

**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ)**



ΑΝΑΠΤΥΞΗ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ

ΧΡΗΣΤΟΣ ΣΗΦΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΟΝΤΑΞΑΚΗΣ

**ΗΡΑΚΛΕΙΟ
ΜΑΙΟΣ 2026**

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στον σχεδιασμό, κατασκευή και αξιολόγηση εύκαμπτου καμπύλου πτερυγίου για μικρή ανεμογεννήτρια υπό κλίμακα, με στόχο την επίτευξη παθητικού ελέγχου της πτερύγωσης μέσω αεροελαστικής παραμόρφωσης. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των ανεμογεννητριών, μια συνοπτική ιστορική αναδρομή και οι κυριότεροι μηχανισμοί ενεργού και παθητικού ελέγχου της γωνίας προσβολής, με έμφαση στη διεθνή ερευνητική πρόοδο σχετικά με τα καμπύλα και εύκαμπτα πτερύγια (swept blades).

Στο πειραματικό μέρος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αεροδυναμικής απόδοσης σε άκαμπτο ευθύγραμμο πτερύγιο στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου αιολικής ενέργειας, με σκοπό τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα θεωρητικά υπολογιστικά μοντέλα DEOL και DINILIDA. Ακολούθησε εργαστηριακή πιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στις προσομοιώσεις, ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε, μέσω SolidWorks, μια παραμετρική διαδικασία σχεδιασμού καμπύλων πτερυγίων με διαφορετικά επίπεδα καμπυλότητας (sweep), τα οποία αξιολογήθηκαν με στατικές προσομοιώσεις (FEA) για τη μέτρηση της μετατόπισης, της στρέψης και των αναπτυσσόμενων τάσεων υπό φορτίσεις που προσομοιώνουν ρεαλιστική αεροδυναμική πίεση. Με μεθοδολογία δοκιμής και σφάλματος, προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά τόσο για το καταλληλότερο υλικό όσο και για της βέλτιστη γεωμετρία σάρωσης.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα εύκαμπτα καμπύλα πτερύγια μπορούν να παρουσιάσουν ελεγχόμενη παραμόρφωση και στρέψη, η οποία οδηγεί σε παθητική μείωση της γωνίας τοποθέτησης σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, συμβάλλοντας στη μείωση των φορτίων. Με τον τρόπο αυτό, επιβεβαιώνεται η δυνατότητα αξιοποίησής τους ως μηχανισμού παθητικού ελέγχου, χωρίς την ανάγκη πρόσθετων κινούμενων μερών.

Η εργασία καταλήγει σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις σχεδιασμού σχετικά με την επιλογή υλικών, τα όρια καμπυλότητας και τις γεωμετρικές παραμέτρους που βελτιστοποιούν την αεροελαστική συμπεριφορά των πτερυγίων.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Περιεχόμενα.....	ii
Κατάλογος Εικόνων και Διαγραμμάτων.....	iv
Κατάλογος πινάκων	xi
Καλησπέρα σας, Σας ζητώ συγγνώμη για την καθυστέρηση . Θα σας παρακαλούσα να υπογράψετε και εσείς την αίτηση κατάθεσης της διπλωματικής μου εργασίας, προκειμένου να την καταθέσω αύριο.	

Σας ευχαριστώ πολύ

1. Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Ιστορική Αναδρομή	2
1.3 Βασικές Αρχές Αεροδυναμικής Πτερυγίων.....	6
Αντωση (Lift).....	7
Οπισθέλκουσα (Drag)	7
Αξονική και Εφαπτομενική Δύναμη (Axial and Tangential Force)	8
Ροπές Στρέψης και Κάμψης (Twisting and Bending Moments)	8
Βαρυτικές και Φυγόκεντρες Δυνάμεις (Gravitational and Centrifugal Forces)	9
Η Σημασία της Γωνίας Προσβολής και του Setting Angle	9
1.4 Μέθοδοι Ελέγχου Γωνίας Προσβολής.....	10
Ενεργές Μέθοδοι Ελέγχου	11
Παθητικές Μέθοδοι Ελέγχου	13
Συγκριτικά.....	14
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	15
2.1 Εισαγωγή	15
2.2 Παθητική Στρεπτική Παραμόρφωση.....	15
2.3 Καμπύλα Πτερύγια	22
2.4 Ερευνητικά Κενά	42
Έλλειψη συστηματικών πειραμάτων μεγάλης κλίμακας.....	42
Περιορισμένη ενσωμάτωση νέων υλικών σε πειραματικό επίπεδο.....	43

Έλλειψη μικρής κλίμακας παραμετρικών πειραμάτων	43
Περιορισμένη έρευνα για πτερύγια forward-sweep.....	43
2.5 Συμπεράσματα	43
3. Μεθοδολογία Ανάλυσης και Πειραματική Διάταξη.....	45
3.1 Μεθοδολογία.....	45
3.2 Γεωμετρία και Υλικά	46
Γεωμετρία	46
Υλικό.....	47
3.3 Μέτρηση απόδοσης σε ευθύ πτερύγιο	49
Αεροσήραγγα και εξοπλισμός	49
Διαδικασία μετρήσεων.....	52
3.4 Σχεδίαση Καμπύλων Πτερυγίων	55
Δημιουργία Μοντέλου Πτερυγίου	55
Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου	64
Δημιουργία Μοντέλου Βάσης Πτερυγίου.....	74
3.5 Πιστοποίηση Υλικού	75
Εργαστηριακή μέτρηση παραμόρφωσης	75
Προσομοίωση Πεπερασμένων Στοιχείων	76
Συμπεράσματα	83
3.6 Μετρήσεις Παραμόρφωσης και Στρέψης Καμπύλων Πτερυγίων	85
Διαδικασία Προσομοίωσης.....	85
Μέτρηση αποτελεσμάτων	88
3.7 Υπολογισμός βέλτιστης γωνία τοποθέτησης.....	94
4. Αποτελέσματα και Ανάλυση	96
4.1 Αποτελέσματα Μετρήσεων Αεροσήραγγας	96
4.2 Αποτελέσματα Σχεδιασμού Καμπύλων Πτερυγίων	102
Σύγκριση Αποτελεσμάτων Διαφορετικών Υλικών.....	102
Σύγκριση Αποτελεσμάτων Διαφορετικών Καμπυλοτήτων	104
5. Συμπεράσματα Και Μελλοντική Εργασία.....	112
5.1 Συμπεράσματα	112
5.2 Μελλοντική Εργασία	113

Βιβλιογραφία	115
--------------------	-----

Κατάλογος Εικόνων και Διαγραμμάτων

Εικόνα 1. Ανάλυση βασικού εξοπλισμού τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.	1
Εικόνα 2. Φωτογραφία από την ανεμογεννήτρια του Poul la Cour (1891-1908).	3
Εικόνα 3. Η ανεμογεννήτρια Smith-Putnam (ΗΠΑ, 1941), η πρώτη μεγάλης ισχύος που συνδέθηκε στο ηλεκτρικό δίκτυο.	4
Εικόνα 4. NASA Mod-0, ΗΠΑ, 1975 (αριστερά) και Growian, Γερμανία, 1983 (δεξιά).	5
Εικόνα 5. Εξέλιξη του μεγέθους των ανεμογεννητριών από τον 19ο αιώνα έως σήμερα.	5
Εικόνα 6. Απεικόνιση της κατανομής πίεσης και του φαινομένου Coanda γύρω από αεροτομή. .	6
Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση των αεροδυναμικών δυνάμεων και ταχυτήτων που δρουν σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας.	8
Εικόνα 8. Απεικόνιση της μεταβολής του πεδίου ροής γύρω από την αεροτομή κατά την αύξηση της γωνίας προσβολής.	10
Εικόνα 9. Διάγραμμα λειτουργίας και ενεργού ελέγχου ανεμογεννήτριας [11].	11
Εικόνα 10. Σύστημα ελέγχου βήματος (pitch mechanism) ανεμογεννήτριας.	12
Εικόνα 11. Σύγκριση προσκολλημένης ροής και αποκολλημένης ροής (stall) γύρω από αεροτομή.	13
Εικόνα 12. Σύγκριση συμβατικού πτερυγίου (αριστερά) και πτερυγίου σχεδιασμένου με σύζευξη κάμψης–στρέψης (δεξιά).	14
Εικόνα 13. Σύγκριση της αεροδυναμικής απόδοσης άκαμπτων και εύκαμπτων (morphing) πτερυγίων για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου και γωνίες βήματος.	17
Εικόνα 14. Σύγκριση αεροδυναμικής απόδοσης της ανεμογεννήτριας NREL 5 MW με άκαμπτα και εύκαμπτα πτερύγια.	18
Εικόνα 15. Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου παθητικής στρέψης εύκαμπτου πτερυγίου.	19
Εικόνα 16. Σχηματική απεικόνιση της εσωτερικής δομής και των στρώσεων υλικών (layup) πτερυγίου ανεμογεννήτριας.	20
Εικόνα 17. Γωνία τοποθέτησης των ινών και θέση τους σε πτερύγιο με σύζευξη κάμψης–στρέψης.	20

Εικόνα 18. Πειραματική δοκιμή πτερυγίου ανεμογεννήτριας σε αεροσήραγγα με ορατοποίηση ιχνών δίνης.	21
Εικόνα 19. Ενδεικτικά γεωμετρικά προφίλ πτερυγίων με οπισθοκλινή (backward) και προσθιοκλινή (forward) καμπυλότητα.....	22
Εικόνα 20. Σύγκριση επαγόμενης στρέψης (tip twist και weighted twist) για πτερύγια με διαφορετική αναλογία ανθρακονημάτων στα spar caps.	24
Εικόνα 21. Διάγραμμα ροής του μοντέλου αεροελαστικής ανάλυσης Larwood & Zuteck (2006).	25
Εικόνα 22. Ανεμογεννήτρια του STAR Project.	26
Εικόνα 23. Γεωμετρικές παράμετροι καμπύλου (swept) πτερυγίου, βάσει του σχεδιασμού STAR.	27
Εικόνα 24. Μεταβολή του προσανατολισμού των ινών κατά μήκος της ακτινικής διεύθυνσης του πτερυγίου με γεωμετρία sweep.	28
Εικόνα 25. Εκτός επιπέδου μετατόπιση κατά μήκος της ακτίνας του πτερυγίου για γραμμικό και μη γραμμικό μοντέλο FE (επάνω) και κατανομή εντός επιπέδου διατμητικής παραμόρφωσης υπό ακραίο flapwise φορτίο (κάτω).....	29
Εικόνα 26. Σχηματική απεικόνιση καμπύλου πτερυγίου με sweep.....	30
Εικόνα 27. Τύποι καμπυλότητας πτερυγίων που μελετήθηκαν.....	31
Εικόνα 28. Κατανομή αδιάστατων δυνάμεων κατά μήκος του πτερυγίου για διαφορετικές διαμορφώσεις sweep για λόγους $TSR = 3$ και 9	32
Εικόνα 29. Βελτιστοποιημένες γεωμετρίες ακροπτερυγίων με καμπυλότητα.	33
Εικόνα 30. Πειραματική διάταξη για δοκιμή ακροπτερυγίου σε αεροσήραγγα (αριστερά) και υπαίθρια δοκιμή του καμπύλου ακροπτερυγίου στο rotating rig του DTU (δεξιά).....	34
Εικόνα 31. Μεταβολή των συντελεστών ισχύος και ώσης (C_p και C_t) για πτερύγια με forward και backward sweep.	35
Εικόνα 32. Ανεμογεννήτρια Viryd CS8 με backward-sweep πτερύγια.	36
Εικόνα 33. Γεωμετρικές παραλλαγές πτερυγίων.	37
Εικόνα 34. Εξέλιξη της στρεπτικής ροπής στη ρίζα (αριστερά) και μεταβολή του συντελεστή ισχύος με την ταχύτητα ανέμου (δεξιά) για διαφορετικές γεωμετρίες πτερυγίων.....	38
Εικόνα 35. Κανονικοποιημένα φορτία κάμψης, διάτμησης και στρέψης στη ρίζα και στην άκρη του πτερυγίου για ευθύγραμμο και καμπύλο πτερύγιο.....	39

Εικόνα 36. Ευθύγραμμο και καμπύλο μοντέλο πτερυγίων (αριστερά) και πειραματική διάταξη με το σύστημα μέτρησης PIV (δεξιά).....	39
Εικόνα 37. Σχηματική απεικόνιση των αεροδυναμικών μεταβολών που προκαλεί το sweep στα πτερύγια.	40
Εικόνα 38. Μέση τιμή και πλάτος ταλάντωσης ισχύος, ώσης και ροπών για διαφορετικές μετατοπίσεις sweep στην IEA-15 MW ανεμογεννήτρια.	41
Εικόνα 39. Σύγκριση παραδοσιακού και aeroelastically-tailored πτερυγίου με ενσωματωμένο bend-twist coupling (Siemens Gamesa).....	42
Εικόνα 40. Αεροσήραγγα εργαστηρίου αιολικών για πειραματικές δοκιμές πτερυγίων μικρής κλίμακας.....	49
Εικόνα 41. Πειραματική διάταξη μέτρησης για δοκιμές αεροδυναμικής συμπεριφοράς πτερυγίων.	51
Εικόνα 42. Πρόγραμμα «Blade Measure NPU v1.1.0» για συλλογή δεδομένων πειραματικής διάταξης.	52
Εικόνα 43. Ευθύ πτερύγιο από HDPE (αριστερά) και ευθύ πτερύγιο από Tough 2000 (δεξιά)..	53
Εικόνα 44. Απεικόνιση των μετρικών ροπής και οπισθέλκουσας δύναμης σε πραγματικό χρόνο στην οθόνη ελέγχου.	54
Εικόνα 45. Διαδικασία ευθυγράμμισης του αισθητήρα μέτρησης ταχύτητας ανέμου στην πειραματική διάταξη.	54
Εικόνα 46. Θέση της εντολής δημιουργίας νέου επιπέδου αναφοράς (Plane).	57
Εικόνα 47. Επίπεδα σχεδίασης των αεροτομών κατά μήκος του πτερυγίου.	58
Εικόνα 48. Θέση της εντολής «Curve Through XYZ Points».	58
Εικόνα 49. Εισαγωγή σχεδίου αεροτομής του πτερυγίου με συντεταγμένες.	59
Εικόνα 50. Θέση της εντολής «Convert Entities» στο περιβάλλον σχεδίασης.	59
Εικόνα 51. Προβολή του αρχικού σχεδίου της αεροτομής στο επίπεδο της πρώτης αεροτομής.	59
Εικόνα 52. Επίπεδα σχεδίασης με τις αντίστοιχες αεροτομές του πτερυγίου τοποθετημένες κατά μήκος του.	60
Εικόνα 53. Δημιουργία ομόκεντρων κύκλων και ακτινικών γραμμών για τον καθορισμό της θέσης των αεροτομών κατά μήκος του άξονα περιστροφής.	61
Εικόνα 54. Δημιουργία επιπέδων σχεδίασης για την κατασκευή καμπύλου πτερυγίου.....	61
Εικόνα 55. Αεροτομές καμπύλου πτερυγίου.	62

Εικόνα 56. Εφαρμογή στρέψης στις αεροτομές για τον καθορισμό της γωνίας τοποθέτησης πτερυγίου.	62
Εικόνα 57 Θέση της εντολής «Spline» στο περιβάλλον σχεδίασης.	63
Εικόνα 58. Δημιουργία καμπύλης οδηγού για τη σύνδεση των αεροτομών κατά μήκος του πτερυγίου.	63
Εικόνα 59. Δημιουργία καμπύλης οδηγού για τον σχηματισμό του ακροπτερυγίου.	64
Εικόνα 60. Θέση της εντολής «Lofted Boss/Base» στο περιβάλλον σχεδίασης.	64
Εικόνα 61. Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου του ακροπτερυγίου.	65
Εικόνα 62. Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου του πτερυγίου μέσω σύνδεσης των αεροτομών με την καμπύλη οδηγό.	65
Εικόνα 63. Δημιουργία σχεδίου για τη γεωμετρία σύνδεσης του πτερυγίου με τη βάση του πτερυγίου.	66
Εικόνα 64. Δημιουργία της γεωμετρίας σύνδεσης του πτερυγίου με τη βάση του πτερυγίου. ...	67
Εικόνα 65. Θέση της εντολής «Extruded Boss/Base» στο περιβάλλον σχεδίασης.	67
Εικόνα 66. Δημιουργία της γεωμετρίας της βάσης του πτερυγίου.	67
Εικόνα 67. Θέση της εντολής «Extruded Cut» στο περιβάλλον σχεδίασης.	68
Εικόνα 68. Αφαίρεση της περιττής γεωμετρίας.	68
Εικόνα 69. Δημιουργία οπής στη βάση του πτερυγίου για τη μηχανική σύνδεση με την πλήμνη.	69
Εικόνα 70. Δημιουργία εσοχής στη βάση του πτερυγίου.	69
Εικόνα 71. Θέση της εντολής «Sketch Fillet» στο περιβάλλον σχεδίασης.	70
Εικόνα 72. Δημιουργία γεωμετρίας σύνδεσης στη βάση του πτερυγίου.	70
Εικόνα 73. Αφαίρεση γεωμετρίας από τη βάση του πτερυγίου.	71
Εικόνα 74. Αφαίρεση τμήματος για δημιουργία ανοχής στη σύνδεση πτερυγίου-βάσης.	72
Εικόνα 75. Αφαίρεση γεωμετρίας για τη δημιουργία εσοχών για την εξόλκευση του πτερυγίου.	72
Εικόνα 76. Θέση της εντολής «Fillet» στο περιβάλλον σχεδίασης.	73
Εικόνα 77. Δημιουργία καμπυλότητας στις ακμές.	73
Εικόνα 78. Τελική γεωμετρία του καμπύλου πτερυγίου.	74
Εικόνα 79. Αφαίρεση γεωμετρίας για τη διαμόρφωση της βάσης (hub) σύνδεσης του πτερυγίου.	74

Εικόνα 80. Τελική γεωμετρία της βάσης για την τοποθέτηση τριών πτερυγίων.....	75
Εικόνα 81. Πειραματική διάταξη και διαδικασία μέτρησης της παραμόρφωσης του πτερυγίου. 76	
Εικόνα 82. Θέση της επιλογής «Study» για την δημιουργία νέας μελέτης.	77
Εικόνα 83. Τρισδιάστατο μοντέλο του ευθύγραμμου πτερυγίου.	77
Εικόνα 84. Θέση της εντολής «Apply/Edit Material» για τον ορισμό του υλικού.....	78
Εικόνα 85. Παράθυρο παραμετροποίησης και επιλογής υλικών στο SolidWorks.....	78
Εικόνα 86. Θέση της εντολής «Fixed Geometry» για τον ορισμό πάκτωσης της γεωμετρίας.....	79
Εικόνα 87. Ορισμός στήριξης στο περιβάλλον προσομοίωσης του SolidWorks.	79
Εικόνα 88. Θέση της εντολής «Force» για τον ορισμό σημειακού φορτίου	80
Εικόνα 89. Εφαρμογή φορτίων στο πτερύγιο μέσα στο περιβάλλον προσομοίωσης του SolidWorks.	80
Εικόνα 90. Θέση της εντολής «Mesh and Run» για την εκκίνηση της προσομοίωσης.	81
Εικόνα 91. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων παραμόρφωσης του πτερυγίου μετά την προσομοίωση.	81
Εικόνα 92. Παραμετροποίησης ένδειξης αποτελεσμάτων παραμόρφωσης.	82
Εικόνα 93. Θέση εργαλείου αξιολόγησης αποτελεσμάτων «Probe».....	82
Εικόνα 94. Μέτρηση της παραμόρφωσης του πτερυγίου μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.....	83
Εικόνα 95. Ορισμός στήριξεων στο καμπύλο πτερύγιο στο περιβάλλον προσομοίωσης του SolidWorks.	86
Εικόνα 96. Παράθυρο παραμετροποίησης και επιλογής υλικών στο SolidWorks.....	86
Εικόνα 97. Θέση της εντολής «Pressure» για τον ορισμό κατανεμημένης πίεσης	87
Εικόνα 98. Εφαρμογή φορτίων πίεσης στις επιφάνειες του πτερυγίου για τη στατική προσομοίωση.	88
Εικόνα 99. Εκτέλεση στατικής προσομοίωσης στο SolidWorks για το καμπύλο πτερύγιο.....	88
Εικόνα 100. Παραμορφωμένο πτερύγιο μετά την ολοκλήρωση της στατικής προσομοίωσης.	89
Εικόνα 101. Θέση της εντολής «Create Body From Deformed Shape».	89
Εικόνα 102. Διαδικασία δημιουργίας νέου μοντέλου βασισμένου στο παραμορφωμένο πτερύγιο μετά την προσομοίωση.	90
Εικόνα 103. Αποθήκευση του παραμορφωμένου πτερυγίου ως νέο μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.	90

Εικόνα 104. Σύγκριση του αρχικού και του παραμορφωμένου πτερυγίου μετά την προσομοίωση.	91
Εικόνα 105. Θέση της εντολής «Make Drawing from Assembly».	91
Εικόνα 106. Κάτοψη του αρχικού και του παραμορφωμένου πτερυγίου σε δισδιάστατη απεικόνιση.....	92
Εικόνα 107. Θέση της εντολής «Section View».....	92
Εικόνα 108. Δημιουργία τομών στο αρχικό και στο παραμορφωμένο πτερύγιο.	93
Εικόνα 109. Μέτρηση της διαφοράς γωνίας τοποθέτησης και της μετατόπισης στο οριζόντιο επίπεδο μεταξύ του αρχικού και του παραμορφωμένου πτερυγίου.....	93
Εικόνα 110. Μέτρηση της διαφοράς γωνίας στρέψης και μετατόπισης στο οριζόντιο επίπεδο μεταξύ του αρχικού και του παραμορφωμένου πτερυγίου, μέσω σημείου αναφοράς.	94
Εικόνα 111. Διάγραμμα ροπής-στροφών για $U = 8 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....	96
Εικόνα 112. Διάγραμμα ροπής-στροφών για $U = 10 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....	97
Εικόνα 113. Διάγραμμα ροπής-στροφών για $U = 12 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....	97
Εικόνα 114. Διάγραμμα ροπής-στροφών για $U = 14 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....	98
Εικόνα 115. Διάγραμμα ροπής-στροφών για $U = 16 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....	98
Εικόνα 116. Διάγραμμα Ισχύος-Στροφών για $U = 8 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....	99
Εικόνα 117. Διάγραμμα Ισχύος-Στροφών για $U = 10 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....	99
Εικόνα 118. Διάγραμμα Ισχύος-Στροφών για $U = 12 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....	100
Εικόνα 119. Διάγραμμα Ισχύος-Στροφών για $U = 14 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....	100
Εικόνα 120. Διάγραμμα Ισχύος-Στροφών για $U = 16 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....	101

Εικόνα 121. Σύγκριση στρέψης αεροτομών πτερυγίων από διαφορετικά υλικά υπό ροή ανέμου 10 m/s και 25 m/s.	103
Εικόνα 122. Σύγκριση στρέψης αεροτομών πτερυγίων από διαφορετικά υλικά υπό ίδιες συνθήκες φόρτισης, για ταχύτητα ανέμου 25 m/s.	103
Εικόνα 123. Σύγκριση καμπυλότητας πτερυγίων B1 με διαφορετικό ποσοστό σάρωσης.	104
Εικόνα 124. Σύγκριση της γωνίας στρέψης κατά μήκος των πτερυγίων B1 με διαφορετικό ποσοστό σάρωσης υπό ίδιες συνθήκες φόρτισης, για ταχύτητα ανέμου 25 m/s.	105
Εικόνα 125. Σύγκριση καμπυλότητας πτερυγίων τύπου B1,B2 και B3 με ίδια ακτίνα σάρωσης.	105
Εικόνα 126. Σύγκριση μέγιστης τάσης των πτερυγίων στις 25 m/s σε σχέση με την τάση διαρροής του υλικού.	106
Εικόνα 127. Σύγκριση της γωνίας στρέψης κατά μήκος των πτερυγίων B1-030, B2-030 και B3-030 υπό ίδιες συνθήκες φόρτισης, για ταχύτητα ανέμου 25 m/s.	107
Εικόνα 128. Σύγκριση της καμπυλότητας των πτερυγίων B1 και B2, για ποσοστιαία ακτίνα σάρωσης ίση με 32% του μήκους τους.	107
Εικόνα 129. Σύγκριση της γωνίας στρέψης κατά μήκος των πτερυγίων υπό ίδιες συνθήκες φόρτισης, για ταχύτητα ανέμου 25 m/s.	108
Εικόνα 130. Σύγκριση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης στα πτερύγια υπό φόρτιση για ταχύτητα ανέμου 25 m/s, σε συσχέτιση με την τάση διαρροής του υλικού.	108
Εικόνα 131. Σύγκριση μη παραμορφωμένου και παραμορφωμένων πτερυγίων για ταχύτητες ανέμου 10 και 25 m/s (κάτοψη).	109
Εικόνα 132. Σύγκριση μη παραμορφωμένου και παραμορφωμένων πτερυγίων για ταχύτητες ανέμου 10 και 25 m/s (Πρόσοψη).	109
Εικόνα 133. Σύγκριση μη παραμορφωμένου και παραμορφωμένων πτερυγίων για ταχύτητες ανέμου 10 και 25 m/s (Πλάγια όψη).	110
Εικόνα 134. Σύγκριση μήκους παραμορφωμένων πτερυγίων υπό φόρτιση για ταχύτητα ανέμου 25 m/s σε σχέση με το αρχικό.	110
Εικόνα 135. Ποσοστό του αρχικού λειτουργικού μήκους (ακτίνας) και της μέγιστης παραγόμενης ισχύος που παραμένει μετά την αεροδυναμική παραμόρφωση των πτερυγίων.	111

Κατάλογος πινάκων

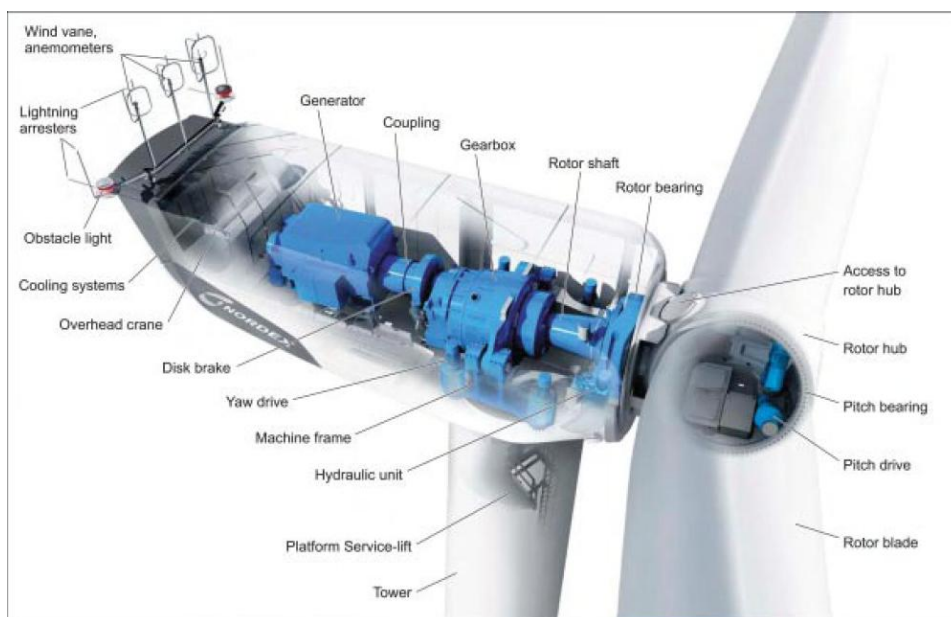
Πίνακας 1. Αποτελέσματα των τριών κλιμακωμένων μοντέλων καμπύλων πτερυγίων.	28
Πίνακας 2. Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών.	49
Πίνακας 3. Σύγκριση μετρούμενης και υπολογισμένης παραμόρφωσης αεροτομών 01.	84
Πίνακας 4. Σύγκριση μετρούμενης και υπολογισμένης παραμόρφωσης αεροτομών 02.	84
Πίνακας 5. Σύγκριση μετρούμενης και υπολογισμένης παραμόρφωσης αεροτομών 03.	84

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μία από τις πιο ώριμες και τεχνολογικά αποδοτικές μορφές ανανεώσιμης ενέργειας. Η αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου για παραγωγή ηλεκτρισμού βασίζεται σε συστήματα ανεμογεννητριών, τα οποία μετατρέπουν τη ροή του αέρα σε μηχανική και, στη συνέχεια, σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της περιστροφής του ρότορα και της γεννήτριας [1]. Η συνεχής πρόοδος των τελευταίων δεκαετιών έχει καταστήσει τις ανεμογεννήτριες το βασικότερο μέσο αξιοποίησης του αιολικού δυναμικού, τόσο σε χερσαίες όσο και σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις [2].

Η βασική λειτουργία μίας ανεμογεννήτριας στηρίζεται στην αεροδυναμική δράση των πτερυγίων του ρότορα. Καθώς ο άνεμος που διέρχεται από την επιφάνεια σάρωσης, προκαλεί τη δημιουργία άντωσης και οπισθέλκουσας επάνω στις αεροτομές, μετατρέποντας μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ροπή περιστροφής. Η ροπή αυτή μεταδίδεται μέσω του άξονα στη γεννήτρια, όπου και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ από την γεννήτρια. Η αεροδυναμική απόδοση εξαρτάται βασικά από τη γεωμετρία του πτερυγίου, τη γωνία προσβολής και την ταχύτητα ροής στο επίπεδο σάρωσης [3][4].



Εικόνα 1. Ανάλυση βασικού εξοπλισμού τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

Η εξέλιξη των ανεμογεννητριών έχει οδηγήσει σε εντυπωσιακή αύξηση της ισχύος και των διαστάσεών τους. Οι σύγχρονες μηχανές μεγάλης κλίμακας διαθέτουν ρότορες διαμέτρου άνω των

150 m και ονομαστική ισχύ που υπερβαίνει τα 10 MW [2]. Ωστόσο, η αύξηση αυτή συνοδεύεται από σημαντικές μηχανικές και αεροδυναμικές προκλήσεις, καθώς τα πτερύγια υπόκεινται σε έντονες δυναμικές φορτίσεις, αεροελαστικά φαινόμενα και κόπωση υλικού.

Η μεγέθυνση των πτερυγίων προκαλεί αύξηση των φορτίων στρέψης και κάμψης, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη πιο ευέλικτων και ανθεκτικών κατασκευών. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη σημασία έχει ο σχεδιασμός των πτερυγίων, καθώς αυτά καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τόσο την ενεργειακή απόδοση όσο και τη μηχανική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας. Η γεωμετρία, το προφίλ των αεροτομών, η συστροφή και η κατανομή της χορδής επηρεάζουν άμεσα το πεδίο πίεσης και τις απώλειες [5]. Κατά συνέπεια, η βελτιστοποίηση της μορφής του πτερυγίου αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στην επίτευξη υψηλής απόδοσης και μακροχρόνιας αξιοπιστίας. Παράλληλα, η ανάπτυξη γεωμετρίας της πτέρυγας που να αποσκοπεί στον έλεγχο των φορτίων έχει καταστεί αναπόσπαστο τμήμα της σύγχρονης σχεδίασης πτερυγώσεων. Οι ανεμογεννήτριες διαθέτουν πλέον μηχανισμούς ενεργού ελέγχου, όπως έλεγχο της κλίσης των πτερυγίων καθώς και τον έλεγχο προσανατολισμού (pitch και yaw control), που επιτρέπουν να διατηρείται σταθερή ισχύς σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ανέμου [2]. Ωστόσο, οι ενεργοί μηχανισμοί ελέγχου αυξάνουν την πολυπλοκότητα και το κόστος συντήρησης, γεγονός που οδηγεί στην αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων μέσω παθητικών μηχανισμών ελέγχου.

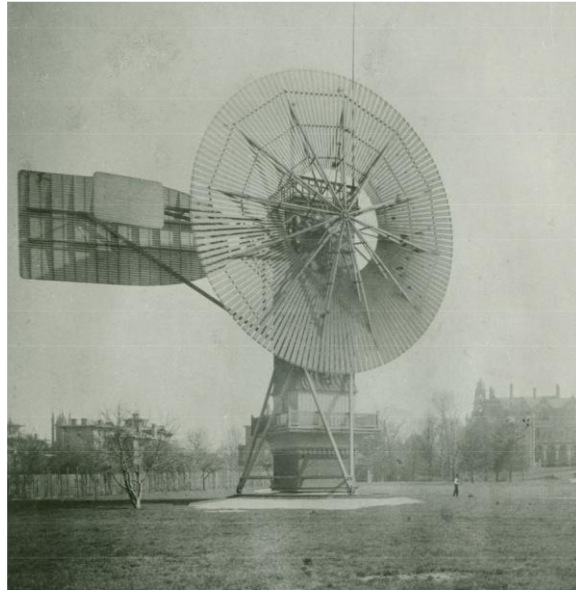
Οι παθητικοί μηχανισμοί ελέγχου εκμεταλλεύονται την ελαστικότητα των υλικών και τη γεωμετρία των πτερυγίων προκειμένου να επιτυγχάνεται αυτόματη προσαρμογή στη ροή του ανέμου χωρίς εξωτερικές εντολές ή κινούμενα μέρη. Ενδεικτικά, τα εύκαμπτα πτερύγια με σύζευξη κάμψης-στρέψης (bend-twist coupling) αποτελούν μια καινοτόμο προσέγγιση παθητικού ελέγχου, καθώς επιτρέπουν την περιορισμένη στρέψη των αεροτομών υπό υψηλά φορτία, μειώνοντας έτσι τις δυναμικές καταπονήσεις και προστατεύοντας τη δομή του ρότορα [6].

Η ανάπτυξη και αξιολόγηση τέτοιων συστημάτων αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, η οποία επικεντρώνεται στον σχεδιασμό, και την ανάλυση πτερυγίων ανεμογεννήτριας με καμπύλη γεωμετρία για την επίτευξη παθητικού ελέγχου φορτίων.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας ξεκινά από τους ανεμόμυλους, οι οποίοι εμφανίστηκαν στην Περσία περίπου τον 7ο αιώνα μ.Χ. και στη συνέχεια εξαπλώθηκαν στην Κίνα και στην Ευρώπη. Τα πρώτα πτερύγια αποτελούνταν από ξύλινα πλαίσια καλυμμένα με πανί και

λειτουργούσαν ως επίπεδες επιφάνειες που μετέτρεπαν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε περιστροφική κίνηση. Η μηχανική ισχύς αξιοποιούνταν κυρίως για άλεση σιτηρών και άντληση νερού [7]. Παρά την απλότητά τους, οι ανεμόμυλοι αποτέλεσαν την πρώτη συστηματική προσπάθεια αξιοποίησης του ανέμου και καθόρισαν βασικές αρχές σχεδίασης πτερυγίων για αιώνες.



Εικόνα 2. Φωτογραφία από την ανεμογεννήτρια του Poul la Cour (1891-1908).

Η μετάβαση από τους ανεμόμυλους στις ανεμογεννήτριες ηλεκτροπαραγωγής πραγματοποιήθηκε στα τέλη του 19ου αιώνα. Ο Poul la Cour στη Δανία (1891-1908) εγκατέστησε ανεμογεννήτριες με ξύλινα πτερύγια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και πραγματοποίησε τα πρώτα πειράματα σε αεροσήραγγα για τη μελέτη της αεροδυναμικής των ρότορων [7]. Ανέπτυξε επίσης αυτορυθμιζόμενα πτερύγια, εισάγοντας πρώιμες μορφές ελεγχόμενης αεροδυναμικής συμπεριφοράς. Αυτή η προσέγγιση σηματοδότησε την αρχή της μετάβασης από εμπειρικά σχέδια σε πιο σημαντικές, επιστημονικά τεκμηριωμένες γεωμετρίες.

Στις μεταπολεμικές δεκαετίες, οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο πραγματοποίησαν μεγάλης κλίμακας πειράματα με ανεμογεννήτριες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ήταν η μηχανή Smith-Putnam (1941) στις ΗΠΑ, με διάμετρο 53 μέτρα και πτερύγια από χάλυβα. Αν και λειτούργησε επιτυχώς για ένα διάστημα, απέτυχε λόγω κόπωσης υλικών και περιορισμένης τεχνογνωσίας σε τόσο μεγάλα συστήματα [7]. Τα εγχειρήματα αυτά ανέδειξαν τις σημαντικές τεχνικές προκλήσεις της μεγέθυνσης των ανεμογεννητριών, καθώς τα πτερύγια έπρεπε να επιτυγχάνουν ταυτόχρονα υψηλή ακαμψία και χαμηλό βάρος, κάτι που δεν ήταν εύκολα εφικτό με τα διαθέσιμα υλικά της εποχής.



Εικόνα 3. Η ανεμογεννήτρια Smith-Putnam (ΗΠΑ, 1941), η πρώτη μεγάλης ισχύος που συνδέθηκε στο ηλεκτρικό δίκτυο.

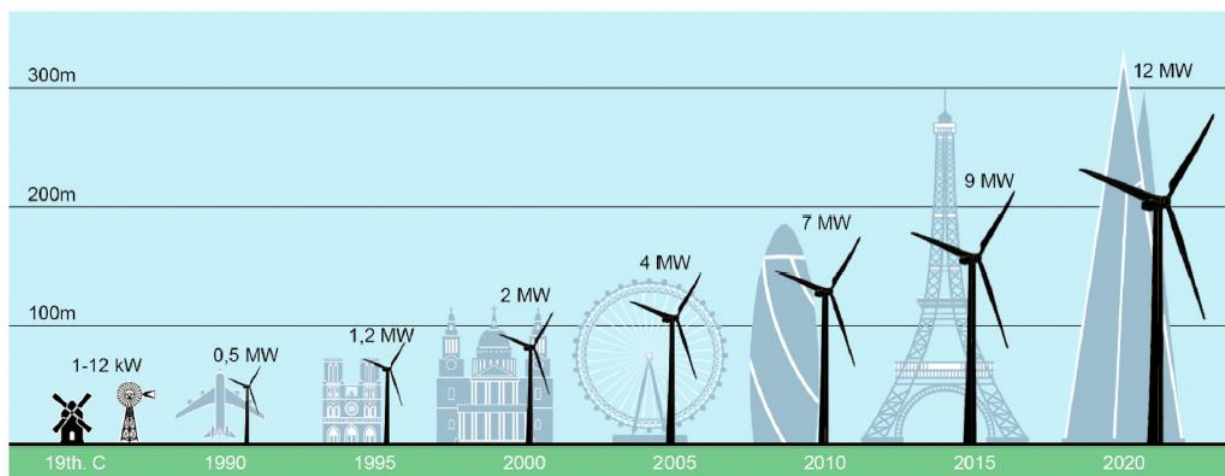
Η πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1973 αναζωπύρωσε το διεθνές ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Στις ΗΠΑ και τη Γερμανία υιοθετήθηκε η “top-down” προσέγγιση, η οποία βασίστηκε στην ανάπτυξη μεγάλων πρωτοτύπων, όπως το NASA Mod-0 και το Growian, αξιοποιώντας τεχνολογίες προερχόμενες από τον αεροδιαστημικό τομέα [8]. Ωστόσο, η αυξημένη πολυπλοκότητα και το υψηλό κόστος περιόρισαν την πρακτική τους εφαρμογή. Αντίθετα, στη Δανία επικράτησε η προσέγγιση “bottom-up”, όπου μικρές επιχειρήσεις και ενεργειακοί συνεταιρισμοί ανέπτυξαν τυποποιημένες ανεμογεννήτριες τριπτέρυγης διάταξης με απλές και αξιόπιστες γεωμετρίες. Η λεγόμενη σχολή του Danish concept (τρεις πτέρυγες, οριζόντιος άξονας περιστροφής και σωληνωτός πύργος) καθιερώθηκε ως το κυρίαρχο διεθνές πρότυπο [8]. Ο συνδυασμός απλότητας, χαμηλού κόστους και υψηλής αξιοπιστίας, σε συνδυασμό με την ευρεία κοινωνική αποδοχή, συνέβαλε καθοριστικά στη μετέπειτα εξάπλωση της αιολικής τεχνολογίας.

Από τη δεκαετία του 1990 μέχρι σήμερα, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών γνώρισαν θεαματική εξέλιξη. Η υιοθέτηση σύνθετων υλικών, όπως υαλονήματα και ανθρακονήματα, επέτρεψε την κατασκευή μακρύτερων, ελαφρύτερων και ανθεκτικότερων πτερυγίων, με μήκη που πλέον ξεπερνούν τα 100 μέτρα [8]. Η γεωμετρία τους σχεδιάζεται με βάση προηγμένες υπολογιστικές μεθόδους (CFD, FEA), ώστε κάθε τμήμα να αξιοποιεί βέλτιστα τη ροή του ανέμου. Παράλληλα, η αύξηση του μεγέθους δημιούργησε νέες προκλήσεις: μεταφορά και εγκατάσταση τεράστιων πτερυγίων, κατασκευή σε τμήματα, καθώς και ζητήματα κόστους και αξιοπιστίας.



Εικόνα 4. NASA Mod-0, ΗΠΑ, 1975 (αριστερά) και Growian, Γερμανία, 1983 (δεξιά).

Σήμερα, η εξέλιξη των πτερυγίων συνδέεται άμεσα με την ανάγκη βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και μείωσης των καταπονήσεων. Πέρα από την καθιέρωση συστημάτων ελέγχου της γωνίας (pitch), διερευνώνται υλικά και γεωμετρίες που επιτρέπουν ελεγχόμενη παραμόρφωση, ώστε τα ίδια τα πτερύγια να ανταποκρίνονται φυσικά σε μεταβολές του ανέμου. Έτσι, η έρευνα δεν επικεντρώνεται μόνο στην αεροδυναμική, αλλά και στην ευφυή αξιοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών [9].



Εικόνα 5. Εξέλιξη του μεγέθους των ανεμογεννητριών από τον 19ο αιώνα έως σήμερα.

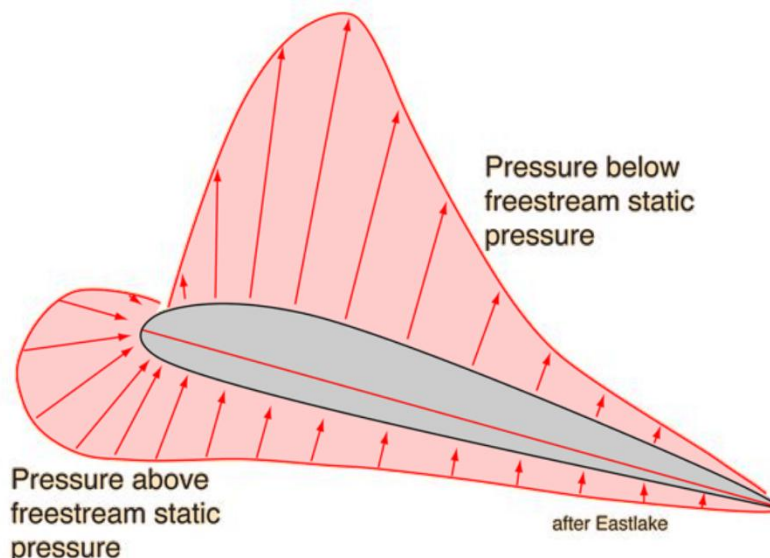
Η ιστορική πορεία των πτερυγίων δείχνει μια συνεχή εξέλιξη από τα ξύλινα επίπεδα πτερύγια των ανεμόμυλων, στα χαλύβδινα πρωτότυπα του 20ού αιώνα, και τέλος στα σημερινά σύνθετα

συστήματα υψηλής αεροδυναμικής. Παράλληλα, αναδεικνύει τις τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις που εξακολουθούν να υφίστανται και οι οποίες καθορίζουν το πλαίσιο για την περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της αιολικής ενέργειας.

1.3 Βασικές Αρχές Αεροδυναμικής Πτερυγίων

Τα πτερύγια αποτελούν το βασικότερο στοιχείο μιας ανεμογεννήτριας, καθώς είναι υπεύθυνα για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια που οδηγεί στον δρομέα. Η απόδοσή τους καθορίζει άμεσα το ποσοστό εκμετάλλευσης του ανέμου, ενώ οι μηχανικές καταπονήσεις που δέχονται επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής και την αξιοπιστία ολόκληρου του συστήματος [5].

Η αεροδυναμική συμπεριφορά ενός πτερυγίου είναι αποτέλεσμα μιας σύνθετης αλληλεπίδρασης δυνάμεων και ροπών, οι οποίες εξαρτώνται από το σχήμα, τα υλικά, τη γωνία προσβολής και τις συνθήκες ροής. Η άντωση (lift) προκύπτει από τη διαφορά πίεσης που αναπτύσσεται μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας της αεροτομής. Η ροή του αέρα ακολουθεί την καμπυλότητα της άνω επιφάνειας (φαινόμενο Coanda), επιταχύνεται και, σύμφωνα με την αρχή Bernoulli, η πίεση μειώνεται. Αντίθετα, στην κάτω επιφάνεια η ταχύτητα της ροής παραμένει χαμηλότερη, οδηγώντας σε υψηλότερη πίεση. Η διαφορά αυτή δημιουργεί τη συνισταμένη δύναμη της άντωσης, ενώ η συνιστώσα της δύναμης που δρα παράλληλα στη ροή αντιστοιχεί στην οπισθέλκουσα (drag).



Εικόνα 6. Απεικόνιση της κατανομής πίεσης και του φαινομένου Coanda γύρω από αεροτομή.

Στην πράξη, το πτερύγιο υπόκειται σε δυνάμεις άντωσης και οπισθέλκουσας, οι οποίες αναλύονται σε αξονικές και εφαπτομενικές συνιστώσες, αλλά και σε ροπές κάμψης και στρέψης που επηρεάζουν τη γεωμετρία του. Επιπλέον, σε πτερύγια μεγάλης κλίμακας αναπτύσσονται σημαντικά βαρυτικά και φυγόκεντρα φορτία, τα οποία περιορίζουν τον σχεδιασμό και συμβάλλουν στην κόπωση. Η συνολική κατανόηση όλων αυτών είναι απαραίτητη όχι μόνο για τη θεωρητική ανάλυση αλλά και για την ερμηνεία πειραματικών αποτελεσμάτων [4].

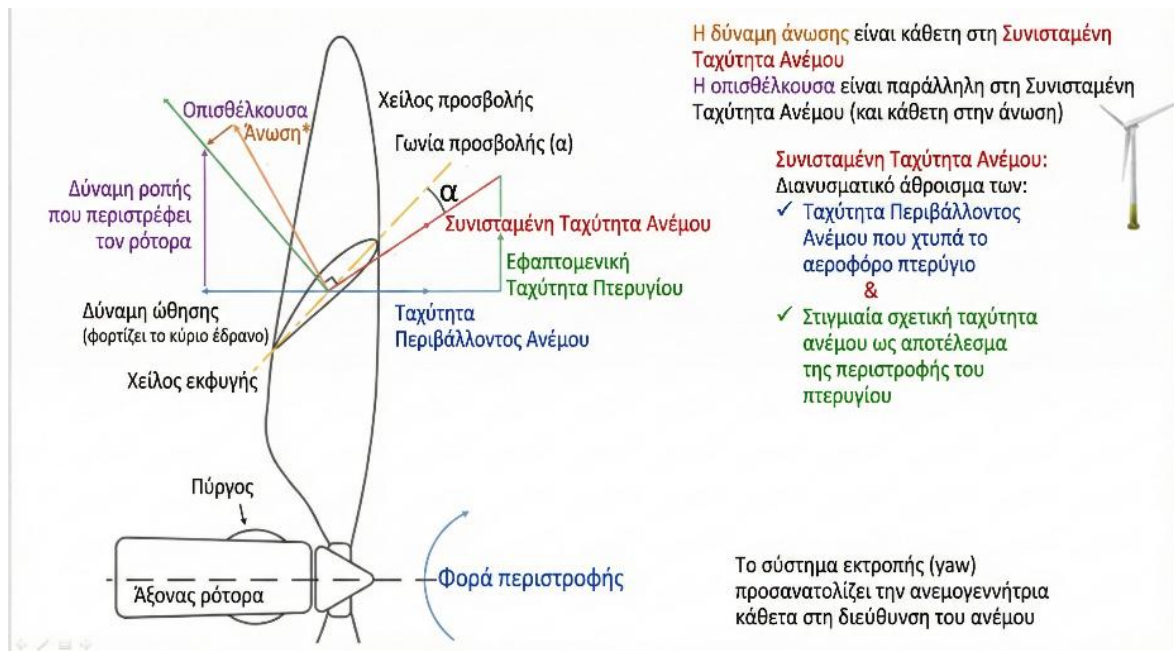
Επίσης, ιδιαίτερη σημασία έχει η γωνία προσβολής (angle of attack) και η σχέση της με τη γωνία σφήνωσης (setting pitch angle) κάθε αεροτομής κατά μήκος της πτέρυγας, καθώς οι μεταβολές τους καθορίζουν εάν το πτερύγιο λειτουργεί εντός της βέλτιστης περιοχής απόδοσης ή αν οδηγείται σε κατάσταση αποκόλλησης του οριακού στρώματος (stall) και υπερφόρτιση. Για τον λόγο αυτό, τα θέματα αυτά αποτελούν αντικείμενο εκτενέστερης ανάλυσης στα επόμενα τμήματα του κεφαλαίου.

Άντωση (Lift)

Η άντωση (Lift) είναι η δύναμη που δρα κάθετα στη διεύθυνση της σχετικής ροής του ανέμου και παράγεται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ της άνω και κάτω επιφάνειας της αεροτομής. Αποτελεί την κύρια ωφέλιμη δύναμη, καθώς η εφαπτομενική της συνιστώσα είναι αυτή που συμβάλλει στην περιστροφική ροπή του δρομέα και τελικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Το μέγεθός της εξαρτάται από το σχήμα της αεροτομής, τη γωνία προσβολής και την ταχύτητα του ανέμου [4].

Οπισθέλκουσα (Drag)

Η οπισθέλκουσα (Drag) είναι η δύναμη που δρα παράλληλα με τη σχετική ροή και αντιστέκεται στην κίνηση του αέρα γύρω από το προφίλ. Διακρίνεται σε (α) Προφίλική οπισθέλκουσα (profile drag), που προκύπτει από την τριβή και την κατανομή πίεσης γύρω από το προφίλ και σε (β) Επαγωγική οπισθέλκουσα (induced drag), η οποία συνδέεται με τη δημιουργία στροβίλων στα άκρα των πτερυγίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η οπισθέλκουσα δεν δρα απευθείας ενάντια στην περιστροφή του πτερυγίου, αλλά κατά μήκος της σχετικής ροής. Η συνεισφορά της στην εφαπτομενική συνιστώσα προκύπτει μόνο μέσω της ανάλυσης των δυνάμεων σε αξονική και εφαπτομενική κατεύθυνση [4].



Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση των αεροδυναμικών δυνάμεων και ταχυτήτων που δρουν σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας.

Αξονική και Εφαπτομενική Δύναμη (Axial and Tangential Force)

Η συνολική αεροδυναμική δύναμη σε κάθε στοιχείο του πτερυγίου αναλύεται σε δύο βασικές συνιστώσες. Η πρώτη είναι η Αξονική Δύναμη, που δρα παράλληλα προς τον άξονα του ανέμου και προκαλεί κάμψη του πτερυγίου προς τα πίσω, αυξάνοντας τα φορτία στον δρομέα και τον πύργο. Η δεύτερη είναι η Εφαπτομενική Δύναμη, που δρα κάθετα στην αξονική και ευθύνεται για την ανάπτυξη ροπής γύρω από τον άξονα. Η ισορροπία μεταξύ των δύο συνιστωσών καθορίζει την αεροδυναμική απόδοση αλλά και το μέγεθος των καταπονήσεων.

Ροπές Στρέψης και Κάμψης (Twisting and Bending Moments)

Οι δυνάμεις άντωσης και οπισθέλκουσας, κατανεμημένες κατά μήκος του πτερυγίου, δημιουργούν τις παρακάτω ροπές (α) Ροπή κάμψης (bending moment), που οφείλεται στην αξονική δύναμη και το βάρος και τείνει να λυγίσει το πτερύγιο προς τα πίσω, και (β) στη Ροπή στρέψης (twisting moment), που προκύπτει επειδή το αεροδυναμικό κέντρο δεν συμπίπτει με τον άξονα ακαμψίας. Συγκεκριμένα, η ροπή στρέψης μεταβάλλει τη γωνία προσβολής, οδηγώντας σε αλλαγές της αεροδυναμικής συμπεριφοράς. Η στρέψη είναι κρίσιμη, καθώς μπορεί να επηρεάσει δραστικά την απόδοση, ενώ σε εύκαμπτα πτερύγια λειτουργεί και ως μηχανισμός παθητικού ελέγχου [4].

Βαρυτικές και Φυγόκεντρες Δυνάμεις (Gravitational and Centrifugal Forces)

Αν και σε πτερύγια μικρής κλίμακας οι αδρανειακές δυνάμεις και οι καταπονήσεις από το ίδιο το βάρος τους έχουν περιορισμένη σημασία, σε πτερύγια μεγάλης κλίμακας εξελίσσονται σε κρίσιμους παράγοντες σχεδιασμού. Το βάρος τους προκαλεί περιοδικές καταπονήσεις σε κάθε περιστροφή, οι οποίες συσσωρεύονται και οδηγούν σε φαινόμενα κόπωσης. Επιπλέον, η φυγόκεντρη δύναμη που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή του δρομέα τείνει να επιμηκύνει το πτερύγιο ακτινικά, προκαλώντας αύξηση των εφελκυστικών τάσεων και επιβαρύνοντας ιδιαίτερα την περιοχή σύνδεσης με τον δρομέα. [4].

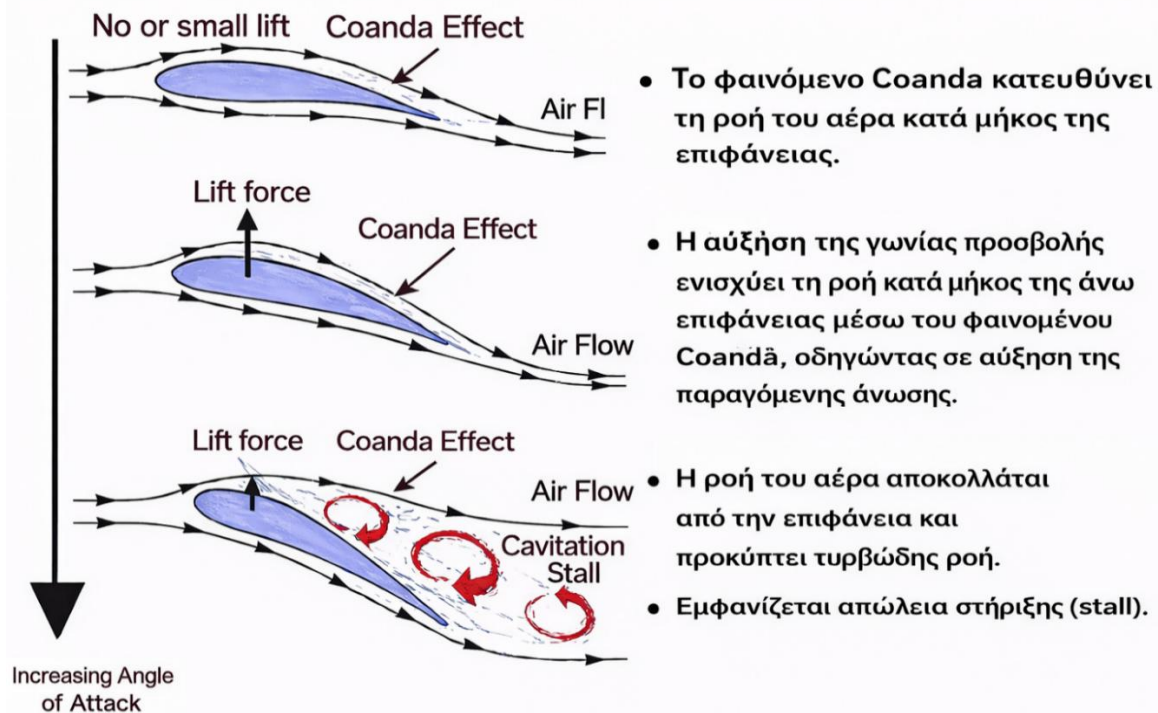
Η Σημασία της Γωνίας Προσβολής και του Setting Angle

Η γωνία προσβολής ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της σχετικής ταχύτητας του ανέμου και της χορδής της αεροτομής. Πρόκειται για το κεντρικότερο αεροδυναμικό μέγεθος, καθώς καθορίζει άμεσα τόσο τη δημιουργία άντωσης όσο και την εμφάνιση οπισθέλκουσας. Η σχετική ροή δεν ταυτίζεται με τη διεύθυνση του ελεύθερου ανέμου, αλλά προκύπτει από τον συνδυασμό δύο ταχυτήτων, της ταχύτητας του ανέμου και της εφαπτομενικής ταχύτητας λόγω περιστροφής του πτερυγίου.

Η σύνθεση αυτών των δύο συνιστωσών δημιουργεί το διάνυσμα της σχετικής ταχύτητας, το οποίο μεταβάλλεται κατά μήκος της ακτίνας. Στα τμήματα κοντά στη ρίζα του πτερυγίου, η ροή επηρεάζεται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου, ενώ προς το ακροπτερύγιο αυξάνει η συνεισφορά της περιστροφής. Αυτή η διαφοροποίηση εξηγεί γιατί τα πτερύγια σχεδιάζονται με μεταβλητή χορδή και γωνία τοποθέτησης, ώστε κάθε τμήμα να λειτουργεί αποδοτικά. Η επίδραση της γωνίας προσβολής μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- Για μικρές τιμές, η άντωση αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με τη γωνία, ενώ η οπισθέλκουσα παραμένει χαμηλή.
- Για ενδιάμεσες τιμές, η άντωση φτάνει στο μέγιστο, και το πτερύγιο λειτουργεί στην αποδοτικότερη περιοχή του.

Όταν η γωνία προσβολής υπερβεί μία κρίσιμη τιμή, γνωστή ως γωνία αποκόλλησης της ροής (stall angle), η ροή αποκολλάται από την άνω επιφάνεια της αεροτομής, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της άνωσης και την απότομη αύξηση της οπισθέλκουσας. Το φαινόμενο αυτό περιορίζει την αεροδυναμική απόδοση και ενδέχεται να οδηγήσει σε αστάθειες λειτουργίας.



Εικόνα 8. Απεικόνιση της μεταβολής του πεδίου ροής γύρω από την αεροτομή κατά την αύξηση της γωνίας προσβολής.

Εκτός από τη θεωρητική γωνία προσβολής, ιδιαίτερη σημασία έχουν (α) η γωνία σφήνωσης εκ κατασκευής ή γωνία τοποθέτησης ή κλίση της εκάστοτε αεροτομής, δηλαδή η γεωμετρική γωνία με την οποία τοποθετείται η αεροτομή στο πτερύγιο, και (β) η ενεργός γωνία προσβολής, η οποία προκύπτει δυναμικά από τις πραγματικές συνθήκες ροής και τις παραμορφώσεις του πτερυγίου (κάμψη, στρέψη). Έτσι, η κατανόηση της σχετικής ροής και της γωνίας προσβολής δεν αποτελεί μόνο ζήτημα αεροδυναμικής θεωρίας, αλλά είναι θεμελιώδης για την ερμηνεία της συμπεριφοράς των πτερυγίων σε πειραματικές δοκιμές και σε υπολογιστικά μοντέλα. Για αυτόν τον λόγο, ο έλεγχος της γωνίας προσβολής είναι κρίσιμος για την επίτευξη βέλτιστης αεροδυναμικής απόδοσης και για τον περιορισμό των μηχανικών φορτίων σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, είτε μέσω ενεργών συστημάτων ελέγχου βήματος, είτε μέσω παθητικής στρέψης του πτερυγίου [5].

1.4 Μέθοδοι Ελέγχου Γωνίας Προσβολής

Ο έλεγχος της γωνίας προσβολής στα πτερύγια των ανεμογεννητριών αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες για την αποδοτική λειτουργία, την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής τους. Μέσω της ρύθμισης της γωνίας προσβολής, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ελέγχουν την

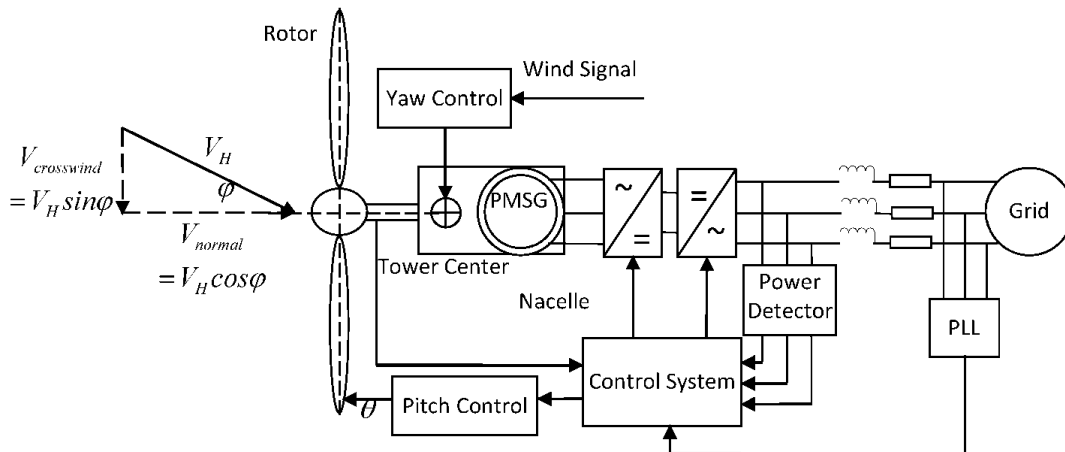
αεροδυναμική ροπή, την παραγόμενη ισχύ και να περιορίζουν τα μηχανικά φορτία που ασκούνται στα δομικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας. Ουσιαστικά, η σωστή επιλογή και υλοποίηση της μεθόδου ελέγχου επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και την αποφυγή μηχανικών αστοχιών σε ακραίες συνθήκες ανέμου. Οι κυριότερες κατηγορίες ρύθμισης της γωνίας προσβολής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ενεργού και παθητικού ελέγχου [10].

Ενεργές Μέθοδοι Ελέγχου

Οι ενεργές μέθοδοι ελέγχου βασίζονται στη χρήση αισθητήρων, επενεργητών και συστημάτων ελέγχου που επιτρέπουν τη δυναμική ρύθμιση της γωνίας προσβολής, ανάλογα με τις συνθήκες του ανέμου και τις λειτουργικές απαιτήσεις. Τον ενεργό έλεγχο μπορούμε να τον χωρίσουμε στις παρακάτω υποκατηγορίες.

Έλεγχος Yaw

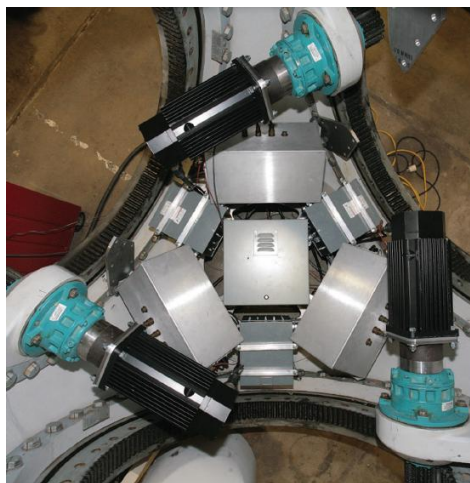
Ο έλεγχος Yaw αφορά την περιστροφή της ατράκτου ώστε ο ρότορας να ευθυγραμμίζεται με τη διεύθυνση του ανέμου. Στις ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας, η διαδικασία υλοποιείται μέσω ηλεκτρομηχανικών κινητήρων και γραναζιών, με σχετικά αργή απόκριση, καθώς απαιτούνται αρκετά δευτερόλεπτα για την πλήρη ευθυγράμμιση. Αντίθετα, στις μικρές ανεμογεννήτριες το yaw πραγματοποιείται παθητικά μέσω πηδαλίου (tail vane), το οποίο αντιδρά πολύ πιο γρήγορα λόγω χαμηλής μάζας και αδράνειας [11]. Έτσι, ο όρος yaw control στις μικρές κλίμακες ταυτίζεται συχνά με την έννοια του furling system.



Εικόνα 9. Διάγραμμα λειτουργίας και ενεργού ελέγχου ανεμογεννήτριας [11].

Ταυτόχρονος έλεγχος κλίσης της πτέρυγας (Collective Pitch Control - CPC)

Ο Ταυτόχρονος Έλεγχος της κλίσης όλων των πτερύγων του ρότορα αποτελεί την πιο διαδεδομένη ενεργή μέθοδο. Όλα τα πτερύγια περιστρέφονται ταυτόχρονα γύρω από τον διαμήκη άξονα, με σκοπό να διατηρηθεί σταθερή η παραγόμενη ισχύς στην περιοχή των υψηλών ταχυτήτων ανέμου. Η μέθοδος CPC είναι θεμελιώδης για τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας, καθώς προσφέρει απλότητα στον έλεγχο, υψηλή αξιοπιστία και αποδεδειγμένα αποτελέσματα στη μείωση φορτίων [2]. Ωστόσο, η συλλογική ρύθμιση δεν εξαλείφει πλήρως τις ανισορροπίες φορτίου μεταξύ των πτερυγίων, με αποτέλεσμα τη συνεχιζόμενη ανάπτυξη περισσότερο εξελιγμένων μεθόδων.



Εικόνα 10. Σύστημα ελέγχου βήματος (pitch mechanism) ανεμογεννήτριας.

Ατομικός Έλεγχος κλίσης της πτέρυγας (Individual Pitch Control - IPC)

Ο Ατομικός Έλεγχος Pitch επιτρέπει την ανεξάρτητη ρύθμιση της γωνίας σφήνωσης κάθε πτερυγίου. Αυτό προσφέρει τη δυνατότητα αντιστάθμισης των μη συμμετρικών φορτίων που αναπτύσσονται λόγω τυρβώδους ροής ή ανωμαλιών στον άνεμο. Μελέτες έχουν δείξει ότι ο IPC μειώνει σημαντικά τα κατακόρυφα και εγκάρσια φορτία, βελτιώνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του συστήματος μετάδοσης και του πύργου [10]. Παρά τα πλεονεκτήματα, η εφαρμογή του IPC απαιτεί προηγμένους ελεγκτές και υψηλότερη πολυπλοκότητα σε επίπεδο λογισμικού και υλικού, γεγονός που αυξάνει το κόστος και τις ανάγκες συντήρησης.

Active Twist - Smart Rotor Concepts

Οι τεχνολογίες Active Twist στοχεύουν στη δυναμική στρέψη των πτερυγίων κατά μήκος του άξονά τους μέσω ενσωματωμένων μηχανισμών ή έξυπνων υλικών. Η μέθοδος αυτή, που ανήκει στο πεδίο των έξυπνων ρότορων (smart rotors), επιτρέπει την τοπική ρύθμιση της αεροδυναμικής

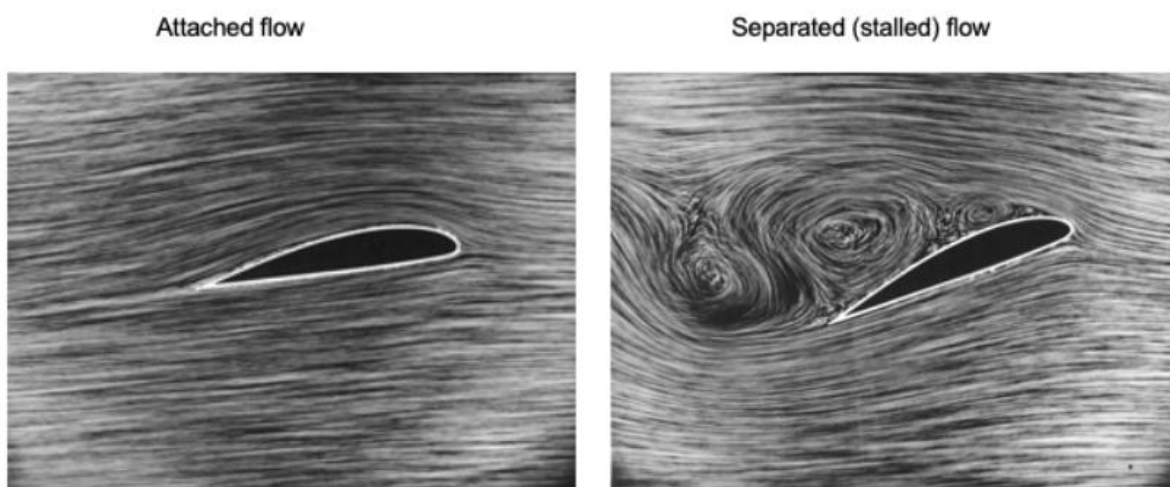
απόκρισης και τη μείωση φορτίων σε πραγματικό χρόνο. Παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο, μελέτες δείχνουν σημαντικές δυνατότητες για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και μείωση καταπονήσεων [4].

Παθητικές Μέθοδοι Ελέγχου

Οι παθητικές μέθοδοι εκμεταλλεύονται τα αεροδυναμικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων, χωρίς την ανάγκη εξωτερικών επενεργητών. Παρά το γεγονός ότι θεωρούνται λιγότερο ακριβείς, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την απλότητα και το χαμηλό κόστος. Οι κυριότερες κατηγορίες παθητικού ελέγχου είναι οι παρακάτω.

Έλεγχος μέσω Stall

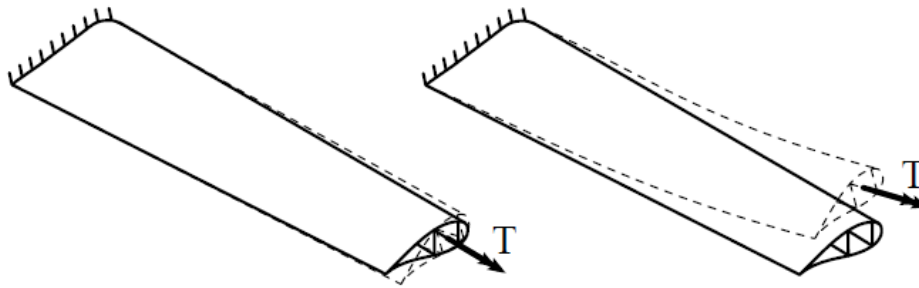
Η τεχνική Stall Control βασίζεται στο φυσικό φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής όταν η γωνία προσβολής υπερβεί μια κρίσιμη τιμή (stall angle). Η γωνία προσβολής καθορίζεται από τη συνισταμένη της ταχύτητας του ανέμου και της περιφερειακής ταχύτητας του πτερυγίου, σε συνδυασμό με τη γωνία τοποθέτησης. Σε συνθήκες ισχυρού ανέμου, η σχετική ροή μεταβάλλεται με αποτέλεσμα η γωνία προσβολής να αυξάνεται, αν η ανεμογεννήτρια δεν ρυθμίσει ανάλογα την ταχύτητα περιστροφής ή το pitch, τότε η γωνία υπερβαίνει το όριο αποκόλλησης. Τότε η άντωση μειώνεται δραστικά, ενώ η οπισθέλκουσα αυξάνεται, περιορίζοντας αυτόματα την αεροδυναμική ισχύ και προστατεύοντας το σύστημα από υπερφόρτωση. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε μικρές ανεμογεννήτριες λόγω απλότητας και χαμηλού κόστους, αν και συνοδεύεται από μειωμένη συνολική απόδοση και περιορισμένο έλεγχο της ροής συγκριτικά με τις ενεργές μεθόδους [4].



Εικόνα 11. Σύγκριση προσκολλημένης ροής και αποκολλημένης ροής (stall) γύρω από αεροτομή.

Σύζευξη Κάμψης-Στρέψης (Bend-Twist Coupling)

Η σύζευξη κάμψης-στρέψης εκμεταλλεύεται την ελαστικότητα των πτερυγίων. Όταν αυτά κάμπτονται υπό την επίδραση φορτίων, προκαλείται ταυτόχρονη στρέψη που μεταβάλλει τη γωνία σφήνωσης ώστε να μεταβληθεί η γωνία προσβολής και, κατά συνέπεια, τα αεροδυναμικά φορτία. Η μέθοδος αυτή μειώνει τις αιχμές φορτίων και συμβάλλει στην παράταση της διάρκειας ζωής, αλλά απαιτεί εξειδικευμένα υλικά και προσεκτικό σχεδιασμό. Ειδικές γεωμετρίες, όπως τα swept blades, έχουν επιβεβαιώσει τα πλεονεκτήματα αυτής της στρατηγικής [12].



Εικόνα 12. Σύγκριση συμβατικού πτερυγίου (αριστερά) και πτερυγίου σχεδιασμένου με σύζευξη κάμψης-στρέψης (δεξιά).

Ελαστικά και Προσαρμοστικά Υλικά

Η χρήση σύνθετων ή έξυπνων υλικών, όπως πολυμερή με μνήμη σχήματος, επιτρέπει στα πτερύγια να μεταβάλλουν παθητικά τη μορφή τους υπό την επίδραση της ροής. Με τον τρόπο αυτό, προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ανέμου χωρίς την ανάγκη μηχανικών συστημάτων. Αν και η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο, παρουσιάζει προοπτικές για την ανάπτυξη πτερυγίων υψηλής απόδοσης. Το κύριο μειονέκτημα αφορά την αβεβαιότητα που σχετίζεται με τη γήρανση των υλικών και την υψηλή τεχνολογική απαίτηση στην κατασκευή [2].

Συγκριτικά

Οι ενεργές μέθοδοι προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και ακρίβεια στον έλεγχο, επιτυγχάνοντας βελτιστοποίηση ισχύος και μείωση φορτίων. Αντίθετα, οι παθητικές τεχνικές χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος και υψηλή αξιοπιστία, αλλά περιορισμένη απόδοση. Σε μικρές ανεμογεννήτριες, όπου το κόστος είναι κρίσιμο, οι παθητικές μέθοδοι παραμένουν ευρέως διαδεδομένες. Σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, η τάση είναι η υιοθέτηση προηγμένων ενεργών μεθόδων, με συνδυασμούς που οδηγούν στην ανάπτυξη έξυπνων πτερυγίων (smart blades).

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Η συνεχής αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών έχει οδηγήσει σε σημαντική άνοδο των αεροδυναμικών και αδρανειακών φορτίων που δέχονται τα πτερύγια. Για να περιοριστούν αυτά τα φορτία χωρίς αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος ελέγχου, η έρευνα τα τελευταία χρόνια έχει στραφεί σε παθητικές στρατηγικές ελάφρυνσης φορτίων, με κυριότερη τη σύζευξη κάμψης-στρέψης. Η βασική ιδέα είναι ότι η κατάλληλη επιλογή γεωμετρίας και ανισοτροπίας σύνθετων υλικών επιτρέπει στο πτερύγιο να στρέφεται αυτόματα όταν κάμπτεται υπό την επίδραση φορτίων, μειώνοντας τη γωνία προσβολής και άρα την άντωση και τις καταπονήσεις στις υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε αρχικά σε πειραματικά προγράμματα μικρής κλίμακας και πλέον εξετάζεται για εφαρμογή σε μεγάλα πτερύγια, καθώς προσφέρει παθητικό έλεγχο φορτίων χωρίς επιπλέον μηχανισμούς pitch, μειώνοντας το βάρος, την πολυπλοκότητα και το κόστος συντήρησης. Παρακάτω παρουσιάζονται χαρακτηριστικές μελέτες και ερευνητικά έργα που ανέδειξαν την πρακτική εφαρμοσιμότητα του BTC και τη συμβολή του στη βελτίωση της αξιοπιστίας και διάρκειας ζωής των πτερυγίων.

2.2 Παθητική Στρεπτική Παραμόρφωση

Ο Vladimir Fedorov (2012) [13] στη διδακτορική του διατριβή στο Technical University of Denmark, μελέτησε εκτενώς τα φαινόμενα σύζευξης κάμψης-στρέψης σε πτερύγια ανεμογεννητριών με στόχο τη μείωση των αεροδυναμικών φορτίων μέσω παθητικών μηχανισμών ελέγχου. Η εργασία συνδυάζει αριθμητικές μεθόδους υπολογισμού και πειραματική διερεύνηση για την επαλήθευση των μοντέλων και την αξιολόγηση της απόκρισης σε πραγματικές κατασκευές.

Αρχικά, αναπτύχθηκε και επικυρώθηκε μια υπολογιστική μεθοδολογία για την εκτίμηση του BTC σε σύνθετες δοκούς πτερυγίων, ικανή να προβλέπει την ελαστική στρέψη που επάγεται από τις φορτίσεις κάμψης λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία της διατομής και τη διάταξη (lay-up) των σύνθετων υλικών. Η ανάλυση εφαρμόστηκε σε διαφορετικές γεωμετρίες πτερυγίων προκειμένου να εξεταστεί πώς η ανισοτροπία των υλικών (π.χ. υαλοΐνες, ανθρακονήματα) και ο σχεδιασμός του κελύφους επηρεάζουν την απόκριση σε κάμψη και την επαγόμενη στρέψη. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη σε πτερύγια μικρής κλίμακας, όπου μετρήθηκε η στρέψη που

προκαλείται από στατικές φορτίσεις κάμψης. Για τον σκοπό αυτό τροποποιήθηκε υπαρκτό εμπορικό πτερύγιο ώστε να εμφανίζει BTC και υποβλήθηκε σε φορτίσεις σε εργαστηριακές συνθήκες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή φορτίων κάμψης προκάλεσε μετρήσιμη στρέψη, επιβεβαιώνοντας τη δυνατότητα αξιοποίησης του φαινομένου στην πράξη. Η ποιοτική και ποσοτική συμφωνία των μετρήσεων με τις προβλέψεις των μοντέλων επαλήθευσε την εγκυρότητα της υπολογιστικής προσέγγισης. Τέλος, αναπτύχθηκε μια απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμού του BTC για χρήση στη φάση προκαταρκτικής σχεδίασης μεγάλων πτερυγίων. Η μελέτη κατέδειξε ότι η ενσωμάτωση BTC στον σχεδιασμό μπορεί να επιφέρει ουσιαστική μείωση των αεροδυναμικών φορτίων και των καταπονήσεων κόπωσης, βελτιώνοντας την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών χωρίς προσθήκη ενεργών μηχανισμών ελέγχου [13].

Ο David W. MacPhee και ο Asfaw Beyene (2019) μελέτησαν την απόδοση μικρής ανεμογεννήτριας εξοπλισμένης με πτερύγια μεταβαλλόμενης γεωμετρίας (morphing blades), με στόχο την αξιολόγηση της πρακτικότητας της συγκεκριμένης ιδέας. Η έρευνα περιλάμβανε τόσο πειραματική όσο και αριθμητική ανάλυση, συγκρίνοντας έναν πρωτότυπο σχεδιασμό με άκαμπτα πτερύγια και έναν πανομοιότυπο με εύκαμπτα. Τα αποτελέσματα από 18 πειραματικές σειρές δοκιμών (230 σημεία δεδομένων) έδειξαν ότι το εύκαμπτο σχέδιο ξεπερνά σε απόδοση το άκαμπτο, ιδίως σε δυσμενείς συνθήκες φόρτισης. Οι μέγιστοι συντελεστές ισχύος (power coefficients) αυξήθηκαν έως και 32,6%, ενώ το εύρος λειτουργίας επεκτάθηκε σε κάποιες περιπτώσεις έως και 34,5% σε σχέση με τα άκαμπτα πτερύγια. Η μελέτη καταλήγει ότι τα εύκαμπτα πτερύγια μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση σε υπο-βέλτιστες συνθήκες ανέμου, καθιστώντας έτσι τις μικρές ανεμογεννήτριες πιο οικονομικά βιώσιμες. Η ένταξη ευκαμψίας στα πτερύγια προτείνεται ως μια απλή και χαμηλού κόστους λύση για αύξηση της απόδοσης και της επιχειρησιακής ευελιξίας σε μικρές ανεμογεννήτριες [14].

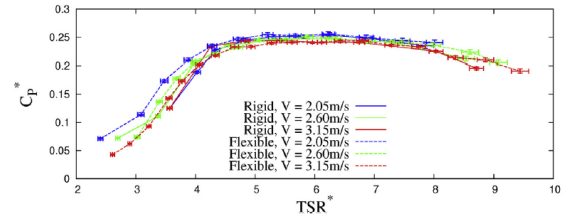
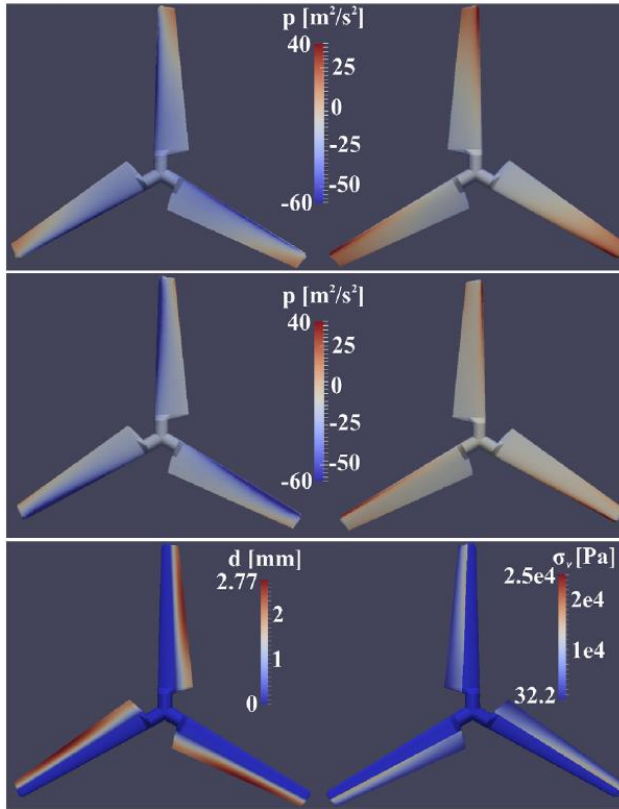


Fig. 11. Rigid and morphing blade performance comparisons across all V for $\beta = 3^\circ$.

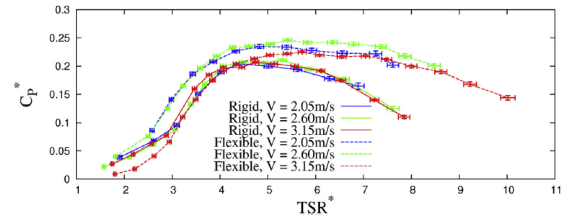


Fig. 12. Rigid and morphing blade performance comparisons across all V for $\beta = 6^\circ$.

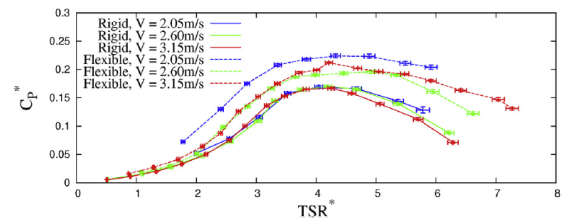
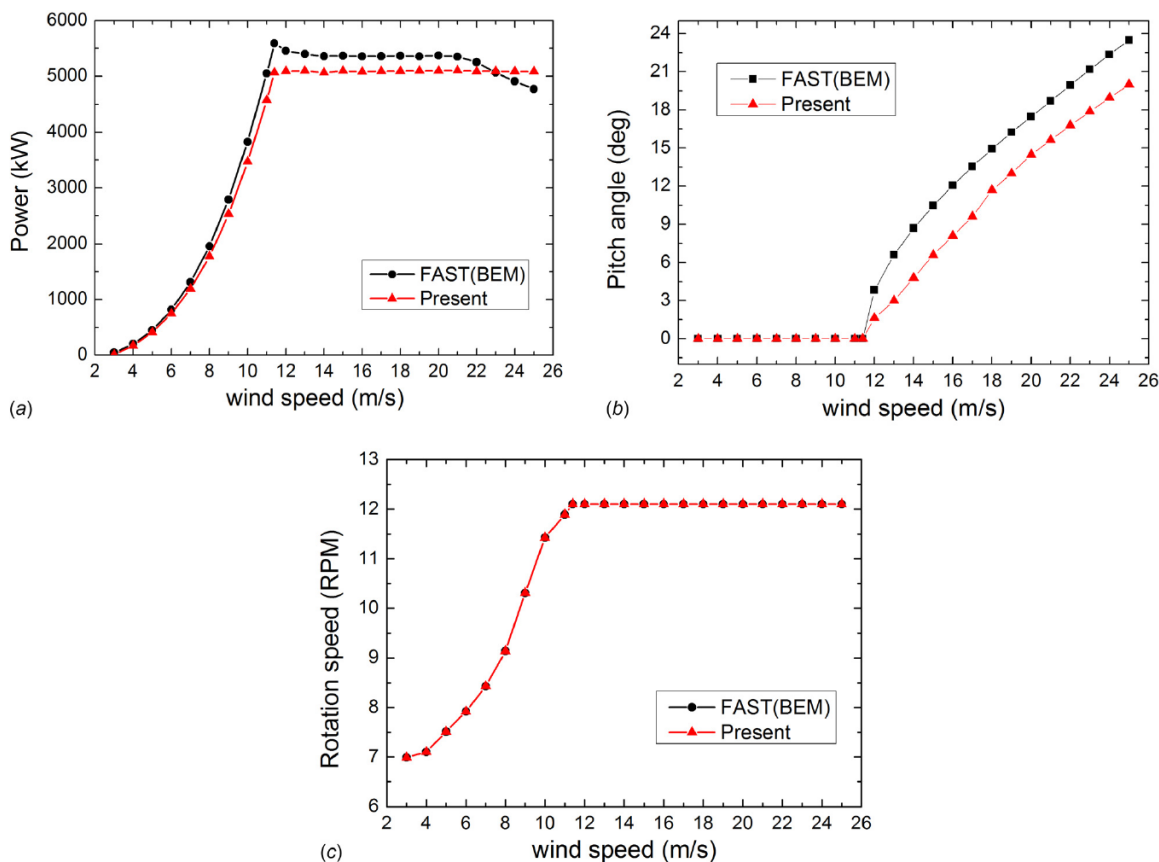


Fig. 13. Rigid and morphing blade performance comparisons across all V for $\beta = 9^\circ$.

Εικόνα 13. Σύγκριση της αεροδυναμικής απόδοσης άκαμπτων και εύκαμπτων (morphing) πτερυγίων για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου και γωνίες βήματος.

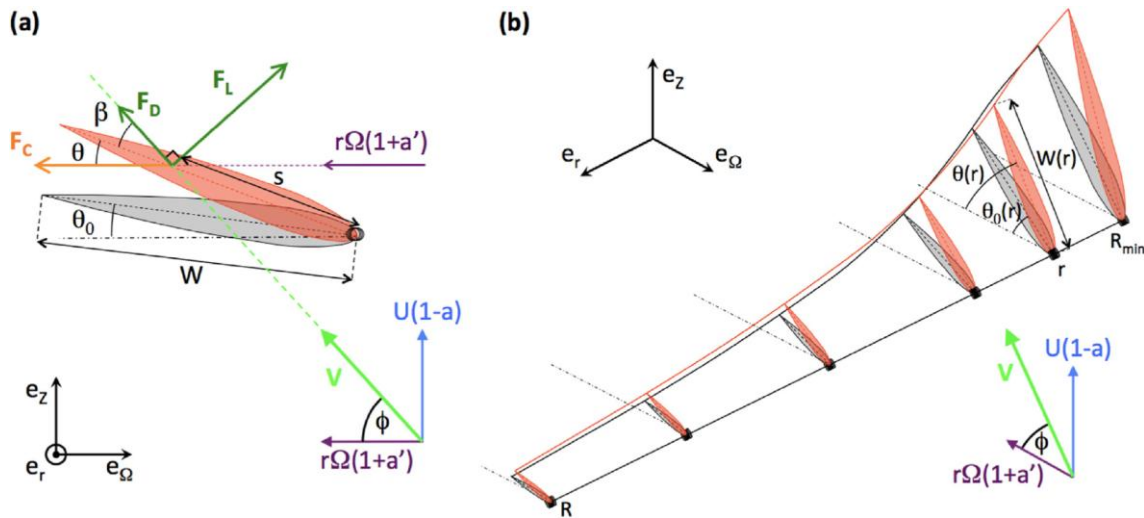
Ο Xiaocheng Zhu και οι συνεργάτες του (2019) [15] διερεύνησαν την επίδραση της ευκαμψίας των πτερυγίων στα αεροδυναμικά φορτία, στην παραγόμενη ισχύ και στις ρυθμίσεις του συστήματος pitch των ανεμογεννητριών, με στόχο την κατανόηση της αεροελαστικής απόκρισης υπό μεγάλες παραμορφώσεις. Για την ανάλυση ανέπτυξαν ένα προηγμένο αεροελαστικό μοντέλο που συνδύαζε το μοντέλο ελεύθερου στροβιλώδους ίχνους (FWVL) για τον αεροδυναμικό υπολογισμό, με τη γεωμετρικά ακριβή θεωρία δοκών (GEBT) για τη δομική απόκριση, το οποίο εφαρμόστηκε στην ανεμογεννήτρια αναφοράς NREL 5 MW. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι στρεπτικές παραμορφώσεις εξαρτώνται άμεσα από τις αεροδυναμικές ροπές στρέψης και από τη σχετική θέση του αεροδυναμικού κέντρου ως προς τον ελαστικό άξονα του πτερυγίου. Διαπιστώθηκε ότι η κάμψη είναι εντονότερη σε ονομαστικές ταχύτητες ανέμου, ενώ η στρέψη προς αποπτέρωση (feather) αυξάνεται προοδευτικά σε ταχύτητες άνω του ονομαστικού εύρους, οδηγώντας σε μείωση της παραγόμενης ισχύος λόγω παθητικής μείωσης της γωνίας προσβολής. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι η ευκαμψία μειώνει τις απαιτούμενες γωνίες pitch για τη διατήρηση σταθερής ισχύος, υποδεικνύοντας ότι οι ελαστικές παραμορφώσεις μπορούν να συνεισφέρουν παθητικά στη

ρύθμιση φορτίων και απόδοσης. Συνολικά, η μελέτη κατέδειξε τη σημασία της ακριβούς μοντελοποίησης της ευκαμψίας για την κατανόηση της αεροελαστικής συμπεριφοράς και ανέδειξε τον ρόλο της ως δυνητικού μηχανισμού παθητικού ελέγχου.



Εικόνα 14. Σύγκριση αεροδυναμικής απόδοσης της ανεμογεννήτριας NREL 5 MW με άκαμπτα και εύκαμπτα πτερύγια.

Οι V. Cognet, S. Courrech du Pont και B. Thiria (2020) [16] διερεύνησαν τη βελτιστοποίηση υλικών για εύκαμπτα, βιο-εμπνευσμένα πτερύγια ανεμογεννητριών. Η μελέτη τους βασίστηκε στην ιδέα ότι οι αεροδυναμικές και φυγόκεντρες δυνάμεις μπορούν να κάμπτουν το πτερύγιο κατά μήκος του χορδή, επιτυγχάνοντας έτσι μια παθητική ρύθμιση του pitch χωρίς την ανάγκη ενεργών μηχανισμών. Οι ερευνητές ανέπτυξαν μια γενική μέθοδο που στηρίζεται σε καθολικούς αδιάστατους αριθμούς (Cauchy και Centrifugal number) για να εντοπίσουν τα βέλτιστα μαλακά υλικά που μεγιστοποιούν την απόδοση, ανεξάρτητα από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας. Συνδύασαν τη θεωρία Blade Element Momentum (BEM) με ένα μοντέλο ελατηρίου-στρέψης για να προσομοιώσουν την παραμόρφωση του πτερυγίου.



Εικόνα 15. Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου παθητικής στρέψης εύκαμπτου πτερυγίου.

Εφαρμόζοντας το μοντέλο σε γεωμετρία μεγάλης ανεμογεννήτριας της Βόρειας Θάλασσας, έδειξαν ότι τα εύκαμπτα πτερύγια μπορούν να αυξήσουν την παραγόμενη ισχύ έως και 35%, ενώ παράλληλα είναι 5-20% ελαφρύτερα από τα συμβατικά άκαμπτα πτερύγια. Ένα σημαντικό εύρημα είναι ότι η βέλτιστη επιλογή υλικών είναι ανεξάρτητη της κλίμακας, κάτι που επιτρέπει δοκιμές σε μικρές ανεμογεννήτριες για την εξαγωγή αποτελεσμάτων που ισχύουν και για μεγαλύτερες. Η εργασία αυτή υπογράμμισε ότι η χρήση παθητικών μηχανισμών ευκαμψίας μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποδοτικότητα και να μειώσει την πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου.

Ο Xingwei Zhao και οι συνεργάτες του (2025) [17] παρουσίασαν μια μελέτη που εστιάζει στην απόδοση της τεχνολογίας BTC για την παθητική μείωση φορτίων σε μεγάλα εύκαμπτα πτερύγια ανεμογεννητριών. Με αφορμή τη συνεχή αύξηση του μεγέθους των πτερυγίων, η οποία συνοδεύεται από υψηλότερες καταπονήσεις, οι συγγραφείς εξέτασαν πώς η ανισοτροπία των σύνθετων υλικών μπορεί να αξιοποιηθεί ώστε τα πτερύγια να στρέφονται ελεγχόμενα υπό φορτίσεις κάμψης, μειώνοντας έτσι τη γωνία προσβολής και τα αεροδυναμικά φορτία. Για την ανάλυση ανέπτυξαν ένα αεροελαστικό μοντέλο που συνδύαζε τη μέθοδο Blade Element Momentum (BEM) με τη γεωμετρικά ακριβή θεωρία δοκών (GEBT) και το εφάρμοσαν στην ανεμογεννήτρια αναφοράς IEA 15 MW υπό τυπικές συνθήκες τυρβώδους ανέμου.

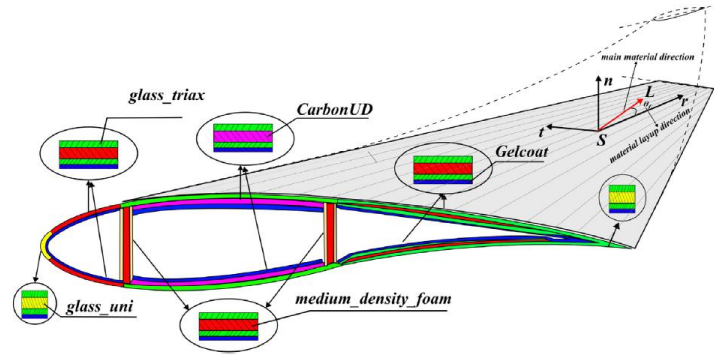
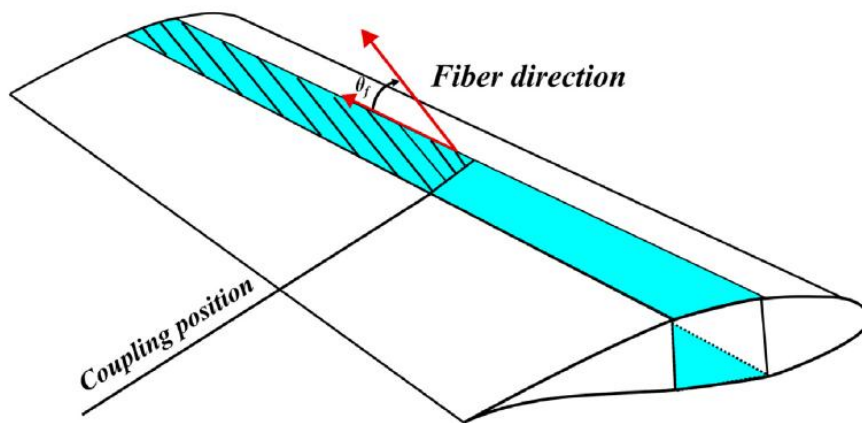


Fig. 4. Schematic diagram of blade structure and layup.

Εικόνα 16. Σχηματική απεικόνιση της εσωτερικής δομής και των στρώσεων υλικών (layup) πτερυγίου ανεμογεννήτριας.

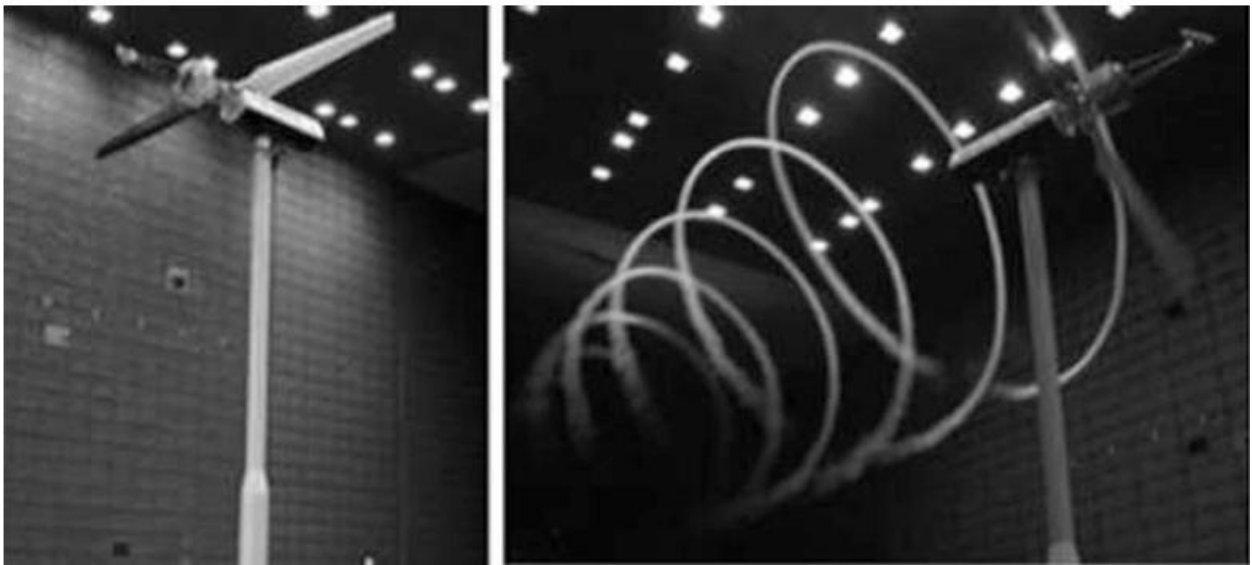
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της γωνίας τοποθέτησης των ινών (fiber off-axis angle) καθώς και η μετατόπιση της θέσης όπου ξεκινά η σύζευξη κάμψης - στρέψης προς το άκρο του πτερυγίου ενισχύουν τη μείωση των φορτίων στη ρίζα, αν και συνοδεύονται από μείωση της παραγόμενης ισχύος. Ενδιαφέρον εύρημα της μελέτης ήταν ότι η εισαγωγή μιας αρνητικής προκαταβολικής στρέψης (pre-twist) μπορεί να αντισταθμίσει μερικώς την απώλεια ισχύος και ταυτόχρονα να ενισχύσει τη μείωση των φορτίων. Η μελέτη καταλήγει ότι ο συνδυασμός προκαταβολικής στρέψης και bend-twist coupling μπορεί να χρησιμοποιηθεί στρατηγικά ώστε να βελτιωθεί η κατανομή φορτίων και να ενισχυθεί η συνολική απόδοση μεγάλων εύκαμπτων πτερυγίων, προσφέροντας μια αποδοτική και παθητική λύση για αύξηση της αξιοπιστίας και της διάρκειας ζωής τους.



Εικόνα 17. Γωνία τοποθέτησης των ινών και θέση τους σε πτερύγιο με σύζευξη κάμψης-στρέψης.

Το 2016, στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος MARE-WINT (Marie Curie Initial Training Network), ο Stäblein και οι συνεργάτες του [18] παρουσίασαν μια ολοκληρωμένη μελέτη, εστιάζοντας στη χρήση της σύζευξης κάμψης-στρέψης (BTC) ως μηχανισμού παθητικού ελέγχου φορτίων σε μεγάλα πτερύγια. Αναπτύχθηκε προηγμένο αεροελαστικό υπολογιστικό πλαίσιο που συνδύαζε ανάλυση εγκάρσιας διατομής, στοιχεία δοκού τύπου Timoshenko με co-rotational διατύπωση και δυνατότητα λήψης γεωμετρικών μη-γραμμικοτήτων, επιτρέποντας την ακριβή πρόβλεψη της αλληλεπίδρασης κάμψης και στρέψης. Η θεωρητική ανάλυση συνοδεύτηκε από πειραματική διερεύνηση σε ειδικά δοκίμια και τμήματα πτερυγίων, ώστε να επαληθευτεί η επαγόμενη στρέψη υπό φορτία κάμψης.

Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι η κατάλληλη διάταξη στρώσεων σύνθετων υλικών και η χρήση προκαταβολικής στρέψης (pre-twist) μπορούν να επιτύχουν ελεγχόμενη στρέψη του πτερυγίου προς nose-down, μειώνοντας τη γωνία προσβολής σε ισχυρούς ανέμους. Οι δοκιμές έδειξαν ουσιαστική μείωση φορτίων κόπωσης και ακραίων καταπονήσεων στη ρίζα χωρίς υποβάθμιση της αεροδυναμικής απόδοσης, αναδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα του BTC ως παθητική στρατηγική αποφόρτισης. Συνολικά, το έργο απέδειξε ότι η ενσωμάτωση BTC σε μεγάλα πτερύγια είναι τεχνικά εφικτή και μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών με χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τα ενεργητικά συστήματα ελέγχου.

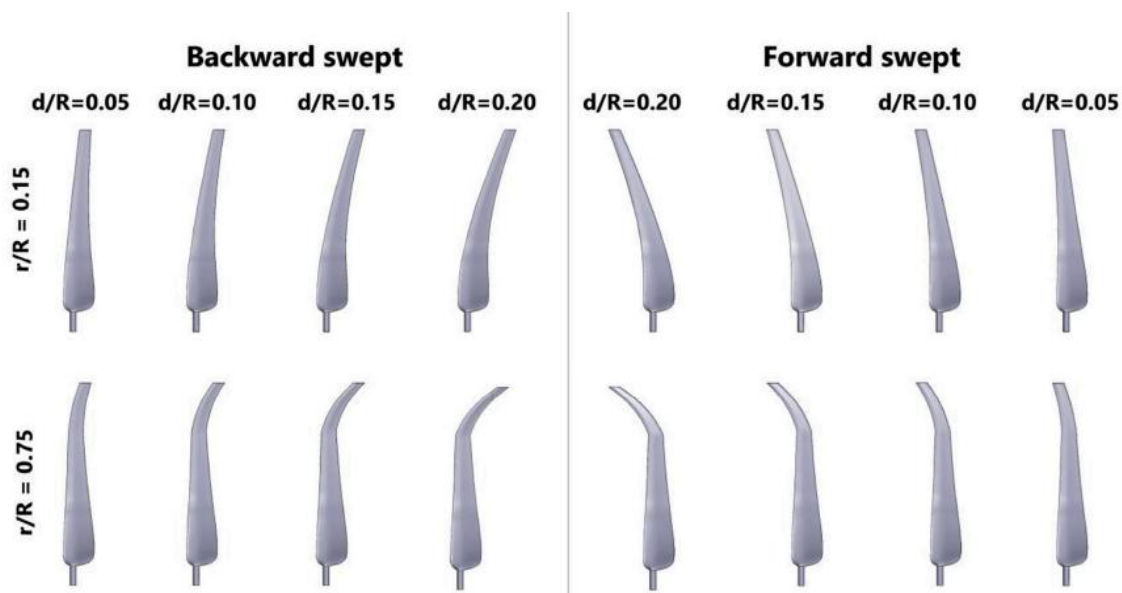


Εικόνα 18. Πειραματική δοκιμή πτερυγίου ανεμογεννήτριας σε αεροσήραγγα με ορατοποίηση ιχνών δίνης.

2.3 Καμπύλα Πτερύγια

Η ανάπτυξη καμπύλων πτερυγίων ανεμογεννητριών (curved ή swept blades) συνδέεται στενά με την ανάγκη μείωσης των αεροδυναμικών φορτίων, βελτίωσης του αεροδυναμικού ελέγχου του συστήματος, αύξησης της αξιοπιστίας και βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης σε ολοένα μεγαλύτερες διαμέτρους δρομέων. Η θεωρητική αφετηρία εντοπίζεται στην αεροναυπηγική, όπου από τη δεκαετία του 1950 η καμπυλότητα πτερυγίων (wing sweep) χρησιμοποιήθηκε για την καθυστέρηση φαινομένων συμπίεστικότητας και τον περιορισμό των στροβιλισμών άκρου (tip vortices). Στην αιολική ενέργεια, η έννοια εισήχθη μεταγενέστερα, με τις πρώτες αναφορές να εμφανίζονται τη δεκαετία του 1980 (Liebst, 1986) [12], και να αποκτούν ιδιαίτερη σημασία μετά το 2000, καθώς οι διάμετροι των δρομέων ξεπέρασαν τα 60 m και τα φορτία κόπωσης έγιναν κρίσιμο ζήτημα σχεδιασμού.

Η καμπυλότητα των πτερυγίων διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες: την οπισθοκλινή (backward sweep) και την προσθιοκλινή. Η πρώτη αποτελεί τη βασική επιλογή στις περισσότερες ερευνητικές και βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς υπό συνθήκες φόρτισης προκαλεί στρέψη προς αποπτέρωση, δηλαδή μείωση της γωνίας προσβολής. Η συμπεριφορά αυτή οδηγεί σε παθητική μείωση των αεροδυναμικών φορτίων και βελτίωση της αντοχής σε κόπωση. Για τον λόγο αυτό, η συγκεκριμένη γεωμετρία χρησιμοποιείται εκτεταμένα τόσο σε ακαδημαϊκά πρωτότυπα όσο και σε εμπορικά έργα μεγάλης κλίμακας.



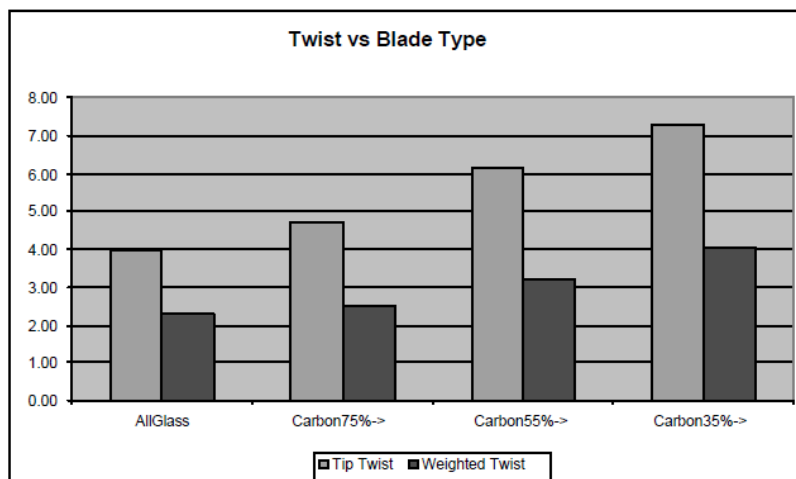
Εικόνα 19. Ενδεικτικά γεωμετρικά προφίλ πτερυγίων με οπισθοκλινή (backward) και προσθιοκλινή (forward) καμπυλότητα.

Αντίθετα, η προσθιοκλινής καμπυλότητα έχει ερευνηθεί λιγότερο, καθώς ενέχει σημαντικό κίνδυνο στρεπτικής αστάθειας, δηλαδή ανεξέλεγκτης αύξησης της στρέψης σε υψηλά φορτία. Ωστόσο, σε θεωρητικό επίπεδο παρουσιάζει ενδιαφέρον για συγκεκριμένες εφαρμογές. Έχει υποστηριχθεί ότι το forward sweep μπορεί να καθυστερεί την αποκόλληση της ροής σε χαμηλές ταχύτητες, βελτιώνοντας την εκκίνηση της ανεμογεννήτριας και αυξάνοντας την απόδοση σε περιοχές χαμηλού φορτίου [19].

Συνολικά, η διεθνής βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι η καμπυλότητα δεν αποτελεί απλώς ένα αεροδυναμικό χαρακτηριστικό, αλλά ένα εργαλείο αεροελαστικού σχεδιασμού. Μέσω της παθητικής αλληλεπίδρασης γεωμετρίας και φορτίων, επιτρέπει την αύξηση της αξιοπιστίας και της ενεργειακής απόδοσης των ανεμογεννητριών, μειώνοντας παράλληλα τις μηχανικές καταπονήσεις και τις ανάγκες για ενεργό έλεγχο.

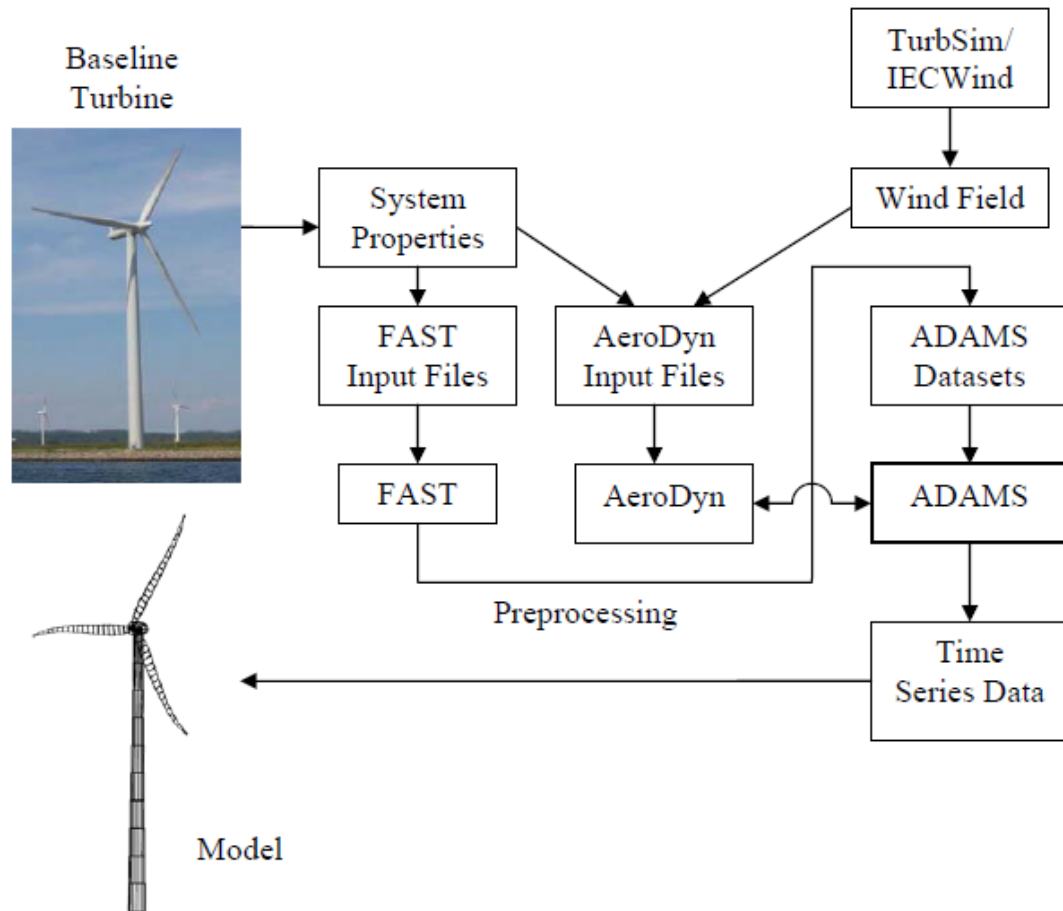
Ο Mike Zuteck (2002) [12] διερεύνησε τη δυνατότητα επίτευξης επαγόμενης στρέψης σε καμπύλα πτερύγια ανεμογεννητριών στην κάτοψη, προτείνοντάς την ως απλούστερη εναλλακτική σε πιο σύνθετες τεχνικές, όπως η ειδική διάταξη ινών στα φέροντα στοιχεία του πτερυγίου. Στόχος της μελέτης ήταν η εκτίμηση, με χρήση υπολογιστικών εργαλείων σχεδιασμού, του μεγέθους της στρεπτικής παραμόρφωσης που μπορεί να προκληθεί σε ένα τυπικό πτερύγιο ανεμογεννήτριας μήκους 30 m, μεταβάλλοντας τόσο τη γεωμετρία της κάτοψης όσο και το υλικό των πέλματων της φέρουσας δοκού (spar caps). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφαρμογή καμπύλης εκθετικής μορφής στην κάτοψη, σε συνδυασμό με τη χρήση υλικών υψηλής ακαμψίας, όπως ανθρακονήματα, στις εξωτερικές περιοχές του πτερυγίου, και με ταυτόχρονη μείωση της χορδής στις ακροπερυγίες ζώνες, μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη στρεπτική απόκριση του πτερυγίου. Συγκεκριμένα, για μια ρεαλιστική καμπύλωση της τάξης του 1m στο άκρο ενός πτερυγίου 30m, η επαγόμενη στρέψη έφτασε περίπου τις 4° με χρήση υαλοϋφάσματος, ενώ με κατασκευή των νευρώσεων από ανθρακονήματα άγγιξε τις 7°. Η μελέτη καταλήγει ότι η γεωμετρική καμπύλωση της κάτοψης μπορεί να αποτελέσει ένα πρακτικό μέσο επίτευξης προσαρμοστικής στρέψης σε μεγάλα πτερύγια, επιτρέποντας την αποφόρτιση των ακροπερυγίων ή την αύξηση της διαμέτρου του ρότορα χωρίς υπέρβαση των επιτρεπόμενων ορίων φόρτισης της κατασκευής.

Blade Type	Tip Twist (deg.)	Weighted Twist (deg.)
AllGlass	3.95	2.28
Carbon75%->	4.70	2.48
Carbon55%->	6.15	3.20
Carbon35%->	7.30	4.03



Εικόνα 20. Σύγκριση επαγόμενης στρέψης (tip twist και weighted twist) για πτερύγια με διαφορετική αναλογία ανθρακονημάτων στα spar caps.

Ο Scott Larwood και ο Mike Zuteck (2006) [12], [20] ανέπτυξαν ένα δυναμικό μοντέλο αεροελαστικής ανάλυσης για καμπύλα πτερύγια, στο πλαίσιο του προγράμματος DOE Low Wind Speed Technology (LWST). Ο στόχος ήταν να εξεταστεί κατά πόσο η χρήση καμπύλων πτερυγίων μπορεί να αυξήσει την παραγωγή ενέργειας σε περιοχές χαμηλού ανέμου, χωρίς να επιβαρύνει τα φορτία της ανεμογεννήτριας. Στο μοντέλο τους, το πτερύγιο έχει σχεδιαστεί ώστε τα αεροδυναμικά φορτία στην εξωτερική περιοχή να προκαλούν παθητική στρέψη του ακροπτερυγίου που μειώνει τη γωνία προσβολής (feather) και κατά συνέπεια τα αεροδυναμικά και δομικά φορτία. Η ανάλυση αφορούσε ένα πτερύγιο ακτίνας 28 m, σχεδιασμένο για δοκιμή σε ανεμογεννήτρια διαμέτρου 50 m. Χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία του NREL FAST και AeroDyn, σε συνδυασμό με το MSC.ADAMS, ώστε να μοντελοποιηθεί με ακρίβεια η αεροδυναμική-δομική αλληλεπίδραση και η πλήρης δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα καμπύλα πτερύγια παρουσίασαν σαφώς την επιθυμητή συμπεριφορά περιστροφής και μείωσης φορτίων, ενώ η καμπύλη ισχύος τους παρέμεινε πρακτικά ανεπηρέαστη. Μάλιστα, σε ταχύτητες κάτω από την ονομαστική, το καμπύλο πτερύγιο έδειξε σημαντική αύξηση παραγόμενης ισχύος σε σχέση με το πτερύγιο αναφοράς μήκους 50 μέτρων. Με αυτό τον τρόπο, η μελέτη απέδειξε θεωρητικά ότι το sweep μπορεί να λειτουργήσει ως ένας αποτελεσματικός παθητικός μηχανισμός για αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και μείωση φορτίων, προετοιμάζοντας το έδαφος για την ανάπτυξη του πρωτοτύπου STAR blade που κατασκευάστηκε λίγα χρόνια αργότερα.



Εικόνα 21. Διάγραμμα ροής του μοντέλου αεροελαστικής ανάλυσης Larwood & Zuteck (2006).

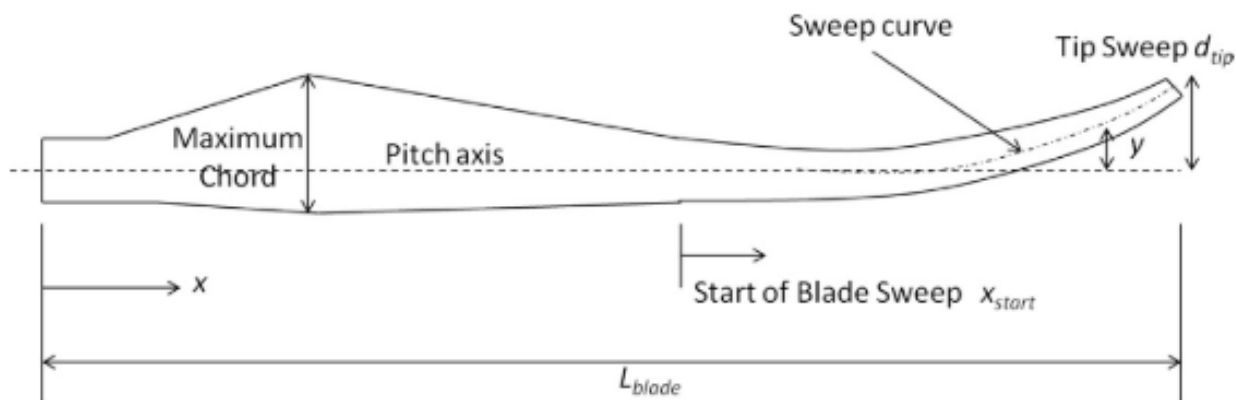
Οι Knight & Carver Wind Group, σε συνεργασία με τα Sandia National Laboratories, [21] ανέπτυξαν και δοκίμασαν το πρωτότυπο πτερύγιο Sweep-Twist Adaptive Rotor (STAR), με στόχο τη μείωση φορτίων και την αύξηση της ενεργειακής παραγωγής μέσω παθητικού ελέγχου. Το STAR σχεδιάστηκε με χαρακτηριστική καμπύλωση στην εξωτερική περιοχή του πτερυγίου, ώστε τα αεροδυναμικά φορτία στο άκρο να προκαλούν ελεγχόμενη στρέψη προς αποπτέρωση και έτσι να μειώνουν τα φορτία χωρίς την ανάγκη μηχανισμών ενεργού ελέγχου. Το έργο ξεκίνησε το 2004 στο πλαίσιο του προγράμματος DOE Low Wind Speed Technology (LWST) και περιλάμβανε εκτενείς παραμετρικές μελέτες, υπολογιστικό σχεδιασμό με μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και κατασκευή και στατικές δοκιμές πρωτοτύπων. Το 2008 τοποθετήθηκαν πλήρεις κλίμακας STAR πτερύγια σε ανεμογεννήτρια Zond 750 kW στην Tehachapi της Καλιφόρνιας, όπου πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες δοκιμές πεδίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το νέο πτερύγιο αύξησε την ετήσια ενεργειακή παραγωγή κατά περίπου 10-12% σε σχέση με το συμβατικό Z48,

ενώ ταυτόχρονα διατήρησε ή και μείωσε τις φορτίσεις στη ρίζα. Επιπλέον, οι δοκιμές κόπωσης στο NREL επιβεβαίωσαν ότι το περύγιο μπορούσε να αντέξει σε φορτίσεις ισοδύναμες με 20 χρόνια λειτουργίας χωρίς ζημιές. Η εργασία αυτή αποτέλεσε το πρώτο επιτυχημένο παράδειγμα πλήρους κλίμακας εφαρμογής καμπύλων περυγίων και κατέδειξε ότι η τεχνολογία μπορεί να προσφέρει ουσιαστικά οφέλη σε απόδοση και διάρκεια ζωής χωρίς αύξηση της πολυπλοκότητας.



Εικόνα 22. Ανεμογεννήτρια του STAR Project.

Το 2014, ο Scott Larwood μαζί με τους συνεργάτες του [22] πραγματοποίησαν μελέτη για τον σχεδιασμό περυγίων ανεμογεννητριών με καμπύλη (swept) γεωμετρία. Η εργασία τους βασίστηκε στο περύγιο της ανεμογεννήτριας STAR (Sweep-Twist Adaptive Rotor), το οποίο είχε εγκατασταθεί σε μηχανή Zond Z-48 ισχύος 750 kW στο Tehachapi (ΗΠΑ) και είχε δείξει αύξηση παραγωγής περίπου 12% σε σχέση με τα ευθύγραμμα περύγια.



Εικόνα 23. Γεωμετρικές παράμετροι καμπύλου (swept) πτερυγίου, βάσει του σχεδιασμού STAR.

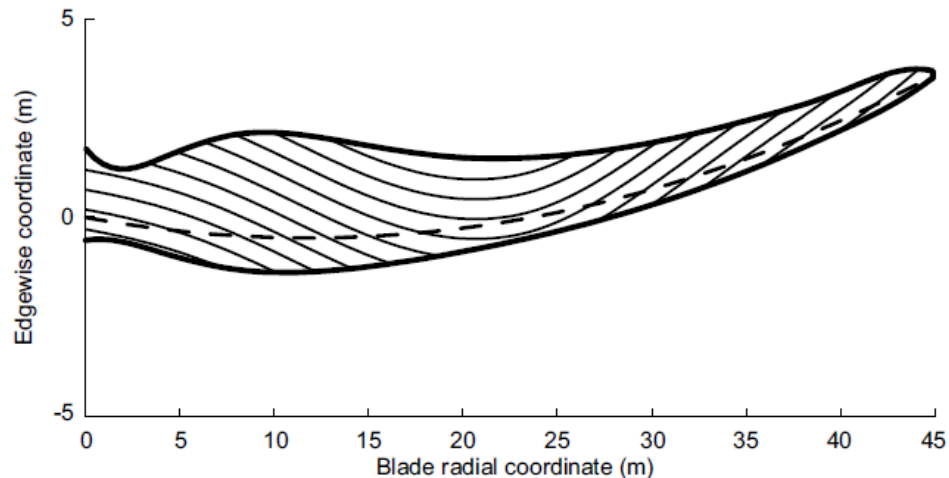
Στη δημοσίευση αυτή οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν το μοντέλο πτερυγίου STAR7d, δηλαδή τη γεωμετρία και τις μηχανικές ιδιότητες του καμπυλωτού πτερυγίου STAR, ως βασικό σημείο αναφοράς για την παραμετρική μελέτη. Διαπιστώθηκε ότι η καμπύλωση στην άκρη του πτερυγίου (tip sweep) είχε τη μεγαλύτερη επίδραση τόσο στην ετήσια παραγωγή ενέργειας όσο και στα μηχανικά φορτία. Στη συνέχεια σχεδίασαν καμπύλα πτερύγια για ανεμογεννήτριες 1,5 MW, 3 MW και 5 MW. Τα σχέδια για τα πτερύγια 1,5 MW και 3 MW πέτυχαν αύξηση της παραγωγής κατά περίπου 5% χωρίς αύξηση των φορτίων, ενώ για τα πτερύγια 5 MW εμφανίστηκε αστάθεια στρέψης σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, γεγονός που δείχνει ότι για μεγαλύτερες μηχανές απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση. Τα αποτελέσματα προέκυψαν μέσω αεροελαστικών προσομοιώσεων στο λογισμικό CurveFAST, με την εισαγωγή των ιδιομορφών κάμψης και στρέψης του πτερυγίου. Οι ιδιομορφές αυτές, καθώς και τα χαρακτηριστικά δυσκαμψίας της δομής, υπολογίστηκαν πρωτογενώς στο εργαλείο CurveFEM, όπου η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων περιορίστηκε αποκλειστικά στον προσδιορισμό των δομικών αυτών παραμέτρων. Η ανάλυση ολοκληρώθηκε με την εκτέλεση προσομοιώσεων σε στοχαστικά πεδία τυρβώδους ανέμου μέσω του λογισμικού TurbSim, επιτρέποντας τον υπολογισμό της Ετήσιας Ενεργειακής Παραγωγής (AEP) και των Ισοδύναμων Φορτίων Κόπωσης (DEL).

Πίνακας 1. Αποτελέσματα των τριών κλιμακωμένων μοντέλων καμπύλων πτερυγίων.

Scaled model results. Twist in Curve5000 with sweep was unstable above rated wind speed.

Model	Curve1500	Curve3000	Curve5000
Baseline radius, m	35.5	49.5	63.0
Stretched radius, m	39.15	55.35	70.44
Maximum chord, m	2.8	3.96	4.652
Tip sweep, m	2.8	2.376	—
GJ modification	74% lower	same as baseline	—
Percent AEP over baseline	6.0%	5.5%	—
Percent flap DEL under baseline ($m = 10$)	15.0%	5.8%	—
Percent edge DEL over baseline ($m = 10$)	1.0%	1.8%	—

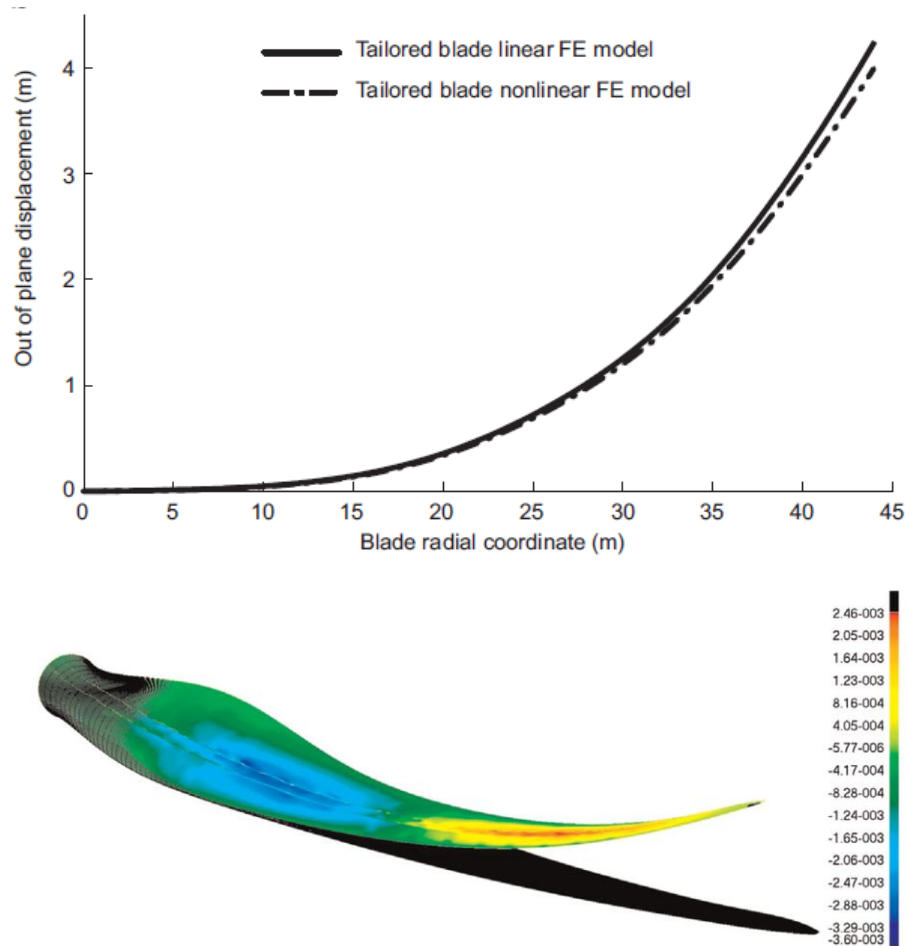
Ο Capuzzi και οι συνεργάτες του (2015) [23] παρουσίασαν τον σχεδιασμό ενός νέου αεροελαστικά προσαρμοσμένου πτερυγίου ανεμογεννήτριας, αξιοποιώντας την ανισοτροπία των σύνθετων υλικών σε συνδυασμό με γεωμετρία τύπου sweep για παθητικό έλεγχο των φορτίων. Στη μελέτη τους, ανέπτυξαν ένα υπολογιστικό πλαίσιο που συνέδεε τη γεωμετρικά ακριβή θεωρία δοκών (GEBT) για την προσομοίωση της δομικής απόκρισης με τη μέθοδο Blade Element Momentum (BEM) για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών φορτίων.



Εικόνα 24. Μεταβολή του προσανατολισμού των ινών κατά μήκος της ακτινικής διεύθυνσης του πτερυγίου με γεωμετρία sweep.

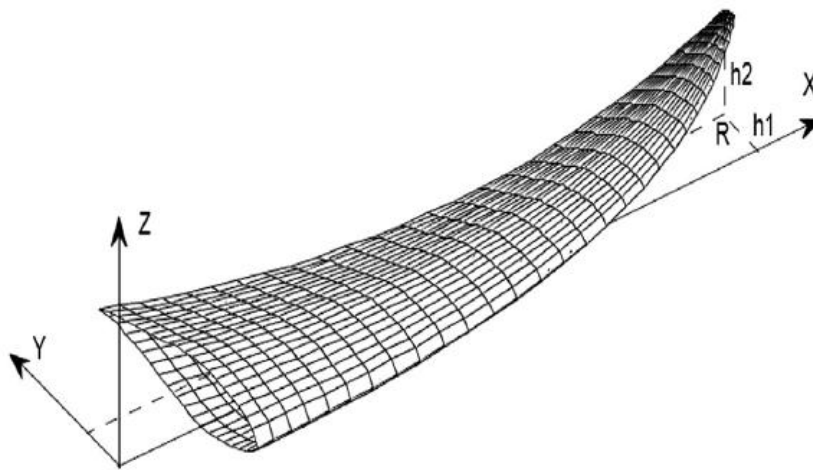
Μέσα από αυτή την προσέγγιση κατέστη δυνατή η ενσωμάτωση συγκεκριμένων επιπέδων σύζευξης κάμψης - στρέψης στον σχεδιασμό του πτερυγίου, έτσι ώστε η κάμψη να προκαλεί

ελεγχόμενη στρέψη προς αποπτέρωση (feather). Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι το προτεινόμενο πτερύγιο επιτυγχάνει σημαντική μείωση των φορτίων στη ρίζα υπό συνθήκες τυρβώδους ανέμου, χωρίς αξιοσημείωτη απώλεια στην παραγόμενη ισχύ. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι ο συνδυασμός οπισθοκλίσης καμπύλης γεωμετρίας (sweep) με σύζευξη κάμψης στρέψης προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και αυξημένες δυνατότητες στον σχεδιασμό σε σύγκριση με την αποκλειστική αξιοποίηση της ανισοτροπίας των υλικών. Η μελέτη αυτή τεκμηριώνει ότι τα αεροελαστικά προσαρμοσμένα πτερύγια (aeroelastically tailored blades) μπορούν να αποτελέσουν μια πολλά υποσχόμενη λύση για τις μελλοντικές ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας, παρέχοντας έναν αποδοτικό και παθητικό μηχανισμό ελέγχου φορτίων.



Εικόνα 25. Εκτός επιπέδου μετατόπιση κατά μήκος της ακτίνας του πτερυγίου για γραμμικό και μη γραμμικό μοντέλο FE (επάνω) και κατανομή εντός επιπέδου διατμητικής παραμόρφωσης υπό ακραίο flapwise φορτίο (κάτω).

Ο Shen και οι συνεργάτες του (2015) [24] παρουσίασαν μια μελέτη βελτιστοποίησης της γεωμετρίας πτερυγίων ανεμογεννήτριας, εστιάζοντας στον ρόλο του sweep και του Dihedral στην αεροδυναμική και αεροελαστική συμπεριφορά. Χρησιμοποίησαν το πτερύγιο αναφοράς NREL Phase VI και εφάρμοσαν το υπολογιστικό μοντέλο Weissinger-L lifting-surface σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης NSGA-II, διατηρώντας σταθερές τις κατανομές χορδής και στρέψης. Με αυτόν τον τρόπο διερεύνησαν παραμετρικά πώς η καμπύλη γεωμετρία και η εγκάρσια κλίση του πτερυγίου (Dihedral) επηρεάζουν την απόδοση και τα φορτία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο σχεδιασμός οπισθοκλίσης καμπύλης γεωμετρίας σε συνδυασμό με θετική εγκάρσια κλίση μπορεί να βελτιώσει ουσιαστικά την ενεργειακή απόδοση. Συγκεκριμένα, εντοπίστηκαν βέλτιστες διαμορφώσεις με αύξηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας έως και 11,82% με αντίστοιχη αύξηση της ώσης κατά 2,11%, ή εναλλακτικά μείωση της ώσης κατά 1,48% συνοδευόμενη από αύξηση της παραγωγής κατά 5,87%, σε σχέση με το baseline πτερύγιο. Η μελέτη ανέδειξε επίσης ότι οι δίνες άκρου που δημιουργούνται από την εγκάρσια κλίση επηρεάζουν ολόκληρο το άνοιγμα, ενώ εκείνες από το sweep επιδρούν κυρίως στην περιοχή κοντά στην ακροπτερύγια.

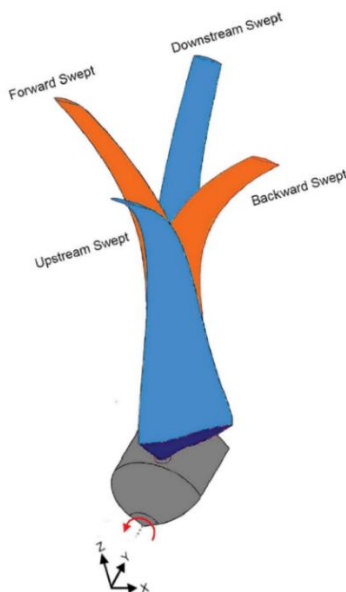


Εικόνα 26. Σχηματική απεικόνιση καμπύλου πτερυγίου με sweep.

Το 2017 Οι M.G. Khalafallah, A.M. Ahmed και M.K. Emam μελέτησαν [25], μέσω υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), την επίδραση της καμπύλης γεωμετρίας στην απόδοση οριζόντιας ανεμογεννήτριας (HAWT). Ως ανεμογεννήτρια αναφοράς χρησιμοποιήθηκε πειραματικό μοντέλο τριών πτερυγίων, διαμέτρου 0,9 m, με προφίλ NREL S826. Η αεροδυναμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το ANSYS FLUENT χρησιμοποιώντας τις RANS εξισώσεις και το μοντέλο τύρβης k- ω SST, ενώ η πλέξη του υπολογιστικού πεδίου περιλάμβανε περίπου 1,8 εκατ. στοιχεία,

επαρκή για ανεξαρτησία πλέγματος. Εξετάστηκαν τέσσερις κατευθύνσεις sweep (forward, backward, upstream και downstream), διάφορες συναρτήσεις καμπυλότητας και σημεία έναρξης της καμπύλωσης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα downstream-swept πτερύγια παρουσίασαν τη μεγαλύτερη αύξηση του συντελεστή ισχύος (C_p) - έως +3,5% σε σχέση με το ευθύγραμμο πτερύγιο - ιδιαίτερα όταν η καμπύλωση ξεκινούσε περίπου στο 25% του μήκους του πτερυγίου. Ωστόσο, η βελτίωση αυτή συνοδεύτηκε από αυξημένη αξονική ώση, γεγονός που απαιτεί προσοχή στον σχεδιασμό λόγω μεγαλύτερης εκτροπής του πτερυγίου προς τα κατάντη. Όσον αφορά τα πτερύγια με θετική σάρωση (forward-swept), η πιο αποδοτική διαμόρφωση ήταν εκείνη με έναρξη καμπύλωσης στο 25% της ακτίνας (forward 10f). Το συγκεκριμένο πτερύγιο παρουσίασε μικρή αλλά θετική αύξηση του συντελεστή ισχύος C_p , περίπου +0,7% σε σύγκριση με το βασικό ευθύγραμμο πτερύγιο, διατηρώντας σχεδόν την ίδια ώση στις περισσότερες τιμές του λόγου ταχύτητας άκρου (TSR). Αντίθετα, άλλες παραλλαγές forward-sweep, όπως με έναρξη καμπύλωσης στο 15% ή στο 50% της ακτίνας, εμφάνισαν χαμηλότερες τιμές C_p από το πτερύγιο αναφοράς. Συνοψίζοντας, η έρευνα ανέδειξε ότι τα downstream-swept πτερύγια προσφέρουν τη μεγαλύτερη αύξηση ισχύος, ιδιαίτερα σε υψηλές τιμές TSR, ενώ η παραλλαγή forward-sweep 10f μπορεί να προσφέρει ένα περιορισμένο, αλλά θετικό κέρδος ισχύος χωρίς σημαντική αύξηση στην ώση.



Εικόνα 27. Τύποι καμπυλότητας πτερυγίων που μελετήθηκαν.

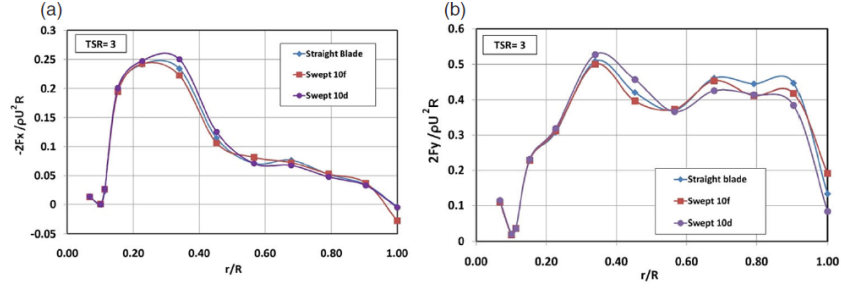


Figure 13. Dimensionless force distribution along the blade at $TSR = 3$ (a) tangential and (b) streamwise directions.

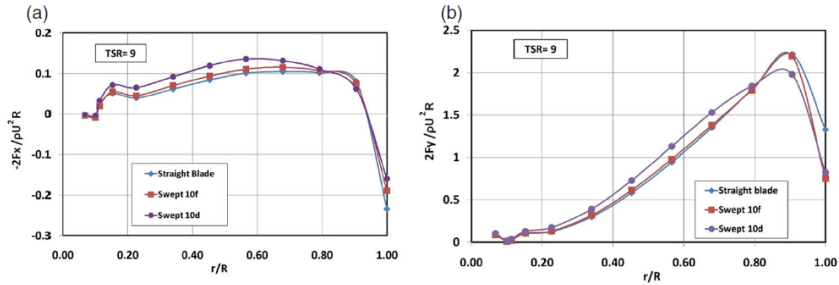
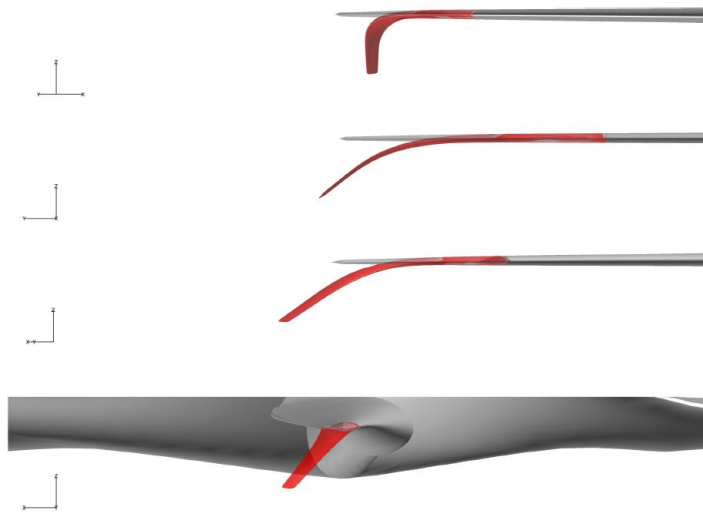


Figure 14. Dimensionless force distribution along the blade at $TSR = 9$ (a) tangential and (b) streamwise directions.

Εικόνα 28. Κατανομή αδιάστατων δυνάμεων κατά μήκος του πτερυγίου για διαφορετικές διαμορφώσεις sweep για λόγους $TSR = 3$ και 9.

Το 2017, Οι Madsen, Zahle, Horcas, Barlas και Sørensen [26] παρουσίασαν μια προσέγγιση σχεδιασμού του ακροπτερυγίου ανεμογεννήτριας μεγάλης κλίμακας με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Στόχος της μελέτης ήταν να βρεθεί μια βελτιωμένη γεωμετρία για το άκρο του πτερυγίου που θα μπορούσε να αυξήσει την αεροδυναμική απόδοση της μηχανής χωρίς να επιβαρυνθούν τα δομικά φορτία κάμψης του πτερυγίου. Η μεθοδολογία βασίστηκε στον επιλύτη ροής EllipSys3D, ο οποίος επιλύει τις εξισώσεις Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), σε συνδυασμό με το εργαλείο βελτιστοποίησης FlowOpt, το οποίο επιτρέπει την παραμετρική τροποποίηση της τοπικής γεωμετρίας του ακροπτερυγίου. Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης επιτράπηκε να μεταβληθεί η επιμήκυνση του ακροπτερυγίου καθώς και η θέση του προς τις κάθετες κατευθύνσεις (flapwise) και την εγκάρσια κατεύθυνση (edgewise), αλλά και η τοπική χορδή και τοπική στρέψη ώστε να επιτευχθεί ο συνδυασμός υψηλής απόδοσης με αποδεκτά φορτία. Για τον υπολογισμό των παραγώγων που απαιτούνται στη βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών, οι οποίες ελέγχθηκαν ως προς την ακρίβειά τους με τη μέθοδο Complex-Step, ώστε να εξασφαλιστούν αξιόπιστα αποτελέσματα. Το πτερύγιο αναφοράς ήταν εντελώς ευθύγραμμο και δεν περιείχε καμπυλότητα στο άκρο. Αντίθετα, η βελτιστοποιημένη γεωμετρία που προέκυψε εισήγαγε ήπια καμπυλωτή μετατόπιση στο ακροπτερύγιο. Το άκρο

επεκτάθηκε ελαφρά προς τα έξω και μετατοπίστηκε περίπου κατά δύο τοις εκατό της ακτίνας τόσο προς την κάθετη κατεύθυνση όσο και προς την εγκάρσια κατεύθυνση, ενώ υπήρξε και μικρή επιμήκυνση της τάξης του 1% της ακτίνας. Η συνδυασμένη αυτή διαμόρφωση, μαζί με την προσαρμογή της τοπικής χορδής και στρέψης, οδήγησε σε αύξηση της ισχύος του ρότορα κατά περίπου 1.1% σε σχέση με το αρχικό πτερύγιο χωρίς sweep, χωρίς να αυξηθούν τα φορτία κάμψης στο μεγαλύτερο τμήμα του πτερυγίου. Η μελέτη καταδεικνύει ότι ο στοχευμένος επανασχεδιασμός του κατά τα άλλα ευθύγραμμου ακροπτερυγίου, με προσεκτικά επιλεγμένη ήπια καμπύλη γεωμετρία, μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση υπαρχόντων ανεμογεννητριών μεγάλης κλίμακας χωρίς να απαιτούνται ουσιαστικές δομικές αλλαγές στο υπόλοιπο πτερύγιο.



Εικόνα 29. Βελτιστοποιημένες γεωμετρίες ακροπτερυγίων με καμπυλότητα.

Οι Barlas, Pirrung και συνεργάτες (2021) [27] μελέτησαν πειραματικά και υπολογιστικά ακροπτερύγια καμπύλης γεωμετρίας (sweep tip), με στόχο την αξιολόγηση της αεροδυναμικής της συμπεριφοράς και τη σύγκριση μοντέλων διαφορετικής υπολογιστικής πιστότητας. Η γεωμετρία του ακροπτερυγίου προέκυψε μέσω διαδικασίας βελτιστοποίησης, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος υπό περιορισμούς φόρτισης. Για την πειραματική διερεύνηση, το μοντέλο εξοπλίστηκε με διαμήκεις ζώνες αισθητήρων πίεσης και δοκιμάστηκε στην αεροσήραγga Poul la Cour του DTU. Η αριθμητική προσομοίωση περιέλαβε τέσσερις κατηγορίες μοντέλων: blade-element, near-wake, lifting-line free-wake και πλήρη επίλυση Navier-Stokes. Η σύγκριση των μετρήσεων με τα υπολογιστικά αποτελέσματα πραγματοποιήθηκε για ένα εύρος γωνιών προσβολής και ταχυτήτων ανέμου αντιπροσωπευτικών των συνθηκών λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το απλοποιημένο μοντέλο blade-element δεν μπορεί να αναπαράγει με ακρίβεια τους μετρούμενους συντελεστές κανονικής δύναμης, ενώ τα πιο προηγμένα μοντέλα (vortex-based και CFD) παρουσιάζουν ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα υπό καθεστώς προσροφημένης ροής (attached flow). Η κατανομή πίεσης και τα αποτελέσματα απεικόνισης ροής συμφωνούν ιδιαίτερα καλά με τις προσομοιώσεις CFD, με μικρότερα επίπεδα σύμπτωσης στην περίπτωση με τεχνητή διέγερση του οριακού στρώματος (tripped). Ωστόσο, παραμένουν αβεβαιότητες σχετικά με την επίδραση του οριακού στρώματος στους τοίχους της σήραγγας και τη συμπεριφορά στη μεταστάθμιση ροής (post-stall).

Οι ίδιοι βασικοί ερευνητές συνέχισαν το 2022 [28] με την πρώτη υπαίθρια δοκιμή σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, χρησιμοποιώντας το rotating rig του DTU, επίσης εξοπλισμένο με αισθητήρες πίεσης. Τα νέα πειραματικά δεδομένα συγκρίθηκαν με τα ίδια είδη μοντέλων και έδειξαν ότι οι vortex-based και CFD προσομοιώσεις αναπαριστούν αξιόπιστα τις μέσες κατανομές κανονικών φορτίων, ενώ το BEM παρουσίασε μεγαλύτερες αποκλίσεις λόγω αδυναμίας περιγραφής τρισδιάστατων φαινομένων στην ακροπερυγική περιοχή και της επίδρασης του root vortex.

Συνολικά, οι δύο αυτές μελέτες δείχνουν ότι τα υψηλότερης πιστότητας υπολογιστικά μοντέλα μπορούν να προβλέψουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά των καμπύλων ακροπερυγίων, ενώ τα απλούστερα εργαλεία όπως το BEM απαιτούν βελτιώσεις για αξιόπιστη χρήση σε τέτοιες γεωμετρίες.



Εικόνα 30. Πειραματική διάταξη για δοκιμή ακροπερυγίου σε αεροσήραγγα (αριστερά) και υπαίθρια δοκιμή του καμπύλου ακροπερυγίου στο rotating rig του DTU (δεξιά).

Το 2018 ο Mehmet Numan Kaya και οι συνεργάτες του [19] μελέτησαν την αεροδυναμική απόδοση οριζόντιας ανεμογεννήτριας με καμπύλα πτερύγια με εμπροσθόκλιση και με πισθόκλιση.

Χρησιμοποιήθηκε ως βασικό μοντέλο μια πειραματική ανεμογεννήτρια του NTNU με διάμετρο ρότορα 0,9 m και εξετάστηκαν, ο προσανατολισμός της καμπύλης γεωμετρίας, το σημείο έναρξης της καμπύλης κατά μήκος του περυγίου και η μετατόπιση της άκρης (tip offset) ως προς την αεροδυναμική επίδοση. Η ανάλυση έγινε με τρισδιάστατες CFD προσομοιώσεις (ANSYS Fluent 17.2) σε ταχύτητα ανέμου 10 m/s και στον σχεδιαστικό λόγο ταχύτητας άκρης $\lambda = 6$ του βασικού ρότορα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το περύγιο τύπου f1520 (με εμπροσθόκλιση, με έναρξη καμπύλης στο $r/R = 0,15$ και μετατόπιση άκρης $d/D = 0,2$) παρουσίασε τη μεγαλύτερη αύξηση της απόδοσης, με ενίσχυση του συντελεστή ισχύος κατά περίπου 2,9% σε σχέση με το ευθύγραμμο περύγιο. Αντίθετα, το περύγιο b7520 (με οπισθόκλιση με έναρξη καμπύλης στο $r/R = 0,75$ και ίδια μετατόπιση άκρης) πέτυχε τη μεγαλύτερη μείωση του συντελεστή ώσης, κατά περίπου 5,4%. Συμπερασματικά, τα περύγια με εμπροσθόκλιση μπορούν να βελτιώσουν την αεροδυναμική απόδοση της ανεμογεννήτριας, ενώ οι τα περύγια με οπισθόκλιση τείνουν να μειώνουν την ώση, γεγονός που μπορεί να είναι χρήσιμο για τον περιορισμό των φορτίων.

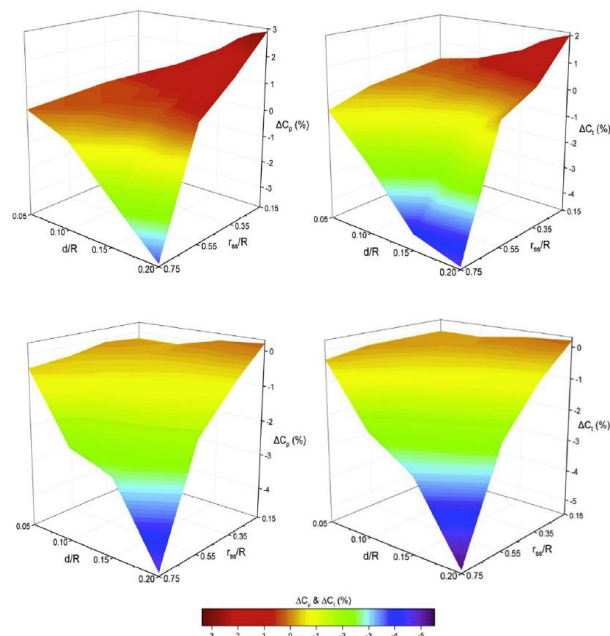
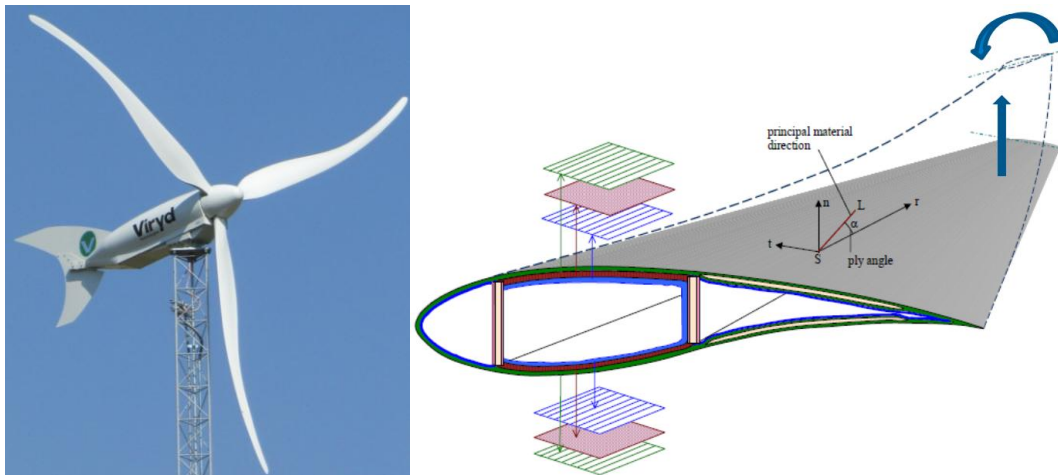


Fig. 6. Surface plots showing the change in C_p and C_t for the forward (top) and backward (bottom) swept blades according to sweep start section (r_w/R) and tip displacement (d/R).

Εικόνα 31. Μεταβολή των συντελεστών ισχύος και ώσης (C_p και C_t) για περύγια με forward και backward sweep.

Η ανεμογεννήτρια Viryd CS8 αναπτύχθηκε το 2011 στο πλαίσιο του προγράμματος DOE Small Wind Turbine Independent Testing, σε συνεργασία της εταιρείας Viryd με το NREL. Σχεδιάστηκε ως πλατφόρμα δοκιμών για περύγια αεροελαστικής προσαρμογής (aero-elastically

tailored), με οπισθόκλιση. Στόχος της σχεδίασης ήταν η επίτευξη παθητικής αεροελαστικής αποφόρτισης μέσω της σύζευξης κάμψης-στρέψης (bend-twist coupling). Η CS8 είναι μικρή οριζόντιου άξονα ανεμογεννήτρια με διάμετρο δρομέα 8,5 m και ονομαστική ισχύ 8 kW, με παθητικό yaw και παθητικό έλεγχο ισχύος. Τα πτερύγια της έκδοσης παραγωγής διαθέτουν οπισθόκλιση, ώστε υπό την επίδραση των αεροδυναμικών φορτίων να κάμπτονται προς τα κατάντη (downwind), προκαλώντας ταυτόχρονα μείωση της γωνίας προσβολής στα ακροπερύγια (blade tips) και περιορίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις καταπονήσεις.

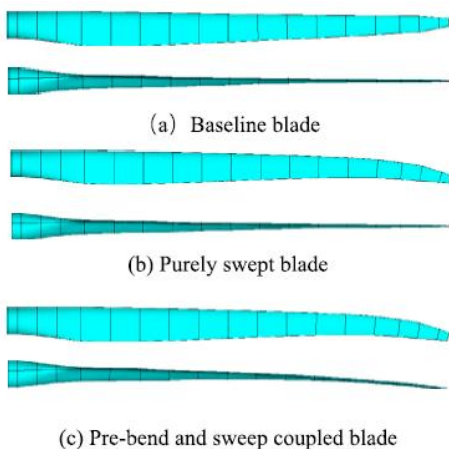


Εικόνα 32. Ανεμογεννήτρια Viryd CS8 με backward-sweep πτερύγια.

Το 2013 ο Preus και οι συνεργάτες του, με υπολογιστική μελέτη χρησιμοποίησε τη γεωμετρία της CS8 ως περιπτωσιολογική μελέτη (case study) και διερεύνησε διάφορες παραλλαγές οπισθόκλισης από 0° έως 20° . Βρέθηκε ότι η διαμόρφωση με καμπύλη γεωμετρία 20° θα μπορούσε να μειώσει τα μέγιστα φορτία κάμψης κατά περίπου 15% και τα ισοδύναμα φορτία κόπωσης κατά περίπου 20% σε σχέση με το ευθύγραμμο πτερύγιο αναφοράς, χωρίς ουσιαστική απώλεια παραγόμενης ισχύος η προσέγγιση αυτή κατέδειξε τη δυνατότητα της καμπύλης γεωμετρίας να προσφέρει σημαντική παθητική αποφόρτιση. Συνολικά, η Viryd CS8 αποτέλεσε ένα χαρακτηριστικό case study για πτερύγια με οπισθόκλιση. Οι υπολογιστικές μελέτες έδειξαν ότι το sweep μπορεί να επιφέρει σημαντική μείωση φορτίων χωρίς απώλεια απόδοσης, ενώ οι δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες απέδειξαν την ασφαλή λειτουργία και την ικανοποιητική δομική αντοχή της μηχανής σε πολύμηνη χρήση [29], [30], [31].

Οι Wang και οι συνεργάτες του (2022)[32] διερεύνησαν υπολογιστικά την αεροελαστική συμπεριφορά πτερυγίων μεγάλων ανεμογεννητριών με διαφορετικές καμπύλες γεωμετρίας. Ως σημείο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το πτερύγιο του μοντέλου NREL-5 MW, μήκους περίπου 61,5

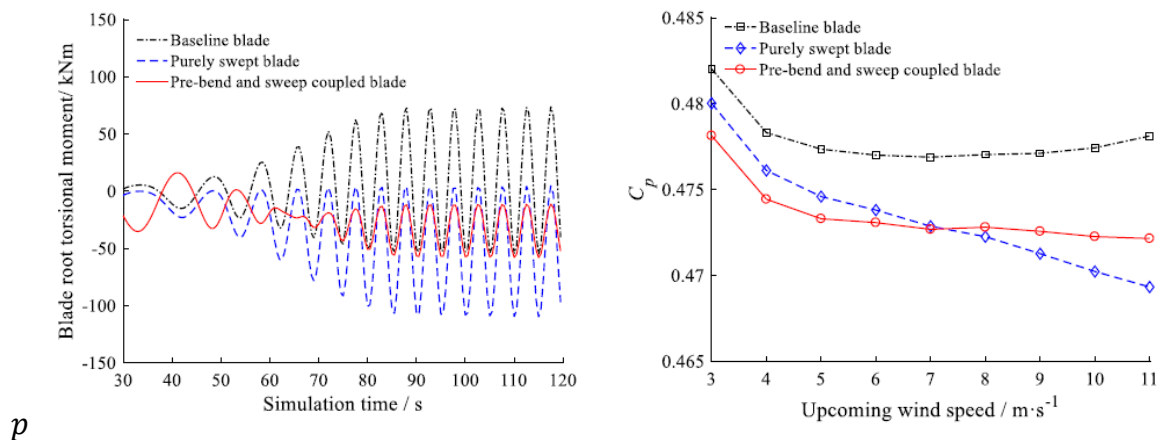
m. Στη συνέχεια μελετήθηκαν τρεις παραλλαγές, το ευθύγραμμο πτερύγιο αναφοράς, ένα καμπύλο πτερύγιο με οπισθόκλιση και ένα πτερύγιο που συνδυάζει την προ-κάμψη προς τα κατάντη (downwind pre-bend) με οπισθόκλιση της κάτωψης.



Εικόνα 33. Γεωμετρικές παραλλαγές πτερυγίων.

Η ανάλυση έδειξε ότι και οι δύο καμπύλες διαμορφώσεις παρουσίασαν χαμηλότερες μέσες τιμές γωνίας προσβολής στα 50% και 98% της ακτίνας, καθώς και μειωμένη κάμψη στη ρίζα, σε σύγκριση με το πτερύγιο αναφοράς. Ο συνδυασμός προκάμψης και οπισθοκλινής καμπυλότητας αποδείχθηκε ευνοϊκότερος, καθώς περιόρισε τις ταλαντώσεις της γωνίας προσβολής και της εκτροπής του άκρου του πτερυγίου. Παράλληλα, η συγκεκριμένη διαμόρφωση οδήγησε σε μείωση της ροπής στρέψης στη ρίζα, σε σύγκριση με την περίπτωση αποκλειστικής οπισθοκλινής καμπυλότητας. Η αεροδυναμική απόδοση παρέμεινε ουσιαστικά αμετάβλητη, με τον συντελεστή ισχύος να μειώνεται οριακά από 0,478 σε 0,473 (-0,93%).

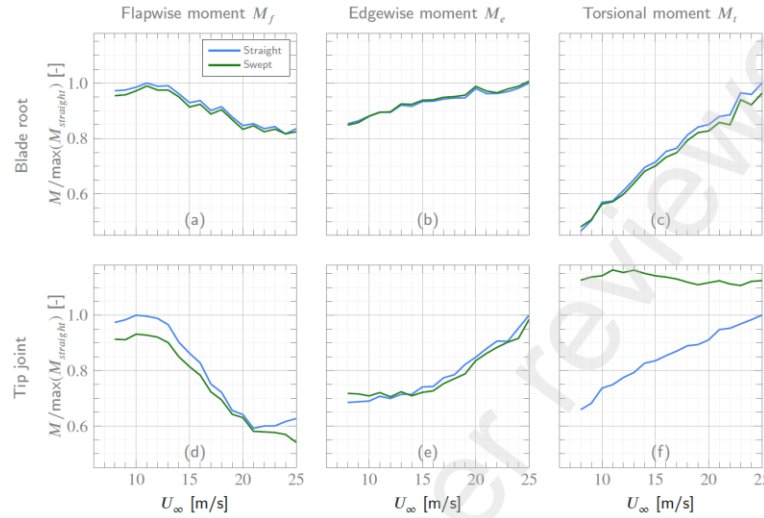
Συνολικά, η μελέτη κατέδειξε ότι ο συνδυασμός προκάμψης και οπισθοκλινής καμπυλότητας αποτελεί μία πιο ισορροπημένη σχεδιαστική λύση, καθώς μειώνει τα αεροδυναμικά φορτία και τα φαινόμενα κόπωσης χωρίς να επηρεάζει σημαντικά την παραγόμενη ισχύ, προτείνοντάς τον ως υποσχόμενη γεωμετρική προσέγγιση για μελλοντικά πτερύγια μεγάλης κλίμακας.



Εικόνα 34. Εξέλιξη της στρεπτικής ροπής στη ρίζα (αριστερά) και μεταβολή του συντελεστή ισχύος με την ταχύτητα ανέμου (δεξιά) για διαφορετικές γεωμετρίες πτερυγίων.

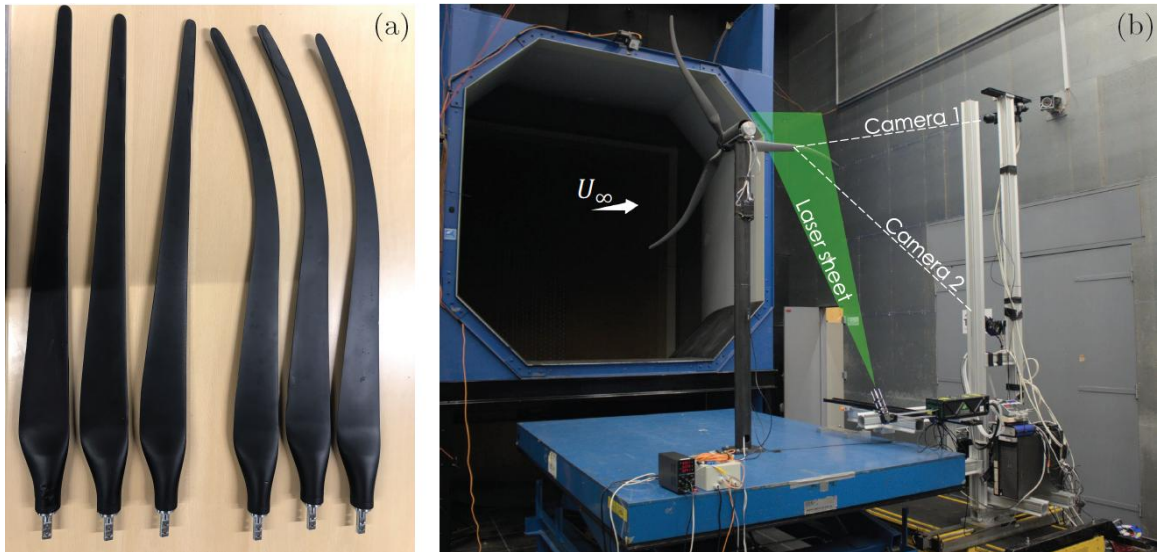
Ο Fritz και άλλοι (2024) [33], [34] παρουσίασαν τα αποτελέσματα της ανάπτυξης και αξιολόγησης ενός αεροελαστικά προσαρμοσμένου ακροπτερυγίου με καμπύλη γεωμετρία προς τα πίσω για πειραματική ανεμογεννήτρια 3,8 MW, στο πλαίσιο του έργου TIADe. Στόχος της μελέτης αποτέλεσε η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης οπισθόκλισης του άκρου του πτερυγίου για τον περιορισμό των δομικών φορτίων σε ρότορες μεγάλης διαμέτρου, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι δεν υποβαθμίζεται η αεροδυναμική απόδοση της ανεμογεννήτριας. Το σύστημα πτερυγίων της ανεμογεννήτριας ήταν αρθρωτής κατασκευής, επιτρέποντας την αντικατάσταση μόνο του εξωτερικού 20% της ακτίνας.

Η αριθμητική ανάλυση σε τυπικά σενάρια φορτίων σχεδιασμού (IEC design load cases) έδειξε ότι η χρήση ενός οπισθοκλινούς ακροπτερυγίου, με μέγιστη μετατόπιση 2% της ακτίνας, οδήγησε σε μείωση των φορτίων εκτός επιπέδου περιστροφής και των ισοδύναμων φορτίων κόπωσης τόσο στη ρίζα του πτερυγίου όσο και στη βάση του πύργου, με αμελητέα επίδραση στην ετήσια παραγωγή ενέργειας ($AEP \approx +0,26\%$). Παράλληλα, παρατηρήθηκε αύξηση των στρεπτικών φορτίων στην περιοχή του τμήματος με οπισθόκλιση, λόγω της επαγόμενης αλληλεπίδρασης κάμψης-στρέψης, γεγονός που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό. Η μελέτη κατέληξε ότι η εφαρμογή ακροπτερυγίων με οπισθόκλιση αποτελεί υποσχόμενη τεχνική για τη μείωση των δομικών φορτίων και της κόπωσης σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, χωρίς αρνητική επίδραση στην απόδοση του ρότορα.



Εικόνα 35. Κανονικοποιημένα φορτία κάμψης, διάτμησης και στρέψης στη ρίζα και στην άκρη του πτερυγίου για ευθύγραμμο και καμπύλο πτερύγιο.

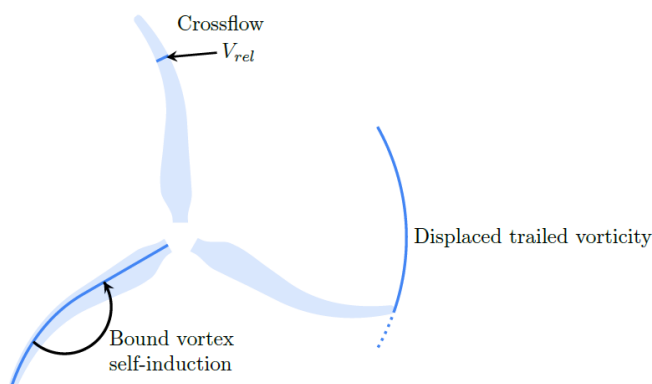
Το 2024, οι Fritz, Boorsma και Ferreira [35] ανέπτυξαν μια ολοκληρωμένη ερευνητική προσέγγιση για τα sweep πτερύγια. Αρχικά, πραγματοποίησαν δοκιμές σε αεροσήραγγα επάνω σε μία υπό κλίμακα ανεμογεννήτρια διαμέτρου 1.8m με πτερύγια με οπισθόκλιση, μετρώντας με τη μέθοδο PIV τα πεδία ταχυτήτων και εξάγοντας αεροδυναμικά μεγέθη σε επίπεδο πτερυγίου.



Εικόνα 36. Ευθύγραμμο και καμπύλα μοντέλα πτερυγίων (αριστερά) και πειραματική διάταξη με το σύστημα μέτρησης PIV (δεξιά).

Οι μετρήσεις με Particle Image Velocimetry (PIV), είναι μια τεχνική κατά την οποία μικροσκοπικά σωματίδια ενσωματώνονται στη ροή, φωτίζονται με παλμικό laser και καταγράφονται με

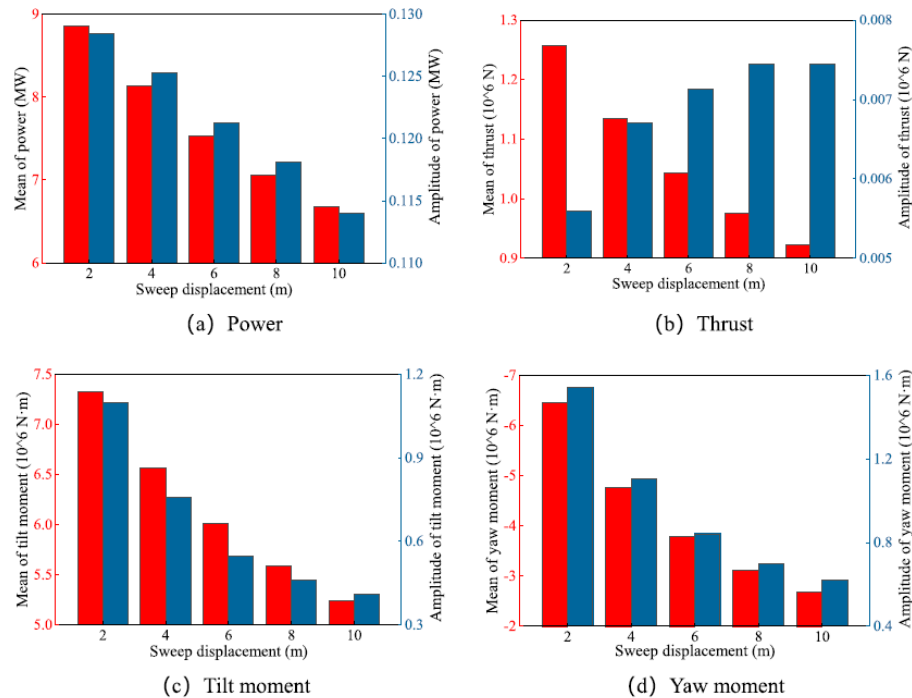
κάμερες υψηλής ταχύτητας, ώστε να ανακατασκευαστεί το πεδίο ταχυτήτων γύρω από το πτερύγιο [34]. Τα δεδομένα αυτά αποτέλεσαν σημείο αναφοράς για την επικύρωση υπολογιστικών εργαλείων. Σε μεταγενέστερη μελέτη, οι ίδιοι ερευνητές χρησιμοποίησαν τα δεδομένα αυτά για να επικυρώσουν ένα διορθωτικό μοντέλο της θεωρίας BEM για πτερύγια με σάρωση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συμβατική θεωρία BEM αποτυγχάνει να περιγράψει σωστά την επίδραση της σάρωσης, ενώ μια απλή crossflow διόρθωση είναι συχνά επαρκής, με το πλήρες μοντέλο να προσφέρει πιο ακριβή φυσική περιγραφή. Συνεπώς, τεκμηριώνεται ότι η σάρωση μειώνει την αξονική επαγωγή και τα φορτία στην εξωτερική περιοχή του πτερυγίου, αποτελώντας αποδοτικό παθητικό μηχανισμό ελέγχου φορτίων.



Εικόνα 37. Σχηματική απεικόνιση των αεροδυναμικών μεταβολών που προκαλεί το sweep στα πτερύγια.

Οι Ma και συνεργάτες (2025) [36] μελέτησαν αεροελαστικά την επίδραση των πτερυγίων με σάρωση σε μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια αναφοράς IEA-15 MW, με μήκος πτερυγίου 117 m και προκάμψη 4 m. Ως πτερύγιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το ευθύγραμμο πτερύγιο της εν λόγω ανεμογεννήτριας, ενώ το τροποποιημένο ενσωμάτωνε οπισθόκλιση με εκθετική κατανομή, με σημείο έναρξης σάρωσης στο 0,2 R και τυπική μετατόπιση ακροπτερυγίου 2 m (μελετήθηκαν επίσης παραλλαγές με μετατόπιση 4-10 m), ώστε να αξιολογηθεί η συμπεριφορά υπό ονομαστικές και εκτός-ευθυγράμμισης συνθήκες. Η σύγκριση ευθύγραμμου-καμπύλου πτερυγίου έδειξε ότι το πτερύγιο με σάρωση εμφάνισε μεγαλύτερη στρέψη προς αποπτέρωση υπό φορτίο, γεγονός που μείωσε την ενεργό γωνία προσβολής. Ως αποτέλεσμα, παρατηρήθηκε μείωση στη μέση ισχύ περίπου 5% και στην ώση περίπου 9,6%, ενώ οι ροπές ρίζας μειώθηκαν κατά ~12% στον άξονα κάμψης και κατά ~5% στον άξονα άκρης. Ωστόσο, η μέση στρεπτική ροπή αυξήθηκε σημαντικά (περίπου +265%), γεγονός που αποτελεί σημαντικό περιορισμό για τον σχεδιασμό. Υπο συνθήκες λοξής

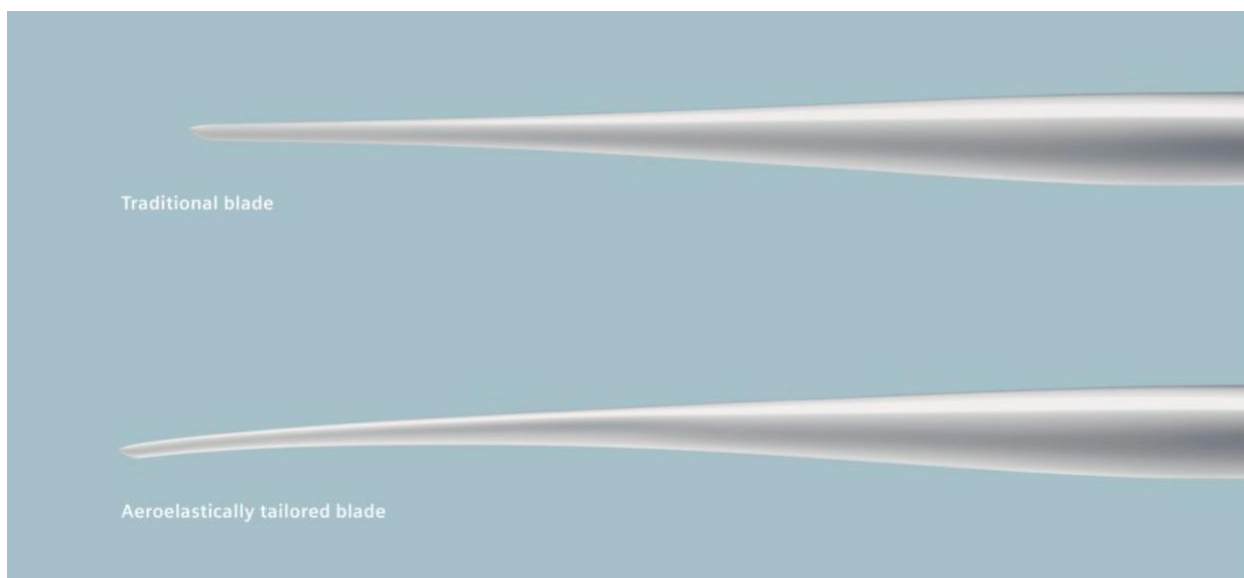
πρόσπτωσης (yaw), διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της μετατόπισης σάρωσης από 2 m σε 10 m οδηγεί σε περαιτέρω μείωση των φορτίων και της διακύμανσης της γωνίας προσβολής, πιο ομοιόμορφη κατανομή ώσης στον δίσκο του ρότορα, μείωση της μέγιστης εκτροπής του ακροπερυγίου και των ταλαντώσεων κάμψης στον άξονα flapwise, καθώς και σε πιο ομαλό και σταθερό ίχνος (wake). Ταυτόχρονα, παρατηρήθηκε περαιτέρω αύξηση της στρεπτικής κάμψης και της αντίστοιχης ροπής, γεγονός που απαιτεί προσεκτική επιλογή του βαθμού σάρωσης. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το μέγεθος της σάρωσης είναι ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση στη μείωση των φορτίων. Κατάλληλες γεωμετρικές ρυθμίσεις μπορούν να μειώσουν τις ροπές ρίζας στον κάθετο άξονα όσο και προς τον εγκάρσιο (edgewise), να βελτιώσουν τη δυναμική συμπεριφορά και να εξομαλύνουν το ίχνος ροής (wake) των μεγάλων υπεράκτιων πτερυγίων, με τίμημα μια περιορισμένη απώλεια ισχύος.



Εικόνα 38. Μέση τιμή και πλάτος ταλάντωσης ισχύος, ώσης και ροπών για διαφορετικές μετατοπίσεις sweep στην IEA-15 MW ανεμογεννήτρια.

Η Siemens Gamesa υπήρξε από τους πρώτους κατασκευαστές που εισήγαγαν στην πράξη την τεχνολογία πτερυγίων αεροελαστικής προσαρμογής (Aeroelastically-tailored Blades), εφαρμόζοντας την σε πτερύγια μήκους περίπου 53 m. Χρησιμοποιώντας το σύστημα IntegralBlade, η εταιρεία ανέπτυξε πτερύγια με συνδυασμένη κάμψη-στρέψη (bend-twist coupling), τα οποία αντιδρούν αυτόματα στις ριπές του ανέμου. Συγκεκριμένα, καθώς αυξάνονται τα αεροδυναμικά

φορτία, το πτερύγιο λυγίζει και στρέφεται ελαφρά, μειώνοντας τη γωνία προσβολής και άρα περιορίζοντας τα φορτία χωρίς απώλεια ισχύος. Έτσι, το πτερύγιο προσαρμόζεται γρήγορα σε μεταβολές της ροής χωρίς την παρέμβαση του ενεργού μηχανισμού κλίσης (pitch mechanism), ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως για πιο αργές αλλαγές συνθηκών. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε την αύξηση του μήκους των πτερυγίων και την αποφόρτιση του ρότορα σε υψηλές ριπές, συνδυάζοντας μεγαλύτερη ετήσια παραγωγή ενέργειας με διατήρηση της δομικής ασφάλειας του συστήματος.



Εικόνα 39. Σύγκριση παραδοσιακού και aeroelastically-tailored πτερυγίου με ενσωματωμένο bend-twist coupling (Siemens Gamesa).

2.4 Ερευνητικά Κενά

Παρά την πρόοδο που έχει επιτευχθεί στον σχεδιασμό και τη μελέτη καμπύλων πτερυγίων, η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει ορισμένα ουσιώδη κενά τα οποία περιορίζουν τη συστηματική αξιολόγηση και την πλήρη αξιοποίησή τους.

Έλλειψη συστηματικών πειραμάτων μεγάλης κλίμακας.

Παρά τα σημαντικά έργα, όπως το Smart Blades Project και το πρόγραμμα STAR της Siemens Gamesa, τα οποία περιλάμβαναν δοκιμές σε πρωτότυπα πλήρους κλίμακας, οι μελέτες παραμένουν αποσπασματικές. Δεν υπάρχουν εκτεταμένες συγκριτικές δοκιμές με διαφορετικές παραμέτρους καμπυλότητας, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή σαφών βέλτιστων πρακτικών

Περιορισμένη ενσωμάτωση νέων υλικών σε πειραματικό επίπεδο

Η συνδυαστική αξιοποίηση καμπυλότητας με προηγμένα σύνθετα υλικά (π.χ. υβριδικά υαλονήματα-ανθρακονήματα, πολυμερή με μνήμη σχήματος) έχει διερευνηθεί κυρίως μέσω προσομοιώσεων. Αντίθετα, οι πειραματικές εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες είναι ελάχιστες, γεγονός που αφήνει ανοιχτά ερωτήματα για τη συμπεριφορά και τη μακροχρόνια αξιοπιστία των υλικών.

Έλλειψη μικρής κλίμακας παραμετρικών πειραμάτων

Οι περισσότερες δοκιμές αεροσήραγγας επικεντρώνονται σε μεμονωμένα τμήματα ή σε πρωτότυπα μεγάλης κλίμακας. Απουσιάζουν συστηματικές μελέτες μικρής κλίμακας που να επιτρέπουν την παραμετρική διερεύνηση διαφορετικών γωνιών καμπυλότητας με χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη επαναληψιμότητα.

Περιορισμένη έρευνα για πτερύγια forward-sweep

Η συντριπτική πλειονότητα των δημοσιεύσεων αφορά backward-sweep πτερύγια λόγω της φυσικής τους ικανότητας να αποφορτίζουν τα ακροπτερύγια. Οι forward-sweep γεωμετρίες, που θεωρητικά μπορούν να προσφέρουν βελτιωμένη κατανομή φορτίων ή έλεγχο του απορρέματος (Wake), έχουν ερευνηθεί ελάχιστα και κυρίως σε επίπεδο υπολογιστικών προσομοιώσεων. Απουσιάζουν πειραματικά δεδομένα μεγάλης κλίμακας και τεκμηριωμένες μετρήσεις απόδοσης, αφήνοντας αναπάντητα ερωτήματα σχετικά με τα δυναμικά πλεονεκτήματα αλλά και τους δομικούς περιορισμούς της εμπροσθόκλισης.

2.5 Συμπεράσματα

Η ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας ανέδειξε ότι η ενσωμάτωση καμπυλότητας στα πτερύγια σε συνδυασμό με τη σύζευξη κάμψης-στρέψης αποτελεί σήμερα μία από τις πιο ελπιδοφόρες στρατηγικές παθητικού ελέγχου φορτίων στις ανεμογεννήτριες. Τα καμπυλωμένα πτερύγια βελτιώνουν την κατανομή των αεροδυναμικών δυνάμεων, μειώνουν τις αιχμές φορτίων και τα ισοδύναμα φορτία κόπωσης, ενώ συμβάλλουν σε χαμηλότερα επίπεδα ακουστικού θορύβου και σε σταθερότερη δυναμική απόκριση του ρότορα. Τα πλεονεκτήματα αυτά επιβεβαιώθηκαν τόσο σε υπολογιστικές μελέτες όσο και σε πρωτότυπες δοκιμές πλήρους κλίμακας.

Παρά την πρόοδο, παραμένουν προκλήσεις: η κατασκευαστική πολυπλοκότητα και το υψηλό κόστος των καλουπιών περιορίζουν τη μαζική παραγωγή, ενώ η πιστοποίηση και η έλλειψη

συστηματικών συγκριτικών πειραμάτων μεγάλης κλίμακας εμποδίζουν την ευρεία υιοθέτηση. Η έρευνα σε forward-sweep γεωμετρίες και στη συνδυαστική χρήση προηγμένων υλικών βρίσκεται ακόμη σε αρχικά στάδια, με ελάχιστα δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα.

Συνολικά, η βιβλιογραφία δείχνει ότι η καμπυλότητα στα πτερύγια μπορεί να προσφέρει ουσιαστική βελτίωση αξιοπιστίας, ανθεκτικότητας και ενεργειακής απόδοσης για τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες, αρκεί να συνεχιστεί η πειραματική επαλήθευση σε πλήρη κλίμακα και να προσαρμοστούν οι διαδικασίες σχεδιασμού και πιστοποίησης στις νέες γεωμετρίες.

3. Μεθοδολογία Ανάλυσης και Πειραματική Διάταξη

3.1 Μεθοδολογία

Όπως έχει αναφερθεί και στο πρώτο κεφάλαιο, στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός καμπύλου πτερυγίου, με σκοπό την αυτορρύθμιση της πραγματικής γωνίας προσβολής και, συνεπώς, την αυτόματη και παθητική ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται αποκλειστικά στον περιορισμό της ταχύτητας περιστροφής και των δυνάμεων που ασκούνται στο πτερύγιο, χωρίς να εξετάζεται η βελτιστοποίηση της γωνίας προσβολής για κάθε διαφορετική ταχύτητα ανέμου.

Πριν από τον σχεδιασμό του καμπύλου πτερυγίου, είναι απαραίτητο να ληφθούν ορισμένες κρίσιμες αποφάσεις, ώστε να διασφαλιστεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα σύμφωνα με τη θεωρία. Ο σημαντικότερος παράγοντας στον σχεδιασμό ενός πτερυγίου είναι η επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας των αεροτομών που το συνθέτουν. Η κατανομή τους κατά μήκος του πτερυγίου επηρεάζει καθοριστικά την καμπύλη απόδοσης, καθώς και τη συμπεριφορά του σε διαφορετικές συνθήκες και ταχύτητες ανέμου. Εξίσου κρίσιμος είναι ο καθορισμός της χορδής και της στρέψης κατά μήκος του πτερυγίου, καθώς επηρεάζουν την κατανομή της ανυψωτικής δύναμης και συμβάλλουν στη διατήρηση ομαλής ροής σε όλο το μήκος του.

Δεύτερος σημαντικός παράγοντας, ιδίως για καμπύλο πτερύγιο, είναι η επιλογή του υλικού καθώς και η εσωτερική του δομή (συμπαγές, κούφιο ή κούφιο με ενισχύσεις). Το υλικό καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη μάζα, την ακαμψία και την ικανότητα απόσβεσης ταλαντώσεων του πτερυγίου, επηρεάζοντας άμεσα τόσο την αεροδυναμική συμπεριφορά όσο και τη δομική του αντοχή. Επιπλέον, η εσωτερική δομή (π.χ. συμπαγής ή με ενισχύσεις) σχετίζεται με την ικανότητα του πτερυγίου να παραμορφώνεται ελεγχόμενα υπό φορτία, χαρακτηριστικό, ιδιαίτερα σημαντικό σε καμπύλα πτερύγια όπου η παραμόρφωση συμβάλει στην παθητική ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής. Στην παρούσα μελέτη, δεδομένου του μεγέθους του πτερυγίου, θεωρείται ότι οι παράμετροι που μπορούν να ελεγχθούν περιορίζονται στην επιλογή του υλικού, στη μέθοδο κατασκευής και στον βαθμό ανισοτροπίας των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Για τη δημιουργία μιας βάσης σύγκρισης, πριν από τον σχεδιασμό του καμπύλου πτερυγίου κρίθηκε απαραίτητο να σχεδιαστεί και να μελετηθεί ένα αντίστοιχο άκαμπτο ευθύ πτερύγιο με τις ίδιες αεροτομές. Υπό την παραδοχή ότι κάθε αεροτομή και στα δύο πτερύγια βρίσκεται στην ίδια απόσταση από τον άξονα περιστροφής και ότι η παραμόρφωσή τους υπό φορτίο μπορεί να

θεωρηθεί αμελητέα, αναμένεται θεωρητικά πως το ευθύγραμμο και το καμπύλο πτερύγιο θα παρουσιάσουν παρόμοια αεροδυναμική απόδοση. Με αυτόν τον τρόπο, η σύγκριση μεταξύ των δύο διατάξεων αποκτά σαφές νόημα, καθώς οποιαδήποτε διαφορά στην απόδοση μπορεί να αποδοθεί άμεσα στην καμπυλότητα του πτερυγίου και όχι σε άλλους παράγοντες. Η πειραματική διερεύνηση επιτρέπει την αξιολόγηση του βαθμού απόκλισης της πραγματικής συμπεριφοράς από την ιδανική θεωρητική παραδοχή, καθώς και τον εντοπισμό μηχανισμών που δεν προβλέπονται από το θεωρητικό μοντέλο.

Στο πλαίσιο της εργασίας, αποφασίστηκε αρχικά να μελετηθεί το ευθύ άκαμπτο πτερύγιο στην αεροσήραγγα του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας, με στόχο να μετρηθεί η αεροδυναμική του απόδοση και να συγκριθεί με τα θεωρητικά μοντέλα υπολογισμού που αναπτύσσονται στο εργαστήριο. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η επικύρωση των θεωρητικών υπολογισμών με πειραματικά δεδομένα, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Εφόσον επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα του θεωρητικού μοντέλου, καθίσταται δυνατή η ακριβέστερη πρόβλεψη της απόδοσης και για το πτερύγιο με καμπύλη γεωμετρία, χωρίς να απαιτείται εξ αρχής πλήρης πειραματική διερεύνηση όλων των παραμέτρων.

Τέλος, ο σχεδιασμός καμπύλου πτερυγίου υλοποιήθηκε μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος, έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή παραμόρφωση. Στόχος ήταν η επίτευξη στρέψης περίπου 20° στις κυριότερες αεροτομές του πτερυγίου. Η τιμή αυτή θεωρείται κρίσιμη σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, καθώς πέραν αυτού του ορίου η αεροδυναμική συμπεριφορά του πτερυγίου επιδεινώνεται σημαντικά. Η υπερβολική στρέψη οδηγεί σε έντονα φαινόμενα αποκόλλησης της ροής, τα οποία προκαλούν απότομη μείωση της άντωση και αύξηση της οπισθέλκουσας. Επιπλέον, κατά τον σχεδιασμό λήφθηκε υπόψη και η αντοχή του υλικού στα αναμενόμενα αεροδυναμικά και φυγόκεντρα φορτία, ώστε να διασφαλιστεί ότι το πτερύγιο δεν θα παρουσιάσει αστοχίες κατά τη λειτουργία του.

3.2 Γεωμετρία και Υλικά

Γεωμετρία

Το πρώτο βήμα του πειραματικού μέρους της εργασίας ήταν ο καθορισμός της αεροτομής και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πτερυγίου που θα εξεταστεί. Το μήκος του πτερυγίου καθορίστηκε με βάση τους περιορισμούς της αεροσήραγγας του εργαστηρίου αιολικής ενέργειας.

Συγκεκριμένα, η μέγιστη ακτίνα πτερυγίου που μπορεί να εξεταστεί με αξιόπιστες μετρήσεις είναι 160 mm. Για τον λόγο αυτό, όλα τα πτερύγια σχεδιάστηκαν ώστε να μην υπερβαίνουν την απόσταση των 160 mm από τον άξονα περιστροφής. Επίσης το πτερύγιο διαχωρίστηκε σε 10 αεροτομές της οικογενείας NACA 44XX, καθώς η συγκεκριμένη σειρά διαθέτει χαρακτηριστικά που συνδυάζουν υψηλή αεροδυναμική απόδοση και επαρκή δομική αντοχή. Συγκεκριμένα, τα προφίλ NACA 44XX παρουσιάζουν υψηλό λόγο CL/CD σε μέσες γωνίες προσβολής, γεγονός που συνεπάγεται παραγωγή σημαντικής άντωσης με σχετικά χαμηλή αντίσταση. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για πτερύγια μικρής κλίμακας, όπου οι απώλειες λόγω οριακού στρώματος είναι εντονότερες. Επιπλέον, η μετάβαση σε αποκόλληση ροής είναι πιο ομαλή σε σχέση με άλλα προφίλ, μειώνοντας τον κίνδυνο απότομης απώλειας της άντωσης και βελτιώνοντας τη σταθερότητα σε ευρύτερο φάσμα γωνιών προσβολής.

Οι αεροτομές τύπου NACA 4-ψηφίων περιγράφονται από έναν κωδικό τεσσάρων αριθμών, οι οποίοι καθορίζουν την καμπυλότητα, τη θέση της καμπυλότητας και το πάχος του προφίλ σε σχέση με τη χορδή. Η δυνατότητα επιλογής διαφορετικού πάχους επιτρέπει την προσαρμογή της γεωμετρίας ώστε να καλύπτονται τόσο αεροδυναμικές όσο και μηχανικές απαιτήσεις.

Υλικό

Η επιλογή των υλικών στην παρούσα εργασία έγινε με γνώμονα την ανάγκη για ευκαμψία των πτερυγίων. Στόχος ήταν η ανάπτυξη καμπύλων πτερυγίων που να μπορούν να παραμορφώνονται υπό αεροδυναμικά φορτία, μεταβάλλοντας τη γωνία σφήνωσης μέσω παθητικού ελέγχου. Για τον λόγο αυτό δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση σε υλικά με υψηλή παραμόρφωση και σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, ώστε να εξασφαλίζεται ελεγχόμενη κάμψη χωρίς αστοχία. Για την επιλογή του υλικού εξετάστηκαν αρκετές εναλλακτικές με διαφορετικές μεθόδους κατασκευής, όπως κατεργασία πέντε αξόνων (5-axis milling), τρισδιάστατη εκτύπωση με εναπόθεση νήματος (FDM) και τρισδιάστατη εκτύπωση με στερεολιθογραφία (SLA). Τελικά, η επιλογή περιορίστηκε σε υλικά που μπορούν να εκτυπωθούν με τη μέθοδο SLA.

Η μέθοδος Στερεολιθογραφίας αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, βασισμένη στον φωτοπολυμερισμό υγρής ρητίνης με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας. Η διαδικασία πραγματοποιείται στρώση-στρώση, με αποτέλεσμα την κατασκευή αντικειμένων υψηλής ακρίβειας και ιδιαίτερα λείας επιφάνειας. Ο βασικός λόγος επιλογής της συγκεκριμένης μεθόδου στην παρούσα εργασία είναι το γεγονός ότι η εκτύπωση παρουσιάζει καλύτερη

ποιότητα επιφάνειας σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, όπως η εκτύπωση FDM. Η λεία επιφάνεια αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αεροδυναμική συμπεριφορά του πτερυγίου, καθώς μειώνει τις επιφανειακές ανωμαλίες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν πρόωρη αποκόλληση της ροής ή να αυξήσουν την οπισθέλκουσα δύναμη. Επιπλέον, η τεχνολογία SLA προσφέρει μεγάλη ποικιλία ρητινών με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων εύκαμπτων τύπων.

Η επιλογή του υλικού περιορίστηκε σε δύο ρητίνες της εταιρείας Formlabs, καθεμία από τις οποίες μπορεί να μελετηθεί σε δύο διαφορετικές καταστάσεις: Green και Post-Cured. Οι δύο αυτές καταστάσεις εμφανίζουν διαφοροποιημένες μηχανικές ιδιότητες, κυρίως ως προς την ακαμψία και την αντοχή. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι ιδιότητες των δύο υλικών.

Tough 2000 Resin

Το Tough 2000 Resin (Formlabs), μετά το curing, αποτελεί το πιο άκαμπτο μέλος της οικογένειας Tough Resins, με μηχανικές ιδιότητες στην κατάσταση post cured παρόμοιες με το ABS. Σε κατάσταση Green, το υλικό παρουσιάζει αντοχή σε εφελκυσμό περίπου 29 MPa, μέτρο ελαστικότητας της τάξης του 1,2 GPa και παραμόρφωση θραύσης περίπου 74%. Από την άλλη, σε κατάσταση Post-Cured, το υλικό εμφανίζει αντοχή σε εφελκυσμό περίπου 46 MPa, μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 2,2 GPa και παραμόρφωση θραύσης περίπου 48%.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, εξετάστηκαν κυρίως δείγματα σε κατάσταση Green, λόγω της αυξημένης ευκαμψίας τους. Ο συνδυασμός υψηλής παραμόρφωσης θραύσης και χαμηλού μέτρου ελαστικότητας καθιστά το υλικό ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται ελεγχόμενη κάμψη χωρίς αστοχία, όπως τα καμπύλα πτερύγια που μελετώνται στην παρούσα έρευνα.

Tough 1500 Resin

Το Tough 1500 Resin (Formlabs) είναι το πιο ελαστικό της ίδιας οικογένειας, με μηχανική συμπεριφορά παρόμοια με το πολυπροπυλένιο. Σε κατάσταση Green, το υλικό παρουσιάζει αντοχή σε εφελκυσμό περίπου 26 MPa, μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 0,94 GPa και παραμόρφωση θραύσης περίπου 69%. Σε κατάσταση Post-Cured, το υλικό παρουσιάζει αντοχή σε εφελκυσμό περίπου 33 MPa, μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 1,5 GPa και παραμόρφωση θραύσης περίπου 51%.

Από τον παρακάτω πίνακα παρατηρούμε ότι, παρά το γεγονός πως τα εξεταζόμενα υλικά παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένη ελαστικότητα στην [Green] κατάστασή τους, η μηχανική τους αντοχή εμφανίζεται σαφώς μειωμένη. Το γεγονός αυτό δημιουργεί πρόσθετες προκλήσεις κατά

τον σχεδιασμό και την εφαρμογή τους, καθώς απαιτείται η εξισορρόπηση ανάμεσα στην επιθυμητή ευκαμψία και στην επαρκή δομική αντοχή.

Πίνακας 2. Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών.

Ιδιότητα	Tough 2000 (Green)	Tough 2000 (Post-Cured)	Tough 1500 (Green)	Tough 1500 (Post-Cured)
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	29	46	26	33
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	1.2	2.2	0.94	1.5
Παραμόρφωση Θραύσης (%)	74	48	69	51
Αντοχή σε Κάμψη (MPa)	17	65	15	39

3.3 Μέτρηση απόδοσης σε ευθύ πτερύγιο

Αεροσήραγγα και εξοπλισμός

Για την πειραματική διερεύνηση, η οποία κρίθηκε απαραίτητη προκειμένου να συγκριθεί η αεροδυναμική συμπεριφορά του ευθύγραμμου και του καμπύλου πτερυγίου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε εξειδικευμένη αεροσήραγγα. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά οι προδιαγραφές και ο εξοπλισμός της αεροσήραγγας που χρησιμοποιήθηκε.

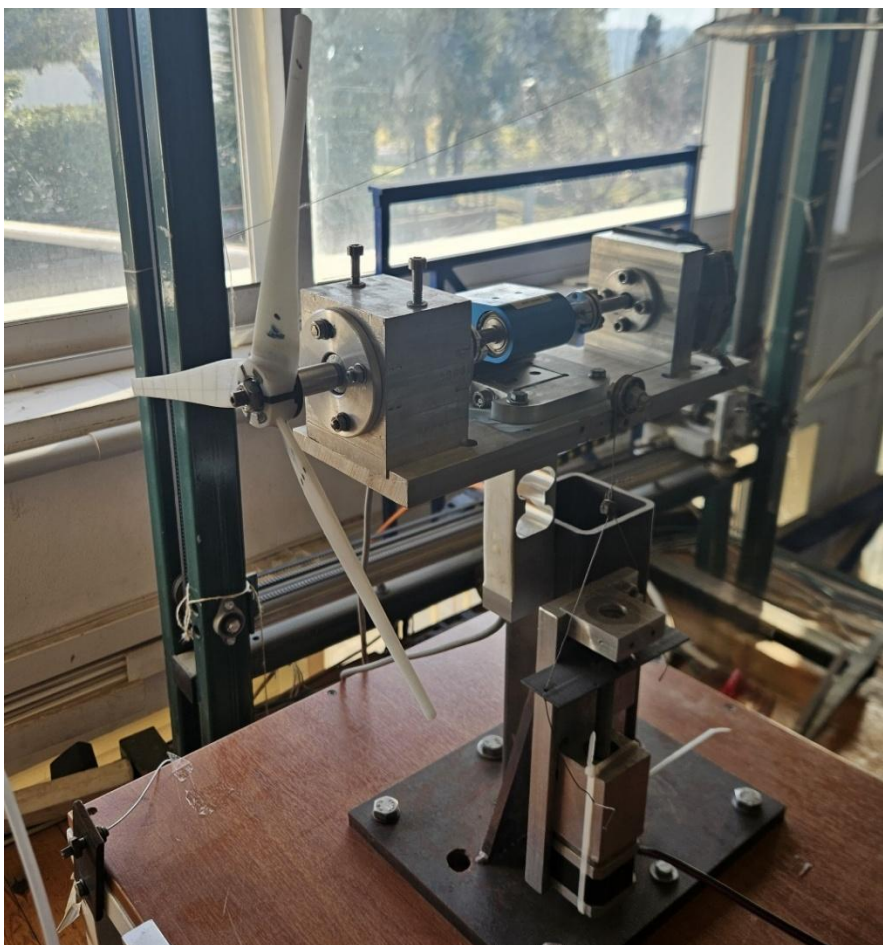


Εικόνα 40. Αεροσήραγγα εργαστηρίου αεροδυναμικών για πειραματικές δοκιμές πτερυγίων μικρής κλίμακας.

Η αεροσήραγγα αποτελεί μια πλήρως εξοπλισμένη πειραματική διάταξη με ολοκληρωμένο σύστημα μετρήσεων, σχεδιασμένη για τη μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς μικρών ροτόρων. Παρέχει δυνατότητα ελέγχου και παρακολούθησης κρίσιμων μεγεθών σε πραγματικό χρόνο, όπως η ταχύτητα ροής του αέρα, οι στροφές περιστροφής του ρότορα, η ροπή στον άξονα και η οπισθέλκουσα δύναμη. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται δυνατή η αναλυτική αποτύπωση της απόδοσης των υπό δοκιμή πτερυγίων σε ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας.

Για την καταγραφή των μεγεθών αυτών χρησιμοποιείται εξειδικευμένος εξοπλισμός υψηλής ακρίβειας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν:

- Το ροτόμετρο SCAIME DR2112L, με ενσωματωμένο κωδικοποιητή, ικανό να μετρά ροπές έως 1 Nm.
- Δυναμοκυψέλη HBM SP4MC6MR, για τη μέτρηση της δύναμης αντίστασης (drag).
- Οπτικός αισθητήρας στροφών, ο οποίος καταγράφει με μεγάλη ακρίβεια την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα.
- Σωλήνας Pitot-Prandtl σε συνδυασμό με διαφορικό μανόμετρο Delta Ohm HD408T, για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του ανέμου στην έξοδο της αεροσήραγγας.

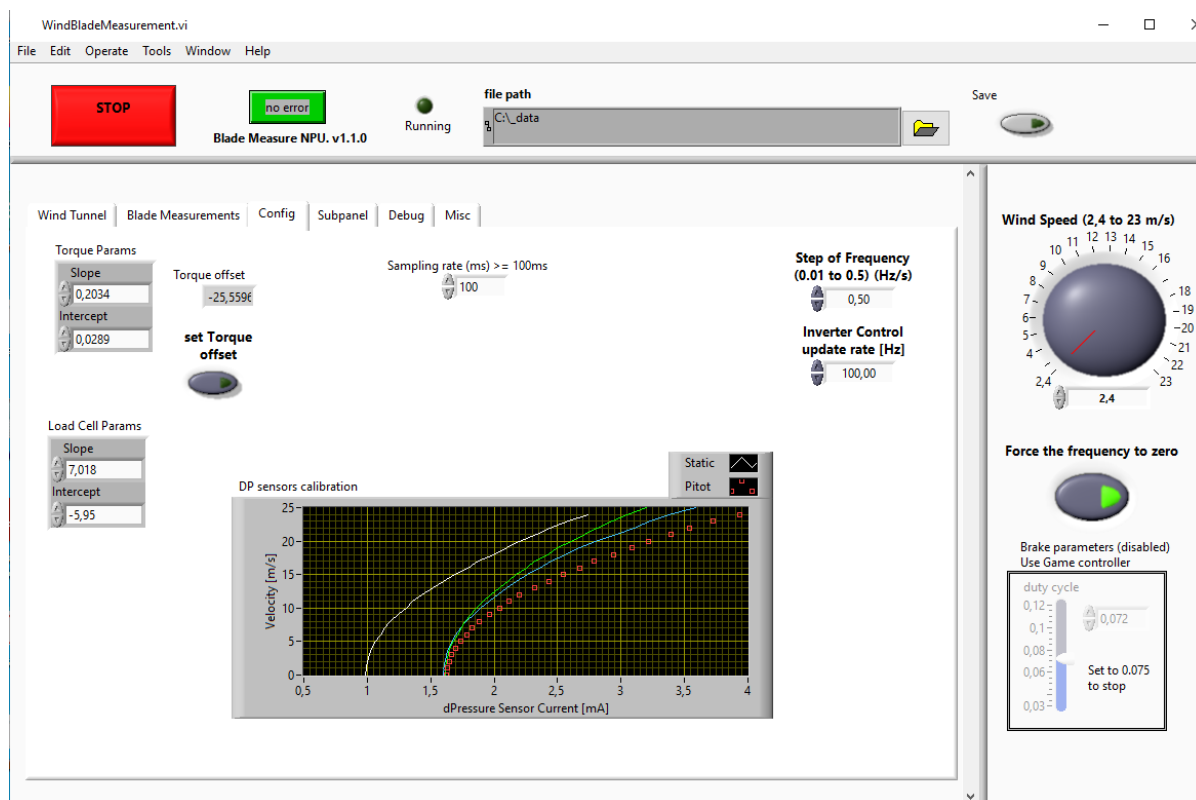


Εικόνα 41. Πειραματική διάταξη μέτρησης για δοκιμές αεροδυναμικής συμπεριφοράς πτερυγίων.

Η μηχανική διάταξη στήριξης του ρότορα περιλαμβάνει τον κεντρικό άξονα, ο οποίος εδράζεται σε ρουλεμάν. Στη μία πλευρά του φέρει σπείρωμα που διευκολύνει την τοποθέτηση διαφορετικών πτερυγίων, ενώ στην άλλη πλευρά διαθέτει δισκόφρενο, μέσω του οποίου, με τη βοήθεια ηλεκτροκινητήρα, εφαρμόζεται μεταβλητό φορτίο πέδησης στον άξονα. Η διάταξη αυτή δίνει τη δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς των πτερυγίων υπό διαφορετικά φορτία και συνθήκες λειτουργίας.

Η συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω λογισμικού που αναπτύχθηκε στην πλατφόρμα LabVIEW, ειδικά για τις ανάγκες του εργαστηρίου. Το λογισμικό “Blade Measure NPU v1.1.0” επιτρέπει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο όλων των μετρούμενων μεγεθών, την απεικόνισή τους κατά τη διάρκεια των δοκιμών, καθώς και την αποθήκευσή

τους σε αρχεία για περαιτέρω ανάλυση. Η περίοδος δειγματοληψίας μπορεί να φτάσει έως τα 100 ms, εξασφαλίζοντας λεπτομερή καταγραφή ακόμη και μικρών διακυμάνσεων.



Εικόνα 42. Πρόγραμμα «Blade Measure NPU v1.1.0» για συλλογή δεδομένων πειραματικής διάταξης.

Η αεροσήραγγα έχει αξιολογηθεί μέσω μετρήσεων του πεδίου ροής και των επιπέδων τύρβης στην έξοδο, επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητά της για πειραματική διερεύνηση αεροδυναμικών φαινομένων. Το εύρος ταχυτήτων του αέρα που μπορεί να παραχθεί καλύπτει ενδεικτικά τιμές από 4 έως 25 m/s.

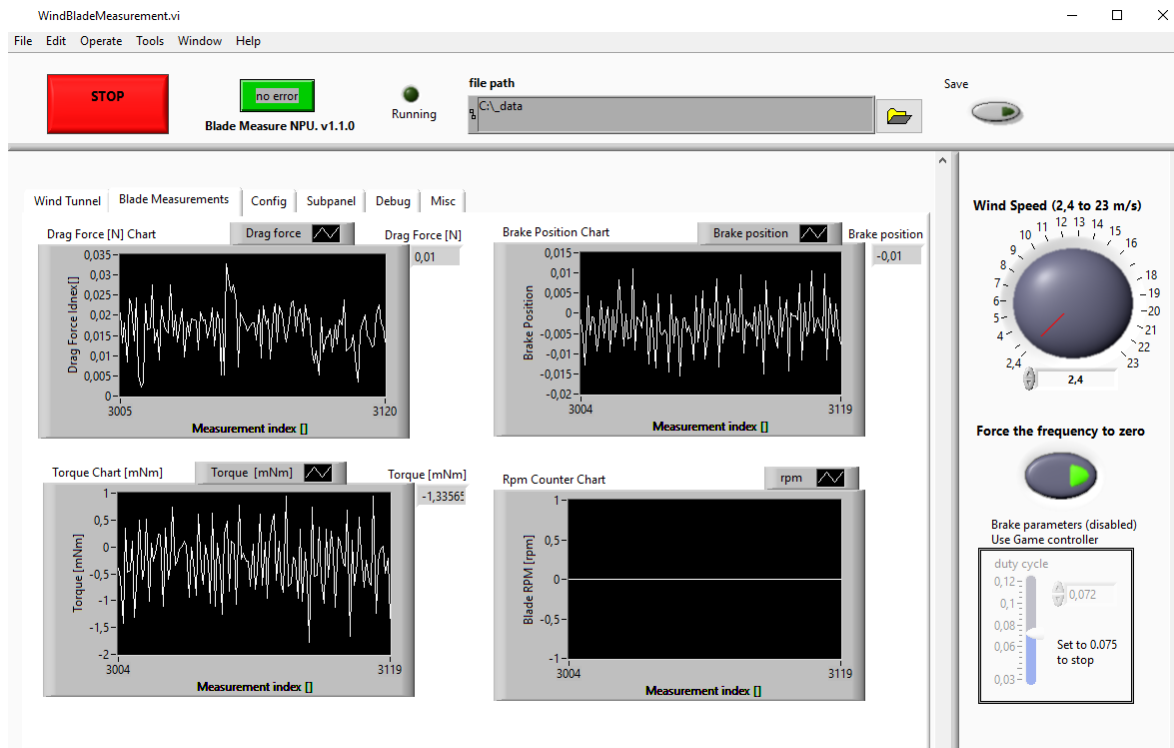
Διαδικασία μετρήσεων

Η πειραματική διερεύνηση ξεκίνησε απευθείας με τις μετρήσεις σε προκατασκευασμένο πετρύγιο, το οποίο είχε κατασκευαστεί με τρισδιάστατο εκτυπωτή. Το πετρύγιο αυτό αποτελούνταν από δέκα διαφορετικές αεροτομές, ίδιες με εκείνες που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν και αργότερα για τον σχεδιασμό του καμπύλου πετυργίου. Η επιλογή του έγινε ώστε να δημιουργηθεί μία αξιόπιστη βάση αναφοράς για την αξιολόγηση της απόδοσης.

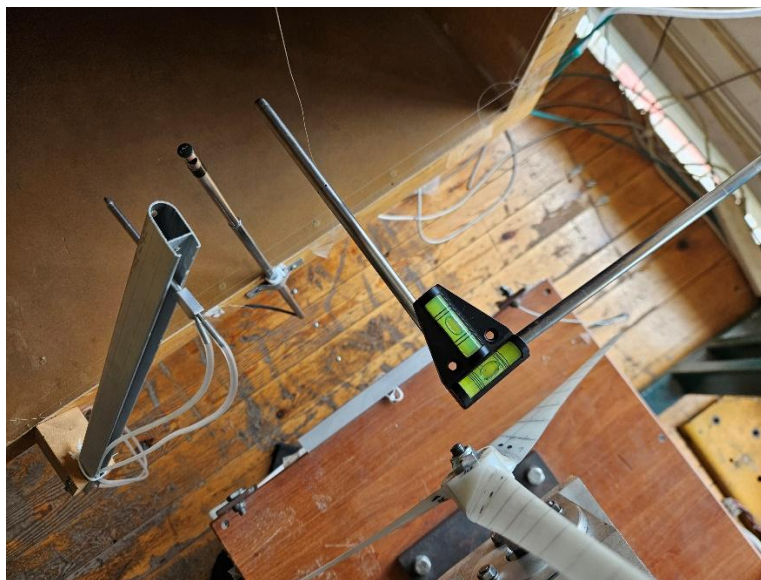


Εικόνα 43. Ευθύ πτερύγιο από HDPE (αριστερά) και ευθύ πτερύγιο από Tough 2000 (δεξιά).

Για τη μέτρηση της απόδοσης του πτερυγίου, ορίστηκε ως ελάχιστη ταχύτητα ανέμου τα 8 m/s, καθώς σε χαμηλότερες ταχύτητες (π.χ. 6 m/s) το πτερύγιο περιστρεφόταν, αλλά ακινητοποιούνταν άμεσα με την εφαρμογή ακόμη και ελάχιστης πέδησης, γεγονός που δεν επέτρεπε τη συλλογή επαρκών πειραματικών δεδομένων. Η μέγιστη ταχύτητα ανέμου ορίστηκε στα 16 m/s, ώστε η ταχύτητα περιστροφής του πτερυγίου να μην υπερβαίνει τις 8500 rpm, η οποία αποτελεί σχεδιαστικό όριο που επιλέχθηκε για τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας και την αποφυγή υπέρβασης των επιτρεπόμενων μηχανικών καταπονήσεων του πτερυγίου. Πριν από κάθε μέτρηση πραγματοποιούνταν βασικός έλεγχος της πειραματικής διάταξης. Συγκεκριμένα, (α) οι ενδείξεις στροφών και ροπής έπρεπε να είναι μηδενικές, (β) η μετρούμενη τιμή της οπισθέλκουσας δύναμης έπρεπε να είναι μηδενική, (γ) τα ανεμόμετρα της πειραματικής διάταξης ελέγχονταν ώστε να είναι ευθυγραμμισμένα και κεντραρισμένα, προκειμένου να εξασφαλίζεται η ακριβής μέτρηση της ταχύτητας ροής.



Εικόνα 44. Απεικόνιση των μετρικών ροπής και οπισθέλκουσας δύναμης σε πραγματικό χρόνο στην οθόνη ελέγχου.



Εικόνα 45. Διαδικασία ευθυγράμμισης του αισθητήρα μέτρησης ταχύτητας ανέμου στην πειραματική διάταξη.

Η διαδικασία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε ως εξής: η ταχύτητα του ανέμου στην αεροσήραγγα αυξανόταν σταδιακά έως την επιθυμητή τιμή. Η ταχύτητα ροής στη θέση του περυγίου

ελεγχόταν με εξωτερικό ανεμόμετρο θερμού σύρματος (hot-wire), με σκοπό την επαλήθευση της ένδειξης της αεροσήραγγας. Σε περίπτωση μικρών αποκλίσεων, γινόταν αντίστοιχη ρύθμιση της αεροσήραγγας ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια των συνθηκών δοκιμής. Πριν από την έναρξη της καταγραφής, εξασφαλιζόταν η σταθεροποίηση των βασικών μετρούμενων μεγεθών (στροφές, ρότορα, ροπή και οπισθέλκουσα). Αφού οι ενδείξεις σταθεροποιούνταν, πραγματοποιούνταν η καταγραφή των δεδομένων μέσω του ειδικού πλήκτρου της πειραματικής διάταξης.

Στη συνέχεια εφαρμόζονταν σταδιακά φορτία πέδησης μέσω του φρένου στον άξονα. Η αύξηση της πέδησης γινόταν βήμα-βήμα, με παύσεις ώστε να σταθεροποιηθούν οι μετρήσεις και να ληφθούν ξεκάθαρες τιμές ροπής και στροφών. Η διαδικασία επαναλαμβανόταν μέχρι το πτερύγιο να ακινητοποιηθεί πλήρως. Σκοπός ήταν η δημιουργία καμπύλης ροπής-στροφών, που στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για ταχύτητες ανέμου 8, 10, 12, 14, και 16 m/s, και στη συνέχεια η διαδικασία επαναλήφθηκε σε φθίνουσα σειρά (16, 14, 12, 10 και 8 m/s), ώστε να διασφαλιστεί η επαναληψιμότητα και να αποφευχθούν τυχόν συστηματικά σφάλματα. Για κάθε ταχύτητα ανέμου συλλέχθηκαν περισσότερα από έξι σετ μετρήσεων, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός αξιόπιστου μέσου όρου.

Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε με ρυθμό δειγματοληψίας 200 ms, ώστε να αγνοούνται μικρές διακυμάνσεις και να καταγραφούν σταθεροποιημένες τιμές. Τα δεδομένα αποθηκεύονταν σε αρχεία μορφής .txt, με δυνατότητα εισαγωγής και επεξεργασίας στο Excel για περαιτέρω ανάλυση.

Αφού ολοκληρώθηκε η μετρητική διαδικασία για το πρώτο πτερύγιο, προχωρήσαμε στη διερεύνηση του δεύτερου ίδιου πτερυγίου, με ακριβώς τις ίδιες αεροτομές και γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Η διαφορά ήταν ότι αυτό είχε κατασκευαστεί από υλικό Tough 2000, γεγονός που επέτρεψε τη σύγκριση της συμπεριφοράς διαφορετικών υλικών υπό τις ίδιες ακριβώς συνθήκες λειτουργίας.

3.4 Σχεδίαση Καμπύλων Πτερυγίων

Δημιουργία Μοντέλου Πτερυγίου

Για τον σχεδιασμό του καμπύλου πτερυγίου με διάταξη τύπου Forward Sweep χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CAD/CAM SolidWorks. Το SolidWorks παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον τρισδιάστατης σχεδίασης, το οποίο επιτρέπει τη δημιουργία παραμετρικών μοντέλων υψηλής

ακρίβειας. Μέσω της παραμετρικής προσέγγισης, καθίσταται δυνατή η εύκολη τροποποίηση βασικών γεωμετρικών παραμέτρων (όπως το μήκος, η καμπυλότητα ή η γωνία sweep) χωρίς την ανάγκη επανασχεδίασης ολόκληρου του προτύπου. Με αυτόν τον τρόπο, η διαδικασία επανασχεδίασης και επαναξιολόγησης του πρωτότυπου μοντέλου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε σημαντικά συντομότερο χρόνο.

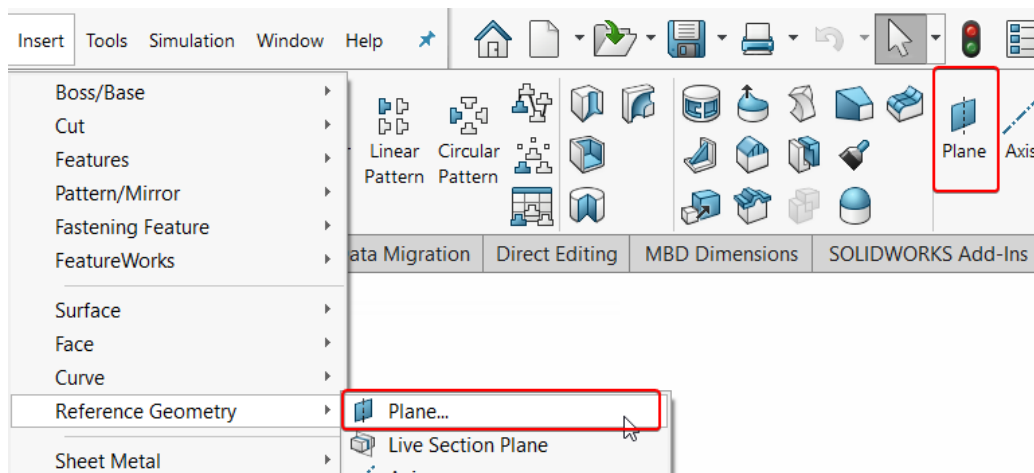
Επιπλέον, το SolidWorks προσφέρει ενσωματωμένες δυνατότητες ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEA) για την εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς του πτερυγίου υπό δυναμικά ή στατικά φορτία, καθώς και εργαλεία υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) για την προσομοίωση της ροής γύρω από το πτερύγιο. Η συνδυασμένη χρήση των δυνατοτήτων αυτών καθιστά το SolidWorks ιδιαίτερα κατάλληλο για τις ανάγκες της εργασίας.

Για τον σχεδιασμό του καμπύλου πτερυγίου, κρίθηκε απαραίτητο να διατηρηθούν τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου αναφοράς, ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση της αεροδυναμικής και δομικής συμπεριφοράς των δύο μοντέλων. Το πρώτο και σημαντικότερο χαρακτηριστικό αφορά τις επιμέρους αεροτομές που συνθέτουν το πτερύγιο. Τόσο το ευθύ (αναφοράς) όσο και το καμπύλο πτερύγιο αποτελούνται από αεροτομές της οικογένειας NACA 44xx, και συγκεκριμένα την NACA 4415 κατά μήκος του πτερυγίου, μεταβάλλοντας μόνο το μήκος της χορδής. Η τοποθέτηση των αεροτομών πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε η απόστασή τους από τον άξονα περιστροφής να παραμένει ίδια με εκείνη του πτερυγίου αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό διατηρείται η ίδια γεωμετρική σχέση μεταξύ των αεροτομών και του κεντρικού άξονα, εξασφαλίζοντας ότι η κατανομή της ακτίνας και της γεωμετρίας κατά μήκος του πτερυγίου παραμένει αμετάβλητη. Η μοναδική διαφοροποίηση που εισάγεται στο νέο μοντέλο αφορά την καμπύλη γεωμετρία του πτερυγίου προς τα εμπρός (forward sweep), η οποία εφαρμόστηκε κατά τη φάση της μοντελοποίησης στο SolidWorks. Με τον τρόπο αυτό, το πτερύγιο με καμπύλη γεωμετρία διατηρεί όλα τα βασικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου αναφοράς, επιτρέποντας τη μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας μεμονωμένα, χωρίς την επιρροή άλλων παραμέτρων.

Γνωρίζοντας από το πτερύγιο αναφοράς τις αεροτομές που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του πτερυγίου με καμπύλη γεωμετρία, το πρώτο βήμα της διαδικασίας σχεδίασης ήταν η συλλογή των γεωμετρικών συντεταγμένων τους. Οι συντεταγμένες αυτές αντιστοιχούν στα σημεία που ορίζουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες κάθε αεροτομής, με στόχο την ακριβή αναπαραστάσή τους στο λογισμικό σχεδίασης. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το διαδικτυακό εργαλείο AirfoilTools (<http://airfoiltools.com/>), το οποίο παρέχει τη δυνατότητα αναζήτησης και

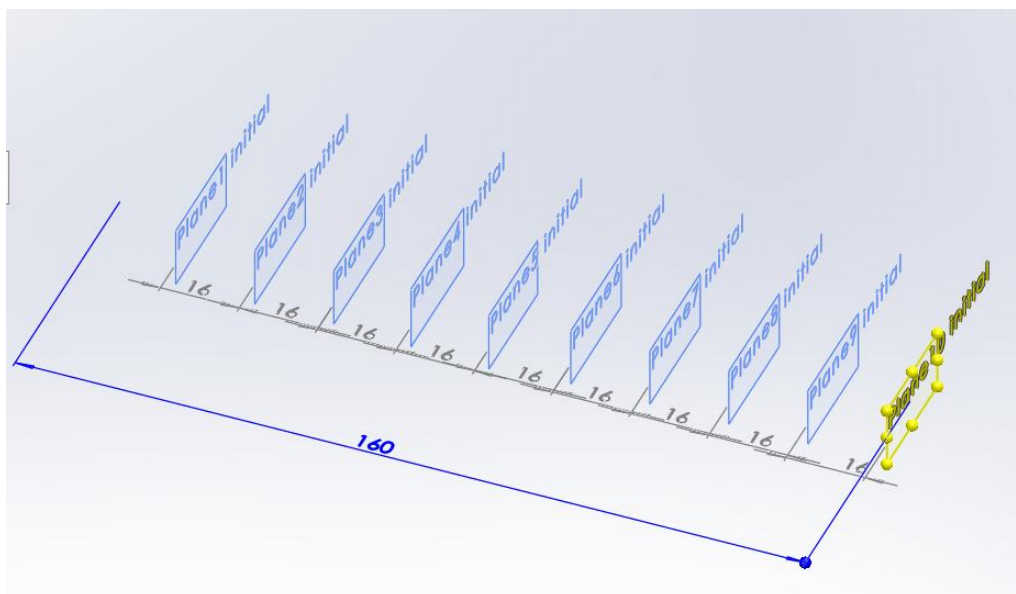
εξαγωγής συντεταγμένων σημείων για πλήθος αεροτομών, συμπεριλαμβανομένων εκείνων της οικογένειας NACA 4415, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Μέσω της πλατφόρμας αυτής είναι δυνατή η εξαγωγή λίστας συντεταγμένων, η οποία μπορεί να εισαχθεί απευθείας στο SolidWorks, επιτρέποντας τη γρήγορη και ακριβή σχεδίαση του προφίλ κάθε αεροτομής.

Για τον σχεδιασμό του πτερυγίου στο περιβάλλον του SolidWorks, δημιουργήθηκαν αρχικά δέκα (10) νέα επίπεδα σχεδίασης (planes), παράλληλα σε ένα από τα κύρια κάθετα επίπεδα αναφοράς.



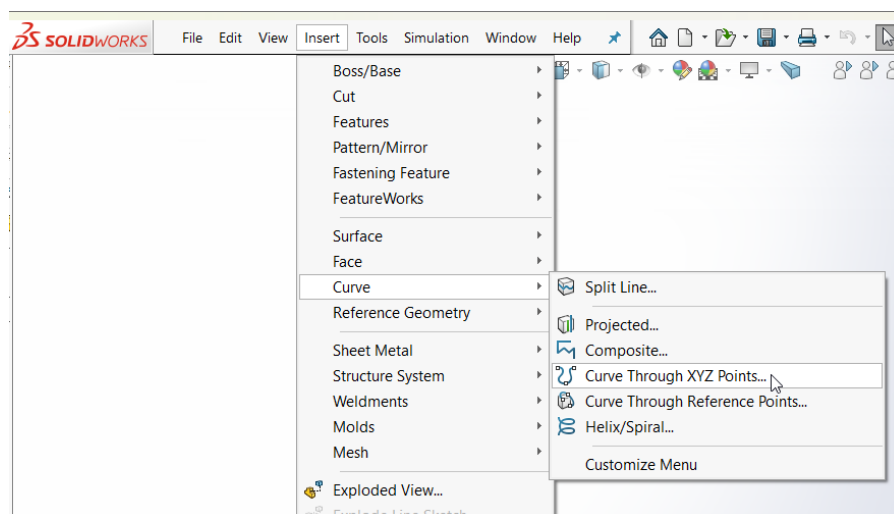
Εικόνα 46. Θέση της εντολής δημιουργίας νέου επιπέδου αναφοράς (Plane).

Τα επίπεδα αυτά τοποθετήθηκαν σε ίσες αποστάσεις κατά μήκος του άξονα του πτερυγίου, ώστε το τελευταίο επίπεδο να βρίσκεται σε απόσταση 160 mm από τον άξονα περιστροφής, ορίζοντας έτσι το συνολικό μήκος της πτέρυγας.



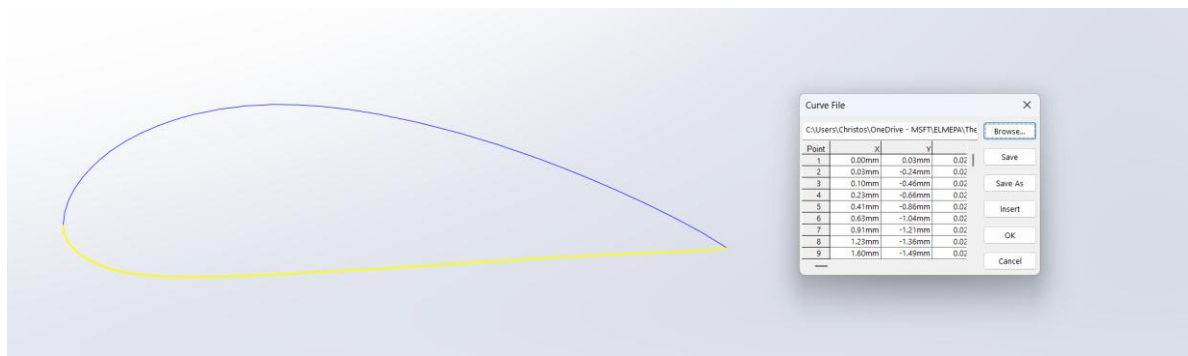
Εικόνα 47. Επίπεδα σχεδίασης των αεροτομών κατά μήκος του περυγίου.

Στη συνέχεια, για κάθε επίπεδο εισήχθη η καμπύλη της αντίστοιχης αεροτομής, κάνοντας χρήση της εντολής «Curve Through XYZ Points».



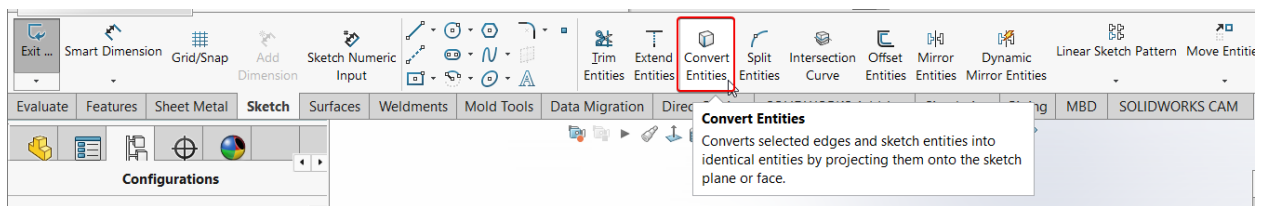
Εικόνα 48. Θέση της εντολής «Curve Through XYZ Points».

Η εντολή αυτή επιτρέπει την εισαγωγή των συντεταγμένων σημείων (x, y, z) που είχαν προηγουμένως εξαχθεί από το Airfoil Tools, επιτρέποντας έτσι την ακριβή αναπαράσταση της γεωμετρίας κάθε αεροτομής στο SolidWorks. Ιδιαίτερα χρήσιμη πρακτική κατά τη διαδικασία αυτή ήταν ο διαχωρισμός των συντεταγμένων του άνω και του κάτω μέρους της αεροτομής. Με αυτόν τον τρόπο, διευκολύνεται τόσο η μετέπειτα σχεδίαση της επιφάνειας του περυγίου όσο και η διαδικασία προσομοιώσεων και μετρήσεων των παραμορφώσεων.



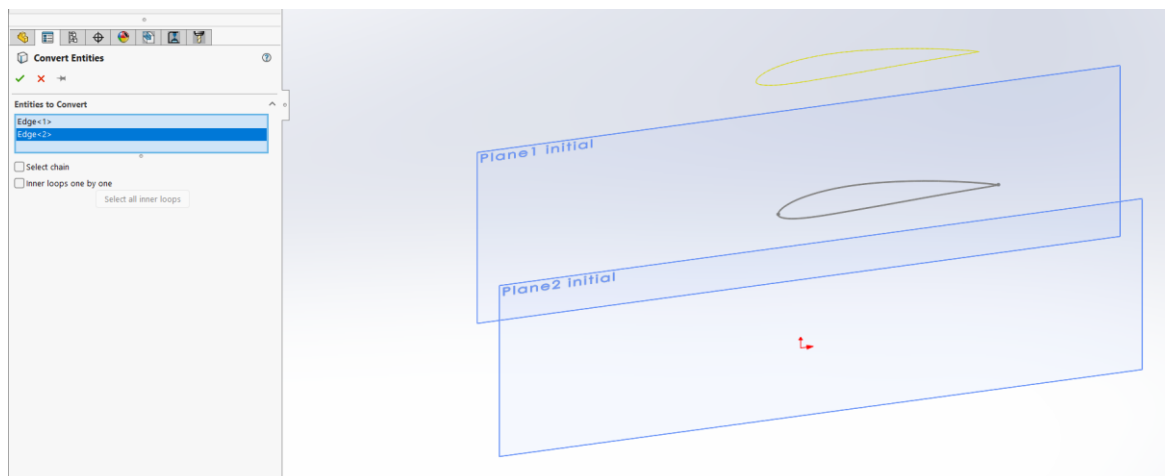
Εικόνα 49. Εισαγωγή σχεδίου αεροτομής του πτερυγίου με συντεταγμένες.

Για να μεταφερθεί η γεωμετρία της κάθε αεροτομής στο αντίστοιχο επίπεδο αναφοράς, χρησιμοποιήθηκε η εντολή [Sketch] → [Convert Entities].



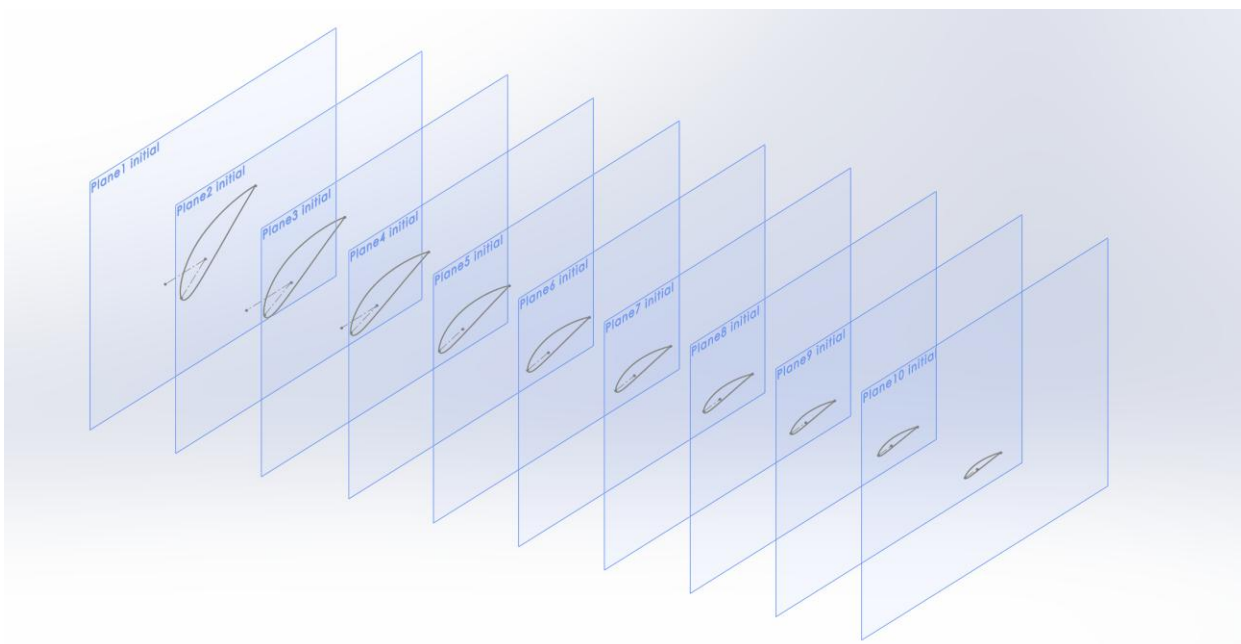
Εικόνα 50. Θέση της εντολής «Convert Entities» στο περιβάλλον σχεδίασης.

Αρχικά επιλέγεται το επιθυμητό επίπεδο σχεδίασης και στη συνέχεια η καμπύλη που έχει εισαχθεί μέσω της εντολής Curve Through XYZ Points. Με τον τρόπο αυτό, η καμπύλη προβάλλεται στο ενεργό επίπεδο σχεδίασης. Τέλος, ορίστηκε το σημείο περιστροφής της αεροτομής, το οποίο θεωρήθηκε ως κέντρο βάρους, και κάθε αεροτομή μετατοπίστηκε ώστε το σημείο αυτό να συμπίπτει με την αρχή των αξόνων $x = 0, y = 0$.



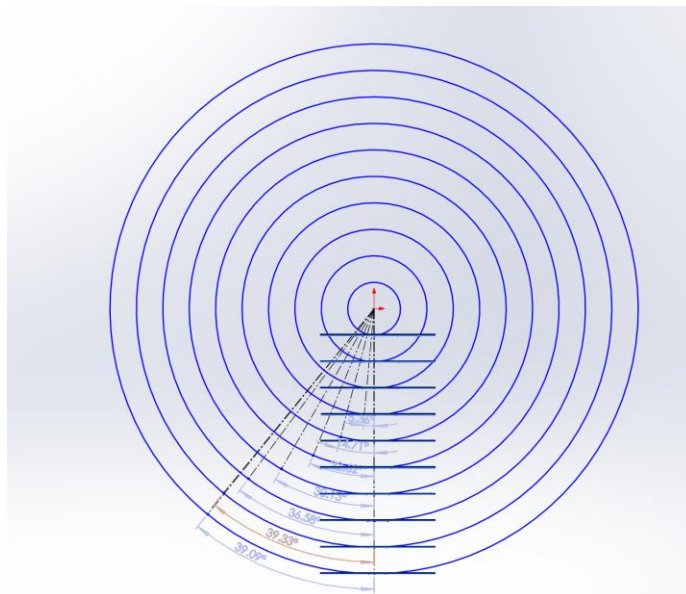
Εικόνα 51. Προβολή του αρχικού σχεδίου της αεροτομής στο επίπεδο της πρώτης αεροτομής.

Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για όλες τις δέκα αεροτομές, ώστε κάθε μία να τοποθετηθεί με ακρίβεια στη σωστή της θέση κατά μήκος του άξονα περιστροφής. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε ένα σύνολο από παράλληλες διατομές που αναπαριστούν την τρισδιάστατη γεωμετρία του πτερυγίου.



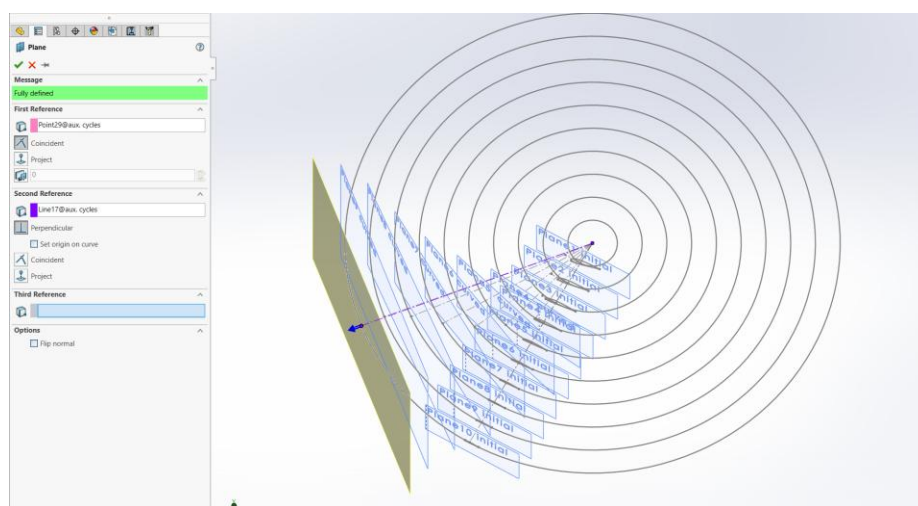
Εικόνα 52. Επίπεδα σχεδίασης με τις αντίστοιχες αεροτομές του πτερυγίου τοποθετημένες κατά μήκος του.

Οι παρακάτω διαδικασίες εφαρμόζονται αποκλειστικά για τον σχεδιασμό πτερυγίου με καμπύλη γεωμετρία. Σε περίπτωση σχεδίασης ευθύγραμμου πτερυγίου, τα αντίστοιχα βήματα μπορούν να παραλειφθούν. Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα νέο Sketch στο οριζόντιο επίπεδο (Top Plane), το οποίο αποτελούνταν από δέκα ομόκεντρους κύκλους με κοινό κέντρο στο σημείο (0,0). Η ακτίνα κάθε κύκλου αντιστοιχούσε στην απόσταση της εκάστοτε αεροτομής από το επίπεδο βάσης. Πάνω σε κάθε κύκλο σχεδιάστηκε μία ακτινική γραμμή, η οποία ορίζει τη θέση (δηλαδή το κεντρικό σημείο) της αεροτομής. Με τη χρήση γωνιακών διαστάσεων μεταξύ της ακτινικής γραμμής και της ευθείας πορείας του πτερυγίου, καθίσταται δυνατός ο καθορισμός της καμπυλότητας του πτερυγίου κατά μήκος του άξονα περιστροφής, ενώ διατηρείται σταθερή η απόσταση κάθε αεροτομής από τον άξονα.



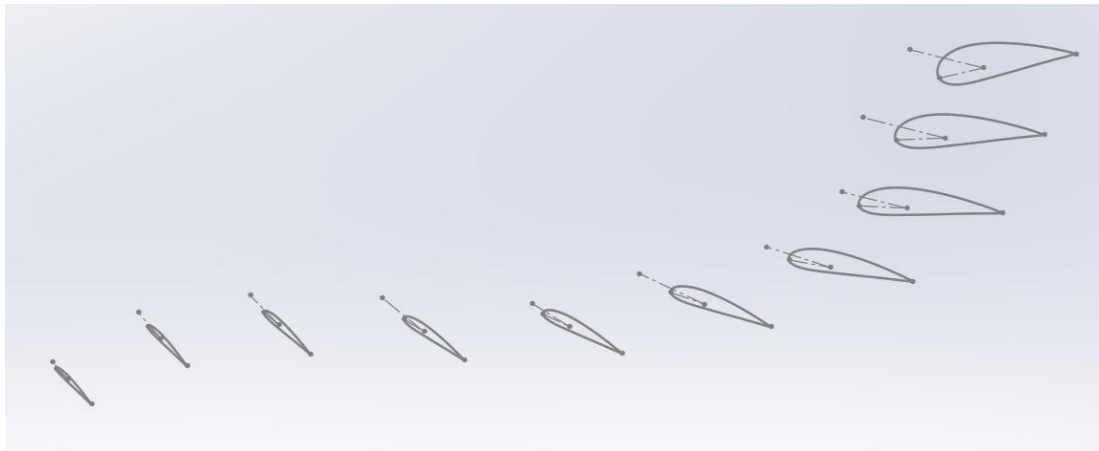
Εικόνα 53. Δημιουργία ομόκεντρων κύκλων και ακτινικών γραμμών για τον καθορισμό της θέσης των αεροτομών κατά μήκος του άξονα περιστροφής.

Στο επόμενο βήμα, στο σημείο τομής κάθε ακτινικής γραμμής με τον αντίστοιχο κύκλο, δημιουργήθηκε νέο επίπεδο σχεδίασης (Reference Geometry → Plane), κάθετο ως προς την ακτινική γραμμή. Στη συνέχεια, το σχέδιο της αεροτομής αντιγράφηκε από το αρχικό επίπεδο και επικολλήθηκε στο αντίστοιχο νέο επίπεδο. Το κέντρο της αεροτομής τοποθετήθηκε στο σημείο τομής της ακτινικής γραμμής με τον αντίστοιχο κύκλο, ώστε να διασφαλιστεί η γεωμετρική ακρίβεια κατά τη διαδοχική τοποθέτηση των αεροτομών κατά μήκος του περυγίου.



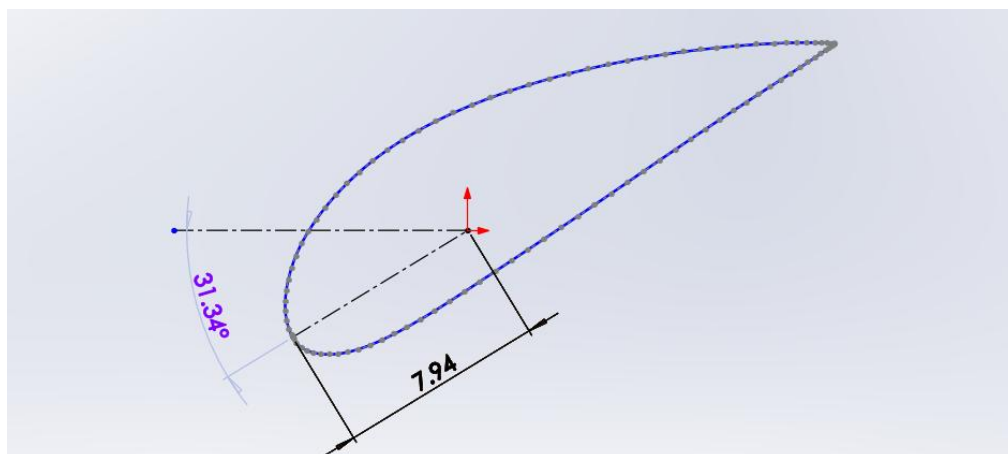
Εικόνα 54. Δημιουργία επιπέδων σχεδίασης για την κατασκευή καμπύλου περυγίου.

Για την παρούσα εργασία, δεν δημιουργήθηκαν νέα επίπεδα για τις τρεις πρώτες αεροτομές, καθώς κρίθηκε ότι η μετατόπιση των αεροτομών δεν είναι σκόπιμο να ξεκινά τόσο κοντά στη ρίζα του πτερυγίου. Συνεπώς, η μετατόπιση εφαρμόζεται από την τέταρτη αεροτομή και έπειτα, ενώ οι τρεις πρώτες παραμένουν αμετάβλητες. Οι υπόλοιπες επτά αρχικές αεροτομές αποκρύφθηκαν για λόγους ευκολίας και καθαρότητας του μοντέλου.



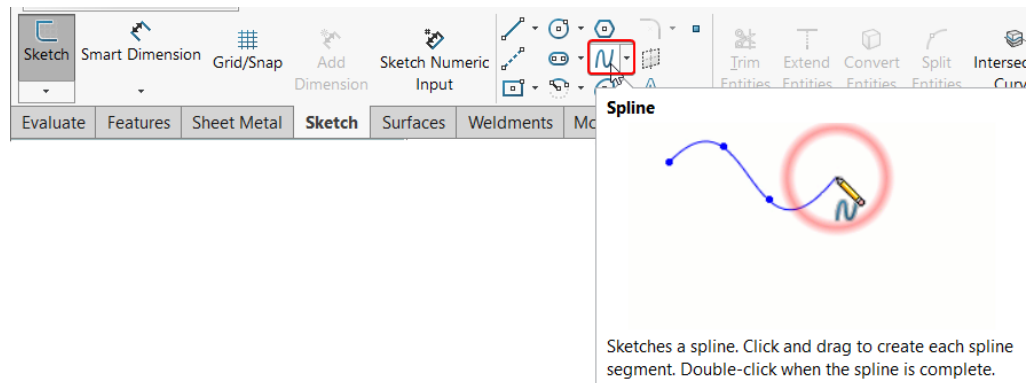
Εικόνα 55. Αεροτομές καμπύλου πτερυγίου.

Κάθε αεροτομή παραμετροποιήθηκε με περιστροφή γύρω από το σημείο αναφοράς της, ώστε να εφαρμοστεί η επιθυμητή γωνία τοποθέτησης (setting angle). Οι αρχικές τιμές της γωνίας αυτής καθορίστηκαν με βάση τα αποτελέσματα του υπολογιστικού εργαλείου DINLINDA, με το οποίο υπολογίστηκε η βέλτιστη γωνία προσβολής για την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας του πτερυγίου.



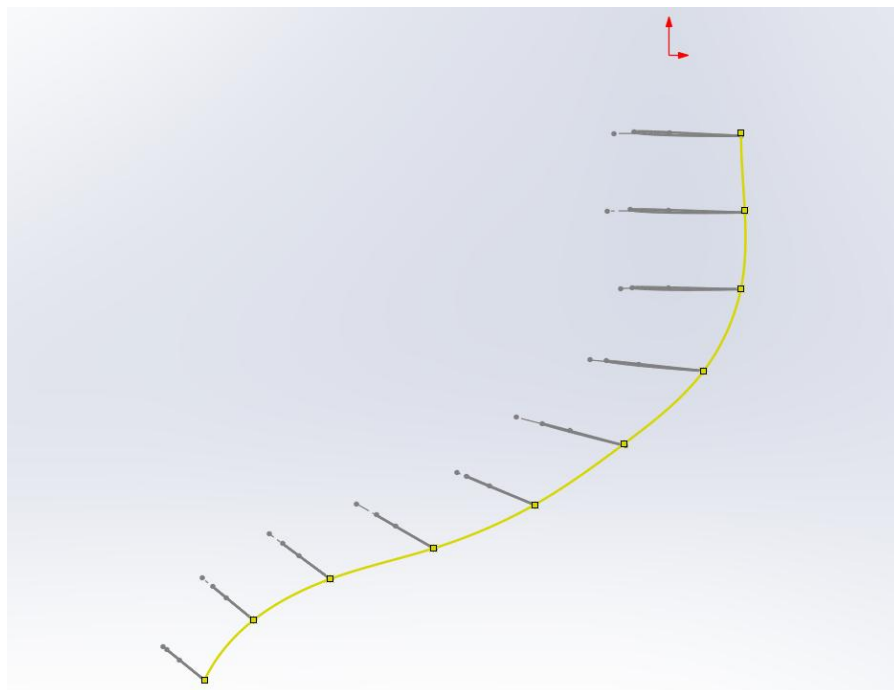
Εικόνα 56. Εφαρμογή στρέψης στις αεροτομές για τον καθορισμό της γωνίας τοποθέτησης πτερυγίου.

Στο οριζόντιο επίπεδο σχεδιάστηκε μία καμπύλη (Spline) που συνδέει τα σημεία εκφυγής όλων των αεροτομών.



Εικόνα 57 Θέση της εντολής «Spline» στο περιβάλλον σχεδίασης.

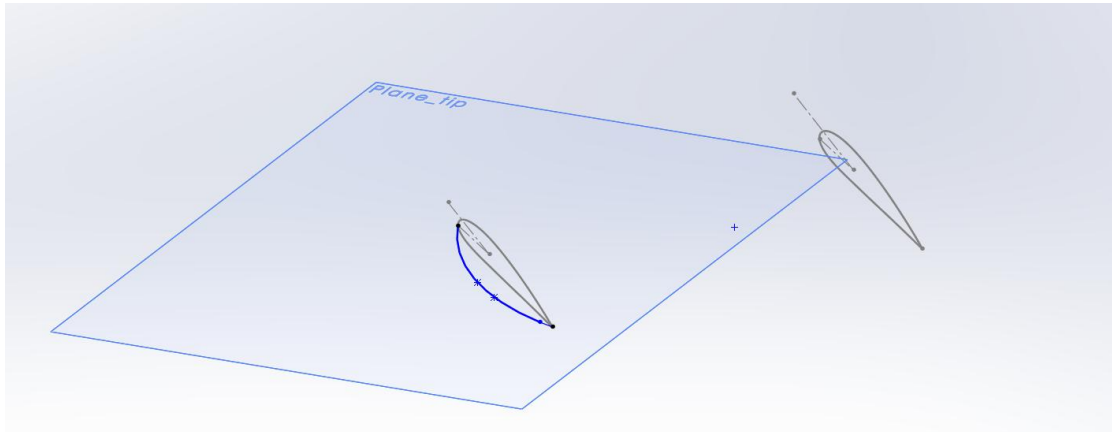
Η καμπύλη αυτή λειτουργεί ως οδηγός για τη δημιουργία του τρισδιάστατου κελύφους του πτερυγίου.



Εικόνα 58. Δημιουργία καμπύλης οδηγού για τη σύνδεση των αεροτομών κατά μήκος του πτερυγίου.

Αντίστοιχα, δημιουργήθηκε και δεύτερη καμπύλη σαν οδηγός για το ακροπτερύγιο. Για να γίνει αυτό, ορίστηκε πρώτα ένα νέο επίπεδο παράλληλο με τη χορδή της δέκατης αεροτομής και επάνω του σχεδιάστηκε καμπύλη που ενώνει τα δύο άκρα της. Όπου επάνω σε αυτή τοποθετήθηκε

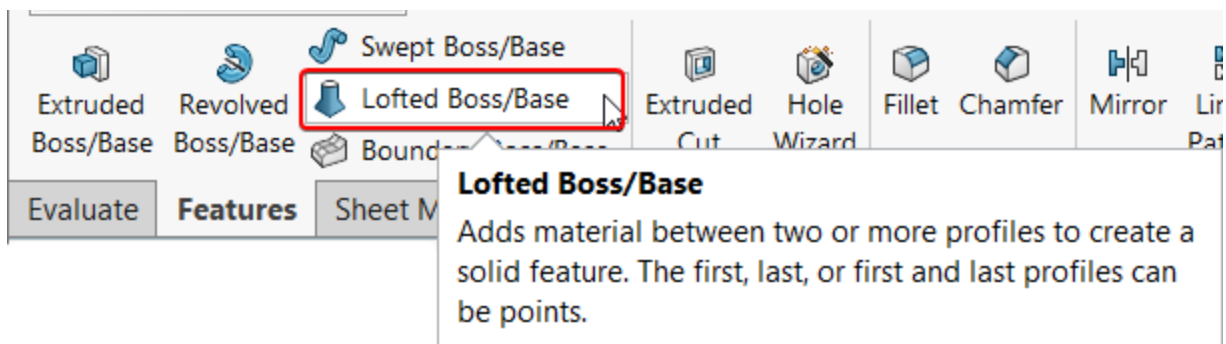
ένα σημείο, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως τερματικό προφίλ για την κατασκευή του ακροπτερυγίου.



Εικόνα 59. Δημιουργία καμπύλης οδηγού για τον σχηματισμό του ακροπτερυγίου.

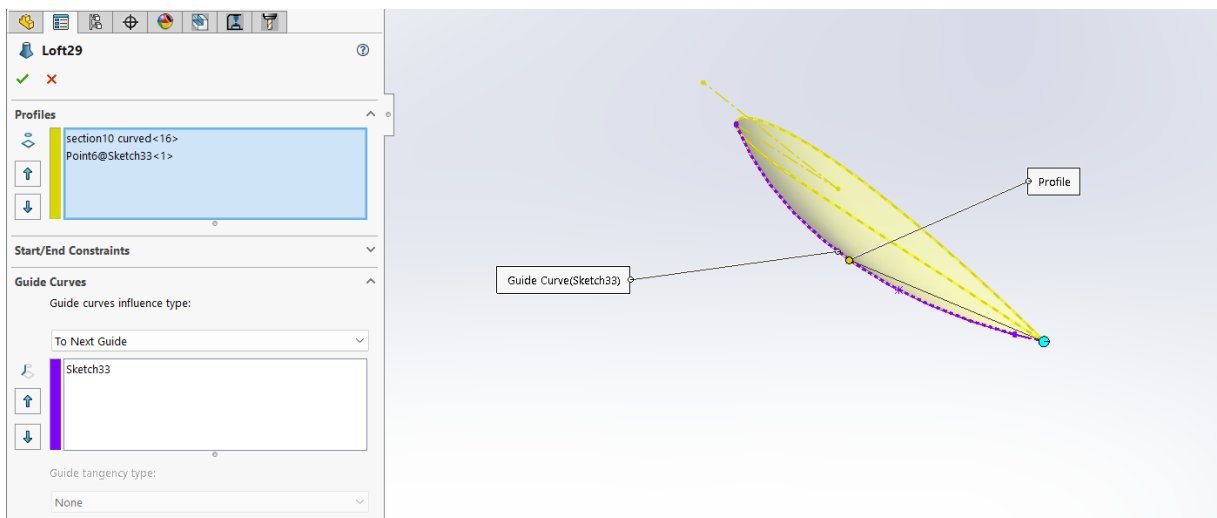
Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου

Η δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου του ακροπτερυγίου πραγματοποιήθηκε με την εντολή [Features] → [Lofted Boss/Base], επιλέγοντας ως προφίλ την δέκατη αεροτομή και ως δεύτερο προφίλ το σημείο που είχε τοποθετηθεί επάνω στην καμπύλη.



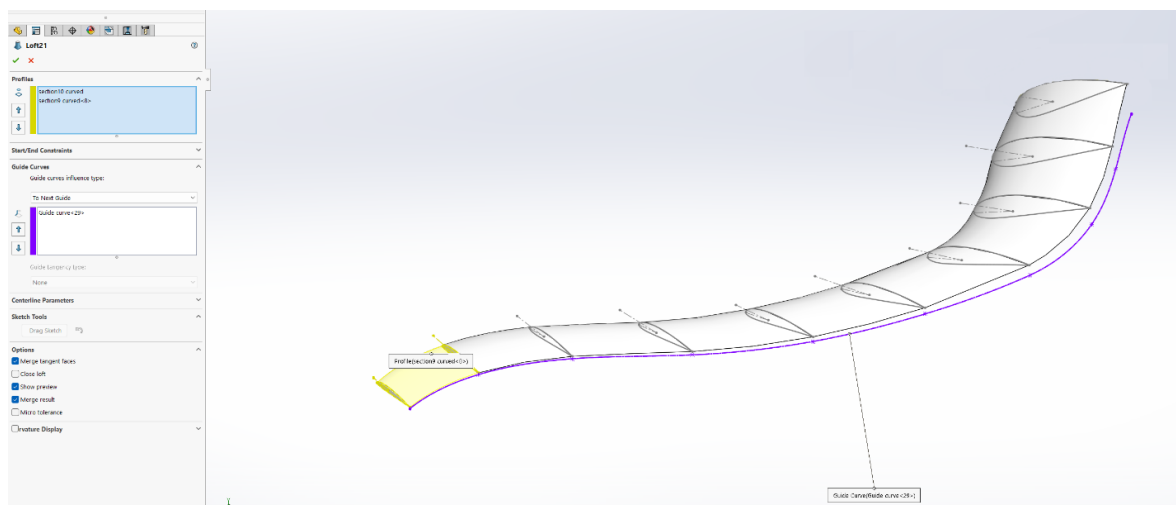
Εικόνα 60. Θέση της εντολής «Lofted Boss/Base» στο περιβάλλον σχεδίασης.

Ως Guide Curve ορίστηκε η καμπύλη του ακροπτερυγίου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε ομαλή μετάβαση και καμπυλότητα στην άκρη του πτερυγίου.



Εικόνα 61. Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου του ακροπτερυγίου.

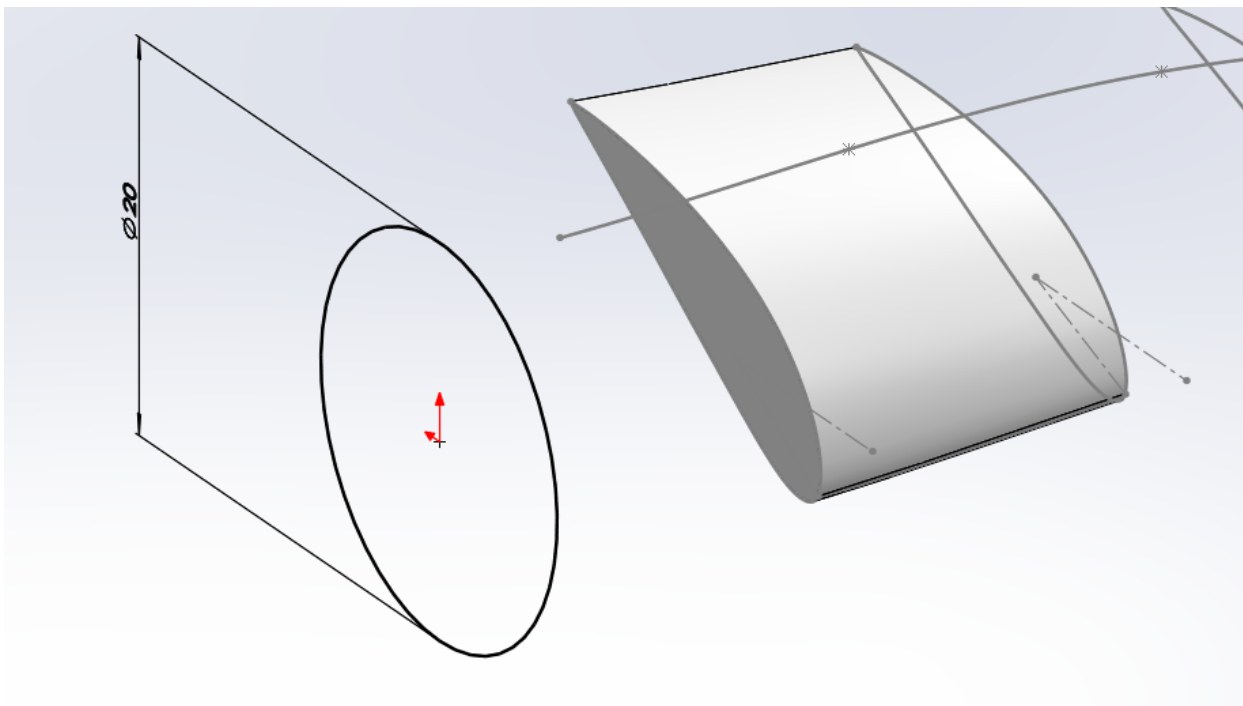
Ακολούθως, με την ίδια εντολή δημιουργήθηκε το υπόλοιπο σώμα του πτερυγίου. Αρχικά επιλέχθηκαν ως προφίλ οι δύο πρώτες αεροτομές και ως οδηγός η καμπύλη που είχε δημιουργηθεί με την εντολή Spline. Το αποτέλεσμα ήταν το πρώτο τμήμα του πτερυγίου. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε σταδιακά από αεροτομή σε αεροτομή, ώστε να δημιουργηθούν τμήματα για κάθε ενδιάμεση περιοχή. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την ύπαρξη ξεκάθαρων επιφανειών, γεγονός ιδιαίτερα χρήσιμο για τις μελλοντικές στατικές αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία.



Εικόνα 62. Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου του πτερυγίου μέσω σύνδεσης των αεροτομών με την καμπύλη οδηγό.

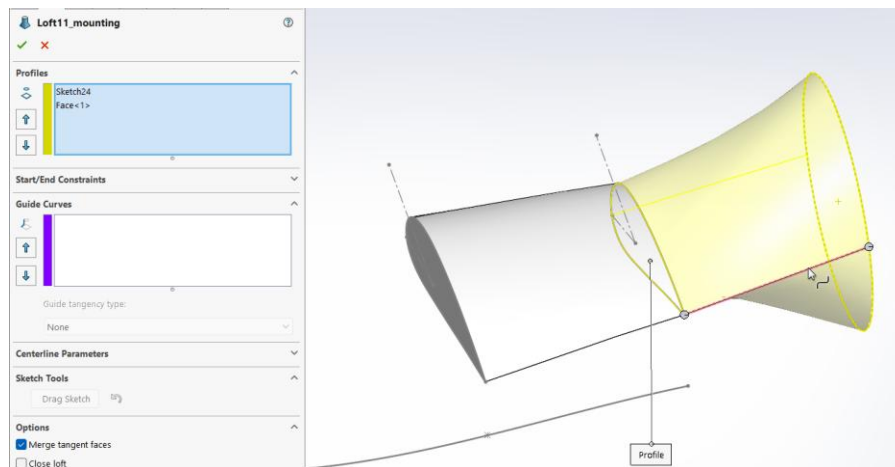
Στη συνέχεια, στο επίπεδο σχεδιασμού Front Plane δημιουργήθηκε ένα νέο σχέδιο (Sketch), το οποίο αποτελούνταν από έναν κύκλο με το κέντρο του στο σημείο (0,0) του επιπέδου. Ο κύκλος

αυτός χρησιμοποιήθηκε ως γεωμετρικό σημείο αναφοράς για τη σύνδεση του πτερυγίου με τη βάση.



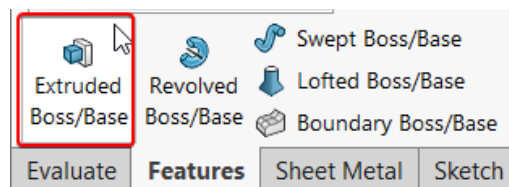
Εικόνα 63. Δημιουργία σχεδίου για τη γεωμετρία σύνδεσης του πτερυγίου με τη βάση του πτερυγίου.

Ακολουθώντας, εφαρμόστηκε η εντολή Lofted Boss/Base (Loft) για τη δημιουργία της γεωμετρίας σύνδεσης μεταξύ της πρώτης αεροτομής του πτερυγίου και της βάσης. Κατά την εκτέλεση της εντολής επιλέχθηκαν διαδοχικά το προφίλ της αεροτομής και ο κύκλος που σχεδιάστηκε, ώστε να δημιουργηθεί το ενδιάμεσο στερεό τμήμα που συνδέει ομαλά τη βάση με το πτερύγιο. Ιδιαίτερη σημασία σε αυτό το στάδιο έχει ο σωστός καθορισμός των Guide Lines, οι οποίες εξασφαλίζουν ομαλή μετάβαση και συνεχή γεωμετρία ανάμεσα στα δύο μέρη, αποτρέποντας ασυνέχειες ή ανεπιθύμητες παραμορφώσεις στην επιφάνεια σύνδεσης.

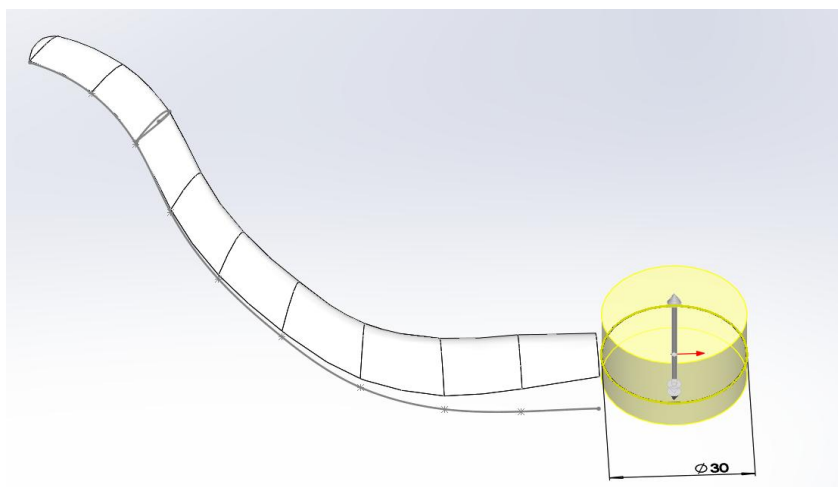


Εικόνα 64. Δημιουργία της γεωμετρίας σύνδεσης του περυγίου με τη βάση του περυγίου.

Μετά την ολοκλήρωση της βασικής γεωμετρίας του περυγίου, ακολούθησε ο σχεδιασμός της βάσης στήριξης του. Αρχικά δημιουργήθηκε ένα νέο Sketch στο οριζόντιο επίπεδο σχεδίασης (Top Plane), στο οποίο σχεδιάστηκε κύκλος διαμέτρου $\varnothing 30$ mm. Με τη χρήση της εντολής [Features] → [Extruded Boss/Base], το σκίτσο αναπτύχθηκε κατακόρυφα προς τα πάνω, δημιουργώντας έναν κυλινδρικό δίσκο που αποτέλεσε το κύριο σώμα της βάσης.

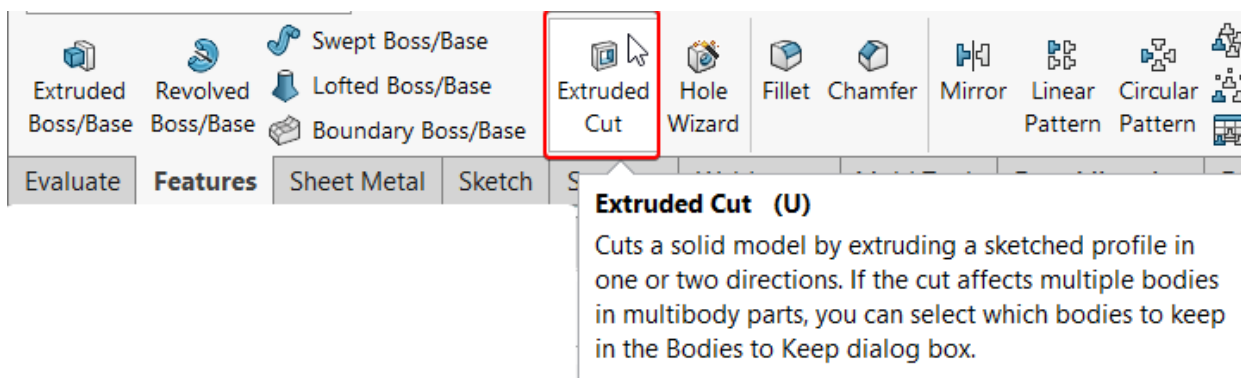


Εικόνα 65. Θέση της εντολής «Extruded Boss/Base» στο περιβάλλον σχεδίασης.



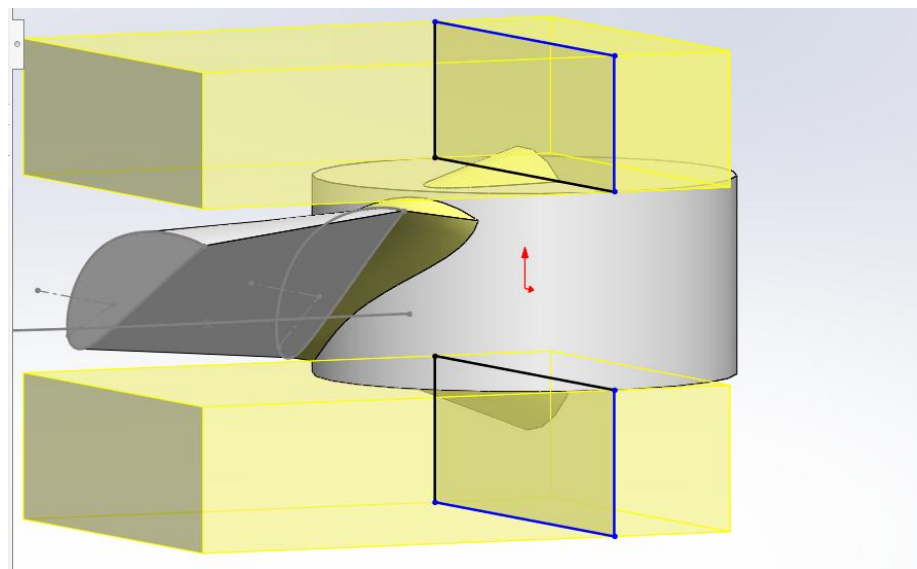
Εικόνα 66. Δημιουργία της γεωμετρίας της βάσης του περυγίου.

Στη συνέχεια, στο επίπεδο σχεδιασμού Front Plane, δημιουργήθηκε ένα ακόμη σχέδιο (Sketch), το οποίο αποτελούνταν από δύο παραλληλόγραμμα. Κάθε παραλληλόγραμμο ήταν τοποθετημένο σε μία από τις δύο επίπεδες πλευρικές επιφάνειες του κυλίνδρου της βάσης. Ο σκοπός του συγκεκριμένου σχεδίου ήταν, με τη χρήση της εντολής [Features] → [Extruded Cut], να αφαιρεθεί το τμήμα του στερεού Loft που είχε δημιουργηθεί προηγουμένως για τη σύνδεση της βάσης με το υπόλοιπο πτερύγιο.



Εικόνα 67. Θέση της εντολής «Extruded Cut» στο περιβάλλον σχεδίασης.

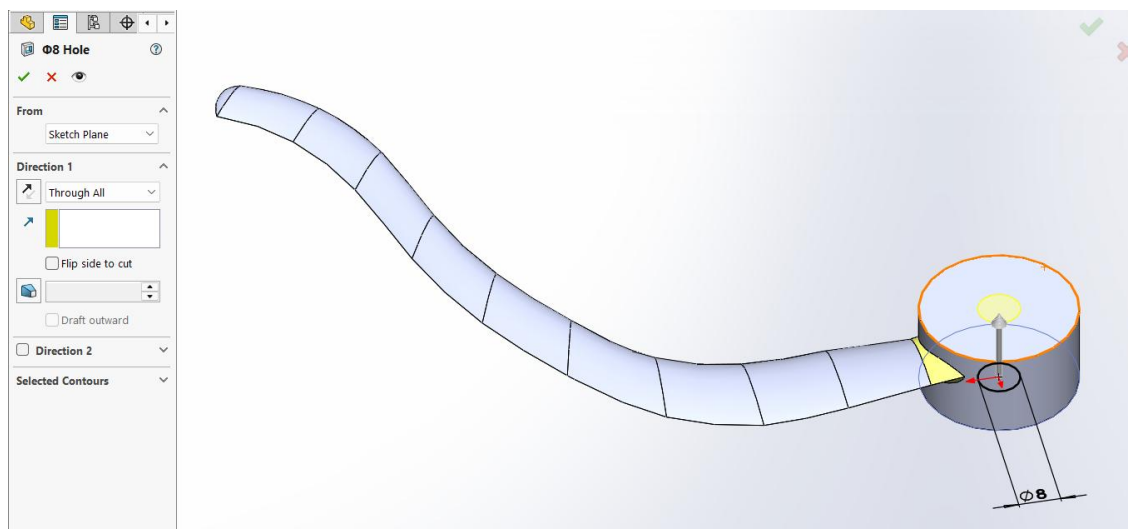
Με αυτόν τον τρόπο διαμορφώθηκε σωστά η τελική γεωμετρία επαφής μεταξύ των δύο τμημάτων.



Εικόνα 68. Αφαίρεση της περιττής γεωμετρίας.

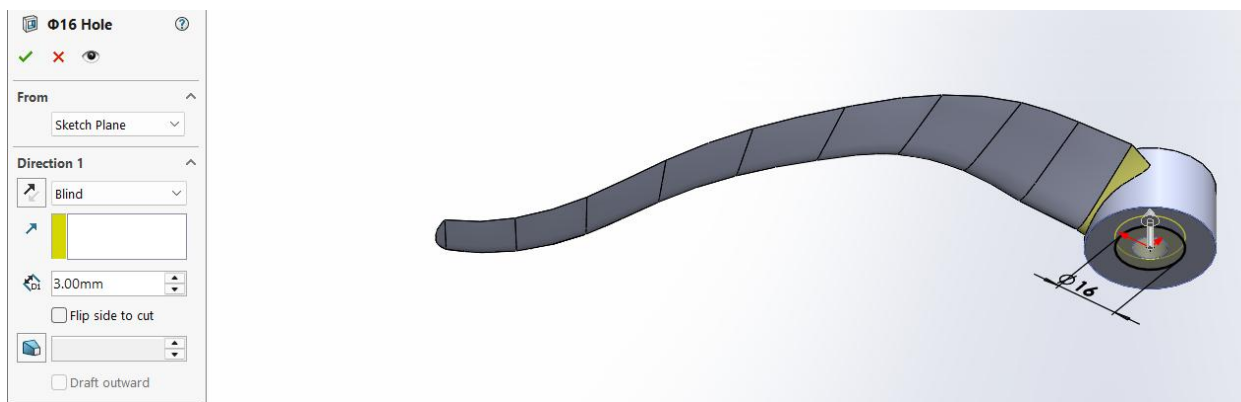
Στη συνέχεια, στην επάνω επιφάνεια του κυλινδρικού δίσκου δημιουργήθηκε νέο Sketch, στο οποίο σχεδιάστηκε κύκλος διαμέτρου $\varnothing 9\text{mm}$. Χρησιμοποιώντας την εντολή [Features] →

[Extruded Cut], δημιουργήθηκε διαμερής οπή στο κέντρο της βάσης, μέσω της οποίας η βάση μπορεί να προσαρμοστεί στον άξονα περιστροφής της πειραματικής διάταξης.



Εικόνα 69. Δημιουργία οπής στη βάση του πτερυγίου για τη μηχανική σύνδεση με την πλήμνη.

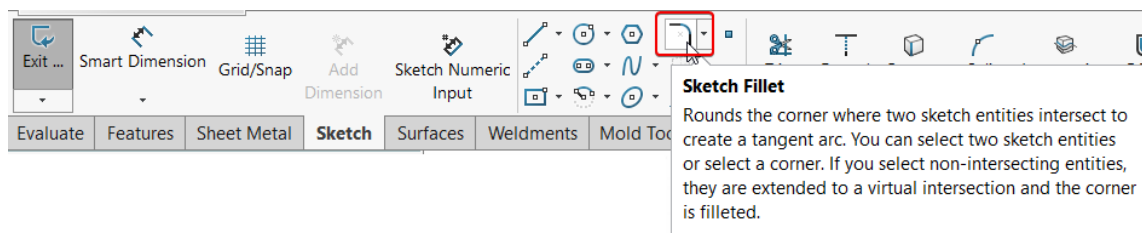
Επιπλέον, επάνω στην ίδια επιφάνεια της βάσης δημιουργήθηκε ακόμη μία κυκλική εσοχή, η οποία προορίζεται για την έδραση ροδέλας και περικοχλίου κατά τη στερέωση της βάσης πάνω στον άξονα. Η εσοχή αυτή δημιουργήθηκε με την ίδια διαδικασία, μέσω της εντολής «Extruded Cut» με καθορισμένο βάθος.



Εικόνα 70. Δημιουργία εσοχής στη βάση του πτερυγίου.

Στο επόμενο στάδιο, σχεδιάστηκε στην περιφέρεια της βάσης μια εσοχή σε σχήμα “T”, η οποία λειτουργεί ως υποδοχή για το αρσενικό άκρο του πτερυγίου. Το σχήμα της εσοχής σχεδιάστηκε ασύμμετρο, ώστε να αποτρέπεται η τοποθέτηση του πτερυγίου με λανθασμένο προσανατολισμό.

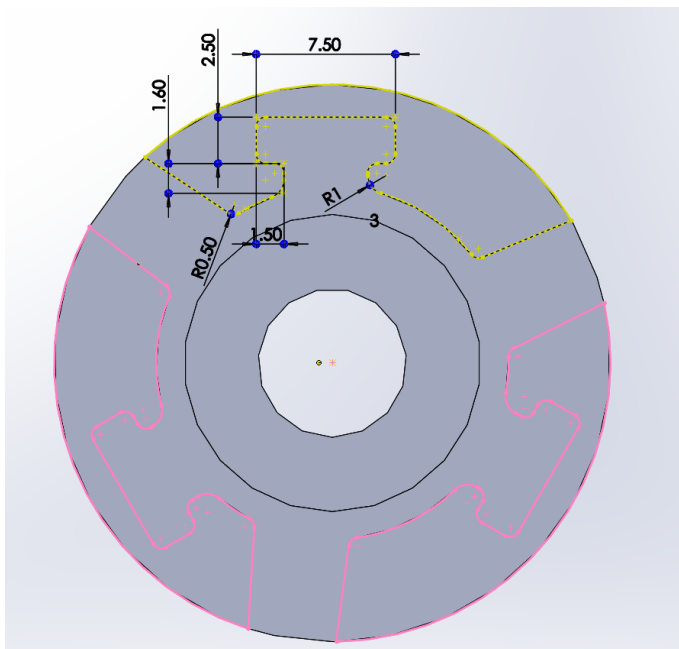
Κατά τη σχεδίαση του προφίλ στο Sketch, εφαρμόστηκε η εντολή Sketch Fillet, προκειμένου να δημιουργηθούν καμπύλες ακμές.



Εικόνα 71. Θέση της εντολής «Sketch Fillet» στο περιβάλλον σχεδίασης.

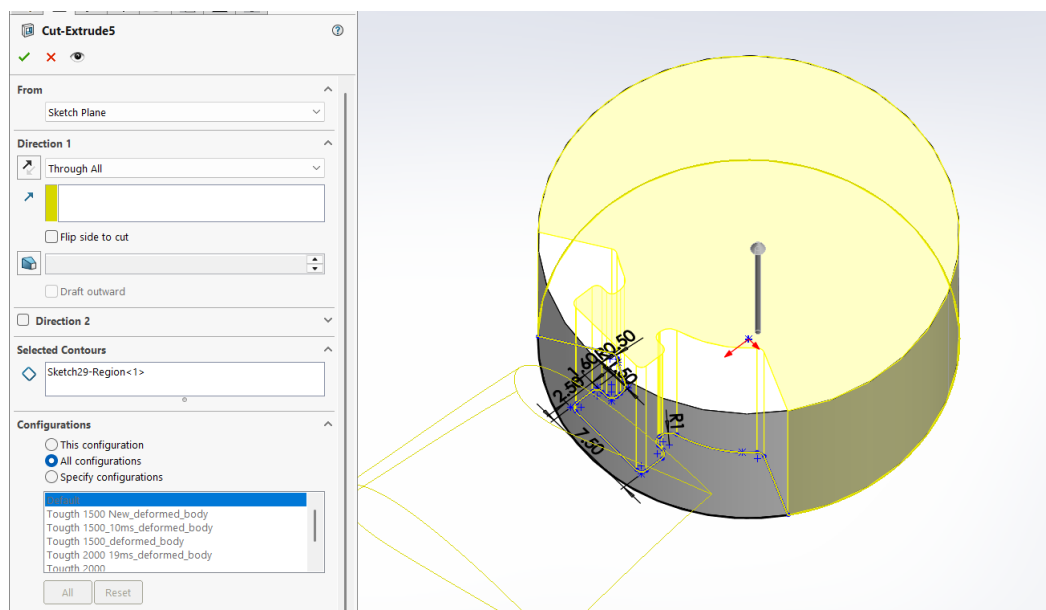
Οι καμπυλώσεις αυτές διευκολύνουν τη σωστή τοποθέτηση των πτερυγίων και συμβάλλουν στην αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων στη σύνδεση.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ένα Circular Sketch Pattern, ώστε το σχήμα της εσοχής να επαναληφθεί συμμετρικά σε τρεις θέσεις γύρω από τον άξονα περιστροφής, δημιουργώντας έτσι τις τρεις υποδοχές για τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Οι υποδοχές αυτές απέχουν 120° μεταξύ τους, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη κατανομή των πτερυγίων και συμμετρική λειτουργία του συστήματος. Στο σημείο αυτό δημιουργήθηκε ένα αντίγραφο του αρχείου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για τον σχεδιασμό της βάσης του πτερυγίου.



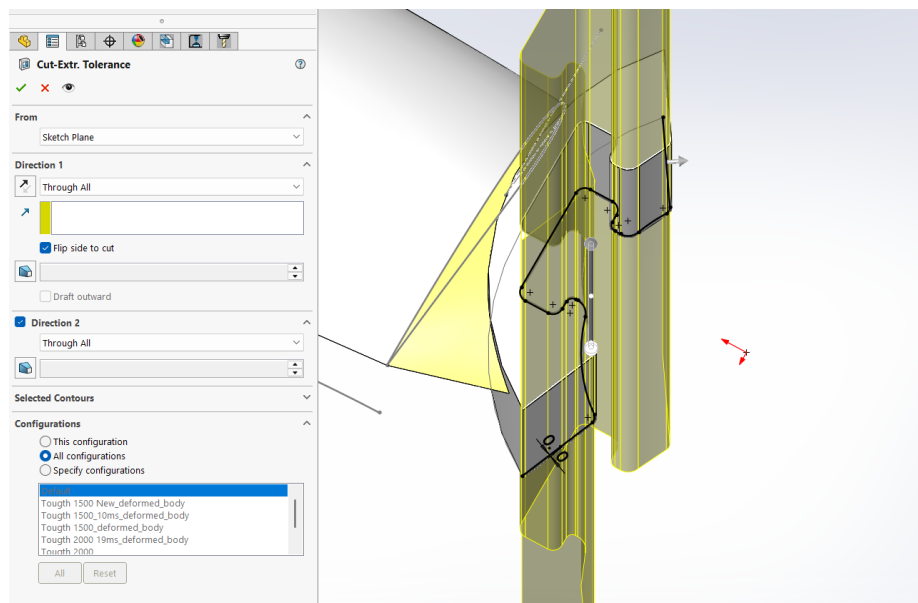
Εικόνα 72. Δημιουργία γεωμετρίας σύνδεσης στη βάση του πτερυγίου.

Στη συνέχεια, για την ολοκλήρωση του μοντέλου του πτερυγίου, αφαιρέθηκε από το αρχικό μοντέλο η γεωμετρία της βάσης, με εξαίρεση την περιοχή της εξοχής (αρσενικό τμήμα) που προσαρμόζεται στη βάση. Η αφαίρεση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της εντολής [Features] → [Extruded Cut], χρησιμοποιώντας την επιλογή Through All, ώστε η κοπή να διαπερνά ολόκληρο το πάχος του τμήματος



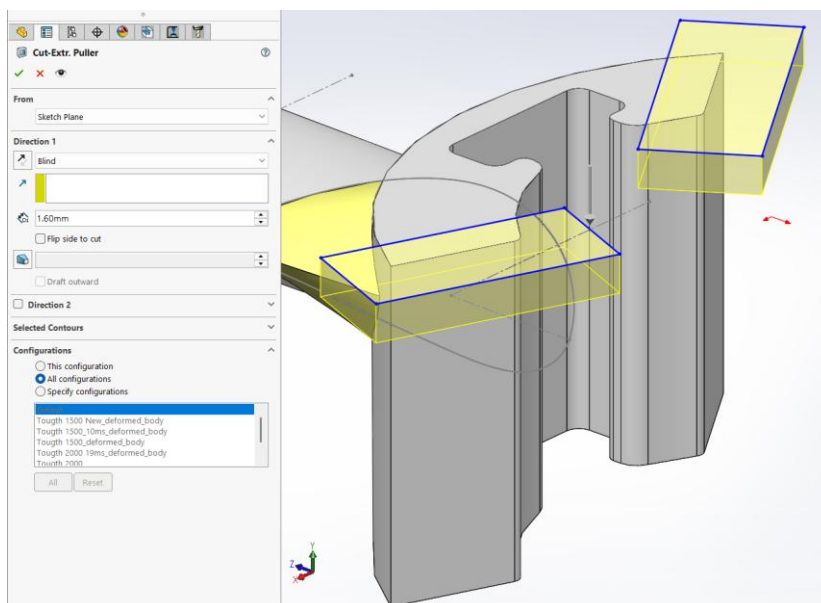
Εικόνα 73. Αφαίρεση γεωμετρίας από τη βάση του πτερυγίου.

Ακολουθώντας, στην επάνω επιφάνεια του τμήματος έδρασης του πτερυγίου δημιουργήθηκε νέο Sketch, στο οποίο εφαρμόστηκε η εντολή Convert Entities, ώστε να προβληθεί η γεωμετρία της βάσης επάνω στο επίπεδο σχεδίασης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε Offset Surface κατά 0,1 mm, προκειμένου να δημιουργηθεί η απαραίτητη ανοχή για την ευκολότερη συναρμολόγηση του πτερυγίου στη βάση. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε με την εντολή Extruded Cut, χρησιμοποιώντας την επιλογή Through All, ώστε η κοπή να διαπερνά ολόκληρο το πάχος του τμήματος.



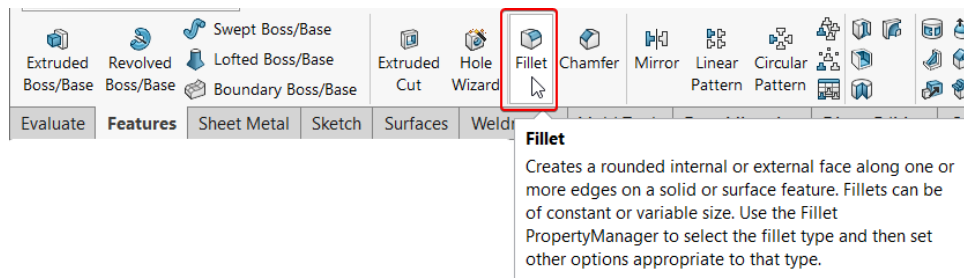
Εικόνα 74. Αφαίρεση τμήματος για δημιουργία ανοχής στη σύνδεση περυγίου-βάσης.

Κατόπιν, ήταν απαραίτητο να δημιουργηθούν δύο επιπλέον εσοχές με την εντολή «Extruded Cut». Πρώτον, από την κάτω επιφάνεια του τμήματος έδρασης πραγματοποιήθηκε αφαίρεση υλικού πάχους πέντε χιλιοστών, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή συναρμογή με τη βάση έδρασης. Δεύτερον, στην πλευρά όπου το περύγιο εφάπτεται στη βάση, δημιουργήθηκαν δύο εσοχές, οι οποίες επιτρέπουν την εισαγωγή εργαλείου για την ευκολότερη εξαγωγή του περυγίου από τη βάση.

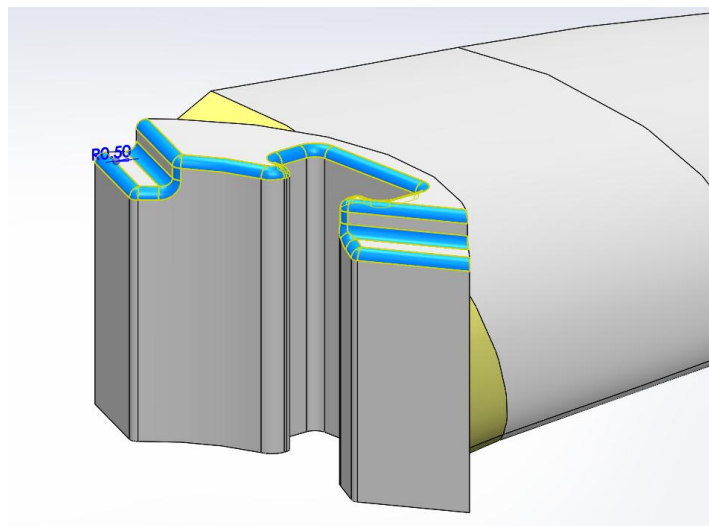


Εικόνα 75. Αφαίρεση γεωμετρίας για τη δημιουργία εσοχών για την εξόλκευση του περυγίου.

Τέλος, εφαρμόστηκε η εντολή [Fillet] σε όλες τις ακμές που έρχονται σε άμεση επαφή με τη βάση, προκειμένου να εξομαλυνθούν και να επιτευχθεί ομαλή συναρμογή των επιφανειών κατά τη σύνδεση των εξαρτημάτων.

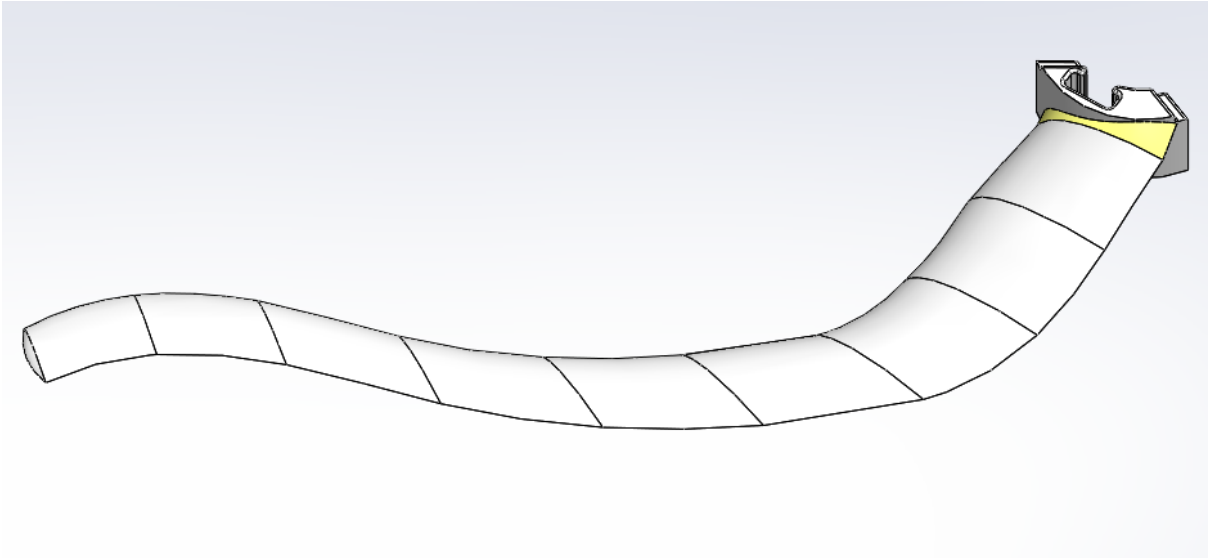


Εικόνα 76. Θέση της εντολής «Fillet» στο περιβάλλον σχεδίασης.



Εικόνα 77. Δημιουργία καμπυλότητας στις ακμές.

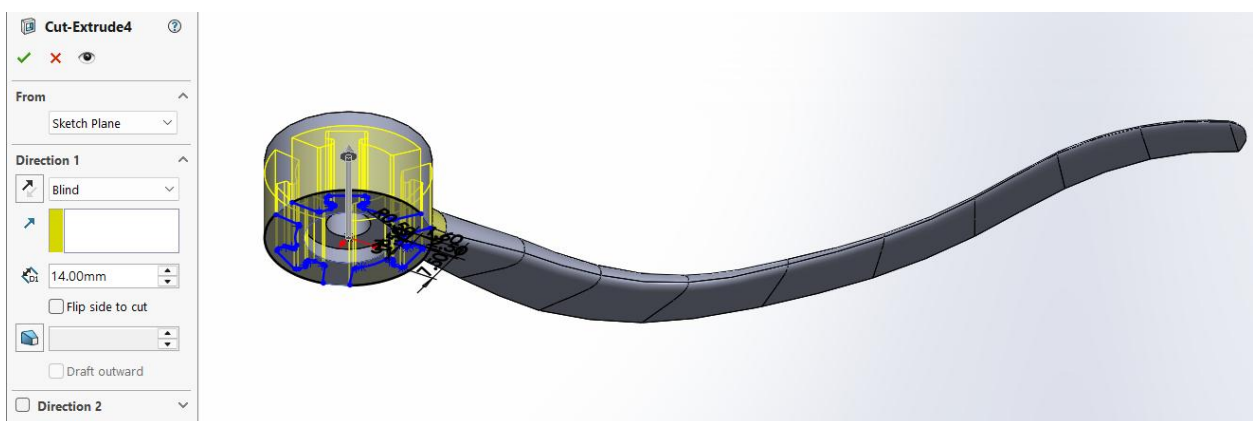
Με την παραπάνω διαδικασία έχει ολοκληρωθεί ο αρχικός σχεδιασμός του πτερυγίου. Από το σημείο αυτό και έπειτα, οποιαδήποτε τροποποίηση ή προσαρμογή απαιτηθεί στη γεωμετρία του μοντέλου μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω παραμετροποίησης των επιμέρους στοιχείων του πτερυγίου, χωρίς την ανάγκη επανασχεδίασης.



Εικόνα 78. Τελική γεωμετρία του καμπύλου πτερυγίου.

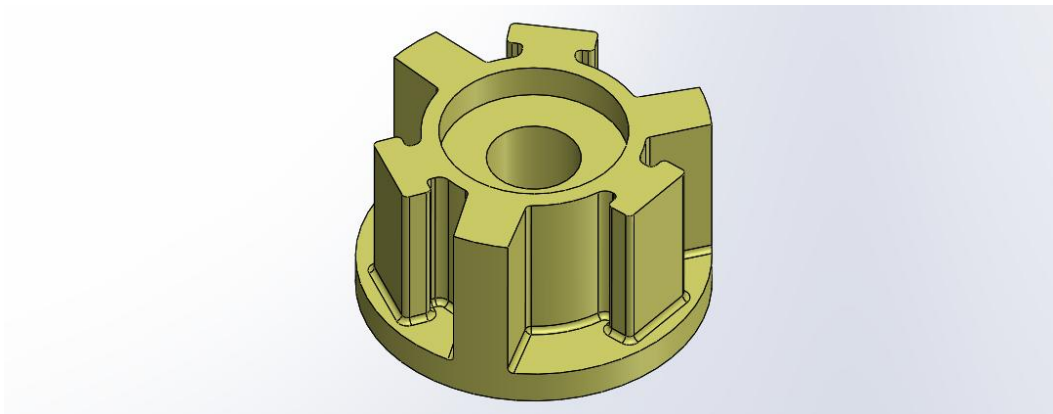
Δημιουργία Μοντέλου Βάσης Πτερυγίου

Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του πτερυγίου που είχε αποθηκευτεί προηγουμένως, προκειμένου να δημιουργηθεί η βάση σύνδεσης του πτερυγίου (hub). Αρχικά, στο μοντέλο εφαρμόστηκε η εντολή [Features] → [Extruded Cut], με καθορισμένο βάθος, στις τρεις εσοχές των πτερυγίων που περιεγράφηκαν παραπάνω, ώστε να ολοκληρωθεί πλήρως η γεωμετρία των υποδοχών. Επιπλέον, η εντολή Fillet εφαρμόστηκε στις κύριες ακμές του τρισδιάστατου μοντέλου, προκειμένου να εξομαλυνθούν τα περιγράμματα και να διευκολυνθεί η συναρμολόγηση των πτερυγίων.



Εικόνα 79. Αφαίρεση γεωμετρίας για τη διαμόρφωση της βάσης (hub) σύνδεσης του πτερυγίου.

Τέλος, το υπόλοιπο τμήμα του πτερυγίου αφαιρέθηκε από το μοντέλο, ώστε να διατηρηθεί μόνο η τελική γεωμετρία της βάσης. Με τον τρόπο αυτό, το εξάρτημα καθίσταται έτοιμο για κατασκευή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πραγματική βάση σύνδεσης των πτερυγίων επάνω στον άξονα περιστροφής της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 80. Τελική γεωμετρία της βάσης για την τοποθέτηση τριών πτερυγίων.

3.5 Πιστοποίηση Υλικού

Εργαστηριακή μέτρηση παραμόρφωσης

Πριν την έναρξη των προσομοιώσεων παραμόρφωσης των καμπύλων πτερυγίων στο SolidWorks Simulation, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μία πειραματική δοκιμή πιστοποίησης με σκοπό την επιβεβαίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί στις αναλύσεις. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο των μετρήσεων στην αεροσήραγγα, ένα από τα πτερύγια που δοκιμάστηκαν είναι κατασκευασμένο από το υλικό Tough 2000 Green. Το συγκεκριμένο πτερύγιο επιλέχθηκε για να χρησιμοποιηθεί σε πειραματικές στατικές δοκιμές παραμόρφωσης, με σκοπό τη σύγκριση και ταυτοποίηση των αποτελεσμάτων με εκείνα που θα προκύψουν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο SolidWorks.



Εικόνα 81. Πειραματική διάταξη και διαδικασία μέτρησης της παραμόρφωσης του πτερυγίου.

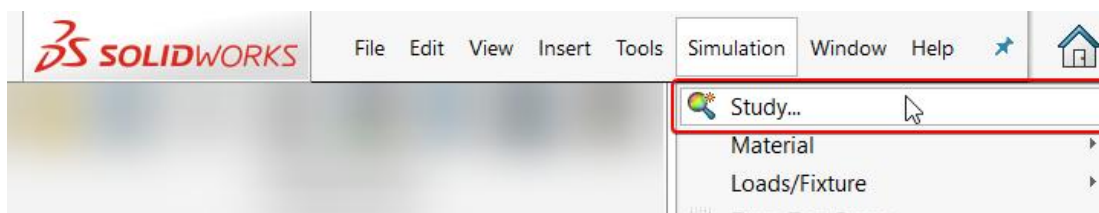
Για το πειραματικό μέρος της πιστοποίησης, το πτερύγιο τοποθετήθηκε οριζόντια επάνω σε μέγγενη, προσομοιώνοντας συνθήκες πρόβολου δοκού. Στην περιοχή της έβδομης αεροτομής, τοποθετήθηκαν γνωστά βαρίδια για την εφαρμογή στατικών φορτίων κάμψης, ενώ η παραμόρφωση μετρήθηκε με τη χρήση επιτραπέζιου οργάνου μέτρησης ύψους σε τέσσερις διαδοχικές αεροτομές.

Για τη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων, εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές τιμές φορτίου. Για κάθε τιμή φορτίου πραγματοποιήθηκε μία σειρά μετρήσεων μετατόπισης σε τέσσερις διαδοχικές αεροτομές: την έκτη, όγδοη, ένατη και δέκατη. Η έβδομη αεροτομή εξαιρέθηκε, καθώς σε αυτό το σημείο εφαρμόστηκε το φορτίο, καθιστώντας αδύνατη τη αξιόπιστη μέτρηση της μετατόπισης της. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε τρεις φορές από την αρχή, αρχίζοντας κάθε φορά με το πρώτο βάρος, ώστε να εντοπιστούν και να εξαλειφθούν τυχόν πειραματικά σφάλματα και να διασφαλιστεί η επαναληψιμότητα και η αξιοπιστία των μετρήσεων.

Προσομοίωση Πεπερασμένων Στοιχείων

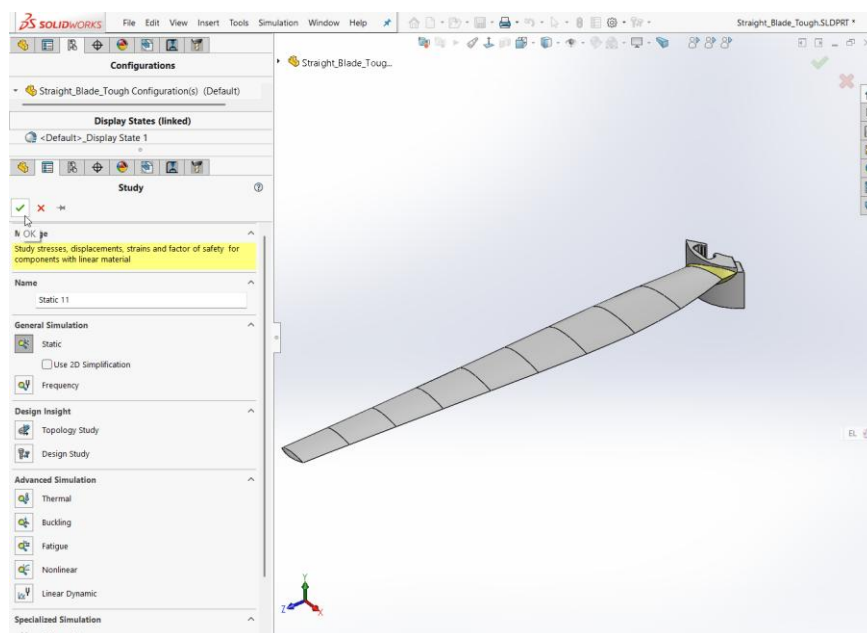
Για την προσομοίωση των παραμορφώσεων κρίθηκε απαραίτητο να σχεδιαστεί στο SolidWorks το πτερύγιο που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική μέτρηση, ώστε να επιτευχθεί

πλήρης αντιστοιχία μεταξύ του φυσικού και του υπολογιστικού μοντέλου. Η διαδικασία σχεδίασης του περυγίου περιγράφεται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.6, όπου παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν και οι διαφοροποιήσεις που εφαρμόστηκαν για τη δημιουργία του ευθύ περυγίου. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε μέσω του πρόσθετου περιβάλλοντος SolidWorks Simulation, με τη δημιουργία νέας στατικής μελέτης (Static Study) από το μενού [Simulation] → [Study].



Εικόνα 82. Θέση της επιλογής «Study» για την δημιουργία νέας μελέτης.

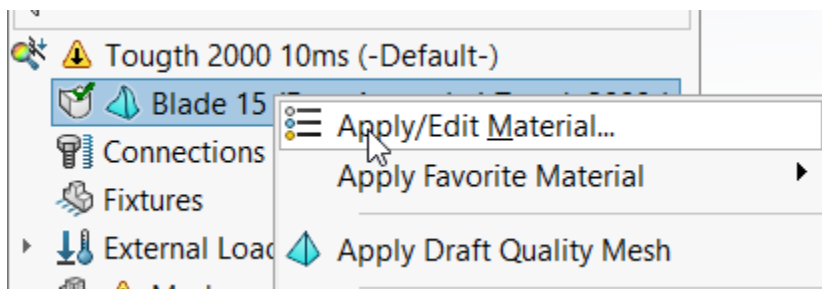
Η ανάλυση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό των παραμορφώσεων και των τάσεων που αναπτύσσονται στο περύγιο κατά την εφαρμογή φορτίων, προσομοιώνοντας με ακρίβεια τις συνθήκες των εργαστηριακών μετρήσεων.



Εικόνα 83. Τρισδιάστατο μοντέλο του ευθύγραμμου περυγίου.

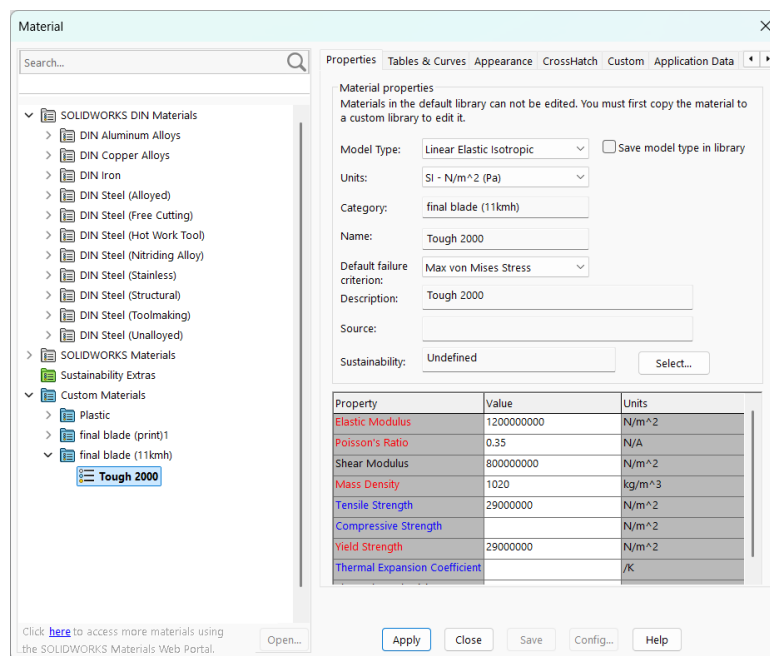
Για τη σωστή εκτέλεση της ανάλυσης ορίστηκαν τέσσερις βασικές παράμετροι: το υλικό του αντικειμένου, οι συνθήκες στήριξης, τα εφαρμοζόμενα φορτία και η διακριτοποίηση (mesh).

Αρχικά, καθορίστηκε το υλικό του μοντέλου. Με δεξί κλικ επάνω στο όνομα του εξαρτήματος επιλέχθηκε η εντολή Apply/Edit Material.



Εικόνα 84. Θέση της εντολής «Apply/Edit Material» για τον ορισμό του υλικού.

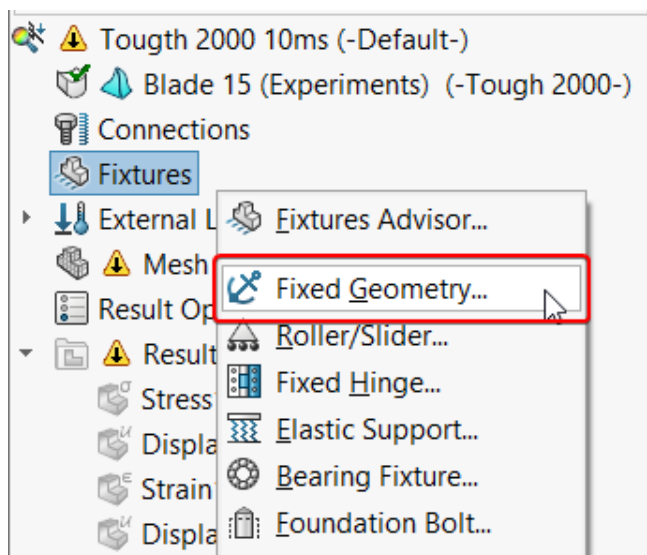
Από τη βιβλιοθήκη υλικών του SolidWorks επιλέχθηκε ένα πολυμερές υλικό, το οποίο αντιγράφηκε σε νέο φάκελο με τίτλο Custom Materials. Στη συνέχεια, το υλικό μετονομάστηκε σε Tough 2000 Green και ενημερώθηκαν οι μηχανικές του ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson, πυκνότητα και όριο διαρροής) σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή. Με τον τρόπο αυτό, το υπολογιστικό μοντέλο χρησιμοποιεί παραμέτρους που ταυτίζονται με εκείνες του πραγματικού δοκιμίου.



Εικόνα 85. Παράθυρο παραμετροποίησης και επιλογής υλικών στο SolidWorks.

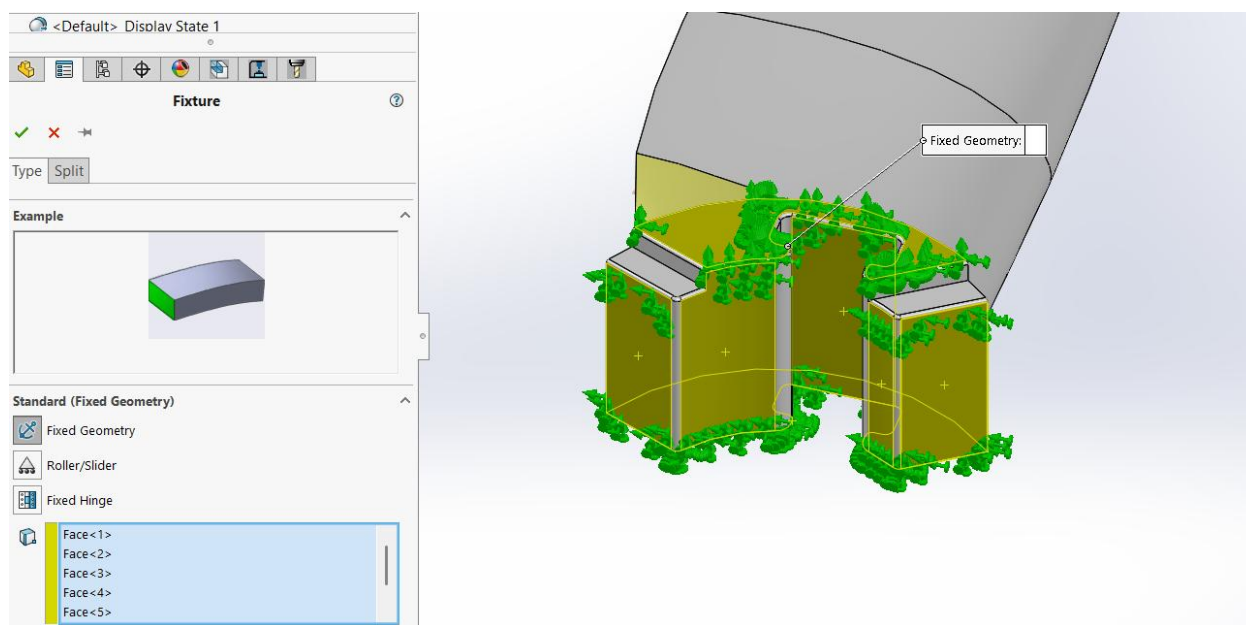
Ακολούθως, ορίστηκαν οι συνθήκες στήριξης του μοντέλου. Από το δέντρο της μελέτης επιλέχθηκε η επιλογή [Fixtures] → [Fixed Geometry] και καθορίστηκαν ως σταθερές όλες οι

επιφάνειες της βάσης του περυγίου, αναπαριστώντας έτσι την πάκτωση που επιτεύχθηκε πειραματικά στη μέγγενη.



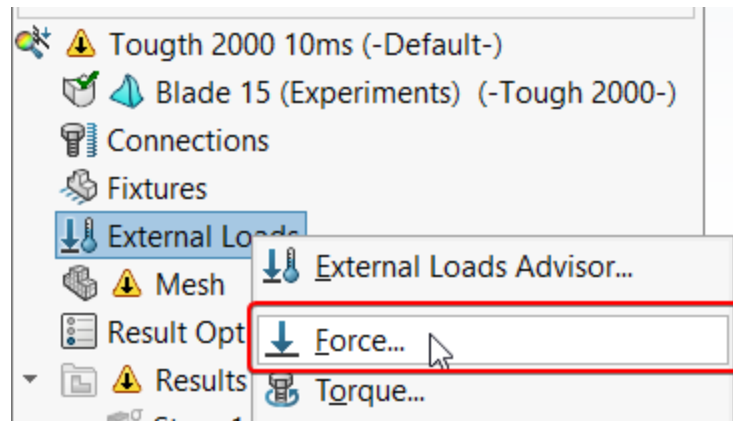
Εικόνα 86. Θέση της εντολής «Fixed Geometry» για τον ορισμό πάκτωσης της γεωμετρίας.

Με αυτόν τον τρόπο, το περύγιο προσομοιώθηκε ως πρόβολος δοκός υπό στατική φόρτιση.



Εικόνα 87. Ορισμός στήριξης στο περιβάλλον προσομοίωσης του SolidWorks.

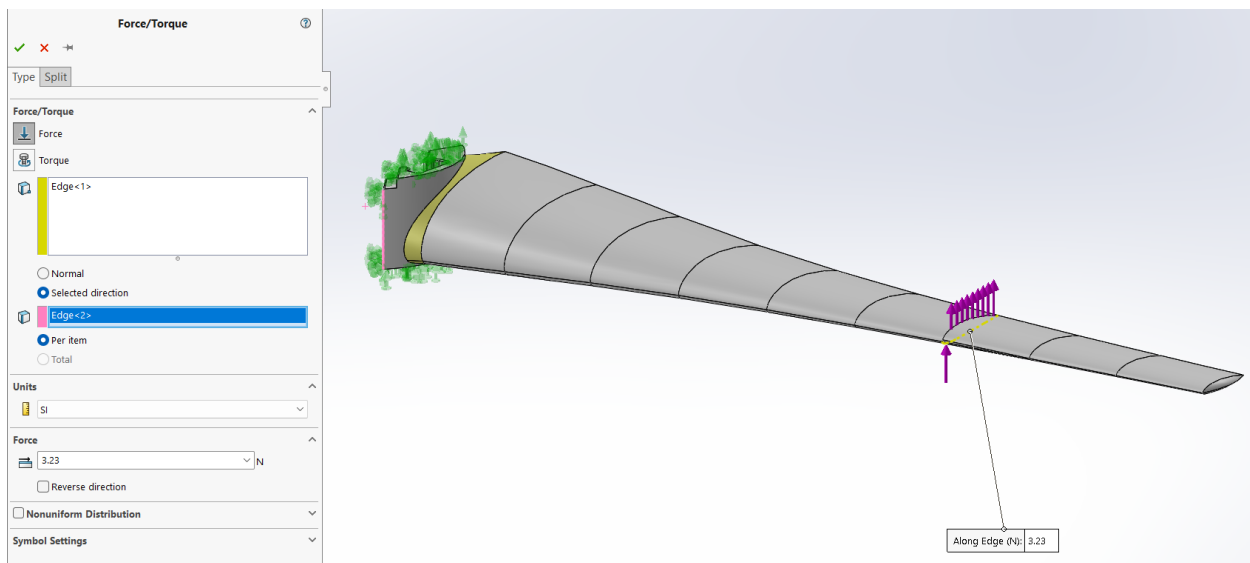
Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η δύναμη που αντιστοιχεί στα πειραματικά βάρη. Με δεξί κλικ στην επιλογή External Loads ενεργοποιήθηκε η εντολή Force και η φόρτιση εφαρμόστηκε στην κάτω επιφάνεια της έβδομης αεροτομής, δηλαδή στο ίδιο σημείο όπου τοποθετήθηκαν τα βαρίδια κατά την πειραματική δοκιμή.



Εικόνα 88. Θέση της εντολής «Force» για τον ορισμό σημειακού φορτίου

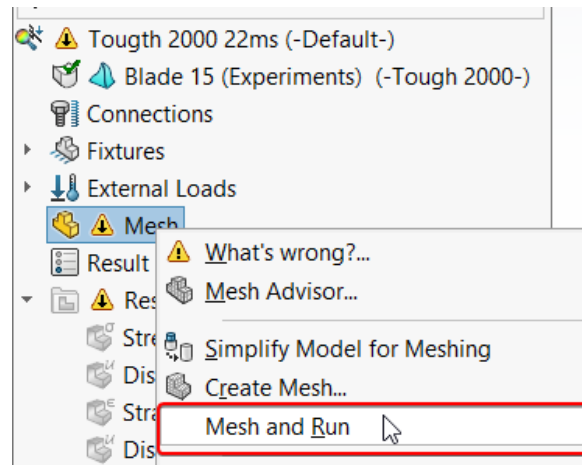
Η διεύθυνση της δύναμης ορίστηκε μέσω της επιλογής Selected Direction, λαμβάνοντας ως αναφορά μια κάθετη ακμή στη βάση του πτερυγίου, ώστε η δύναμη να δρα κατακόρυφα προς τα κάτω - με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόστηκε και στο φυσικό πείραμα.

□



Εικόνα 89. Εφαρμογή φορτίων στο πτερύγιο μέσα στο περιβάλλον προσομοίωσης του SolidWorks.

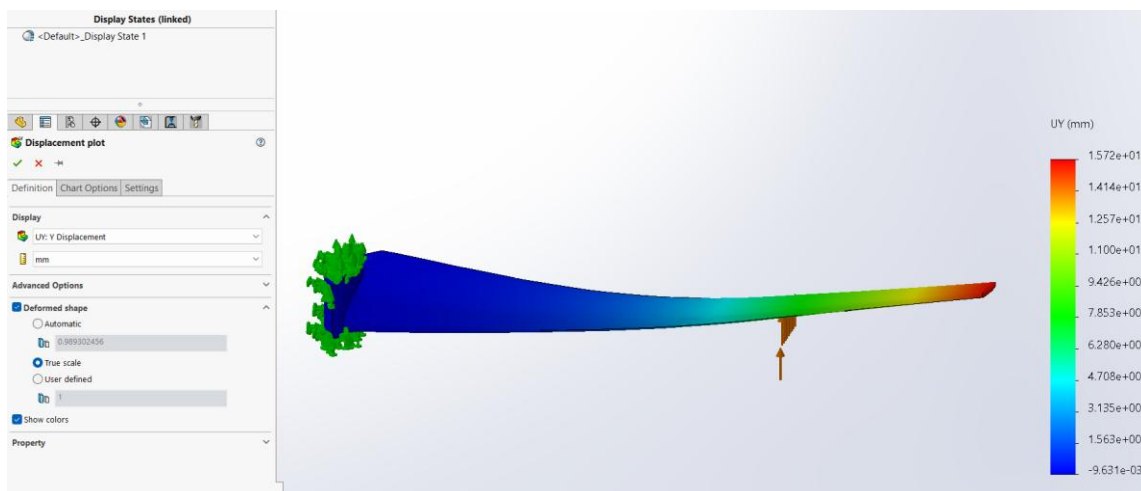
Το επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία του πλέγματος. Με δεξί κλικ στο Mesh επιλέχθηκε η εντολή Mesh and Run.



Εικόνα 90. Θέση της εντολής «Mesh and Run» για την εκκίνηση της προσομοίωσης.

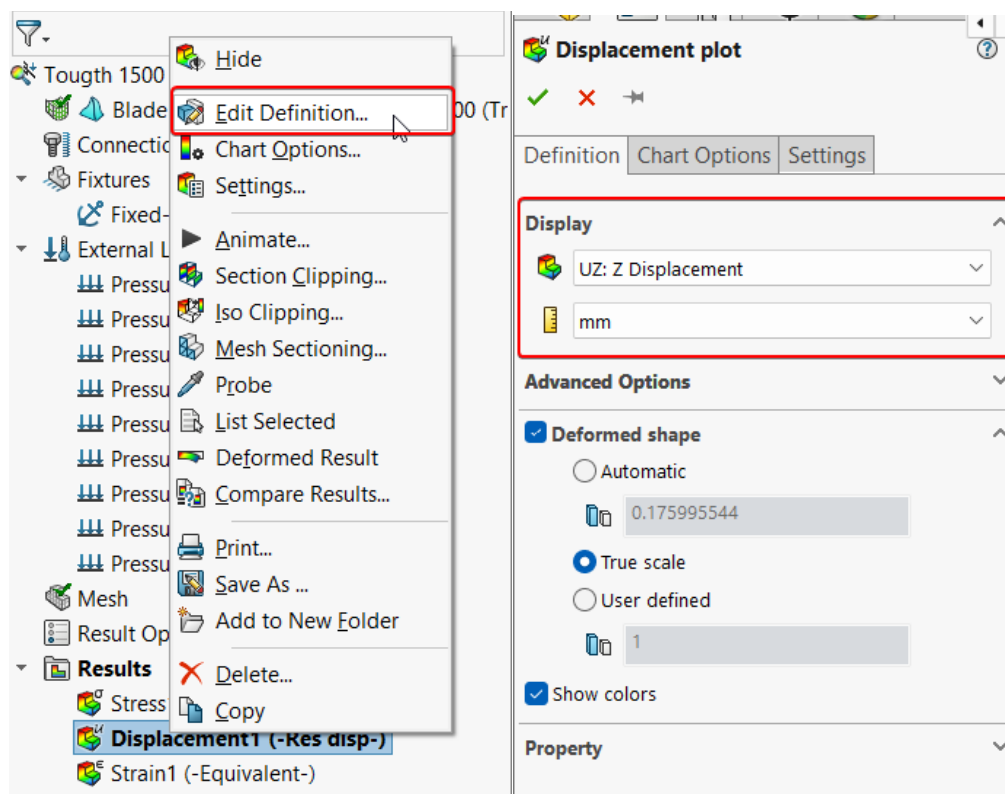
Το SolidWorks Simulation δημιούργησε αυτόματα ένα τρισδιάστατο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων, διαιρώντας τη γεωμετρία σε μικρότερα τμήματα για την επίλυση των εξισώσεων παραμόρφωσης. Μετά τη δημιουργία του πλέγματος εκτελέστηκε η προσομοίωση και υπολογίστηκαν οι μετατοπίσεις, οι τάσεις και οι συνολικές παραμορφώσεις στο πτερύγιο.

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, στην οθόνη εμφανίστηκαν τα αποτελέσματα, στα οποία παρουσιάζεται αρχικά η κατανομή των τάσεων και στη συνέχεια η παραμόρφωση του πτερυγίου. Με διπλό κλικ στην επιλογή Displacement, εμφανίζεται η χρωματική απεικόνιση της παραμόρφωσης η οποία αποτελεί οπτική αναπαράσταση αλλά και ποσοτικά μετρήσιμα δεδομένα μετατόπισης. Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μέγεθος παραμόρφωσης, επιτρέποντας έτσι τόσο την οπτική όσο και την αριθμητική αξιολόγηση της συμπεριφοράς του μοντέλου.



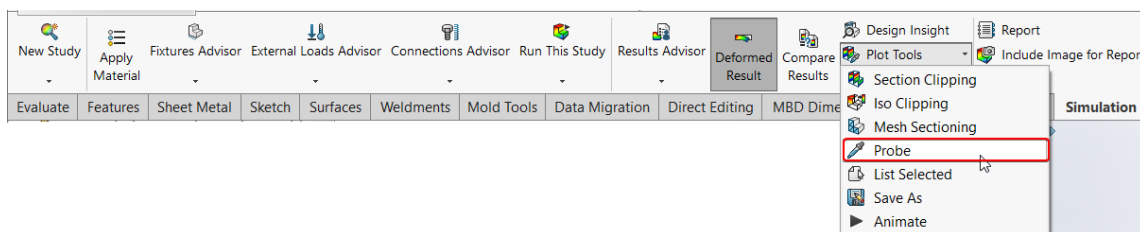
Εικόνα 91. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων παραμόρφωσης του πτερυγίου μετά την προσομοίωση.

Με δεξί κλικ στα αποτελέσματα της παραμόρφωσης και επιλογή Edit Definition, τροποποιήθηκε η ρύθμιση Display, ώστε να εμφανίζεται μόνο η παραμόρφωση κατά μήκος του άξονα y, εξασφαλίζοντας αντιστοίχιση με την κατακόρυφη παραμόρφωση που καταγράφηκε κατά την πειραματική διαδικασία. Με αυτό τον τρόπο η προσομοίωση αποδίδει αποκλειστικά την κατακόρυφη μετατόπιση, η οποία αντιστοιχεί άμεσα στα πειραματικά δεδομένα.



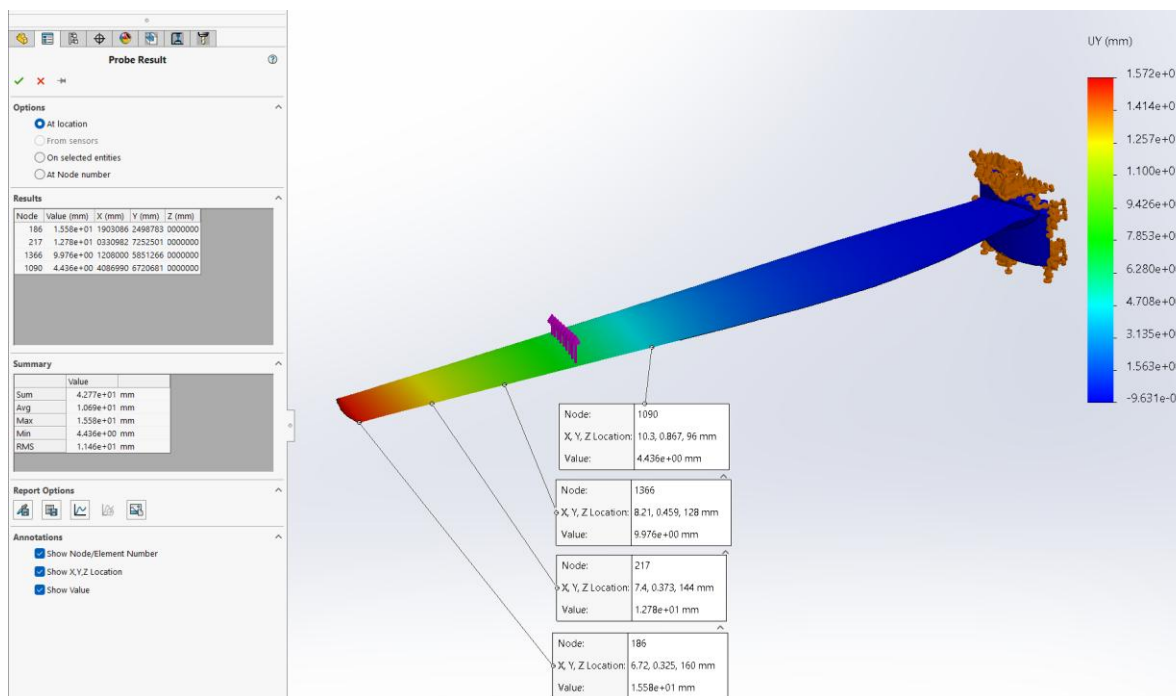
Εικόνα 92. Παραμετροποίησης ένδειξης αποτελεσμάτων παραμόρφωσης.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο [Simulation] → [Plot Tools] → [Probe], μέσω του οποίου μετρήθηκε η μετατόπιση στα ίδια σημεία της ακμής όπου πραγματοποιήθηκαν και οι εργαστηριακές μετρήσεις.



Εικόνα 93. Θέση εργαλείου αξιολόγησης αποτελεσμάτων «Probe».

Με τη διαδικασία αυτή επιτεύχθηκε άμεση σύγκριση μεταξύ των υπολογιστικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων, επιτρέποντας την αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου.



Εικόνα 94. Μέτρηση της παραμόρφωσης του πετυργίου μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

Τέλος, η αρχική μελέτη αντιγράφηκε δύο επιπλέον φορές, με δεξί κλικ στο όνομα της υπάρχουσας προσομοίωσης με την επιλογή της εντολής Copy Study. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν τρεις συνολικά μελέτες, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχούσε σε διαφορετική τιμή φορτίου, σύμφωνα με τα τρία επίπεδα φόρτισης που εφαρμόστηκαν κατά την πειραματική δοκιμή. Για κάθε μία από τις νέες μελέτες τροποποιήθηκαν ανάλογα οι συνθήκες φόρτισης, ώστε να αναπαράχθούν πιστά τα πειραματικά δεδομένα και να επαναληφθεί η διαδικασία υπολογισμού, καταγράφοντας τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων.

Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων με εκείνα των προσομοιώσεων στο SolidWorks, παρατηρήθηκε πολύ καλή ταύτιση των δεδομένων. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εντοπίστηκαν σε ποσοστά της τάξης του 10-15%, τιμές οι οποίες θεωρούνται εντός αποδεκτού περιθωρίου σφάλματος.

Πίνακας 3. Σύγκριση μετρούμενης και υπολογισμένης παραμόρφωσης αεροτομών 01.

Airfoil No.	Average Measured Deformation	Deformation from Simulation	Difference (%)
6	2.33 mm	2.26 mm	-3.24%
8	5.10 mm	5.03 mm	-1.39%
9	5.70 mm	6.47 mm	11.90%
10	7.10 mm	7.88 mm	9.90%

Πίνακας 4. Σύγκριση μετρούμενης και υπολογισμένης παραμόρφωσης αεροτομών 02.

Airfoil No.	Average Measured Deformation	Deformation from Simulation	Difference (%)
6	5.07 mm	4.47 mm	-13.35%
8	10.27 mm	10.07 mm	-1.95%
9	11.67 mm	12.95 mm	9.91%
10	15.03 mm	15.63 mm	3.82%

Πίνακας 5. Σύγκριση μετρούμενης και υπολογισμένης παραμόρφωσης αεροτομών 03.

Airfoil No.	Average Measured Deformation	Deformation from Simulation	Difference%
6	6.67 mm	5.76 mm	-15.74%
8	13.47 mm	13.09 mm	-2.88%
9	16.37 mm	16.80 mm	2.58%
10	19.17 mm	20.14 mm	4.83%

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, φαίνεται ότι το υλικό Tough 2000, όπως ορίστηκε στο SolidWorks, αποδίδει με μεγάλη ακρίβεια τη συμπεριφορά του πραγματικού πτερυγίου. Και οι προσομοιώσεις με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων περιγράφουν σωστά τον τρόπο που το πτερυγίο παραμορφώνεται υπό φόρτιση. Έτσι, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα, παρέχοντας ισχυρή βάση για τη συνέχιση της μελέτης και την εφαρμογή της ίδιας μεθοδολογίας στα καμπύλα πτερύγια που εξετάζονται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

3.6 Μετρήσεις Παραμόρφωσης και Στρέψης Καμπύλων Πτερυγίων

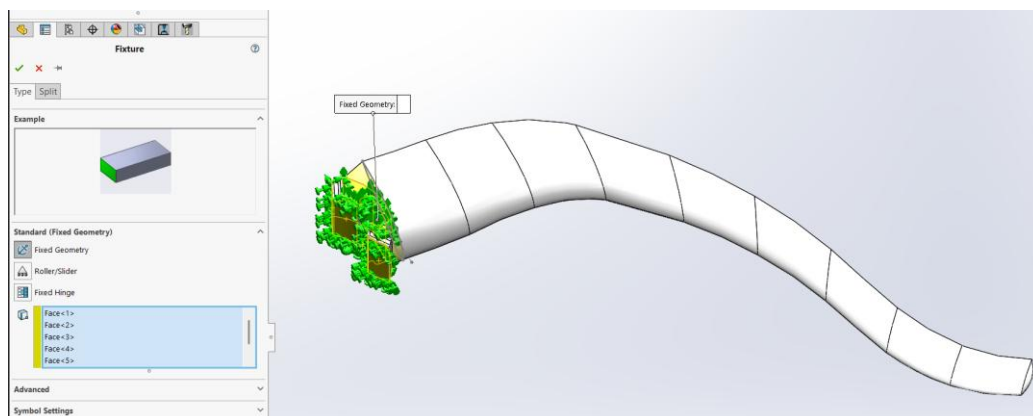
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη συγκεκριμένη εργασία η γεωμετρία του πτερυγίου καθορίζεται μέσω διαδικασίας δοκιμών και σφαλμάτων. Με άλλα λόγια, η μεθοδολογία βασίζεται στον αρχικό σχεδιασμό που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 3.4, ο οποίος στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται στατικά, ώστε να προσδιοριστούν η παραμόρφωση, η στρέψη των αεροτομών και η μεταβολή του setting angle κατά μήκος του πτερυγίου. Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων, η γεωμετρία προσαρμόζεται επαναληπτικά, μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα μηχανικής και αεροδυναμικής συμπεριφοράς.

Για κάθε πτερύγιο που εξετάζεται, πραγματοποιούνται τουλάχιστον δύο μελέτες πεπερασμένων στοιχείων με διαφορετικά επίπεδα φόρτισης. Η πρώτη εκτελείται στη μέγιστη ταχύτητα ανέμου λειτουργίας, με στόχο την αξιολόγηση της μηχανικής αντοχής του πτερυγίου, ενώ η δεύτερη πραγματοποιείται στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου, που αντιστοιχεί στις συνθήκες κανονικής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Ο σκοπός των δύο αυτών αναλύσεων δεν είναι η αποτίμηση της απόλυτης μέγιστης παραμόρφωσης, αλλά η εκτίμηση της μεταβολής της γωνίας τοποθέτησης μεταξύ των δύο ταχυτήτων ανέμου. Η μεταβολή αυτή αποτελεί κρίσιμο δείκτη της ελαστικής συμπεριφοράς και της ικανότητας παθητικού ελέγχου φορτίων του πτερυγίου, δηλαδή της δυνατότητάς του να προσαρμόζει τη γωνία τοποθέτησης του υπό την επίδραση των αεροδυναμικών δυνάμεων. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η επίτευξη μεταβολής της γωνίας τοποθέτησης της τάξης των 20° , τιμή που σύμφωνα με σχετική βιβλιογραφία [14] οδηγεί σε σημαντική μείωση της αεροδυναμικής απόδοσης των αεροτομών και, κατ' επέκταση, σε παθητική επιβράδυνση ή παύση περιστροφής του πτερυγίου υπό συνθήκες υπερφόρτισης, χωρίς ωστόσο να υπερβαίνονται οι μηχανικές αντοχές του υλικού. Με αυτόν τον τρόπο, αξιολογείται η δυνατότητα του καμπύλου πτερυγίου να λειτουργεί ως παθητικός μηχανισμός περιορισμού φορτίων και ασφάλειας του συστήματος.

Διαδικασία Προσομοίωσης

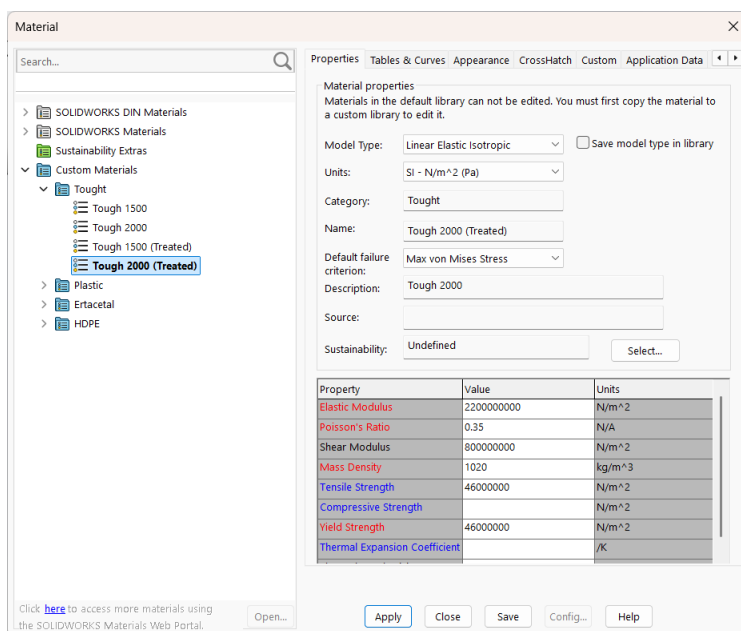
Για τη στατική προσομοίωση της παραμόρφωσης ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως για τη δημιουργία νέας μελέτης στο SolidWorks Simulation. Δημιουργήθηκε νέα ανάλυση τύπου Static Study και καθορίστηκαν εκ νέου οι συνθήκες στήριξης του πτερυγίου, εφαρμόζοντας πάκτωση ([Fixtures] → [Fixed Geometry]) σε όλες τις επιφάνειες της

βάσης, ώστε να προσομοιωθεί η πλήρης ακινητοποίηση του σημείου σύνδεσης του πτερυγίου με τη βάση, όπως συνέβη και στην πραγματική πειραματική διάταξη.



Εικόνα 95. Ορισμός στηρίξεων στο καμπύλο πτερύγιο στο περιβάλλον προσομοίωσης του SolidWorks.

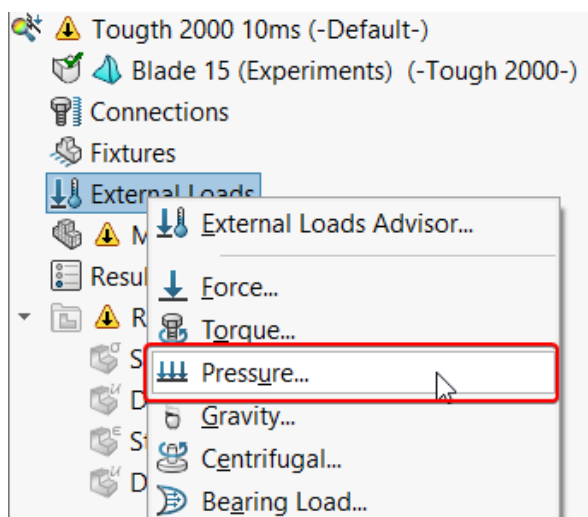
Όσον αφορά το υλικό, με δεξί κλικ επάνω στο όνομα του εξαρτήματος επιλέχθηκε η εντολή Apply/Edit Material. Από τη λίστα υλικών που εμφανίζεται, αντιγράφηκε το ήδη δημιουργημένο υλικό Tough 2000 (Green) και δημιουργήθηκαν ακόμη τρία νέα υλικά: Tough 2000 Post-Cured, Tough 1500 (Green) και Tough 1500 Post-Cured. Για καθένα από αυτά ορίστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή. Τα τέσσερα συνολικά υλικά χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, προκειμένου να αξιολογηθεί ποιο παρουσιάζει την καταλληλότερη μηχανική συμπεριφορά για την εφαρμογή.



Εικόνα 96. Παράθυρο παραμετροποίησης και επιλογής υλικών στο SolidWorks.

Στη συνέχεια, οι δυνάμεις που ασκούνται στο πτερύγιο ορίστηκαν υπό τη μορφή κατανεμημένης πίεσης.

Οι τιμές των φορτίων υπολογίστηκαν από το υπολογιστικό αεροδυναμικό μοντέλο DNLINDA, το οποίο υπολογίζει τη συνολική αεροδυναμική δύναμη που αναπτύσσεται σε καθεμία από τις αεροτομές του πτερυγίου. Για την ορθή εφαρμογή των φορτίσεων στο SolidWorks, κάθε δύναμη αντιστοιχίστηκε στην κάτω επιφάνεια του τμήματος του πτερυγίου που εκτείνεται μεταξύ δύο διαδοχικών αεροτομών. Για παράδειγμα, η δύναμη που υπολογίστηκε για την αεροτομή 7 εφαρμόστηκε στο τμήμα που βρίσκεται μεταξύ των αεροτομών 6 και 7. Για τον υπολογισμό της πίεσης σε κάθε επιφάνεια, μετρήθηκε πρώτα το εμβαδόν της μέσω του εργαλείου [Evaluate] → [Measure]. Στη συνέχεια, η αεροδυναμική δύναμη που παρείχε το μοντέλο DNLINDA διαιρέθηκε με το εμβαδόν αυτό, ώστε να υπολογιστεί η πίεση σε μονάδες N/mm^2 , η οποία εισήχθη στο SolidWorks ως κατανεμημένο φορτίο. Η εφαρμογή της πραγματοποιήθηκε με δεξί κλικ στο [External Loads] → [Pressure], επιλέγοντας κάθε επιφάνεια ξεχωριστά και εισάγοντας τη σωστή τιμή πίεσης.



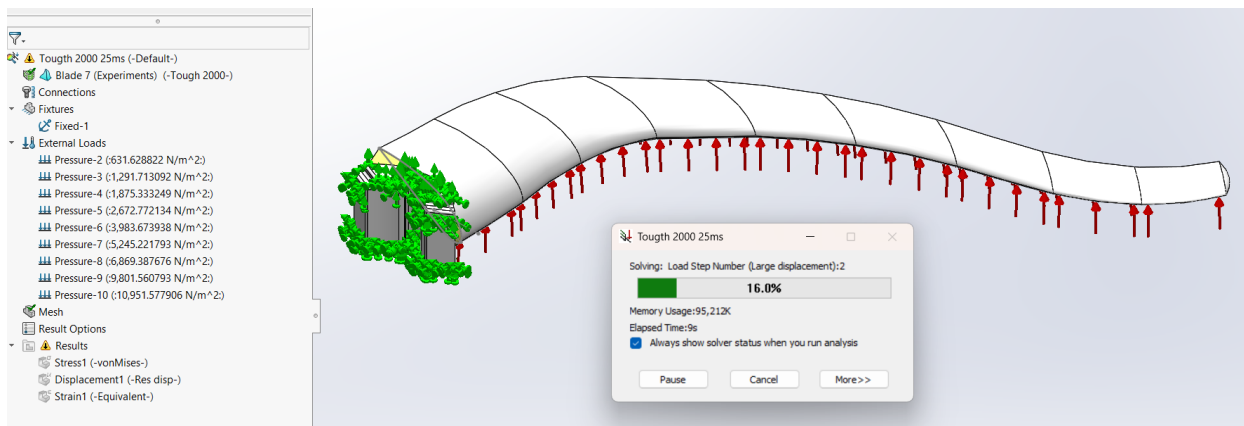
Εικόνα 97. Θέση της εντολής «Pressure» για τον ορισμό κατανεμημένης πίεσης

Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίστηκε η ρεαλιστική κατανομή των αεροδυναμικών φορτίων κατά μήκος του πτερυγίου.



Εικόνα 98. Εφαρμογή φορτίων πίεσης στις επιφάνειες του πτερυγίου για τη στατική προσομοίωση.

Τέλος, όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις, μέσω της επιλογής [Mesh and Run] στο στοιχείο Mesh, το SolidWorks προχώρησε στην αυτόματη δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων και στην εκτέλεση της στατικής ανάλυσης. Από την ανάλυση προέκυψαν η συνολική παραμόρφωση, η στρέψη των αεροτομών και η μεταβολή της γωνίας τοποθέτησης υπό τα εφαρμοζόμενα φορτία.

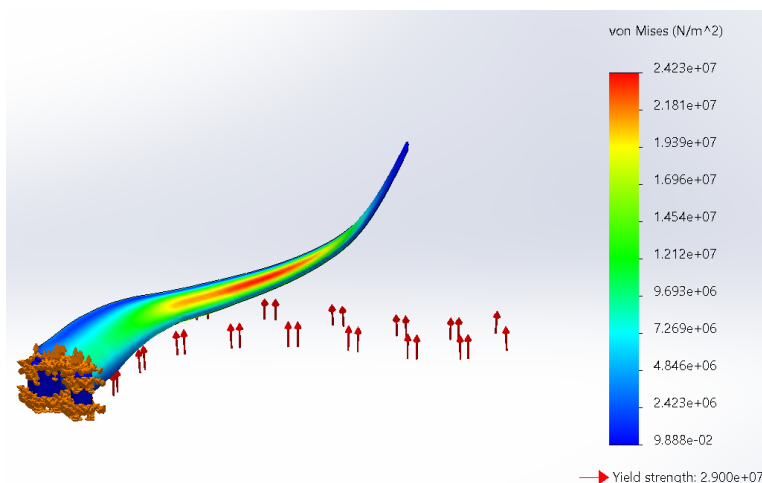


Εικόνα 99. Εκτέλεση στατικής προσομοίωσης στο SolidWorks για το καμπύλο πτερύγιο.

Μέτρηση αποτελεσμάτων

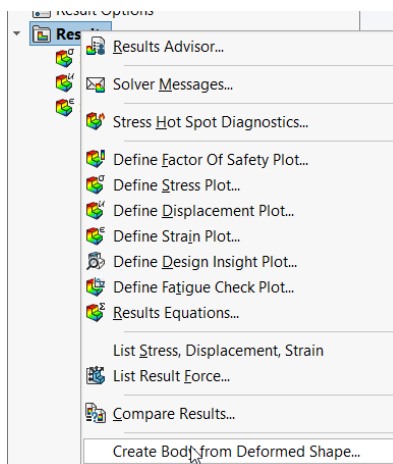
Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, στην οθόνη εμφανίζονται τα αποτελέσματα των τάσεων που αναπτύσσονται στο πτερύγιο. Είναι κρίσιμο να εξεταστεί, μέσω του χρωματικού πίνακα που εμφανίζεται στο δεξί μέρος της οθόνης, η μέγιστη τιμή της τάσης που ασκείται στο πτερύγιο και να συγκριθεί με τη μέγιστη αντοχή του υλικού. Η σύγκριση αυτή επιτρέπει την επαλήθευση της δομικής επάρκειας του πτερυγίου υπό τις δεδομένες συνθήκες ανέμου. Εάν η αναπτυσσόμενη τάση προσεγγίζει ή υπερβαίνει το όριο αντοχής του υλικού, απαιτείται επανεξέταση

και επανασχεδιασμός του πτερυγίου, με στόχο τη βελτίωση της μηχανικής του συμπεριφοράς και την εξασφάλιση ασφαλούς λειτουργίας στις προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας.



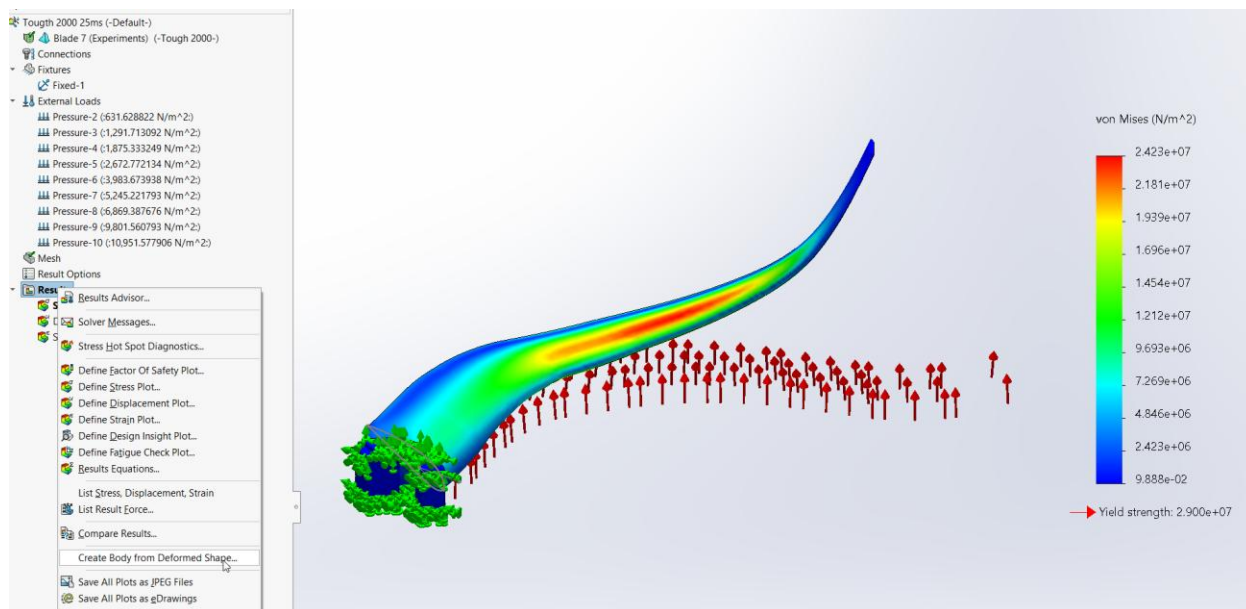
Εικόνα 100. Παραμορφωμένο πτερύγιο μετά την ολοκλήρωση της στατικής προσομοίωσης.

Η μέτρηση της παραμόρφωσης του πτερυγίου πραγματοποιείται με παρόμοιο τρόπο όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και αποτελεί σχετικά απλή διαδικασία. Αντίθετα, η μέτρηση της στρέψης των αεροτομών και της μεταβολής του setting angle απαιτεί πρόσθετα βήματα. Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, γίνεται δεξί κλικ στο Results και επιλέγεται η εντολή Create Body From Deformed Shape, μέσω της οποίας δημιουργείται ένα νέο μοντέλο που απεικονίζει το παραμορφωμένο πτερύγιο.

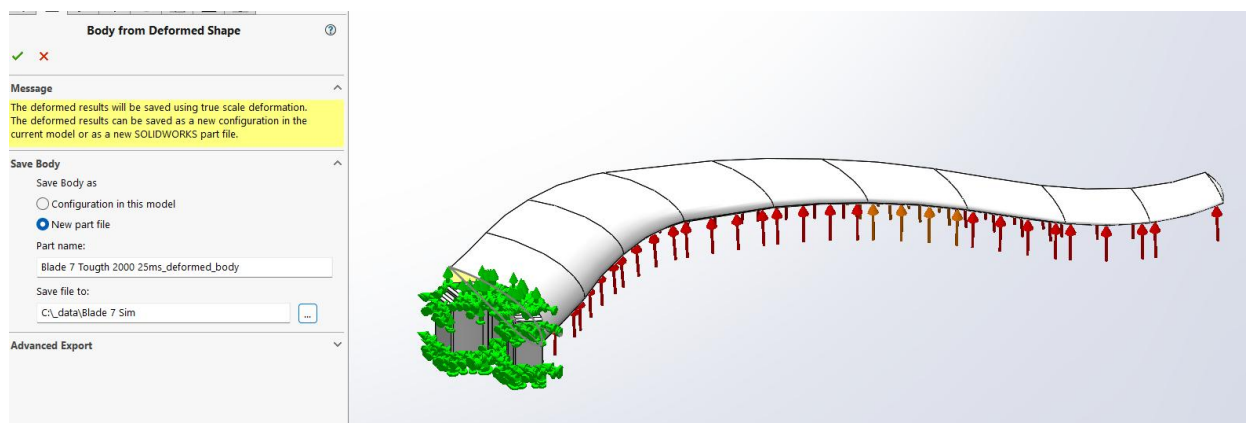


Εικόνα 101. Θέση της εντολής «Create Body From Deformed Shape».

Το μοντέλο αυτό αποθηκεύεται ως ξεχωριστό αρχείο, ώστε να μπορέσει να συγκριθεί απευθείας με το αρχικό μη παραμορφωμένο πτερύγιο.

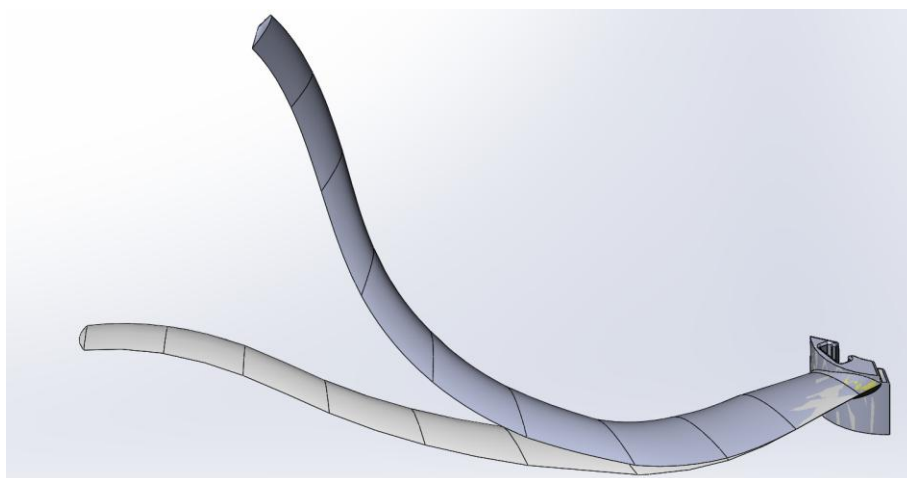


Εικόνα 102. Διαδικασία δημιουργίας νέου μοντέλου βασισμένου στο παραμορφωμένο πτερύγιο μετά την προσομοίωση.



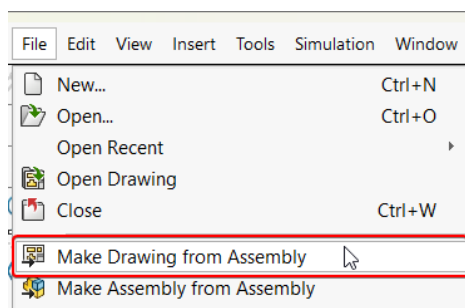
Εικόνα 103. Αποθήκευση του παραμορφωμένου πτερυγίου ως νέο μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια δημιουργείται ένα νέο αρχείο συναρμολόγησης ([File] → [New] → [Assembly]), στο οποίο τοποθετούνται και τα δύο μοντέλα, το παραμορφωμένο και το αρχικό πτερύγιο.



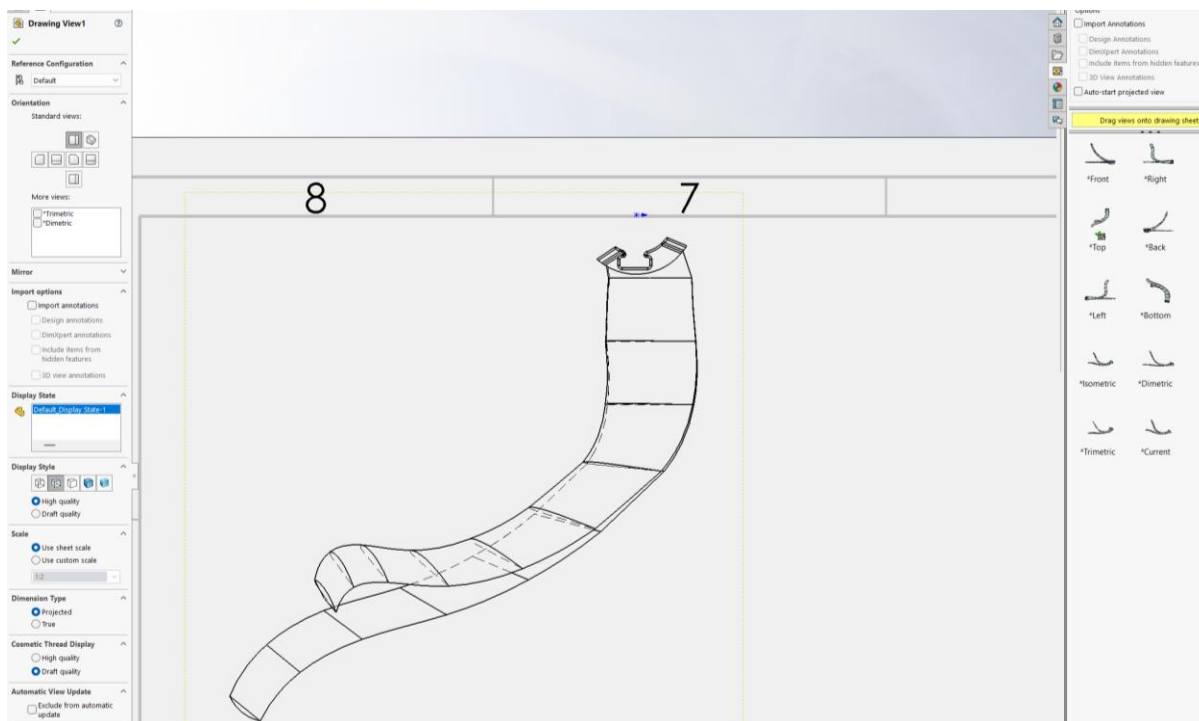
Εικόνα 104. Σύγκριση του αρχικού και του παραμορφωμένου πτερυγίου μετά την προσομοίωση.

Για να πραγματοποιηθούν ακριβείς μετρήσεις, δημιουργείται 2D Drawing του συναρμολογήματος μέσω της εντολής [File] → [Make Drawing from Assembly].



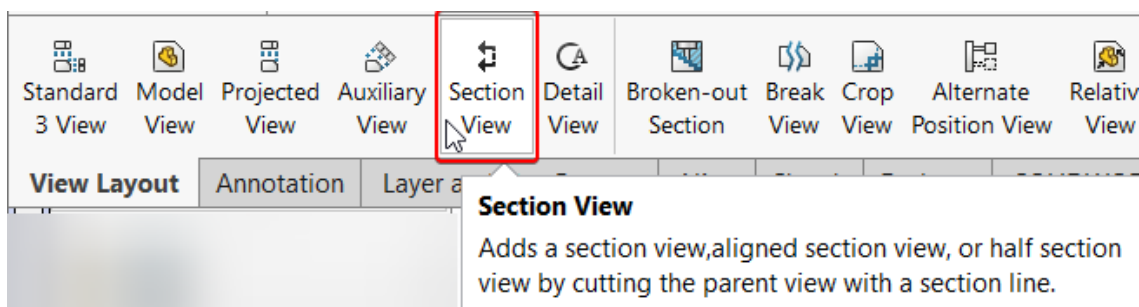
Εικόνα 105. Θέση της εντολής «Make Drawing from Assembly».

Στο νέο Drawing είναι απαραίτητο να επιβεβαιωθεί ότι οι μονάδες μέτρησης είναι σωστές (π.χ. mm). Έπειτα, εισάγεται η άνω όψη του assembly σε μορφή Wireframe ή Hidden Lines Visible, ώστε να είναι ορατές οι γεωμετρίες και των δύο πτερυγίων ταυτόχρονα.



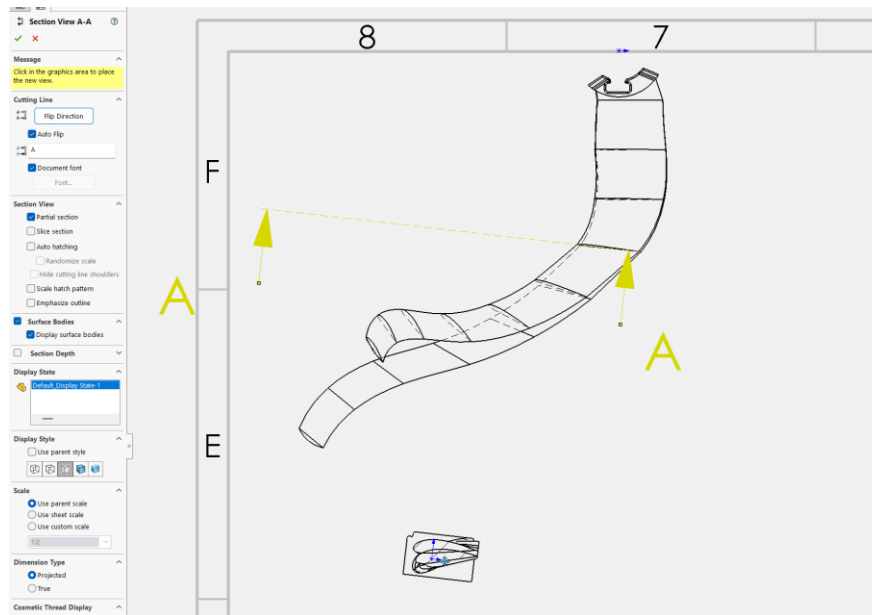
Εικόνα 106. Κάτοψη του αρχικού και του παραμορφωμένου πτερυγίου σε δισδιάστατη απεικόνιση.

Για τη μέτρηση της στρεπτικής παραμόρφωσης είναι απαραίτητη η δημιουργία τομών σε καθεμία από τις δέκα αεροτομές των πτερυγίων, χρησιμοποιώντας την εντολή [View Layout] → [Section View].



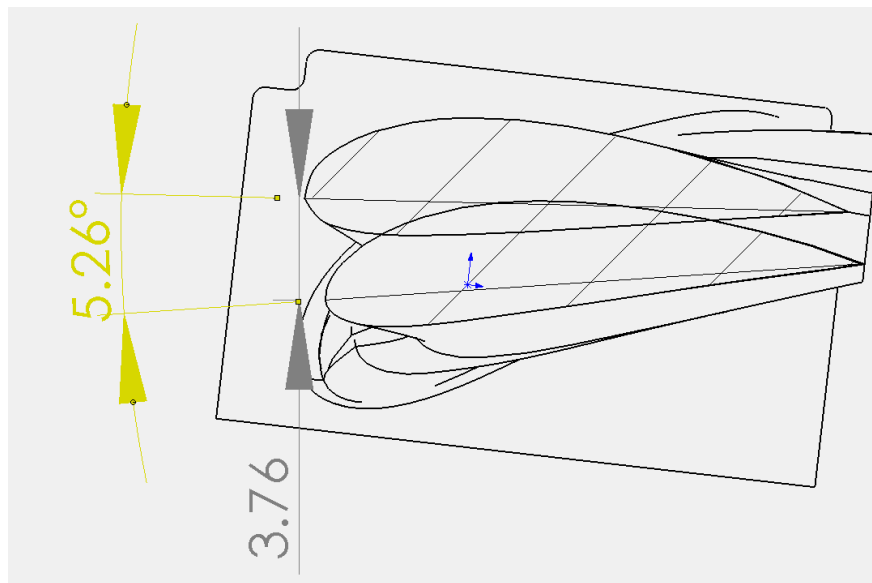
Εικόνα 107. Θέση της εντολής «Section View».

Εάν η παραμορφωμένη αεροτομή βρίσκεται πολύ κοντά στη θέση της αρχικής ως προς τους άξονες x και y (δηλαδή, η μετατόπιση αφορά κυρίως τον κατακόρυφο άξονα z), τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία κοινή τομή για τις δύο αεροτομές. Μέσω αυτής της τομής απεικονίζονται καθαρά η παραμορφωμένη και η μη παραμορφωμένη αεροτομή, επιτρέποντας την άμεση σύγκριση της γωνίας στρέψης της παραμορφωμένης αεροτομής.



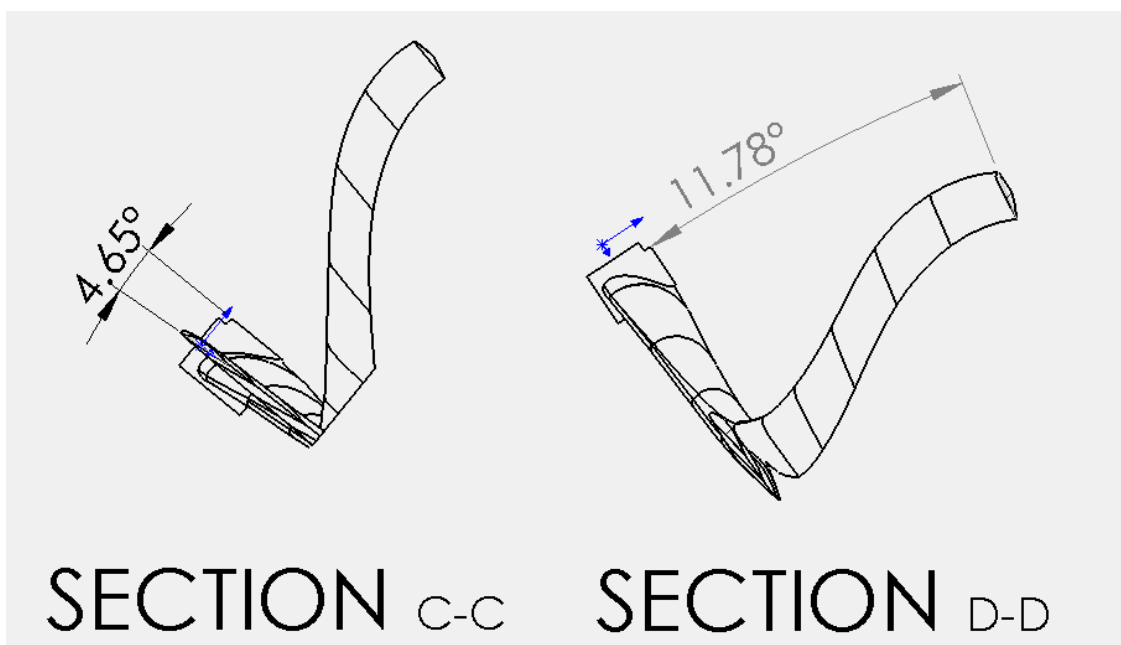
Εικόνα 108. Δημιουργία τομών στο αρχικό και στο παραμορφωμένο περὺγιο.

Σε αυτή την περίπτωση, με την εντολή [Sketch] → [Line] σχεδιάζονται οι γραμμές χορδής για κάθε αεροτομή. Στη συνέχεια, μέσω της εντολής Smart Dimension, μετράται απευθείας η γωνία μεταξύ των δύο χορδών, η οποία αντιστοιχεί στη μεταβολή της γωνίας τοποθέτησης.



Εικόνα 109. Μέτρηση της διαφοράς γωνίας τοποθέτησης και της μετατόπισης στο οριζόντιο επίπεδο μεταξύ του αρχικού και του παραμορφωμένου περὺγιου.

Αντίθετα, όταν οι δύο αεροτομές (παραμορφωμένη και μη παραμορφωμένη) παρουσιάζουν σημαντική μετατόπιση μεταξύ τους, απαιτείται η δημιουργία ξεχωριστών τομών για καθεμία. Σε αυτή την περίπτωση, η γωνία της χορδής κάθε αεροτομής μετريέται χωριστά ως προς ένα κοινό σημείο αναφοράς, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η βάση του πτερυγίου. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η διαφορά των δύο γωνιών, η οποία αντιστοιχεί στη συνολική στρέψη της αεροτομής.



Εικόνα 110. Μέτρηση της διαφοράς γωνίας στρέψης και μετατόπισης στο οριζόντιο επίπεδο μεταξύ του αρχικού και του παραμορφωμένου πτερυγίου, μέσω σημείου αναφοράς.

Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει την ακριβή εκτίμηση της ελαστικής στρέψης των αεροτομών και τη μεταβολή της γωνίας προσβολής υπό στατικές φορτίσεις, παρέχοντας αξιόπιστα δεδομένα για τη σύγκριση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς των διαφορετικών υλικών και γεωμετριών.

3.7 Υπολογισμός βέλτιστης γωνία τοποθέτησης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά τον αρχικό σχεδιασμό του πτερυγίου, η γωνία τοποθέτησης (setting angle) κάθε αεροτομής προσδιορίστηκε βάσει των αποτελεσμάτων του υπολογιστικού μοντέλου DNLINDA. Στο πλαίσιο ανάπτυξης πτερυγίων με παθητικό έλεγχο φορτίων, το πτερύγιο σχεδιάστηκε ώστε να παρουσιάζει ελεγχόμενη ελαστική παραμόρφωση σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Ωστόσο, η παραμόρφωση αυτή εμφανίζεται σε μικρότερο βαθμό και στην

ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας, οδηγώντας σε ανεπιθύμητη μεταβολή της γωνίας τοποθέτησης και, κατ' επέκταση, της αεροδυναμικής συμπεριφοράς.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και μετρήσεις παραμόρφωσης σε συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας, με στόχο τον προσδιορισμό της μεταβολής της γωνίας τοποθέτησης κατά μήκος του πτερυγίου. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε επανασχεδιασμός με προκαθορισμένη αντίθετη στρέψη των αεροτομών (pre-twist), ώστε κατά τη λειτουργία και την ελαστική παραμόρφωση να προκύπτει η επιθυμητή κατανομή της γωνίας τοποθέτησης.

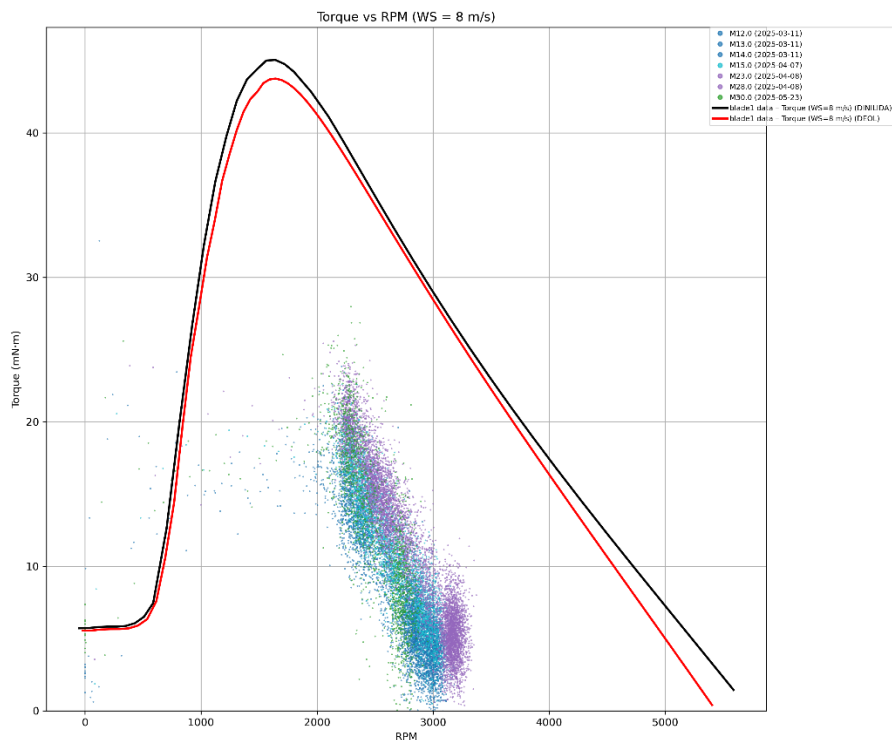
Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε επαναληπτικά, με ελέγχους τόσο σε ονομαστικές όσο και σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας, ενώ σε κάθε στάδιο πραγματοποιούνταν στατικές αναλύσεις για την επαλήθευση της γεωμετρικής ορθότητας και της δομικής επάρκειας του πτερυγίου.

4. Αποτελέσματα και Ανάλυση

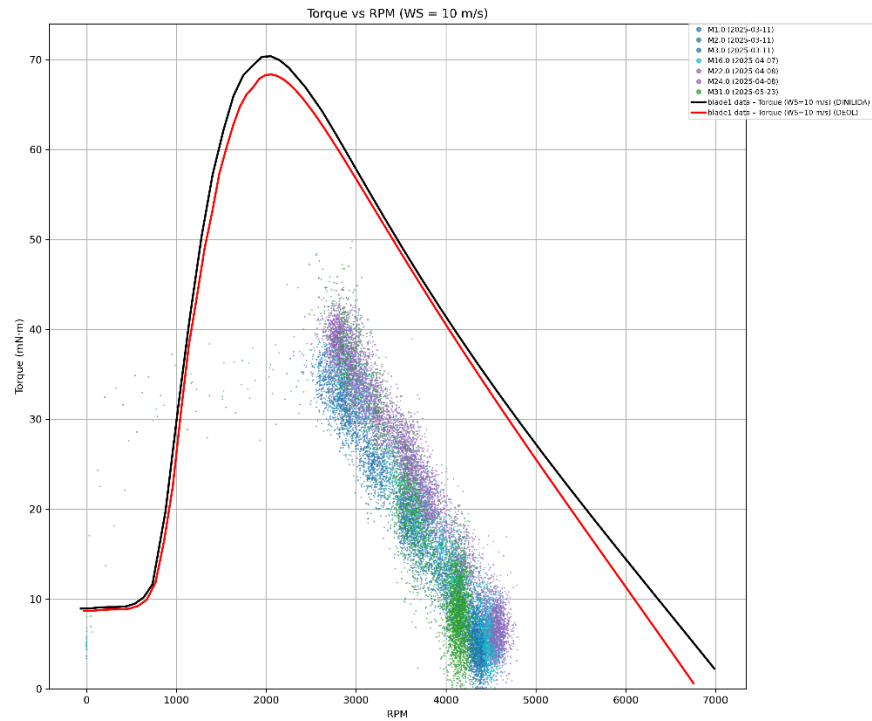
4.1 Αποτελέσματα Μετρήσεων Αεροσήραγγας

Μετά την ολοκλήρωση των πειραματικών μετρήσεων στην αεροσήραγγα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των καταγεγραμμένων τιμών με τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από υπολογιστικά μοντέλα DEOL και DINILIDA, τα οποία έχουν αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας.

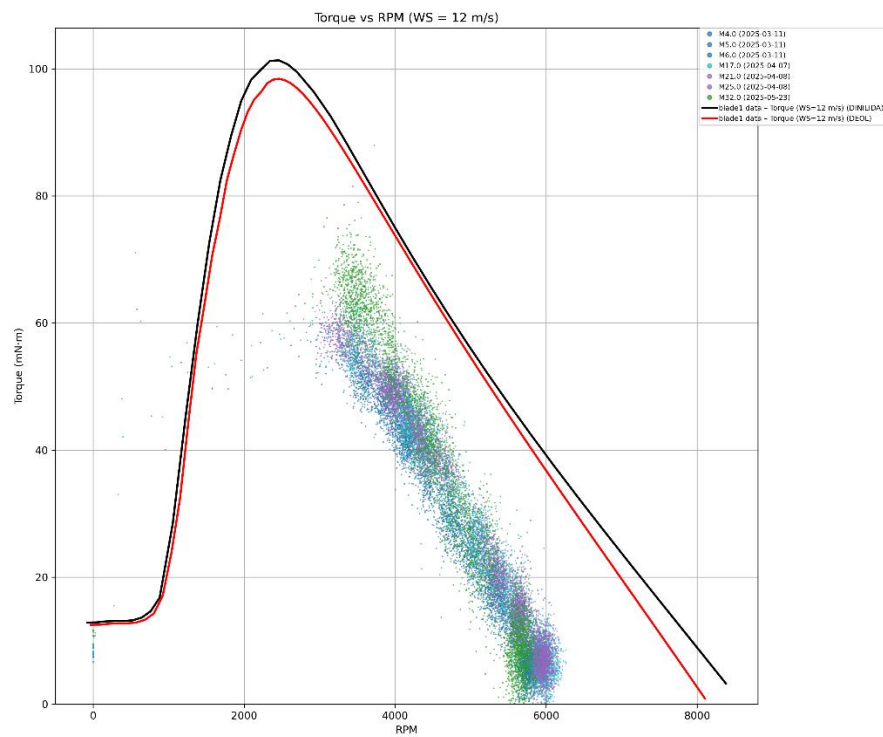
Αρχικά παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα Ροπής-Στροφών (Torque-RPM) για ταχύτητες ανέμου 8, 10, 12, 14 και 16 m/s. Για την ταχύτητα των 16 m/s δεν είχαν πραγματοποιηθεί οι απαραίτητοι υπολογισμοί από το υπολογιστικό μοντέλο DEOL, και για τον λόγο αυτό απεικονίζετε μόνο η θεωρητική καμπύλη DINILIDA.



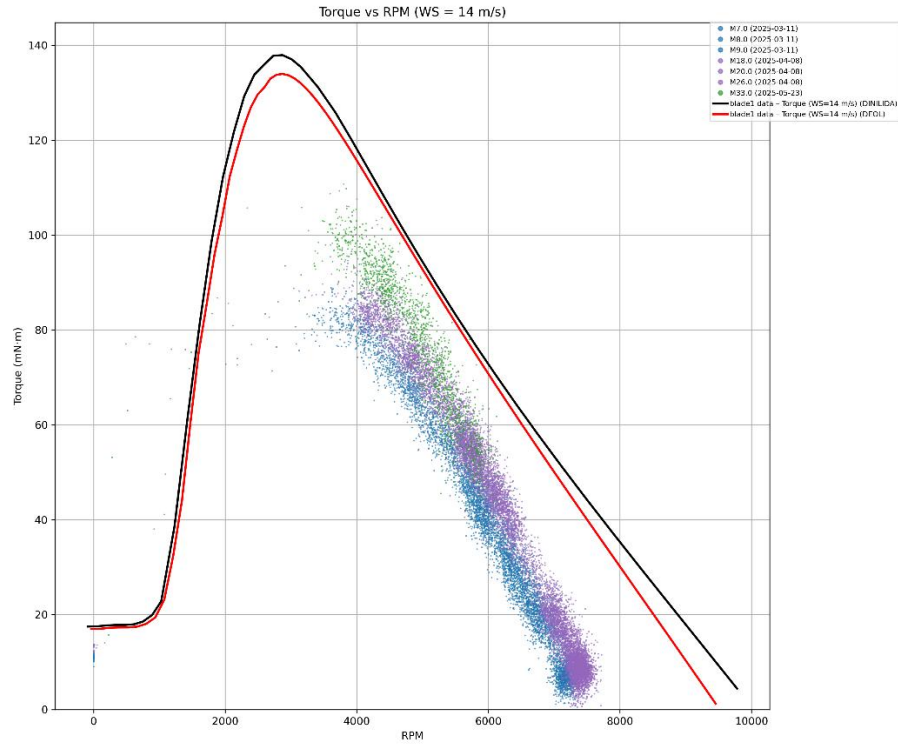
Εικόνα 111. Διάγραμμα ροπής-στροφών για $U = 8$ m/s, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.



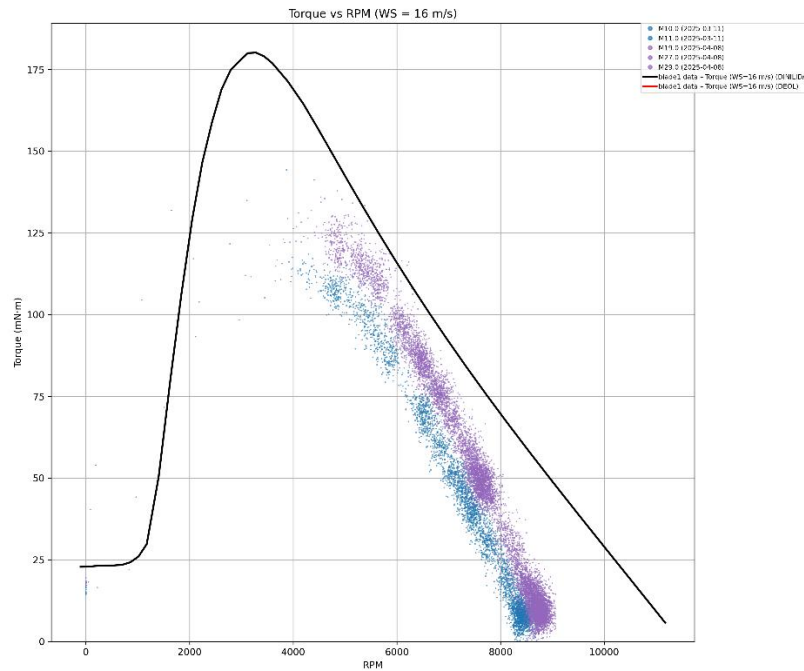
Εικόνα 112. Διάγραμμα ροπής-στροφών για $U = 10$ m/s, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 113. Διάγραμμα ροπής-στροφών για $U = 12$ m/s, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.

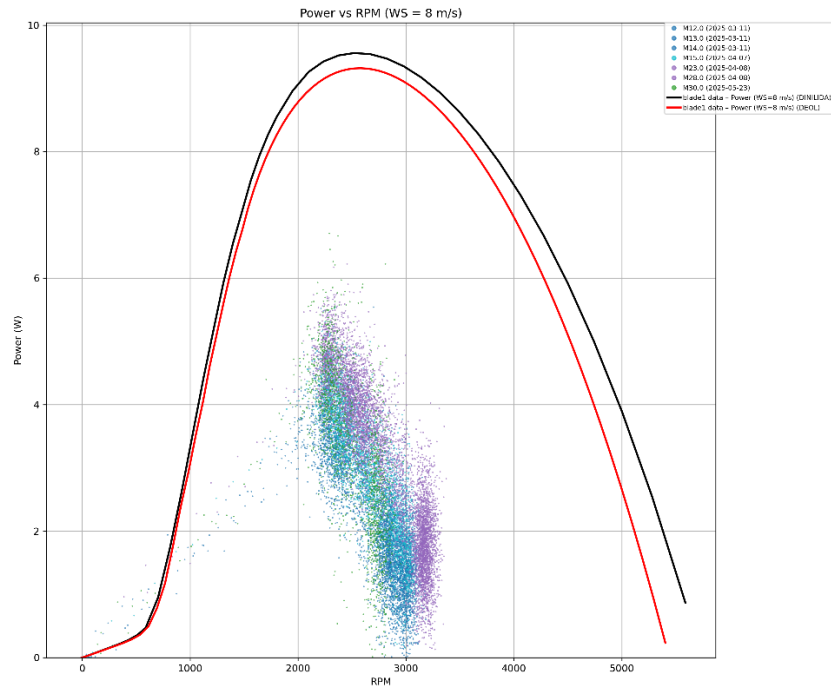


Εικόνα 114. Διάγραμμα ροπής-στροφών για $U = 14$ m/s, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.

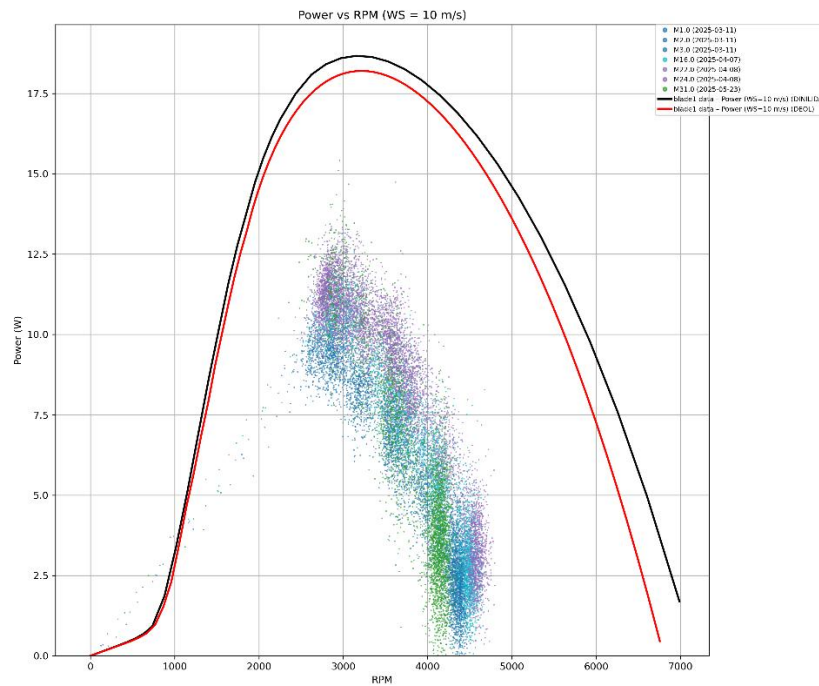


Εικόνα 115. Διάγραμμα ροπής-στροφών για $U = 16$ m/s, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.

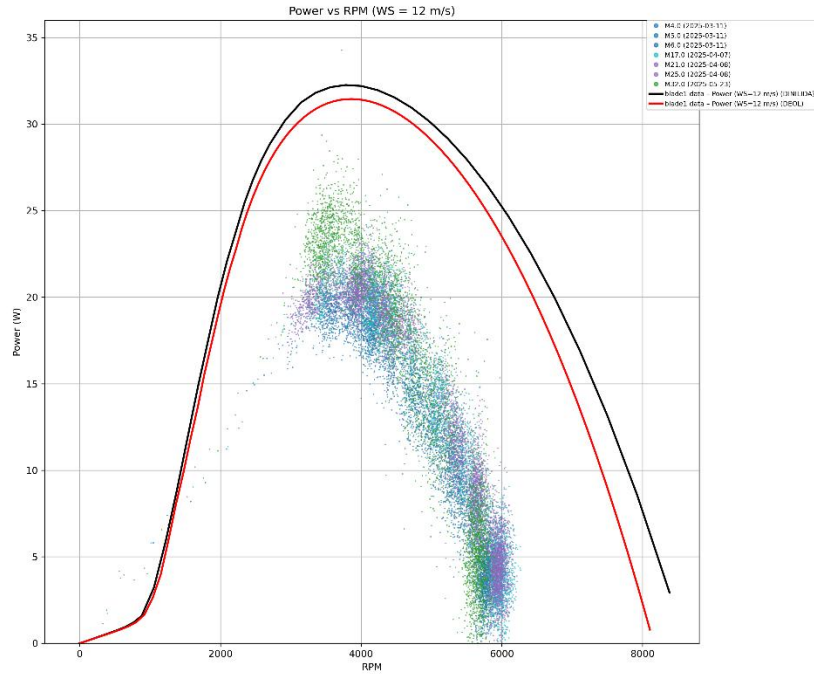
Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα Ισχύος-Στροφών (Power-RPM) για τις ίδιες ταχύτητες ανέμου.



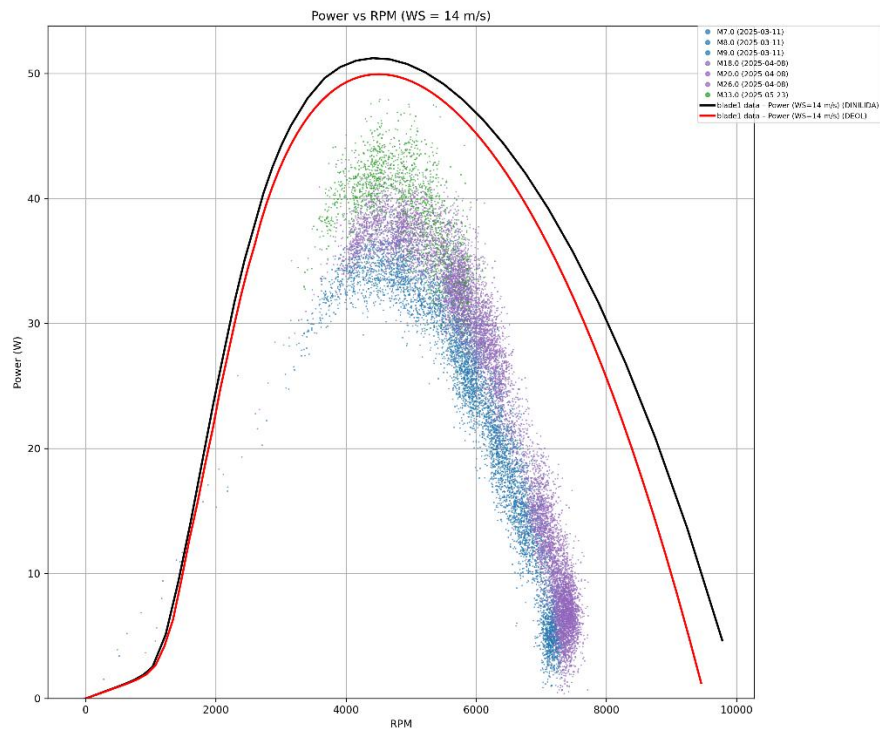
Εικόνα 116. Διάγραμμα Ισχύος-Στροφών για $U = 8 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.



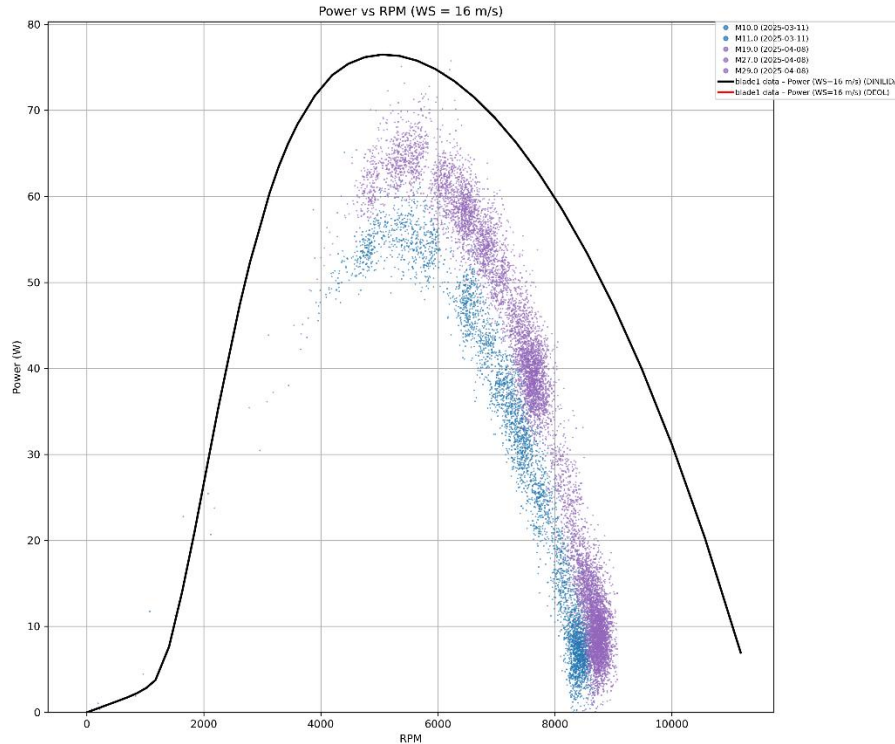
Εικόνα 117. Διάγραμμα Ισχύος-Στροφών για $U = 10 \text{ m/s}$, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 118. Διάγραμμα Ισχύος-Στροφών για $U = 12$ m/s, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 119. Διάγραμμα Ισχύος-Στροφών για $U = 14$ m/s, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 120. Διάγραμμα Ισχύος-Στροφών για $U = 16$ m/s, Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Από τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα θεωρητικά αποτελέσματα του μοντέλου DEOL προκύπτει ότι, παρότι η γενική μορφή των καμπυλών ροπής και ισχύος ως προς τις στροφές ακολουθεί την αναμενόμενη λειτουργική συμπεριφορά μιας ανεμογεννήτριας, παρατηρούνται σημαντικές ποσοτικές αποκλίσεις. Συγκεκριμένα, οι πειραματικές μετρήσεις εμφανίζουν συστηματικά χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τους θεωρητικούς υπολογισμούς.

Η απόκλιση αυτή παρουσιάζεται περίπου σταθερή για όλες τις ταχύτητες ανέμου που εξετάστηκαν. Ως αποτέλεσμα, το φαινόμενο καθίσταται εντονότερο σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου, όπου η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων είναι μεγαλύτερη.

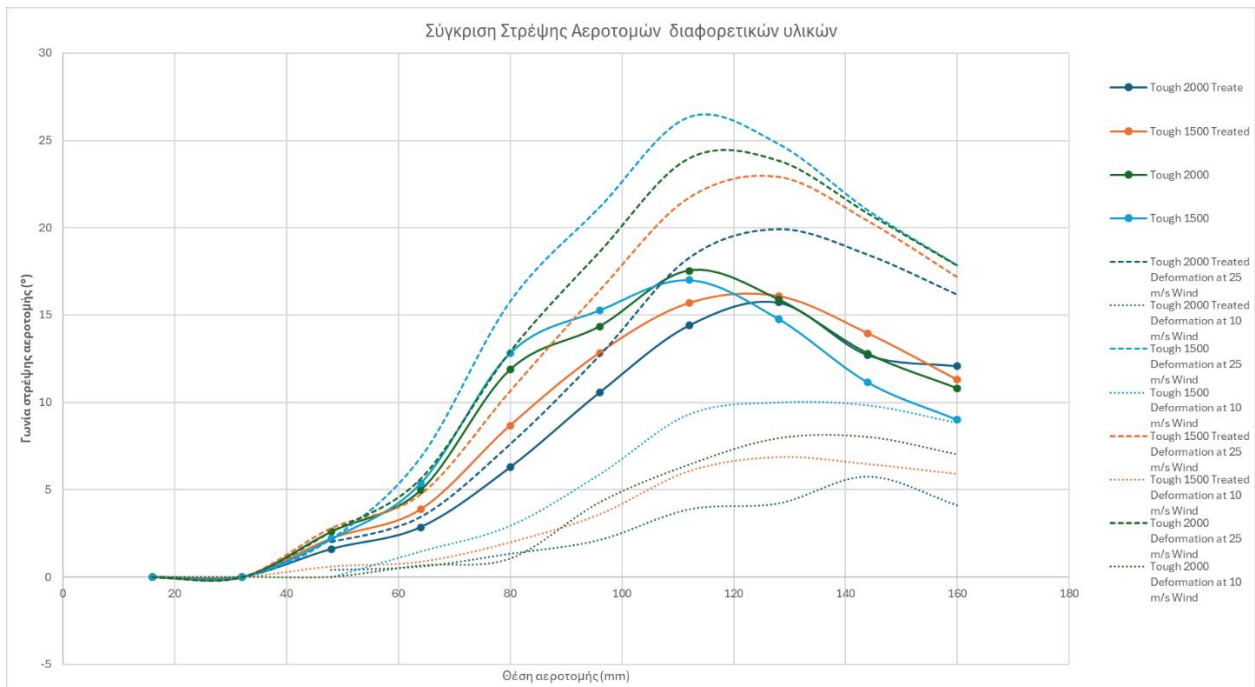
Παρά τις αποκλίσεις αυτές, οι πειραματικές καμπύλες επιβεβαιώνουν ότι τα θεωρητικά μοντέλα αποτυπώνουν ικανοποιητικά τη γενική λειτουργική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, η συστηματική υπερεκτίμηση των μεγεθών υποδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση, προκειμένου να εντοπιστούν οι ακριβείς αεροδυναμικοί ή μηχανικοί παράγοντες που προκαλούν αυτές τις διαφορές.

4.2 Αποτελέσματα Σχεδιασμού Καμπύλων Πτερυγίων

Σύγκριση Αποτελεσμάτων Διαφορετικών Υλικών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για τον σχεδιασμό του μηχανισμού παθητικού ελέγχου παραμόρφωσης του πτερυγίου, εξετάστηκαν δύο βασικοί παράγοντες, η γεωμετρία του πτερυγίου και η ελαστικότητα του υλικού κατασκευής. Όσον αφορά το υλικό, μελετήθηκαν δύο ρητίνες της Formlabs, οι Tough 2000 και Tough 1500, σε δύο διαφορετικές καταστάσεις σκλήρυνσης. Στην κατάσταση (Treated)-, το υλικό έχει υποστεί μετα-επεξεργασία (post-curing), γεγονός που αυξάνει τη μηχανική του αντοχή αλλά μειώνει την ελαστικότητά του. Αντίθετα, στην κατάσταση [Green], δηλαδή πριν από τη διαδικασία σκλήρυνσης, το υλικό διατηρεί μεγαλύτερη ελαστικότητα, εις βάρος όμως της μηχανικής αντοχής. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκαν τέσσερις προσομοιώσεις επάνω στο ίδιο πτερύγιο με καμπύλη γεωμετρία, καθένα εκ των οποίων αφορούσε διαφορετικό συνδυασμό υλικού και κατάστασης σκλήρυνσης.

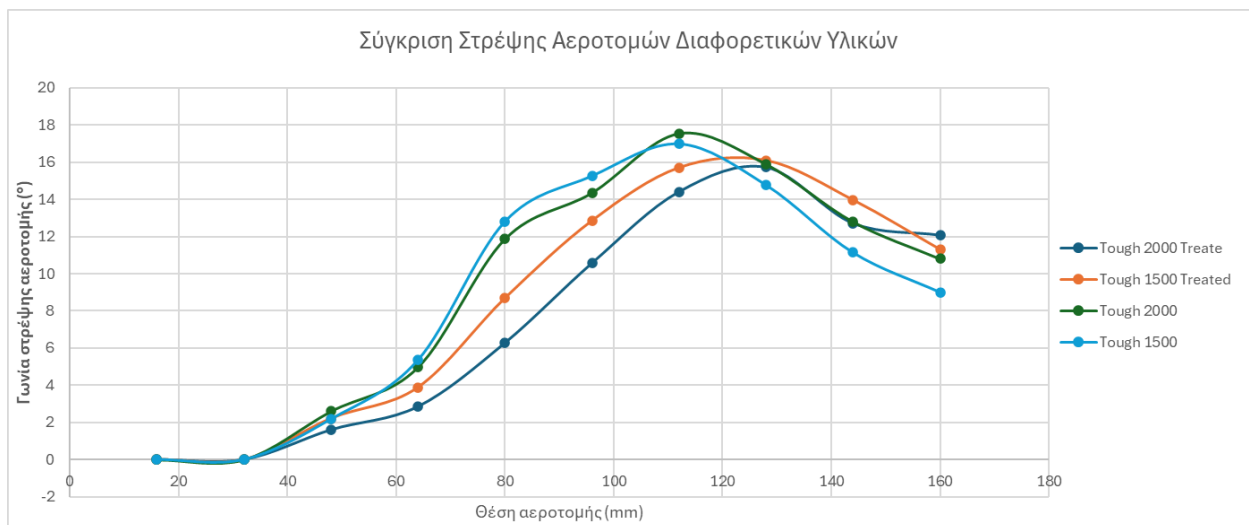
Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η κατανομή της στρεπτικής παραμόρφωσης του πτερυγίου κατά μήκος του, τόσο υπό συνθήκες ονομαστικής ταχύτητας ανέμου (10 m/s), όσο και υπό συνθήκες μέγιστης ταχύτητας (25 m/s). Παράλληλα, απεικονίζεται η διαφορά στρέψης μεταξύ των δύο αυτών συνθηκών, η οποία χρησιμοποιείται ως μέτρο αξιολόγησης της απόκρισης του παθητικού μηχανισμού ελέγχου.



Εικόνα 121. Σύγκριση στρέψης αεροτομών πτερυγίων από διαφορετικά υλικά υπό ροή ανέμου 10 m/s και 25 m/s.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο κατά τον τελικό σχεδιασμό, το πτερύγιο πρέπει να διαθέτει κατάλληλη αρχική γωνία στρέψης (pretwist), ώστε κατά τη λειτουργία του στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου, οι επιμέρους αεροτομές να ευθυγραμμίζονται με τη βέλτιστη γωνία προσβολής. Με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, η επαγόμενη στρεπτική παραμόρφωση μεταβάλλει τη γωνία προσβολής των αεροτομών, επιτρέποντας έτσι την αυτόματη προσαρμογή της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του πτερυγίου χωρίς την ανάγκη ενεργού ελέγχου.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η κατανομή της στρεπτικής παραμόρφωσης κατά μήκος του πτερυγίου διαφοροποιείται αισθητά μεταξύ των διαφορετικών υλικών, τόσο στις ονομαστικές όσο και στις μέγιστες συνθήκες φόρτισης. Παρότι τα πιο εύκαμπτα υλικά εμφανίζουν μεγαλύτερη συνολική παραμόρφωση, η διαφορά της στρεπτικής γωνίας ανάμεσα στις δύο ταχύτητες ανέμου δεν είναι απαραίτητα μεγαλύτερη σε σχέση με τα λιγότερο εύκαμπτα υλικά. Αυτό συμβαίνει επειδή η αυξημένη ελαστικότητα προκαλεί έντονη στρέψη ήδη από την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας, με αποτέλεσμα η διαφορά στρέψης των δύο ταχυτήτων να μην είναι τόσο έντονη.

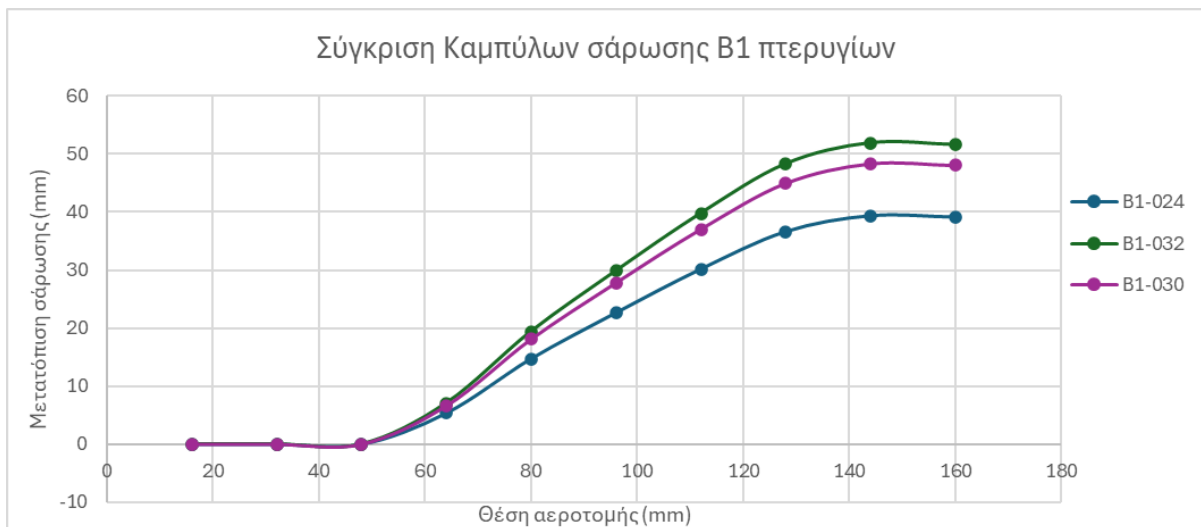


Εικόνα 122. Σύγκριση στρέψης αεροτομών πτερυγίων από διαφορετικά υλικά υπό ίδιες συνθήκες φόρτισης, για ταχύτητα ανέμου 25 m/s.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, κρίθηκε ότι το υλικό Tough 2000 παρουσιάζει την πιο ισορροπημένη συμπεριφορά μεταξύ ελαστικότητας και δομικής ακαμψίας, επιτυγχάνοντας ικανοποιητική στρεπτική απόκριση χωρίς υπερβολικές παραμορφώσεις. Για τον λόγο αυτό, στις επόμενες φάσεις των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά το συγκεκριμένο υλικό.

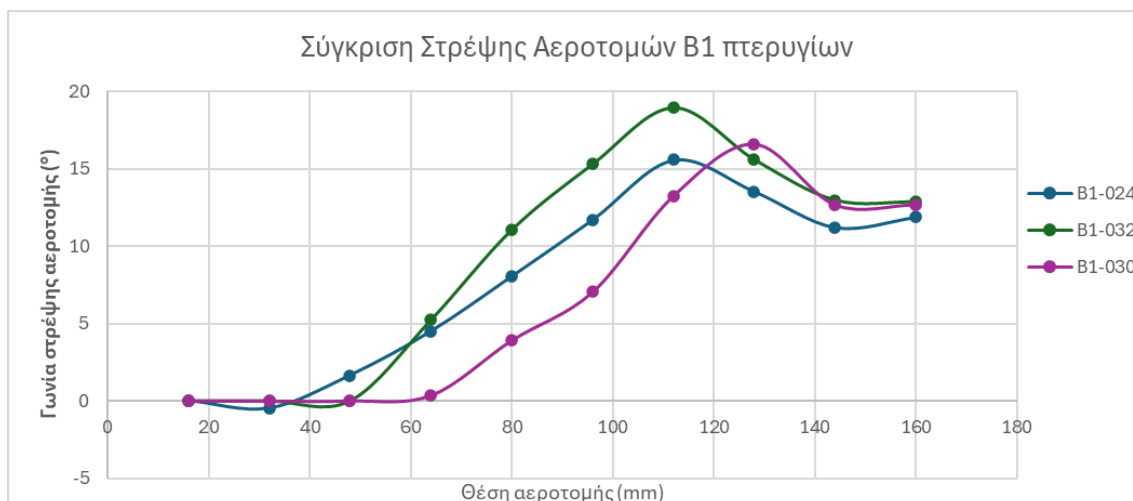
Σύγκριση Αποτελεσμάτων Διαφορετικών Καμπυλοτήτων

Αρχικά σχεδιάστηκαν τρία διαφορετικά πτερύγια με κοινή καμπύλη γεωμετρία, τα οποία διέφεραν ως προς την ένταση της καμπυλότητας. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τρία μοντέλα πτερυγίων όπου το ακροπτερύγιο απείχε από τον διαμήκη άξονα του πτερυγίου κατά 25%, 30% και 32% του συνολικού μήκους του. Τα πτερύγια αυτά συμβολίζονται ως B1-024, B1-030 και B1-032 αντίστοιχα. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται αναλυτικά η γεωμετρία των τριών πτερυγίων τύπου B1. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται το μήκος του πτερυγίου, εκφρασμένο ως η αξονική θέση κάθε αεροτομής σε χιλιοστά (mm), ενώ στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η μετατόπιση σάρωσης (mm), δηλαδή η απόσταση κάθε αεροτομής από τον διαμήκη άξονα αναφοράς.



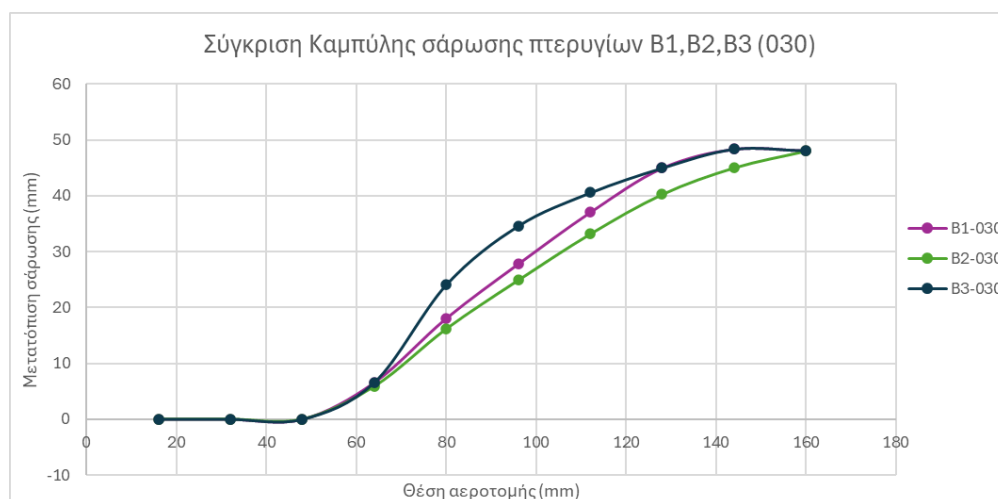
Εικόνα 123. Σύγκριση καμπυλότητας πτερυγίων B1 με διαφορετικό ποσοστό σάρωσης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι σχετικές στρεπτικές παραμορφώσεις που προκύπτουν στα τρία πτερύγια κατά τη λειτουργία τους στη μέγιστη ταχύτητα ανέμου (25 m/s), σε σύγκριση με τη λειτουργία τους στην ονομαστική ταχύτητα (10 m/s). Παρατηρείται ότι το πτερύγιο με τη μεγαλύτερη ένταση καμπυλότητας εμφανίζει και τη μεγαλύτερη στρεπτική απόκλιση, η οποία είναι επιθυμητή για την εφαρμογή παθητικού ελέγχου φορτίων.



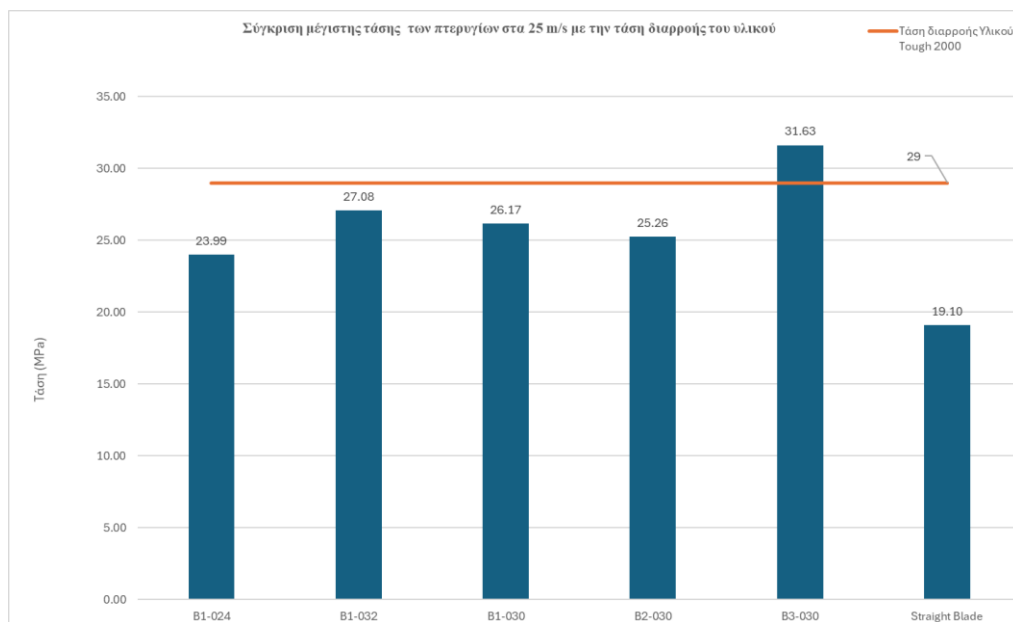
Εικόνα 124. Σύγκριση της γωνίας στρέψης κατά μήκος των πτερυγίων B1 με διαφορετικό ποσοστό σάρωσης υπό ίδιες συνθήκες φόρτισης, για ταχύτητα ανέμου 25 m/s.

Παρά την καλύτερη στρεπτική συμπεριφορά που εμφάνισε το πτερύγιο B1-032, αρχικά επιλέχθηκε να εξεταστούν τροποποιημένες εκδόσεις του πτερυγίου B1-030, καθώς παρατηρήθηκε ότι παρουσίαζε χαμηλότερες μέγιστες τάσεις (Stress) και πιο ισορροπημένη μηχανική συμπεριφορά. Με βάση το αρχικό πτερύγιο B1-030, δημιουργήθηκαν δύο νέα πτερύγια, B2-030 και B3-030, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς το σχήμα της καμπύλης σάρωσης. Το πτερύγιο B2-030 παρουσιάζει ομαλότερη και πιο προοδευτική αύξηση της μετατόπισης κατά μήκος του, ενώ το B3-030 εμφανίζει εντονότερη καμπυλότητα στις πρώτες αεροτομές, οδηγώντας σε πιο απότομη μεταβολή της γεωμετρίας σάρωσης.



Εικόνα 125. Σύγκριση καμπυλότητας πτερυγίων τύπου B1,B2 και B3 με ίδια ακτίνα σάρωσης.

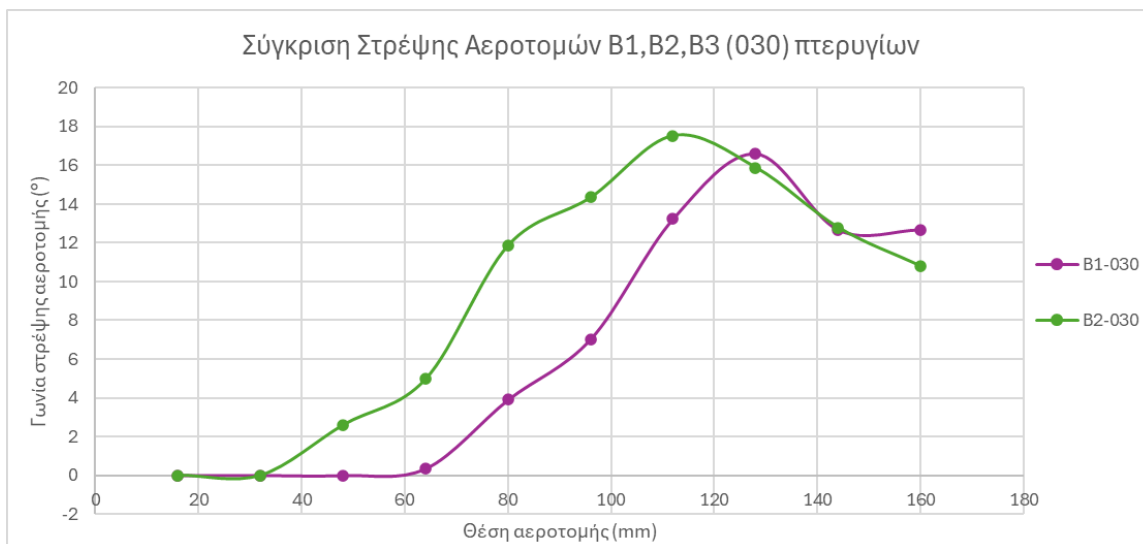
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές τάσης που αναπτύχθηκαν στα πτερύγια που εξετάστηκαν έως τώρα, σε σύγκριση με την τάση διαρροής του υλικού.



Εικόνα 126. Σύγκριση μέγιστης τάσης των πτερυγίων στις 25 m/s σε σχέση με την τάση διαρροής του υλικού

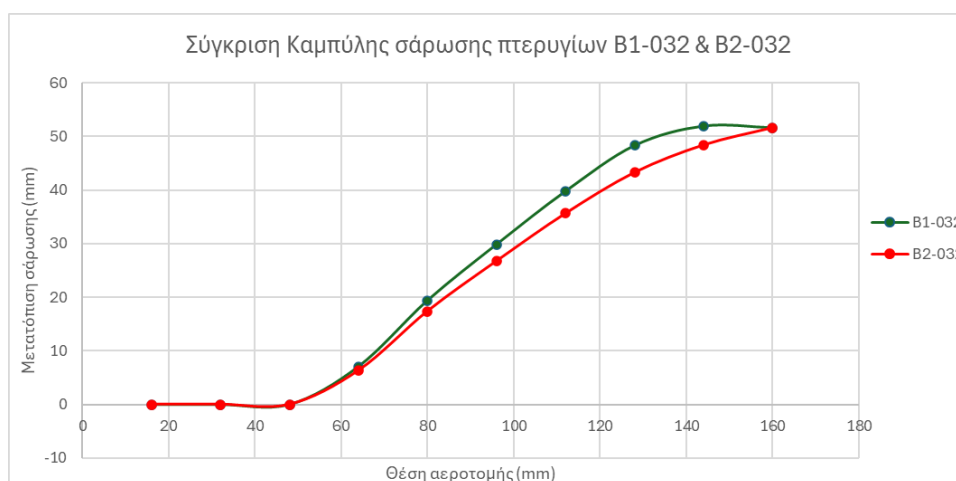
Παρατηρείται ότι το πτερύγιο B3-030 εμφάνισε μέγιστη τάση μεγαλύτερη από την τάση διαρροής του υλικού, γεγονός που υποδηλώνει πιθανή αστοχία υπό συνθήκες μέγιστης ταχύτητας ανέμου (25 m/s). Για τον λόγο αυτό, το συγκεκριμένο πτερύγιο αποκλείστηκε από την περαιτέρω ανάλυση στρεπτικής παραμόρφωσης. Για τον λόγο αυτό, το συγκεκριμένο πτερύγιο αποκλείστηκε από την περαιτέρω ανάλυση στρεπτικής παραμόρφωσης. Αντίθετα, συγκρίνοντας το αρχικό πτερύγιο B1-030 με το τροποποιημένο B2-030, παρατηρείται ότι το B2-030 παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές τάσης, γεγονός που υποδηλώνει βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά και αυξημένη αντοχή στη φόρτιση.

Εκτός από τη μείωση των τάσεων σε σχέση με το αρχικό πτερύγιο (B1-030), το πτερύγιο B2-030 παρουσιάζει και βελτιωμένη στρεπτική απόκριση. Η μεταβολή της γωνίας στρέψης κατά μήκος του πτερυγίου είναι πιο ομαλή, ενώ οι μέγιστες τιμές που εμφανίζονται προς το ακροπτερύγιο είναι υψηλότερες. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει αυξημένη ικανότητα παθητικής προσαρμογής στην αεροδυναμική φόρτιση.



Εικόνα 127. Σύγκριση της γωνίας στρέψης κατά μήκος των πτερυγίων B1-030, B2-030 και B3-030 υπό ίδιες συνθήκες φόρτισης, για ταχύτητα ανέμου 25 m/s.

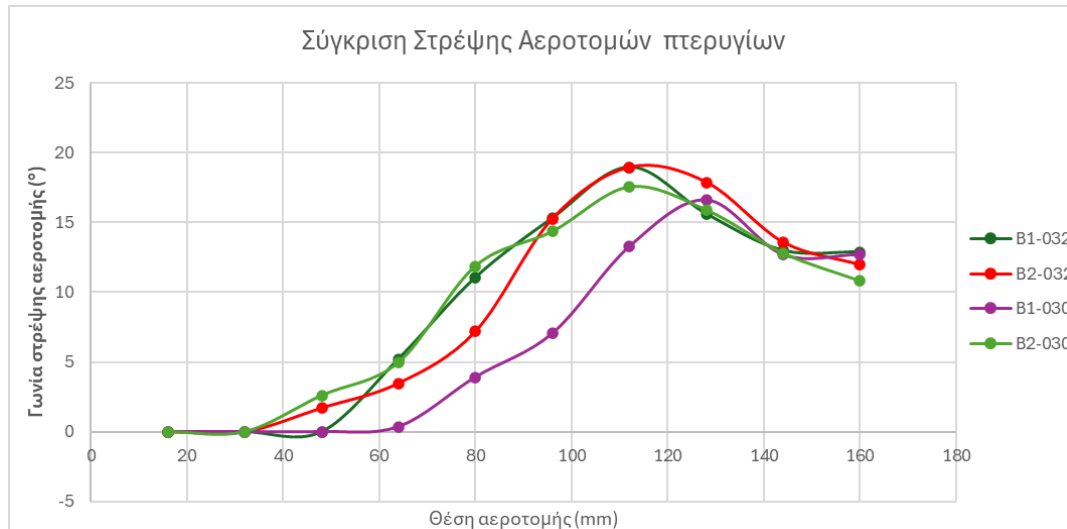
Γνωρίζοντας ότι η γεωμετρία του πτερυγίου B2 παρουσίασε βελτιωμένη μηχανική και στρεπτική συμπεριφορά, στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε τροποποίηση της καμπυλότητας και δημιουργήθηκε το αντίστοιχο πτερύγιο B2-032.



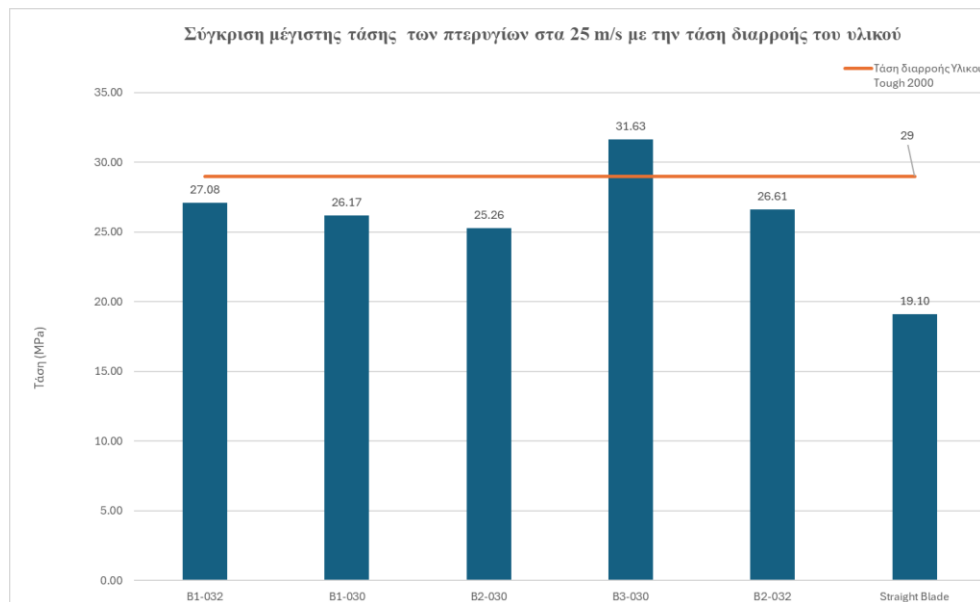
Εικόνα 128. Σύγκριση της καμπυλότητας των πτερυγίων B1 και B2, για ποσοστιαία ακτίνα σάρωσης ίση με 32% του μήκους τους.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που συγκρίνουν το πτερύγιο B2-032 με τα υπόλοιπα μοντέλα που αναλύθηκαν. Όσον αφορά τη στρεπτική του συμπεριφορά, το πτερύγιο B2-032 εμφάνισε τη βέλτιστη απόκριση, με ορισμένες αεροτομές να φτάνουν γωνίες στρέψης έως και 19°, τιμή ιδιαίτερα ικανοποιητική για την επιθυμητή λειτουργία παθητικού ελέγχου φορτίων. Επιπλέον, από το διάγραμμα των τάσεων προκύπτει ότι οι μέγιστες αναπτυσσόμενες

τάσεις στο περύγιο B2-032 βρίσκονται μεταξύ των αντίστοιχων τιμών των περυγίων B1-032 και B1-030. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι το περύγιο B2-032 επιτυγχάνει καλύτερη ισορροπία μεταξύ ελαστικής παραμόρφωσης και δομικής αντοχής, καθιστώντας το καταλληλότερο για περαιτέρω αξιολόγηση στις επόμενες φάσεις της μελέτης.



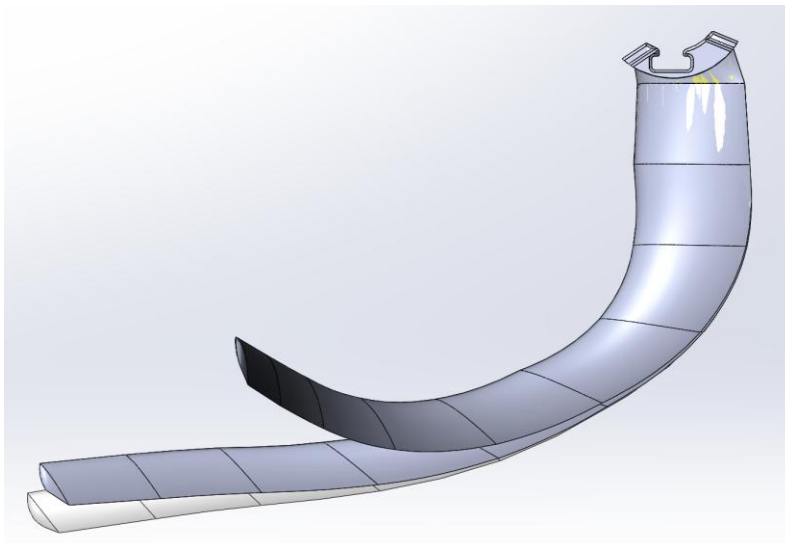
Εικόνα 129. Σύγκριση της γωνίας στρέψης κατά μήκος των περυγίων υπό ίδιες συνθήκες φόρτισης, για ταχύτητα ανέμου 25 m/s.



Εικόνα 130. Σύγκριση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης στα περύγια υπό φόρτιση για ταχύτητα ανέμου 25 m/s, σε συσχέτιση με την τάση διαρροής του υλικού.

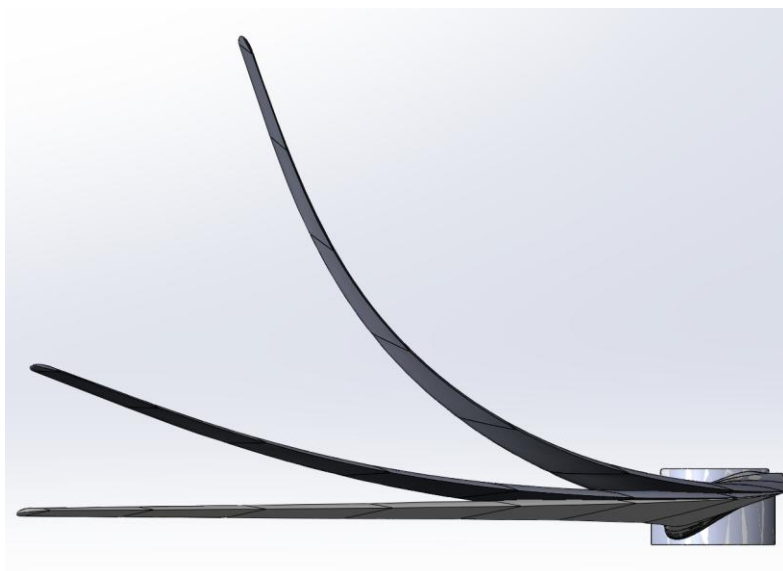
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η σύγκριση των παραμορφωμένων περυγίων στις ταχύτητες ανέμου 10 m/s και 25 m/s, σε σχέση με την αρχική γεωμετρία. Εκτός από τη στρεπτική

παραμόρφωση των αεροτομών, διακρίνονται επίσης μετατοπίσεις των αεροτομών τόσο κατά μήκος του διαμήκη άξονα όσο και ως προς τον άξονα περιστροφής.



Εικόνα 131. Σύγκριση μη παραμορφωμένου και παραμορφωμένων πτερυγίων για ταχύτητες ανέμου 10 και 25 m/s (κάτοψη).

Η παραμόρφωση αυτή οδηγεί σε αισθητή μείωση της ακτίνας σάρωσης του πτερυγίου, με αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργού επιφάνειας σάρωσης και, κατ' επέκταση, της μέγιστης διαθέσιμης αιολικής ενέργειας που μπορεί να αξιοποιηθεί από την ανεμογεννήτρια.

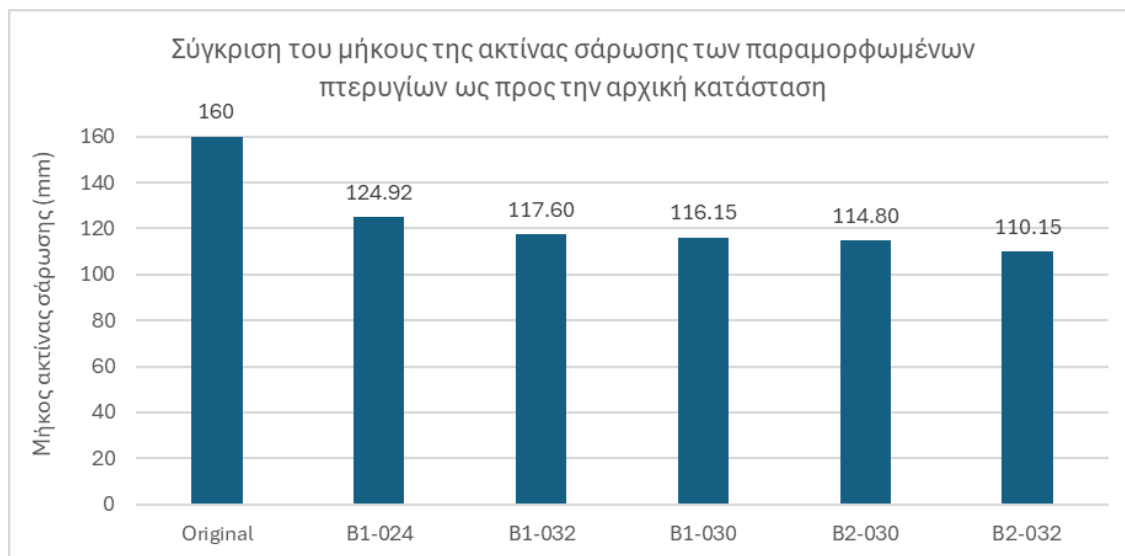


Εικόνα 132. Σύγκριση μη παραμορφωμένου και παραμορφωμένων πτερυγίων για ταχύτητες ανέμου 10 και 25 m/s (Πρόσοψη).

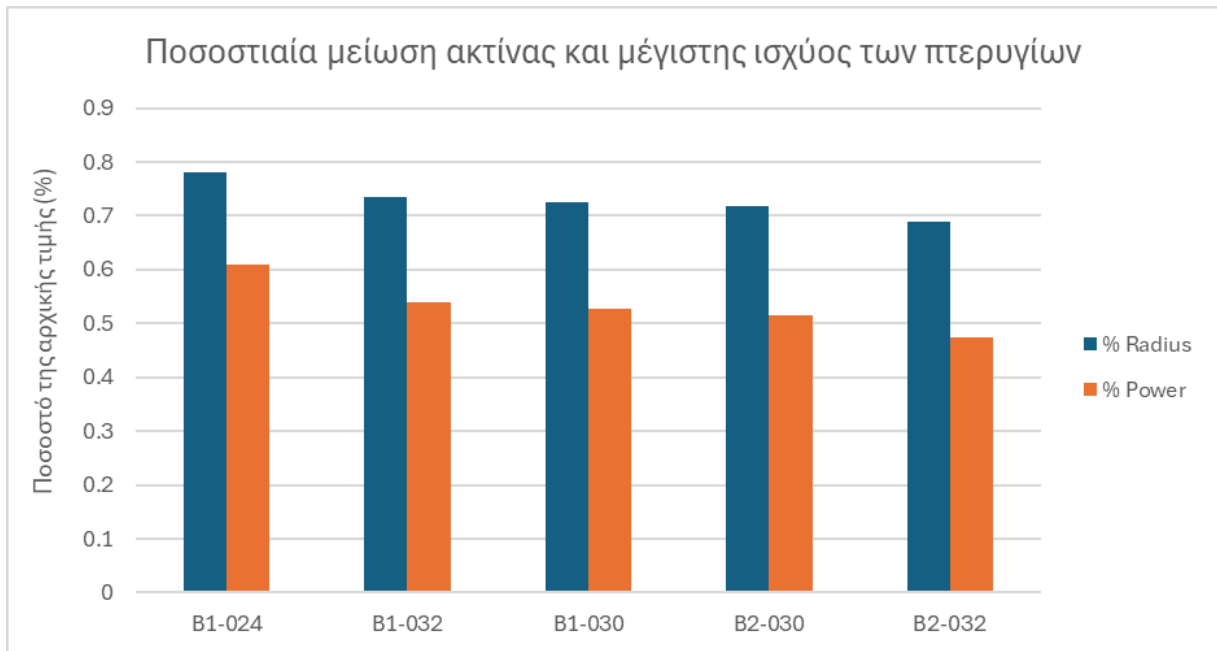


Εικόνα 133. Σύγκριση μη παραμορφωμένου και παραμορφωμένων πτερυγίων για ταχύτητες ανέμου 10 και 25 m/s (Πλάγια όψη).

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται η σύγκριση του τελικού μήκους κάθε πτερυγίου που εξετάστηκε, σε σχέση με το αρχικό μήκος του πριν την παραμόρφωση. Όπως επίσης, απεικονίζονται η ποσοστιαία μείωση του συνολικού μήκους του πτερυγίου καθώς και η αντίστοιχη ποσοστιαία μείωση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, η οποία προκύπτει λόγω της μείωσης της ενεργού ακτίνας σάρωσης.



Εικόνα 134. Σύγκριση μήκους παραμορφωμένων πτερυγίων υπό φόρτιση για ταχύτητα ανέμου 25 m/s σε σχέση με το αρχικό.



Εικόνα 135. Ποσοστό του αρχικού λειτουργικού μήκους (ακτίνας) και της μέγιστης παραγόμενης ισχύος που παραμένει μετά την αεροδυναμική παραμόρφωση των πτερυγίων.

5. Συμπεράσματα Και Μελλοντική Εργασία

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη διερεύνηση της δυνατότητας παθητικού ελέγχου φορτίων σε ανεμογεννήτριες, μέσω της ανάπτυξης εύκαμπτων πτερυγίων με καμπύλη γεωμετρία. Στόχος ήταν η αξιολόγηση του βαθμού στον οποίο ο κατάλληλος συνδυασμός υλικών και γεωμετρίας μπορεί να επιτύχει παθητική αεροελαστική απόκριση των πτερυγίων στα αεροδυναμικά φορτία, μειώνοντας τη γωνία προσβολής σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, χωρίς την ανάγκη ενεργού ελέγχου. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκαν υπολογιστικά μοντέλα για την εκτίμηση της αεροδυναμικής απόδοσης, ενώ πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις σε αεροσήραγγα για άκαμπτο ευθύγραμμο πτερύγιο, οι οποίες συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα υπολογιστικά αποτελέσματα. Παράλληλα, σχεδιάστηκαν και αναλύθηκαν, μέσω μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων (FEA), πρωτότυπα εύκαμπτων πτερυγίων, με στόχο την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών που απαιτούνται για την επίτευξη επιθυμητής αεροελαστικής συμπεριφοράς.

Από τις συγκρίσεις προέκυψε ότι το υπολογιστικό μοντέλο αναπαράγει ικανοποιητικά τη μορφή των καμπυλών ισχύος και ροπής ως συνάρτηση των στροφών του ρότορα, ωστόσο παρουσιάζει συστηματικές αποκλίσεις στις απόλυτες τιμές. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο πρόβλεψης, απαιτεί όμως περαιτέρω βαθμονόμηση με βάση πειραματικά δεδομένα, ώστε να αποδίδονται με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πραγματικά φαινόμενα λειτουργίας.

Παράλληλα, μέσα από τη σχεδίαση και αξιολόγηση πτερυγίων με καμπύλη γεωμετρία με διαφορετικά υλικά, διαπιστώθηκε ότι η επιλογή του υλικού αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στη δυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων. Τα πιο άκαμπτα υλικά δεν επέτρεπαν την επιθυμητή επαγόμενη στρέψη σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, ενώ τα πολύ εύκαμπτα υλικά, παρότι είχαν τη χαμηλότερη απαιτούμενη ακαμψία, παρουσίασαν περιορισμένη διαφορά στρέψης μεταξύ των ταχυτήτων λειτουργίας, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται η αποδοτική παθητική ρύθμιση της γωνίας προσβολής. Από την ανάλυση στατικής παραμόρφωσης προέκυψε ότι υπάρχει βέλτιστο εύρος ελαστικών ιδιοτήτων, στο οποίο συνδυάζεται επαρκής ευκαμψία με ικανοποιητική διαφοροποίηση στρέψης μεταξύ των διαφόρων φορτίσεων, χωρίς υπερβολική παραμόρφωση που θα έθετε σε κίνδυνο τη μηχανική αντοχή ή την αεροδυναμική συμπεριφορά. Από τα εξεταζόμενα υλικά, αυτό που ανταποκρίθηκε αποτελεσματικότερα στις παραπάνω απαιτήσεις ήταν το Tough 2000.

Όσον αφορά τη γεωμετρία, η μελέτη έδειξε ότι η καμπύλη γεωμετρία επηρεάζει ουσιαστικά τόσο την κατανομή των φορτίων κατά μήκος του πτερυγίου όσο και την επαγόμενη στρέψη. Διαπιστώθηκε ότι πτερύγια με αυξημένο βαθμό καμπυλότητας, δηλαδή μεγαλύτερη απόκλιση από την ευθύγραμμη διάταξη, παρουσιάζουν ενισχυμένη παθητική αεροελαστική απόκριση, αυξάνοντας την ικανότητά τους να μεταβάλλουν τη γωνία τοποθέτησης υπό φόρτιση.

Παράλληλα, διαπιστώθηκε ότι γεωμετρίες με ομαλότερη καμπυλότητα και μικρότερες μεταβολές παρουσιάζουν χαμηλότερες αναπτυσσόμενες τάσεις. Επιπλέον, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προέκυψε ότι η γεωμετρία B2-032 εμφανίζει τη μεγαλύτερη επαγόμενη στρέψη υπό φόρτιση, σε συνδυασμό με τις χαμηλότερες τιμές τάσεων σε σύγκριση με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες γεωμετρίες.

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία συνέβαλε στη θεμελίωση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση εύκαμπτων πτερυγίων με καμπύλη γεωμετρία, με στόχο τον παθητικό έλεγχο φορτίων σε ανεμογεννήτριες. Με την αξιοποίηση τόσο πειραματικών όσο και υπολογιστικών μεθόδων, αναδείχθηκαν κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των πτερυγίων, όπως τα υλικά, η γεωμετρία και η δυναμική παραμόρφωση υπό φορτίο. Παρά τους περιορισμούς που αντιμετωπίστηκαν, η έρευνα αυτή θέτει τις βάσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη αποδοτικών, ελαφρών και προσαρμοστικών πτερυγίων, συμβάλλοντας στις τρέχουσες τάσεις της αιολικής τεχνολογίας. Η συνδυαστική εφαρμογή αριθμητικών και πειραματικών εργαλείων, όπως το DEOL, το CFD και οι δοκιμές σε αεροσήραγγα, αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω την κατανόηση και τη βελτιστοποίηση τέτοιων συστημάτων, ανοίγοντας τον δρόμο για καινοτόμες εφαρμογές στο πεδίο της αιολικής ενέργειας.

5.2 Μελλοντική Εργασία

Σε ό,τι αφορά τη μελλοντική προοπτική της εργασίας, επισημαίνεται ότι η ανάπτυξη του τελικού πρωτοτύπου εύκαμπτου πτερυγίου με καμπύλη γεωμετρία δεν ολοκληρώθηκε, γεγονός που δεν επέτρεψε την πειραματική επιβεβαίωση της αεροελαστικής του συμπεριφοράς σε συνθήκες λειτουργίας.

Επόμενα βήματα περιλαμβάνουν τη διερεύνηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των εύκαμπτων γεωμετριών μέσω υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), με στόχο την επαλήθευση των αεροδυναμικών δυνάμεων που χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό μοντέλο και τον εντοπισμό πιθανών αποκλίσεων. Οι αρχικοί υπολογισμοί βασίστηκαν σε αεροδυναμικά φορτία που

αντιστοιχούν σε άκαμπτο ευθύγραμμο πτερύγιο, με σταθερή γωνία προσβολής. Ωστόσο, στα εύκαμπτα πτερύγια η γωνία προσβολής μεταβάλλεται δυναμικά κατά μήκος της ακτίνας, λόγω της αεροελαστικής απόκρισης. Για τον λόγο αυτό, η χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) κρίνεται απαραίτητη για την ακριβέστερη εκτίμηση των πραγματικών αεροδυναμικών φορτίων, τα οποία καθορίζουν την παραμόρφωση του πτερυγίου και, κατ' επέκταση, τη λειτουργία του παθητικού μηχανισμού ελέγχου.

Στη συνέχεια, η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου υπολογιστικού πλαισίου, το οποίο θα συνδυάζει τα αποτελέσματα CFD με αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων (FEA), αναμένεται να επιτρέψει την ακριβέστερη πρόβλεψη της αλληλεπίδρασης φορτίων–ευκαμψίας, σε αντίθεση με τις τρέχουσες προσεγγίσεις που βασίζονται σε στατικά φορτία.

Τελικός στόχος αποτελεί η κατασκευή και πειραματική διερεύνηση πρωτοτύπου εύκαμπτου πτερυγίου με καμπύλη γεωμετρία, το οποίο θα υποβληθεί σε δοκιμές σε αεροσήραγγα και σε στατικές δοκιμές, προκειμένου να μετρηθούν η πραγματική παραμόρφωση, η επαγόμενη στρέψη και η ενεργειακή του απόδοση, με σκοπό την αξιολόγηση της παθητικής λειτουργίας του πτερυγίου. Τα αποτελέσματα αυτά θα επιτρέψουν την τελική βαθμονόμηση των υπολογιστικών μοντέλων και θα συμβάλουν στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού εύκαμπτων πτερυγίων για μελλοντικές εφαρμογές.

Επιπλέον, αξίζει να διερευνηθεί η χρήση υβριδικών υλικών στη δομή του πτερυγίου, με διαβαθμισμένες μηχανικές ιδιότητες κατά μήκος της ακτίνας και του πάχους του. Μια τέτοια προσέγγιση θα επέτρεπε τη στοχευμένη κατανομή της ευκαμψίας, ώστε ορισμένες περιοχές να εμφανίζουν αυξημένη παραμορφωσιμότητα για την ενίσχυση της επαγόμενης στρέψης και τη μείωση των φορτίων σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, ενώ άλλες να διατηρούν υψηλή ακαμψία, διασφαλίζοντας τη δομική ακεραιότητα.

Βιβλιογραφία

- [1] W. Tong, 'Wind Power Generation and Wind Power Generation and Wind Power Generation and Wind Power Generation and Wind Turbine Design Wind Turbine Design Wind Turbine Design Wind Turbine Design Wind Turbine Design'. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <http://library.witpress.comwww.witpress.comWITPRESS>
- [2] P. Veers κ.ά., 'Grand challenges in the design, manufacture, and operation of future wind turbine systems', 11 Ιούλιος 2023, *Copernicus Publications*. doi: 10.5194/wes-8-1071-2023.
- [3] Thomas. Ackermann, *Wind power in power systems*. John Wiley & Sons, 2012.
- [4] A. Ghassemi, D. R. Myers, F. Vignola, J. Michalsky, και T. Stoffel, 'WIND ENERGY Renewable Energy and the Environment ENERGY AND THE ENVIRONMENT SERIES EDITOR Solar and Infrared Radiation Measurements'.
- [5] P. J. Schubel και R. J. Crossley, 'Wind turbine blade design', 2012, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en5093425.
- [6] P. Tchakoua, R. Wamkeue, M. Ouhrouche, F. Slaoui-Hasnaoui, T. A. Tameghe, και G. Ekemb, 'Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges', 2014, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en7042595.
- [7] P. Gipe και E. Möllerström, 'An overview of the history of wind turbine development: Part I—The early wind turbines until the 1960s', 1 Δεκέμβριος 2022, *SAGE Publications Inc*. doi: 10.1177/0309524X221117825.
- [8] P. Gipe και E. Möllerström, 'An overview of the history of wind turbine development: Part II—The 1970s onward', 1 Φεβρουάριος 2023, *SAGE Publications Inc*. doi: 10.1177/0309524X221122594.
- [9] K. Johansen, 'Blowing in the wind: A brief history of wind energy and wind power technologies in Denmark', *Energy Policy*, τ. 152, Μαΐου 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112139.
- [10] J. G. Njiri και D. Söffker, 'State-of-the-art in wind turbine control: Trends and challenges', 1 Ιούλιος 2016, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2016.01.110.

- [11] S. Wan, L. Cheng, και X. Sheng, ‘Effects of yaw error on wind turbine running characteristics based on the equivalent wind speed model’, *Energies (Basel)*, τ. 8, τχ. 7, σσ. 6286–6301, 2015, doi: 10.3390/en8076286.
- [12] M. Zuteck, ‘Adaptive Blade Concept Assessment: Curved Planform Induced Twist Investigation’, 2002.
- [13] V. Fedorov, ‘General rights Bend-Twist Coupling Effects in Wind Turbine Blades’, 2025.
- [14] D. W. MacPhee και A. Beyene, ‘Performance analysis of a small wind turbine equipped with flexible blades’, *Renew Energy*, τ. 132, σσ. 497–508, Μαρτίου 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.08.014.
- [15] X. Zhu, J. Chen, X. Shen, και Z. Du, ‘Impact of Blade Flexibility on Wind Turbine Loads and Pitch Settings’, *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, τ. 141, τχ. 4, Αυγούστου 2019, doi: 10.1115/1.4042315.
- [16] V. Cognet, S. Courrech du Pont, και B. Thiria, ‘Material optimization of flexible blades for wind turbines’, *Renew Energy*, τ. 160, σσ. 1373–1384, Νοεμβρίου 2020, doi: 10.1016.
- [17] X. Zhao, W. Jiang, Z. Liang, και Y. Zhao, ‘Passive load reduction performance of bend-twist coupling in large flexible wind turbine blades’, *Compos Struct*, τ. 371, Νοεμβρίου 2025, doi: 10.1016/j.compstruct.2025.119421.
- [18] W. Ostachowicz, M. McGugan, J.-U. Schröder-Hinrichs, και M. Luczak, ‘MARE-WINT’.
- [19] M. N. Kaya, F. Kose, D. Ingham, L. Ma, και M. Pourkashanian, ‘Aerodynamic performance of a horizontal axis wind turbine with forward and backward swept blades’, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, τ. 176, σσ. 166–173, Μαΐου 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.03.023.
- [20] P. S. Veers κ.ά., ‘Trends in the design, manufacture and evaluation of wind turbine blades’, 2003, *John Wiley and Sons Ltd*. doi: 10.1002/we.90.
- [21] K. & Carver, T. Manager, και T. Ashwill, ‘SANDIA REPORT Sweep-Twist Adaptive Rotor Blade: Final Project Report’, 2010. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <http://www.ntis.gov/help/ordermethods.asp?loc=7-4-0#online>

- [22] S. Larwood, C. P. Van Dam, και D. Schow, ‘Design studies of swept wind turbine blades’, *Renew Energy*, τ. 71, σσ. 563–571, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.05.050.
- [23] M. Capuzzi, A. Pirrera, και P. M. Weaver, ‘Structural design of a novel aeroelastically tailored wind turbine blade’, *Thin-Walled Structures*, τ. 95, σσ. 7–15, Ιουνίου 2015, doi: 10.1016/j.tws.2015.06.006.
- [24] X. Shen, J. G. Chen, X. C. Zhu, P. Y. Liu, και Z. H. Du, ‘Multi-objective optimization of wind turbine blades using lifting surface method’, *Energy*, τ. 90, σσ. 1111–1121, Οκτωβρίου 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.06.062.
- [25] M. G. Khalafallah, A. M. Ahmed, και M. K. Emam, ‘CFD study of some factors affecting performance of HAWT with swept blades’, *International Journal of Sustainable Energy*, τ. 36, τχ. 5, σσ. 489–501, Μαΐου 2017, doi: 10.1080/14786451.2015.1053394.
- [26] M. H. A. Madsen, F. Zahle, S. G. Horcas, T. K. Barlas, και N. N. Sørensen, ‘CFD-based curved tip shape design for wind turbine blades’, *Wind Energy Science*, τ. 7, τχ. 4, σσ. 1471–1501, Ιουλίου 2022, doi: 10.5194/wes-7-1471-2022.
- [27] T. Barlas κ.ά., ‘Wind tunnel testing of a swept tip shape and comparison with multi-fidelity aerodynamic simulations’, *Wind Energy Science*, τ. 6, τχ. 5, σσ. 1311–1324, Οκτωβρίου 2021, doi: 10.5194/wes-6-1311-2021.
- [28] T. Barlas, G. R. Pirrung, N. Ramos-García, S. González Horcas, A. Li, και H. A. Madsen, ‘Atmospheric rotating rig testing of a swept blade tip and comparison with multi-fidelity aeroelastic simulations’, *Wind Energy Science*, τ. 7, τχ. 5, σσ. 1957–1973, Οκτωβρίου 2022, doi: 10.5194/wes-7-1957-2022.
- [29] J. Roadman, M. Murphy, και J. Van Dam, ‘Power Performance Test Report for the Viryd CS8 Wind Turbine’, 2012. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <http://www.osti.gov/bridge>
- [30] J. Roadman, M. Murphy, και J. Van Dam, ‘Safety and Function Test Report for the Viryd CS8 Wind Turbine’, 2013. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: www.nrel.gov/publications.
- [31] J. Roadman, M. Murphy, και J. Van Dam, ‘Duration Test Report for the Viryd CS8 Wind Turbine’, 2006. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: www.nrel.gov/publications.

- [32] Q. Wang, C. Hu, D. Zhang, G. Chen, και F. Wang, ‘Study on geometrical adaptive-ness of pre-bend and swept coupled blades’, *Heliyon*, τ. 8, τχ. 11, Νοεμβρίου 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11809.
- [33] E. Fritz, K. Boorsma, και A. Herrig, ‘Design of an aeroelastically tailored wind turbine blade tip for field 1 experiments 2 A R T I C L E I N F O’. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://ssrn.com/abstract=4916275>
- [34] E. Fritz, K. Boorsma, και C. Ferreira, ‘Experimental analysis of a horizontal axis wind turbine with swept blades using PIV data’, 29 Ιανουάριος 2024. doi: 10.5194/wes-2024-11.
- [35] E. Fritz, K. Boorsma, και C. Ferreira, ‘Validation of a BEM correction model for swept blades using experimental data’, στο *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1742-6596/2767/2/022035.
- [36] L. Ma, Y. Li, L. Zhou, H. Guo, X. Shen, και Z. Du, ‘Load reduction characteristics of swept blade for 15 MW wind turbine’, *Front Energy Res*, τ. 13, Μαΐου 2025, doi: 10.3389/fenrg.2025.1591837.