την οικοδόμηση του γεωμετρικού μοντέλου του πτερυγίου σε επαγγελματικό λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης, όπως το Solidworks, το PROE και το CATIA και στη συνέχεια εισάγεται σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, όπως το ANSYS και το ABAQUS για τον ορισμό στοιχείων και πλέγματος. Αυτή η μέθοδος είναι εύκολη να λειτουργήσει λόγω της χρήσης ώριμου 3D λογισμικού γεωμετρικής μοντελοποίησης. Ωστόσο, επειδή το μοντέλο βρίσκεται σε διαφορετικό υπολογιστικό περιβάλλον, το γεωμετρικό μοντέλο είναι συχνά επιρρεπές σε απόκλιση όταν εισάγεται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Οπότε χρειάζεται πολύς χρόνος για τη διενέργεια διαρθρωτικών επιθεωρήσεων και επισκευών στο πεπερασμένο στοιχείο. Για να αποφευχθεί το παραπάνω πρόβλημα, το μοντέλο χτίζεται κατευθείαν στο λογισμικό του ANSYS και συγκεκριμένα μέσω χρήσης της γλώσσας του παραμετρικού σχεδιασμού στο APDL (ANSYS Parametric Design Language) για να ενισχυθεί η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα. Τα βήματα σχεδιασμού πραγματοποιούνται όπως περιγράφεται παρακάτω:

(1) Εισαγωγή των συντεταγμένων των 101 διατομών, με την εντολή 'K', κατά τους άξονες X, Y και Z. Η κάθε διατομή περιγράφεται από 107 συντεταγμένες πράγμα που σημαίνει ότι θα πρέπει να εισαχθούν 10807 σημεία.

(2) Χρησιμοποιείται ο βρόγχος DO μαζί με την εντολή 'L' για να γίνει η σύνδεση μεταξύ των σημείων με γραμμές, όπου πρώτα κατασκευάζονται οι γραμμές μεταξύ των σημείων της κάθε διατομής και ύστερα οι γραμμές κατά μήκος του πτερυγίου, δηλαδή οι γραμμές που συνδέουν μεταξύ των διατομών. Τέλος, κατασκευάζονται οι γραμμές των δικτύων (Webs A,B και C). Αξίζει να σημειωθεί ότι το τρίτο δίκτυο, δηλαδή το C, δεν ξεκινά, όπως τα άλλα δύο δίκτυα A και B, από τη ρίζα του πτερυγίου, αλλά από την 23^η διατομή. Το εν λόγω δίκτυο έχει προστεθεί για να αποφευχθεί ο λυγισμός στο τμήμα της εκφυγής του πτερυγίου.

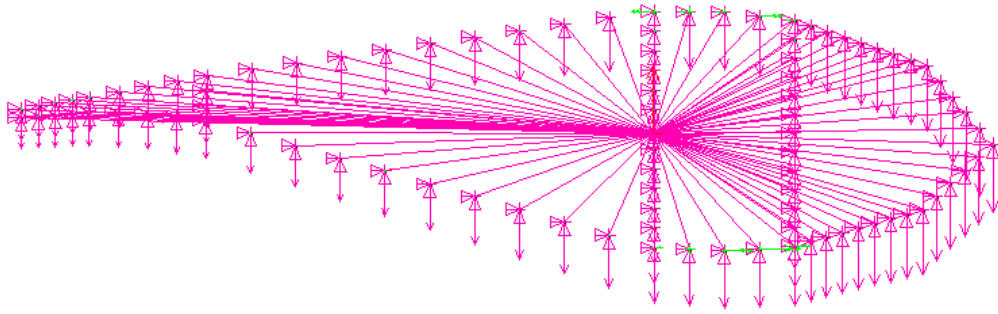
(3) Χρησιμοποιείται ο βρόγχος DO μαζί με την εντολή 'S' για να σχηματιστούν επιφάνειες, όπου πρώτα φτιάχνονται οι επιφάνειες του εξωτερικού σχήματος του πτερυγίου και στη συνέχεια οι επιφάνειες των τριών δικτύων.

Στο ANSYS (APDL) διαλέγεται το πεπερασμένο στοιχείο *SHELL281* για μοντελοποίηση σύνθετου υλικού, όπου το κάθε στοιχείο έχει 8 κόμβους και ο κάθε κόμβος έχει 6 βαθμούς ελευθερίας οι οποίοι είναι κατάλληλοι για τη προσημείωση της στρωτής δομής ή της δομής του "Σάντουιτς". Επίσης, το εν λόγω πεπερασμένο στοιχείο μπορεί να δέχεται μέχρι και παραπάνω από 250 στρώσεις. Το μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο διάτμησης, ο λόγος Poisson και οι παράμετροι πυκνότητας του υλικού έχουν οριστεί με τη βοήθεια της εντολής MPDATA. Οι παράμετροι του υλικού, το πάχος και η γωνία των στρώσεων έχουν οριστεί με την εντολή SECDATA. Χρησιμοποιείται η εντολή AMESH για να δημιουργείται το πλέγμα των επιφανειών. Το ορθογώνιο στοιχείο μπορεί να προσομοιώσει καλύτερα τη τάση και τη μετατόπιση της δομής επειδή έχει υψηλότερο τρόπο μετατόπισης από το τριγωνικό στοιχείο. Το τετράπλευρο πλέγμα χαρτογράφησης υιοθετείται για να διαιρέσει το μοντέλο πτερυγίου. Τα τελικό μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων του πτερυγίου φαίνεται στο Διάγραμμα 18.



Διάγραμμα 18: Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων του πτερυγίου.

Προκειμένου να προστεθούν οι συγκεντρωμένες δυνάμεις στο μοντέλο, έχουν δημιουργηθεί κύριοι κόμβους στο κέντρο κάθε διατομής. Ο κάθε κύριος κόμβος ζευγαρώθηκε με ακόλουθους κόμβους γύρω του μέσω της μεθόδου περιορισμού πολλαπλών σημείων (Multi-point Constraint Method - MPC) όπως δείχνει το Διάγραμμα 19. Με αυτό το τρόπο, οι συγκεντρωμένες δυνάμεις εφαρμόζονται στους κύριους κόμβους και οι κόμβοι με τη σειρά τους θα μοιράσουν τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις στους ακόλουθους κόμβους.



Διάγραμμα 19: Ένας περιορισμός πολλαπλών σημείων (MPC) με τους δικούς του ακόλουθους κόμβους

Πρακτικά, το πτερύγιο έχει πακτωθεί στη πλήμνη. Για αυτό, στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων, το πτερύγιο μπορεί να παρουσιαστεί ως πακτωμένη δοκός με πλήρη πάκτωση στη ρίζα.

5

Εγκυρότητα μοντέλου

5.1 Έλεγχος μάζας και κέντρο βαρύτητας

Το μηχανικό μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων ολοκληρώνεται μετά από τα παραπάνω βήματα παραμετρικής μοντελοποίησης μέσω του λογισμικού Ansys/APDL. Αρχικά, υπολογίζονται η μάζα και το κέντρο βαρύτητας του πτερυγίου. Ο Πίνακας 5-1 συγκρίνει τις τιμές της μάζας και κέντρου βαρύτητας του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων με τις αντίστοιχες προκαταρτικές τιμές του πτερυγίου. Από τον πίνακα παρατηρείται ότι η τιμή της μάζας του υπολογιστικού μοντέλου είναι πολύ κοντά στη τιμή της μάζας του προκαταρτικού πτερυγίου και η απόκλιση μεταξύ των δύο τιμών είναι λιγότερη από 1 τοις εκατό, δηλαδή πολύ μικρή. Επίσης, η απόκλιση μεταξύ των σημείων των κέντρων βαρύτητας είναι μικρή. Οι δύο πολύ μικρές προαναφερόμενες αποκλίσεις δείχνουν πόσο κοντά είναι το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων που ολοκληρώθηκε μέσω Ansys/APDL από το προκαταρτικό μοντέλο του πτερυγίου.

Πίνακας 5-1: Σύγκριση της μάζας και του κέντρου βαρύτητας του υπολογιστικού μοντέλου με το πραγματικό μοντέλο

	Μάζα (kg)	Κέντρο βαρύτητας (x,y,z)
Πραγματικό μοντέλο	41788.3	(-0.11829,-0.35973,26.1789)
Υπολογιστικό Μοντέλο	41671.9	(-0.0628,0.43206,30.036)
απόκλιση (%)	0.27	-

5.2 Έλεγχος της φυσικής συχνότητας του μοντέλου

Η φυσική συχνότητα της δομής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της όπως τη γεωμετρία, τα υλικά, την δυσκαμψία κτλ. Το μοντέλο επαληθεύεται με τη σύγκριση των φυσικών συχνοτήτων του πτερυγίου. Με την επίδραση των εξωτερικών φορτίων, το πτερύγιο παράγει ταλαντώσεις πτερύγισης, περιστροφής και στρέψης. Επίσης, πραγματοποιείται σύζευξη μεταξύ των τριών ταλαντώσεων αλλά συνήθως η αλληλεπίδραση είναι πολύ μικρή. Οι οκτώ πρώτες φυσικές συχνότητες του πτερυγίου υπολογίζονται με τη βοήθεια της ιδιοανυσματικής ανάλυσης (Modal Analysis) στο ANSYS-APDL. Ο Manolas et al. [20] χρησιμοποίησε διαφορετικά λογισμικά αεροελαστικής προσομοίωσης, όπως hGAST, NEREA, cp-lambda, HAWC2 και NISA, για να διεξαγάγει την ιδιοανυσματική ανάλυση του πτερυγίου. Ο Πίνακας 5-2 δείχνει τα αποτελέσματα υπολογισμών συχνοτήτων από διαφορετικούς λογισμικούς.

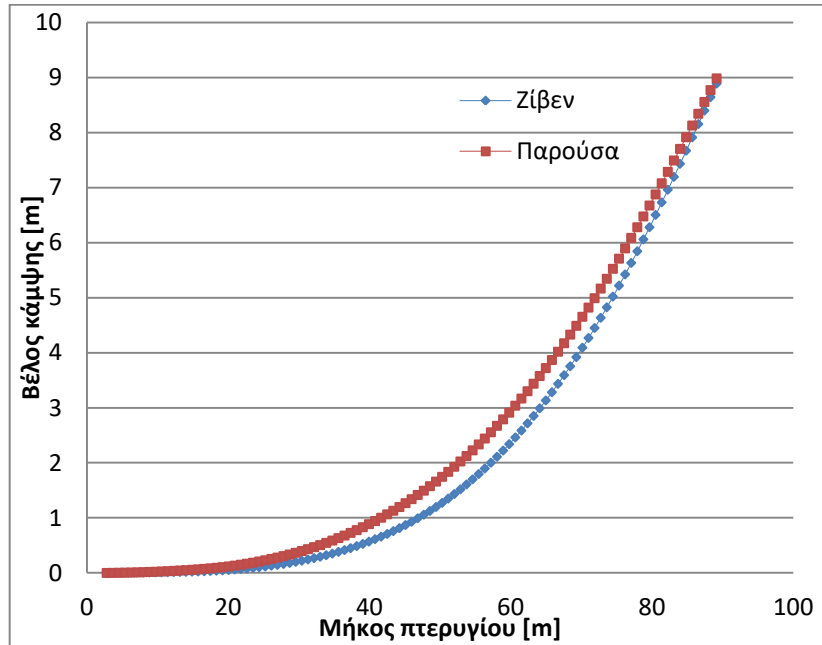
Πίνακας 5-2: Σύγκριση των φυσικών συχνοτήτων του πτερυγίου.

	Mode	ANSYS	hGAST	NEREA	Cp- Lambda	HAWC2	NISA
1	1st flap	0.69521	0.62	0.62	0.62	0.61	0.64
2	1st edge	0.90009	0.94	0.94	0.94	0.93	0.96
3	2nd flap	1.9875	1.76	1.74	1.76	1.74	1.85
4	2nd edge	2.6948	2.8	2.79	2.8	2.77	2.86
5	3rd flap	3.9683	3.59	3.52	3.6	3.57	3.76
6	1st torsion	5.5347	5.4	5.36	-	6.6	6.01
7	3rd edge	6.168	5.73	5.61	5.74	5.7	5.82
8	4th flap	6.658	6.09	6.03	6.11	6.11	-

Από τον παραπάνω πίνακα αποδεικνύεται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε μέσω ANSYS/APDL είναι αρκετά κοντά στα αντίστοιχα αποτελέσματα των άλλων λογισμικών.

5.3 Σύγκριση βέλους κάμψης

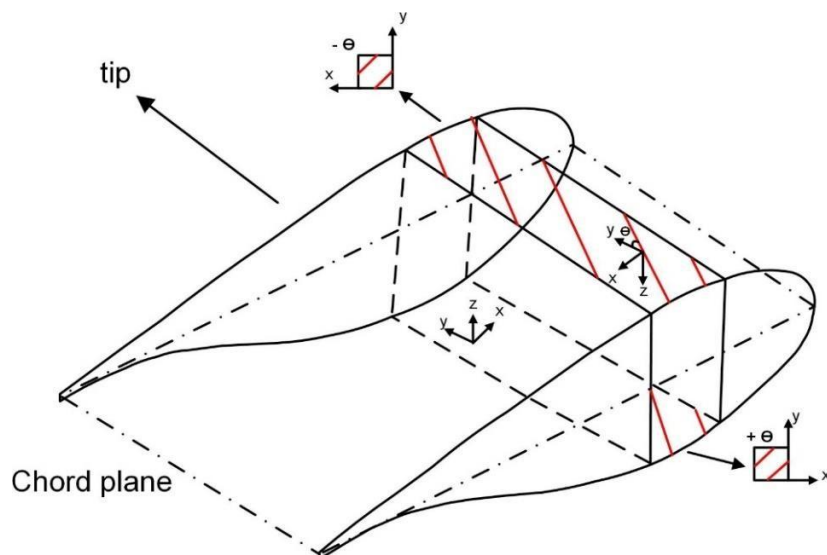
Το Διάγραμμα 20 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ του βέλους κάμψης του πτερυγίου χωρίς σύζευξη κάμψης στρέψης της παρούσας εργασίας με το αντίστοιχο αποτέλεσμα της δημοσίευσης [21]. Από το εν λόγω διάγραμμα, φαίνεται ότι, η απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών των βελών κάμψης είναι μικρή και σχεδόν είναι μηδενική στη ρίζα και στο άκρο του πτερυγίου.



Διάγραμμα 20: Σύγκριση του βέλους κάμψης της παρούσας εργασίας με το αντίστοιχο βέλος της [21]

5.4 Ανάλυση χαρακτηριστικών πτερυγίου

Τα Καπάκια (Caps) είναι το μέρος του πτερυγίου που δέχεται το βασικό φορτίο της κάμψης. Συνεπώς, σε αυτή τη μελέτη, η σύζευξη κάμψης-στρέψης του πτερυγίου πραγματοποιείται με τη συμμετρική αλλαγή της γωνίας των ινών της στρώσης του μονοαξονικού υλικού στα Καπάκια της δοκού όπως είναι στο Διάγραμμα 21.



Διάγραμμα 21: Η γωνία των ινών της στρώσης σε πτερύγια με σύζευξη κάμψης-στρέψης

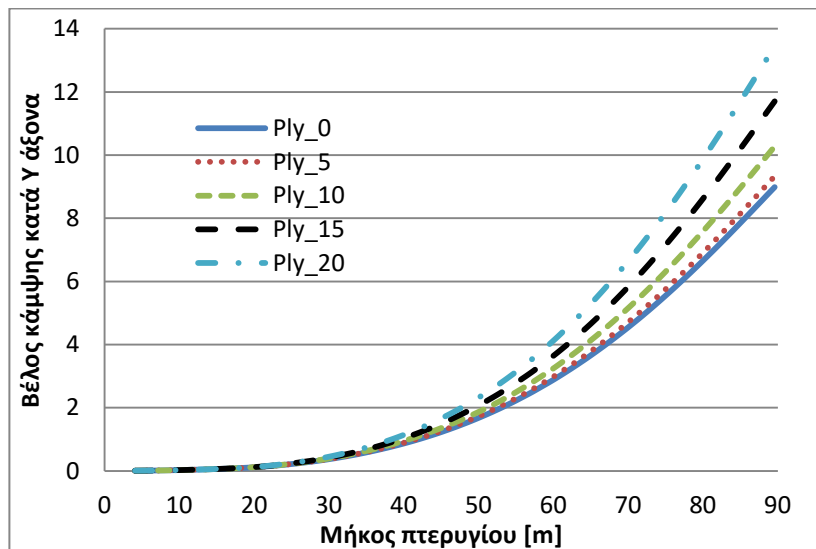
Το αεροδυναμικό φορτίο στις συνθήκες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, μετατρέπεται σε συγκεντρωμένη δύναμη μέσω της εξίσωσης και τότε εφαρμόζεται στις 101 διατομές του πτερυγίου μέσω των κόμβων MPC. Οι

κόμβοι με την σειρά τους κατανέμουν τις δυνάμεις και τις ροπές στους ακόλουθους κόμβους τους. Η απόσταση μεταξύ της διατομής i και της ρίζας του πτερυγίου είναι X και η συγκεντρωμένη δύναμη της διατομής i είναι F , όπου $0 < i < 101$, τότε:

$$F = \frac{1}{2} \times (X_{i+1} - X_{i-1}) \times (f_{i+1} - f_{i-1}) \quad 5-1$$

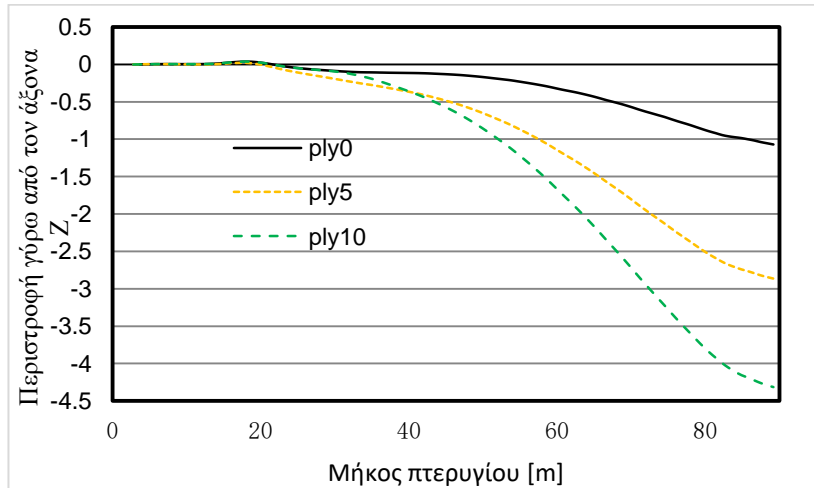
Το Διάγραμμα 22 δείχνει το βέλος κάμψης του πτερυγίου σε διάφορες γωνίες των ινών των στρώσεων. Οι γωνίες που μελετήθηκαν στη παρούσα έρευνα είναι 0° (δηλαδή ο αρχικός προσανατολισμός των ινών) 5° , 10° , 15° και 20° μοίρες. Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι γωνίες ήταν θετικές στα πάνω Καπάκια και αρνητικές στα κάτω Καπάκια του πτερυγίου. Από το εν λόγω διάγραμμα παρατηρείται το εξής:

- Όσο αυξάνεται η γωνία των ινών του μονοαξονικού υλικού των καπακιών τόσο αυξάνεται το βέλος κάμψης
- Δεν επηρεάζεται το βέλος κάμψης από την αλλαγή της γωνίας των ινών από τη ρίζα του πτερυγίου μέχρι τη διατομή (που απέχει περίπου 30 μέτρα από τη ρίζα).
- Η διαφορά του βέλους κάμψης λόγω αλλαγής γωνίας παρατηρείται μετά από αυτό το σημείο και γίνεται πολύ έντονη στο άκρο του πτερυγίου.
- Οι γωνίες 0° και 5° μοιρών δίνουν πολύ κοντά αποτελέσματα του βέλους κάμψης που ισούται περίπου με 9 μέτρα. Όμως οι σημαντικές αλλαγές του βέλους κάμψης παρατηρούνται στις μεγάλες γωνίες, δηλαδή από 10° μέχρι 20° , όπου το βέλος κάμψης φτάνει μέχρι 13 μέτρα.



Διάγραμμα 22: Το βέλος κάμψης κατά τον άξονα Y σε διάφορες γωνίες στρώσεων.

Στο Διάγραμμα 23 φαίνεται η στρέψη του πτερυγίου γύρω από τον άξονα Z του πτερυγίου σε διάφορες γωνίες ινών του υλικού των καπακιών του πτερυγίου.



Διάγραμμα 23: Κατανομή της γωνίας στρώσης γύρω από τον άξονα Z σε διάφορες γωνίες στρώσεων.

Λόγω του αεροδυναμικού φορτίου, η παραμόρφωση του πτερυγίου είναι συνεχόμενη κατά μήκος του πτερυγίου. Όταν η γωνία της στρώσης είναι μηδενική, τότε η μέγιστη μετατόπιση στο άκρο του πτερυγίου είναι 8.9894 μέτρα. Όταν η γωνία της στρώσης ισούται με 5, 10, 15 και 20 μοίρες, τότε η μέγιστη παραμόρφωση του πτερυγίου είναι 9.3303, 10.273, 11.699 και 13.445 μέτρα αντίστοιχα. Συγκρίνοντας με το κανονικό πτερύγιο, οι παραμορφώσεις της κάμψης του πτερυγίου με BTC αυξάνονται ελαφρά λόγω το ότι η αλλαγή της γωνίας των ινών θα μειώσει την δυσκαμψία του πτερυγίου στην κατεύθυνση της πτερύγισης. Συγκρίνοντας τις παραμορφώσεις με γωνίες 0, 5, 10, 15 και 20 μοιρών υπό την αντίδραση του αεροδυναμικού φορτίου, παρατηρείται ότι η σύζευξη κάμψης-στρέψης των υλικών παίζει ρόλο. Κάτω από το φορτίο του ανέμου, το πτερύγιο θα στρέψει καθώς κάμπτεται.

Τα δύο παραπάνω διαγράμματα δείχνουν την σύζευξη κάμψης-στρέψης του πτερυγίου μέσω αλλαγής της γωνίας των ινών της στρώσης σε όλη τη περιοχή των καπακιών (Caps). Καθώς η δυσκαμψία της πτερύγισης του πτερυγίου μειώνεται όταν η γωνία των ινών αλλάζει, τότε οι παραμορφώσεις κάμψης του πτερυγίου αυξάνονται. Για να αποζημιωθεί αυτή η μείωση της ακαμψίας, είναι συνήθως απαραίτητο να αυξηθεί το πάχος των καπακιών. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μάζας του πτερυγίου και συνεπώς την αύξηση του κόστους. Οι Bottaso κ.ά. [9] χρησιμοποίησε αριθμητική μέθοδος για να μελετήσει την επίδραση της περιοχής σύζευξης στην απόδοση του πτερυγίου με BTC και διαπίστωσε ότι όταν η γωνία ινών στρώσης μεταβάλλεται ξεκινώντας από τη θέση του μέγιστου μήκους χορδής του πτερυγίου μέχρι το άκρο του πτερυγίου, αποκτάται το ίδιο ποσοστό μείωσης όπως στο πλήρες συζευγμένο πτερύγιο, ενώ η μάζα του πτερυγίου μειώνεται κατά 1.5% σε σύγκριση με το πλήρες συζευγμένο πτερύγιο.

5.5 Μελέτη λυγισμού πτερυγίου

5.5.1 Ορισμός

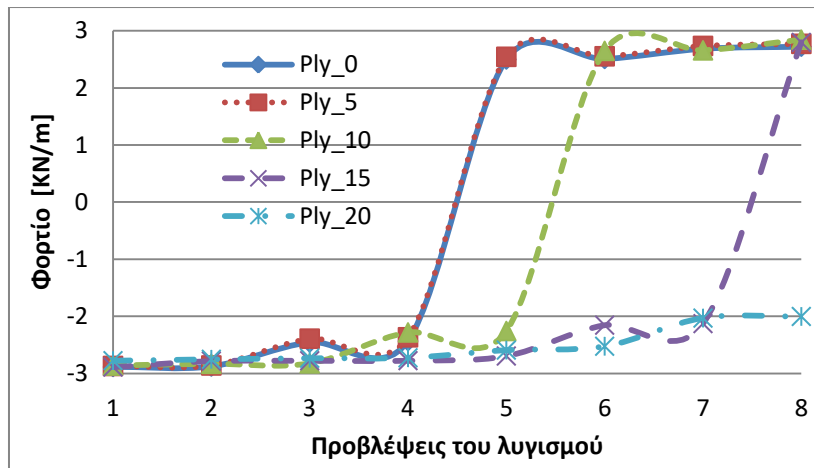
Ο λυγισμός χαρακτηρίζεται από μια ξαφνική πλευρική βλάβη ενός δομικού στοιχείου που υπόκειται σε υψηλή τάση θλίψεως, όπου η θλιπτική τάση στο σημείο της αστοχίας είναι μικρότερη από τη τελική συμπίεση που το υλικό είναι ικανό να αντέξει. Η μαθηματική ανάλυση του λυγισμού συχνά χρησιμοποιεί μια «τεχνητή» αξονική εκκεντρότητα φορτίου που εισάγει μια δευτερεύουσα ροπή κάμψης που δεν αποτελεί μέρος των αρχικών εφαρμοζόμενων δυνάμεων που μελετώνται. Όταν ένα εφαρμοζόμενο φορτίο αυξάνεται αρκετά σε ένα μέλος, όπως μια στήλη, τότε το μέλος γίνεται ασταθές και λέγεται ότι έχει λυγίσει. Το πρόσθετο φορτίο θα προκαλέσει σημαντικές και κάπως απρόβλεπτες παραμορφώσεις και πιθανόν να οδηγήσει σε πλήρη απώλεια της ικανότητας φόρτωσης του μέλους. Εάν οι παραμορφώσεις που ακολουθούν το λυγισμό δεν είναι καταστροφικές, το μέλος θα συνεχίσει να μεταφέρει το φορτίο που το έκανε να λυγίσει.

5.5.2 Λυγισμός λόγω φορτίου (*Eigen value Buckling*)

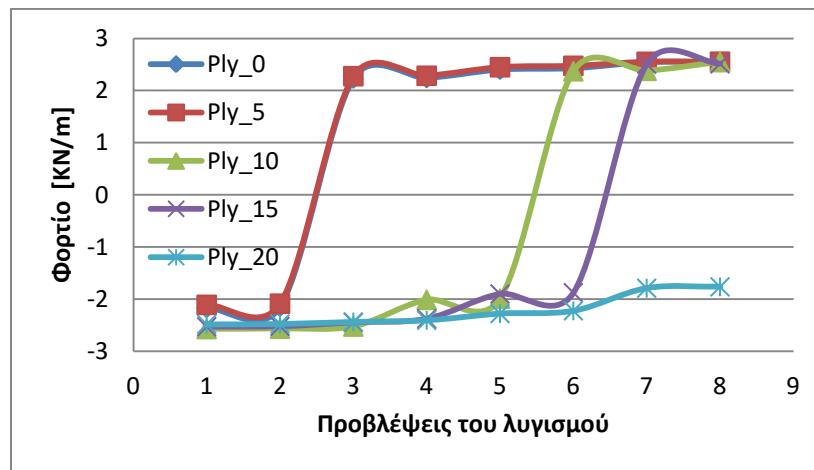
Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των κρίσιμων φορτίων που προκαλούν το λυγισμό και δείχνει τα σχήματα λυγισμού που αντιστοιχούν στα κρίσιμα φορτία. Ο σκοπός της ανάλυσης του λυγισμού είναι η πρόβλεψη των μέγιστων φορτίων που μπορεί να αντέξει μια δομή πριν να χάσει την αστάθειά της ή να καταρρεύσει.

Στα παρακάτω διαγράμματα, από το Διάγραμμα 24 μέχρι και το Διάγραμμα 26, φαίνονται τα πρώτα οκτώ κρίσιμα φορτία που προκαλούν λυγισμό. Παρατηρείται ότι η μηδενική γωνία και η γωνία 5 μοιρών δίνουν, σε οποιοδήποτε πάχος, τις ίδιες προβλέψεις. Η γωνία 20 μοιρών και σε όλα τα πάχη πάντα δίνουν προβλέψεις να γίνει λυγισμό με αρνητικά φορτία. Όσο μειώνεται το πάχος τόσο γίνονται μικρότερα τα θετικά και τα αρνητικά φορτία που μπορεί να προκαλέσουν λυγισμό.

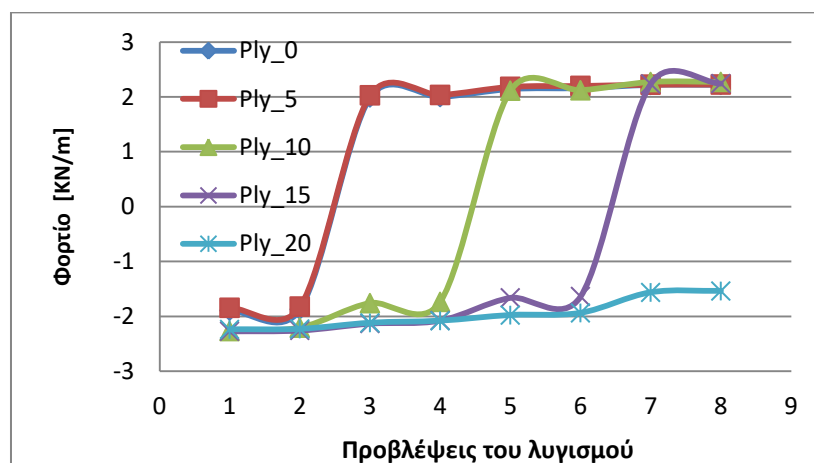
Στα υπόλοιπα διαγράμματα, από το Διάγραμμα 27 μέχρι και το Διάγραμμα 31, φαίνονται οι οκτώ προβλέψεις των κρίσιμων φορτίων που μπορεί να προκαλέσουν λυγισμό αλλά έχουν κατηγορηθεί ανά γωνία.



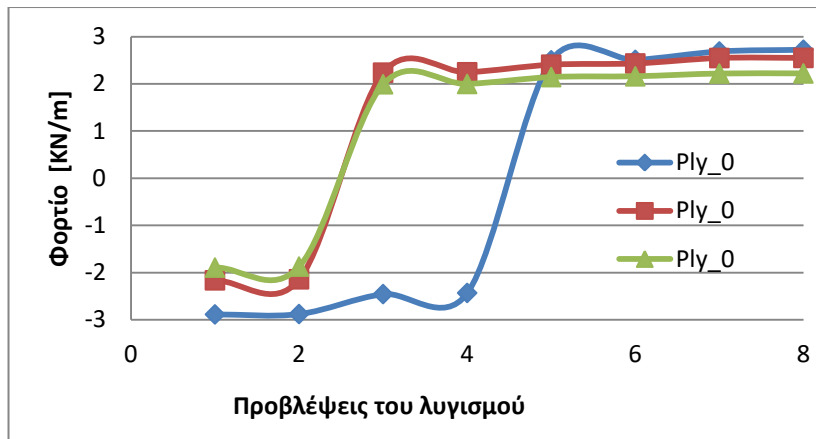
Διάγραμμα 24: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πετεργίου σε διάφορες γωνίες στρώσεων και με αρχικό πάχος.



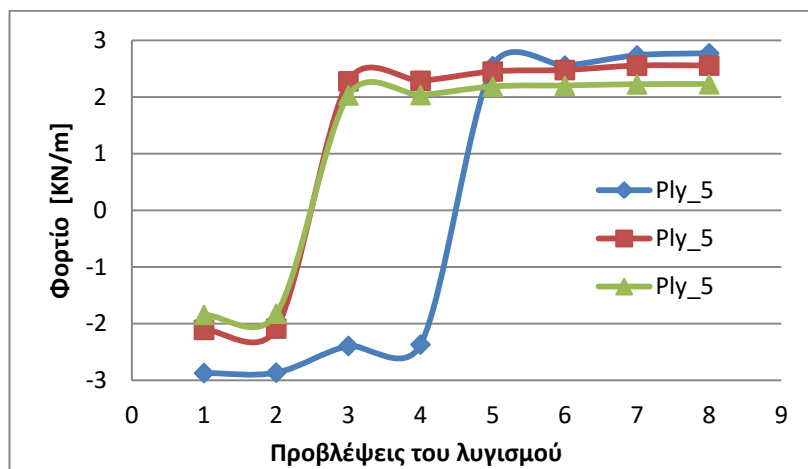
Διάγραμμα 25: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πετεργίου σε διάφορες γωνίες στρώσεων και με μειωμένο πάχος κατά 5 %.



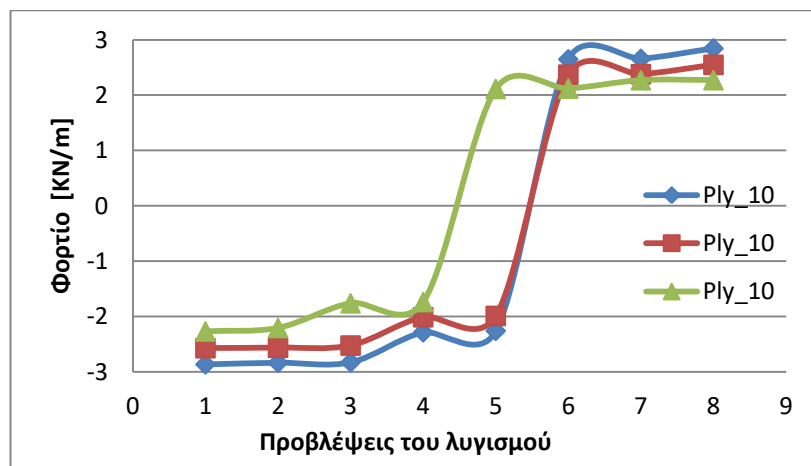
Διάγραμμα 26 Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πετεργίου σε διάφορες γωνίες στρώσεων και με μειωμένο πάχος κατά 10 %.



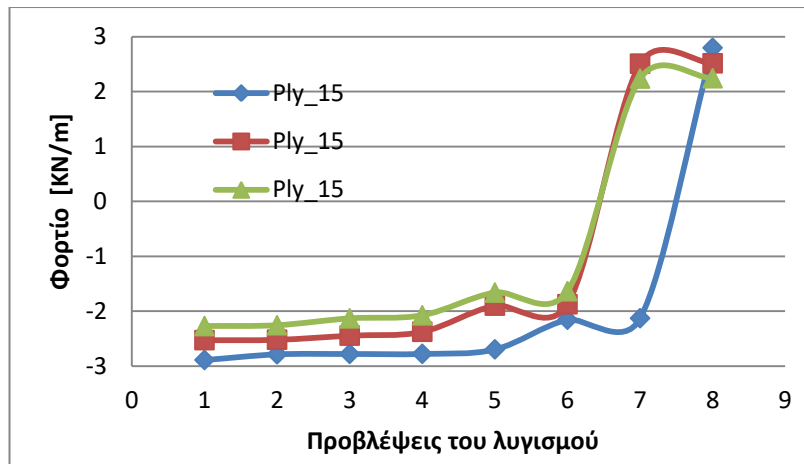
Διάγραμμα 27: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου της γωνίας 0 σε διάφορα πάχη στρώσεων.



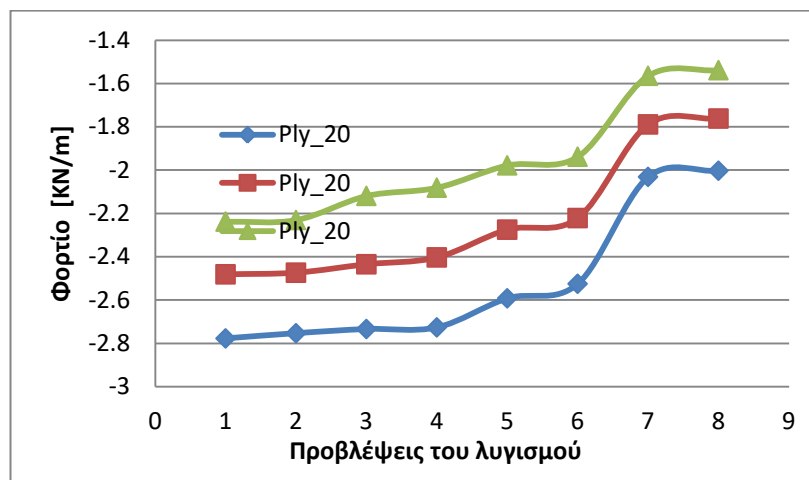
Διάγραμμα 28: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου της γωνίας 5 σε διάφορα πάχη στρώσεων.



Διάγραμμα 29: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου της γωνίας 10 σε διάφορα πάχη στρώσεων.



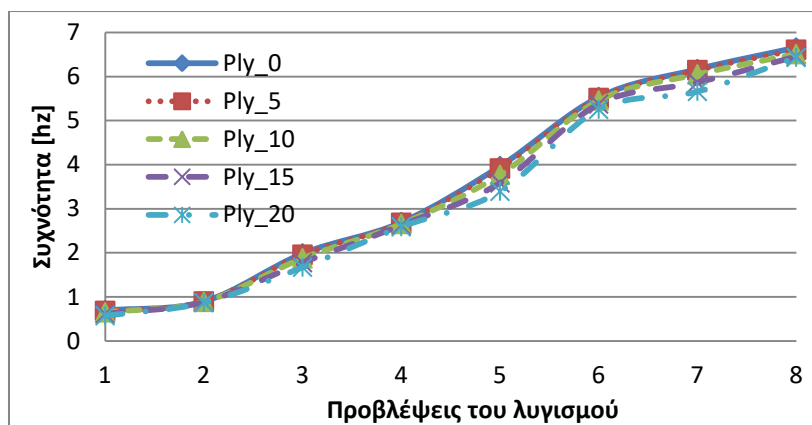
Διάγραμμα 30: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου της γωνίας 15 σε διάφορα πάχη στρώσεων.



Διάγραμμα 31: Οι πρώτες 8 προβλέψεις του λυγισμού του πτερυγίου της γωνίας 20 σε διάφορα πάχη στρώσεων.

5.5.3 Ανάλυση λόγω δόνησης (Modal Analysis)

Είναι ένας τρόπος υπολογισμού των φυσικών συχνοτήτων του συστήματος και έτσι μπορεί εύκολα κάποιος να μάθει ποιες συχνότητες είναι επικίνδυνες και καταστροφικές. Με αυτή την ανάλυση εντοπίζονται οι ιδιοσυχνότητες του συστήματος, οι αντίστοιχες μορφές του και συγκρίνονται οι τιμές των παραπάνω ιδιοσυχνοτήτων με τις τιμές των προβλεπόμενων συχνοτήτων των φορτίων που αντιμετωπίζει το σύστημα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Έτσι, μπορείτε να βρείτε φυσικές συχνότητες και να συγκρίνετε τις τιμές τους με τις τιμές της αναμενόμενης συχνότητας των αναγκασμένων κραδασμών που μπορεί να αντιμετωπίσει το σύστημα κατά τη χρήση του. Αν η τιμή μιας τέτοιας συχνότητας συναντά τη φυσική συχνότητα του συστήματος τότε θα υπάρξει συντονισμός και αυτό θα ισοδυναμεί με την αύξηση του πλάτους των δονήσεων στη μέγιστη τιμή και η κατασκευή μπορεί να καταρρεύσει.



Διάγραμμα 32: Οι πρώτες οκτώ φυσικών συχνοτήτων του πτερυγίου σε διαφορετικές γωνίες στρώσεων.

Αλλάζοντας τη γωνία των ινών της στρώσης του μονοαξονικού υλικού στα Καπάκια του πτερυγίου από 0 σε 20 μοίρες, κατά διάστημα 5 μοιρών και χωρίς να μειωθεί το πάχος του πτερυγίου καθόλου, καταγράφονται οι εξής πρώτες οκτώ φυσικές συχνοτήτες του πτερυγίου που εξήχθησαν μέσω λογισμικού ANSYS-APDL και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 32.

Για την ίδια συχνότητα με αύξηση της γωνίας της στρώσης, τα πράγματα γίνονται πιο πολύπλοκα. Αυτό συμβαίνει επειδή οι τύποι δόνησης υψηλής τάξης είναι πολύπλοκοι και η επίδραση της γωνίας της στρώσης στη δυσκαμψία του κάθε τμήματος του πτερυγίου είναι διαφορετική. Καθώς αυξάνεται η γωνία της στρώσης, μειώνεται η φυσική συχνότητα χαμηλής τάξης του πτερυγίου με αποτέλεσμα να έρθει πιο κοντά στη δόνηση του πτερυγίου και να είναι πιο εύκολο να προκαλέσει συντονισμό που οδηγεί σε λυγισμό. Συνεπώς, όταν σχεδιάζεται το πτερύγιο με BTC, η επίδραση της γωνίας της στρώσης στις φυσικές συχνοτήτες πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν για να διασφαλιστεί ότι το πτερύγιο δεν θα καταρρεύσει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Καθώς αυξάνεται η γωνία της στρώσης, οι συχνοτήτες της πρώτης, τρίτης, πέμπτης και όγδοης τάξης του πτερυγίου μειώνονται σταδιακά. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της γωνίας στρώσης μειώνει την δυσκαμψία του πτερυγίου στη κατεύθυνση της πτερύγισης. Αντιθέτως, η συχνότητα στη κατεύθυνση της στρέψης μειώνεται λίγο. Η αλλαγή συχνότητας στη κατεύθυνση της πτερύγισης είναι μικρή λόγω της αλλαγής της γωνίας της στρώσης που έχει μικρή επίδραση στην δυσκαμψία και επηρεάζεται, βασικώς, από την βαρύτητα.

5.6 Ελαφρύς σχεδιασμός πτερυγίου με BTC

Λόγω της επίδρασης του υλικού με BTC, το πτερύγιο στρέφει όσο κάμπτεται λόγω του φορτίου της πτερύγισης. Οι παραμορφώσεις της στρέψης μειώνουν τη γωνία της προσβολής του πτερυγίου, για αυτό, το αεροδυναμικό φορτίο στο πτερύγιο μειώνεται. Από τους υπολογισμούς του φορτίου στο κεφαλαίο 2, μπορούμε να δούμε ότι το αεροδυναμικό φορτίο του πτερυγίου με BTC είναι μικρότερο από όσο είναι στο κανονικό πτερύγιο αλλά η μάζα και το αδρανειακό φορτίο του πτερυγίου δεν θα αλλάξουν λόγω της αλλαγής της γωνίας της

στρώσης. Συνεπώς, το συνολικό εξωτερικό φορτίο στο πτερύγιο με BTC είναι μικρότερο από το αντίστοιχο στο κανονικό πτερύγιο. Βάση αυτού, σε αυτήν την έρευνα θα εξεταστεί η περίπτωση μείωσης της μάζας του πτερυγίου μειώνοντας το υλικό. Επίσης, η απόλυτη αντοχή είναι ένα σημαντικό κριτήριο στο σχεδιασμό του πτερυγίου. Αυτό σχετίζεται με την ασφάλεια των πτερυγίων. Αν η απόλυτη αντοχή των πτερυγίων δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις, τα πτερύγια μπορεί να υποστούν από κατάρρευση όπως ρωγμές και θραύσεις όταν λειτουργούν σε ακραίες συνθήκες ανέμου. Για αυτό, ο σχεδιασμός του ελαφρύ πτερυγίου θα πρέπει να διασφαλίζει την ικανοποίηση του πτερυγίου στις απαιτήσεις της απόλυτης αντοχής.

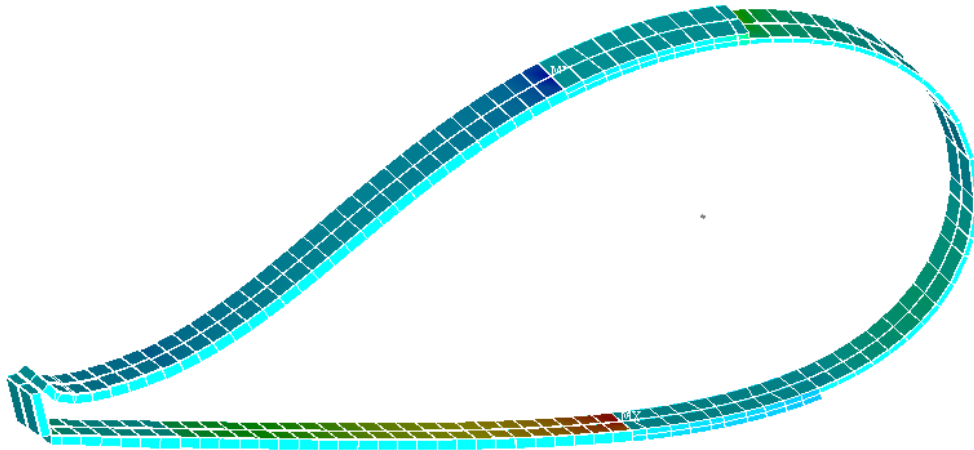
5.7 Ελαχιστοποίηση πάχους πτερυγίου

Τα φορτία πτερύγισης (Flap-wise) είναι σημαντικά υψηλότερα από τα φορτία περιστροφής (Edge-wise), ειδικά στις εξαιρετικές συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Συνεπώς, αυτά τα φορτία οδηγούν στο σχεδιασμό του πτερυγίου. Για αυτό, η παρούσα έρευνα συγκεντρώνεται στον έλεγχο της αντοχής του πτερυγίου υπό την μέγιστη ροπή κάμψης της πτερύγισης. Στο κεφαλαίο 3 υπολογίστηκε το απόλυτο φορτίο που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή κάμψης της ρίζας του πτερυγίου και εκτιμήθηκε το δομικό φορτίο του πτερυγίου υπό εξαιρετικές συνθήκες. Επομένως, έχουμε βρει τις παραπάνω συνθήκες φορτίου για να ελεγχθεί το απόλυτο φορτίο του πτερυγίου.

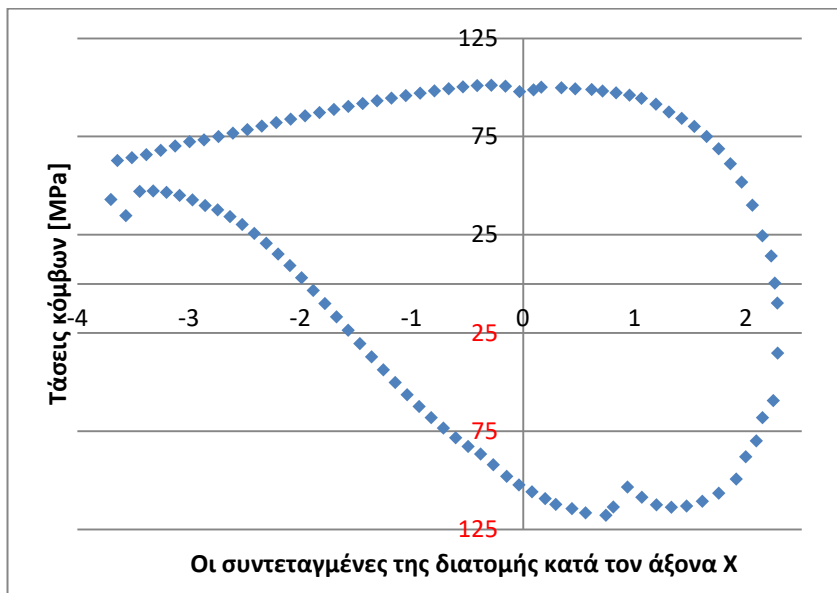
5.7.1 Ανάλυση τάσεων σε διατομή

Οι τάσεις των υλικών του πτερυγίου των 5, 10, 15 και 20 μοιρών του κανονικού πτερυγίου έχουν εξεταστεί κάτω από εξαιρετικές συνθήκες για να βρεθεί ο ελαφρύς σχεδιασμός του πτερυγίου. Στο κεφαλαίο 3 φαίνεται ότι τα Καπάκια είναι το τμήμα κλειδί που μεταφέρει το φορτίο του πτερυγίου στη πλήμνη. Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 16 τα Καπάκια είναι επικαλυμμένα με τριαξονικό υλικό στη ρίζα του πτερυγίου και με λίγη Μπάλσα στο άκρο του πτερυγίου, το υπόλοιπο μέρος του πτερυγίου έχει κατασκευαστεί από μονοαξονικό υλικό. Συνεπώς, το πάχος της στρώσης θα μειωθεί μέσω ανάλυσης των τάσεων του μονοαξονικού υλικού. Εκτός αυτού, το ξύλο της Μπάλσα δεν έχει δυσκαμψία και δεν είναι σύνθετο υλικό, για αυτό δεν θα εξεταστεί η ανάλυση τάσεων σε αυτό το υλικό.

Η δομή του πτερυγίου μοιάζει με μακρόστενη δοκό που παράγει παραμορφώσεις κάμψης προς τη πτερύγιση υπό την επίδραση του φορτίου του αέρα. Συγκρίνοντας τις τάσεις στις άλλες κατευθύνσεις, οι ορθές τάσεις κατά τον άξονα Z της διατομής, όπως αυτήν που φαίνεται σε επίπεδο πεπερασμένων στοιχείων στο Διάγραμμα 33, του πτερυγίου είναι πιο συγκεντρωμένες εδώ. Το Διάγραμμα 34 δείχνει ένα παράδειγμα των κατά τον άξονα Z ορθών τάσεων των κόμβων σε μια διατομή του πτερυγίου.

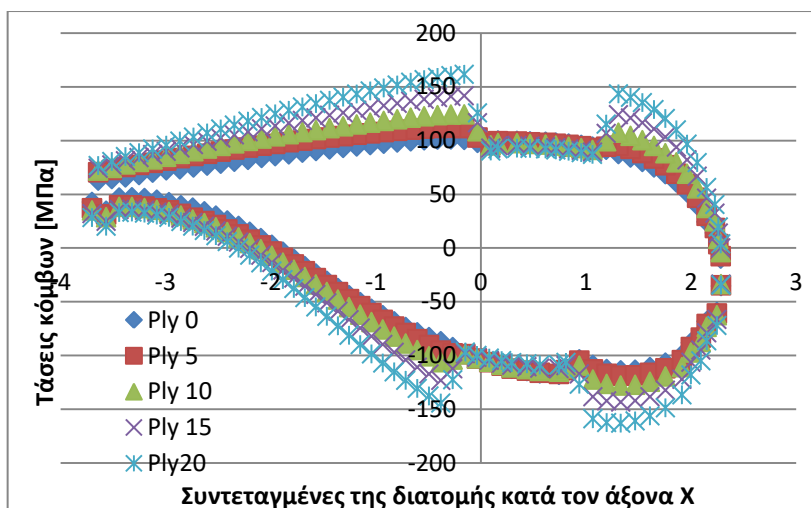


Διάγραμμα 33: Τα πεπερασμένα στοιχεία της διατομής της θέσης Z=26.199

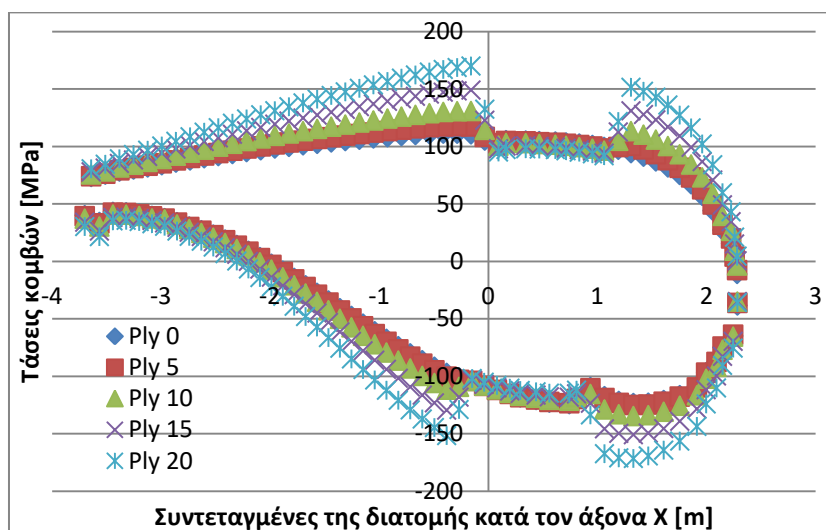


Διάγραμμα 34: Οι ορθές τάσεις κόμβων κατά τον άξονα Z της μονοαξονικής στρώσης της διατομής της απόστασης 26.199 m από την ρίζα.

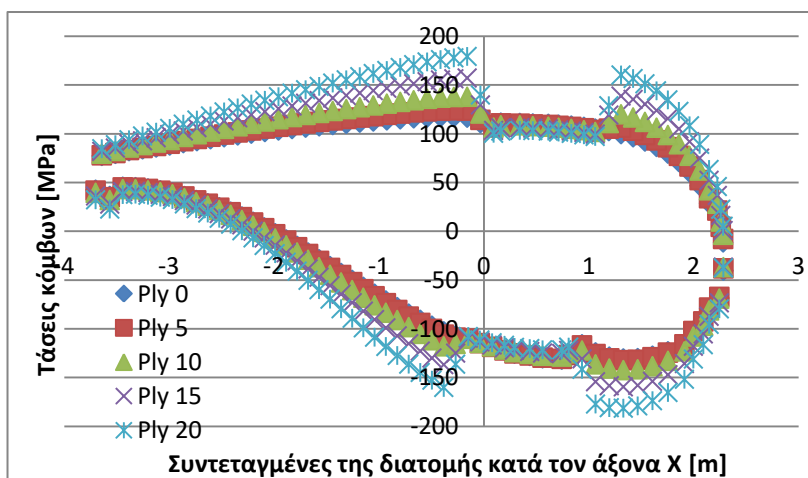
Το απόλυτο φορτίο που αντιστοιχεί στο DLC1.3 εφαρμόστηκε στο πολυστρωματικό πτερύγιο με 5, 10, 15 και 20 μοίρες και σε κανονικό πτερύγιο (δηλαδή με μηδενική γωνία) για να συγκριθούν οι μεταβολές των τάσεων της διατομής του πτερυγίου. Από Το Διάγραμμα 35 μέχρι το Διάγραμμα 42 παρουσιάζονται οι κατά τον άξονα Z ορθές τάσεις των κόμβων σε μία διατομή και φαίνεται πόσο αλλάζουν, στα Καπάκια του πτερυγίου, με την αύξηση της γωνίας στρώσης. Όπως αναμενόταν, η τάση του μονοαξονικού υλικού μειώνεται με την αύξηση της γωνίας της στρώσης λόγω της αλλαγής της γωνίας προσβολής.



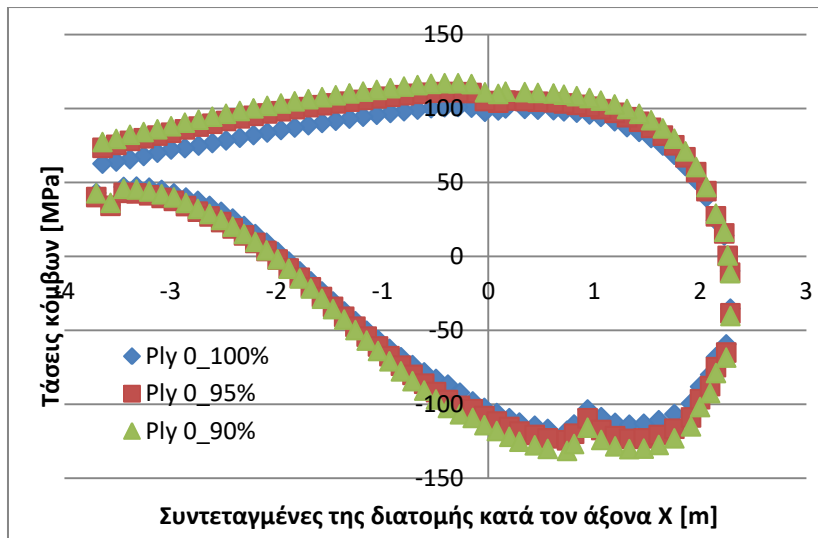
Διάγραμμα 35: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων της διατομής $r=26.199$ m σε διάφορες γωνίες στρώσης χωρίς μείωση πάχους.



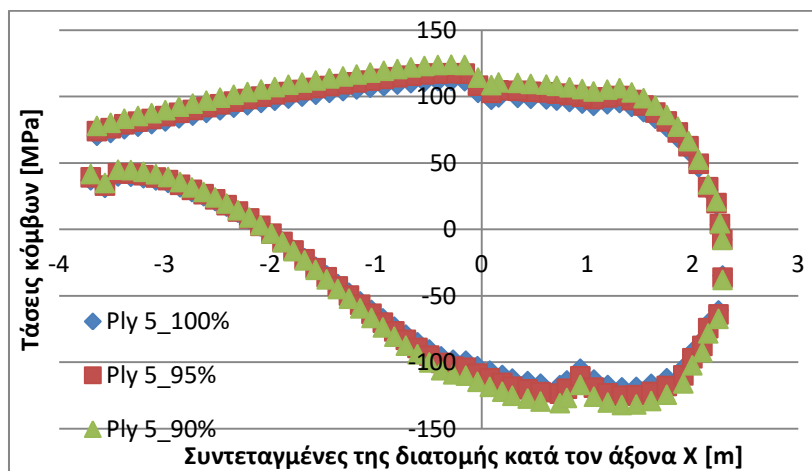
Διάγραμμα 36: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων της διατομής $r=26.199$ m σε διάφορες γωνίες στρώσης με μειωμένο πάχος κατά 5%



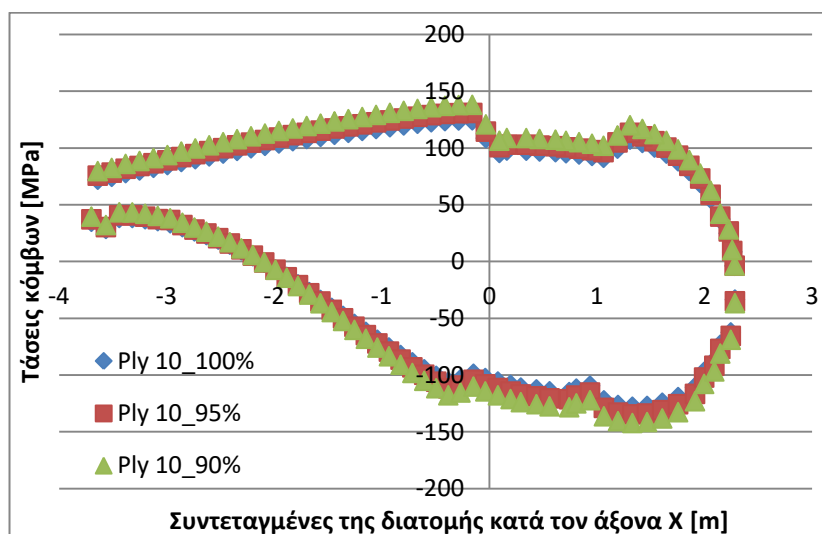
Διάγραμμα 37: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων της διατομής $r=26.199$ m σε διάφορες γωνίες στρώσης με μειωμένο πάχος κατά 10%



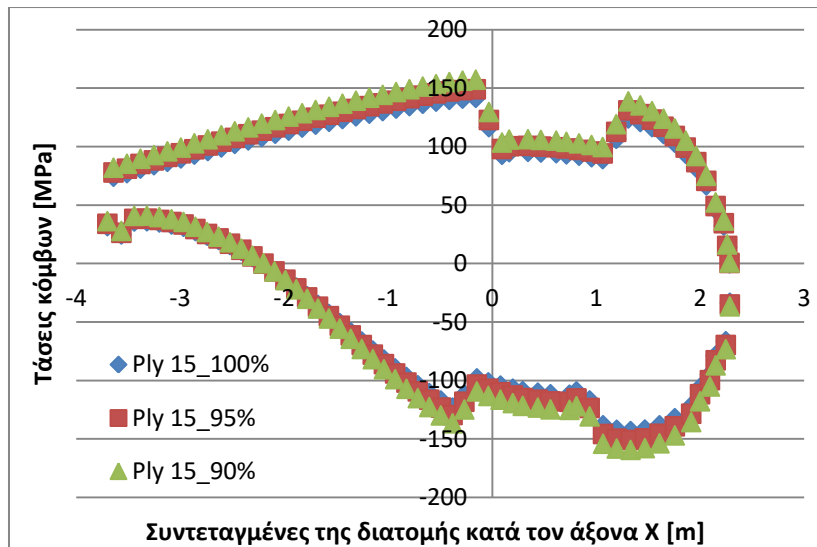
Διάγραμμα 38: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων της διατομής $r=26.199$ m σε γωνία 0° αλλά με διαφορετικά πάχη.



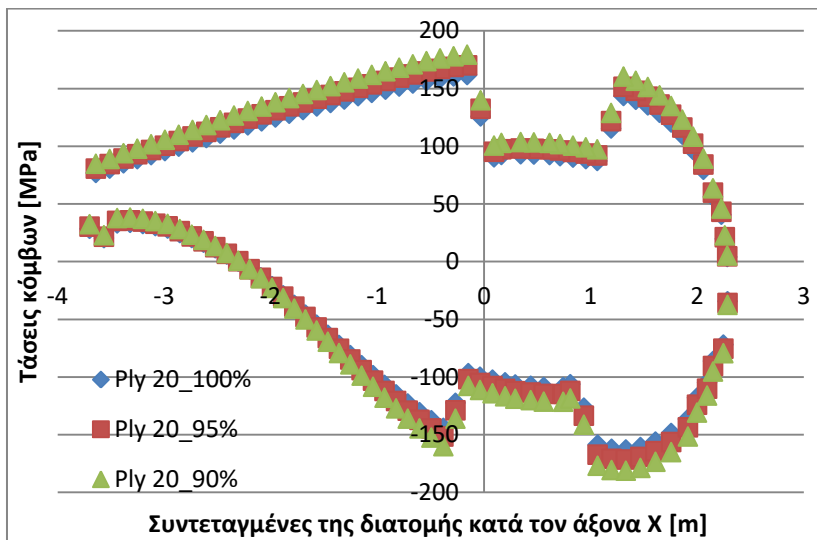
Διάγραμμα 39: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων της διατομής $r=26.199$ m σε γωνία 5° αλλά με διαφορετικά πάχη.



Διάγραμμα 40: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων της διατομής $r=26.199$ m σε γωνία 10° αλλά με διαφορετικά πάχη.



Διάγραμμα 41: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων της διατομής $r = 26.199$ m σε γωνία 15° αλλά με διαφορετικά πάχη.



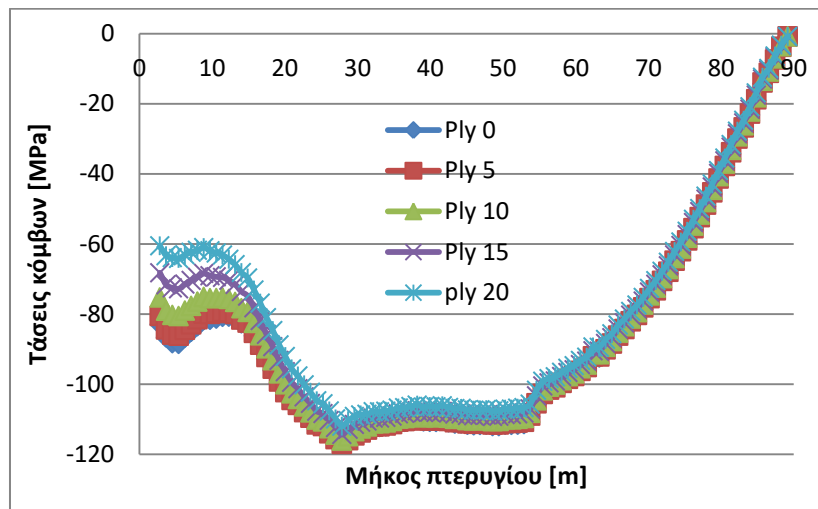
Διάγραμμα 42: Σύγκριση ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων της διατομής $r = 26.199$ m σε γωνία 20° αλλά με διαφορετικά πάχη.

Η απόλυτη αντοχή του περυγίου σχετίζεται με τη στρώση του υλικού και το φορτίο. Η τάση του περυγίου με BTC είναι μικρότερη από ότι είναι σε κανονικό περύγιο. Το επίπεδο τάσης των καπακιών του περυγίου με μειωμένο πάχος είναι μικρότερο από ό,τι είναι στο κανονικό περύγιο. Με αυτόν τον τρόπο, η μάζα του περυγίου μπορεί να μειωθεί.

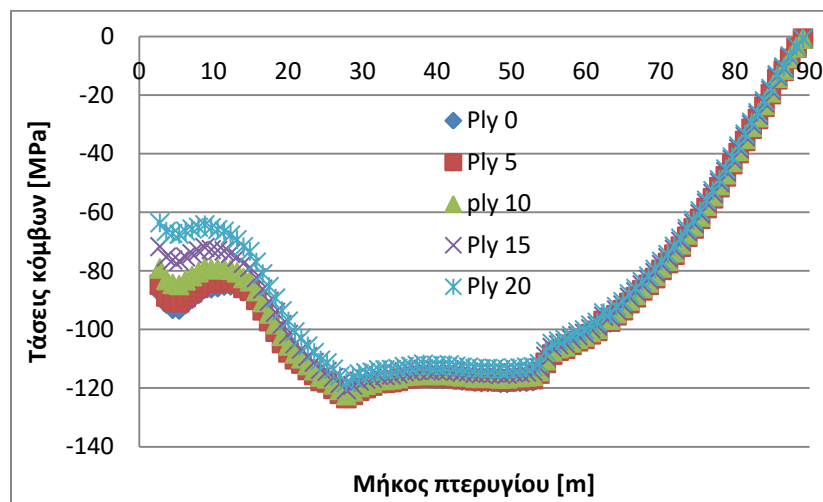
5.7.2 Ανάλυση τάσεων κατά μήκος καπακιών πτερυγίου

Στη προηγούμενη παράγραφο έγινε μια ανάλυση κατά τον άξονα Z ορθών τάσεων σε μια διατομή. Τώρα θα πραγματοποιηθεί μια ανάλυση ορθών τάσεων στα καπάκια κατά μήκος του πτερυγίου για να μελετηθεί η επίδραση της αλλαγής γωνίας στρώσης και η αλλαγή πάχους του πτερυγίου στο μέγεθος και στη κατανομή των τάσεων.

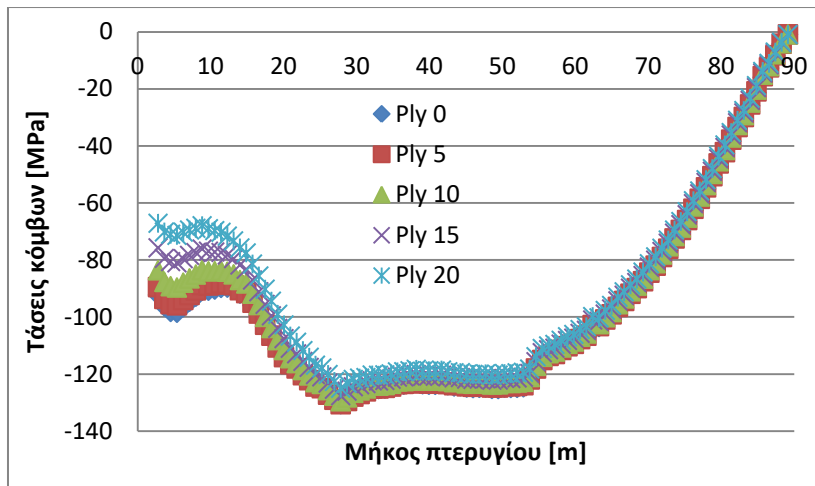
Στα πρώτα τρία διαγράμματα φαίνεται ότι η αλλαγή πάχους οδηγεί σε αύξηση μεγέθους των ορθών τάσεων στα καπάκια του πτερυγίου. Επίσης, φαίνεται ότι η διαφορά μεταξύ των τάσεων γίνεται πιο σαφή στη περιοχή της ρίζας του πτερυγίου. Παρατηρείται από τα εν λόγω διαγράμματα ότι οι ορθές τάσεις παίρνουν τη μέγιστη τιμή τους στη διατομή που έχει την μεγαλύτερη χορδή η οποία απέχει περίπου 26 μέτρα από τη ρίζα.



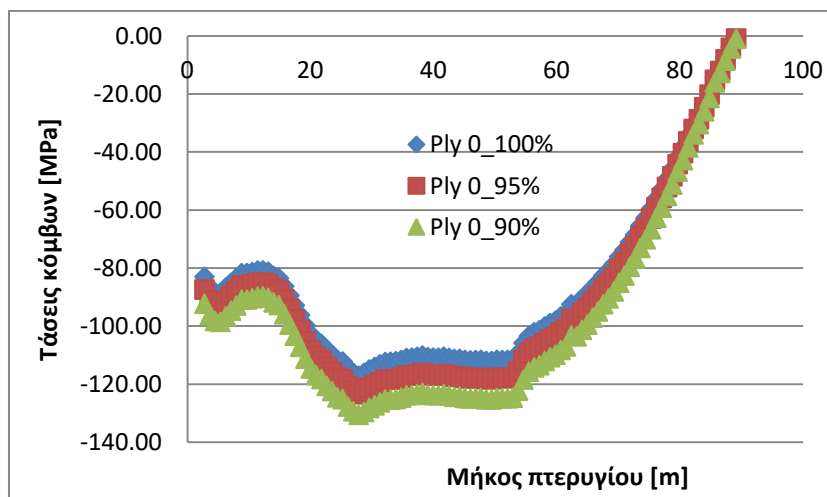
Διάγραμμα 43: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω καπακιών σε διαφορετικές γωνίες στρώσης σε αρχικό πάχος.



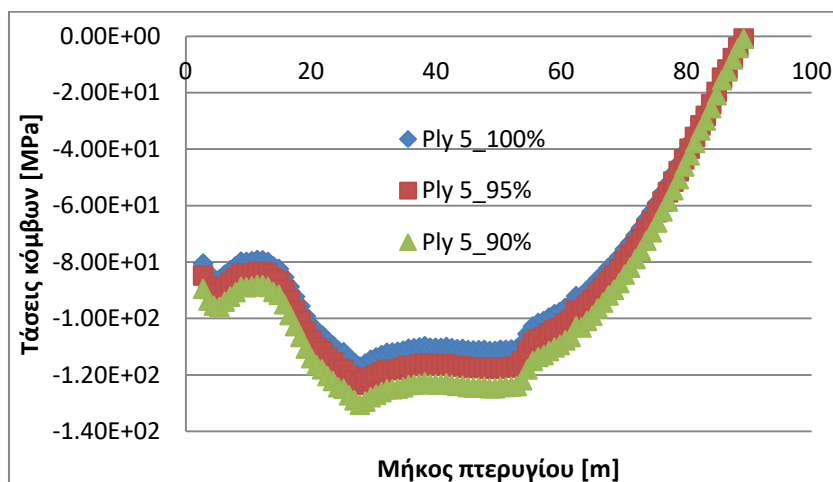
Διάγραμμα 44: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω καπακιών σε διαφορετικές γωνίες στρώσης σε μειωμένο πάχος κατά 5%.



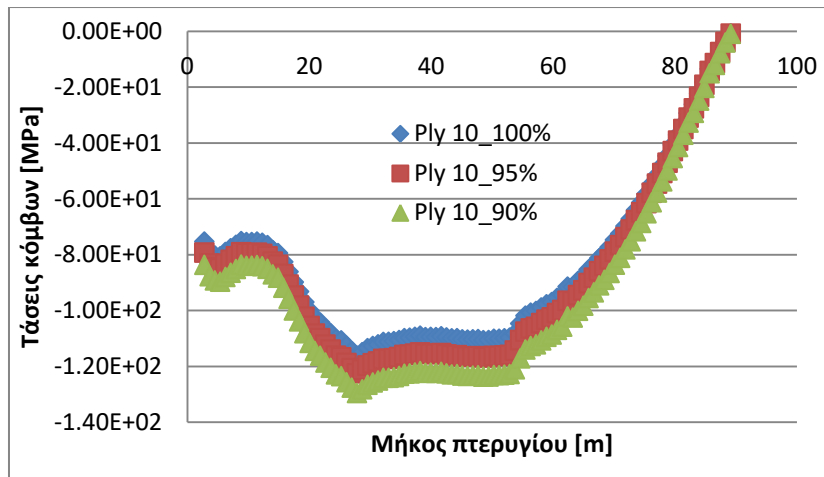
Διάγραμμα 45: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω καπακιών σε διαφορετικές γωνίες στρώσης σε μειωμένο πάχος κατά 10%.



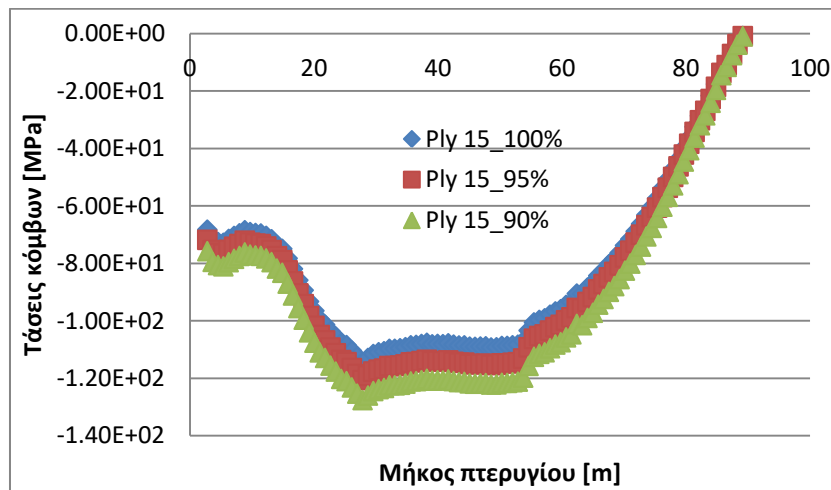
Διάγραμμα 46: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω καπακιών σε μηδενική γωνία στρώσης σε διάφορα πάχη.



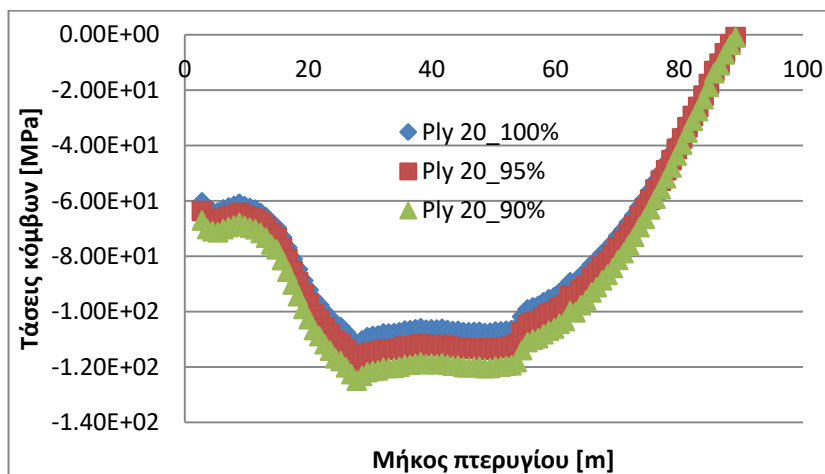
Διάγραμμα 47: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω καπακιών σε γωνία στρώσης 5° σε διάφορα πάχη.



Διάγραμμα 48: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω κατακίων σε γωνία στρώσης 10° σε διάφορα πάχη.



Διάγραμμα 49: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω κατακίων σε γωνία στρώσης 15° σε διάφορα πάχη.



Διάγραμμα 50: Κατανομή ορθών τάσεων, κατά τον άξονα Z, κόμβων των κάτω κατακίων σε γωνία στρώσης 20° σε διάφορα πάχη.

5.8 Δυσκαμψία πτερυγίου και έλεγχος μοντέλου μειωμένου μάζας

Από τη παραπάνω ανάλυση, ήταν φανερό πως οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι διαφορετικές από τα άλλα μη ομογενή και ανισοτροπικά υλικά. Το βασικό υλικό του πτερυγίου είναι οι ίνες υάλου, οι οποίες είναι ξεκάθαρα ορθοτροπικές. Η πιο χαρακτηριστική ιδιότητα των ορθοτροπικών υλικών είναι η κατευθυντικότητα της στιβαρότητάς τους. Για αυτό, η μέγιστη τάση δεν αντιστοιχεί απαραίτητα σε κατάσταση κινδύνου. Η θεωρία της αντοχής των ισοτροπικών υλικών δεν εφαρμόζεται πια εδώ. Στη συνέχεια, η αντοχή του υλικού ελέγχεται από το μέγιστο κριτήριο τάσης που εφαρμόζεται στον έλεγχο αντοχής του σύνθετου υλικού.

Το κριτήριο της μέγιστης τάσης δηλώνει ότι για ένα ενιαίο στρώμα, η τάση στη κύρια κατεύθυνση πρέπει να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη αντοχή. Διαφορετικά το υλικό αποτυγχάνει.

Για τάση εφελκυσμού:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 < X_t \\ \sigma_2 < Y_t \\ |\tau_{12}| < S \end{array} \right\} \quad (5-2)$$

Για τάση θλίψης, οι πρώτοι δύο όροι αλλάζουν:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 > -X_c \\ \sigma_2 > -Y_c \end{array} \right\} \quad (5-3)$$

σ_1, σ_2 είναι οι ορθές τάσεις; τ_{12} είναι η διατμητική τάση; S είναι η αντοχή διάτμηση; X_t, Y_t είναι η αντοχή σε εφελκυσμό των σύνθετων υλικών κατά μήκος της κατεύθυνσης των ινών και κάθετα προς την κατεύθυνση των ινών αντίστοιχα; X_c, Y_c είναι η αντοχή σε θλίψη των σύνθετων υλικών κατά μήκος της κατεύθυνσης των ινών και κάθετα προς την κατεύθυνση των ινών αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα δεδομένα του πτερυγίου, οι παράμετροι της αντοχής των υλικών του πτερυγίου παρουσιάζονται στο πίνακα Πίνακας 5-3.

Πίνακας 5-3: Η αντοχή των υλικών του πτερυγίου.

	XTEN (MPa)	XCMP (MPa)	YTEN (MPa)	YCMP (MPa)	ZTEN (MPa)	ZCMP (MPa)	SXY (MPa)	SYZ (MPa)	SXZ (MPa)
Uniax	33.5	85.69	33.5	85.69	396.4	283.2	25.6	25.6	30.93
Triax	40.9	69.1	33.5	85.69	217.4	177.9	51.6	51.6	30.73

Εφαρμόζοντας τα αεροδυναμικά φορτία που υπολογίστηκαν στο κεφαλαίο 2, δημιουργούνται οι παρακάτω πίνακες που δείχνουν οι τιμές των τάσεων στην πρώτη, δεύτερη, τέταρτη και Πέμπτη στρώση του πτερυγίου. Από τον Πίνακας 5-3 και τον Πίνακας 5-4 φαίνεται ότι η μέγιστη εφελκυστική και θλιπτική τάση κάθε στρώματος υλικού κάτω από τη

δράση του τελικού φορτίου μετά τη μείωση της μάζας της λεπίδας BTC είναι χαμηλότερη από την αντοχή του υλικού και το υλικό δεν θα αποτύχει, έτσι ώστε η λεπίδα να είναι ασφαλής.

Πίνακας 5-4: Οι μέγιστες ορθές τάσεις των γωνιών 5, 10, 15, και 20 μοιρών αφού μειώθηκε το πάχος του περυγίου κατά 10%.

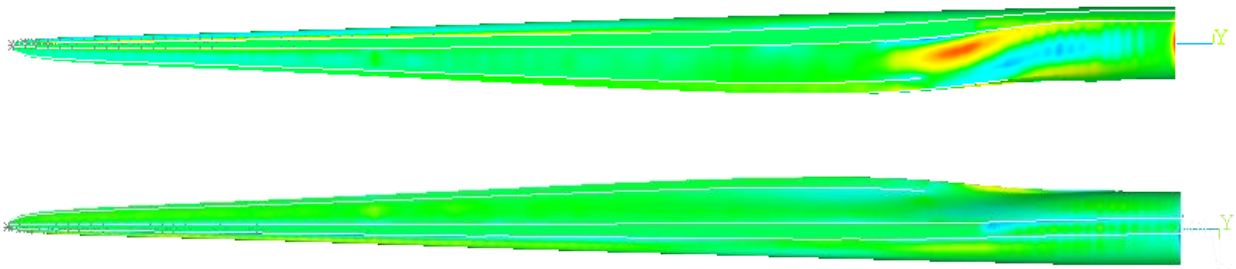
Ply5	XTEN(MPa)	XCMP(MPa)	YTEN(MPa)	YCMP(MPa)	ZTEN(MPa)	ZCMP(MPa)
First layer	-24.5	28.4	-50.1	33.9	-79.9	88.7
Second layer	-24.8	15.8	-14.4	10.6	-165	138
Fourth layer	-27	17.4	-14	12.4	-160	130
Fifth layer	-23.8	28.5	-14.8	21.9	-79.5	74.2

Ply10	XTEN(MPa)	XCMP(MPa)	YTEN(MPa)	YCMP(MPa)	ZTEN(MPa)	ZCMP(MPa)
First layer	-23.8	28.8	-50.6	33.6	-85.7	89.7
Second layer	-27	17.2	-14.2	11.3	-169	145
Fourth layer	-28.5	17.8	-13.9	12.5	-163	144
Fifth layer	-24.4	28.9	-14.7	21.8	-85.9	81.7

Ply15	XTEN(MPa)	XCMP(MPa)	YTEN(MPa)	YCMP(MPa)	ZTEN(MPa)	ZCMP(MPa)
First layer	-22.8	29.2	-51.8	33.3	-95.6	91.1
Second layer	-29.8	19.2	-14.2	12.4	-180	164
Fourth layer	-30.4	18.2	-14.8	12.7	-176	163
Fifth layer	-25.8	29.2	-16.2	21.9	-96.5	92.2

Ply20	XTEN(MPa)	XCMP(MPa)	YTEN(MPa)	YCMP(MPa)	ZTEN(MPa)	ZCMP(MPa)
First layer	-22.1	30	-53.5	33	-108	99.7
Second layer	-32.9	21.7	-14.2	13.6	-204	186
Fourth layer	-32.5	18.5	-15.8	13	-200	184
Fifth layer	-27.5	29.5	-17.8	22.1	-110	104

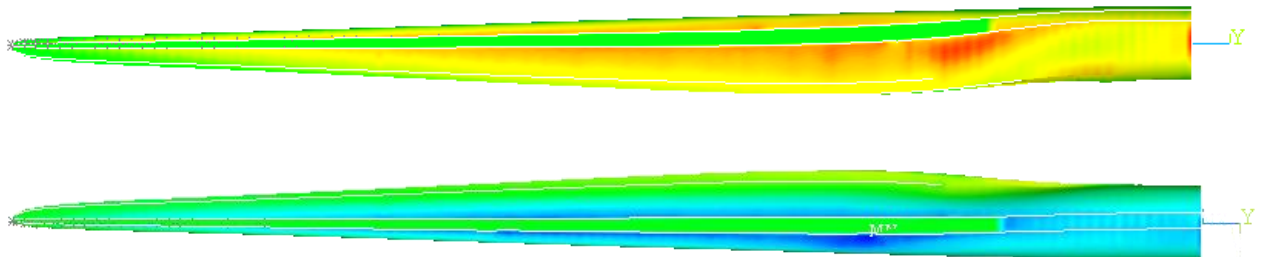
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι κατανομές των ορθών τάσεων κατά τους X, Y και Z άξονες στην 1^η, 2^η, 4^η και 5^η στρώση κατά μήκος του πτερυγίου με μειωμένο πάχος κατά 10 %.



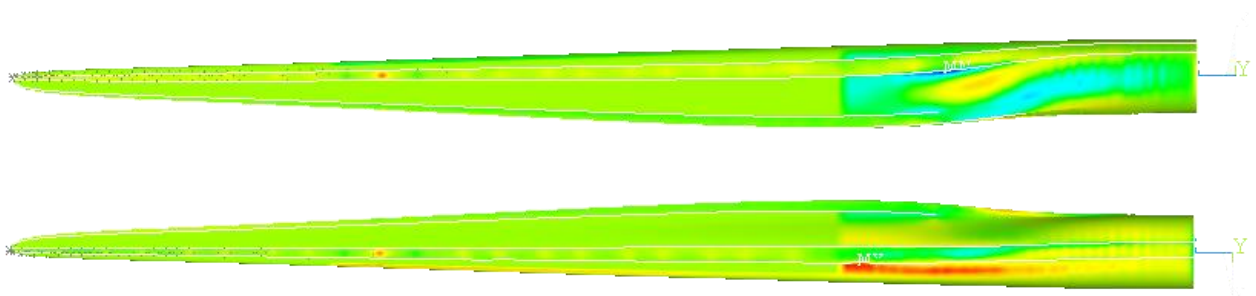
Διάγραμμα 51: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα X της πρώτης στρώσης του πτερυγίου.



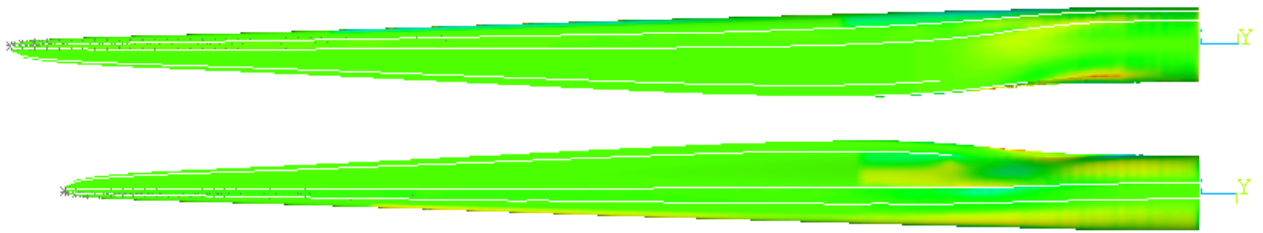
Διάγραμμα 52: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Y της πρώτης στρώσης του πτερυγίου.



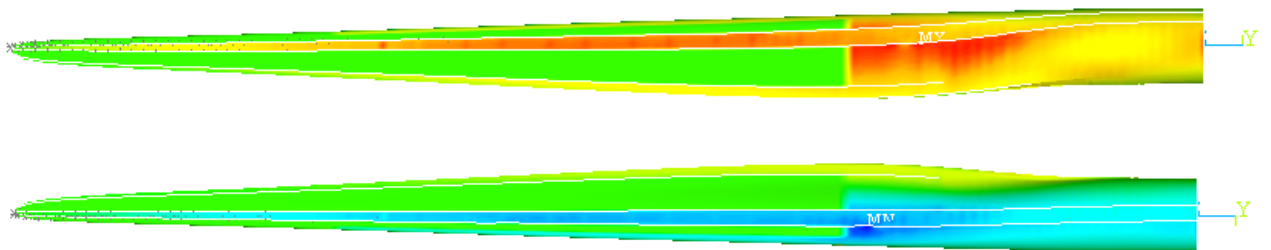
Διάγραμμα 53: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Z της πρώτης στρώσης του πτερυγίου.



Διάγραμμα 54: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα X της δεύτερης στρώσης του πτερυγίου.



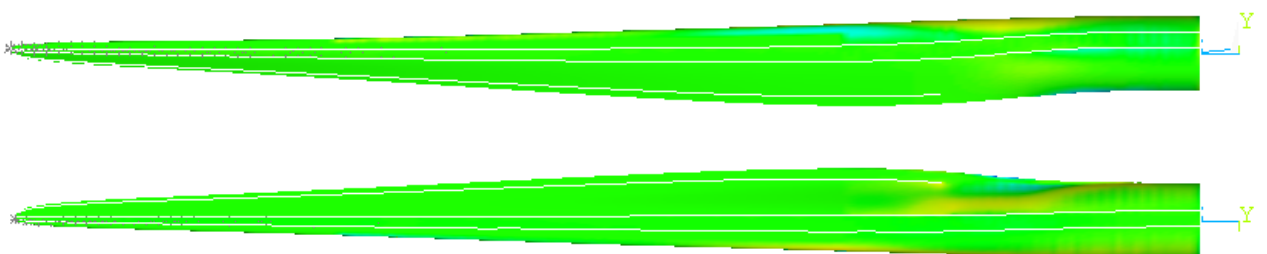
Διάγραμμα 55: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Y της δεύτερης στρώσης του πτερυγίου.



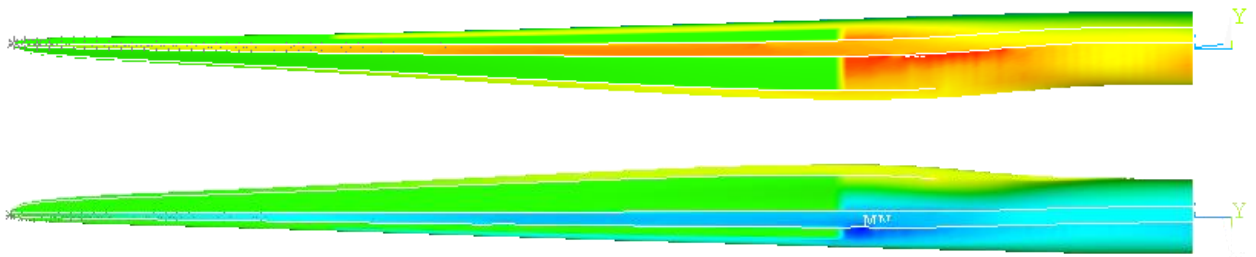
Διάγραμμα 56: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Z της δεύτερης στρώσης του πτερυγίου.



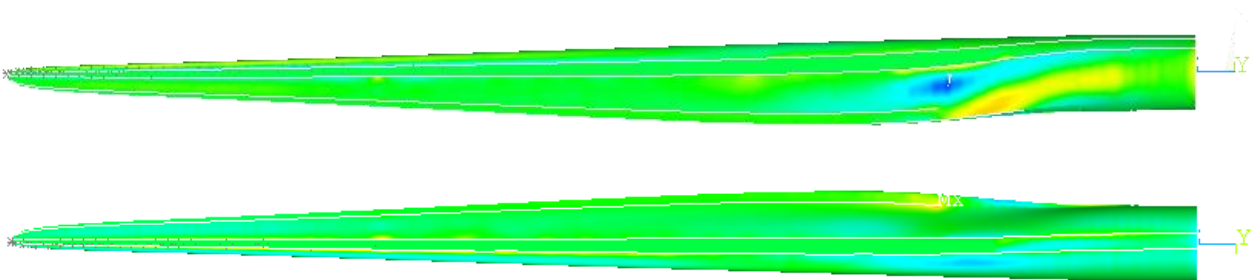
Διάγραμμα 57: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα X της τέταρτης στρώσης του πτερυγίου.



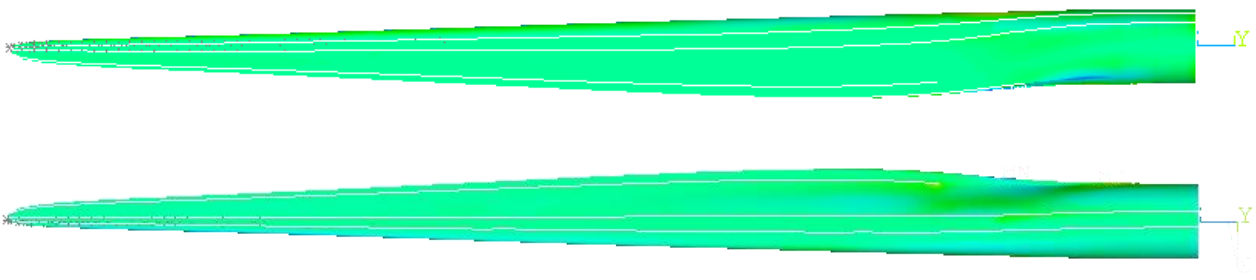
Διάγραμμα 58: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Y της τέταρτης στρώσης του πτερυγίου.



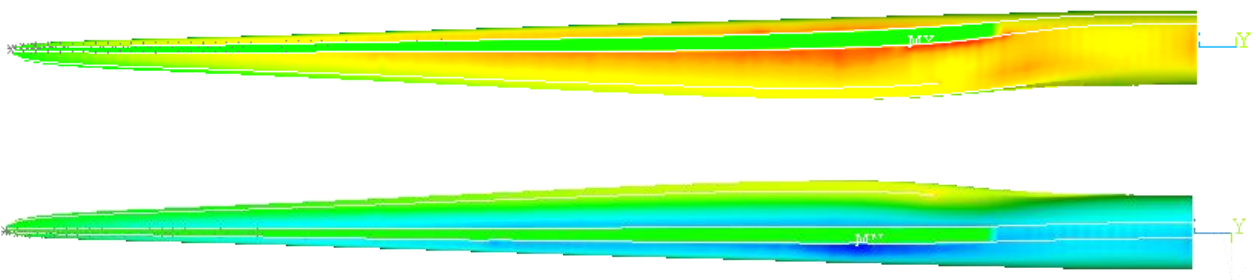
Διάγραμμα 59: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Z της τέταρτης στρώσης του πτερυγίου.



Διάγραμμα 60: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα X της πέμπτης στρώσης του πτερυγίου.



Διάγραμμα 61: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Y της πέμπτης στρώσης του πτερυγίου.



Διάγραμμα 62: Η κατανομή των ορθών τάσεων κατά τον άξονα Z της πέμπτης στρώσης του πτερυγίου.

Δεδομένου ότι παράγεται κυρίως παραμόρφωση κάμψης στο πτερύγιο κάτω από το φορτίο ανέμου, η τάση στη κανονική κατεύθυνση του πτερυγίου, δηλαδή η κατεύθυνση Z, είναι η μεγαλύτερη. Η διάταξη των υλικών σε κάθε τμήμα του πτερυγίου είναι διαφορετική.

6

Βιβλιογραφία

- [1] Global Wind Report: Annual Market Update 2019[R].2019.
- [2] UpWind: Integrated Wind Turbine Design [EB/OL]. <http://www.ewea.org/our-activities/eu-funded-projects/completedprojects/upwind>.
- [3] INNWIND: INNovative WIND conversion systems (10-20MW) for offshore applications [EB/OL]. <http://www.innwind.eu>.
- [4] Veers P, DW L, Bir G. Aeroelastic tailoring in wind-turbine blade application: American Wind Energy Association Meeting and Exhibition, Bakersfield, California, 1998 [C].
- [5] de Goeij W C, van Tooren M J L, Beukers A. Implementation of bending-torsion coupling in the design of a wind-turbine rotor-blade [J]. Applied Energy, 1999,63(3):191-207.DOI: [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00016-1).
- [6] Ponta F L, Otero A D, Rajan A, et al. The adaptive-blade concept in wind-power applications [J]. Energy for Sustainable Development, 2014,22(1):3-12.
- [7] S. Liebst B. Wind turbine gust load alleviation utilizing curved blades [J]. Journal of Propulsion and Power, 1986,2:371-377.
- [8] Lobitz D, Laino D. Load mitigation with twist-coupled HAWT blades[C]//: Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 2006.
- [9] Bottasso C L, Campagnolo F, Croce A, et al. Optimization-based study of bend–twist coupled rotor blades for passive and integrated passive/active load alleviation[J]. Wind Energy, 2013,16(8):1149-1166.
- [10] Blasques J P A A. User’s Manual for BECAS: A cross section analysis tool for anisotropic and inhomogeneous beam sections of arbitrary geometry [Z]. Risø DTU – National Laboratory for Sustainable Energy: 2012.
- [11] Kim T, Hansen A M, Branner K. Development of an anisotropic beam finite element for composite wind turbine blades in multibody system [J]. Renewable Energy, 39 2013,59 (Complete):172-183.
- [12] W. Lobitz D, Veers P. Aeroelastic behavior of twist-coupled HAWT blades[M]. 1998.10.2514/6.1998-29.

-
- [13] Ong C H, Tsai S W. Design, Manufacture and Testing of A Bend-Twist D-spar [J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1999.
- [14] Hayat K, Ha S K. Load mitigation of wind turbine blade by aeroelastic tailoring via unbalanced laminates composites [J]. Composite Structures, 2015,128:122-133.DOI:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.042>.
- [15] Griffin D A. Evaluation of design concepts for adaptive wind turbine blades[R].Sandia National Laboratories, 2002.
- [16] Zahle F, Tibaldi C, Pavese C, et al. Design of an Aeroelastically Tailored 10 MW Wind Turbine Rotor [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016,753:62008.DOI:10.1088/1742-6596/753/6/062008. 40
- [17] MT T. IEC 61400-1, IEC 2003, 188184CDV[S]. 2003.
- [18] Manolas D, Riziotis V, Voutsinas S. Assessing the importance of geometric non-linear effects in the prediction of wind turbine blade loads [J]. Journal of Computational & Nonlinear Dynamics, 2015,10(4):41008.
- [19] Riziotis V A, Voutsinas S G, Manolas D I, et al. Aeroelastic Analysis of Pre-Curved Rotor Blades [C]//: Ewea, 2008.
- [20] Manolas D, Pirrung G R, Croce A, et al. Cross comparison of aeroelastic state-of-the-art design tools on a 10 MW scale wind turbine [M]. 2015.
- [21] WANG Zi-wen; YANG Tao; Vasilis Riziotis; Giannis Seferain; Tohid Bagherpour; “Research on bending and torsion coupling characteristics of 10MW wind turbine blade based on Ansys”, Applied Energy Technology 2019.