



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ  
ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ**

**Τίτλος**

**Προσομοίωση σύνθετων πολύφυλλων κατασκευών με  
τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων**

**ΥΠΟ**

**Πετσινίκης, Σωτήριος**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

**Καθηγητής, Σταυρουλάκης Γεώργιος**

**ΧΑΝΙΑ, 2024**



**TECHNICAL  
UNIVERSITY  
OF CRETE**

**TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE**

**SCHOOL OF PRODUCTION ENGINEERING AND  
MANAGEMENT**

**MASTER'S PROGRAM IN PRODUCT DESIGN AND  
MANUFACTURING**

**Title**

**Modeling of multilayered composite structures using finite  
elements**

**By**

**Petsinikis, Sotirios**

**Under the direction of**

**Professor, Stavroulakis Georgios**

**CHANIA, 2024**



### **Τριμελής Επιτροπή Επίβλεψης Μεταπτυχιακής εργασίας**

Η διατριβή του Σωτήρη Πετσινίκη εγκρίνεται από την Επιτροπή:

1. Καθηγητής, Σταυρουλάκης Γεώργιος, Επιβλέπων
2. Καθηγητής, Αντωνιάδης Αριστομένης, Μέλος
3. Επίκουρος Καθηγητής, Αλευράς Παναγιώτης, Μέλος

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

*"Με την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο, επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, για την υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης. Η συμβολή του και η λεπτομερή καθοδήγηση ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας.*

*Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κουτσιανίτη, για την ευγενική παραχώρηση του σχεδίου του κελύφους του πτερυγίου, οπού σχεδιάστηκε από τον ίδιο μέσω του Autodesk Fusion 360 και αποτέλεσε βασικό μέρος στην μηχανική ανάλυση της εργασίας.*

*Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου για την αμέριστη υποστήριξη και ενθάρρυνση κατά την εκπόνηση της εργασίας, δίνοντας δύναμη κουράγιο και κίνητρο ώστε να μπορέσω να συνεχίσω και τελικά να ολοκληρώσω την μεταπτυχιακή εργασία μου "*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικειμενικό σκοπό την προσομοίωση και τη μηχανική ανάλυση των πολύφυλλων κατασκευών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στη διερεύνηση της μηχανικής απόκρισης των σύνθετων υλικών που απαρτίζουν το κέλυφος του πτερυγίου, υπό την εφαρμογή στατικών φορτίσεων σε διαφορετικές περιοχές της κατασκευής του. Η κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς του πτερύγιου είναι ιδιαίζουσας σημασίας για τη λειτουργική αξιοπιστία της ανεμογεννήτριας. Το πτερύγιο αποτελεί κύριο δομικό στοιχείο του συστήματός της, καθώς μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε μηχανική και στη συνέχεια, σε ηλεκτρική ενέργεια.

Για την επίτευξη του στόχου της παρούσας μελέτης, αναπτύχθηκε το μοντέλο κελύφους πτερυγίου τύπου OML, στο οποίο ορίστηκαν τα σύνθετα υλικά και οι συνθήκες εφαρμογής των στατικών φορτίων. Η τρισδιάστατη γεωμετρική απεικόνιση του κελύφους του πτερυγίου υλοποιήθηκε μέσω ενός λογισμικού προγράμματος από Computer Aided Design (CAD), παρέχοντας ακριβή γεωμετρική απεικόνιση. Στη συνέχεια της μελέτης, η ανάλυση της μηχανικής απόκρισης υπό την εφαρμογή των στατικών φορτίσεων στην επιφάνεια του πτερυγίου και στην οπίσθια ακμή του, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics 6.0. Τέλος, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βασίστηκε στην κατανομή των τάσεων Von Mises, μέσω της οποίας επιτρέπεται ο εντοπισμός των περιοχών συγκέντρωσης τάσεων και η πιθανή κόπωση του υλικού.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης καταδεικνύουν ότι υπάρχει μία γενική ομοιότητα στην μηχανική απόκριση του πτερύγιου υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Ωστόσο, η κατανομή των τάσεων στην επιφάνεια του πτερυγίου διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών. Συνεπώς, η επιλογή των συνθετών υλικών και ο προσανατολισμός των ινών τους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη βελτιστοποίηση της μηχανικής απόδοσης του πτερύγιου και κατ'επέκταση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

**Λέξεις κλειδιά:** Σύνθετα υλικά, μοντέλο κελύφους εξωτερικής επιφάνειας, πεπερασμένα στοιχεία, πτερύγιο ανεμογεννήτριας

## ABSTRACT

This study aims to simulate and analyze the mechanical behavior of multilayered composite structures using the Finite Element Method (FEM). Special emphasis is placed on investigating the mechanical response of the composite materials that form the blade shell, under the application of static loads at different regions of its structure. Understanding the mechanical behavior of the blade is of particular importance for the operational reliability of the wind turbine. The blade constitutes a key structural component of the system, as it transforms wind energy into mechanical and subsequently into electrical energy.

To achieve the objectives of this study, an OML-type blade shell model was developed, in which the composite materials and static load application conditions were defined. The three-dimensional geometric representation of the blade shell was created using Computer-Aided Design (CAD) software, providing an accurate geometric model. Subsequently, the analysis of the mechanical response under static loading—applied both to the surface and the trailing edge of the blade—was carried out using the COMSOL Multiphysics 6.0 finite element software.

The evaluation of the results was based on the distribution of Von Mises stresses, which allows for the identification of stress concentration regions and potential material fatigue. The analysis results demonstrate a general similarity in the mechanical response of the blade under different loading conditions. However, the stress distribution on the blade surface varies significantly depending on the fiber orientation. Therefore, the selection of composite materials and the orientation of their fibers is a critical factor in optimizing the mechanical performance of the blade—and, by extension, the operation of the wind turbine.

**Key words:** Composite materials, outer surface shell model, finite elements, wind turbine blade

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	V
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	VI
ABSTRACT .....	VII
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	IX
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	X
1 Εισαγωγή .....	1
1.2 Δομή εργασίας .....	2
2 Σύνθετα υλικά (Composite materials) .....	4
2.1 Ορισμός Σύνθετων Υλικών .....	4
2.2 Πλεονεκτήματα Σύνθετων Υλικών .....	4
2.3 Κατηγορίες Σύνθετων Υλικών .....	5
2.2.1 Κατηγορίες σύνθετων υλικών βάσει συστατικού μήτρας .....	5
2.2.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών βάσει συστατικού ενίσχυσης.....	6
2.3 Εφαρμογές Σύνθετων Υλικών .....	7
3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....	8
3.1 Αιολική Ενέργεια .....	8
3.1.1 Αιολική Ενέργεια & Ανεμογεννήτριες.....	8
4. Ανεμογεννήτριες .....	10
4.1 Συστατικά Μέρη Ανεμογεννήτριας .....	10
4.2 Μεγέθη Ανεμογεννήτριας.....	12
4.3 Τύποι Ανεμογεννήτριας .....	12
4.3.1 Ανεμογεννήτρια Οριζοντίου Άξονα (HAWT).....	14
4.3.2 Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Άξονα (VAWT).....	15
4.3.3 Σύγκριση ανεμογεννητριών HAWT & VAWT .....	17
4.4 Μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.....	17
5. Πτερύγιο ανεμογεννήτριας .....	19
5.1 Σύνθετα υλικά πτερυγίου ανεμογεννήτριας .....	19
5.1.1 Συστατικό ενίσχυσης πτερυγίου ανεμογεννήτριας .....	20
5.1.2 Συστατικό μήτρας πτερυγίου ανεμογεννήτριας .....	23
5.2 Σχεδιαστικές προσεγγίσεις στο πτερύγιο ανεμογεννήτριας.....	24
5.2.1 Δομικός σχεδιασμός πτερυγίου ανεμογεννήτριας .....	24
5.2.2 Αεροδυναμική σχεδίαση πτερυγίου ανεμογεννήτριας.....	25



6. Μεθοδολογική προσέγγιση & Μοντέλο κελύφους πτερυγίου .....	28
6.1 Μεθοδολογική προσέγγιση .....	28
6.2 Ορισμός μοντέλου κελύφους .....	29
6.3.1 Ορισμός φορτίων & υλικών πτερυγίου.....	31
6.3 Μηχανική ανάλυση πτερύγιου .....	33
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	37
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	38
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	39
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	43

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Συστατικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα (Ozdamar, Mertcan, & Ozdamar, 2018).....	11
Εικόνα 2:Ανεμογεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο (Stavrakakis, 2012).....	12
Εικόνα 3:Προσανατολισμός άξονα & ρότορα ανεμογεννητριών (Schubel & Crossley, 2012, σ. 3426).....	13
Εικόνα 4:Ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (Windpower Engineering & Development).....	15
Εικόνα 5:Ανεμογεννήτρια Savonius (Peng, Liu, & Yang, 2021).....	16
Εικόνα 6: Ανεμογεννήτριες Darriues (Peng, Liu, & Yang, 2021).....	16
Εικόνα 7: Υλικά πτερυγίων ανεμογεννητριών (Ashby, 2009).....	20
Εικόνα 8:Διατομή πτερυγίου ανεμογεννήτριας (Lee & Shin, 2022) .....	25
Εικόνα 9: Συγκριτικά προφίλ αεροτομής για πτερύγια ανεμογεννητριών διαφορετικών μεγεθών (Firoozi, Firoozi, & Hejazi, 2024, σ. 12) .....	27
Εικόνα 10:Μπροστινό μέρος πτερυγίου ανεμογεννήτριας μέσω Autodesk Fusion 360 (Κουτσιανίτης).....	29
Εικόνα 11:Κάτω μέρος πτερυγίου ανεμογεννήτριας μέσω Autodesk Fusion 360 (Κουτσιανίτης).....	30
Εικόνα 12:Πλαϊνό πτερυγίου ανεμογεννήτριας μέσω Autodesk Fusion 360 (Κουτσιανίτης).....	30
Εικόνα 13:Γεωμετρία πτερυγίου ανεμογεννήτριας (Ivanyna, et al., 2024, p. 22) .....	31
Εικόνα 14: Αποτελέσματα δοκιμών μηχανικής ανάλυσης πτερυγίου .....	34

Εικόνα 15:Περιοχές φόρτισης κελύφους πτερυγίου .....	43
Εικόνα 16:Κατεύθυνση στρωμάτων ινών βάσει δοκιμής και μοιρών .....	43

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1:Ιδιότητες των υλικών πτερυγίου ανεμογεννήτριας (Firoozi, Firoozi, & Hejazi, 2024).....	23
Πίνακας 2:Υλικά & στοιχεία δοκιμών προσομοίωσης.....	32
Πίνακας 3:Διαγράμματα κατανομής von Mises .....	35
Πίνακας 4:Σημεία σύγκρισης δοκιμών 1 έως 3 .....	36
Πίνακας 5: Σημεία σύγκρισης δοκιμών 4 έως 6 .....	36

# 1 Εισαγωγή

Η επιστήμη και η τεχνολογία των σύνθετων υλικών αποτελούν θεμελιώδη παράγοντα της τεχνολογικής προόδου, καθώς επιτρέπουν την ανάπτυξη προηγμένων εφαρμογών με βελτιωμένες ιδιότητες. Η ανάλυση και ο σχεδιασμός των σύνθετων κατασκευών αποτελούν πρόκληση στον τομέα της μηχανικής επιστήμης, ιδίως όταν οι κατασκευές υπόκεινται σε πολύπλοκα πεδία φορτίων. Επιπρόσθετα, τα σύνθετα υλικά έχουν αναδειχθεί ως ένας καινοτόμος τομέας στην επιστήμη των υλικών, με ευρύ φάσμα εφαρμογών στους τομείς της ενέργειας, την αυτοκινητοβιομηχανία, τις κατασκευές, την αεροδιαστημική και την αεροναυπηγική μηχανική κ.α.

Στη σύγχρονη εποχή οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνιστούν τον ακρογωνιαίο λίθο για τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον λόγω της αύξησης των παγκόσμιων ενεργειακών απαιτήσεων και της ανάγκης περιορισμού των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Η αιολική ενέργεια διακατέχει κεντρικό ρόλο στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λόγω της βιωσιμότητάς της και των χαρακτηριστικών της στην παραγωγή ενέργειας. Σύμφωνα με τους (Kumar, Ringenberg, Depuru, Devabhaktuni, Lee, & Nikolaidis, 2016) και (de Falani, González, Barreto, de Toledo, & Torkomian, 2020), η αιολική ενέργεια αποτελεί αναπτυσσόμενη τεχνολογία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς συνιστά αναπόσπαστο κομμάτι για τις εθνικές και διεθνείς στρατηγικές. Οι στρατηγικές αυτές των χωρών έχουν θέσει ως στόχο την επίτευξη της βιώσιμης ανάπτυξης και της μετάβασης των χωρών σε οικονομίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα.

Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει αναδείξει τις ανεμογεννήτριες ως το σημαντικότερο πυλώνα της βιώσιμης παράγωγης ενέργειας. Το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας συνιστά κύριο στοιχείο για την απόδοση της αιολικής ενέργειας και αποτελεί το σημαντικότερο δομικό στοιχείο της ανεμογεννήτριας, καθώς ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η λειτουργία του καθορίζει τη συνολική απόδοσή της. Τα πτερύγια αποτελούν πολύφυλλες κατασκευές και υπόκεινται σε μηχανικές και αεροδυναμικές καταπονήσεις καθώς λειτουργούν σε έντονες συνθήκες φορτίων που μεταβάλλονται ενώ παράλληλα διατηρούν υψηλή αντοχή και απόδοση.

Στην επιστήμη της μηχανικής αναπτύσσονται συνεχώς διάφορες καινοτομίες για τα πτερύγια των ανεμογεννητριών με σκοπό την υψηλότερη αντοχή, τη βέλτιστη ενεργειακή αποδοτικότητα και το καλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμά τους. Αυτό εξαρτάται κυρίως από την ανθεκτικότητα των σύνθετων υλικών με βάση τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητές τους, από τον ακριβή αεροδυναμικό σχεδιασμό και από τις πρακτικές παραγωγής τους (Karthikeyan, Anand, Suthakar, & Barhate, 2018). Συνεπώς, σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η ακριβής προσομοίωση της μηχανικής ανάλυσης του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας. Αυτό αποσκοπεί στη διερεύνηση της μηχανικής απόκρισης του πτερυγίου, η οποία θα συμβάλλει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του και κατ' επέκταση στην αύξηση της αντοχής και αποδοτικότητας του πτερυγίου στη μονάδα της ανεμογεννήτριας. Η συγκεκριμένη ανάλυση είναι ιδιάζουσας σημασίας καθώς το πτερύγιο αποτελεί κύριο στοιχείο της ανεμογεννήτριας, αφού μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε μηχανική και κατ' επέκταση, σε ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, η ανάλυση συμβάλλει στην κατανόηση της μηχανικής καταπόνησης και των αστοχιών με την εφαρμογή δυνάμεων και τάσεων στο κέλυφος του πτερυγίου. Οποιαδήποτε αρνητική παραμόρφωση του πτερυγίου προκαλεί μείωση της απόδοσής του και κατ' επέκταση αρνητικές συνέπειες στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

Η προσομοίωση των πολύφυλλων σύνθετων κατασκευών μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί βασικό εργαλείο στη μηχανική επιστήμη, καθώς επιτρέπει την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς και της κατανομής των τάσεων σε σύνθετες δομές. Με τη μέθοδο FEM, επιτυγχάνεται η ποσοτική αποτίμηση των διαφόρων παραμέτρων όπως η πιθανή αστοχία του υλικού, η κατανομή των τάσεων σε διάφορες περιοχές, η παραμόρφωση του υλικού κ.α. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης θα συμβάλλουν στο βέλτιστο σχεδιασμό και τη μακροχρόνια λειτουργία του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας.

## **1.2 Δομή εργασίας**

Η παρούσα διατριβή δομείται σε επιμέρους ενότητες και υποενότητες στις οποίες παρουσιάζονται διαφορετικές πτυχές του θέματος διερεύνησης, επιδιώκοντας έτσι τη σφαιρική και ολοκληρωμένη προσέγγιση αυτού. Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας διαμορφώνεται το πλαίσιο ανάλυσης της διατριβής, εισάγοντας το θέμα και τη μεθοδολογική προσέγγισή του. Το δεύτερο κεφάλαιο καλύπτει την έννοια των

σύνθετων υλικών, εξετάζει τα πλεονεκτήματά τους, διαχωρίζει τις κατηγορίες τους βάσει του συστατικού της μήτρας και της ενίσχυσης και τέλος τονίζει τη σημασία τους σε διάφορους κλάδους της οικονομίας. Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και επικεντρώνεται στην ανάλυση των κύριων μορφών ενέργειας, δίνοντας έμφαση στην αιολική ενέργεια και στον τρόπο παραγωγής της. Το επόμενο κεφάλαιο αναφέρεται στην αναλυτική παρουσίαση των ανεμογεννητριών, εστιάζοντας στα συστατικά μέρη τους, στην περιγραφή των βασικών λειτουργικών μονάδων και τη σύνθεσή τους. Επιπλέον, αναλύονται οι τύποι των ανεμογεννητριών, πραγματοποιείται η σύγκριση μεταξύ τους και τέλος παρουσιάζονται οι διάφοροι μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας. Ειδικότερα εξετάζεται η χρήση των σύνθετων υλικών στην κατασκευή του, με έμφαση στις επιλογές των υλικών και στις ιδιότητές τους και παρουσιάζεται ο δομικός και ο αεροδυναμικός σχεδιασμός του πτερυγίου. Το έκτο κεφάλαιο αποτελεί τη σημαντικότερη ενότητα της εργασίας καθώς σε αυτό αναλύεται η μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας και διεξάγονται τα αποτελέσματα της μηχανικής ανάλυσης. Αρχικά παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας η οποία περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός μοντέλου κελύφους για το πτερύγιο στο οποίο ορίζονται τα υλικά και οι περιοχές εφαρμογής στατικών φορτίσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η προσομοίωση του κελύφους μέσω ενός λογισμικού από το πρόγραμμα σχεδίασης CAD. Ακολούθως, πραγματοποιείται η μηχανική ανάλυση του μοντέλου με την χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics 6. Τέλος, αξιολογούνται τα αποτελέσματα με την χρήση της κατανομής των τάσεων Von Mises. Στο τελευταίο μέρος την εργασίας παρατίθενται τα συμπεράσματα της ανάλυσης.

## **2 Σύνθετα υλικά (Composite materials)**

### **2.1 Ορισμός Σύνθετων Υλικών**

*«Η βασική ιδέα της ανάπτυξης ενός σύνθετου υλικού είναι η φυσική ανάπτυξη σε μακροσκοπική κλίμακα δύο ή περισσότερων υλικών και η δημιουργία ενός νέου υλικού με τελικές ιδιότητες διαφορετικές από τις αντίστοιχες των υλικών που το αποτελούν»* (Παπανικολάου & Μουζάκης, 2007, σ. 13). Συνεπώς, τα σύνθετα υλικά αποτελούν ένα ετερογενές υλικό το οποίο δημιουργείται από διαφορετικά συστατικά, με σκοπό την επίτευξη της βελτιωμένης δομικής απόδοσής τους.

Τα δύο βασικά συστατικά υλικά των σύνθετων υλικών είναι το συστατικό της ενίσχυσης (Reinforcements Material) το οποίο προσδίδει στο σύνθετο υλικό τις ζητούμενες βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες όπως την αντοχή, την ακαμψία, τη θερμική μόνωση, την αγωγιμότητα κ.α. και το συστατικό της μήτρας (Matrix) το οποίο βοηθά στη βέλτιστη αξιοποίηση των ιδιοτήτων των υλικών και συνήθως είναι χαμηλής πυκνότητας. Συνεπώς, οι τελικές ιδιότητες που αποκτά το σύνθετο υλικό καθορίζονται από το είδος του συστατικού της μήτρας και των ενισχύσεων.

### **2.2 Πλεονεκτήματα Σύνθετων Υλικών**

Ένα υλικό θεωρείται σύνθετο, όταν αποτελείται από πολλαπλά συστατικά μέρη με μακροσκοπικά διακριτές ιδιότητες, δημιουργώντας ένα νέο σύνθετο υλικό με ανώτερες ιδιότητες. Οι ιδιότητες κάθε συνθέτου ή κοινού υλικού, μπορούν να διακριθούν σε μηχανικές και μη μηχανικές. Ως μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού θεωρούνται η ακαμψία, η αντοχή, η ολκιμότητα, η σκληρότητα καθώς και η συμπεριφορά του σε κόπωση, ερπυσμό, χαλάρωση κ.α. Ως μη μηχανικές ιδιότητες θεωρούνται κυρίως η πυκνότητα, η θερμική συμπεριφορά, η αντίσταση σε διάβρωση κ.α. Επιπρόσθετα, τα σύνθετα υλικά έχουν το σημαντικότερο πλεονέκτημα ότι διαθέτουν τις βέλτιστες ιδιότητες των αποτελούμενων υλικών καθώς και τις νέες ιδιότητες που δημιουργούνται και που κανένα από τα υλικά δεν διέθετε αρχικά. Έτσι, όλες αυτές οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών έχουν ως αποτελέσματα να τα καθιστούν ανώτερα από άλλα υλικά.

Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά δεν μπορούν να διαθέτουν συγχρόνως όλες τις ιδιότητες που προαναφέρθηκαν, ενώ κάποιες από αυτές είναι ασυμβίβαστες μεταξύ τους όπως

η θερμική μόνωση και η θερμική αγωγιμότητα. Συνεπώς, η κατασκευή κάθε σύνθετου υλικού έγκειται στο συνδυασμό ορισμένων ιδιοτήτων.

## 2.3 Κατηγορίες Σύνθετων Υλικών

Η κατηγοριοποίηση των σύνθετων υλικών μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους λόγω του μεγάλου αριθμού των υλικών που μπορούν να συνδυαστούν καθώς και των μεθόδων κατασκευής τους. Ο πιο συνήθης τρόπος κατηγοριοποίησης των σύνθετων υλικών είναι με βάση το συστατικό της μήτρας και το συστατικό της ενίσχυσης.

### 2.2.1 Κατηγορίες σύνθετων υλικών βάσει συστατικού μήτρας

*«Η μήτρα ενός σύνθετου υλικού είναι δυνατόν να είναι πολυμερική (άμορφη ή ημικρυσταλλική), κεραμική (πολυκρυσταλλική ή υαλόμορφη, ενώ σπανίως ημικρυσταλλική) ή μεταλλική (πολυκρυσταλλική)»* (Μπέλτσιος, 2018, σ. 79). Επιπλέον στις κεραμικές μήτρες συμπεριλαμβάνονται και οι μήτρες από άνθρακα και γραφίτη. Έτσι τα σύνθετα υλικά με βάση το συστατικό της μήτρας διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Πολυμερικά σύνθετα υλικά (Polymer matrix composites - PMC): αποτελούν μία κατηγορία σύνθετων υλικών στα οποία η μήτρα είναι πολυμερές υλικό ενισχυμένο με διάφορα υλικά. Η μήτρα και η ενίσχυσή της επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά των πολυμερικών σύνθετων υλικών. Για να μπορέσει να επιτευχθεί ισοτροπία στις μηχανικές ιδιότητες, για την ενίσχυση της μήτρας χρησιμοποιούνται κυρίως ίνες. Είναι άξιο προς αναφορά το ότι τα πολυμερικά σύνθετα υλικά όταν τεντώνονται κάθετα προς τον προσανατολισμό των ινών τους είναι περισσότερο σταθερά, ενώ όταν τεντώνονται παράλληλα με τις ίνες είναι περισσότερο αδύναμα. (Sharma, Bhandari, Aherwar, Rimašauskiene, & Pinca-Bretotean, 2020).
- Μεταλλικά σύνθετα υλικά (Metal matrix composites - MMC): απαρτίζουν προηγμένα υλικά με μεταλλική μήτρα ενώ η ενίσχυσή τους αποτελείται από κεραμικά, καρβίδια, μέταλλα κ.α. Η ενίσχυση αυτών των υλικών συνδυάζει τα οφέλη των μετάλλων και τις ιδιότητες των ενισχυτικών υλικών όπως την καλή αγωγιμότητα, την υψηλή ανθεκτικότητα, την αντοχή σε διάφορες

θερμοκρασίες, την ανθεκτικότητα στην φθορά κ.α. Είναι άξιο να αναφερθεί ότι η σημαντικότερη ιδιότητά τους έγκειται στην αντοχή τους σε μεγάλες θερμοκρασίες καθώς και στη διατήρηση της μηχανικής τους ακεραιότητας σε περιβάλλοντα στα οποία θα προκαλούνταν παραμόρφωση των παραδοσιακών μετάλλων.

- Κεραμικά σύνθετα υλικά (Ceramic matrix composites - CMC): απαρτίζουν μία σύγχρονη κατηγορία σύνθετων υλικών, στα οποία η δομή τους ενισχύεται με ίνες κεραμικών ή άλλων υλικών. Τα κεραμικά σύνθετα υλικά σε αντίθεση με τα παραδοσιακά έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε ρωγμές και μικρότερη τάση σε θραύση, ενισχύοντας τη συνολική δομική αντοχή και αξιοπιστία τους σε συνθήκες καταπόνησης. Οι ιδιότητές τους, τα καθιστούν κατάλληλα για εφαρμογές με περιβάλλοντα υψηλών απαιτήσεων.
- Προηγμένα σύνθετα υλικά (Advanced composite material - ACMs): διακρίνονται για την υψηλή ανθεκτικότητά τους σε εφελκυσμό και την ευελιξία τους. Τα βιώσιμα σύνθετα υλικά διακρίνονται για τη χαμηλή πυκνότητα τους και τις ελάχιστες επιπτώσεις τους στο περιβάλλον, καθιστώντας τα βιώσιμη επιλογή για την παραγωγή προϊόντων με μειωμένο οικολογικό αποτύπωμα. Στη έρευνά τους οι (Firoozi, Firoozi, & Hejazi, 2024) κατέληξαν στο ότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν υψηλή ενεργειακή απόδοση και ανθεκτικότητα ενώ τα βιώσιμα υλικά παρουσιάζουν χαμηλή ανθεκτικότητα, μέτρια ενεργειακή απόδοση και έχουν καλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Έτσι, η υιοθέτηση προηγμένων σύνθετων και βιώσιμων υλικών θα έχει ως αποτέλεσμα τη βέλτιστη απόδοση της ανεμογεννήτριας και θα οδηγήσει στην υιοθέτηση αποδοτικότερων και πιο βιώσιμων λύσεων στη βιομηχανία της αιολικής ενέργειας.

### **2.2.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών βάσει συστατικού ενίσχυσης**

Με βάση τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα υλικά κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Ινώδη σύνθετα υλικά (Fiber-Reinforced Composites): αποτελούν υλικά ενισχυμένα με ίνες αξονικού προσανατολισμού. Η αντοχή τους καθορίζεται από την ικανότητα μεταφοράς του φορτίου εφαρμογής από τη μήτρα στις ίνες,



τη διεπιφανειακή σύνδεση μεταξύ αυτών, την ευθυγράμμισή τους και τη φύση των ινών οι οποίες καθορίζουν τη συνολική συμπεριφορά του υλικού (S1, Subbaya, Nithin, & Sachhidananda, 2017).

- Πολύστρωτα σύνθετα υλικά (Laminated Composites): η κατασκευή αυτών των υλικών αποτελείται από λεπτά στρώματα γνωστά ως ελάσματα, τα οποία είναι προσκολλημένα μεταξύ τους. Η διάταξη των στρώσεων αποτελεί τη βασική σχεδιαστική παράμετρο στα προβλήματα βελτιστοποίησης των πολύστρωτων σύνθετων υλικών.
- Κοκκώδη σύνθετα υλικά (Particulate Composites): απαρτίζονται από έγκλεισμα υπό μορφή κόκκων μέσα σε μία μήτρα. Οι κόκκοι και η μήτρα αυτών των υλικών δύναται να είναι μεταλλικοί ή μη.

## 2.3 Εφαρμογές Σύνθετων Υλικών

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των τεχνολογικών εξελίξεων καθώς επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Η εφαρμογή και η αξιοποίησή τους πραγματοποιείται σε πολλούς τομείς της οικονομίας. Τα κυριότερα πεδία εφαρμογής της στον τομέα της ενέργειας είναι κυρίως στην αιολική ενέργεια, την αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική, την αεροδιαστημική, τις κατασκευές και τις υποδομές. Οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών τα καθιστούν κατάλληλα σε πολλές εφαρμογές και για διάφορους λόγους όπως:

- Υψηλή αναλογία αντοχής ως προς το βάρος
- Αύξηση της ασφάλειας
- Αντοχή στη διάβρωση και στην κόπωση
- Αντικατάσταση παραδοσιακών υλικών με υλικά υψηλότερης ανθεκτικότητας
- Ευκολία στην κατασκευή και επισκευή εξαρτημάτων
- Αντοχή στις διάφορες περιβαλλοντολογικές συνθήκες
- Υψηλή χημική αντοχή
- Θερμική σταθερότητα

### 3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) συνιστούν βασικό πυλώνα για τη βιώσιμη ανάπτυξη καθώς αξιοποιούν τους φυσικούς πόρους του περιβάλλοντος, οι οποίοι υπάρχουν σε αφθονία και συνεχώς ανανεώνονται. Συνεισφέρουν στην ανάπτυξη των χωρών σε εθνικό επίπεδο καθώς συμβάλλουν στην αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης και της κλιματικής αλλαγής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, αφενός να μειώνονται οι αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και αφετέρου να ενισχύεται η ασφάλεια του εφοδιασμού ενέργειας των χωρών. Κύρια προτεραιότητα για την επιστημονική κοινότητα παγκοσμίως, αποτελεί η μετάβαση σε ένα ενεργειακό σύστημα το οποίο θα βασίζεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η εξάρτηση από τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να ενισχυθεί η ενεργειακή ασφάλεια των χωρών.

#### 3.1 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια έχει αναδειχθεί ως μία από τις πιο αποδοτικές μορφές ανανεώσιμης ενέργειας. Η εκμετάλλευσή της πραγματοποιείται με την χρήση των ανεμογεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η μορφή ενέργειας συνιστά κύριο ζήτημα της αειφόρου ανάπτυξης, συμβάλλοντας στην κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη των χωρών. Σύμφωνα με τους (Giddings, Hopwood, & O'Brien, 2002), η έννοια της αειφόρου ανάπτυξης περιλαμβάνει τους τρεις βασικούς πυλώνες του περιβάλλοντος, της κοινωνίας και της οικονομίας, οι οποίοι ενώ θεωρούνται ξεχωριστοί, ταυτόχρονα συνδέονται μεταξύ τους ως οντότητες. Ειδικότερα, *«ως αειφόρος ή βιώσιμη ανάπτυξη ορίζεται η ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύει την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες»*<sup>1</sup>.

##### 3.1.1 Αιολική Ενεργεία & Ανεμογεννήτριες

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Πρόκειται δηλαδή για τη μετατροπή της ενέργειας που υπάρχει στον άνεμο, σε ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια μέσω της χρήσης ανεμογεννητριών, οι οποίες αποτελούν το βασικό μηχανισμό παραγωγής ενέργειας (Balat & Ayar, 2005). Είναι

---

<sup>1</sup> Πηγή: (Ο.ΦΥ.ΠΕ.ΚΑ) <https://necca.gov.gr/aksones-drasis/aeioforos-anaptyxi-kai-klimatiki-allagi/>

γνωστό ότι η αιολική ενέργεια είναι μία από τις φιλικότερες και ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές ενέργειας προς το περιβάλλον, με τεράστιο δυναμικό από τη φύση (Bhutta, Hayat, Farooq, Ali, Jamil, & Hussain, 2012). Οι ανεμογεννήτριες είναι αιολικές μηχανές οι οποίες αποτελούν ειδικά σχεδιασμένες κατασκευές από πολυμερή σύνθετα υλικά. Ο σκοπός κατασκευής τους έγκειται στη βελτιωμένη απόδοση τους όσον αφορά την αποτελεσματικότερη παραγωγή ενέργειας, την αξιόπιστη λειτουργία, τη συντήρηση, το κόστος κεφαλαίου και μεταφοράς τους.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην παραγωγή αιολικής ενέργειας καταδεικνύουν την χρήση συνδυασμών διαφόρων τύπων ανεμογεννητριών με στόχο την προσαρμογή στις διάφορες απαιτήσεις τόσο σε χερσαίες όσο και σε υπεράκτιες περιοχές. Στις σύγχρονες αιολικές μηχανές των ανεμογεννητριών ενσωματώνονται προηγμένα εξαρτήματα, τα οποία παρέχουν το χαμηλότερο ενεργειακό κόστος (Robinson, Kelley, Moriarty, Schreck, Simms, & Wright, 2011). Τέλος, *«στόχος είναι να αναπτυχθούν 28 τεχνο-κλιματικά σενάρια επέκτασης της αιολικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη μονοπάτια επέκτασης εγκατεστημένης ισχύος και πιθανές τοποθεσίες αιολικών πάρκων για την εκτίμηση της εθνικής και παγκόσμιας απόδοσης αιολικής ενέργειας το 2025-2054»*, (Jung, Sander, & Schindler, 2024, p. 1).

## 4. Ανεμογεννήτριες

«Η θεμελιώδης ιδέα ενός συστήματος ανεμογεννητριών είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του κινούμενου αέρα σε μηχανική ενέργεια και επιτέλους σε ηλεκτρική ενέργεια με την εφαρμογή μιας ηλεκτρικής γεννήτριας», (Hasan, 2017, p. 22) Οι ανεμογεννήτριες είναι πολύπλοκες αιολικές μηχανές οι οποίες αποτελούν ειδικά σχεδιασμένες κατασκευές από πολυμερή σύνθετα υλικά. Ο σχεδιασμός τους βασίζεται στις αρχές του κλάδου της αεροδυναμικής και στις γνώσεις υπό την έννοια ότι η λειτουργία τους έγκειται στην αεροδυναμική δύναμη<sup>2</sup> του δρομέα τους. «Η αεροδυναμική απόδοση είναι θεμελιώδης για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό του ρότορα», (Schubel & Crossley, 2012, p. 3435) και με βάση αυτήν διαφοροποιείται ο κάθε τύπος της ανεμογεννήτριας. Προκειμένου να επιτευχθεί ο αποτελεσματικότερος σχεδιασμός ανεμογεννητριών, χρειάζονται γνώσεις από πολλά επιστημονικά πεδία και συγκεκριμένα της αεροδυναμικής, ηλεκτρολογικής και ηλεκτρονικής επιστήμης, της μηχανολογίας, της επιστήμης και τεχνολογίας των υλικών κ.α. Αξίζει να αναφερθεί ότι η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας είναι 20-25 χρόνια. Προκειμένου να αυξηθεί η διάρκεια ζωής της, η επιλογή των υλικών για την κατασκευή και τα εξαρτήματά της είναι υψίστης σημασίας (Mohamed & Wetzel, 2006).

### 4.1 Συστατικά Μέρη Ανεμογεννήτριας

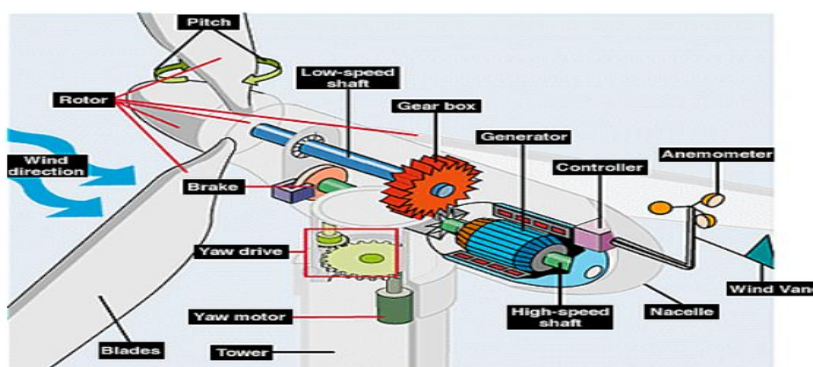
Η ανεμογεννήτρια συνιστά ένα σύνθετο σύστημα αποτελούμενο από πολλαπλά εξαρτήματα. Ο σχεδιασμός τους συνιστά τον επιτυχή συνδυασμό κόστους, ενέργειας και κόπωσης. Αυτός ο συνδυασμός είναι επιτυχημένος μέσω της εφαρμογής τεχνικών υπολογιστικής μοντελοποίησης (Hewitt, Margetts, & Revell, 2017). Επιπλέον, λόγω της σπουδαιότητάς τους, δίνεται ιδιαίτερα έμφαση στην κατασκευή και τη λειτουργία τους υπό ακραία φορτία. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελούμενα εξωτερικά μέρη (εικόνα 1) και εσωτερικά μέρη (εικόνα 2) της ανεμογεννήτριας. Ο πύργος, ο ρότορας και τα πτερύγια τα οποία προσδιορίζουν την αποδοτική λειτουργία της ανεμογεννήτριας (Ostachowicz, McGugan, Schröder-Hinrichs, & Luczak, 2016). Στο εσωτερικό της ατράκτου και της βάσης του πύργου υπάρχουν τα ηλεκτρικά και

---

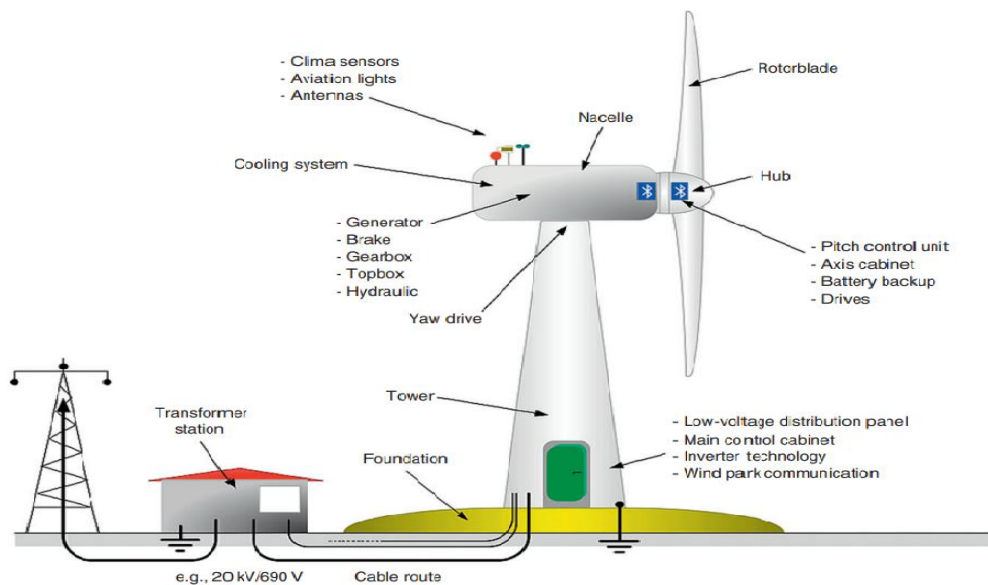
<sup>2</sup> «Η αεροδυναμική δύναμη είναι η ολοκληρωμένη επίδραση της πίεσης και της τριβής του δέρματος που προκαλείται από τη ροή αέρα πάνω από την επιφάνεια του αεροτομού», (Schubel & Crossley, 2012, p. 3428)

ηλεκτρολογικά μέρη μέσω των οποίων επιτυγχάνεται μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Τα κύρια συστατικά μέρη της ανεμογεννήτριας και η λειτουργία τους είναι:

- ❖ Πύργος (tower) : αποτελεί συνήθως σωληνοειδείς χαλύβδινες κατασκευές και έχει την έδρα του σε θεμέλιο οπλισμένο με σκυρόδεμα ώστε να είναι καλά στερεωμένος. Σε αυτόν στηρίζεται ο ρότορας, η άτρακτος και γενικότερα όλος ο ηλεκτρολογικός και μηχανολογικός εξοπλισμός της ανεμογεννήτριας.
- ❖ Ρότορας (rotor): εναλλακτικά ονομάζεται πλήμνη και η χρησιμότητά του έγκειται στη σύνδεση των πτερυγίων με το κιβώτιο ταχυτήτων.
- ❖ Πτερύγια (blades): χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική μέσω της περιστροφής τους από τον άνεμο.
- ❖ Άτρακτος (nacelle): εμπεριέχει τα ηλεκτρικά και μηχανικά εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, τη γεννήτρια, το μηχανισμό περιστροφής κ.α.
- ❖ Κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox): χρησιμοποιείται για να αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής του άξονα ώστε να ταιριάζει με την απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Πολλές ανεμογεννήτριες διαθέτουν κιβώτιο ταχυτήτων, ενώ οι ανεμογεννήτριες με μικρές τουρμπίνες ( $>10\text{kW}$ ) χρησιμοποιούν γεννήτριες άμεσης κίνησης για τις οποίες δεν απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων (Kumar, Rao, & Farooq, 2016)
- ❖ Γεννήτρια (generator): χρησιμοποιείται για να μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω της περιστροφής των πτερυγίων. Οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν πολλές φορές χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων καθώς δεν χρειάζεται μεγάλη ταχύτητα περιστροφής.



Εικόνα 1: Συστατικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα (Ozdamar, Mertcan, & Ozdamar, 2018)



Εικόνα 2: Ανεμογεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο (Stavrakakis, 2012)

## 4.2 Μεγέθη Ανεμογεννήτριας

Η ταξινόμηση των ανεμογεννητριών μπορεί να γίνει με βάση το μέγεθος και τη χωρητικότητά τους, δηλαδή την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργειά τους. Σύμφωνα με τους (Kalagi, Patil, & Nayak, 2018), η κατηγοριοποίησή τους με βάση το μέγεθος και την παραγόμενη ισχύ τους είναι η εξής:

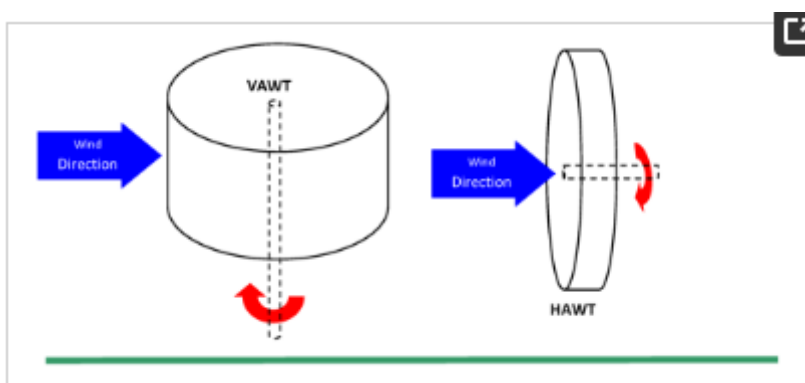
- i. Μικρές ανεμογεννήτριες ( $< 100 \text{ kW}$ ): χρησιμοποιούνται κυρίως για οικιακή χρήση (σπίτια, αγροκτήματα), επαγγελματική χρήση μικρών επιχειρήσεων, καλύπτοντας τοπικές ενεργειακές ανάγκες.
- ii. Μεσαίες ανεμογεννήτριες ( $100\text{-}500 \text{ kW}$ ): χρησιμοποιούνται για βιομηχανικές εγκαταστάσεις, μικρές ενεργειακές κοινότητες και για την τροφοδοσία πόλεων και χωριών σε απομακρυσμένη τοποθεσία.
- iii. Μεγάλες ανεμογεννήτριες ( $500 \text{ kW} - 5 \text{ MW}$ ): χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία μεταφέρεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στη συνέχεια, η ενέργεια αυτή μπορεί να διατεθεί για οικιακή, δημόσια, επαγγελματική ή βιομηχανική χρήση (Bénard, Foïs, & Grisel, 2007).

## 4.3 Τύποι Ανεμογεννήτριας

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών, με τον καθένα να αποδίδει διαφορετικό μέγιστο όριο ισχύος για διάφορες συνθήκες ροής. Η κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών στους διάφορους τύπους πραγματοποιείται με βάση τον

προσανατολισμό του άξονα περιστροφής. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι ανεμογεννητριών είναι η Ανεμογεννήτρια Κάθετου Άξονα (Vertical Axis Wind Turbine – VAWT) και η Ανεμογεννήτρια Οριζόντιου Άξονα (Horizontal Axis Wind Turbine – HAWT).

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ο άξονας και ο ρότορας των ανεμογεννητριών VAWT είναι τοποθετημένοι κατακόρυφα προς το έδαφος, ενώ στις ανεμογεννήτριες HAWT είναι τοποθετημένοι σε οριζόντιο άξονα και είναι παράλληλοι με το έδαφος.



Εικόνα 3: Προσανατολισμός άξονα & ρότορα ανεμογεννητριών (Schubel & Crossley, 2012, p. 3426)

Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική και σε μηχανική πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο πραγματοποιείται μέσω του ρότορα με την περιστροφή των πτερύγιων γύρω από τον άξονα της ανεμογεννήτριας, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια σε μηχανική. Οι καθοριστικοί παράγοντες της αεροδυναμικής σχεδίασης ενός ρότορα είναι ο προσδιορισμός κατανομής της πλατφόρμας και συστροφής του πτερυγίου και ο αριθμός τους, η επιλογή της αεροτομής και η αναλογία ταχύτητας άκρου σχεδιασμού (TSR)<sup>3</sup>, (Maalawi & Badr, 2003). Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή μεγέθους του ρότορα εξαρτάται από μέση ταχύτητα του ανέμου στο σημείο που θα τοποθετηθεί καθώς και από την απαιτούμενη ενέργεια της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, είναι σαφές ότι η επίτευξη της μέγιστης απόδοσης ταχύτητας περιστροφής διαφοροποιείται με την ταχύτητα του ανέμου. Το δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται μέσω της γεννήτριας, η οποία μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια.

---

3 «Ο λόγος ταχύτητας κορυφής μιας ανεμογεννήτριας (TSR) είναι η γραμμική ταχύτητα του άκρου του πτερυγίου, που κανονικοποιείται από την ταχύτητα του εισερχόμενου ανέμου. Για ένα δεδομένο προφίλ πτερυγίων, υπάρχει ένα TSR που μεγιστοποιεί την απόδοση του στροβίλου.», (Hosseini, Cannon, & Vasel-Be-Hagh, 2022)

Η ανεμογεννήτρια συνιστά ένα σύνθετο σύστημα αποτελούμενο από πολλαπλά εξαρτήματα. Ο πύργος, η άτρακτος και τα πτερύγια αποτελούν τα κύρια δομικά στοιχεία που προσδιορίζουν την αποδοτική λειτουργία της ανεμογεννήτριας (Ostachowicz, McGugan, Schröder-Hinrichs, & Luczak, 2016). Στο εσωτερικό της ατράκτου και της βάσης του πύργου υπάρχουν τα ηλεκτρικά και ηλεκτρολογικά μέρη μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στην εικόνα 2 παρατηρούνται τα αποτελούμενα εσωτερικά και εξωτερικά μέρη μίας τυπικής ανεμογεννήτριας καθώς και η σύνδεσή της με το δίκτυο.

Η Ελλάδα διαθέτει ένα εξαιρετικά σημαντικό αιολικό δυναμικό, το οποίο αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια. Σε διάφορες περιοχές της όπως την Κρήτη, την Εύβοια, την Πελοπόννησο και στα νησιά του Αιγαίου υπάρχουν αιολικά πάρκα αποτελούμενα από συστοιχίες ανεμογεννητριών με σκοπό τη βέλτιστη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού της χώρας.

#### **4.3.1 Ανεμογεννήτρια Οριζοντίου Άξονα (HAWT)**

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT) συνιστούν τον κυρίαρχο τύπο στη βιομηχανία των ανεμογεννητριών, καθώς αποτελούν την κύρια τεχνολογική μέθοδο στην παραγωγή αιολικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες HAWT έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον μεταξύ όλων των ανεμογεννητριών λόγω του ότι αποφέρουν τις υψηλότερες αποδόσεις στην παραγωγική διαδικασία ενέργειας, ενώ έχουν λάβει μεγάλη χρηματοδότηση για έρευνα και ανάπτυξη κατά την διάρκεια των ετών.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αποτελούνται από έναν άξονα περιστροφής, ο οποίος είναι τοποθετημένος παράλληλα με το έδαφος και με την κατεύθυνση του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αποτελούνται από τον δρομέα ο οποίος έχει τον τύπο έλικα και είναι παράλληλος με την κατεύθυνση που έχει ο άνεμος και το έδαφος. Οι αιολικές μηχανές αυτού του τύπου είναι εξοπλισμένες με ρότορες, οι οποίοι φέρουν ποικίλους αριθμούς πτερυγίων. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αεροδυναμική ανύψωσης η οποία αποτελεί τη δύναμη που καθορίζει την απόδοση ισχύος που παράγει ο στρόβιλος καθώς τα πτερύγια λειτουργούν και περιστρέφονται λόγω αυτής. Οπότε, είναι σημαντικό να μεγιστοποιηθεί η δύναμη της ανύψωσης μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού.



Η ανεμογεννήτρια HAWT που διαθέτει ρότορα με τρία πτερύγια (εικόνα 4) αποτελεί τον πιο αποδοτικό σχεδιασμό καθώς ανταποκρίνεται στους περιβαλλοντολογικούς και οικονομικούς περιορισμούς. Ως αποτέλεσμα, συνιστά την κυρίαρχη επιλογή στη σύγχρονη βιομηχανία των ανεμογεννητριών μεγάλης κλίμακας.



*Εικόνα 4: Ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (Windpower Engineering & Development)*

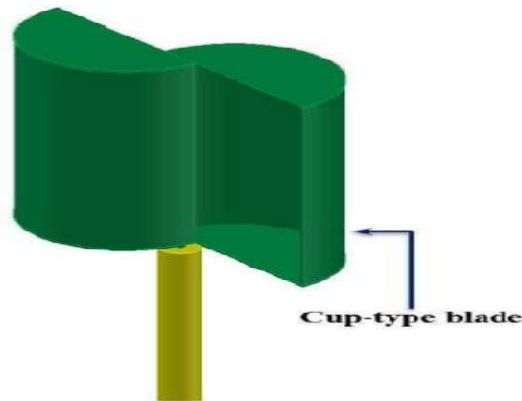
#### **4.3.2 Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Άξονα (VAWT)**

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα διαθέτουν έναν άξονα περιστροφής ο οποίος είναι σταθερός και κάθετος προς την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος αέρα. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου διαθέτουν το πλεονέκτημα ότι αξιοποιούν τον άνεμο από όλες τις κατευθύνσεις του αφού δεν χρειάζονται μηχανισμοί περιστροφής για τον προσανατολισμό τους προς τον άνεμο. Έτσι «μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, να αντιμετωπίζουν αλλαγές στην κατεύθυνση του ανέμου και να έχουν συμμετρικό σχεδιασμό» (Nugraha, et al., 2025, p. 2). Ωστόσο, οι (Mendoza, Katsidoniotaki, & Bernhoff, 2020) υποστήριξαν ότι οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου έχουν πιο χαμηλή απόδοση και η δομή τους είναι πιο σύνθετη.

Οι γενικές αρχές λειτουργίας των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα είναι η έλξη και η ανύψωση. Με βάση τις δύο δυνάμεις που οδηγούν τα πτερύγια, οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες (Peng, Liu, & Yang, 2021):

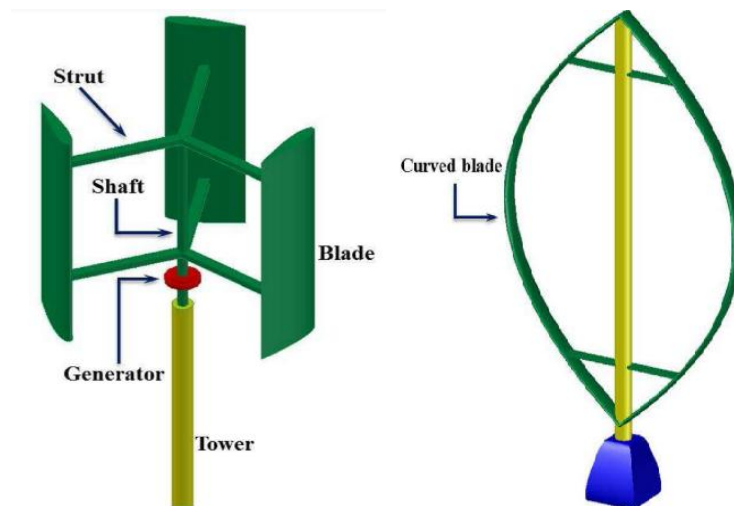
1. Τύπος Savonius: οι ανεμογεννήτριες βασίζονται στην οπισθέλκουσα, δηλαδή η κίνησή τους επιτυγχάνεται μέσω της αντίστασης των πτερυγίων τους προς

τον άνεμο και όχι λόγω της ανύψωσης. Έχουν πιο χαμηλό συντελεστή ισχύος, μικρότερη περιφερειακή ταχύτητα και περιορισμένο μέγεθος σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους.



Εικόνα 5: Ανεμογεννήτρια Savonius (Peng, Liu, & Yang, 2021)

2. Τύπος Darrieus: οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου είναι οι πιο διαδεδομένες στη διεθνή αγορά. Πρόκειται για μηχανές που λειτουργούν με τη δυναμική της ανύψωσης, διαθέτουν υψηλές ταχύτητες εκκίνησης ενώ έχουν χαμηλό μέσο ετήσιο συντελεστή ισχύος.



Εικόνα 6: Ανεμογεννήτριες Darrieus (Peng, Liu, & Yang, 2021)

Γενικότερα, τα αποτελέσματα πολλών ερευνών όπως των (Roy & Saha, 2013) και (Gorelov & Krivospitsky, 2008) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus είναι περισσότερο αποδοτικές στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες Savonius.

### 4.3.3 Σύγκριση ανεμογεννητριών HAWT & VAWT

Η επιλογή ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες καθέτου και οριζόντιου άξονα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως την απόδοσή τους, τις συνθήκες εγκατάστασής τους, τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες υπό τις οποίες θα λειτουργούν κ.α. Πλήθος ερευνών κατέληξε στο ότι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα *«προτιμώνται περισσότερο στις θαλάσσιες ρυθμίσεις λόγω του χαμηλότερου κέντρου βάρους και της έλλειψης δυναμικών φορτίων, προσφέροντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα»*, (Xue, Wan, Takahashi, & Akimoto, 2024, p. 1). Ειδικότερα, η έρευνα των (Yang, Guo, Song, Zhang, & Li, 2018) και των (Mohammed, Sahin, & Quakad, 2020) που πραγματοποιήθηκε με σκοπό να εξετάσει τις βέλτιστες αποδόσεις καθώς και τις αεροδυναμικές ιδιότητες των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατό να επιτευχθούν υψηλότεροι συντελεστές ισχύος ( $C_p$ ) από τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Γενικότερα, τα ευρήματα των ερευνών στη διεθνή βιβλιογραφία τονίζουν τη δυνατότητα βέλτιστων αποδόσεων των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα με σκοπό την υπεράκτια παραγωγή αιολικής ενέργειας (Xue, Wan, Takahashi, & Akimoto, 2024).

### 4.4 Μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Η χρήση των ανεμογεννητριών πραγματοποιείται για την ολοκληρωμένη ή την συμπληρωματική κάλυψη των αναγκών ενέργειας στον ιδιωτικό και το δημόσιο τομέα. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να καταναλωθεί είτε τοπικά είτε να διοχετευτεί σε ηλεκτρικό δίκτυο ώστε να καταναλωθεί μεταγενέστερα, σε άλλο χρόνο και τόπο. Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να πραγματοποιείται με διάφορες μεθόδους, οι οποίες εξαρτώνται από τις ανάγκες και τις υποδομές του συστήματός τους και είναι οι εξής:

- Σύστημα αποθήκευσης με ηλεκτρικούς συσσωρευτές
- Αντλησιοταμίευση υδροηλεκτρικής ενέργειας
- Θερμική αποθήκευση ενέργειας
- Αποθήκευση σε υδρογόνο

Στη σύγχρονη εποχή, η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω των ηλεκτρικών συσσωρευτών (μπαταρίες), οι οποίοι αποτελούν την κύρια και πιο

διαδεδομένη μέθοδο αποθήκευσης για μικρής κλίμακας παραγωγικές μονάδες. «*Η άντληση ύδατος με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ανεμογεννήτριες και η ταμίευσή του σε τεχνητές λίμνες κατασκευασμένες σε υψόμετρο το οποίο είναι ικανό να τροφοδοτήσει υδροηλεκτρικό σταθμό, είναι η μέθοδος αποθήκευσης που χρησιμοποιείται όταν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγάλη*», (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας)<sup>4</sup>.

Η Ελλάδα διαθέτει ένα εξαιρετικά σημαντικό αιολικό δυναμικό, το οποίο αξιοποιείται σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια. Σε διάφορες περιοχές της όπως την Κρήτη, την Εύβοια, την Πελοπόννησο και στα νησιά του Αιγαίου υπάρχουν αιολικά πάρκα αποτελούμενα από συστοιχίες ανεμογεννητριών με σκοπό τη βέλτιστη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού της χώρας.

---

<sup>4</sup> Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας: <https://ypen.gov.gr/energeia/ape/technologies/aioliki/>

## 5. Πτερύγιο ανεμογεννήτριας

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών αποτελούν σημαντικό στοιχείο για την παραγωγή της αιολικής ενέργειας. Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η λειτουργικότητά τους είναι παράγοντες καθοριστικής σημασίας για τη συνολική αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών, καθώς επηρεάζουν την ικανότητά τους να μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Συνεπώς, ο σκοπός λειτουργίας των πτερυγίων είναι η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική, με τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα. Αυτό έχει αποτελέσει πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα καθώς εξαρτάται από την ακριβή αεροδυναμική σχεδίασή τους, την ανθεκτικότητα των σύνθετων υλικών καθώς και τις πρακτικές παραγωγής τους, (Krishnan, Al-Obaidi, & Hao, 2023).

### 5.1 Σύνθετα υλικά πτερυγίου ανεμογεννήτριας

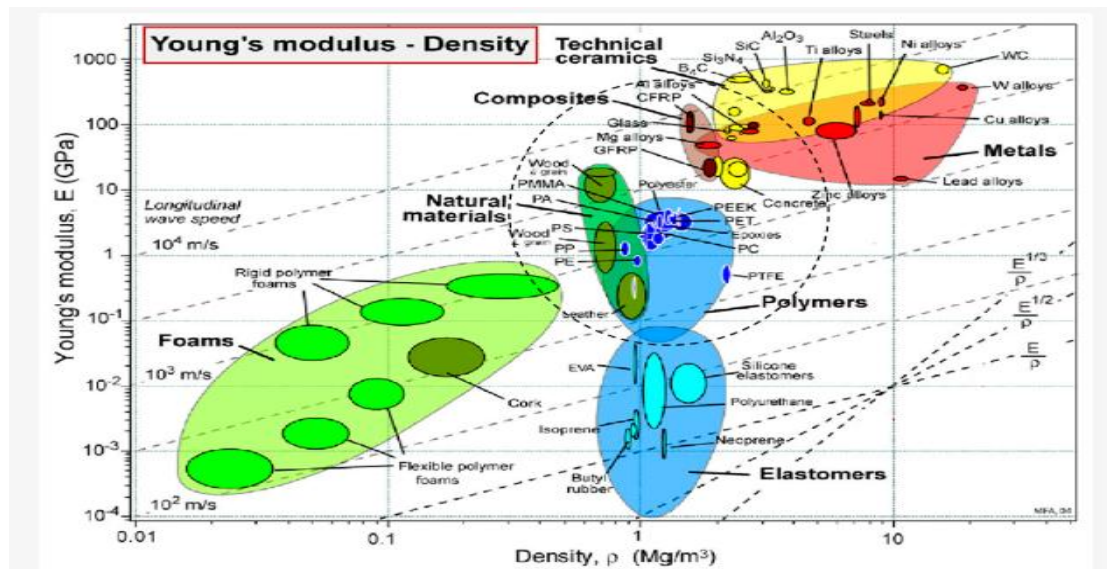
Τα σύνθετα πολύφυλλα υλικά που επιλέγονται για την κατασκευή του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποτελεσματική παραγωγικότητα, την ενεργειακή απόδοση και τη βιωσιμότητα των συστημάτων παραγωγής αιολικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια των ετών, τα υλικά που χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή του πτερυγίου, έχουν εξελιχθεί από βαρέα μέταλλα όπως ο χάλυβας και το αλουμίνιο, σε πιο ελαφρές και ευέλικτες επιλογές υλικών, με στόχο να αντιμετωπιστούν προκλήσεις που αφορούν το βάρος και τη λειτουργική απόδοσή τους.

Η τεχνολογική εξέλιξη των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας αντιπροσωπεύει μία βελτιστοποιημένη συμβολή της επιστήμης των υλικών και της αεροδυναμικής μηχανικής, αναδεικνύοντας τη διαρκή αναζήτηση ισορροπίας για υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος. Λόγω των ραγδαίων εξελίξεων στο τομέα της αιολικής ενέργειας, δημιουργήθηκε επιτακτική η ανάγκη χρησιμοποίησης υλικών τα οποία θα αποφέρουν καλύτερες αποδόσεις και καλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Συνεπώς, η χρήση των σύνθετων υλικών για την κατασκευή έγκειται στους εξής λόγους (Kulatunga, Jayamani, Soon, Prashanth, Jeyanthi, & Sankar, 2022, p. 2):

- *Υψηλή δύναμη: για να αντέχουν στη βαρύτητα και σε άλλα ακραία φορτία.*

- Υψηλή αντοχή στην κόπωση και αξιοπιστία: για να εξασφαλίζεται σταθερή λειτουργία για διάρκεια ζωής 20-25 ετών.
- Χαμηλό βάρος: για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης των βαρυτικών δυνάμεων και του φορτίου που ασκείται στον πύργο.
- Υψηλή ακαμψία: για να διασφαλίζεται η σταθερότητα και ο προσανατολισμός του πτερυγίου κατά τη λειτουργία.

Αυτό είχε ως αποτελέσματα την υιοθέτηση προηγμένων και βιώσιμων σύνθετων υλικών. Η χρησιμότητά τους εξαρτάται από το βάρος και την ακαμψία. Όπως παρατηρείται παρακάτω, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται για την υψηλή αντοχή τους, την καλή ακαμψία των ινών και το χαμηλό τους βάρος.



Εικόνα 7: Υλικά πτερυγίων ανεμογεννητριών (Ashby, 2009)

### 5.1.1 Συστατικό ενίσχυσης πτερυγίου ανεμογεννήτριας

Οι πιο διαδεδομένοι τύποι συστατικών ενίσχυσης που εφαρμόζονται στα σύγχρονα σχέδια πτερυγίων είναι τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (Glass fiber reinforced polymer composites- GFRP), τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (Carbon Fibre Reinforced Polymer - CFRP) και τα βιοσύνθετα υλικά (Bio-composite materials). Αυτό έγκειται στην υψηλότερη ακαμψία και αντοχή τους, την ξεχωριστή μορφοποίησή τους και την ικανότητα προσαρμογής τους σύμφωνα με το προσανατολισμό, τη θέση και τις επιθυμητές ιδιότητες λιγότερου βάρους (Attaf, 2013). Ειδικότερα, η ακαμψία του σύνθετου υλικού και η αντοχή του σε διάφορες

επιδράσεις όπως στη θλίψη, το εφελκυσμό κ.α. εξαρτώνται από τον όγκο των ινών. Για παράδειγμα όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του όγκου των ινών τόσο αυξάνεται η αντοχή και η ακαμψία τους.

### **Ίνες γυαλιού (Glass Fiber)**

Οι ίνες γυαλιού κυριαρχούν στα σύνθετα υλικά των πτερυγίων, παρόλο που υπάρχουν πολλές επιλογές υλικού που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία. Αυτό έγκειται κυρίως στο χαμηλό κόστος και στη μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό. Το κύριο ενισχυτικό υλικό στις ίνες γυαλιού είναι συνήθως οι ίνες E-Glass, η χρησιμότητα των οποίων έγκειται στο χαμηλό κόστος, την αποτελεσματική μόνωση και την ιδιότητα χαμηλού ρυθμού απορρόφησης νερού (Bulent Eke & Akdogan, 2006). Στις περισσότερες περιπτώσεις, το βάρος του γυαλιού το οποίο εμπεριέχεται στα σύνθετα υλικά του πτερυγίου είναι περίπου το 75%. Επιπλέον, έχουν διεξαχθεί έρευνες σε άλλους τύπους ινών γυαλιού, με τους κυριότερους να είναι οι S-glass και R-glass, οι οποίοι έχουν καλύτερες ιδιότητες από το E-glass αλλά δεν προτιμώνται στην σχεδίαση των πτερυγίων (Mishnaevsky, 2017). Τελικά, στη βιομηχανία των ανεμογεννητριών, επιλέγονται τα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GRP), τα οποία αποτελούν κυρίαρχη επιλογή αφού παρέχουν πληθώρα θετικών ιδιοτήτων και χαμηλό κόστος (Tenguria, Mittal, & Ahmed, 2011).

### **Ίνες άνθρακα (Carbon fibers)**

Όσον αφορά τις ίνες άνθρακα «αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση έναντι των ινών γυαλιού, καθώς παρουσιάζουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας, χαμηλότερη πυκνότητα, υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό σε σύγκριση με το E-glass, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση λεπτότερων και μακρύτερων πτερυγίων», (Kulatunga, Jayamani, Soon, Prashanth, Jeyanthi, & Sankar, 2022, σ. 2). Οι ίνες άνθρακα διακρίνονται για την υψηλότερη ακαμψία, το λιγότερο βάρος τους και την αντοχή τους στο εφελκυσμό σε σχέση με τις ίνες γυαλιού, καθιστώντας τα καταλληλότερα υλικά για την κατασκευή των πτερυγίων. Ωστόσο, πολυάριθμες δοκιμές έχουν αποδείξει ότι είναι ευάλωτα σε παραμορφώσεις και σε κυματισμούς μεγάλων φορτίων, γεγονός που θα μειώσει την αντοχή του σε κόπωση και θλίψη και τελικά θα οδηγήσει στην καταστροφή του. Επίσης, *«η αντοχή στην κόπωση και η αντοχή σε θλίψη τείνουν να μειώνονται όταν υπάρχει κακή ευθυγράμμιση της ίνας στο σύνθετο υλικό από ανθρακονήματα»*, (Olabi, et al., 2021, p. 7). Αξίζει να αναφερθεί ότι, οι ίνες

άνθρακα παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις σε πολλές από τις ιδιότητές τους συγκριτικά με τις ίνες γυαλιού. Ωστόσο, λόγω του υψηλότερου κόστους, της χαμηλής αντοχής και τελικής καταπόνησής τους, συνήθως προτιμώνται οι ίνες γυαλιού ειδικά στις περιπτώσεις κατασκευής ανεμογεννητριών για αιολικά πάρκα.

### **Bio-σύνθετα υλικά (Bio-composite materials)**

Αξίζει να αναφερθεί ότι, λόγω της ανάπτυξης των ανεμογεννητριών για την παραγωγή ενέργειας καθώς και των διαφόρων περιβαλλοντικών ζητημάτων, η προσοχή των ερευνητών και των κατασκευαστών στράφηκε στην χρήση φυσικών υλικών. Έτσι για την κατασκευή του πτερυγίου άρχισαν να χρησιμοποιούνται σύνθετα πολυμερή υλικά ενισχυμένα με φυσικές ίνες (natural fiber reinforced plastic composites). Οι φυσικές ίνες αποτελούν προηγμένα βιώσιμα υλικά καθώς λόγω των καλύτερων ιδιοτήτων τους όπως η υψηλή αντοχή, η χαμηλή πυκνότητα, το χαμηλό κόστος, το χαμηλό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και η αφθονία τους σε διάφορες χώρες, τα καθιστούν την καλύτερη επιλογή ως σύνθετα υλικά (Bakri, Chandrabakty, Alfriansyah, & Dahy, 2016) & (Debnath, Singh, & Dvived, 2013).

Οι φυσικές ίνες με βάση την πηγή προέλευσής τους κατηγορούνται στις εξής κατηγορίες: (i) φυτικές ίνες, (ii) ζωικές ίνες και (iii) ορυκτές ίνες. Ενδεικτικά παραδείγματα φυσικών ινών είναι το μπαμπού (bambusoideae), η κάνναβη (Cannabis), ο κοκοφοίνικας (cocos nucifera) κ.α. Συγκεκριμένα, το μπαμπού αποτελεί φυσικό υλικό με προοπτικές καθώς θεωρείται η ιδανική επιλογή υλικού για την κατασκευή του πτερυγίου, σύμφωνα με την έρευνα των (Holmes, Brøndsted, Jiang, Sun, & Chen, 2009). Συμπερασματικά λοιπόν, η χρήση των σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με φυσικές ίνες θεωρείται το μέλλον για τη βιομηχανία της αιολικής ενέργειας εξαιτίας του ταχύτατου ρυθμού ανάπτυξης, της εύκολης πρόσβασης λόγω της αφθονίας τους καθώς και του φιλικού αποτυπώματός τους προς το περιβάλλον (Holmes, Sørensen, & Brøndsted, Reliability of wind turbine blades: An overview of materials testing, 2007).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μία συγκριτική ανάλυση των διαφόρων ιδιοτήτων των υλικών της κατασκευής του πτερυγίου. Η ανάλυση εστιάζει στα βασικά χαρακτηριστικά, αναφορικά με την πυκνότητα, την αντοχή σε εφελκυσμό, την ευελιξία, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υλικών. Ο στόχος της παρακάτω ανάλυσης είναι η οριοθέτηση των διαφορών μεταξύ των παραδοσιακών



υλικών όπως τα μέταλλα και των προηγμένων σύνθετων υλικών όπως οι ίνες γυαλιού άνθρακα και των βιο-σύνθετων υλικών. Από τον πίνακα προκύπτει ότι οι ίνες γυαλιού αποτελούν την καταλληλότερη επιλογή υλικού καθώς ανταποκρίνονται καλύτερα στις επιθυμητές ιδιότητες του υλικού κατασκευής του πτερυγίου.

Τύπος Υλικού	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Ευελιξία (GPa)	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις
<b>Μέταλλα</b>	2700	110-400	Χαμηλή	Υψηλή (παραγωγή έντασης ενέργειας)
<b>Ίνες γυαλιού</b>	1900	500-750	Μέτρια	Μέτρια (μη βιοαποδομήσιμα, προκλήσεις ανακύκλωσης)
<b>Ίνες άνθρακα</b>	1600	2000-2500	Υψηλή	Μέτρια (ενέργειας, ανακυκλώσιμη)
<b>Βιοσύνθετα υλικά</b>	1300	100-300	Χαμηλή έως Μέτρια	Χαμηλή (βιοαποικοδομήσιμη, βιώσιμη προμήθεια)

Πίνακας 1: Ιδιότητες των υλικών πτερυγίου ανεμογεννήτριας (Firoozi, Firoozi, & Hejazi, 2024)

### 5.1.2 Συστατικό μήτρας πτερυγίου ανεμογεννήτριας

Υπάρχουν διάφοροι τύποι του συστατικού της μήτρας που εφαρμόζονται στην κατασκευή των πτερυγίων όπου είναι οι θερμοσκληρυνόμενες, οι θερμοπλαστικές, οι εποξειδικές και οι βινυλεστέρες μήτρες.

#### Θερμοσκληρυνόμενη μήτρα (Thermoset polymer matrix)

Ο πιο διαδεδομένος τύπος του συστατικού της μήτρας που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των πτερυγίων είναι η θερμοσκληρυνόμενη πολυμερής μήτρα (Thermoset polymer matrix). Ειδικότερα, για την κατασκευή του πτερυγίου χρησιμοποιούνται θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80% των ενισχυμένων σύνθετων υλικών του (Olabi, και συν., 2021). Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν σημαντικές ιδιότητες όπως η υψηλή αντοχή, η ακαμψία και η εύκολη επεξεργασία τους. Επιπλέον, είναι εφικτό να σκληρυνθούν σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες καθώς και σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Είναι υψίστης σημασίας να αναφερθεί ότι η περαιτέρω ανάπτυξη τέτοιων υλικών μήτρας τα οποία έχουν γρήγορο ρυθμό

σκληρύνσης σε χαμηλές θερμοκρασίες συνιστά πεδίο έρευνας για περαιτέρω ανάλυση.

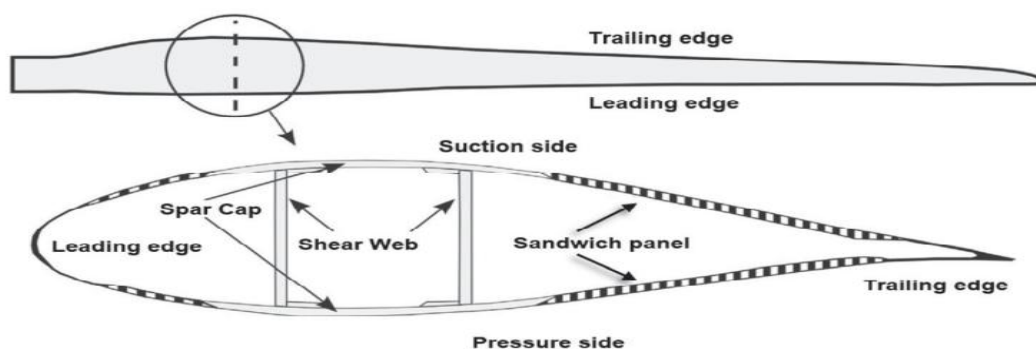
## **5.2 Σχεδιαστικές προσεγγίσεις στο πτερύγιο ανεμογεννήτριας**

Ο δομικός σχεδιασμός και η αεροδυναμική σχεδίαση του πτερυγίου αποτελούν το πυρήνα σχεδίασής του. Είναι δύο έννοιες άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους, καθώς ο στόχος του δομικού σχεδιασμού είναι η μηχανική αντοχή του πτερυγίου ενώ της αεροδυναμικής σχεδίασής του είναι η μέγιστη απόδοση μετατροπής της ενέργειας. Χωρίς τη συνέργεια των παραπάνω σχεδιασμών δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί η μέγιστη αεροδυναμική απόδοση και ταυτόχρονα η μηχανική ασφάλεια του πτερυγίου. Συνεπώς, απαιτείται η αρμονική συνεργασία των δύο σχεδιαστικών προσεγγίσεων καθώς ο τελικός στόχος τους είναι η αποδοτικότερη και πιο αξιόπιστη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

### **5.2.1 Δομικός σχεδιασμός πτερυγίου ανεμογεννήτριας**

Ο δομικός σχεδιασμός του πτερυγίου εστιάζει στη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας και μηχανικής αντοχής, υπό τις διαφορετικές φορτίσεις που υφίσταται και τη λειτουργία του. Κατά το δομικό σχεδιασμό λαμβάνονται υπόψη παράγοντες που αφορούν τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του κελύφους και το πάχος αυτού, οι καταπονήσεις που δέχεται από τον αέρα και τη βαρύτητα, η ανομοιόμορφη κατανομή των φορτίων του αέρα σε διαφορετικά σημεία του πτερυγίου κ.α. Βασική προτεραιότητα του σχεδιασμού είναι η υψηλότερη αντοχή του πτερυγίου με το μικρότερο δυνατό βάρος.

Η δομή του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Ειδικότερα, το πτερύγιο απαρτίζεται από δύο επιφάνειες, την πλευρά της πίεσης (pressure side) και την πλευρά της αναρρόφησης (suction side). Οι επιφάνειες αυτές ενώνονται μεταξύ τους και σκληραίνουν με έναν ή περισσότερους ιστούς διάτμησης (shear web) οι οποίοι ενώνουν το άνω και το κάτω μέρος του κελύφους του πτερυγίου. *«Ο διατμητικός ιστός βρίσκεται μεταξύ των φλοιών στη δομή σάντουιτς που αποτελείται από το διαζονικό υαλοβάμβακα και τον αφρό για να αντέχει το εγκάρσιο διατμητικό φορτίο»*, (Lee & Shin, 2022, σ. 2060).



Εικόνα 8: Διατομή πτερυγίου ανεμογεννήτριας (Lee & Shin, 2022)

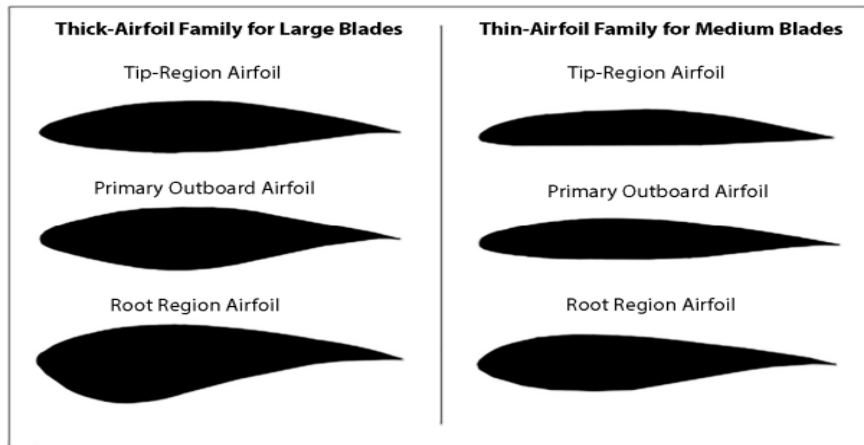
### 5.2.2 Αεροδυναμική σχεδίαση πτερυγίου ανεμογεννήτριας

Η αεροδυναμική σχεδίαση του πτερυγίου επικεντρώνεται στη βέλτιστη μετατροπή της ενέργειας με στόχο τη μέγιστη δυνατή απόδοση του πτερυγίου. Κατά την σχεδίαση λαμβάνονται υπόψη στοιχεία που αφορούν το προφίλ της αεροτομής όπως τη μορφή, το πάχος, τη γωνία προσβολής κ.α. ενώ ταυτόχρονα συνυπολογίζεται η ταχύτητα του ανέμου. Η αεροδυναμική σχεδίαση έγκειται στην υψηλότερη απόδοση του πτερυγίου με τη μικρότερη αντίστασή του, προσαρμόζοντας την γεωμετρία του. Ειδικότερα, η σχεδίαση του πτερυγίου προσαρμόζεται με την κατάλληλη στρέψη (twist) και στένωση (taper) του πτερυγίου ώστε να λειτουργεί αποδοτικότερα σε όλο το μήκος του. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη βέλτιστη αλληλεπίδραση του ανέμου και την παραγωγή περισσότερης ενέργειας.

Οι καινοτομίες στην αεροδυναμική έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της σχεδίασης των ανεμογεννητριών και κατ' επέκταση στην απόδοσή τους. «Η αεροδυναμική βελτιστοποίηση των πτερυγίων ανεμογεννητριών περιλαμβάνει ένα εξελιγμένο μείγμα αρχών και τεχνολογιών που έχουν σχεδιαστεί για να μεγιστοποιούν την εξαγωγή ενέργειας και να ελαχιστοποιούν τις μηχανικές καταπονήσεις», (Firoozi, Firoozi, & Hejazi, 2024, σ. 6). Οι καινοτομίες αφορούν την εισαγωγή προσαρμοστικών πτερυγίων οπίσθιας ακμής, τα οποία διακρίνονται για τη δυναμική προσαρμογή τους στις συνθήκες του ανέμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της ενεργειακής παραγωγής, την παράταση της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων και την βελτίωση της αναλογίας ανύψωσης προς την οπισθέλκουσα σε διάφορα σενάρια λειτουργίας. Παράλληλα, η προσθήκη τμηματοποιημένων πτερυγίων έδωσε τη δυνατότητα να κατασκευαστούν μεγαλύτερα πτερύγια τα οποία θα απορροφούν

μεγαλύτερη ποσότητα αιολικής ενέργειας. Αυτό θα έχει ως αποτελέσματα την αύξηση της συνολικής απόδοσης και τη μείωση του κόστους. Οι έρευνες που διεξήχθησαν έδωσαν έμφαση στην εισαγωγή καινοτόμων σχεδίων αεροτομών του πτερυγίου, σημειώνοντας σημαντικό βήμα στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Συνεπώς, η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης αποτελεί κύριο στοιχείο για τη μεγέθυνση της ενεργειακής αποδοτικότητας, τη μεγιστοποίηση της δεσμευμένης ποσότητας ενέργειας και την ελαχιστοποίηση των παραγόντων που εμποδίζουν την λειτουργική απόδοση των συστημάτων της αιολικής ενέργειας (Rehman, Alam, Alhems, & Rafique, 2015).

Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται η μεταβολή από το προφίλ των αεροτομών που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό των πτερυγίων ως συνάρτηση του μεγέθους τους. Στο αριστερό μέρος παρουσιάζεται η «Οικογένεια Χονδρής Αεροτομής για Μεγάλα Πτερύγια», των οποίων τα προφίλ έχουν βελτιστοποιηθεί για μεγαλύτερα μεγέθη πτερυγίων. Επιπλέον διακρίνονται για την στιβαρότητά τους και τη βελτιωμένη απόδοσή τους σε υψηλότερες ταχύτερες ανέμους. Όσο πιο λεπτή γίνεται η αεροτομή, τόσο μειώνεται η έλξη και βελτιστοποιείται η απόδοση στα εξωτερικά τμήματα τα οποία κινούνται ταχύτερα. Στο δεξί μέρος παρουσιάζεται η «Οικογένεια Λεπτής Αεροτομής για Μεσαία Πτερύγια», των οποίων τα προφίλ έχουν βελτιστοποιηθεί για μεσαίου μεγέθους πτερύγια με σκοπό να αποκρίνονται σε συνθήκες μέτριου ανέμου. Επιπλέον, έχουν προσαρμοστεί για να ισοσκελίζουν την ανύψωση και την αποδοτική έλξη, με σκοπό να βελτιώσουν την απόδοση σε διάφορα τμήματα της λεπίδας. *«Συγκρίνοντας τις δύο οικογένειες, οι σχεδιαστές μπορούν να επιλέξουν τα καταλληλότερα τμήματα αεροτομής για να προσαρμόσουν τα πτερύγια για βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της δομικής ακεραιότητας και της αεροδυναμικής απόδοσης, που είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική δέσμευση ενέργειας και τη μακροπρόθεσμη αντοχή των ανεμογεννητριών»*, (Firoozi, Firoozi, & Hejazi, 2024, p. 11). Συμπερασματικά, οι διάφορες δυναμικές αλλαγές της γωνίας κάθε πτερυγίου και οι βελτιώσεις που έχουν επέλθει σε αυτό, συνεισφέρουν με αποτελεσματικότερο τρόπο στην διαχείριση ροής και κατεύθυνσης του ανέμου πάνω από την επιφάνεια της λεπίδας, βελτιώνοντας έτσι την ενεργειακή αποδοτικότητα σε διάφορες συνθήκες κυμαινόμενου αέρα (Alom & Saha, 2019) .



Εικόνα 9: Συγκριτικά προφίλ αεροτομής για περύγια ανεμογεννητριών διαφορετικών μεγεθών (Firoozi, Firoozi, & Hejazi, 2024, σ. 12)

## **6. Μεθοδολογική προσέγγιση & Μοντέλο κελύφους πτερυγίου**

### **6.1 Μεθοδολογική προσέγγιση**

Η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας εργασίας βασίζεται στην ανάπτυξη ενός ανεπτυγμένου μοντέλου κελύφους για το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας στο οποίο ενσωματώθηκαν τα σύνθετα υλικά τα οποία είναι το glass fiber/polyester και το carbon fiber/epoxy. Παράλληλα ορίστηκαν κρίσιμα στοιχεία όπως οι μοίρες, οι στρώσεις, το πάχος, η πυκνότητα των ινών καθώς και οι περιοχές επιβολής της φόρτισης. Η τρισδιάστατη γεωμετρία του μοντέλου του κελύφους θα επιτευχθεί με τη χρήση του Autodesk Fusion 360 το οποίο αποτελεί λογισμικό του σχεδιαστικού προγράμματος Computer Aided Design (CAD). Η αξιοποίηση αυτού του προγράμματος έγκειται στο ότι παρέχει τη δυνατότητα σχεδιασμού πολύπλοκων δομών. Σε αυτή την περίπτωση θα επιτευχθεί η λεπτομερής αναπαράσταση της μορφής του πτερυγίου και των λεπτομερειών κατασκευής του.

Η μηχανική ανάλυση του μοντέλου με την οποία θα προσομοιωθούν κρίσιμες παράμετροι όπως η κάμψη, η διάταση κτλ θα πραγματοποιηθεί με την χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics 6.0. Το συγκεκριμένο λογισμικό εμπεριέχει την ενότητα των σύνθετων υλικών με την οποία καθίσταται εφικτή η προσομοίωση κατασκευών τύπου σάντουιτς, αποτελούμενες από στρωματοποιημένα συνθετά υλικά. Η επιλογή αυτής της μεθοδολογίας διευκολύνει τον ακριβή σχεδιασμό του πτερυγίου καθώς επιτρέπει την παραμετροποίηση βασικών παραγόντων όπως η επιλογή των υλικών, η διαστρωμάτωσή τους κ.α. Ειδικότερα, στην ανάλυση, ιδιαίτερη έμφαση θα δοθεί στην επιλογή κρίσιμων παραμέτρων αναφορικά με την επιλογή των υλικών, την κατανομή των τάσεων και την απόκρισή του σε διάφορες εφαρμογές φόρτισης. Το κέλυφος του πτερυγίου θα υποβληθεί σε μία σειρά δοκιμών υπό διαφορετικές υποθέσεις ανά περίπτωση.

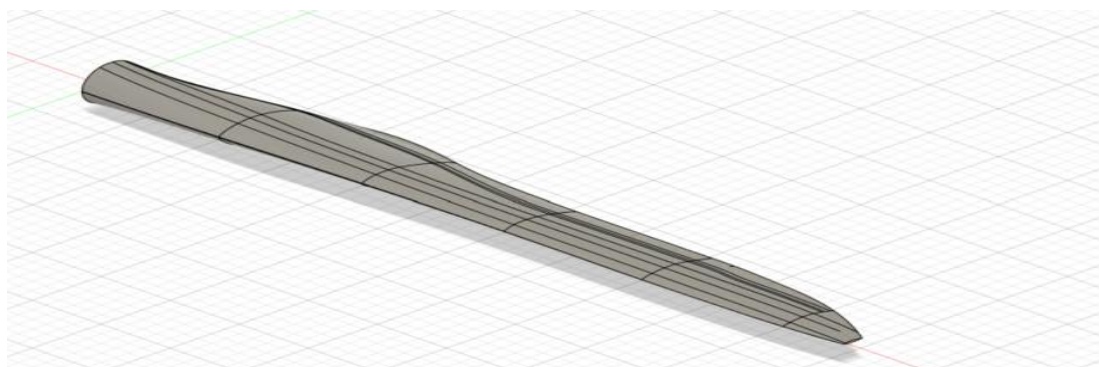
Τέλος, για τη διεξαγωγή των συμπερασμάτων θα χρησιμοποιηθεί η κατανομή τάσεων Von Mises. Οι τάσεις Von Mises χρησιμοποιούνται ως εργαλείο εκτίμησης για να διαπιστωθεί η λειτουργία ή η αστοχία του υλικού υπό την εφαρμογή φόρτισης (Wang, Liu, Wen, & Xie, 2020). Οι τάσεις Von Mises αποτελούν ένα δείκτη της σημειακής κατανομής και συγκέντρωσης των επιβαλλόμενων τάσεων, συμβάλλοντας στον εντοπισμό των περιοχών καταπόνησης του πτερυγίου στα οποία είναι πιθανή η

διαρροή. Το κριτήριο υποδηλώνει ότι όταν η τιμή τάσης Von Mises (γνωστή και ως Von Mises Stress) του υλικού ισούται ή υπερβαίνει το όριο διαρροής, τότε το υλικό αρχίζει να υπόκειται σε μόνιμες παραμορφώσεις. Αυτό συνεπάγεται ότι δεν θα επιστρέψει στην αρχική μορφή του μετά την αφαίρεση του φορτίου.

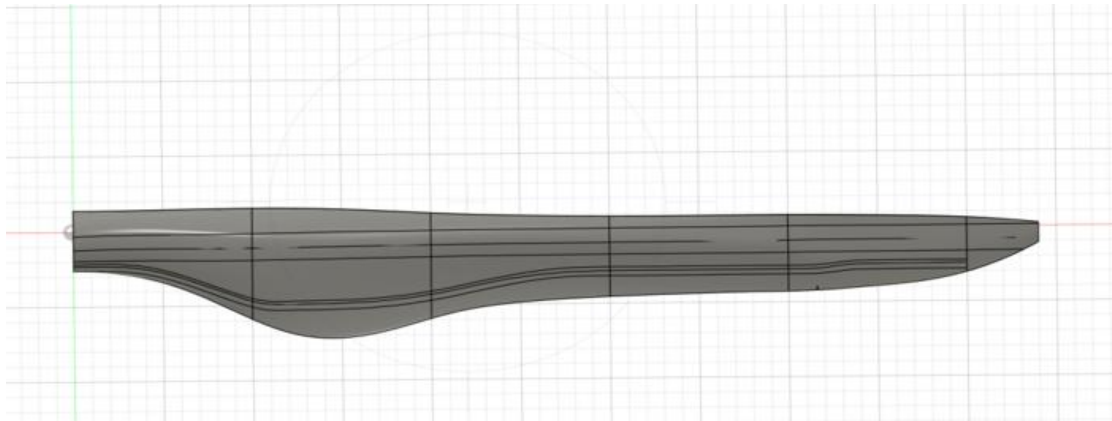
## 6.2 Ορισμός μοντέλου κελύφους

Η μηχανική ανάλυση του κελύφους του πτερυγίου θα διευρυνθεί με την χρήση των μοντέλων κελύφους εξωτερικού στρώματος καλουπιού (Outer Mold Line – OML) (Kim, Bang, Shin, & Jang, 2014). Η επιλογή του μοντέλου επιτρέπει τη λεπτομερή γεωμετρική απεικόνιση της εξωτερικής επιφάνειας του κελύφους του πτερυγίου, που είναι κρίσιμη για την ανάλυση της μηχανικής απόκρισής του. Ειδικότερα το μοντέλο της ανάλυσης αποτελείται από μία επιφάνεια διπλού στρώματος, αποτελούμενη από carbon fiber/epoxy και glass fiber/polyester. Η κάθε στρώση διαθέτει ίσο πάχος και διαφορετικές μοίρες. Τέλος, εφαρμόζονται στατικά φορτία σε διαφορετικές περιοχές του πτερυγίου.

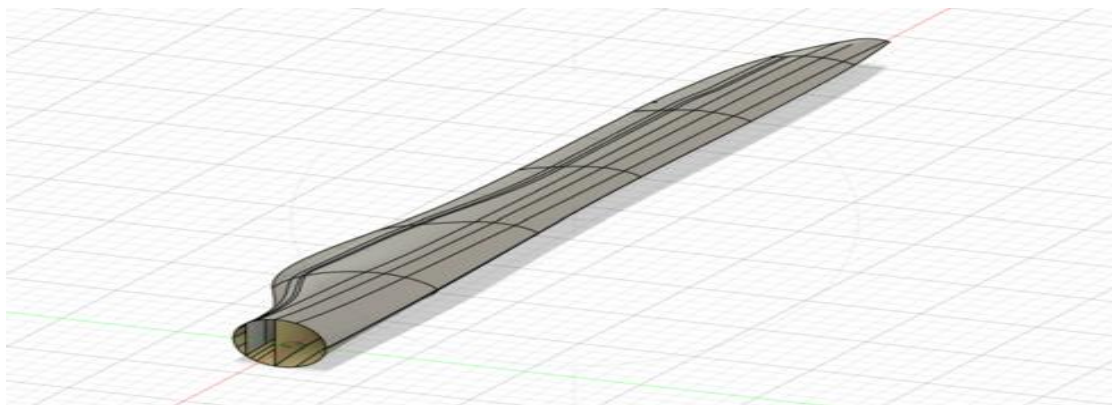
Η προσομοίωση του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας πραγματοποιήθηκε μέσω σχεδιαστικού προγράμματος Computer Aided Design (CAD), το οποίο επιτρέπει την παραμετρική διαμόρφωση των κύριων χαρακτηριστικών του πτερυγίου όπως η καμπυλότητα, το μήκος, η γωνία προβολής κ.α. Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός του κελύφους του πτερύγιου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Autodesk Fusion 360. Προκείμενου να επιτευχθεί η μηχανική ανάλυση του πτερυγίου, το μοντέλο του κελύφους σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα και διατέθηκε από τον κ. Κουτσιανίτη. Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται το σχέδιο του κελύφους από διαφορετικές οπτικές γωνίες, παρουσιάζοντας μία ολοκληρωμένη εικόνα της δομής του.



Εικόνα 10:Μπροστινό μέρος πτερυγίου ανεμογεννήτριας μέσω Autodesk Fusion 360 (Rentoumis, et al., 2018)



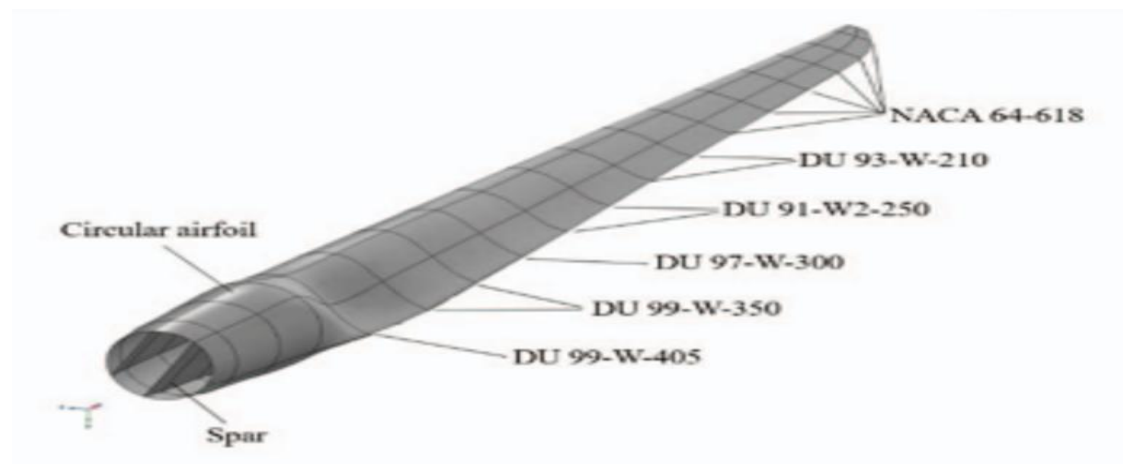
Εικόνα 11: Κάτω μέρος πτερυγίου ανεμογεννήτριας μέσω Autodesk Fusion 360 (Rentoumis, et al., 2018)



Εικόνα 12: Πλαϊνό πτερυγίου ανεμογεννήτριας μέσω Autodesk Fusion 360 (Rentoumis, et al., 2018)

Το κέλυφος και οι δοκοί αποτελούν τα δύο βασικά μέρη του πτερυγίου. Αναφορικά με το κέλυφος, σχηματίζεται από εξωτερικές καμπύλες άκρες και η σημαντικότητά του έγκειται στο ότι φέρει την πλειονότητα του φορτίου. Επιπλέον, οι δοκοί αποτελούν εσωτερικά κάθετα στοιχεία, τα οποία ενισχύουν το πτερύγιο βελτιώνοντας την ακαμψία του έναντι στην κάμψη και τη συστρόφη. Η ανάλυση των βασικών αυτών μερών διακατέχει ιδιάζουσα σημασία καθώς μέσω αυτής επιτρέπεται η πρόβλεψη πιθανών περιοχών συσσώρευσης τάσης. Επιπλέον, επιτυγχάνεται η βελτίωση για περαιτέρω ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της απόδοσης της λεπίδας των ανεμογεννητριών. Η λεπίδα αποτελείται από τμήματα, τα οποία διαθέτουν μοναδικό σχήμα προφίλ. Προκειμένου να επιτευχθεί η διαμόρφωση της συνολικής γεωμετρίας του πτερυγίου, γίνεται χρήση έξι διαφορετικών τύπων αεροδυναμικού προφίλ. Στην κορυφή της λεπίδας χρησιμοποιείται το προφίλ NACA 64-618, παρέχοντας βέλτιστη αεροδυναμική απόδοση, ενώ στις ρίζες του πτερυγίου γίνεται χρήση του DU 99-W-405, εξαιτίας των αποδοτικών δομικών ιδιοτήτων του (Ivanyna, Matviikiv, Klymkovych, Farmaha, Zabierowski, & Panchak, 2024).





Εικόνα 13:Γεωμετρία πτερυγίου ανεμογεννήτριας (Ivanyna, Matviukiv, Klymkovych, Farmaha, Zabierowski, & Panchak, 2024, p. 22)

### 6.3.1 Ορισμός φορτίων & υλικών πτερυγίου

Η δομή του πτερυγίου επηρεάζεται από το βάρος του και τις φυγόκεντρικές δυνάμεις ως αποτέλεσμα της περιστροφής. Η μηχανική ανάλυση της δομής του κελύφους του, χρησιμοποιεί ως βασικό τύπο έρευνας την στατική ανάλυση. Ειδικότερα, στο πλαίσιο αυτής της ανάλυσης θα εξεταστούν οι επιπτώσεις που προκαλούνται από την στατική φόρτιση αρχικά σε όλο το μήκος της επιφανείας του πτερυγίου και έπειτα στην οπίσθια ακμή του. Στο παράρτημα της εργασίας εμπεριέχονται εικόνες, όπου απεικονίζεται το σημείο φόρτισης κατά περίπτωση. Τα διάφορα φορτία που εφαρμόζονται στο πτερύγιο επηρεάζουν τη δομή του, η οποία έχει δομή "σάντουιτς". Η δομή αποτελείται από τα υλικά carbon fiber/epoxy και glass fiber/polyester. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται οι έξι δοκιμές - προσομοιώσεις με τα κύρια στοιχεία του μοντέλου OML.

Δοκιμές προσομοίωσης	Υλικό	Μοίρες	Πάχος	Περιοχή Φόρτισης
1 <sup>η</sup> δοκιμή	Carbon fiber/epoxy	0 μοίρες	15mm	Φόρτιση σε όλη στην επιφάνεια
	Glass fiber/polyester	90 μοίρες		
2 <sup>η</sup> δοκιμή	Carbon fiber/epoxy	135 μοίρες	15mm	
	Glass fiber/polyester	45 μοίρες		
3 <sup>η</sup> δοκιμή	Carbon fiber/epoxy	90 μοίρες	15mm	
	Glass fiber/polyester	90 μοίρες		

4 <sup>η</sup> δοκιμή	Carbon fiber/epoxy	0 μοίρες	15mm	Φόρτιση στη οπίσθια ακμή
	Glass fiber/polyester	90 μοίρες		
5 <sup>η</sup> δοκιμή	Carbon fiber/epoxy	135 μοίρες	15mm	
	Glass fiber/polyester	45 μοίρες		
6 <sup>η</sup> δοκιμή	Carbon fiber/epoxy	90 μοίρες	15mm	
	Glass fiber/polyester	90 μοίρες		

*Πίνακας 2: Υλικά & στοιχεία δοκιμών προσομοίωσης*

Η επιφανειακή φόρτιση θα επιβληθεί σε όλο το μήκος του πτερυγίου ενώ η σημειακή θα επιβληθεί στην οπίσθια ακμή του. Η επιλογή των συγκεκριμένων περιοχών φόρτισης έγινε για τους εξής λόγους:

- Η φόρτιση σε όλο το μήκος του φτερού αποδίδει μία ρεαλιστική προσομοίωση στις συνθήκες λειτουργίας της ενώ αξιολογείται και η συνολική συμπεριφορά της αφού κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, η κατανομή της πίεσης επηρεάζει όλη την επιφάνεια του φτερού.
- Η φόρτιση στην οπίσθια ακμή του πτερυγίου βοηθά στο να εντοπιστούν οι πιθανές αστοχίες και οι αδυναμίες του κάθε υλικού.
- Τέλος, η επιλογή εναλλακτικών περιοχών φόρτισης βοηθά στη διεξαγωγή αποτελεσμάτων, επιτρέποντας αφενός τη σύγκριση των αποδόσεων του κάθε υλικού και αφετέρου την καλύτερη επιλογή αυτών.

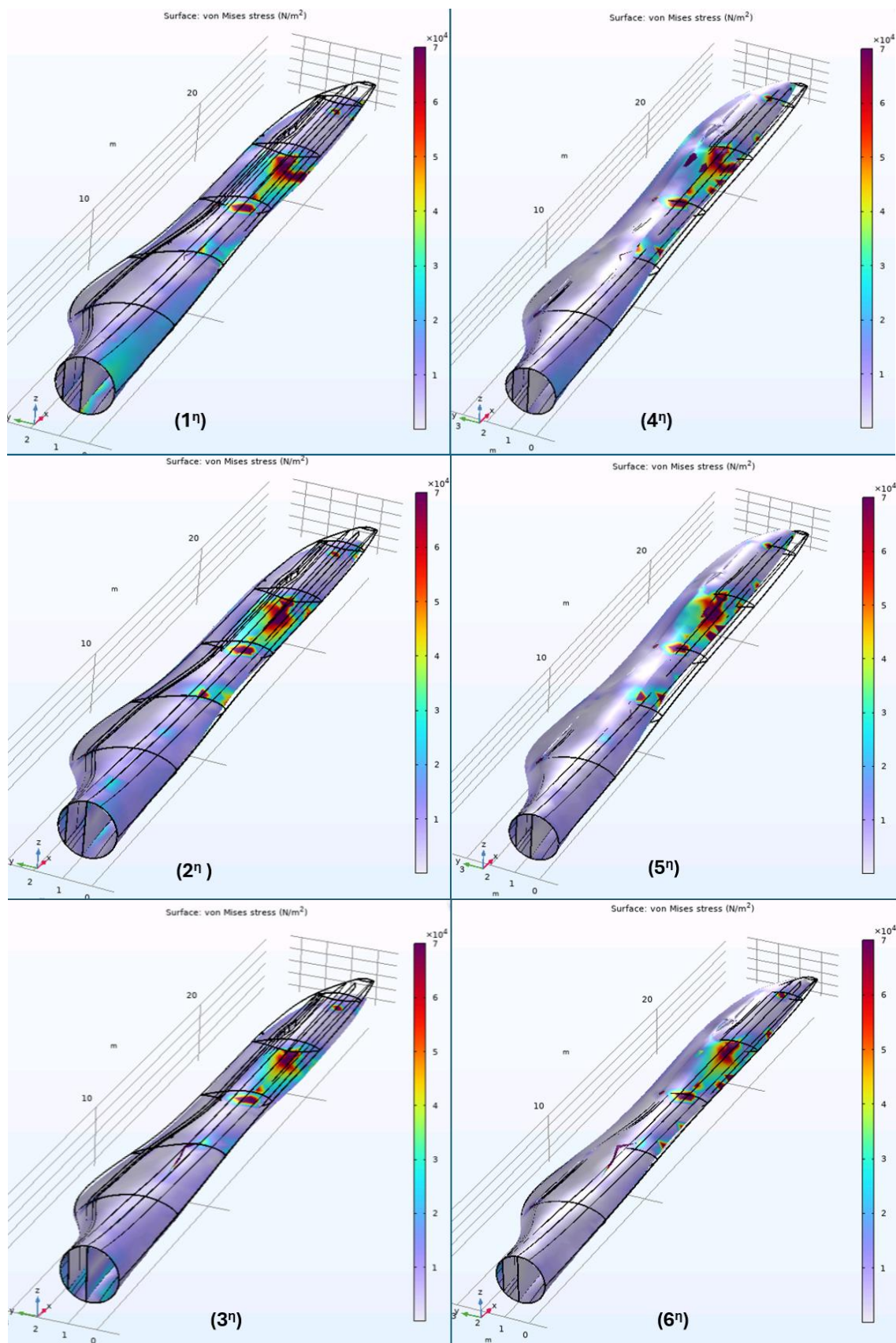
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι θα οριστούν επιπρόσθετα στοιχεία στο μοντέλο του κελύφους. Η εξωτερική επιφάνεια της δομής του πτερυγίου απαρτίζεται από το συνδυασμό δύο μεμονωμένων στρωμάτων, στα οποία γίνεται χρήση είτε δύο διαφορετικών υλικών είτε ενός υλικού και για τις δύο στρώσεις. Η κατεύθυνση των ινών κάθε στρώσης έχει ως στόχο την υψηλότερη αντοχή και ακαμψία και αποτυπώνεται στον σχεδιασμό του πτερυγίου. Στο παράρτημα της εργασίας φαίνονται οι κατευθύνσεις των στρωμάτων της κάθε δοκιμής. Τα στρώματα ακολουθούν μία συγκεκριμένη σειρά στοίβαξης ανάλογα με τις μοίρες της κάθε δοκιμής, επιτρέποντας στο υλικό να παρουσιάσει προσαρμοσμένες μηχανικές ιδιότητες. Ο προσανατολισμός των μοιρών επηρεάζει την αντοχή του πτερυγίου σε εφελκυσμό κατά μήκος του ελάσματος, έχοντας ως αποτέλεσμα την καλύτερη αντοχή στα φορτία που εφαρμόζονται στην επιφάνειά του. Επιπλέον, η πυκνότητα των στρώσεων διακατέχει καθοριστικό ρόλο στο να προσδιοριστεί το συνολικό βάρος της

δομής καθώς για την καλύτερη απόδοση του πτερυγίου απαιτείται μικρότερο βάρος. Η πυκνότητα της κάθε στρώσης είναι διαφορετική, συγκεκριμένα για το glass fiber / poluester είναι  $2.200 \text{ kg/m}^3$  και το carbon fiber / epoxy είναι  $1.600 \text{ kg/m}^3$ . Όσον αφορά το πάχος της κάθε στρώσης είναι 15mm και για τα δύο υλικά. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι στρώσεις με μεγαλύτερο πάχος προσφέρουν αποτελεσματικότερη αντοχή στην κάμψη, την στρέψη και την αντοχή αυτού στην κόπωση εξαιτίας των φορτίσεων του ανέμου που επαναλαμβάνεται συνεχώς.

### 6.3 Μηχανική ανάλυση πτερύγιου

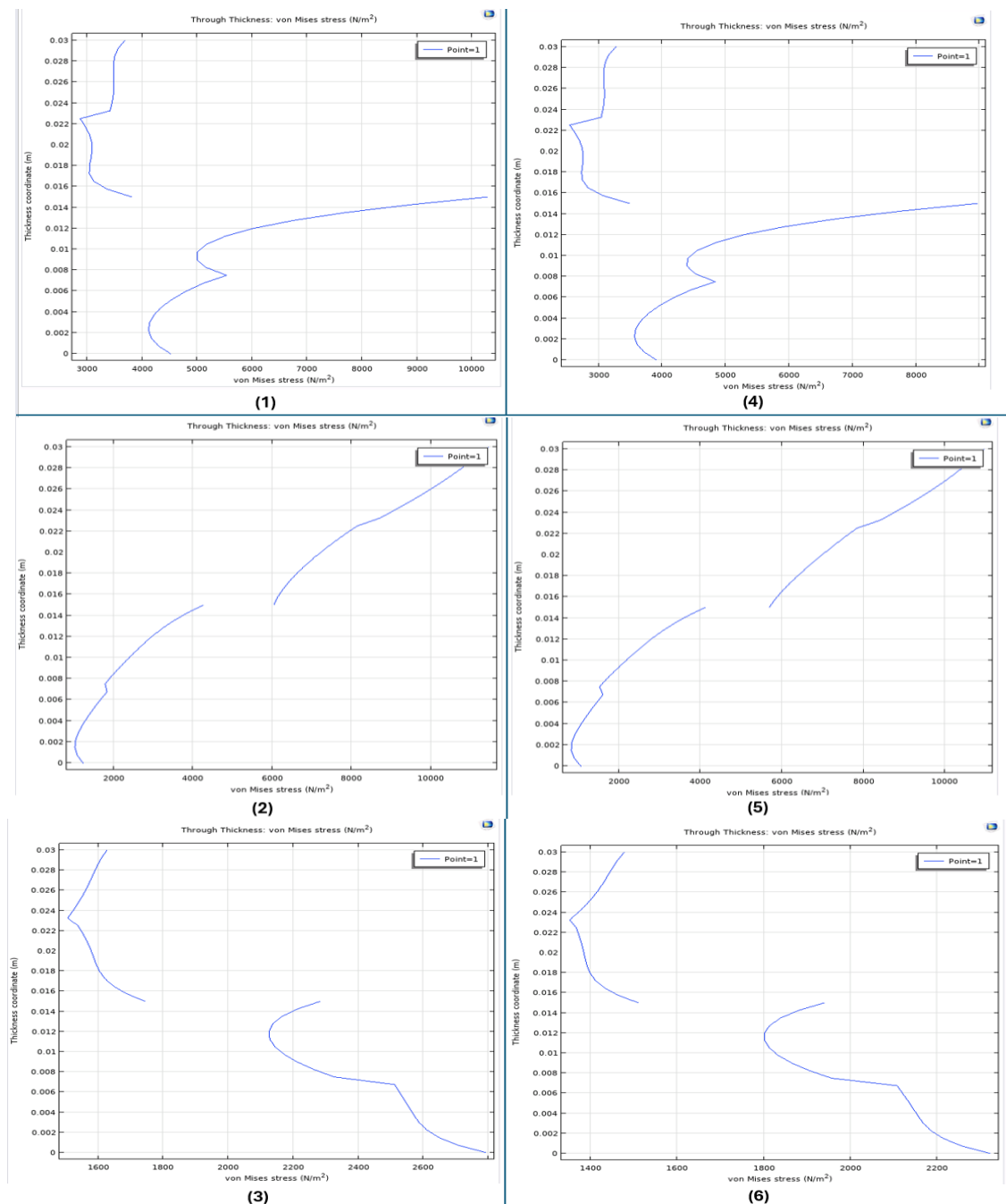
Η μηχανική ανάλυση του κελύφους του πτερυγίου θα διερευνηθεί με την χρήση του μοντέλου κελύφους εξωτερικού στρώματος καλουπιού (Outer Mold Line – OML) (Kim, Bang, Shin, & Jang, 2014). Στο πλαίσιο διεξαγωγής της μηχανικής ανάλυσης του κελύφους, θα πραγματοποιηθούν έξι δοκιμές, στις οποίες θα επιβληθούν στατικά φορτία στην επιφάνεια του πτερυγίου. Οι δοκιμές αυτές συνδέονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, προβλέποντας τις διαφορετικές περιοχές φόρτισης και τα διαφορετικά επίπεδα παραμόρφωσης. Συνεπώς, η μηχανική ανάλυση αποσκοπεί στην διερεύνηση της μηχανική απόκρισης τους κελύφους του πτερυγίου καθώς και των περιοχών καταπόνησης εφαρμόζοντας διαφορετικές συνθήκες φόρτισης ανά περίπτωση.

Η παρούσα ανάλυση επικεντρώνεται στην αποτίμηση της κατανομής των ισοδύναμων τάσεων Von Mises στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους του πτερυγίου. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης ανέδειξαν ζώνες αυξημένης συγκέντρωσης τάσης, με ιδιαίτερη έμφαση στην περιοχή της οπίσθιας ακμής. Όπως αποτυπώνεται στην εικόνα 14, κατά την εφαρμογή ομοιόμορφου στατικού φορτίου ύψους  $50 \text{ N/m}^3$  κατά μήκος του πτερυγίου, παρατηρείται σαφής εντοπισμός κρίσιμων περιοχών, οι οποίες ενδέχεται να αποτελέσουν πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας και απαιτούν περαιτέρω μελέτη κατά τη διαδικασία του δομικού σχεδιασμού.



Εικόνα 14: Αποτελέσματα δοκιμών μηχανικής ανάλυσης πτερυγίου

Ο παρακάτω πίνακας διαγραμμάτων απεικονίζει την κατανομή της τάσης Von Mises κατά μήκος του πάχους των δύο στρωμάτων των υλικών του περυγίου σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Ο κατακόρυφος άξονας (y) απεικονίζει το πάχος του υλικού, το οποίο σε όλες τις περιπτώσεις είναι από 0 έως 0.03m. Ο οριζόντιος άξονας (x) απεικονίζει την τάση Von Mises και οι τιμές του εξαρτώνται από τις συνθήκες φόρτισης της κάθε δοκιμής.



Πίνακας 3: Διαγράμματα κατανομής Von Mises

Τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιηθήκαν παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες ανά περίπτωση. Ειδικότερα, κατέδειξαν μία πανομοιότυπη μηχανική απόκριση ως προς τα επίπεδα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων ανά περίπτωση. Παρόλα αυτά, η κατανομή των τάσεων στην επιφάνεια του πτερυγίου παρουσίασε σημαντικές διαφορές. Οι διαφοροποιήσεις αποδίδονται κυρίως στον προσανατολισμό των ινών, αναδεικνύοντας την κύρια επίδραση της ανισορροπίας στη δομική μηχανική απόκριση της κατασκευής του πτερυγίου. Τέλος, είναι σημαντική η διαφορά στην εφελκυστική αντοχή των υλικών, με το carbon fiber/epoxy να φτάνει περίπου τα 1.450 MPa ενώ το glass fiber/polyester να φτάνει τα 207 MPa, επηρεάζοντας σημαντικά τη συνολική αντοχή της δομής του πτερυγίου.

Σημεία Σύγκρισης	1 <sup>η</sup> Δοκιμή	2 <sup>η</sup> Δοκιμή	3 <sup>η</sup> Δοκιμή
<b>Μέγιστη τάση</b> N/m <sup>2</sup>	~10.5000	~11.000	~2.700
<b>Κάτω στρώση</b>	Υψηλή τάση	Χαμηλή τάση	Υψηλή τάση
<b>Ανω στρώση</b>	Χαμηλή τάση	Υψηλή τάση	Χαμηλή τάση
<b>Διαφορές μεταξύ στρώσεων</b>	Απότομη πτώση τάσης στην ανώτερη στρώση	Απότομη αύξηση τάσης στην ανώτερη στρώση	Πτώση τάσης στη ανώτερη στρώση
<b>Γραμμικότητα</b>	Κυρτή κατατομή	Γραμμική κατατομή	Κυρτή κατατομή
<b>Ερμηνεία</b>	Ανώτερη στρώση φέρει μικρότερο φορτίο	Ανώτερη στρώση φέρει μεγαλύτερο φορτίο	Ανώτερη στρώση φέρει μικρότερο φορτίο

Πίνακας 4: Σημεία σύγκρισης δοκιμών 1 έως 3

Σημεία Σύγκρισης	4 <sup>η</sup> Δοκιμή	5 <sup>η</sup> Δοκιμή	6 <sup>η</sup> Δοκιμή
<b>Μέγιστη τάση</b> N/m <sup>2</sup>	~10.000	~11.000	~2.400
<b>Κάτω στρώση</b>	Υψηλή τάση	Χαμηλή τάση	Υψηλή τάση
<b>Ανω στρώση</b>	Χαμηλή τάση	Υψηλή τάση	Χαμηλή τάση
<b>Διαφορές μεταξύ στρώσεων</b>	Απότομη πτώση τάσης στην ανώτερη στρώση	Απότομη αύξηση τάσης στην ανώτερη στρώση	Πτώση τάσης στη ανώτερη στρώση
<b>Γραμμικότητα</b>	Κυρτή κατατομή	Γραμμική κατατομή	Κυρτή κατατομή
<b>Ερμηνεία</b>	Ανώτερη στρώση φέρει μικρότερο φορτίο	Ανώτερη στρώση φέρει μεγαλύτερο φορτίο	Ανώτερη στρώση φέρει μικρότερο φορτίο

Πίνακας 5: Σημεία σύγκρισης δοκιμών 4 έως 6

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν θεμελιώδες πεδίο της σύγχρονης επιστήμης των υλικών και ταυτόχρονα καθοριστικό παράγοντα της τεχνολογικής προόδου, καθώς συμβάλλουν στην ανάπτυξη προηγμένων κατασκευών με υψηλότερες αποδόσεις και βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Η αξιοποίησή τους είναι καθοριστικής σημασίας σε κατασκευές στις οποίες απαιτείται βέλτιστη μηχανική απόδοση. Στον τομέα της αεροναυτικής ενέργειας και συγκεκριμένα στην κατασκευή του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται σύνθετες δομές ως κύρια δομικά στοιχεία καθώς εξασφαλίζουν την καλύτερη δομική ακεραιότητα και υψηλότερη αντοχή υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένα μοντέλο κελύφους πτερυγίου στο οποίο ορίστηκαν ως δομικά υλικά οι ίνες άνθρακα/εποξειδικές και ίνες γυαλιού/πολυεστέρας, με ίδιο πάχος, διαφορετικές μοίρες και φόρτιση σε όλο το μήκος ή στην οπίσθια ακμή του πτερυγίου ανά περίπτωση. Η γεωμετρική απεικόνιση του κελύφους του πτερυγίου πραγματοποιήθηκε με την χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος Computer Aided Design (CAD) και η μηχανική ανάλυσή του με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αξιοποιώντας το COMSOL Multiphysics 6.0. Με την προσομοίωση και τη μηχανική ανάλυση του κελύφους επιτεύχθηκε η διερεύνηση της μηχανικής απόκρισής του, με την πραγματοποίηση έξι δοκιμών στις οποίες ορίστηκαν διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.

Συμπερασματικά, από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι η συνολική μηχανική απόκριση του πτερυγίου στις διάφορες δοκιμές παρουσίασε παρόμοια επίπεδα μέγιστων και ελάχιστων τάσεων Von Mises. Ωστόσο, η κατανομή των τάσεων στην επιφάνεια του κελύφους παρουσίασε σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των περιπτώσεων. Επιπλέον, βρέθηκε σημαντική διαφορά στην εφελκυστική αντοχή των χρησιμοποιούμενων υλικών, η οποία επηρεάζει καθοριστικά τη συνολική αντοχή της δομής. Οι διαφορές αυτές οφείλονται πρωτίστως στον προσανατολισμό των ινών των σύνθετων υλικών, γεγονός που τονίζει τον κρίσιμο ρόλο της ανισοτροπίας στη διαμόρφωση της δομικής συμπεριφοράς. Επομένως, η κατάλληλη επιλογή των σύνθετων υλικών και της διεύθυνσης των ινών, συνιστά καθοριστικό παράγοντα για τη βελτιστοποίηση της μηχανικής απόδοσης του πτερυγίου.

## ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα ανάλυση ανέδειξε τη συγκέντρωση τάσης σε ορισμένες περιοχές του κελύφους του πτερυγίου υπό την εφαρμογή στατικών φορτίων σε διαφορετικές περιοχές. Ειδικότερα, έγινε χρήση του λογισμικού COMSOL για να δειχθεί η καταπόνηση του πτερυγίου υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Για να διεξαχθεί η μηχανική ανάλυση, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο εξωτερικού κελύφους πτερυγίου OML. Ως πιθανή επέκταση του μοντέλου, θα μπορούσε να αποτελεί η εργασία των (Koutsianitis, Paterakis, & Stavroulakis, 2024) , η οποία αφορά την επίδραση βλαβών στη συνολική συμπεριφορά του πτερυγίου και την πιθανή χρήση μετρήσεων για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας.

Επιπλέον, το μοντέλο εξωτερικού κελύφους παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς καθώς δεν λαμβάνονται υπόψη κρίσιμοι παράγοντες της εσωτερικής δομής του. Ως εκ τούτου, κρίνεται απαραίτητη η διενέργεια περαιτέρω έρευνας με την χρήση διαφορετικών υπολογιστικών μοντέλων, τα οποία θα περιλαμβάνουν στοιχεία της εσωτερικής δομής του πτερυγίου. Αυτή η προσέγγιση θα συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της σχεδιάσής του.

Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να διεξαχθεί σχετικά με τη μηχανική ανάλυση του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας, της οποίας η κατασκευή θα αποτελείται από καινοτόμα σύνθετα υλικά με προηγμένες μηχανικές ιδιότητες. Ειδικότερα, προτείνεται η μελλοντική διερεύνηση των σύνθετων υλικών τα οποία, υπό την επίδραση της ροής του ανέμου, θα παραμορφώνονται ελεγχόμενα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση ή το φρενάρισμα της περιστροφής των πτερυγίων, χωρίς την ανάγκη χρήσης εξωτερικού συστήματος παρέμβασης.

Επιπλέον, προτείνεται η διερεύνηση της χρήσης των πιεζοηλεκτρικών υλικών στις περιπτώσεις όπου όταν υποβάλλονται σε συνθήκες θλίψης ή εφελκυσμού, θα είναι εφικτή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της μηχανικής καταπόνησής τους. Η αξιοποίηση αυτών υλικών στη δομή του πτερυγίου θα αποτελέσει καινοτόμα εφαρμογή στη βελτίωση των ενεργειακά αυτόνομων συστημάτων, συμβάλλοντας στην ενίσχυση της λειτουργικής βιωσιμότητας και ενεργειακής αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών της νέας γενιάς



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alom, N., & Saha, U. (2019). Evolution and progress in the development of savonius wind turbine rotor blade profiles and shapes. *J. Sol. Energy Eng.* , 3 (141).
- Ashby, M. (2009). *Material Process and Selection Charts, 2nd ed.* Reed Educational and Professional Publishing Ltd.: London, UK,.
- Attaf, B. (2013). Designing Composite Wind Turbine Blades from Cradle to Cradle. *World Academic Publishing* , σσ. 1-14.
- Bakri, B., Chandrabakty, S., Alfriansyah, R., & Dahy, A. (2016). Potential coir fiber composite for small wind turbine blade application. *Int. J. Smart Mater. Mechatronics.* (2), σσ. 42–44.
- Balat, M., & Ayar, G. (2005). Biomass energy in the world, use of biomass and potential trends. *Energy Sources* , 27 (10), σσ. σελ. 931–940.
- Bénard, Q., Fois, M., & Grisel, M. (2007). Roughness and fibre reinforcement effect onto wettability of composite surfaces . *Applied Surface Science* , 253 (10), σσ. 4753–4758.
- Bhutta, M., Hayat, N., Farooq, A., Ali, Z., Jamil, S., & Hussain, Z. (2012). Vertical Axis Wind Turbine—A Review of Various Configurations and Design Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* .
- Bulent Eke, A., & Akdogan, A. (2006). Using of Composite Materials in Wind Turbine Blades. *Journal of Applied Sciences* , 6 (14), σσ. 2917-2921.
- de Falani, S., González, M., Barreto, F., de Toledo, J., & Torkomian, A. (2020). Trends in the technological development of wind energy generation. *International Journal of Technology Management and Sustainable Development* , 1 (19), σσ. 43–68.
- Debnath, K., Singh, I., & Dvived, A. (2013). Natural fiber reinforced polymer composite for wind turbine blades: Challenges and Opportunities. *Recent Advances In Composite Materials For Wind Turbine Blade* , σσ. 25-39.
- Firoozi, A., Firoozi, A., & Hejazi, F. (2024). Advancing Wind Energy Efficiency: A Systematic Review of Aerodynamic Optimization in Wind Turbine Blade Design. *Energies* , 17 (12).
- Firoozi, A., Firoozi, A., & Hejazi, F. (2024). Innovations in Wind Turbine Blade Engineering: Exploring Materials, Sustainability, and Market Dynamics. *Sustainability* , 16 (9), σσ. 1-35.
- Giddings, B., Hopwood, B., & O'Brien, G. (2002). Environment, economy and society: fitting them together into sustainable development. *Sustainable Development* , 10 (4), σσ. 187–196.
- Gorelov, D., & Krivospitsky, V. (2008). Prospects for development of wind turbines with orthogonal rotor. *Thermophys Aeromechanics* , 1 (15), σσ. 153-157.
- Hasan, M. (2017). Design and Performance Analysis of Small Scale Horizontal Axis Wind Turbine for Nano Grid Application. *Engineering, Environmental Science* .

- Hewitt, S., Margetts, L., & Revell, A. (2017). Building a digital wind farm. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 25 (4), σσ. 879–899.
- Holmes, J., Brøndsted, P., Jiang, Z., Sun, Z., & Chen, X. (2009). Development of a bamboo-based composite as a sustainable green material for wind turbine blades. *Wind Engineering* (33), σσ. 197-210.
- Holmes, J., Sørensen, B., & Brøndsted, P. (2007). Reliability of wind turbine blades: An overview of materials testing. *Wind Power Shangha*, σσ. 310–315.
- Hosseini, A., Cannon, D., & Vassel-Be-Hagh, A. (2022). Tip Speed Ratio Optimization: More Energy Production with Reduced Rotor Speed. *Wind*, 2 (4), σσ. 691-710.
- Ivanyna, V., Matviikiv, O., Klymkovych, D., Farmaha, I., Zabierowski, W., & Panchak, R. (2024). Analyzing Stress and Frequency Parameters of the Wind Turbine Composite Blade. *2024 IEEE 19th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, σσ. 20-23.
- Jung, C., Sander, L., & Schindler, D. (2024). Future global offshore wind energy under climate change and advanced wind turbine technology. *Energy Conversion and Management*, 321.
- Kalagi, G., Patil, R., & Nayak, N. (2018). Experimental Study on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composite Materials for Wind Turbine Blades. *Materials Today: Proceedings*, 5 (1), σσ. 2588–2596.
- Karthikeyan, N., Anand, R., Suthakar, T., & Barhate, S. (2018). Materials, innovations and future research opportunities on wind turbine blades—Insight review. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38 (3).
- Kim, S.-H., Bang, H.-J., Shin, H.-K., & Jang, M.-S. (2014). Composite Structural Analysis of Flat-Back Shaped Blade for Multi-MW Class Wind Turbine. *Appl. Compos. Mater.* (21), σσ. 525–539.
- Koutsianitis, P., Paterakis, M., & Stavroulakis, G. (2024). Identification of Damage in a Wind Turbine Blade Using Mechanical Measurements and Artificial Neural Networks. *Journal of Data Science and Intelligent Systems*, 2 (4), σσ. 221–232.
- Krishnan, A., Al-Obaidi, A., & Hao, L. (2023). A comprehensive review of innovative wind turbine airfoil and blade designs: Toward enhanced efficiency and sustainability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60.
- Kulatunga, S., Jayamani, E., Soon, K., Prashanth, H., Jeyanthi, S., & Sankar, R. (2022). Comparative study of static and fatigue performances of wind turbine blade materials. *Materials Today: Proceedings*, 62 (12).
- Kumar, V., Rao, B., & Farooq, S. (2016). Modeling and analysis of wind turbine blade with advanced materials by simulation. *International Journal of Applied Engineering*, 11 (6), σσ. 4491-4499.

- Kumar, Y., Ringenberg, J., Depuru, S., Devabhaktuni, V., Lee, J., & Nikolaidis, E. (2016). Wind energy: Trends and enabling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 53, σσ. 209–224.
- Lee, S., & Shin, S. (2022). Structural design optimization of a wind turbine blade using the genetic algorithm. *Engineering Optimization* , 54 (12), σσ. 2053–2070.
- Maalawi, K., & Badr, M. (2003). A practical approach for selecting optimum wind rotors. *Renewable Energy* , 28, σσ. 803–822.
- Mendoza, V., Katsidoniotaki, E., & Bernhoff, H. (2020). Numerical study of a novel concept for manufacturing Savonius turbines with twisted blades, *Energies*. (Basel) 13 (2020) 1–16., *Energies* (13), σσ. 1–13.
- Mishnaevsky, L. (2017). *Composite materials in wind energy technology*. ©Encyclopedia of Life Support Systems.
- Mohamed, M., & Wetzel, K. (2006). 3D woven carbon/glass hybrid spar cap for wind turbine rotor blade. *J. Sol. Energy Eng.* , σσ. 562–573.
- Mohammed, A., Sahin, A., & Quakad, H. (2020). Numerical investigation of a vertical axis wind turbine performance characterization using new variable pitch control scheme. *Energy Resour. Technol.* , 3 (142).
- Nugraha, A., Garingging, R., Wiranata, A., Sitanggang, A., Supriyant, E., Tanbar, F., και συν. (2025). Comparison of “Rose, Aeroleaf, and Tulip” vertical axis wind turbines(VAWTs) and their characteristics for alternative electricity generation inurban and rural areas. *Results in Engineering* (25).
- Olabi, A., Wilberforce, T., Elsaid, K., Sayed, E., Salameh, T., Abdelkareem, M., και συν. (2021). A Review on Failure Modes of Wind Turbine Components. *Energies* , 14 (17).
- Ostachowicz, W., McGugan, M., Schröder-Hinrichs, J., & Luczak, M. (2016). MARE-MINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology. *Springer Nature: Berlin/Heidelberg* .
- Ozdamar, G., Mertcan, M., & Ozdamar, A. (2018). Numerical Comparison of the Effect of Blade Material on Wind Turbine Efficiency. *Acta Physica Polonica A* , 134, σσ. 156–158.
- Peng, H., Liu, H., & Yang, J. (2021). A review on the wake aerodynamics of H-rotor vertical axis wind. *Energy* (232).
- Rehman, S., Alam, M., Alhems, L., & Rafique, M. (2015). Horizontal axis wind turbine blade design methodologies for efficiency enhancement—A review. *Enrgies* , 11 (3).
- Rentoumis, M., Koutsianitis, P., Athanailidis, I., Taridis, G., Tselikos, G., Bilalis, N., et al. (2018). DESIGN AND STRUCTURAL ANALYSIS OF WIND TURBINE BLADES FOR. *GRACM* , pp. 153–162.
- Robinson, M., Kelley, N., Moriarty, P., Schreck, S., Simms, D., & Wright, A. (2011). Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability. *Materials Research Society* , σσ. 396–423.

Roy, S., & Saha, U. K. (2013). Review on the numerical investigations into the design and development of Savonius wind rotors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (24), σσ. 73-83.

S1, P., Subbaya, K., Nithin, K., & Sachhidananda, S. (2017). Fiber Reinforced Composites - A Review. *Journal of Material Sciences & Engineering Journal of Material Sciences & Engineering* , 6 (3).

Schubel, P., & Crossley, R. (2012). Wind Turbine Blade Design. *Energies* , 5 (9), pp. 3425-3449.

Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, ., A., Rimašauskiene, R., & Pinca-Bretotean, C. (2020). A study of advancement in application opportunities of aluminum metal matrix composites,. *Materials Today: Proceedings* , 26 (2), σσ. 2419-2424.

Stavrakakis, G. (2012). Electrical Parts of Wind Turbines. *Comprehensive Renewable Energy* (2), σσ. 269–328.

Tenguria, N., Mittal, N., & Ahmed, S. (2011). Modal Analysis for Blade of Horizontal Axis Wind Turbine. *Asian Journal of Scientific Research* , 4 (4), σσ. 326-334.

Wang, H., Liu, J., Wen, G., & Xie, Y. M. (2020). The robust fail-safe topological designs based on the von Mises stress. *Finite Elements in Analysis and Design* , 17 (103376).

Xue, P., Wan, Y., Takahashi, J., & Akimoto, H. (2024). Structural optimization using a genetic algorithm aiming for the minimum mass of vertical axis wind turbines using composite materials. *Heliyon* , 10 (12).

Yang, Y., Guo, Z., Song, Q., Zhang, Y., & Li, Q. (2018). Effect of Blade Pitch Angle on the Aerodynamic Characteristics of a Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine Based on Experiments and Simulations. *Energies* , 11 (6).

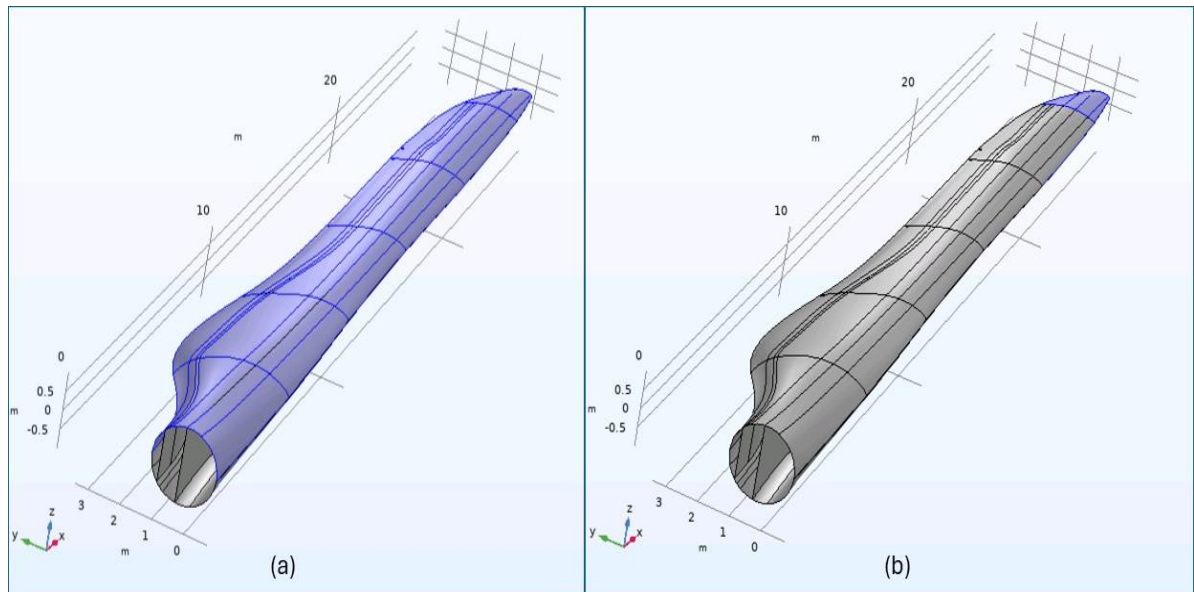
Μπέλτσιος, Κ. (2018). *Επιστήμη και Τεχνολογία των Σύνθετων Υλικών*. Τζιολά.

Ο.ΦΥ.ΠΕ.ΚΑ. (n.d.). Ανάκτηση από <https://necca.gov.gr/aksones-drasis/aeioforos-anaptyxi-kai-klimatiki-allagi/>

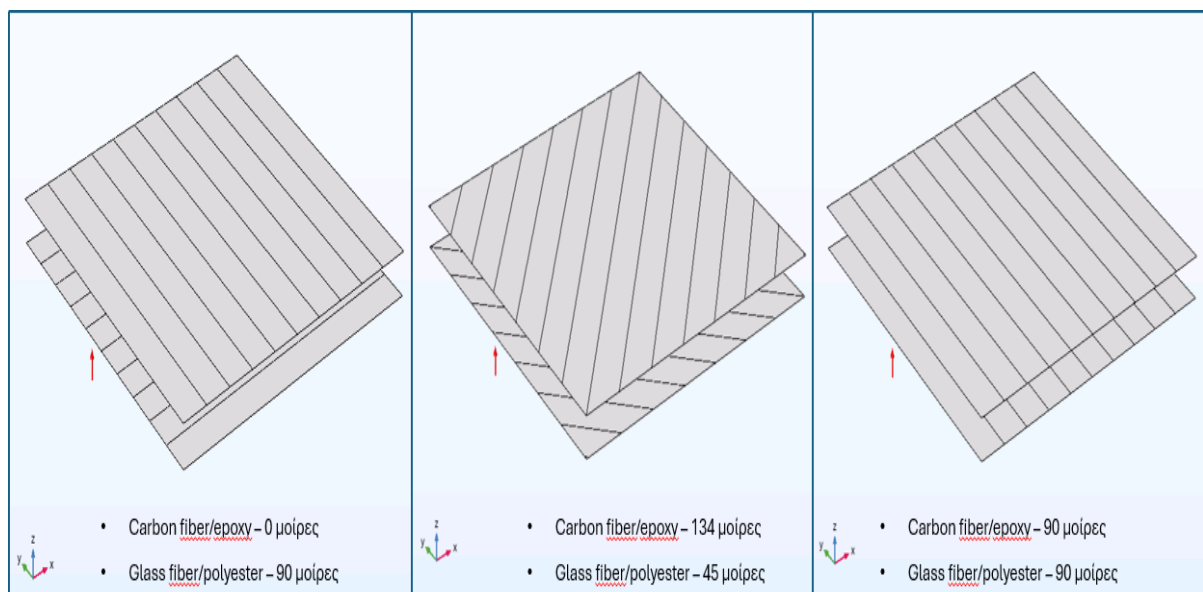
Παπανικολάου, Ν., & Μουζάκης, Δ. (2007). *Σύνθετα Υλικά*. Κλειδάριθμος.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας. (n.d.). Ανάκτηση από <https://ypen.gov.gr/energeia/ape/technologies/aioliki/>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Εικόνα 15: Περιοχές φόρτισης κελύφους πτερυγίου



Εικόνα 16: Κατεύθυνση στρωμάτων ινών βάσει δοκιμής και μοιρών