

**ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Ευστάθιος Ε. Θεοτόκογλου

Καθηγητής

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών Ε.Μ.Π.

stathis@central.ntua.gr

Γεώργιος Μπαλόκας

Πολιτικός Μηχανικός MSc

ELAN-AUSY GmbH

Αμβούργο, Γερμανία

Georgios.Balokas@elan-ausy.com

Ευγενία Κ. Σαββάκη

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., MSc

eugin@windowslive.com

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η συμπεριφορά του εσωτερικού μηχανισμού στηρίξεως πτερυγίου ανεμογεννήτριας σε λυγισμό λόγω κάμψης. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η εκδήλωση τοπικού λυγισμού στο μηχανισμό είναι εξέχουσα μορφή αστοχίας, που μπορεί να επιδράσει καθοριστικά στην καθολική αστοχία του πτερυγίου. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτει μια ολοκληρωμένη εικόνα όχι μόνο για το φορτίο λυγισμού, αλλά και για τη μεταλυγισμική συμπεριφορά και αντοχή των μοντέλων. Καθίσταται έτσι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση της απόκρισης των διαφορετικών ινοπλισμένων σύνθετων υλικών, που χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό προσομοίωμα. Τέλος, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα πάνω στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του μηχανισμού, καθώς προκύπτουν σημαντικά πλεονεκτήματα από τον συνδυασμό διαφορετικών ινοπλισμένων πολυμερών σε υβριδικά μοντέλα, αλλά και από την χρησιμοποίηση ινών αραμιδίου.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

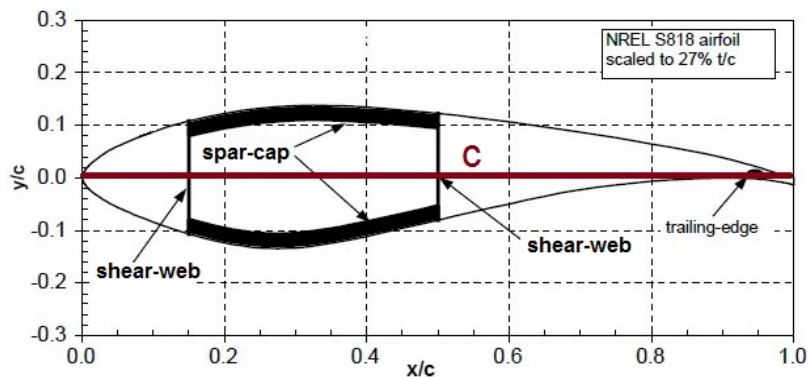
Τα τελευταία χρόνια, η αιολική ενέργεια σημειώνει τον μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης, συγκριτικά με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [1]. Έτσι, οι ανεμογεννήτριες, συγκεντρώνουν έντονο ενδιαφέρον, τόσο σε κατασκευαστικό, όσο και σε ερευνητικό επίπεδο. Η απαίτηση για βελτιστοποίηση της απόδοσής τους οδηγεί σε ανεμογεννήτριες

σημαντικά μεγαλύτερης ισχύος, με πτερύγια ολοένα και μεγαλύτερου μήκους και με καινοτόμα χαρακτηριστικά όσον αφορά τη γεωμετρία και τις ιδιότητες των υλικών τους. Το πτερύγιο είναι ουσιαστικά ένας πρόβολος, που στηρίζεται στην περιστρεφόμενη πλήμνη (hub) της ανεμογεννήτριας, με βασικά κριτήρια σχεδιασμού την υψηλή δυσκαμψία, το χαμηλό βάρος και το αεροδυναμικό σχήμα. Τα χαρακτηριστικά αυτά παρέχονται από ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά, που τοποθετούνται σε πολυστρωματικές και sandwich δομές τόσο στο εξωτερικό περίβλημα του πτερυγίου, όσο και στο μηχανισμό που του παρέχει την στήριξη εσωτερικά, διασφαλίζοντάς του την απαιτούμενη αντοχή και δυσκαμψία. Στην παρούσα εργασία, μελετάται ο μηχανισμός αυτός, μέσω προσομοίωσης σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, με παράμετρο ανάλυσης τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.1. Γεωμετρικό μοντέλο

Δύο είναι οι βασικοί τύποι διαμόρφωσης της εσωτερικής γεωμετρίας του πτερυγίου. Στην πρώτη περίπτωση, δύο διακριτοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας εκτείνονται κατά μήκος του πτερυγίου και παρέχουν την εσωτερική του στήριξη. Στη δεύτερη περίπτωση, που αποτελεί και την εξεταζόμενη, η εσωτερική στήριξη παρέχεται από μια ενιαία κιβωτιοειδή κατασκευή κοίλης διατομής (one-piece construction), που εκτίνεται σχεδόν σε όλο το μήκος του πτερυγίου και ονομάζεται μηχανισμός στήριξης. Το εφελκύμενο και θλιβόμενο πέλμα της δομής συγκολλούνται στο προσήνεμο και υπήνεμο εξωτερικό κέλυφος αντίστοιχα και ονομάζονται spar-caps, ενώ συνδέονται μεταξύ τους με τους ιστούς διάτμησης, τα shear-webs, που τοποθετούνται κάθετα στη διατομή (Σχήμα 1).



Σχ. 1: Τομή πτερυγίου στην περίπτωση της one-piece construction [2]

Ο μηχανισμός στήριξης παρέχει την απαιτούμενη αντοχή και δυσκαμψία στο εξωτερικό περίβλημα του πτερυγίου, τοπικά και καθολικά. Γι' αυτόν το λόγο, ο μηχανισμός επιλέχθηκε να μελετηθεί μεμονωμένα, αφού παραμορφώνεται πανομοιότυπα με το εξωτερικό κέλυφος, ενώ η αυξημένη λυγηρότητα των τοιχωμάτων του, τον καθιστούν επιρρεπή στην εκδήλωση φαινομένων τοπικού λυγισμού. Πειραματικά δεδομένα, άλλωστε, αποδεικνύουν ότι ο τοπικός λυγισμός είναι κυρίαρχη μορφή αστοχίας, που μπορεί να επιδράσει καθοριστικά στην ολοκληρωτική αστοχία του πτερυγίου [3, 4].

Μοντέλο της έρευνας αποτέλεσε ο μηχανισμός πτερυγίου ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, ονομαστικής ισχύος 1MW, με πυλώνα ύψους 64,14m και ρότορα διαμέτρου

63,04m. Τα πτερύγια χωρίζονται σε τρία τμήματα, ανάλογα με την παραμόρφωση που τους προκαλούν τα επιβαλλόμενα φορτία [2]. Στην περίπτωση μας, το τμήμα βάσης (root segment) έχει μήκος 2,10m, το τμήμα μετάβασης (transition segment) 5,40m και το κυρίως τμήμα (box girder segment) 22,50m, το οποίο και ταυτίζεται με το μήκος του υπό μελέτη μηχανισμού στηρίξεως [5].

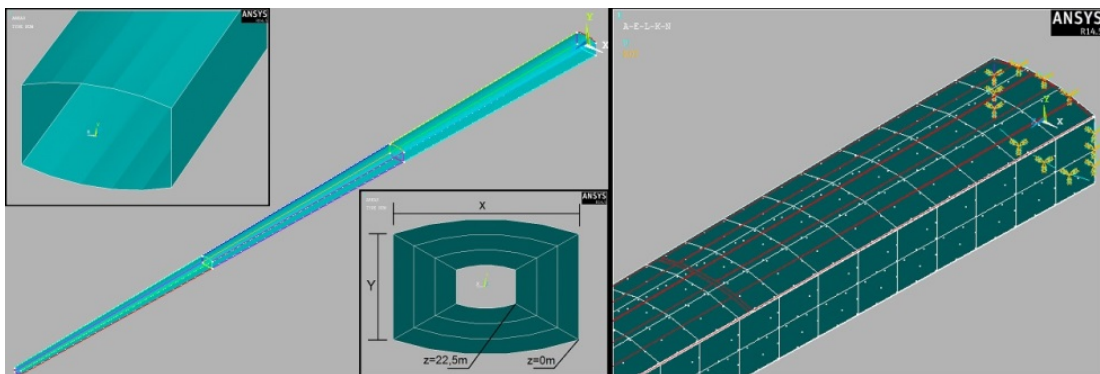
Για την ανάλυση, κατασκευάστηκε αριθμητικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων μέσω του προγράμματος ANSYS 14.5. Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους (shell281 στο ANSYS [6]), ενώ, μετά από μελέτη σύγκλισης της διακριτοποίησης, κρίθηκαν επαρκή στοιχεία κελύφους διαστάσεων πλευράς 300mm. Οι διαστάσεις και οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες του εξεταζόμενου πτερυγίου ανήκουν στο πρότυπο αεροτομών S818 [2].

Υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες 24 σημείων στην αρχή, στο τέλος και σε δύο ενδιάμεσες θέσεις του μηχανισμού και εν συνεχεία με δεδομένη τη γραμμική κατά μήκος μεταβολή των διαστάσεων κατασκευάστηκε το μοντέλο στο σύνολό του (Σχήμα 2). Έγινε η παραδοχή, που γίνεται και σε σχετικές μελέτες της βιβλιογραφίας [3], ότι υπάρχει διπλή συμμετρία της διατομής ως προς τους άξονες x και y.

3.2. Συνοριακές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης

Η κάμψη στην οποία υποβάλλεται το πτερύγιο, αλλά και ο μηχανισμός στηρίξεως, είναι δύο ειδών: η edge-wise κάμψη (γύρω από τον άξονα y – Σχήμα 2), που είναι κάθετη σε μία από τις δύο κόψεις του πτερυγίου (leading και trailing edge) και προκαλείται από τα φορτία βαρύτητας και η κάμψη flap-wise (γύρω από τον άξονα x), που προκαλείται από τα φορτία ανέμου και είναι κάθετη στη μεγάλη επιφάνεια του πτερυγίου, άρα και στα spar-caps.

Στην παρούσα μελέτη, η φόρτιση επιβλήθηκε μέσω ομοιόμορφης πίεσης, κάθετα κατανεμημένης στο άνω spar-cap (Σχήμα 2), ώστε να προκαλεί flap-wise κάμψη, επειδή αυτή θεωρείται ως η σημαντικότερη και που συνήθως οδηγεί σε αστοχία, σε τοπικό ή/και σε καθολικό επίπεδο [3]. Οι φορτίσεις είναι στατικές, επιβλήθηκαν με προσαυξητική βήμα – προς – βήμα διαδικασία (μέθοδος Newton – Raphson) και με διεύθυνση εφαρμογής τέτοια ώστε το άνω spar-cap να εφελκύεται (προσήνεμο) και το κάτω spar-cap να θλίβεται (υπήνεμο). Τέλος, στις τέσσερις πλευρές της διατομής του φορέα που βρίσκεται στη θέση $z=0$ δεσμεύτηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας κινήσεως (περιστροφή και μετατόπιση κατά τους άξονες x, y και z), ώστε οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος να αντιστοιχούν σε αυτές της πάκτωσης.

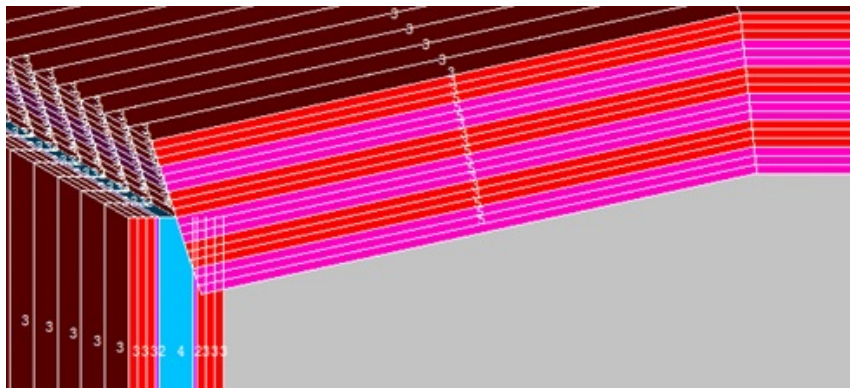


Σχ. 2: Εικόνες γεωμετρίας φορέα (αριστερά) και επιβολή φόρτισης (δεξιά)

3.3. Επιλογή ινοπλισμένων σύνθετων υλικών

Για την κατασκευή του εξωτερικού κελύφους, αλλά και του εσωτερικού μηχανισμού του πτερυγίου, χρησιμοποιούνται πολυμερή ενισχυμένα με ισχυρές ίνες, που λειτουργούν ως οπλισμός και συγκρατούνται από τη μήτρα (συνήθως από εποξειδική ρητίνη). Συγκεκριμένα, τα spar-caps είναι κατασκευασμένα από πολυστρωματική δομή, εναλλάσσοντας στρώματα ίσου πάχους (1,20 mm) από υλικό με ίνες σε τρεις διευθύνσεις (tri-axial), $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$, και από το υλικό με ίνες σε μία διεύθυνση (uni-axial). Οι στρώσεις με ίνες σε 0° χρησιμοποιούνται για αντοχή σε κάμψη, ενώ ίνες με γωνία $\pm 45^{\circ}$ παρέχουν στρεπτική δυσκαμψία και αντοχή σε λυγισμό της επιφάνειας που θλίβεται. Τα shear-webs έχουν δομή υλικού sandwich, με τρεις στρώσεις σύνθετου laminate υλικού με τις ίνες σε τρεις διευθύνσεις, $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$, πάχους 1,20mm, και μία στρώση υλικού με ίνες τυχούσης διεύθυνσης (random), πάχους 0,59mm, εκατέρωθεν του πυρήνα, που είναι κατασκευασμένος από ξύλο τύπου balsa (πάχους $0,005 \times$ μήκος χορδής c). Η εφαρμογή ενός υλικού πυρήνα αυξάνει τοπικά την αντοχή σε κάμψη, που απαιτείται για την αποφυγή εκδήλωσης λυγισμού, όταν το μέλος υποβάλλεται σε θλιπτικά ή διατμητικά φορτία. Η αλληλουχία των στρώσεων είναι εμφανής στο Σχήμα 3.

Στην παρούσα μελέτη, πραγματοποιήθηκε σύγκριση ανάμεσα σε τρία ινοπλισμένα πολυμερή: α) πολυμερές με ίνες γυαλιού (Glass Fiber Reinforced Polymer – GFRP μοντέλο), β) πολυμερές με ίνες άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Polymer – CFRP μοντέλο), γ) πολυμερές με ίνες αραμιδίου (Aramid Fiber Reinforced – AFRP μοντέλο), καθώς και συνδυασμός αυτών σε υβριδικά συστήματα. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε η ίδια μήτρα από εποξειδική ρητίνη, η ίδια διάταξη των υλικών στα spar-caps και τα shear-webs, που επίσης είχαν το ίδιο πάχος.



Σχ. 3: Μοντελοποίηση για την πολυστρωματική δομή του spar-cap και την sandwich δομή του shear-web

Τα ινοπλισμένα πολυμερή με ίνες γυαλιού είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σε πτερύγια ανεμογεννητριών. Ωστόσο, λίγες πληροφορίες είναι διαθέσιμες σχετικά με τη διαδικασία σχεδιασμού του πτερυγίου, αφού παραμένουν εμπιστευτικές για τους κατασκευαστές, με αποτέλεσμα να παρατηρείται έλλειμμα δεδομένων. Ως εκ τούτου, οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού GFRP, όπως και τα πάχη και η διάταξη των επιμέρους στρώσεων έχουν προέλθει από πειραματικά αποτελέσματα για τις δεδομένες κατευθύνσεις ινών και για τη διάταξη των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε μελέτη πτερυγίου ανεμογεννήτριας [5, 7]. Οι ιδιότητες του GFRP και του υλικού του πυρήνα δίνονται στον Πίνακα 1, μαζί με τον χαρακτηριστικό αριθμό κάθε στρώσης, όπου ν_{xy} είναι ο λόγος Poisson, u_f η κατ'όγκο και w_f η κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες και ρ η πυκνότητα.

Ιδιότητες	Uni-axial (#5)	Tri-axial (#3)	Random (#2)	Balsa (#4)	Gel (#1)	Epoxy adhesive
E_{xx} (GPa)	31,00	24,20	9,65	2,07	3,44	2,76
E_{yy} (GPa)	7,59	8,97	9,65	2,07	3,44	2,76
G_{xy} (GPa)	3,52	4,97	3,86	0,14	1,38	1,10
ν_{xy}	0,31	0,39	0,30	0,22	0,30	0,30
u_f	0,40	0,40	–	–	–	–
w_f	0,61	0,61	–	–	–	–
ρ (g/cm ³)	1,70	1,70	1,67	0,14	1,23	1,15

Πιν. 1: Ιδιότητες υλικού GFRP

Αυξημένη χρήση τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν και οι ίνες άνθρακα, αφού έχουν πολύ καλύτερη απόδοση από τις ίνες γυαλιού (υψηλή ακαμψία, υψηλή αντοχή και χαμηλή πυκνότητα), με μειονέκτημα όμως το αυξημένο κόστος σε σχέση με τις τελευταίες. Στην παρούσα μελέτη, οι ιδιότητες του CFRP υλικού (Πίνακας 2) υπολογίστηκαν εφαρμόζοντας τύπους σύνθετων υλικών [8] λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων παρόμοιων με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο GFRP. Ως δεδομένα θεωρήθηκαν οι ιδιότητες ινών άνθρακα τύπου AS4-D και μήτρας από εποξειδική ρητίνη, ίδιας με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στο GFRP υλικό.

Εκτός από τα ανθρακονήματα, και οι ίνες αραμιδίου παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα υαλονήματα, ενώ τα πολυμερή με ίνες αραμιδίου έχει αποδειχθεί ότι έχουν πολύ μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και καλύτερη αντοχή σε κόπωση από πολυμερή με ίνες γυαλιού [9]. Ωστόσο, παρά τα θετικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν και το εύρος των εφαρμογών τους (αεροναυπηγική, ναυτιλία, αυτοκινητοβιομηχανία), ακόμα δεν έχει ερευνηθεί η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους σε πτερυγία ανεμογεννήτριας. Έτσι, στην παρούσα εργασία διερευνάται η συμπεριφορά τους σε λυγισμό, συγκρινόμενα με τα πολυμερή με ίνες γυαλιού και άνθρακα. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν ίνες Kevlar 149, αφού έχουν πολύ υψηλότερο μέτρο Ελαστικότητας από άλλες κατηγορίες Kevlar, έχοντας ίδια περίπου πυκνότητα και διάμετρο, ενώ παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερη ευπάθεια στην υγρασία.. Οι μηχανικές ιδιότητες του μοντέλου AFPR προέκυψαν εφαρμόζοντας τους ίδιους τύπους που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο CFRP και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Ιδιότητες	Uni-axial CFRP	Uni-axial AFRP	Tri-axial CFRP	Tri-axial AFRP	Random CFRP	Random AFRP
E_{xx} (GPa)	146,00	113,00	65,00	50,87	62,47	48,88
E_{yy} (GPa)	18,53	15,24	22,50	18,28	62,47	48,88
G_{xy} (GPa)	9,41	7,46	13,46	10,72	24,19	18,63
ν_{xy}	0,27	0,37	0,29	0,34	0,29	0,31

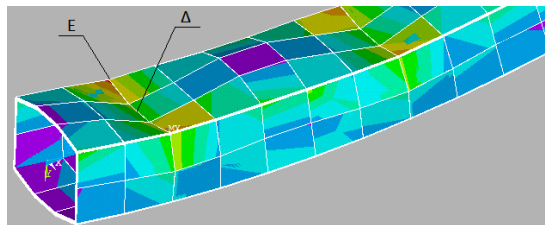
Πιν. 2: Ιδιότητες υλικών CFRP και AFRP

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

4.1. Σύγκριση γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

Συνολικά, μελετήθηκαν οχτώ μοντέλα, ενώ σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν και οι δύο αναλύσεις λυγισμού, γραμμική και μη γραμμική. Η γραμμική ανάλυση παρέχει γρήγορο έλεγχο για την σωστή κατασκευή του μοντέλου και της απόκρισής του, ενώ δίνει μία πρώτη εικόνα για την τάξη μεγέθους του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Καμία άλλη πληροφορία ωστόσο δεν προκύπτει ούτε για το μέγεθος των παραμορφώσεων, ούτε για τη μεταλυγισμική αντοχή του φορέα, σε περίπτωση που διαθέτει. Η τελική και πιο ρεαλιστική συμπεριφορά του φορέα προκύπτει από τη μη γραμμική ανάλυση λυγισμού. Από τις μη γραμμικές αναλύσεις λυγισμού εξήχθησαν οι δρόμοι ισοροπίας (καμπύλες φορτίου – μετατόπισης), με θεώρηση γεωμετρικής μη γραμμικότητας.

Παρατηρώντας την περιοχή εκδήλωσης τοπικού λυγισμού (Σχήμα 4), βλέπουμε ότι εντοπίζεται στο θλιβόμενο spar-cap, στο αρχικό τμήμα του φορέα, κοντά στην περιοχή της στήριξης, ενώ τοπικός διατρητικός λυγισμός εκδηλώνεται στην ίδια θέση στα shear-webs. Επιπλέον, ο τοπικός λυγισμός των shear-webs και του θλιβόμενου spar-cap προκαλεί την οβαλοποίηση της διατομής σε σχέση με την εικόνα που παρουσιάζει πριν το λυγισμό, φαινόμενο που ονομάζεται Brazier effect [10].

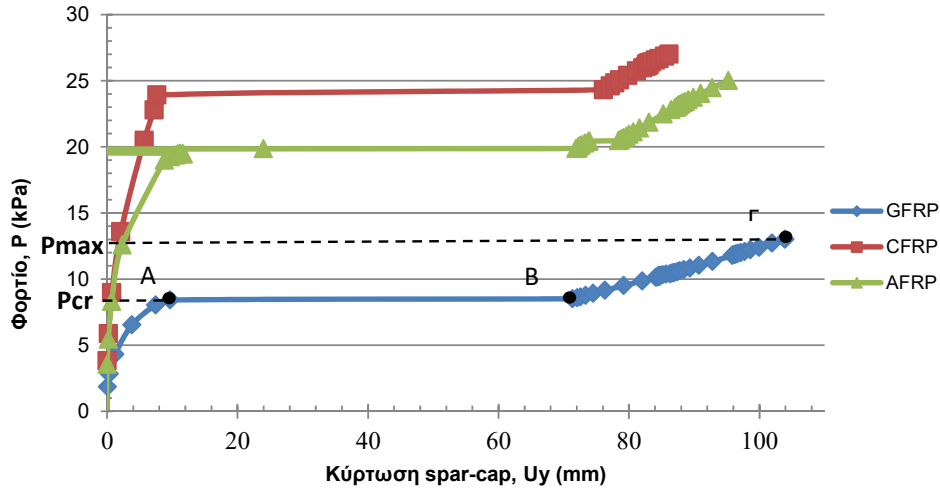


Σχ.4: Τοπικός λυγισμός θλιβόμενου spar-cap και κατανομή τάσεων von Mises

Η τελική εικόνα παραμόρφωσης παρουσιάζει μία σχετικά μεγάλη τοπική παραμόρφωση στο μέσον του θλιβόμενου πέλματος, που αντιστοιχεί στο σημείο Δ του Σχήματος 4, η σχέση της οποίας με την επιβαλλόμενη φόρτιση απεικονίζεται στο αντίστοιχο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης (Σχήμα 5). Για τον υπολογισμό της τοπικής κύρτωσης προς τα μέσα, η καθολική μετατόπιση κατά τη διεύθυνση y του σημείου E αφαιρέθηκε από την αντίστοιχη του σημείο Δ για κάθε βήμα φόρτισης. Η καμπύλη παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά (προλυγισμικό στάδιο) μέχρι το σημείο διακλάδωσης Α (για το GFRP μοντέλο), που αντιστοιχεί στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Κατόπιν, ο φορέας εμφανίζει έντονη μη γραμμική απόκριση, μέχρι το σημείο Γ (μεταλυγισμικό στάδιο). Η καμπύλη εμφανίζει σταθερή μεταλυγισμική συμπεριφορά μεταξύ των σημείων Α και Γ.

4.2. Σύγκριση υλικών GFRP – CFRP – AFRP

Η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης (Σχήμα 5) δείχνει ότι το μοντέλο από CFRP υλικό έχει υπερδιπλάσιο κρίσιμο φορτίο λυγισμού και σημαντικά μεγαλύτερη δυσκαμψία (προλυγισμικός κλάδος με μεγαλύτερη κλίση) συγκριτικά με το GFRP μοντέλο. Αυτό ήταν αναμενόμενο, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων που διαθέτουν οι ίνες άνθρακα. Επιπλέον, για ίδια επίπεδα φόρτισης, το GFRP μοντέλο παρουσιάζει δραματικά μεγαλύτερη παραμόρφωση από το CFRP. Το AFRP μοντέλο έχει επίσης σημαντικά μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού, αλλά και δυσκαμψία, συγκριτικά με το GFRP.



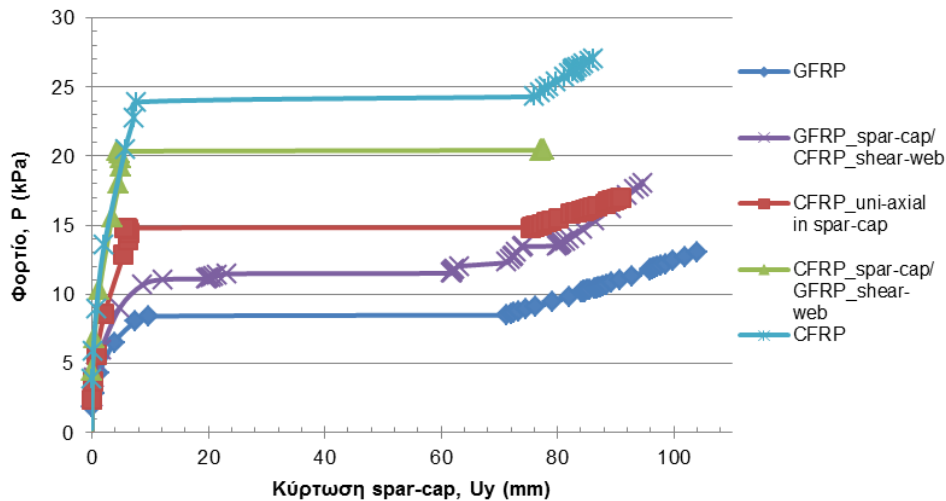
Σχ. 5: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (μετατόπιση κατά τη διεύθυνση y)

Ωστόσο το AFRP μοντέλο παρουσιάζει ασταθή μεταλυστική συμπεριφορά, όπως υποδεικνύεται και από τις τιμές της μετατόπισης, αμέσως μετά το σημείο διακλάδωσης. Αυτό αποδεικνύεται και από τις εικόνες του παραμορφωμένου μοντέλου σε διαφορετικά επίπεδα φόρτισης, όπου η περιοχή του μοντέλου που αρχικά παραμορφώθηκε διαφέρει από τη θέση της μέγιστης παραμόρφωσης στην ολοκλήρωση της φόρτισης, κάτι που δεν παρατηρήθηκε σε καμία άλλη από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

4.3. Σύγκριση υβριδικών μοντέλων υλικών GFRP και CFRP

Είδαμε παραπάνω ότι η χρήση ινών άνθρακα αυξάνει θεαματικά την τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού και περιορίζει σημαντικά τις παραμορφώσεις. Το αυξημένο κόστος των ανθρακονημάτων ωστόσο παραμένει εμπόδιο, οδηγώντας τη βιομηχανία αεροκλιτικής ενέργειας στη μελέτη υβριδικών μοντέλων, αφού έχει βρεθεί να παρουσιάζουν υψηλότερες αντοχές από πτερύγια που αποτελούνται αμιγώς από GFRP και παράλληλα να έχουν χαμηλότερο συνολικό κόστος από αυτά. Στην παρούσα μελέτη, εξετάζουμε: α) την αντικατάσταση του υλικού GFRP από CFRP στα shear-webs (μοντέλο GFRP_spar-cap/CFRP_shear-web), β) την αντικατάσταση του υλικού GFRP από CFRP στα spar-caps (μοντέλο CFRP_spar-cap/GFRP_shear-web) και γ) την αντικατάσταση του GFRP από CFRP στα spar-caps, αλλά μόνο στις στρώσεις με προσανατολισμό 0° , δηλαδή στο uni-axial υλικό (μοντέλο CFRP_uni-axial in spar-cap).

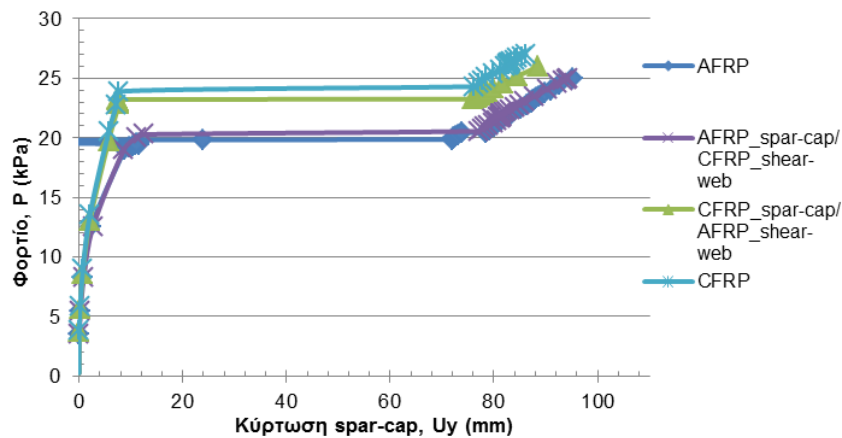
Από τις καμπύλες φορτίου–μετατόπισης (Σχήμα 6) προκύπτει ότι το μοντέλο GFRP_spar-cap/CFRP_shear-web παρουσιάζει ανάλογη απόκρισή με το GFRP μοντέλο, αλλά με ελαφρώς μεγαλύτερη δυσκαμψία και περιορισμό των παραμορφώσεων. Το CFRP_spar-cap/GFRP_shear-web μοντέλο έχει πανομοιότυπο προλυγισμό κλάδο με το CFRP μοντέλο, δε διαθέτει ωστόσο καθόλου μεταλυστική αντοχή, αφού δεν μπορεί να παραλάβει επιπλέον θλιπτικό φορτίο από το σημείο διακλάδωσης και μετά. Η απουσία μεταλυστικής αντοχής είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα και σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να αποφεύγεται. Ο βέλτιστος συνδυασμός των ινών φαίνεται να επιτυγχάνεται όταν οι ίνες άνθρακα τοποθετούνται μόνο στις uni-axial στρώσεις των spar-caps και τα υαλονήματα σε όλες τις υπόλοιπες στρώσεις. Αυτό το υβριδικό μοντέλο φαίνεται να συνδυάζει με ικανοποιητικό τρόπο φέρουσα ικανότητα και μεταλυστική αντοχή, συμπέρασμα που εξάγεται και σε σχετικές μελέτες της βιβλιογραφίας [12].



Σχ.6: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (μετατόπιση κατά τη διεύθυνση y)

4.4. Σύγκριση υβριδικών μοντέλων υλικών CFRP και AFRP

Τέλος, εξετάστηκε η απόκριση υβριδικών μοντέλων, από ίνες άνθρακα και αραμιδίου. Μελετήθηκαν οι εξής περιπτώσεις: α) η αντικατάσταση του υλικού CFRP από AFRP στα spar-caps (μοντέλο AFRP_spar-cap/CFRP_shear-web) και β) η αντικατάσταση του υλικού CFRP από AFRP στα shear-webs (μοντέλο CFRP_spar-cap/AFRP_shear-web). Το AFRP_spar-cap/CFRP_shear-web μοντέλο έχει την ίδια καμπύλη με το AFRP μοντέλο (Σχήμα 7), χωρίς ωστόσο την ασταθή μεταλυσμική συμπεριφορά, που το τελευταίο επέδειξε, κάτι το οποίο μπορούμε να το αποτιμήσουμε ως ιδιαίτερα θετικό. Το CFRP_spar-cap/AFRP_shear-web μοντέλο έχει ακριβώς την ίδια απόκριση, δυσκαμψία και μεταλυσμική αντοχή με το CFRP μοντέλο, αφού οι καμπύλες τους είναι πανομοιότυπες, κάτι που αξιολογείται ιδιαίτερα σημαντικό. Επίσης, οι εικόνες των παραμορφωμένων μοντέλων στην ολοκλήρωση της φόρτισης διαφέρουν ελάχιστα.



Σχ. 7: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (μετατόπιση κατά τη διεύθυνση y)

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα από τις μη γραμμικές αναλύσεις λυγισμού είναι επαρκή και σύμφωνα με σχετική μελέτη της βιβλιογραφίας [3]. Τουναντίον, η γραμμική ανάλυση αποδείχτηκε εξαιρετικά συντηρητική, αφού οι τιμές των κρίσιμων φορτίων λυγισμού ήταν υπερεκτιμημένες σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Επιβεβαιώνεται έτσι ότι ο τύπος της ανάλυσης που διεξάγεται έχει καθοριστική σημασία στον προσδιορισμό της πραγματικής συμπεριφοράς του μοντέλου, καθώς και η αναγκαιότητα διεξαγωγής μη γραμμικής ανάλυσης, παρά το αυξημένο υπολογιστικό κόστος που αυτή συνεπάγεται, σε περιπτώσεις όπου, όπως η εξεταζόμενη, οι αλλαγές στη γεωμετρία του φορέα, λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων, επηρεάζουν αισθητά τη σχέση φορτίου – μετατόπισης.

Από την σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των μοντέλων με υλικό GFRP, CFRP και AFRP, προκύπτει ότι το CFRP μοντέλο έχει εξαιρετικά μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία από το GFRP μοντέλο, ενώ οι παραμορφώσεις περιορίζονται σημαντικά για ίδια επίπεδα φόρτισης. Αναλόγως, το AFRP μοντέλο παρουσίασε υψηλή δυσκαμψία και κρίσιμο φορτίο λυγισμού, η ασταθής ωστόσο μεταλυγισμική συμπεριφορά που επέδειξε αποτιμάται αρνητικά. Βέβαια, η ασταθής αυτή συμπεριφορά του αραμιδίου είδαμε να εξαλείφεται όταν χρησιμοποιήθηκε από κοινού με τις ίνες άνθρακα σε υβριδικά μοντέλα. Αυτό αποτελεί και ισχυρή προτροπή περαιτέρω διερεύνησης της δυνατότητας χρήσης ινών Kevlar σε εφαρμογές ανεμογεννητριών, αν όχι αυτοτελώς, σίγουρα σε υβριδικά μοντέλα. Είναι εξαιρετικού ενδιαφέροντος το συμπέρασμα ότι αν έχουμε CFRP υλικό στα spar-caps, αλλά στα shear-webs αντί αυτού χρησιμοποιηθεί AFRP υλικό, μπορούμε να πετύχουμε ένα φορέα με την ίδια φέρουσα ικανότητα και απόκριση σε λυγισμό, αλλά πολύ οικονομικότερο, αφού οι ίνες Kevlar 149 έχουν μικρότερο κόστος και ελαφρώς μικρότερη πυκνότητα από τις ίνες άνθρακα.

Συνολικά, η παρούσα μελέτη δίνει μια σαφή εικόνα της αντοχής λυγισμού και της μεταλυγισμικής συμπεριφοράς του πτερυγίου και του πώς αυτή επηρεάζεται με την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Παρ' όλα αυτά, το υπολογιστικό προσομοίωμα μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω (πιο ρεαλιστική διαμόρφωση, χωρίς παραδοχή διπλής συμμετρίας κτλ). Προτείνεται επίσης η εξέταση με ταυτόχρονη θεώρηση μη γραμμικοτήτων γεωμετρίας και υλικού, με δοκιμή διάφορων μοντέλων πλαστικότητας των σύνθετων ινοπλισμένων πολυμερών ή/και υπόθεση ύπαρξης ατελειών. Επιπρόσθετα, τα σημαντικά πλεονεκτήματα που φάνηκε να προκύπτουν από τη χρήση ινών αραμιδίου θα πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω, με διερεύνηση της απόκρισης τους και σε πειραματικά μοντέλα.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2015 Global Status Report, Paris, France.
- [2] Griffin D.A., WindPact Turbine Design Scaling Studies Technical Area 1 – Composite Blades for 80- to 120-Meter Rotor, NREL, Washington, 2001.
- [3] Sorensen B.F, Jorgensen E., Debel C.P., Jensen F.M., Jensen H.M., Jacobsen T.K. and Halling K.M., Improved design of large wind turbine blade of fiber composites based on studies of scale effects (Phase 1)–Summary Report, Risø-R-1390(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2004.
- [4] Thomsen O.T., Sandwich materials for wind turbine blades – present and future”, Journal of Sandwich Structures and Materials, Vol.11, p.p. 7–27, 2009.

- [5] Theotokoglou E.E and Balokas G.A., Computational Analysis and Material Selection in Cross-Section of a Composite Wind Turbine Blade, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(2): 101-115, 2015.
- [6] ANSYS Engineering Analysis System. User's manual, Swanson Analysis System Inc., Houston, USA, 2007.
- [7] Grujicic M., Arakere G., Subramanian E., Sellappan V., Vallejo A., Ozen M., Structural-Response Analysis, Fatigue–Life Prediction, and Material Selection for 1MW Horizontal-Axis Wind Turbine Blades, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19: 790–801, 2009.
- [8] Zimmer J.E., Cost J.R., Determination of the Elastic Constants of a Unidirectional Fiber Composite using Ultrasonic Velocity Measurements, *J.Acoust. Soc. Am.* 47, 795, 1970.
- [9] Praveen Shaju C., Manikandan T., Sai Balaji S., Experimental Study on Environmental Exposure of Kevlar Epoxy Composites, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 3, Issue 10, 2013.
- [10] Zimmer J.E., Cost J.R., Determination of the Elastic Constants of a Unidirectional Fiber Composite using Ultrasonic Velocity Measurements, *J.Acoust. Soc. Am.* 47, 795, 1970.
- [11] Ashwill, *Materials and Innovations for Large Blade Structures: Research Opportunities in Wind Energy Technology*, 50th AIAA Structures, Structural Dynamics & Materials Conference Palm Springs, May, 2009.

**LINEAR AND NON LINEAR BUCKLING ANALYSIS OF WIND TURBINE
BLADE WITH INVESTIGATION OF DIFFERENT FIBER REINFORCED
POLYMERS**

Efstathios E. Theotokoglou

Professor

School of Applied Mathematical and Physical Sciences, National Technical University of
Athens

stathis@central.ntua.gr

Georgios Balokas

Structural Engineer MSc

ELAN-AUSY GmbH

Hamburg, Germany

Georgios.Balokas@elan-ausy.com

Evgenia K. Savvaki

Civil Engineer N.T.U.A., MSc

eugin@windowslive.com

SUMMARY

In this paper, the buckling behavior of the load-carrying support structure of a wind turbine blade is investigated. Experimental experience has shown that local buckling is a major failure mode that dominantly influences the total collapse of the blade. Results from parametric analyses offer a clear perspective about the buckling capacity but also about the post-buckling behavior and strength of the models. This makes it possible to compare the response of the different fiber reinforced polymers used in the computational model. Furthermore, this investigation leads to useful conclusions for the material design optimization of the load-carrying box girder, as significant advantages derive from the combination of different fiber-reinforced polymers in hybrid material structures, but also from kevlar-fiber blades.