

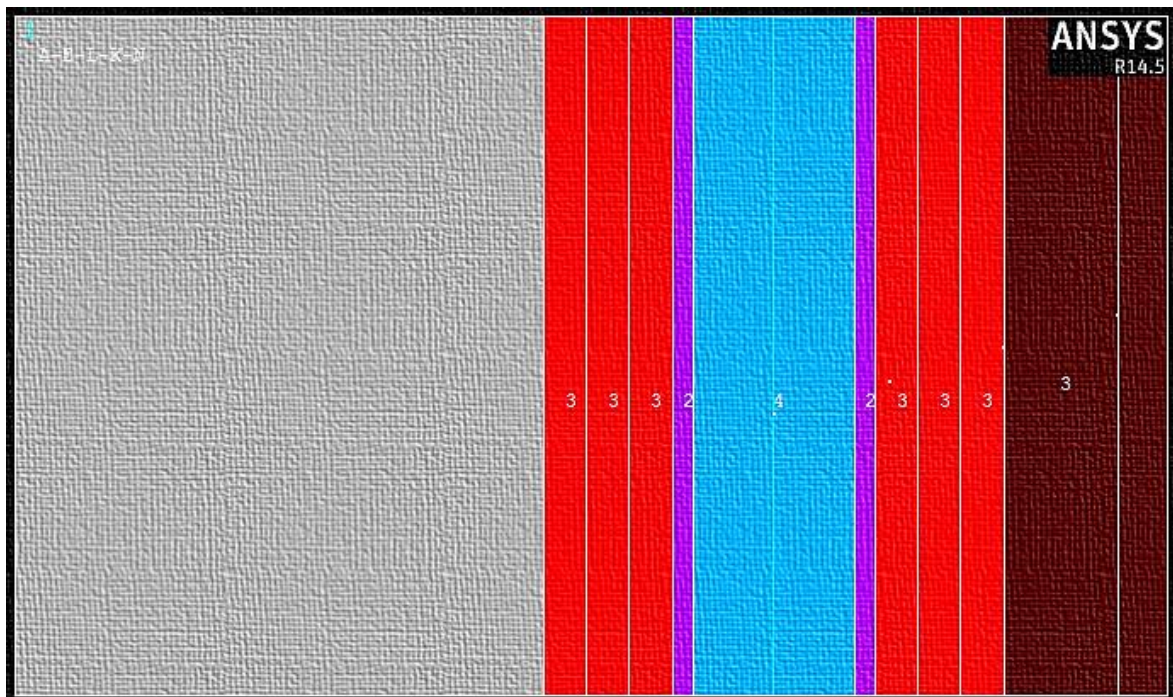


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών:
Εφαρμοσμένη Μηχανική

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διερεύνηση διαφορετικών ινοπλισμένων
σύνθετων υλικών πτερυγίου ανεμογεννήτριας και
συμπεριφορά του σε λυγισμό λόγω κάμψης



Ευγενία Κ. Σαββάκη

Επιβλέπων: Ευστάθιος Ε. Θεοτόκογλου

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Σαββάκη Ε.Κ.
Επιβλέπων: Θεοτόκογλου Ε.Ε.
Διερεύνηση διαφορετικών ινοπλισμένων σύνθετων υλικών πτερυγίου ανεμογεννήτριας
και συμπεριφορά του σε λυγισμό λόγω κάμψης
Μεταπτυχιακή Εργασία
Δ.Π.Μ.Σ.: Εφαρμοσμένη Μηχανική, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.

Savvaki E.K.
Supervised by Theotokoglou E.E.
Numerical investigation of different fiber–reinforced composite materials for wind
turbine blades in buckling capacity due to flap-wise bending
MSc Dissertation
I.P.P.S.: Applied Mechanics, National Technical University of Athens, Greece, 2015.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	5
Ευχαριστίες	7
1 Εισαγωγικά στοιχεία	9
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	9
1.2 Αιολική ενέργεια	10
1.2.1 Γενικά	10
1.2.2 Η αιολική ενέργεια στην Ευρώπη και διεθνώς.....	11
1.2.3 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.....	13
1.3 Μια κριτική προσέγγιση.....	14
2 Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας.....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Τύποι ανεμογεννητριών.....	18
2.3 Δομικά μέλη ανεμογεννήτριας	21
2.4 Πτερύγιο ανεμογεννήτριας.....	23
2.4.1 Εξωτερική γεωμετρία πτερυγίου	23
2.4.2 Εσωτερική γεωμετρία πτερυγίου	25
3 Υλικά πτερυγίου	27
3.1 Εισαγωγή.....	27
3.2 Κατασκευαστικές απαιτήσεις και επιλογή υλικών	28
3.3 Ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά	31
3.3.1 Γενικά	31
3.3.2 Μόρφωση δομικών στοιχείων.....	32
3.3.3 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων.....	35
3.3.4 Μηχανισμοί αστοχίας – Έλεγχοι.....	37
3.4 Λειτουργίες των υλικών στην εσωτερική στήριξη πτερυγίου	38
4 Στοιχεία θεωρίας λυγισμού.....	41
4.1 Εισαγωγή.....	41
4.2 Γραμμική και μη γραμμική ανάλυση λυγισμού	42
4.3 Μη γραμμικότητα γεωμετρίας.....	45
4.4 Αλγόριθμοι επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων	48
4.4.1 Γενικά	48
4.4.2 Μέθοδος Newton – Raphson.....	48
4.4.3 Έρευνα γραμμής.....	51
5 Μοντελοποίηση και ανάλυση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	53
5.1 Εισαγωγή.....	53
5.2 Γεωμετρικό μοντέλο.....	54
5.3 Συνοριακές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης	60
5.4 Επιλογή ινοπλισμένων σύνθετων υλικών.....	63
5.4.1 Πολυμερές με ίνες γυαλιού (GFRP)	63
5.4.2 Πολυμερές με ίνες άνθρακα (CFRP).....	66
5.4.3 Πολυμερές με ίνες αραμιδίου (AFRP).....	69

6	Αποτελέσματα αναλύσεων	71
6.1	Αποτελέσματα ανάλυσης για το βασικό μοντέλο.....	71
6.2	Αποτελέσματα για διαφορετική διαμόρφωση διατομής μέλους.....	78
6.3	Αποτελέσματα για διαφορετικούς τρόπους εφαρμογής φόρτισης	81
6.4	Αποτελέσματα για διαφορετικά πολυμερή σύνθετα υλικά	84
6.4.1	Σύγκριση υλικών GFRP – CFRP – AFRP	84
6.4.2	Σύγκριση υβριδικών μοντέλων υλικών GFRP και CFRP	87
6.4.3	Σύγκριση υβριδικών μοντέλων υλικών CFRP και AFRP	91
6.4.4	Σύγκριση υβριδικών μοντέλων υλικών GFRP και AFRP	94
7	Συμπεράσματα	99
8	Βιβλιογραφία.....	103

**Διερεύνηση διαφορετικών ινοπλισμένων σύνθετων υλικών πτερυγίου
ανεμογεννήτριας και συμπεριφορά του σε λυγισμό λόγω κάμψης**

Περίληψη

Τα πτερύγια των σύγχρονων ανεμογεννητριών κατασκευάζονται με ολοένα και μεγαλύτερο μήκος, στην προσπάθεια αύξησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, που υπαγορεύεται από τις εντεινόμενες ενεργειακές ανάγκες και την εξάπλωση των ΑΠΕ. Η απαίτηση για αύξηση της απόδοσης, με ταυτόχρονη μείωση σε υλικά και συνολικό βάρος των πτερυγίων, άρα και σε κόστος, καλύπτεται από καινοτόμα σύνθετα υλικά, που χρησιμοποιούνται σε πολυστρωματικές και sandwich δομές στο εξωτερικό κέλυφος, αλλά και στο μηχανισμό που παρέχει στο πτερύγιο την στήριξη εσωτερικά, διασφαλίζοντας του την απαιτούμενη αντοχή και δυσκαμψία, σε τοπικό και καθολικό επίπεδο. Στην παρούσα εργασία μελετάται, μέσω της προσομοίωσης σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, ο μηχανισμός αυτός, στην περίπτωση που αποτελείται από ενιαία κιβωτιοειδή δομή κοίλης διατομής.

Μέσω της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε επιχειρήθηκε να διερευνηθεί η συμπεριφορά σε λυγισμό λόγω κάμψης του μηχανισμού εσωτερικής στηρίξεως όταν μεταβάλλεται: η γεωμετρία, ο τρόπος επιβολής φόρτισης που προκαλεί flap-wise κάμψη και τα ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά από τα οποία αποτελείται. Μελετήθηκαν συνολικά δεκαπέντε μοντέλα, όπου σε όλες τις περιπτώσεις πραγματοποιούνταν και οι δύο αναλύσεις λυγισμού, γραμμική και μη γραμμική. Μέσω της πρώτης γινόταν γρήγορος έλεγχος του μοντέλου και της απόκρισης του, ενώ σχηματιζόταν μία πρώτη εικόνα για την κατά προσέγγιση τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Η μη γραμμική ανάλυση ωστόσο δίνει αποτελέσματα πιο ρεαλιστικά και επιβάλλεται να διεξάγεται σε περιπτώσεις όπου, όπως η εξεταζόμενη, οι αλλαγές στη γεωμετρία, λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων επηρεάζουν αισθητά τη σχέση φορτίου – μετατόπισης (περίπτωση γεωμετρικής μη γραμμικότητας). Από τη μη γραμμική ανάλυση υπολογίστηκαν τα κρίσιμα φορτία λυγισμού, με πιο ασφαλείς τιμές, αφού από τη γραμμική ανάλυση υπερεκτιμώνται, και εξήχθησαν οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων σχηματίστηκε μια εποπτική εικόνα όχι μόνο για το φορτίο λυγισμού και το πώς αυτό επηρεάζεται όταν μεταβάλλονται οι παράμετροι που αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά και για τη μεταλυγισμική συμπεριφορά και αντοχή των μοντέλων. Κατέστη έτσι δυνατή και η συγκριτική αξιολόγηση της απόκρισης των διαφορετικών ινοπλισμένων σύνθετων υλικών, που χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό προσομοίωμα. Με βάση αυτή εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του μηχανισμού στηρίξεως, αφού προκύπτουν σημαντικά πλεονεκτήματα από τον συνδυασμό διαφορετικών ινοπλισμένων πολυμερών σε υβριδικά μοντέλα και την ευρύτερη χρήση τους σε σχέση με σήμερα, αλλά και η πρόκληση αξιοποίησης νέων υλικών με υψηλές μηχανικές ιδιότητες.

MSc Dissertation

**Numerical investigation of different fiber–reinforced composite materials
for wind turbine blades in buckling capacity due to flap-wise bending**

Abstract

Modern wind turbines blades become increasingly larger, in order to amplify the electrical power output, in order to fulfill the growing energy needs and the expansion of renewable energy sources. The demand for high performance, with a simultaneous reduction of the total weight of the blades (thus with a cost reduction), is covered by innovative polymer composite materials. These materials are used in laminates and sandwich structures for the outer aerodynamic shell, but also for the internal load–carrying structure, ensuring the required strength and stiffness of the blade, both locally and globally. In the present study, the support structure is investigated through finite element simulation, for the case of a hollow one–piece construction section (box girder).

Through parametric analyses we attempt to investigate the buckling behavior due to flap-wise bending of the load–carrying box girder, with respect to the following parameters: the geometry, the way of loading imposition and the fiber–reinforced composite material properties. Totally fifteen models were used and in all cases both linear and non-linear buckling analysis were performed. Linear analysis offers a quick check of the model and its response, while a rough value of the critical buckling load is estimated. However, nonlinear analysis leads to more realistic results and should always be performed in cases where changes in geometry due to large deformations significantly affect the relationship between the applied load and the displacement (geometrical non linearity). From the nonlinear analysis, the critical buckling loads are more precise (since the linear analysis proved to overestimate them) and the equilibrium paths were exported for all the cases considered.

This study offers a clear perspective about the buckling capacity and its sensitivity on the parameters mentioned above, but also about the postbuckling behavior and strength of the models. The results of this dissertation guide to useful conclusions for the structural design optimization of the load-carrying box girder, as significant advantages are derived from the combination of different fiber–reinforced polymers in hybrid material structures.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα, καθηγητή στο Ε. Μ.Π., κ. Ευστάθιο Θεοτόκογλου, για την συνεργασία και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται στον Γεώργιο Μπαλόκα, Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη συμβολή και βοήθεια του στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, τον σημαντικό χρόνο που αφιέρωσε στην παρακολούθηση της πορείας της εργασίας και τη διαρκή και υποδειγματική καθοδήγησή του σε όλα τα στάδιά της.

Τέλος οφείλω να ευχαριστήσω τους γονείς και τον αδερφό μου, για την στήριξη τους μέχρι σήμερα. Και τους φίλους μου, που βαδίζουμε μαζί αυτούς τους δύσκολους, αλλά ενδιαφέροντες καιρούς.

1 Εισαγωγικά στοιχεία

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Βρισκόμαστε σε μια περίοδο που οι ενεργειακές ανάγκες σε παγκόσμια κλίμακα διαρκώς αυξάνονται. Ταυτόχρονα οι υπό εξάντληση φυσικοί πόροι, που αδυνατούν να καλύψουν αυτήν την αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, σε συνδυασμό με το βάθεμα της οικολογικής κρίσης, φέρνουν emphaticά στο προσκήνιο τη λεγόμενη “πράσινη διέξοδο”. Η πράσινη οικονομία και η αειφόρος ανάπτυξη εμφανίζονται ως λύση, προάγοντας ένα μοντέλο που, σύμφωνα με τους υποστηρικτές του, θα ενσωματώνει τις βασικές αρχές της καπιταλιστικής οικονομίας και παράλληλα θα στηρίζεται στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και της περιβαλλοντικής καταστροφής, στην καλύτερη διαχείριση της ενέργειας και στην ευρεία χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ορίζονται οι ακόλουθες πηγές ενέργειας: αιολική, ηλιακή και υδροηλεκτρική ενέργεια, βιομάζα, γεωθερμία και ενέργεια της θάλασσας (παλίρροια, κύματα, θερμοκρασιακή διαφορά). Στην ουσία είναι οι πρώτες πηγές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, διακηρύσσονται όμως για πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του '50, συγκεντρώνουν κάποιο ενδιαφέρον μετά την πετρελαϊκή κρίση του '73, ενώ μόλις τις δύο τελευταίες δεκαετίες συντελούνται μεγάλα βήματα τόσο στο ποσοστό συμμετοχής τους στη συνολική παραγωγή ενέργειας, όσο και στις τεχνολογίες που αναπτύσσονται για την εκμετάλλευσή τους.

Το βασικό τους πλεονέκτημα εντοπίζεται στο ότι αποτελούν καθαρές μορφές ενέργειας, αφού δεν αποδεδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα, τοξικά ή ραδιενεργά απόβλητα, ενώ για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως συμβαίνει με τις συμβατικές πηγές ενέργειας (στερεά καύσιμα, πετρελαιοειδή, φυσικό αέριο). Τα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα των περισσότερων ανεπτυγμένων χωρών τις καθιστούν έτσι ιδιαίτερα ελκυστικές σε σχέση με την προστασία του περιβάλλοντος. Με τη διεύρυσή τους στην παραγωγή ενέργειας, και τη συνεπαγόμενη μείωση συμμετοχής των λοιπών πηγών παραγωγής, μπορούν να συμβάλουν σε καθοριστικό βαθμό στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Επιπρόσθετα, οι ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι είναι πρακτικά μη ποσοτικά περιορισμένοι πόροι που, σε αντίθεση με τους μη ανανεώσιμους, δύναται να χρησιμοποιηθούν και στο μέλλον, να έχουν δηλαδή αειφορική χρήση. Τη σημασία αυτού μπορεί να την αντιληφθεί κάποιος αν αναλογιστεί ότι η ηλεκτροδότηση της Ελλάδας βασίζεται κυρίως στο λιγνίτη, τα αποθέματα του οποίου προβλέπεται να εξαντληθούν το 2050, ξέχωρα απ' το γεγονός ότι η καύση του προκαλεί αυξημένες εκπομπές CO₂.

Στον αντίποδα των παραπάνω, εντοπίζονται μειονεκτήματα που παρουσιάζουν σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Έχουν συγκριτικά υψηλό κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας στο οποίο προστίθεται και το κόστος μεταφοράς, δεδομένου ότι οι περιοχές που ενδείκνυνται περισσότερο για την εκμετάλλευσή των ανανεώσιμων πηγών δεν συμπίπτουν συνήθως με τις περιοχές όπου σημειώνεται η μεγαλύτερη

κατανάλωση ενέργειας. Παρουσιάζουν μικρό συντελεστής απόδοσης, της τάξεως του 30% ή και λιγότερο, ενώ εγχύουν στοχαστικά, ανάλογα για παράδειγμα με την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου ή την ηλιοφάνεια. Αυτό τις καθιστά αυτόματα συμπληρωματικές μορφές ενέργειας, αφού –προς το παρόν τουλάχιστον– είναι αδύνατο να διασφαλίσουν αυτόνομα την αδιάλειπτη και ασφαλή παροχή ενέργειας και κατ' ανάγκη λειτουργούν παράλληλα και συνδυαστικά με άλλες μονάδες (μονάδες diesel, αεριοστρόβιλοι φυσικού αερίου), που μπορούν να ακολουθήσουν τις αυξομειώσεις στο φορτίο τους.

Όλα τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά των ΑΠΕ κάνουν τις δυνατότητες τους να διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με περιβαλλοντικούς, γεωγραφικούς και οικονομικούς παράγοντες. Έτσι βλέπουμε η Βρετανία να ανακοινώνει την διακοπή της κρατικής επιχορήγησης στα αιολικά πάρκα το 2016, την ίδια στιγμή που η Δανία στοχεύει το 2020 το 50% των ενεργειακών της αναγκών να καλύπτεται από ΑΠΕ και το 2050 να καταργήσει πλήρως τα ορυκτά καύσιμα, ενώ στην Ισλανδία το 85% του συνόλου της καταναλισκόμενης ενέργειας προέρχεται από υδροηλεκτρικές και γεωθερμικές πηγές.

1.2 Αιολική ενέργεια

1.2.1 Γενικά

Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που προμηθεύουν οι ΑΠΕ υπολογίζεται ότι προέρχεται από μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες, που μπορούμε να πούμε ότι παρουσιάζουν και τον καλύτερο συνδυασμό απόδοσης – κόστους. Παρ' όλα αυτά, με βάση και τα δεδομένα των σχετικών οργανισμών, η αιολική ενέργεια είναι αυτή που σημειώνει διεθνώς τον υψηλότερο ρυθμό ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια, ενώ τα συστήματα εκμετάλλευσής της, οι ανεμογεννήτριες, συγκροτούν έναν κλάδο που συγκεντρώνει ολοένα και εντονότερο ενδιαφέρον, κατασκευαστικό αλλά και ερευνητικό.

Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου αρχικά σε μηχανική, μέσω των πτερυγίων, και στη συνέχεια τη μηχανική σε ηλεκτρική, μέσω της γεννήτριας. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, όταν δεν καταναλώνεται απευθείας και εφόσον προέρχεται από μικρής κλίμακας και μη συνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο μονάδες, συνήθως αποθηκεύεται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Για μεγάλης κλίμακας μονάδες, ο πιο αποτελεσματικός τρόπος σύνδεσης των αιολικών πάρκων με το ηλεκτρικό δίκτυο είναι μέσω υδροηλεκτρικής μονάδας και ταμιευτήρων αντλησιοταμίευσης, που αποτελούν τα ονομαζόμενα υβριδικά συστήματα (αιολικό – υδροηλεκτρικό σύστημα). Μέσω της αντλησιοταμίευσης το πλεόνασμα αιολικής ενέργειας, που παράγεται κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης ρεύματος, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά νερού στον ταμιευτήρα του υδροηλεκτρικού, το οποίο θα παράγει ενέργεια όταν η ζήτηση ξεπεράσει την προσφορά ή προκειμένου να καλυφθούν οι αυξομειώσεις της παραγόμενης ισχύος, αφού μικρές μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου μπορεί να επιδράσουν σημαντικά στην ενεργειακή παραγωγή.

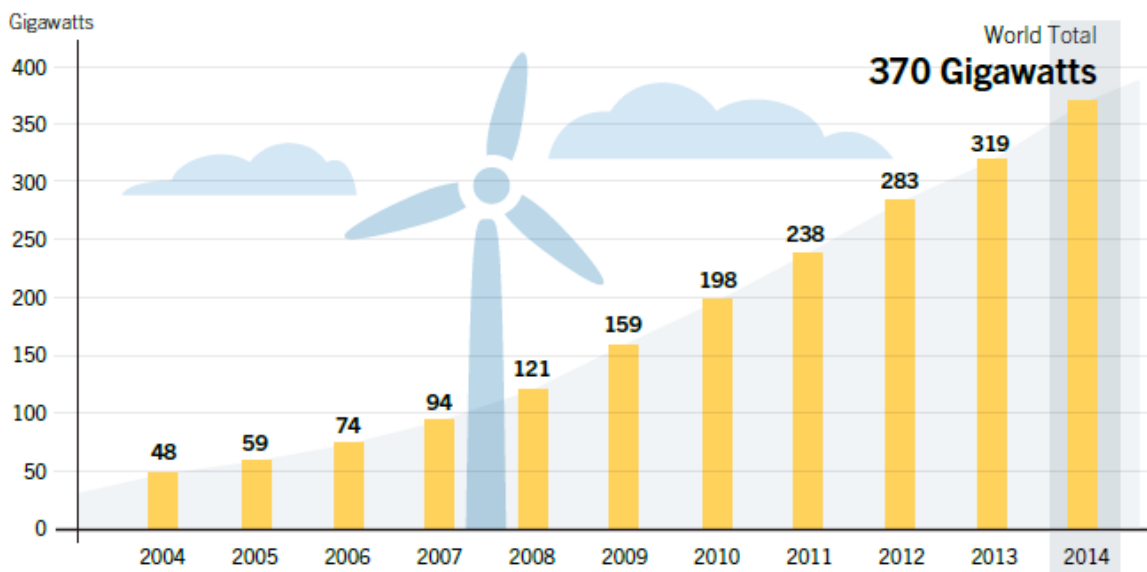
Πέρα από τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ, που αναφέρθηκαν γενικά παραπάνω, το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης των αιολικών πάρκων είναι χαμηλότερο από των

φωτοβολταϊκών (έχουν πενταπλάσιο κόστος παραγωγής ενέργειας) και έχει συμπιεστεί περαιτέρω τα τελευταία χρόνια λόγω της διαρκούς εξέλιξης της τεχνολογίας και του ανταγωνισμού μεταξύ των κατασκευαστών, σε επίπεδο μάλιστα που να είναι συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών πηγών. Αυτός είναι και ο βασικός παράγοντας που καθιστά πλέον την αιολική ενέργεια σοβαρό ανταγωνιστή της πυρηνικής και της ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Ταυτόχρονα το κόστος λειτουργίας και συντήρησής τους είναι σχετικά χαμηλό. Επιπλέον, η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή, εγκατάσταση και λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας μέσης ισχύος είναι πολύ μικρή και υπολογίζεται ότι αποσβένεται σε διάστημα περίπου τριών μηνών. Αντιθέτως, υπάρχουν μελέτες που υποστηρίζουν ότι σε ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του ένα φωτοβολταϊκό παράγει συνολικά λιγότερη ενέργεια από αυτήν που καταναλώθηκε για την κατασκευή του. Ακόμα, οι ανεμογεννήτριες έχουν μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης, δεν προκαλούν οπτική και ακουστική όχληση και είναι πιο ήπιες για το περιβάλλον. Για εγκατάσταση ίσης ποσότητας ισχύος, απαιτούν μικρότερη έκταση εγκατάστασης σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά, αφήνοντας ταυτόχρονα το μεγαλύτερο ποσοστό της έκτασης διαθέσιμο για άλλες χρήσεις του εδάφους, ενώ μετά την αποσυναρμολόγηση μιας ανεμογεννήτριας τα περισσότερα υλικά είναι επαναχρησιμοποιήσιμα ή ανακυκλώσιμα. Τέλος, ως ραγδαία εξελισσόμενος τεχνολογικός κλάδος, συμβάλλουν στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.

Σε σχέση με το χρηματοδοτικό καθεστώς, οι επενδύσεις στην αιολική ενέργεια, αλλά και στις υπόλοιπες ΑΠΕ, πλαισιώνονται από δύο οικονομικά μοντέλα, το σύστημα εγγυημένων τιμών (fixed price) και το σύστημα σταθερής ποιότητας (fixed quantity) [7]. Το πρώτο μοντέλο, που είναι και αυτό που απαντάται κατά κόρον, αποτελεί το ονομαζόμενο μοντέλο “feed-in tariff”, όπου ο διαχειριστής του δικτύου εγγυάται μια σταθερή τιμή αγοράς της παραγόμενης ενέργειας στον επενδυτή, ανεξάρτητα από την τελική απόδοση της εγκατάστασης. Αυτό συνεπάγεται μηδενικό επενδυτικό ρίσκο, αφού ο επενδυτής έχει εξασφαλισμένο ένα ελάχιστο κέρδος από την στιγμή που δεν υπάρχει ρήτρα εξοικονόμησης καυσίμου. Το δεύτερο είναι το λεγόμενο σύστημα “πράσινων πιστοποιητικών”, όπου ορίζεται ένα ποσοστό συμμετοχής της αιολικής ενέργειας στη συνολική παραγωγή ηλεκτρισμού και τα πιστοποιητικά εκδίδονται για κάθε μονάδα ενέργειας που παράγεται.

1.2.2 Η αιολική ενέργεια στην Ευρώπη και διεθνώς

Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στο τέλος του 2014, όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 1.1, ανέρχεται σε 370GW, παρουσιάζοντας αύξηση 49% σε σχέση με το 2013. Είναι υπερδιπλάσια από την ηλιακή, που υπολογίζεται σε 177GW για το ίδιο έτος και περίπου η μισή της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος από ΑΠΕ (εξαιρουμένης της υδροηλεκτρικής) που ήταν 657GW [26]. Η Κίνα εγκατέστησε σχεδόν τη μισή από την αιολική ισχύ που προστέθηκε παγκοσμίως το 2014 και ακολούθησαν, με μεγάλη όμως διαφορά, η Γερμανία και οι ΗΠΑ, ενώ ενδεικτικό είναι ότι στις ΗΠΑ εκτιμάται ότι το 2030 τουλάχιστον το 20% των ενεργειακών της αναγκών θα καλύπτεται αποκλειστικά από τα αιολικά πάρκα.

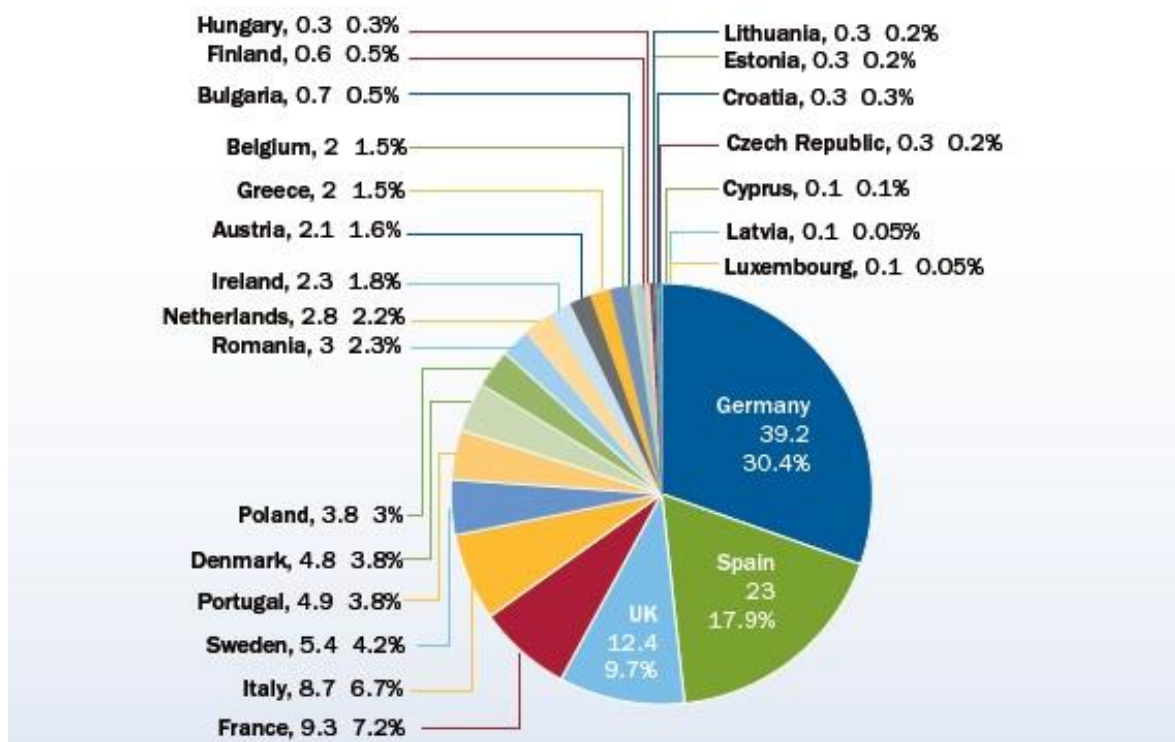


Σχήμα 1.1: Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στη δεκαετία 2004–2014 [26]

Η ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική που ακολουθείται τα τελευταία χρόνια πλαισιώνεται από την κωδικοποιημένα γνωστή και ως η «Πολιτική 20–20–20». Συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δεσμευτεί ότι το 2020 θα έχει μειώσει κατά 20% τις εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου, θα έχει βελτιώσει την ενεργειακή αποδοτικότητα κατά 20% και θα έχει αυξήσει τη συμμετοχή των ΑΠΕ στο 20% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας, που εξειδικεύεται σε 40% ποσοστό συμμετοχής τους στην ηλεκτροπαραγωγή και σε συμμετοχή των βιοκαυσίμων στις μεταφορές στο 10%. Η στροφή στην αιολική ενέργεια αποτελεί κεντρικό πυλώνα της πολιτικής αυτής, αφού και σε πανευρωπαϊκό επίπεδο αποτελεί την πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, με σημαντική αύξηση κρατικών και ιδιωτικών επενδύσεων στην εγκατάσταση και εκμετάλλευση αιολικών πάρκων.

Η επί του παρόντος εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη είναι 134GW, από τα οποία τα 128,8GW προέρχονται από χώρες της Ε.Ε., καλύπτοντας περίπου το 8% των ευρωπαϊκών αναγκών ηλεκτρισμού [30]. Από αυτά, τα 120,6GW είναι στην ξηρά (onshore) και μόλις 8GW αντιστοιχούν σε υπεράκτια αιολικά πάρκα (offshore). Στη συνολική αιολική ισχύ, η Γερμανία κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο, με 39,2GW, ακολουθεί η Ισπανία, με 23GW και η Βρετανία, με 12,4GW (Σχήμα 1.2).

Το 2014 εγκαταστάθηκαν συνολικά 26,9GW από ΑΠΕ, από τα οποία η αιολική ενέργεια έχει τη μερίδα του λέοντος με ποσοστό 43,7%, ήτοι 11,8GW (10,3GW onshore και 1,5GW offshore), με μικρή όμως αύξηση (3,8%) σε σχέση με το 2013. Τα αιολικά πάρκα που κατασκευάστηκαν το 2014 στην Ε.Ε. έχουν συνολική αξία που κυμαίνεται μεταξύ 13,1 και 18,7 δις €. Μεταξύ των κρατών – μελών, η Γερμανία, και εδώ, είχε το μεγαλύτερο ποσοστό, με εγκατάσταση 5.279,2MW αιολικής ισχύος, και ακολούθησαν η Βρετανία και η Σουηδία [30]. Τουναντίον, και σαν αποτέλεσμα των ενδοευρωπαϊκών αντιθέσεων που διαρκώς οξύνονται, χώρες όπως η Δανία, η Ισπανία και η Ιταλία, με μέχρι πρότινος ισχυρή αγορά σε σχετικές επενδύσεις, είδαν τους ρυθμούς εγκατάστασης αιολικών να σημειώνουν κατακόρυφη πτώση.

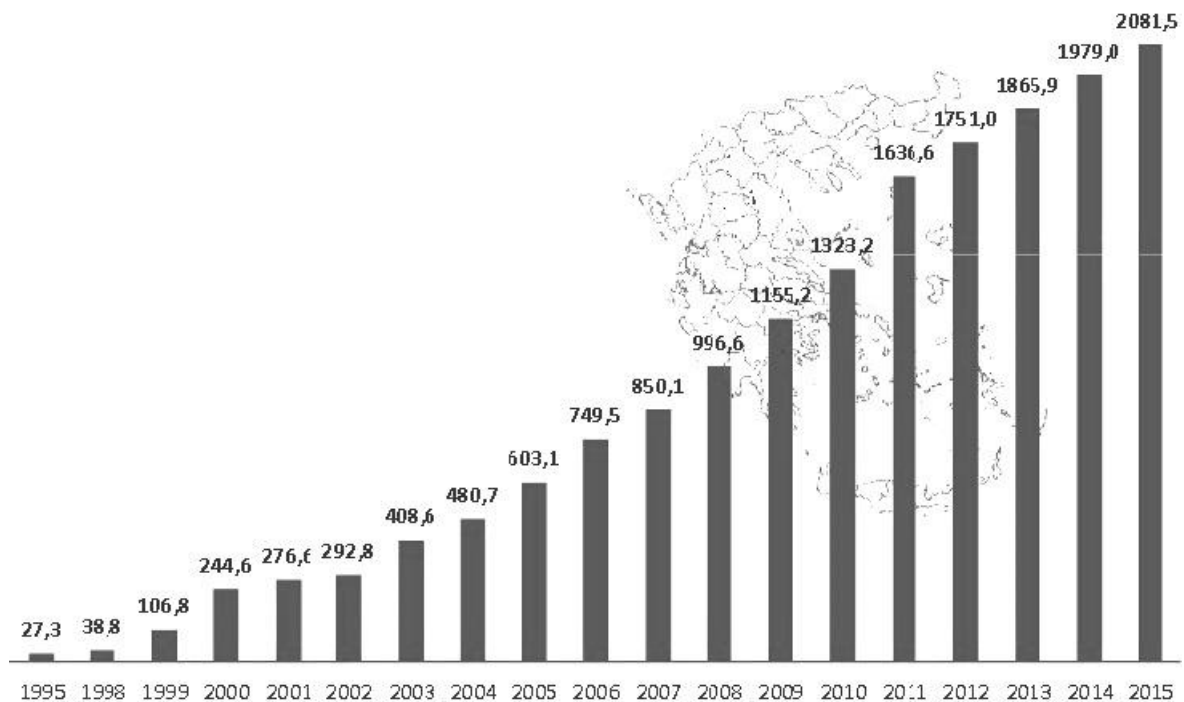


Σχήμα 1.2: Συνολική ισχύς αιολικής ενέργειας (σε GW) σε κράτη της Ε.Ε. [30]

1.2.3 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Οι ΑΠΕ αποτελούν στρατηγικό ενεργειακό πλεονέκτημα για τη χώρα, λόγω του πλούσιου φυσικού περιβάλλοντός της, της γεωγραφικής της θέσης αλλά και του συγκριτικού πλεονεκτήματος που έχει σε αιφορικές μορφές ενέργειας, κυρίως ηλιακής και αιολικής. Η αιολική ενέργεια παρουσιάζει αυξανόμενη και ταχύρυθμη συμμετοχή στη συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ τα τελευταία χρόνια, παρά τα προβλήματα που είχαν εντοπιστεί κατά την πρώτη περίοδο ανάπτυξης των εγκαταστάσεων, όπως η έλλειψη χρηματοδοτικών εργαλείων για την ανάπτυξη νέων έργων (δεδομένης της οικονομικής ύφεσης) και ο κορεσμός των δικτύων σε περιοχές με υψηλό ενεργειακό δυναμικό.

Στον Εθνικό Ενεργειακό Σχεδιασμό, στις κατευθύνσεις της Οδηγίας «20–20–20», είχε τεθεί ο στόχος το 2020 το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας να είναι στο 20%. Τη χρονιά που αυτός συντάχθηκε, το 2012, ο στόχος φαινόταν πολύ μακριά, αφού η συνολική εγκατεστημένη ισχύς από ΑΠΕ στο διασυνδεδεμένο σύστημα κάλυπτε μόλις το 6,3% της ηλεκτροδότησης. Τα σημερινά δεδομένα κινούνται σε σαφώς πιο θετική κατεύθυνση. Σύμφωνα με τον ΛΑΓΗΕ (Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ στο διασυνδεδεμένο σύστημα έφθασε τον Ιούλιο του 2015 στο 25,35% (4582MW), παρουσιάζοντας αύξηση έγχυσης 4,6% σε ετήσια βάση, έναντι 24,65% (4456MW) των λιγνιτικών μονάδων, 28,40% (5170MW) των μονάδων φυσικού αερίου, 17,55% (3173MW) των υδροηλεκτρικών και 3,86% (698 MW) των πετρελαϊκών μονάδων [6]. Ταυτόχρονα, το ποσοστό συμμετοχής τους στα μη διασυνδεδεμένα νησιά έφτασε τον Ιούνιο του ίδιου έτους στο 18% του συνόλου της ηλεκτροπαραγωγής, που στο υπόλοιπο τμήμα της καλύπτεται από πετρελαϊκούς σταθμούς.



Σχήμα 1.3: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας σε MW στην Ελλάδα μέχρι τον Ιούνιο του 2015 [3]

Το σύνολο της αιολικής ισχύος που κατά το πρώτο εξάμηνο του 2015 ήταν σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία προσέγγισε τα 2081,5 MW (Σχήμα 1.3), καταγράφοντας αύξηση 5,2% σε σχέση με το τέλος του 2014, σύμφωνα με στοιχεία της Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας [6]. Τους τελευταίους 12 μήνες εισήχθησαν στο σύστημα 196MW, από τα οποία τα 174MW προέρχονται από αιολικά πάρκα. Βλέπουμε ότι και εδώ η αιολική ισχύς είναι αυτή που αυξάνεται ταχύτερα τα τελευταία δύο χρόνια, καθώς σε αυτό το διάστημα έχει αυξηθεί κατά 17% έναντι 4,6% της φωτοβολταϊκής ισχύος. Πέραν αυτών, βρίσκονται υπό κατασκευή ή έχουν ήδη συμβολαιοποιηθεί νέα αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 198MW. Σε επίπεδο Περιφερειών, η Στερεά Ελλάδα παραμένει στην κορυφή των αιολικών εγκαταστάσεων καθώς φιλοξενεί 625,8MW (30,1% του συνόλου) και ακολουθούν η Πελοπόννησος με 411,8MW (19,8%) και η Ανατολική Μακεδονία-Θράκη, με ανεμογεννήτριες ισχύος 298,7MW (14,3%). Παρ' όλα αυτά, πρέπει να πούμε ότι υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των προσδοκώμενων και των πραγματικών στοιχείων, αφού για το 2014 υπήρχε ο στόχος η εγκατεστημένη αιολική ισχύς να προσεγγίσει τα 4000MW, που απέχει παρασάγγας από τα υφιστάμενα, ενώ για το 2020 υπάρχει η στόχευση των 7500MW.

1.3 Μια κριτική προσέγγιση

Η επιδίωξη ενός επενδυτή σε τεχνολογίες ΑΠΕ βασίζεται στο τρίπτυχο: βελτιστοποίηση απόδοσης – μεγιστοποίηση κέρδους – απόσπαση κοινωνικής συναίνεσης. Με μια πιο κριτική και σφαιρική προσέγγιση ωστόσο, γίνεται αντιληπτό ότι το ζήτημα δεν είναι μόνο το πώς και πόση ενέργεια παράγεται, αλλά και το αν αυτή θα είναι υπέρ των αναγκών της κοινωνικής πλειοψηφίας ή θα εξυπηρετεί τα συμφέροντα μεγάλων επιχειρηματικών ομίλων. Στην πραγματικότητα ο ίδιος ο καπιταλισμός, διανύοντας την πιο βαθιά κρίση

του, αναγνωρίζει την αξία του φυσικού κεφαλαίου (όπου φυσικό κεφάλαιο ορίζεται το σύνολο των φυσικών πόρων, των οικοσυστημάτων και των φυσικών διεργασιών) και μέσα από την εκμετάλλευσή του ανοίγει νέα πεδία κερδοφορίας.

Το νομοθετικό πλαίσιο που διαμορφώνεται σε εγχώριο επίπεδο συμβάλει καθοριστικά στην κατεύθυνση αυτή, δημιουργώντας ένα προνομιακό πεδίο για τους επενδυτές μέσω των διαδικασιών fast track. Ο νόμος Μπιρμπίλη 3851/2010 επιταχύνει τη διαδικασία εγκατάστασης ΑΠΕ, καταργώντας την Προκαταρκτική Μελέτη (ΠΠΕΑ), ενώ η Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) εκπονείται αφού έχει ήδη εκδοθεί η άδεια παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο οι επιπτώσεις των έργων υποδομής και εγκατάστασης των ΑΠΕ ουσιαστικά παραβλέπονται. Την ίδια στιγμή η εγκατάσταση τους επιτρέπεται ακόμα και σε δασικές και αναδασωτέες εκτάσεις, με βάση την υπουργική απόφαση που εκδόθηκε το 2008 και πρόσφατα ανέκρινε το ΣτΕ.

Παράλληλα, η εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ αποτέλεσε το βασικό εργαλείο απελευθέρωσης της ηλεκτροπαραγωγής από τα δημόσια μονοπώλια, στην κατεύθυνση της συνολικής απελευθέρωσης της αγοράς ενέργειας. Αυτό αυτόματα οδηγεί σε ένα μοντέλο ηλεκτροδότησης σημαντικά πιο ενεργοβόρο και δαπανηρό. Και αυτό γιατί το σύστημα μεταφοράς και το δίκτυο διανομής του ρεύματος (ΑΔΜΗΕ και ΔΕΔΔΗΕ) αγοράζουν υποχρεωτικά και κατά προτεραιότητα το ρεύμα που παράγουν οι ΑΠΕ σε τιμή επιδοτούμενη, άρα κατά πολύ αυξημένη, για να προκύπτει το εξασφαλισμένο κέρδος των ιδιωτών μεγαλοεπενδυτών. Το συνολικό κόστος επιδότησης των ΑΠΕ, σύμφωνα με τον ΛΑΓΗΕ, για το 2013 έφτασε τα 1,9 δις €, έναντι 350 εκ. € το 2012. Για συμβολή μόλις στο 10% της ηλεκτροδότησης, στοίχισαν το 1/3 του ετήσιου τζίρου της ΔΕΗ.

Ο ίδιος ο εκπρόσωπος των ιδιωτικών μονοπωλίων, η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, παραδέχεται ότι: «με τη μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ στην εγχώρια αγορά το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής γίνεται συνολικά ακριβότερο λόγω μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύος (συμβατικής και ΑΠΕ). Επιπλέον διαφοροποιούνται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συμβατικών σταθμών, ώστε να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ αυτών και των τεχνολογιών ΑΠΕ, με χρήση αεριοστρόβιλων φυσικού αερίου. Λύση είναι το σύνολο πλέον της πληρωμής των ΑΠΕ να προέρχεται από το Λογαριασμό του Ειδικού Τέλους (ΕΤΜΕΑΡ). Σε κάθε περίπτωση το οικονομικό βάρος θα είναι μεγάλο και διαρκώς αυξανόμενο» [9]. Το οικονομικό αυτό βάρος, μέσω του ΕΤΜΕΑΡ, μεταφέρεται απευθείας στο λογαριασμό ρεύματος, επιβαρύνοντας τους καταναλωτές.

Συμπερασματικά, γίνεται αντιληπτό ότι όσο η ενέργεια δεν αντιμετωπίζεται σαν κοινωνικό αγαθό, αλλά σαν εμπόρευμα και όσο δεν εθνικοποιείται ολόκληρος ο ενεργειακός τομέας, κάθε άλλο παρά θα διασφαλίζεται η πρόσβαση σε οικονομική, αξιόπιστη και φιλική στο περιβάλλον ενέργεια. Ταυτόχρονα, τα οφέλη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι δύσκολο να αντικρουστούν ή να αντισταθμιστούν. Η υπεράσπισή τους ωστόσο δεν μπορεί να γίνεται a priori, αλλά από την σκοπιά της υπεράσπισης των πραγματικών αναγκών της κοινωνίας και με κριτήριο την ισορροπία ανθρώπου – φύσης σε ένα ανώτερο τεχνολογικό επίπεδο.

2 Βασικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας

2.1 Εισαγωγή

Όπως ειπώθηκε και εισαγωγικά, η αιολική ενέργεια κερδίζει συνεχώς έδαφος έναντι των υπολοίπων ανανεώσιμων πηγών και αυτό συνακολουθως κάνει τις μηχανές εκμετάλλευσής της, τις ανεμογεννήτριες, αντικείμενο έντονου ερευνητικού και κατασκευαστικού ενδιαφέροντος. Η αναγκαιότητα βελτιστοποίησης της απόδοσής τους και ελαχιστοποίησης του κόστους, οικονομικού και περιβαλλοντικού, οδηγεί, εκτός από τη μετάβαση που ήδη έχει συντελεστεί από χερσαίες σε υπεράκτιες περιοχές, σε ανεμογεννήτριες με μεγαλύτερη ισχύ, σημαντικά μεγαλύτερο μήκος πτερυγίων και καινοτόμα χαρακτηριστικά όσον αφορά τη γεωμετρία και τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται.

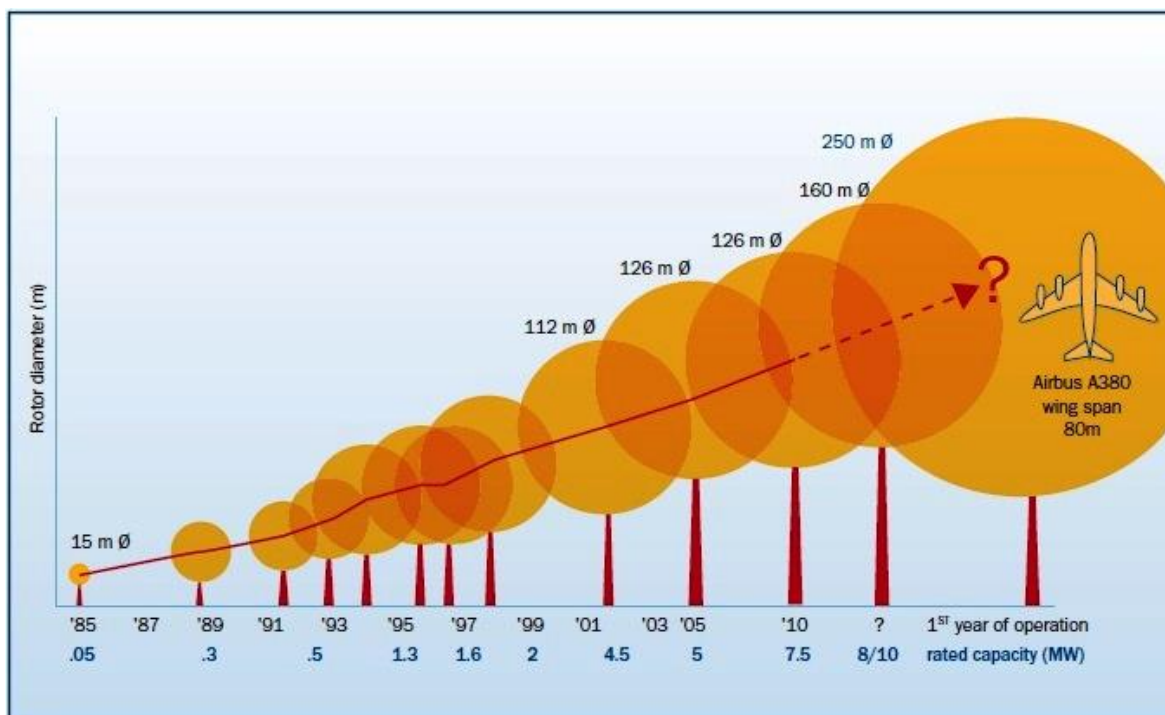
Η αιολική ισχύς που δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times S \times V^3, \quad (2.1)$$

όπου C_p ο συντελεστής ισχύος με μέγιστη τιμή $16/27$, ρ είναι η πυκνότητα του ανέμου, που εξαρτάται από την περιοχή και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, V η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου και S η επιφάνεια που σαρώνει ο ρότορας της ανεμογεννήτριας [27]. Βλέπουμε λοιπόν ότι η ισχύς είναι ακριβώς ανάλογη της διαμέτρου του ρότορα και έτσι ερμηνεύεται η τάση της συνεχούς αύξησής του, στην προσπάθεια αύξησης της παραγόμενης ισχύος και μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος της παραγόμενης ενέργειας. Η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια που βρίσκεται σε λειτουργία σήμερα έχει ρότορα με διάμετρο 125m και ονομαστική ισχύ 10MW, χωρίς όμως ακόμα να είναι ξεκάθαρο ποια είναι η μέγιστη διάμετρος που μπορεί να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψη τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες. Μια εικόνα της αύξησης των διαστάσεων και της ισχύος των ανεμογεννητριών που έχει συντελεστεί τα τελευταία τριάντα χρόνια δίνεται στο Σχήμα 2.1 στην επόμενη σελίδα.

Η αύξηση των διαστάσεων οδηγεί και σε αυξημένες απαιτήσεις που πρέπει οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες να πληρούν, όπως η επαρκής αντοχή απέναντι σε ακραίες συνθήκες φόρτισης (ίδιον βάρος, φόρτιση ανέμου), η υψηλή δυσκαμψία του πτερυγίου, ώστε πάντα να διατηρείται μια ελάχιστη απόσταση μεταξύ του άκρου του και του αντίστοιχου σημείου του πυλώνα και η τουλάχιστον 20-ετής διάρκεια ζωής σε κόπωση, λόγω της έκθεσης σε δυναμικά φορτία ανέμου με θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος [18].

Στη συνέχεια θα δοθούν κάποια βασικά στοιχεία, ώστε να σχηματιστεί μια εποπτική εικόνα σε σχέση με τα κύρια χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας και τα δομικά μέλη της, με μεγαλύτερη έμφαση στα πτερύγια και την εσωτερική τους στήριξη, που αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.



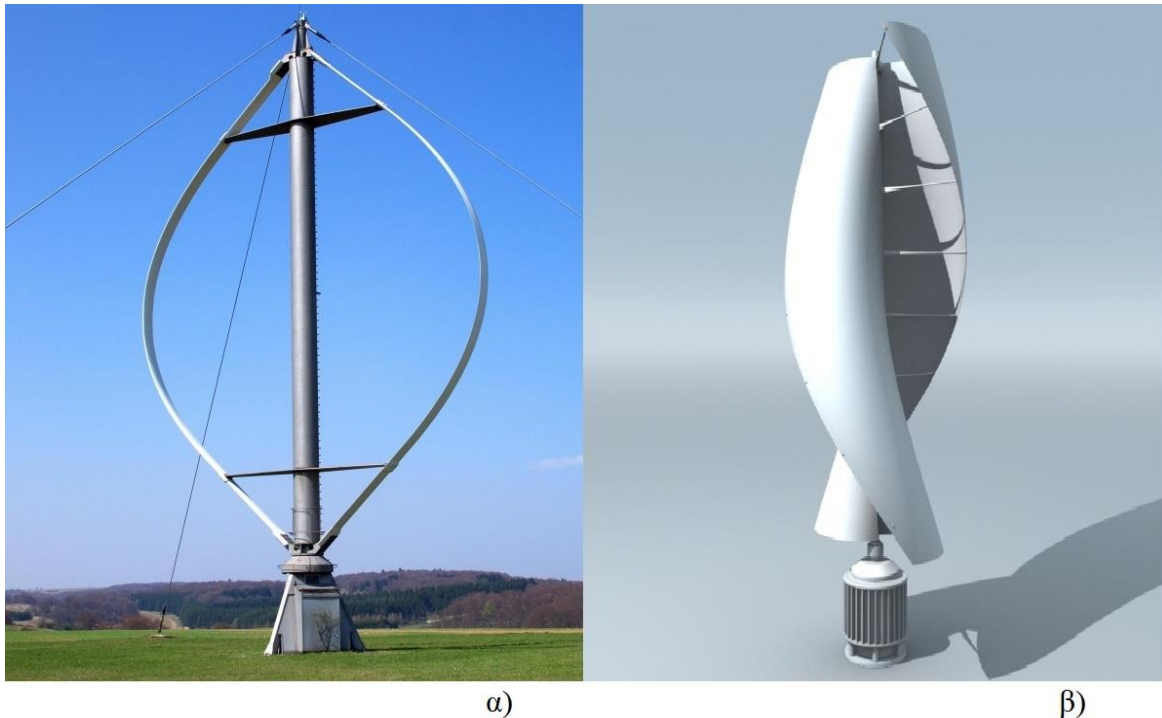
Σχήμα 2.1: Εξέλιξη της ισχύος και της διαμέτρου του ρότορα με το χρόνο [29]

2.2 Τύποι ανεμογεννητριών

Οι διαφορετικοί τύποι ανεμογεννητριών που απαντώνται μπορούν να καταταχθούν σε κατηγορίες με βάση τα εξής τρία κριτήρια: τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής, την ταχύτητα περιστροφής και τη μέθοδο ελέγχου της αεροδυναμικής ισχύος.

➤ Διεύθυνση άξονα περιστροφής

Με βάση τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα. Στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, ο άξονας περιστροφής είναι κάθετα στο έδαφος και κατακόρυφα στη ροή του ανέμου. Λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζουν είναι πιο αποτελεσματικές στους ανέμους οποιασδήποτε κατεύθυνσης. Ακόμα, είναι πιο απλές στην κατασκευή από τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, με χαμηλό κέντρο βάρους και με τη γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων τους να μπορούν να τοποθετηθούν στο έδαφος, καθιστώντας έτσι ευκολότερη την πρόσβαση και την συντήρησή τους. Το μεγάλο τους όμως μειονέκτημα είναι ότι έχουν πολύ μικρό βαθμό απόδοσης, λόγω των μικρών ταχυτήτων που ο άνεμος αναπτύσσει κοντά στο έδαφος, ενώ συνήθως απαιτείται εξωτερική υποβοήθηση για να εκκινήσουν. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, παρά σε ελάχιστες περιπτώσεις, όπως για γεωργικούς σκοπούς. Οι πιο γνωστοί τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius και Darrieus (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα τύπου: α) Darrieus και β) Savonius [27]

Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, ο άξονας περιστροφής τους είναι οριζόντιος ως προς το έδαφος και σχεδόν παράλληλα στη ροή του ανέμου. Είναι αυτές που έχουν επικρατήσει στην αγορά και απαντώνται κατά κόρον σε μεγάλης ή και μικρότερης κλίμακας αιολικές εγκαταστάσεις. Δεν χρειάζονται εξωτερική υποβοήθηση για να ξεκινήσουν να περιστρέφονται ούτε υψηλή ταχύτητα ανέμου, παράγοντας έτσι ενέργεια και σε σχετικά χαμηλότερες ταχύτητες. Σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, έχουν τη γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων στην κορυφή του πύργου στήριξης, γεγονός που καθιστά πιο δύσκολη την επιθεώρηση και συντήρησή τους. Επιπλέον χρειάζονται σύστημα προσανατολισμού, που να ρυθμίζει τη σωστή θέση του ρότορα ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου, ώστε αυτός να ρέει παράλληλα με τον άξονα περιστροφής και να προσπίπτει πάντα κάθετα στα πτερύγια, τα οποία τοποθετούνται με τη μεγάλη τους πλευρά παράλληλη στο επίπεδο περιστροφής. Ανάλογα με τον αριθμό πτερυγίων που διαθέτουν, διακρίνονται σε μονοπτέρυγες, διπτέρυγες, τριπτέρυγες και πολυπτέρυγες (Σχήμα 2.3). Παρόλο που τα μοντέλα με ένα ή δύο πτερύγια εξοικονομούν κόστος και βάρος, οι τριπτέρυγες ανεμογεννήτριες είναι αυτές που έχουν επικρατήσει στην αγορά, επειδή επιτυγχάνουν βέλτιστο συνδυασμό απόδοσης και ευστάθειας του συνόλου της κατασκευής.



Σχήμα 2.3: Τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, με τρία, δύο και ένα πτερύγια [27]

➤ Ταχύτητα περιστροφής ρότορα

Με βάση την ταχύτητα περιστροφής, οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε ανεμογεννήτριες με σταθερή (fixed speed) και με μεταβλητή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (variable speed). Στην πρώτη περίπτωση, η ταχύτητα της ανεμογεννήτριας είναι σταθερή ή σχεδόν σταθερή και ανεξάρτητη από την ταχύτητα του ανέμου. Οι κατασκευές αυτές θεωρούνται πιο απλές στην κατασκευή και πιο οικονομικές και μέχρι πρότινος ήταν κυρίαρχες, σήμερα όμως τείνουν να εγκαταλειφθούν. Βασική αιτία είναι το γεγονός ότι δεν εκμεταλλεύονται στο έπακρο το αιολικό δυναμικό, αφού μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου δεν συνεπάγονται και περισσότερη παραγόμενη ενέργεια, την ίδια στιγμή που οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου προκαλούν υψηλές μηχανικές καταπονήσεις στα πτερύγια.

Στις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, η ταχύτητα περιστροφής τους προσαρμόζεται στην ταχύτητα του ανέμου και έτσι μεγιστοποιείται η ποσότητα της κινητικής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική και άρα βελτιστοποιείται η ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον είναι πιο εύκολος ο έλεγχος της αεροδυναμικής ισχύος.

➤ Μέθοδος ελέγχου της αεροδυναμικής ισχύος

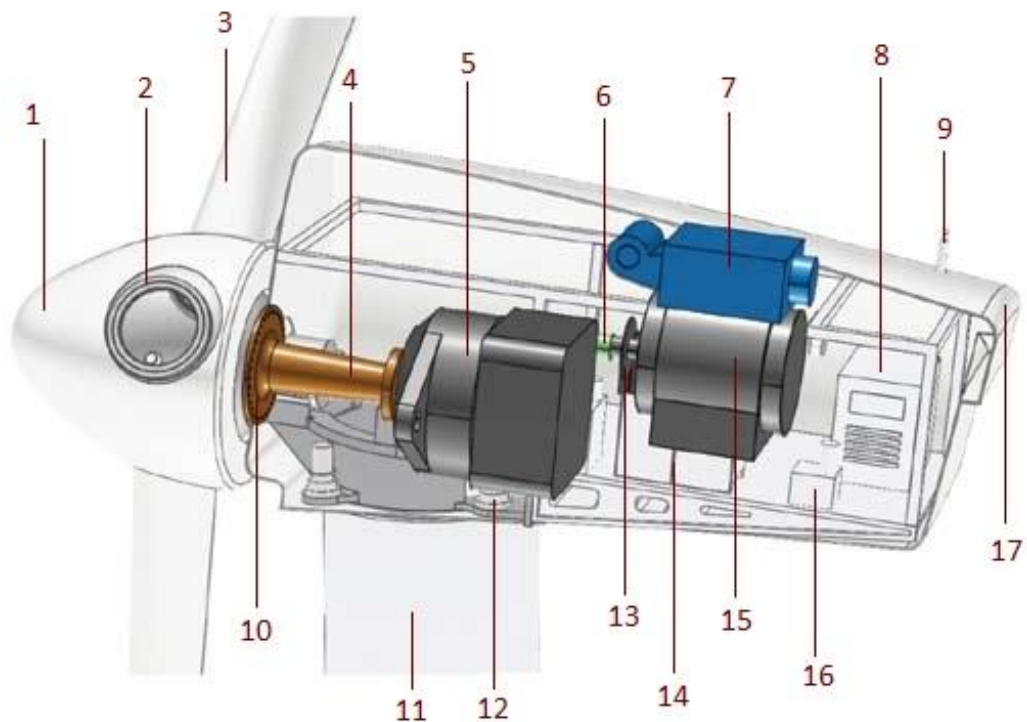
Όπως έχει ειπωθεί, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου τόσο μεγαλύτερη είναι και η παραγόμενη από την ανεμογεννήτρια ενέργεια, που είναι γενικά και το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Όμως σε υπερβολικά υψηλές ταχύτητες ανέμου, υπάρχει ο κίνδυνος να προκληθεί βλάβη στην ανεμογεννήτρια. Προκύπτει έτσι η αναγκαιότητα ελέγχου της παραγόμενης ισχύος, που στην ουσία πρόκειται για έλεγχο περιορισμού υψηλών ροπών και επιτυγχάνεται με δύο τρόπους, είτε με τον έλεγχο κλίσης των πτερυγίων (pitch-controlled), είτε με τον έλεγχο απώλειας στήριξης (stall-controlled) [27].

Κατά τον έλεγχο κλίσης ή έλεγχο γωνίας βήματος των πτερυγίων, μετράται από το σύστημα ελέγχου η ισχύς εξόδου, έτσι ώστε όταν αυτή ξεπεράσει την καθορισμένη οριακή τιμή να μεταβληθεί προσωρινά η κλίση των πτερυγίων ή τμήματος αυτών, μεταβάλλοντας έτσι τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και επομένως και την παραγόμενη ισχύ. Οι ανεμογεννήτριες pitch controlled έχουν μεγαλύτερη απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου και επιτυγχάνεται πιο αποτελεσματικός έλεγχος ισχύος, η μέθοδος όμως αυτή έχει αυξημένο κόστος και πολυπλοκότητα, ενώ ακόμα και μικρές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου προκαλούν μεγάλες διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου.

Οι ανεμογεννήτριες stall-controlled διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης, τα οποία για υψηλές τιμές της ταχύτητας του ανέμου εμφανίζουν απώλεια στήριξης. Το αεροδυναμικό τους σχήμα είναι αυτό που επενεργεί στην ανεμογεννήτρια, έτσι ώστε να αποτραπεί η υπερφόρτισή της. Με αυτόν τον τρόπο το κόστος και οι απαιτήσεις συντήρησης μειώνονται, αφού δεν απαιτείται σύστημα ελέγχου, η διαδικασία όμως σχεδίασης και κατασκευής των πτερυγίων καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη.

2.3 Δομικά μέλη ανεμογεννήτριας

Από τα προηγούμενα γίνεται αντιληπτό ότι τα χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία σε γεωμετρία, μέγεθος και λειτουργία, η οποία εντείνεται συνεχώς με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την απόκτηση νέας γνώσης. Ως εκ τούτου και τα επιμέρους μέρη που την απαρτίζουν διαφοροποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα και εξαρτώνται, εκτός από διάφορα κριτήρια και απαιτήσεις, και από την κατασκευαστική εταιρεία. Σε γενικές γραμμές όμως, τα βασικά δομικά μέλη μιας τυπικής, μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, δίνονται στο Σχήμα 2.4 που ακολουθεί.



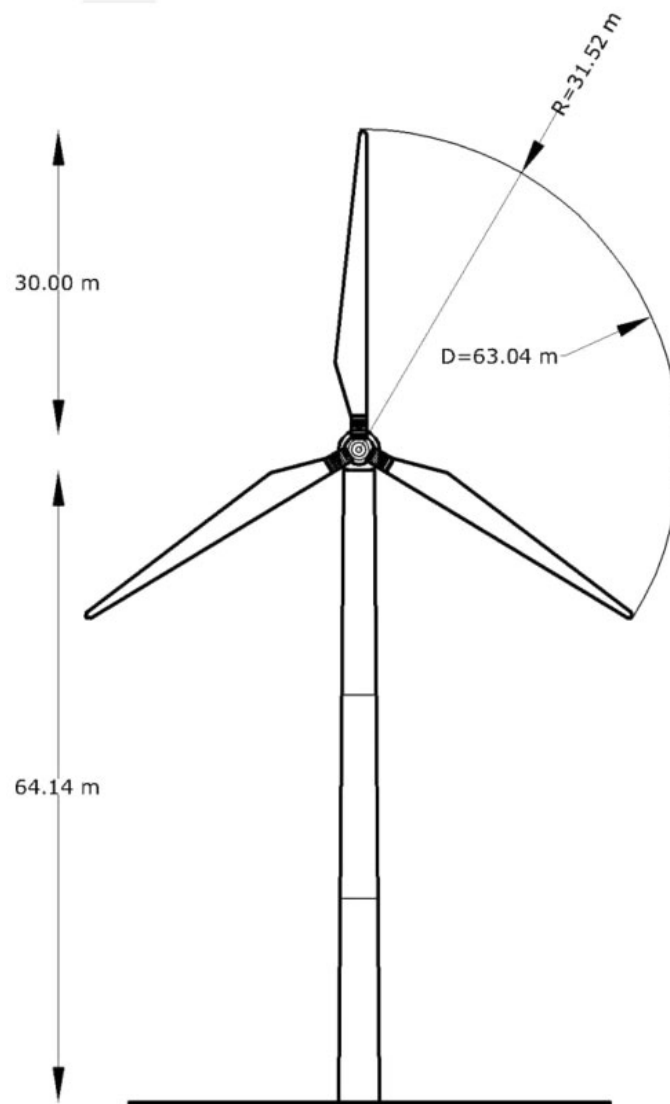
Σχήμα 2.4: Κύρια μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα [14]

Υπόμνημα Σχήματος:

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1. Πλήμνη (hub) | 9. Αισθητήρας ανέμου |
| 2. Βάση στήριξης πτερυγίου | 10. Κύριο ρουλεμάν ατράκτου |
| 3. Πτερύγιο | 11. Πυλώνας |
| 4. Άξονας χαμηλών στροφών | 12. Σύστημα περιστροφής |
| 5. Κιβώτιο ταχυτήτων | 13. Σύστημα φρεναρίσματος |
| 6. Άξονας υψηλών στροφών | 14. Σύστημα ελέγχου |
| 7. Δοχείο ψύξης | 15. Γεννήτρια |
| 8. Ελεγκτής ισχύος (power controller) | 16. Φίλτρα λαδιού |
| | 17. Κέλυφος ατράκτου |

Πιο αναλυτικά, η αιολική ενέργεια δεσμεύεται μέσω των πτερυγίων (blades), τα οποία έχουν αεροδυναμικό σχήμα και συνδέονται στην πλήμνη (hub), συγκροτώντας το ρότορα

(rotor). Τα πτερύγια συνδέονται στην πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα περιστροφής περί τον διαμήκη τους άξονα, μεταβάλλοντας έτσι το βήμα. Ο ρότορας μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική, η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται στη γεννήτρια (generator), για να μετατραπεί μέσω επαγωγής σε ηλεκτρική. Η μεταφορά της ενέργειας γίνεται μέσω του άξονα χαμηλών στροφών (low speed shaft), που συνδέει την πλήμνη με το κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox). Στη συνέχεια το κιβώτιο ταχυτήτων, μέσω του άξονα υψηλών στροφών (high speed shaft), συνδέεται με τη γεννήτρια. Οι μηχανισμοί αυτοί, μαζί με τα συστήματα ελέγχου, εκτροπής, φρεναρίσματος κτλ στεγάζονται στην άτρακτο (nacelle). Τέλος, η παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση στηρίζεται στον πυλώνα (tower), που συνήθως είναι χαλύβδινος σωληνωτός (σπανιότερα δικτυωτός ή από οπλισμένο σκυρόδεμα) και στη βάση του είναι τοποθετημένοι ο ηλεκτρονικός πίνακας και ο πίνακας ελέγχου. Ο πυλώνας κατασκευάζεται πάντα με ύψος λίγο μεγαλύτερο από τη διάμετρο του ρότορα. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, ο πυλώνας έχει ύψος 64,14m και η διάμετρος του ρότορα είναι ίση με 63,04m. Στο Σχήμα 2.5 που ακολουθεί δίνεται η γενική όψη και οι διαστάσεις της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.5: Διαστάσεις της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας ισχύος 1MW [32]

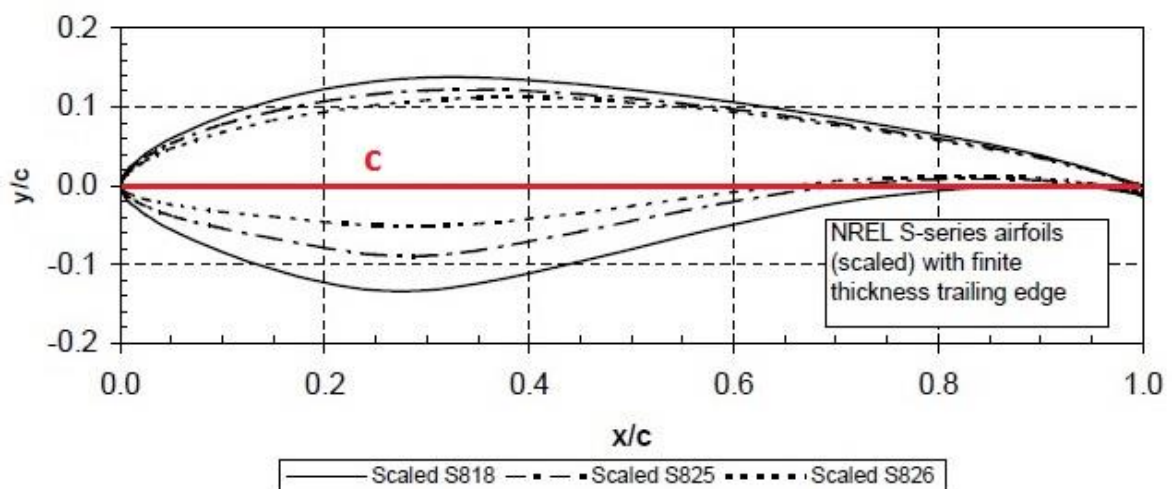
2.4 Πτερύγιο ανεμογεννήτριας

2.4.1 Εξωτερική γεωμετρία πτερυγίου

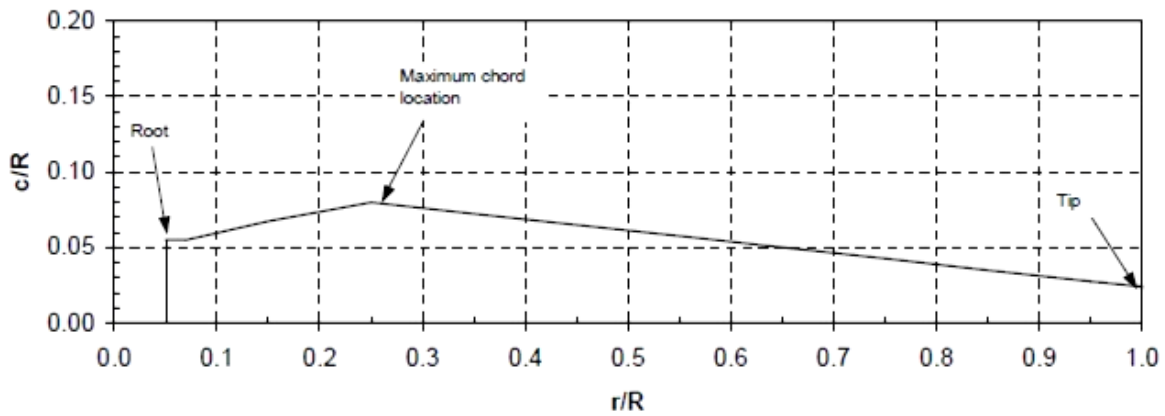
Τα πτερύγια είναι ίσως το πιο κρίσιμο από τα δομικά μέλη της ανεμογεννήτριας, αφού η όλο και μεγαλύτερη διάμετρος του ρότορα δημιουργεί πολλά θέματα σε σχέση με τον σχεδιασμό και την κατασκευή τους. Στην ουσία πρόκειται για δοκούς, με στατικό προσομοίωμα προβόλου, που το άκρο τους στηρίζεται στον περιστρεφόμενο άξονα της πλήμνης (hub), με βασικά κριτήρια σχεδιασμού το αεροδυναμικό σχήμα, την απαιτούμενη υψηλή δυσκαμψία και το όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος.

Το αεροδυναμικό σχήμα του πτερυγίου επιτυγχάνεται μέσω ξεχωριστών συνθετικών στρωμάτων, συγκολλημένων μεταξύ τους που συγκροτούν έτσι το εξωτερικό κέλυφος (outer skin). Για τον ακριβή προσδιορισμό των διαστάσεων ακολουθούνται προκαθορισμένα αεροδυναμικά προφίλ, όπως είναι οι οικογένειες αεροτομών S818, S825 και S826, που εικονίζονται στο Σχήμα 2.6, όπου για κάθε διατομή οι συντεταγμένες x και y προσδιορίζονται συναρτήσει του μήκους c της χορδής στην αντίστοιχη θέση. Αντίστοιχα, το μήκος της χορδής σε κάθε διατομή του πτερυγίου προκύπτει ως ποσοστό της ακτίνας R του ρότορα, σύμφωνα με το Σχήμα 2.7. Οι διαστάσεις και οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες του πτερυγίου που εξετάζεται στην παρούσα εργασία ανήκουν στην κατηγορία αεροδυναμικών πτερυγίων S818 και θα δοθούν αναλυτικά, μαζί με όλες τις υπόλοιπες πληροφορίες που αφορούν το συγκεκριμένο πτερύγιο, σε επόμενο κεφάλαιο.

Ανάλογα με την παραμόρφωση που υφίσταται από την καταπόνηση των φορτίων, το πτερύγιο χωρίζεται σε τρία τμήματα. Το τμήμα βάσης (root segment) ξεκινάει από τη βάση του πτερυγίου (root), που είναι το σημείο στήριξής του στην πλήμη, είναι κυκλικής διατομής και ισούται με το 7% του συνολικού μήκους R του πτερυγίου. Ακολουθεί το τμήμα μετάβασης (transition segment), που εκτείνεται μέχρι το 25% του συνολικού μήκους και τέλος το κυρίως τμήμα του πτερυγίου, που είναι το καθαρά αεροδυναμικό τμήμα, όπου βρίσκονται και οι εσωτερικές στηρίξεις (box girder segment) [7,22].



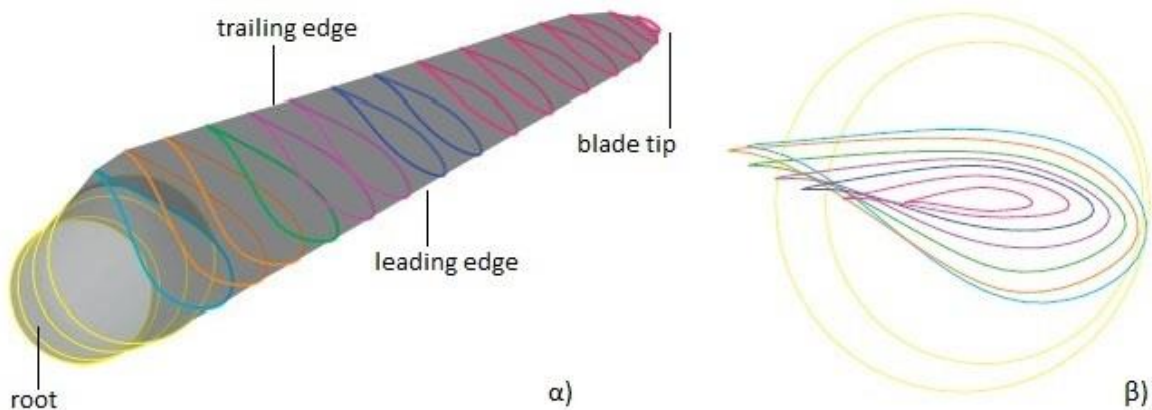
Σχήμα 2.6: Αεροτομές που αποτελούν κατευθυντήρια γραμμή για το μοντέλο των πτερυγίων [22]



Σχήμα 2.7: Τυπικό διάγραμμα μεταβολής της χορδής c συναρτήσει της απόστασης r από τη βάση του πτερυγίου [22]

Το κάτω μέρος του πτερυγίου ονομάζεται *leading edge*, το επάνω *trailing edge* και καθώς ο ρότορας περιστρέφεται το πρώτο προηγείται και το δεύτερο έπεται. Η ευθύγραμμη απόσταση μεταξύ των δύο άκρων αποτελεί τη χορδή (σημειώνεται με κόκκινο στο Σχήμα 2.6), η οποία έχει μέγιστο μήκος στο σημείο που τελειώνει το τμήμα μετάβασης και αρχίζει το κυρίως τμήμα, στη συνέχεια μειώνεται γραμμικά κατά μήκος του πτερυγίου και ελαχιστοποιείται στο άκρο του (*blade tip*) (Σχήμα 2.8α).

Προκειμένου να μειωθούν οι ροπές κάμψης που αναπτύσσονται στο πτερύγιο μακριά από το σημείο στήριξής του με την πλήμνη, το σχήμα των πτερυγίων είναι κωνικό. Η γραμμική κωνικοποίηση (*linear taper*) αφορά το κυρίως τμήμα του πτερυγίου και εφαρμόζεται όχι μόνο στο μήκος της χορδής, που όπως είπαμε μειώνεται κατά μήκος, αλλά και στα πάχη των στρωμάτων των υλικών που αποτελούν το εξωτερικό περίβλημα, καθώς και τις εσωτερικές δομές στήριξης, που περιγράφονται παρακάτω. Αυτό εξασφαλίζει ότι τα διάφορα κατά μήκος τμήματα του πτερυγίου θα υφίστανται συγκρίσιμες μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις. Επιπρόσθετα, τα πτερύγια διαθέτουν μια ορισμένη συστροφή (*blade twisting*) κατά το μήκος τους (Σχήμα 2.8β), η οποία επενεργεί θετικά σε σχέση με την αυτοεκκίνηση του ρότορα, ενώ μέσω της σύζευξης ροπής και στρέψης που αναπτύσσονται ενισχύει την αποδοτικότητα της ανεμογεννήτριας [23].



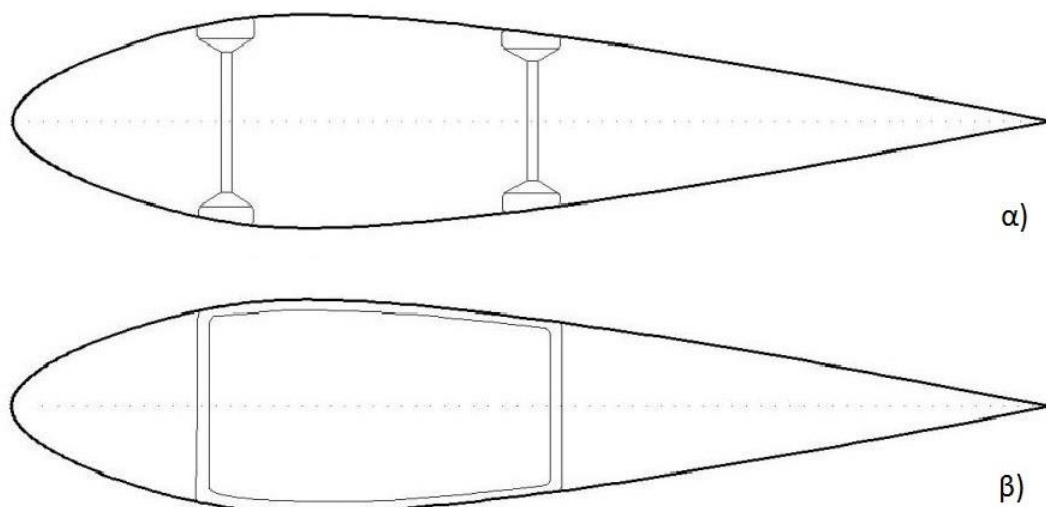
Σχήμα 2.8: α) Τυπικό γεωμετρικό μοντέλο πτερυγίου και β) κάτοψη ενός συνόλου διατομών με εμφανή τη συστροφή του πτερυγίου [16]

2.4.2 Εσωτερική γεωμετρία πτερυγίου

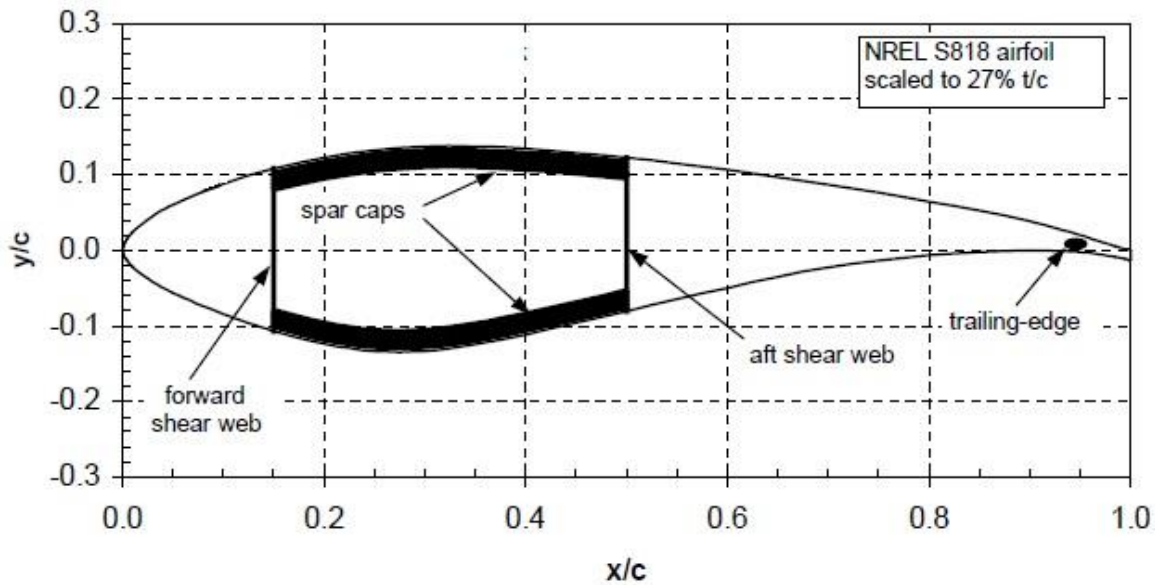
Οι αυξημένες κατασκευαστικές απαιτήσεις καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη υπόθεση τον σχεδιασμό και κατασκευή και του εσωτερικού τμήματος του πτερυγίου, αφού εκεί μεταβιβάζεται το σύνολο των φορτίων που καταπονούν το ρότορα. Δύο είναι οι βασικοί τύποι διαμόρφωσης της εσωτερικής γεωμετρίας του πτερυγίου, που διαφοροποιούνται σε σχέση με τον σχεδιασμό τους και τον τρόπο που αποκαθίσταται η σύνδεσή τους με το εξωτερικό κέλυφος.

Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχουν δύο διακριτοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας (two-piece construction), οι ονομαζόμενοι ιστοί διάτμησης (shear-webs), που εκτείνονται κατά μήκος του πτερυγίου και παρέχουν την εσωτερική του στήριξη (Σχήμα 2.9α). Είναι συγκολλημένοι στα δύο άκρα τους με το εξωτερικό περίβλημα και έχουν υψηλή αντοχή έναντι διάτμησης, στην οποία κυρίως υποβάλλονται. Επειδή οι συγκολλητικοί δεσμοί καλούνται να μεταφέρουν υψηλές τάσεις τόσο μεταξύ των δύο ιστών διάτμησης όσο και μεταξύ αυτών και του εξωτερικού περιβλήματος, χρησιμοποιείται ισχυρό συγκολλητικό μέσο, όπως εποξειδική ρητίνη [23].

Στη δεύτερη περίπτωση, που αποτελεί και την εξεταζόμενη, η εσωτερική στήριξη του πτερυγίου παρέχεται από μια ενιαία κατασκευή κοίλης διατομής (one-piece construction), η οποία εκτείνεται σχεδόν σε όλο το μήκος του πτερυγίου (στο κυρίως τμήμα του που καταλαμβάνει το 75% του μήκους του) και περιγραφικά μπορεί να διατυπωθεί ως κουτί στηρίξεως (box girder) (Σχήμα 2.9β). Το εφελκόμενο και θλιβόμενο πέλμα αυτής της δομής συγκολλούνται στο προσήνεμο και υπήνεμο εξωτερικό κέλυφος αντίστοιχα. Τα τμήματα που συγκολλούνται στο κέλυφος ονομάζονται spar-caps ή flanges και συνδέονται μεταξύ τους με τους ιστούς διάτμησης, τα shear-webs, που τοποθετούνται κάθετα στη διατομή (Σχήμα 2.10). Οι μεταφερόμενες τάσεις από το εξωτερικό κέλυφος στο εσωτερικό είναι σαφώς μικρότερες από την προηγούμενη περίπτωση και γι' αυτό χρησιμοποιείται χαμηλότερης αντοχής συγκολλητική ύλη, όπως πολουουρεθάνη [23].



Σχήμα 2.9: Περιπτώσεις εσωτερικής στήριξης πτερυγίου: α) two-piece construction και β) one-piece construction [7]



Σχήμα 2.10: Τομή πτερυγίου στην περίπτωση της one-piece construction [22]

Η κάμψη στην οποία υποβάλλεται το πτερύγιο, άρα κατ' επέκταση και το κουτί στηρίξεως, επικεντρώνονται στην τελευταία περίπτωση εσωτερικής στηρίξεως, μπορούμε να πούμε απλουστευτικά ότι είναι δύο ειδών. Όταν η διεύθυνση της φόρτισης είναι κάθετη σε μία από τις δύο κόψεις του πτερυγίου (leading edge και trailing edge) πρόκειται για κάμψη φόρτισης edge-wise και προκαλείται από τα φορτία βαρύτητας του πτερυγίου. Όταν η φόρτιση είναι κάθετη στη μεγάλη επιφάνεια του πτερυγίου ονομάζεται flap-wise και προκαλείται από τα φορτία ανέμου (στατική και δυναμική φόρτιση). Η flap-wise κάμψη είναι η πιο σημαντική φόρτιση στην οποία υποβάλλεται το κουτί στηρίξεως και αναλαμβάνεται από τα spar-caps, χρησιμοποιώντας στρώσεις από σύνθετα υλικά (laminates) με συνολικό πάχος μεγαλύτερο από αυτό των shear-webs. Τα shear-webs προσδίδουν κάποια αντοχή σε στρεπτική και πλάγια κάμψη, αλλά κυρίως συμβάλλουν στην διατμητική δυσκαμψία (shear stiffness).

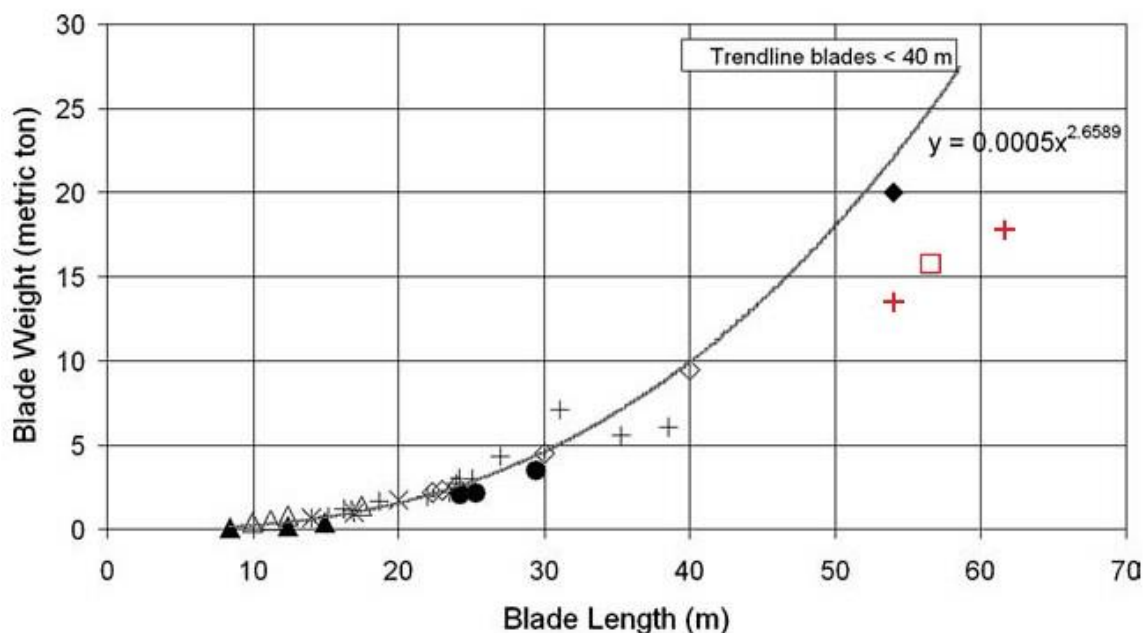
Και στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή την one-piece και two-piece construction, τα shear-webs τοποθετούνται στο 15% και στο 50% του μήκους της χορδής όπως μετράται από το leading edge του πτερυγίου (Σχήμα 2.10), έτσι ώστε τα spar-caps να είναι στη μεγαλύτερη δυνατή απόσταση από τον ουδέτερο άξονα κάμψης, παρέχοντας έτσι τη μέγιστη καμπτική δυσκαμψία [20]. Αυτό επιβεβαιώνεται και από περιπτώσεις τροποποιημένου σχεδιασμού [23], όπου το δεξί shear-web τοποθετήθηκε στο 45%, αντί για το 50%, του μήκους της χορδής και με βάση το μέγεθος της παραμόρφωσης του άκρου του πτερυγίου προέκυψε μειωμένη αντοχή σε κάμψη συγκριτικά με την κλασική περίπτωση σχεδιασμού.

3 Υλικά πτερυγίου

3.1 Εισαγωγή

Η διαμόρφωση της εξωτερικής και εσωτερικής γεωμετρίας του πτερυγίου, που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελεί μόνο ένα τμήμα του συνόλου της διαδικασίας σχεδιασμού και κατασκευής του ρότορα. Η επιλογή των κατάλληλων υλικών, που θα μπορούν με το βέλτιστο τρόπο, να ανταποκρίνονται στις υπεραυξημένες πλέον απαιτήσεις ασφάλειας, αποδοτικότητας και διάρκειας ζωής μιας σύγχρονης, μεγάλης ισχύος, ανεμογεννήτριας, αποτελεί ίσως το πιο κρίσιμο στάδιο και παράλληλα τη μεγάλη πρόκληση για τους σχεδιαστές. Η δυσκολία αξιολόγησης και επιλογής των κατάλληλων υλικών για την κατασκευή του πτερυγίου έγκειται στα πολλά κριτήρια που θα πρέπει παράλληλα να πληρούνται, την ίδια στιγμή που διάφοροι άλλοι παράγοντες που υπεισέρχονται στην κατασκευαστική διαδικασία (περιβαλλοντικοί, οικονομικοί κτλ) είναι δυνατόν να αλλάζουν άρδην ανά περίπτωση. Συγκεντρωτικά, τα κριτήρια επιλογής διακρίνονται στα εξής τρία: πρώτον, η υψηλή δυσκαμψία του υλικού, δεύτερον, η μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τρίτον, η χαμηλή πυκνότητα. Το μέγεθος της δυσκολίας στο να συγκλίνουν ταυτόχρονα τα κριτήρια αυτά καθίσταται σαφές από το γεγονός ότι η απαίτηση για μικρό βάρος, έρχεται σε ευθεία σύγκρουση με την τάση συνεχούς αύξησης της διαμέτρου του ρότορα, που συντελείται σε τέτοιο βαθμό ώστε να εκτιμάται ότι στο μέλλον τα φορτία βαρύτητας θα υπερβαίνουν τα αεροδυναμικά φορτία. Η εκθετική αυτή αύξηση του βάρους συναρτήσει του μήκους του πτερυγίου δίνεται στο Σχήμα 3.1, με τη μορφή της εμπειρικής καμπύλης που απεικονίζεται και αντιπροσωπεύει πτερύγια με μήκος μικρότερο από 40m. Τα διαφορετικά σύμβολα αντιστοιχούν σε διαφορετικούς κατασκευαστές και διαδικασίες παρασκευής, ενώ τα τρία σημεία κόκκινα σημεία κάτω από την καμπύλη αντιπροσωπεύουν πρωτοπόρες περιπτώσεις μεγάλων πτερυγίων (54–61,5m) όπου, με τη βελτίωση του σχεδιασμού και της παραγωγικής διαδικασίας, το βάρος μειώθηκε σημαντικά κάτω από το εκτιμώμενο.

Σήμερα, λαμβανομένης υπόψη της μεγάλης τεχνολογικής εξέλιξης, την απόκτηση χρήσιμης εμπειρίας από τη διεξαγωγή πολλών πειραματικών διαδικασιών και την χρησιμοποίηση καινοτόμων σύνθετων υλικών ή την αξιοποίηση με πρωτοποριακό τρόπο παλιών, η διαδικασία επιλογής και αξιολόγησης των υλικών κατασκευής του πτερυγίου, αλλά και των υπολοίπων τμημάτων της ανεμογεννήτριας, έχει καταστεί σαφώς ευκολότερη. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι επιλογής των υλικών, που σε συνδυασμό με προγράμματα για τη μοντελοποίηση της φόρτισης του πτερυγίου, μπορούν να οδηγήσουν σε αξιόπιστα, ασφαλή και οικονομικά αποτελέσματα. Παρακάτω θα περιγραφεί μία από τις μεθόδους αυτές, που έχουν αναπτυχθεί και αποσκοπούν στην εκλογή των ιδανικών υλικών για ένα δεδομένο σύνολο λειτουργικών απαιτήσεων, απ' όπου και διαφαίνεται πώς συντελέστηκε η μετάβαση από το χάλυβα και το ξύλο, που αρχικά χρησιμοποιούνταν, στα σύνθετα υλικά. Επίσης θα περιγραφούν συνοπτικά τα κύρια χαρακτηριστικά, οι ιδιότητες και τα μοντέλα αστοχίας των σύνθετων υλικών που είναι πιο συχνά χρησιμοποιούμενα στην κατασκευή πτερυγίων, ώστε να γίνει αντιληπτός και ο τρόπος λειτουργίας τους όταν χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό.



Σχήμα 3.1: Αύξηση του βάρους του πτερυγίου συναρτήσει του μήκους του [17]

3.2 Κατασκευαστικές απαιτήσεις και επιλογή υλικών

Όπως προαναφέρθηκε, έχουν αναπτυχθεί πολλές μεθοδολογίες ώστε οι κατασκευαστές να είναι σε θέση, με μικρό υπολογιστικό κόστος, να καταλήξουν στην σωστότερη επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας. Μία από αυτές τις μεθόδους [17,23] βασίζεται στην ανάλυση με την εισαγωγή τριών δεικτών οι οποίοι αντιστοιχούν στις τρεις βασικές απαιτήσεις που θα πρέπει οπωσδήποτε να ικανοποιούνται και οι οποίες είναι:

- η υψηλή δυσκαμψία του υλικού, για να διασφαλιστεί η διατήρηση του βέλτιστου αεροδυναμικού σχήματος του πτερυγίου και να αποτραπεί σύγκρουσή του με τον πυλώνα, καθώς υποβάλλεται σε συνθήκες ισχυρής φόρτισης, όπως και η εκδήλωση τοπικού λυγισμού υπό θλιπτικό φορτίο,
- η χαμηλή πυκνότητα, ώστε να ελαχιστοποιούνται τα φορτία βαρύτητας και
- η υψηλή αντοχή σε κόπωση, για να περιοριστεί η υποβάθμιση των υλικών κατά τη λειτουργία και να διασφαλιστεί η απαιτούμενη 20-ετής διάρκεια ζωής.

Ο πρώτος δείκτης για την επιλογή των υλικών μπορεί να οριστεί με την απαίτηση ότι το πτερύγιο επιτυγχάνει μία ελάχιστη τιμή μάζας, ενώ ανταποκρίνεται στις καθορισμένες απαιτήσεις δυσκαμψίας ή διαφορετικά, ότι το πτερύγιο επιτυγχάνει μέγιστη αντοχή σε κάμψη για ένα δεδομένο επίπεδο μάζας. Προκύπτει έτσι ο ακόλουθος δείκτης “ελαφριάς – άκαμπτης δοκού”:

$$M_1 = E^{1/2} / \rho, \quad (3.1)$$

όπου E είναι το μέτρο Ελαστικότητας και ρ η πυκνότητα του υλικού. Η χρήση αποκλειστικά του δείκτη αυτού για την εκλογή των υλικών θα υποδείκνυε ως πιθανά υποψήφια τα αφρώδη υλικά (foam materials). Στα υλικά αυτά, η χαμηλή δυσκαμψία που διαθέτουν (όπως υπολογίζεται από την τιμή του μέτρου Ελαστικότητας), αντισταθμίζεται

από την ακόμα μικρότερη πυκνότητα, με αποτέλεσμα να προκύπτει σχετικά αυξημένη η τιμή του δείκτη M_1 , υποδεικνύοντας τα έτσι κατάλληλα για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Ωστόσο τα αφρώδη υλικά θα οδηγούσαν σε ογκώδη πτερύγια, προκαλώντας πολλά σχεδιαστικά, κατασκευαστικά και λειτουργικά προβλήματα. Επιπρόσθετα, η κυψελωτή δομή και η συνακόλουθη απορρόφηση υγρασίας και υψηλή υδατοπερατότητα αυτών των υλικών, τα αποκλείει εξαρχής από τέτοιου είδους εφαρμογές.

Για την υπέρβαση των προβλημάτων αυτών, ένας δεύτερος δείκτης επιλογής υλικών προτείνεται, με βάση τον οποίο απαιτείται ότι τα υλικά του πτερυγίου θα διαθέτουν ένα ελάχιστο επίπεδο ακαμψίας, σύμφωνα με τον τύπο:

$$M_2 \geq E, \quad (3.2)$$

όπου οι κατώτατες επιτρεπόμενες τιμές του μέτρου Ελαστικότητας E είναι συνήθως της τάξεως των 15–20GPa. Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται για να αποκλειστούν εξ αρχής υλικά που δε διαθέτουν ένα ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο δυσκαμψίας και όντας έτσι πιο εύκαμπτα θα οδηγήσουν στην εκδήλωση υπερβολικών παραμορφώσεων.

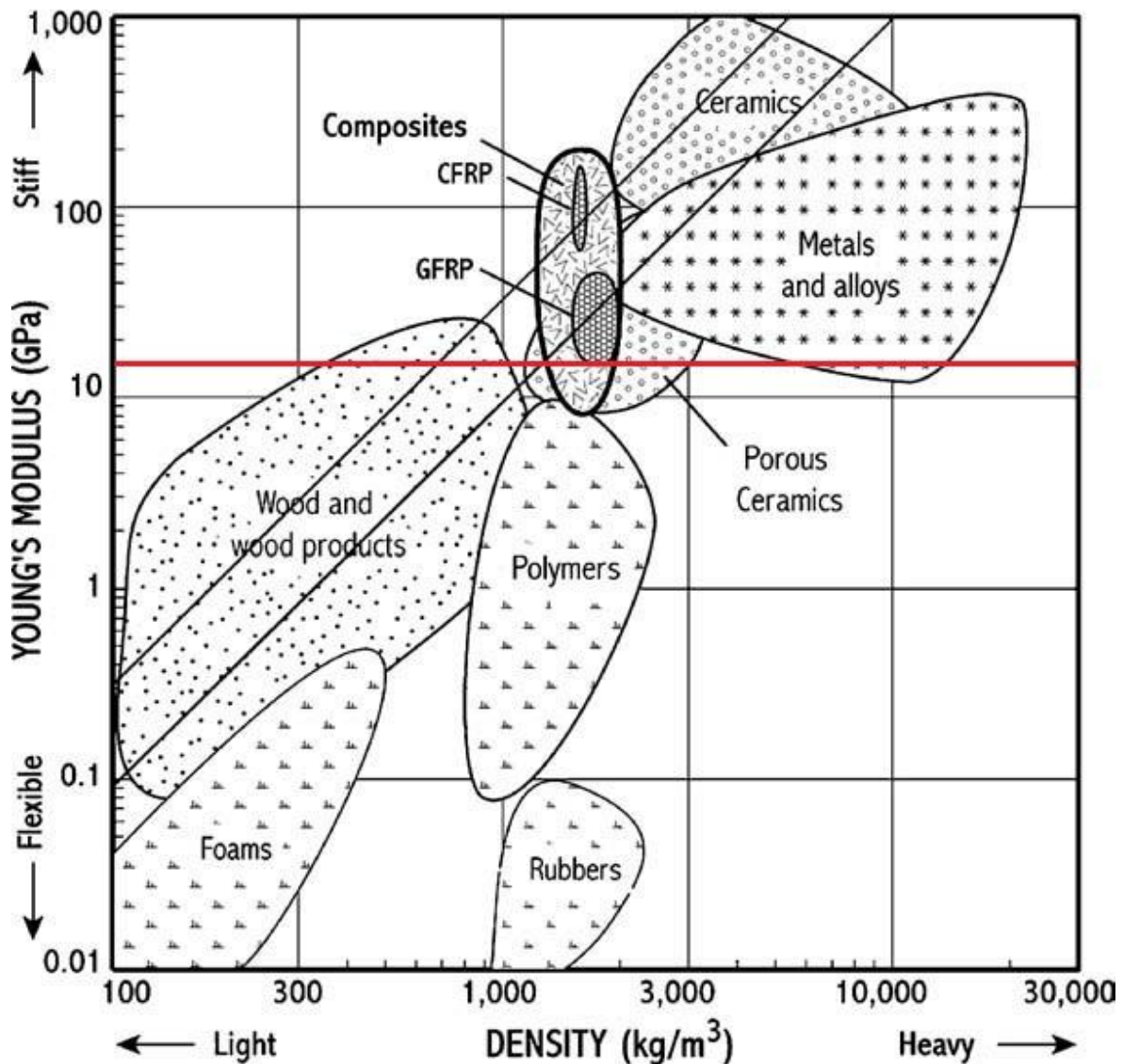
Οι δύο δείκτες που έχουν εισαχθεί μέχρι τώρα αντιστοιχούν στις δύο (E και ρ) από τις τρεις ιδιότητες που καθορίζουν την καταλληλότητα ενός δεδομένου υλικού, ενώ η ένταξη της αντοχής σε κόπωση σε μία αντίστοιχη σχέση είναι αρκετά περίπλοκη διαδικασία. Ο λόγος είναι ότι η αντοχή σε κόπωση σταθερού πλάτους (constant-amplitude fatigue strength) σχετίζεται με μια δεδομένη μέση τιμή φόρτισης και μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί. Ωστόσο, για τα υλικά του πτερυγίου απαιτείται ο προσδιορισμός της αντοχής σε κόπωση μεταβλητού πλάτους (variable-amplitude fatigue strength), που οφείλεται στη χρονικά μεταβαλλόμενη φόρτιση του ανέμου, η οποία είναι ακανόνιστη και στοχαστική, με αποτέλεσμα η χρονοιστορία της φόρτισης να επηρεάζει την αντοχή σε κόπωση με πολύπλοκους τρόπους. Η τελευταία μπορεί να υπολογιστεί για ένα δεδομένο συνδυασμό οιονεί στατικής και χρονικά μεταβαλλόμενης φόρτισης, απαιτούνται όμως δεδομένα από εκτεταμένες πειραματικές έρευνες, τα οποία σπάνια είναι δημοσία διαθέσιμα. Έτσι, όταν απαιτούνται πιο άμεσα διαθέσιμες ιδιότητες των υλικών, τίθεται σε χρήση το “όριο αντοχής” (endurance limit), δηλαδή η αντοχή σε κόπωση με σταθερό πλάτος άπειρης διάρκειας. Επίσης, όπως είναι γνωστό, τα υλικά με μεγαλύτερη αντοχή σε θραύση αστοχούν με ένα πιο σταδιακό τρόπο, παρέχοντας έτσι στο πτερύγιο μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τη στιγμή που θα εμφανιστεί η πρώτη ρωγμή μέχρι την ολοκληρωτική αστοχία. Με αυτό τον τρόπο, πτερύγια που έχουν εμφανίσει βλάβη λόγω κόπωσης, μπορούν να εντοπιστούν κατά τους περιοδικούς ελέγχους και να αντικατασταθούν, πριν προκληθεί αστοχία του συνόλου της κατασκευής [7].

Με βάση το σκεπτικό που αναπτύχθηκε, εισάγεται ο τρίτος και τελευταίος δείκτης για την επιλογή των υλικών της ανεμογεννήτριας, που ορίζεται ως:

$$M_3 = \sigma_{end} \times G_{ic}, \quad (3.3)$$

όπου σ_{end} είναι το όριο αντοχής και G_{ic} είναι ο ρυθμός εκροής της ενέργειας παραμόρφωσης (strain energy).

Οι δείκτες M_1 και M_2 εικονίζονται στο Σχήμα 3.2 μέσω του διαγράμματος μεταξύ της δυσκαμψίας και πυκνότητας των πιο διαδεδομένων υλικών. Οι δύο διαγώνιες γραμμές που διαγράφονται αντιστοιχούν σε δύο σταθερές τιμές του δείκτη M_1 , η χαμηλότερη αντιστοιχεί σε τιμή 0,003, ενώ η υψηλότερη γραμμή σε τιμή 0,006 (E σε GPa και ρ σε kg/m^3). Οι γραμμές αυτές είναι αυθαίρετες και απεικονίζουν υλικά που είναι εξίσου κατάλληλα σε όρους δυσκαμψίας και πυκνότητας. Η οριζόντια κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί σε τιμή του μέτρου Ελαστικότητας $E=15\text{GPa}$, εκφράζοντας το δείκτη M_2 της μεθόδου, που αποτελεί το κάτω όριο του μέτρου Ελαστικότητας που θα πρέπει να έχει το υλικό, ώστε να είναι επαρκώς δύσκαμπτο για χρήση στο πτερόγιο. Με βάση το διάγραμμα, κατάλληλα υλικά είναι αυτά που βρίσκονται πάνω από την οριζόντια κόκκινη γραμμή και πάνω και αριστερά από τις δύο κεκλιμένες. Δυνάμει υποψήφια προκύπτουν να είναι τα σύνθετα υλικά, το ξύλο και τα κεραμικά, τα σύνθετα υλικά όμως φαίνεται ότι επιτυγχάνουν καλύτερο συνδυασμό υψηλότερης δυσκαμψίας (συγκριτικά με το ξύλο) και χαμηλότερης πυκνότητας (συγκριτικά με τα κεραμικά).



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα απεικόνισης της σχέσης μεταξύ δυσκαμψίας και πυκνότητας για ένα σύνολο υλικών [17]

Τέλος, είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερος είναι καθένας από τους τρεις προαναφερθέντες δείκτες, τόσο πιο κατάλληλο είναι το συγκεκριμένο υλικό για χρήση σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας. Ωστόσο κατά τη διαδικασία επιλογής του καταλληλότερου υλικού ανάμεσα σε ένα πλήθος υποψηφίων, αυτά που προκύπτουν ως ιδανικότερα εφαρμόζοντας τις σχέσεις (3.1) και (3.2) και συγκροτώντας ένα διάγραμμα αντίστοιχο με αυτό του Σχήματος 3.2 είναι συνήθως διαφορετικά από τα υλικά που φαίνονται ως καταλληλότερα από την εφαρμογή της σχέσης (3.3). Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να αναπτυχθεί διαδικασία που να λαμβάνει υπόψη ταυτόχρονα και τους δύο δείκτες (M_1 και M_3) και να απεικονίζει τη συσχέτισή τους στο ίδιο διάγραμμα, μέσω μιας συνάρτησης που μπορεί να έχει τη μορφή:

$$M = wM_1 + (1 - w)M_3, \quad (3.4)$$

όπου ο συντελεστής στάθμισης w έχει τιμή 0,5 για τον δείκτη M_1 καθιστώντας τον συντελεστή στάθμισης για τον δείκτη M_2 επίσης ίσο με $1,0 - 0,5 = 0,5$ [23].

3.3 Ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά

3.3.1 Γενικά

Κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης εγκαταστάσεων ανεμογεννητριών, τα υλικά που κυρίως χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή των πτερυγίων ήταν το ξύλο και ο χάλυβας. Το ξύλο έχει χαμηλή πυκνότητα, ωστόσο η εξίσου χαμηλή δυσκαμψία του καθιστά δύσκολο τον περιορισμό των παραμορφώσεων σε πτερύγια μεγάλου μήκους. Επιπλέον, είναι φυσικό υλικό, και ως εκ τούτου περιβαλλοντικά ελκυστικό, ταυτόχρονα όμως είναι δύσκολο να ληφθεί σε αναπαραγωγίμη και υψηλή ποιότητα, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιόπιστη και οικονομική κατασκευή των πτερυγίων. Έτσι, ενώ αρχικά το ξύλο ήταν το κυρίαρχο υλικό κατασκευής των πτερυγίων, πλέον έχει εγκαταλειφθεί και χρησιμοποιείται μόνο ως συστατικό στις δομές sandwich που θα περιγραφούν παρακάτω. Παλαιότερου τύπου πτερύγια κατασκευάζονταν επίσης από χάλυβα ή από χαλύβδινο κράμα νικελίου. Το κράμα νικελίου έχει μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και την οξείδωση και μέσω αυτού στόχος ήταν να ελαττωθεί η στρέβλωση σε ψύξη και να μειωθούν οι κρίσιμες θερμοκρασίες του χάλυβα. Ο χάλυβας όμως έχει πολύ μεγάλο βάρος και μικρή αντοχή σε κόπωση, με αποτέλεσμα να εκλείψει η χρήση και αυτού του υλικού για τις εξεταζόμενες εφαρμογές. Τέλος, σε δοκιμαστικό στάδιο εξετάστηκε η χρήση του αλουμινίου, επειδή έχει πυκνότητα ίση με το 1/3 αυτής του χάλυβα, είναι σχετικά φθινό μέταλλο και με μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό. Ωστόσο βρέθηκε να έχει πολύ μικρότερη διάρκεια ζωής από το χάλυβα και μικρή δυσκαμψία, με αποτέλεσμα να μην χρησιμοποιηθεί πέρα από τις ερευνητικές διαδικασίες [7].

Κυρίως για τους παραπάνω λόγους, τα σύνθετα υλικά είναι αυτά που σήμερα χρησιμοποιούνται, αποκλειστικά πλέον, για την κατασκευή των πτερυγίων, αφού πληρούν τη βασική αλλά και καθοριστική απαίτηση, να είναι ταυτόχρονα δύσκαμπτα και ελαφριά. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους συνοπτικά είναι το μειωμένο βάρος, η βελτιωμένη αντοχή σε διάβρωση, η ηλεκτρομαγνητική διαφάνεια, η αντοχή σε φθορές, η αυξημένη αντοχή έναντι κόπωσης, η θερμική μόνωση, η χαμηλή θερμική διαστολή.

3.3.2 Μόρφωση δομικών στοιχείων

Τα πιο κοινά σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πτερυγίων, αλλά και γενικότερα, είναι πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (glass fiber reinforced polymer-gfrp) ή με ίνες άνθρακα (carbon fiber reinforced polymer-cfrp), τα οποία κατασκευάζονται από ισχυρές ίνες, που λειτουργούν ως οπλισμός, και συγκρατούνται με ένα συνδετικό υλικό, τη μήτρα (matrix). Τα υλικά αυτά είναι ελαφρύτερα από τα συμβατικά, επειδή τόσο οι ίνες όσο και τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται ως συνδετικά υλικά έχουν χαμηλό ειδικό βάρος. Επιπρόσθετα οι ίνες έχουν πολύ μεγαλύτερο λόγο αντοχής προς βάρος (ειδική αντοχή) και ακαμψίας προς βάρος (ειδική ακαμψία) σε σχέση με τα περισσότερα υλικά.

Οι ίνες, παρ' ότι είναι ανθεκτικές και άκαμπτες, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτοτελώς ως δομικό υλικό, επειδή είναι ευπαθείς σε θλιπτικό ή εγκάρσιο φορτίο. Οι ιδιότητες τους μπορούν να αξιοποιηθούν μόνο σε συνδυασμό με το συνεχές μέσο, τη μήτρα, που δεσμεύει τις ίνες, διατηρώντας τις στην κατάλληλη θέση και παρέχοντας τους προστασία από περιβαλλοντικές επιδράσεις. Έτσι μπορούν να λειτουργούν από κοινού, καθιστώντας το σύνθετο υλικό δομικό στοιχείο κατάλληλο να παραλάβει την επιβαλλόμενη φόρτιση. Οι μήτρες είναι δύο ειδών, οι θερμοσκληρυνόμενες (thermosets) (πολυεστέρας, βινυλεστέρας, εποξειδική ρητίνη) και οι θερμοπλαστικές (thermoplastics). Και τα δύο είδη είναι αρκετά μαλακά και εύκαμπτα (δυσκαμψία κάτω από 4GPa) με αποτέλεσμα το σύνθετο υλικό που προκύπτει να έχει μηχανικές ιδιότητες κατώτερες από τις ίνες που το αποτελούν. Στα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια, η μήτρα συνήθως είναι από εποξειδική ρητίνη (epoxy), λόγω της μεγάλης ικανότητας προσαρμογής που διαθέτει, των ικανοποιητικών μηχανικών ιδιοτήτων, της υψηλής αντοχής σε διάβρωση και της ανθεκτικότητας απέναντι στην υγρασία και τη θερμοκρασία, συγκριτικά με άλλα πολυμερή [7]. Επιπρόσθετα, οι εποξειδικές ρητίνες συρρικνώνονται λιγότερο από άλλα υλικά (1,2 έως 4% του όγκου), γεγονός στο οποίο αποδίδονται τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά δεσμού όταν χρησιμοποιούνται ως συγκολλητική ύλη (adhesive), ενώ η διαδικασία στερεοποίησής τους είναι απλή και μπορεί να γίνει σε θερμοκρασίες μεταξύ 5° και 150°C.

Αναφορικά με τα υλικά των ινών, οι ίνες γυαλιού ή υαλονήματα (glass fibers) είναι οι, επί του παρόντος, πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες ίνες στα πτερύγια. Διατίθενται σε διάφορους τύπους, με διαφορετικές χημικές συνθέσεις, με τις ηλεκτρικές ίνες γυαλιού (E-glass fibers) να χρησιμοποιούνται κυρίως στα πτερύγια, λόγω της μηχανικής τους απόδοσης και της αντοχής στη διάβρωση. Κατασκευάζονται από λιωμένο γυαλί και παρουσιάζουν έτσι τις τυπικές ιδιότητες του γυαλιού, όπως σκληρότητα και αντοχή στη διάβρωση. Συνολικά, διαθέτουν ικανοποιητικό συνδυασμό ιδιοτήτων, όπως μέτρια ακαμψία, υψηλή αντοχή και μέτρια πυκνότητα, ενώ έχουν πολύ χαμηλό κόστος συγκριτικά με άλλα υλικά ινών, γεγονός που καθιστά τα υαλονήματα, λόγω και της ικανοποιητικής τους απόδοσης, τα πιο δημοφιλή.

Τα τελευταία χρόνια αυξανόμενη συμμετοχή στα υλικά ινών για εφαρμογές ανεμογεννητριών παρουσιάζουν και οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα ή ίνες γραφίτη) (carbon fibers), λόγω των αυξημένων απαιτήσεων που προκύπτουν από τα ολοένα και μεγαλύτερα πτερύγια, αλλά και της μείωσης του κόστους των ανθρακονημάτων που έχει

επιτελεστεί πρόσφατα. Οι ίνες άνθρακα αποτελούνται από σχεδόν καθαρό άνθρακα, που σχηματίζει ένα κρυσταλλογραφικό πλέγμα εξαγωνικού σχήματος που ονομάζεται γραφίτης. Παρασκευάζονται με δύο διαφορετικές μεθόδους, όπου στη μία χρησιμοποιούνται πολυακρυλονιτριλικές ίνες (polyacrylonitrile-PAN) και στην άλλη ίνες πίσσας (pitch). Οι ίνες πίσσας έχουν μικρότερο κόστος, αλλά διαθέτουν μικρότερη αντοχή από τις ίνες PAN, οι οποίες επικρατούν επειδή έχουν καλύτερη απόδοση και μπορούν να κατασκευάζονται με ποικίλες τιμές δυσκαμψίας και αντοχής. Ο τρόπος παρασκευής καθορίζει και τις μηχανικές ιδιότητες των ινών. Τα ανθρακονήματα παρουσιάζουν εξαιρετικό συνδυασμό υψηλής ακαμψίας, υψηλής αντοχής και χαμηλής πυκνότητας. Συνολικά έχουν πολύ καλύτερη απόδοση από τα υαλονήματα, ωστόσο χρησιμοποιούνται σε μικρότερο ποσοστό από τα τελευταία λόγω του σημαντικά υψηλότερου κόστους. Συγκεκριμένα, τα ανθρακονήματα είναι 5 έως 10 φορές ακριβότερα από τα υαλονήματα, χωρίς το αυξημένο αυτό κόστος να αντισταθμίζεται από τη μείωση της μάζας του πτερυγίου, που σύμφωνα με μελέτες [15], μπορεί να φτάσει μέχρι και σε ποσοστό 40%.

Πρόσφατες έρευνες επικεντρώνονται και στην απόκριση υβριδικών υλικών (hybrids), μέσω της ενσωμάτωσης ινών άνθρακα και γυαλιού σε μεγάλης κλίμακας πτερύγια και έχουν ανακύψει δυνατότητες για σημαντικά καλύτερη απόδοση και ακόμα χαμηλότερο κόστος, απ' ό,τι με τη χρήση αποκλειστικά ινών γυαλιού. Σε κάποιες από αυτές τις μελέτες [13,20], τα ανθρακονήματα έχουν βέλτιστη χρήση όταν αντικαθιστούν στα spar-caps τα υαλονήματα που έχουν γωνία προσανατολισμού 0°, περιορίζοντας έτσι την παραμόρφωση του άκρου του πτερυγίου και παρέχοντας υψηλότερη αντοχή σε λυγισμό και μικρότερο βάρος. Με τα ανθρακονήματα επιτυγχάνεται επαρκής καμπτική δυσκαμψία, ενώ τα υαλονήματα συμβάλουν στην αντοχή σε λυγισμό. Στις περιπτώσεις βέβαια αυτές γεννούνται προβλήματα από τη μεγάλη διαφορά στην αντοχή και την ακαμψία μεταξύ των ινών γυαλιού και άνθρακα και απαιτείται μήτρα υψηλής αντοχής, για να διασφαλιστεί η συνάφεια μεταξύ των στρώσεων.

Οι αναγκαιότητα για περαιτέρω αύξηση του λόγου αντοχής προς βάρος και ακαμψίας προς βάρος με ταυτόχρονο περιορισμό του κόστους έχει οδηγήσει τη βιομηχανία της αεροναυτικής ενέργειας, πέρα από τη διερεύνηση των υβριδικών υλικών, στην αναζήτηση και νέων που θα συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού και κατασκευής πτερυγίων. Ωστόσο, παρόλο που η έρευνα αρχικά ήταν υποσχόμενη στον τομέα αυτό, μέχρι σήμερα δεν έχει επιτευχθεί κάποια σημαντική πρόοδος και εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται οι τυποποιημένες διεργασίες και υλικά που προαναφέρθηκαν. Ίνες εν δυνάμει χρησιμοποιήσιμες είναι οι ίνες αραμιδίου (aramid), πολυαιθυλενίου και κυτταρίνης (cellulose), όλες εκ των οποίων έχουν μέτριες μηχανικές ιδιότητες και χαμηλές ή πολύ χαμηλές πυκνότητες.

Συγκεκριμένα, οι ίνες αραμιδίου (με εμπορική ονομασία Kevlar) διαθέτουν υψηλή χημική αντοχή, χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής και σε σχέση με τις ίνες γυαλιού έχουν υψηλότερη δυσκαμψία (σχεδόν διπλάσιο μέτρο Ελαστικότητας) και εφελκυστική αντοχή και χαμηλότερη πυκνότητα. Κοστίζουν λιγότερο από τις ίνες άνθρακα, όχι όμως και από τις ίνες γυαλιού. Επίσης, έχουν χαμηλή θλιπτική αντοχή, μειωμένη ανθεκτικότητα στην υγρασία, περιορισμένη κατεργαστικότητα και τα δεδομένα σε σχέση με την αντοχή τους στην κόπωση είναι περιορισμένα [15]. Λόγω όμως των θετικών

χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν, θα μπορούσε να εξεταστεί περαιτέρω η συμμετοχή τους, αν όχι αυτοτελώς, σε συνδυασμό με ανθρακονήματα ή υαλονήματα σε υβριδικά σύνθετα υλικά, προκειμένου να διερευνηθεί η καταλληλότητά τους για χρήση σε πτερύγια ανεμογεννήτριας.

Για την κατασκευή των ινοπλισμένων πολυμερών, οι ίνες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως στις ακόλουθες δύο μορφές:

- Ίνες προεμποτισμένες σε ρητίνη (pre-impregnated fibers – Prepreg) σε ελεγχόμενο εργοστασιακό περιβάλλον. Το υλικό αυτό είναι αρχικά διαμορφωμένο σε μορφή ρολών και φυλάσσεται σε χαμηλή θερμοκρασία (-10°C περίπου) μέχρι να φτάσει η στιγμή της χρήσης του. Στη συνέχεια κόβεται στις απαιτούμενες διαστάσεις και τοποθετείται η μια στρώση πάνω στην άλλη προκειμένου να σχηματισθεί η σχεδιαζόμενη διαστρωμάτωση (δηλαδή τοποθετούνται οι ίνες σε διαφορετικές διευθύνσεις) και το ζητούμενο πάχος και ακολουθεί ο πολυμερισμός σε συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας και πίεσης.
- Πεπλεγμένες ίνες, σε μορφή υφάσματος, το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή συνθέτων υλικών με προσανατολισμό ινών σε δύο τουλάχιστον διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους. Και πάλι το ύφασμα κόβεται στις απαιτούμενες διαστάσεις και τοποθετείται σε στρώσεις, ενδιάμεσα των οποίων επαλείφεται η ρητίνη σε υγρή μορφή. Η μορφή του υφάσματος (δηλαδή της πλέξης των ινών) καθορίζει ουσιαστικά την περιεκτικότητα κατά βάρος του συνθέτου υλικού σε οπλισμό, την αναλογία του οπλισμού σε κάθε διεύθυνση καθώς και τη δυνατότητα κατασκευής υλικών με μεγάλη καμπυλότητα, με τη χρήση των ανάλογων καλουπιών [11].

Ανάλογα, τέλος, με τον τρόπο που είναι διατεταγμένες οι στρώσεις του ινοπλισμένου πολυμερούς, διακρίνονται δύο είδη διαφορετικών δομών που χρησιμοποιούνται στο εξωτερικό περίβλημα, αλλά και στην εσωτερική στήριξη του πτερυγίου: οι πολυστρωματικές δομές (laminated) και οι δομές sandwich. Η τοποθέτηση επάλληλων στρώσεων προκύπτει ως αναγκαιότητα από το γεγονός ότι οι ίνες δεν συνεισφέρουν στην αντοχή κατά την εγκάρσια στη διεύθυνση των ινών έννοια και με δεδομένο ότι η αντοχή του συνδετικού μέσου είναι πολύ μικρή, καθίσταται αναγκαίο να προστεθούν στρώσεις με διάφορους προσανατολισμούς, ώστε να παραλαμβάνονται τα επιβαλλόμενα φορτία. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι με τη δημιουργία μιας διαστρωμάτωσης με αλληλουχία στρώσεων σε διαφορετικούς προσανατολισμούς (πολυστρωματική δομή). Βέβαια, παρόλο που η διαστρωμάτωση αυτή μπορεί να παραλάβει φορτία επίπεδης έντασης, η αντοχή και η δυσκαμψία της ανά μονάδα βάρους για δεδομένη διεύθυνση είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες τιμές μίας μεμονωμένης στρώσης [7,33].

Στις sandwich δομές, ισχυρές και δύσκαμπτες στρώσεις ινών τοποθετούνται συμμετρικά εκατέρωθεν του ασθενέστερου πυρήνα. Τα πιο κοινά υλικά πυρήνα είναι αφρώδη δομικά υλικά, όπως PVC, και προϊόντα ξύλου, όπως το κόντρα πλακέ και το ξύλο balsa, που είναι και το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο. Μεταξύ των στρώσεων και του πυρήνα, χρησιμοποιείται συγκολλητική ύλη, για την αποκατάσταση της συνέχειας και τη διατήρηση της διατμητικής ικανότητας του πυρήνα. Η προσθήκη πυρήνα αυξάνει το πάχος της διατομής και συνακόλουθα την καμπτική δυσκαμψία και αντοχή, χωρίς αυτό να συνεπάγεται αύξηση του βάρους.

3.3.3 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων

Οι μηχανικές ιδιότητες (μέτρο Ελαστικότητας, μέτρο διάτμησης, αντοχή σε εφελκυσμό κτλ) μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ διαφορετικού είδους ινών, αλλά και μεταξύ ινών του ίδιου υλικού, που έχουν όμως παρασκευαστεί με διαφορετική διαδικασία. Με βάση την περιεκτικότητα του σύνθετου υλικού σε καθένα από τα δύο συστατικά μέρη (ίνες και μήτρα) καθορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη, τα οποία είναι κρίσιμα για τον περαιτέρω χαρακτηρισμό του σύνθετου υλικού, αναφορικά με τις μηχανικές του ιδιότητες [11]:

- Κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ίνες (Fiber Volume Ratio):

$$u_f = \frac{V_f}{V}, \quad (3.5)$$

όπου V_f ο όγκος των ινών και V ο συνολικός όγκος του σύνθετου υλικού.

- Κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες (Fiber Weight Ratio):

$$w_f = \frac{W_f}{W}, \quad (3.6)$$

όπου W_f το βάρος των ινών και W το συνολικό βάρος του σύνθετου υλικού.

- Κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ρητίνη (μήτρα) (Matrix Volume Ratio):

$$u_m = \frac{V_m}{V}, \quad (3.7)$$

όπου V_m ο όγκος της ρητίνης.

- Κατά βάρος περιεκτικότητα σε ρητίνη (Matrix Weight Ratio):

$$w_m = 1 - w_f = \frac{W_m}{W}, \quad (3.8)$$

όπου W_m το βάρος της ρητίνης.

- Περιεκτικότητα σε κενά (Void Volume Ratio):

$$u_v = 1 - u_f - u_m = \frac{V_v}{V}, \quad (3.9)$$

όπου V_v ο όγκος των κενών.

- Συνολική πυκνότητα σύνθετου υλικού:

$$\rho = \rho_f u_f + \rho_m u_m, \quad (3.10)$$

όπου ρ_f η πυκνότητα των ινών και ρ_m η πυκνότητα της μήτρας.

Οι τελικές μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού επηρεάζονται από την αναλογία με την οποία έχουν συνδυαστεί τα δύο βασικά συστατικά, ο σπλισμός και η μήτρα, και την περιεκτικότητά του σε κενά. Η αναλογία αυτή εκφράζεται από το νόμο ανάμιξης (rule of mixture), που δίνεται από την σχέση:

$$E = u_f E_f + u_m E_m, \quad (3.11)$$

Είναι προφανές ότι δεν μπορεί να διασφαλιστεί ασφαλής επιλογή των υλικών, αν δεν υπάρχει πλήρης περιγραφή των μηχανικών τους ιδιοτήτων, μέσω του ακριβή πειραματικού ελέγχου τους σε δοκιμές εφελκυσμού, διάτμησης, κόπωσης και της αξιόπιστης πιστοποίησης τους, μετά από εκτεταμένη στατιστική επεξεργασία. Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρατίθενται οι κυριότερες μηχανικές ιδιότητες για μια σειρά από ίνες που χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή των σύνθετων υλικών, ενώ στον Πίνακα 3.2 παρατίθενται ενδεικτικά οι τελικές μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών, που αποτελούνται από τις ίνες αυτές και από μια τυπική θερμοσκληρυνόμενη μήτρα με μέτρο Ελαστικότητας $E_m=3\text{GPa}$, αντοχή σε εφελκυσμό $\sigma_m=100\text{MPa}$ και πυκνότητα $\rho_m=1,2\text{g/cm}^3$.

Πίνακας 3.1: Μηχανικές ιδιότητες των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων ινών [17]

Είδος ίνας	Μέτρο Ελαστικότητας, E_f (GPa)	Εφελκυστική αντοχή, σ_f (MPa)	Πυκνότητα, ρ_f (g/cm ³)
E-glass	72	3500	2,54
Carbon	350	4000	1,77
Aramid	120	3600	1,45
Polyethylene	117	2600	0,97
Cellulose	80	1000	1,50

Πίνακας 3.2: Τελικές μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών [17]

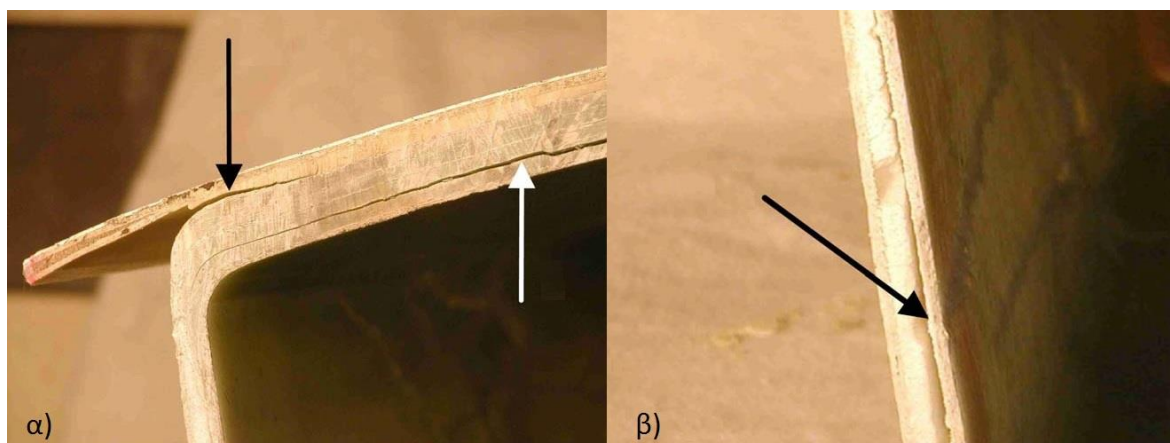
Είδος ίνας	Προσανατολισμός, θ	Μέτρο Ελαστικότητας, E_c (GPa)	Εφελκυστική αντοχή, σ_c (MPa)	Πυκνότητα, ρ_c (g/cm ³)	Δείκτης M_1 ($E_c^{1/2}/\rho_c$)
E-glass	0°	38	1800	1,87	3,3
	random	9,3	420	1,60	1,9
Carbon	0°	176	2050	1,49	8,9
	random	37	470	1,37	4,4
Aramid	0°	61	1850	1,33	5,9
	random	14,1	430	1,27	1,9
Polyethylene	0°	60	1350	1,09	7,1
	random	13,8	330	1,13	3,3
Cellulose	0°	41	550	1,35	4,7
	random	10,1	170	1,29	2,5

3.3.4 Μηχανισμοί αστοχίας – Έλεγχοι

Η πολυπλοκότητα κατά τη σχεδιαστική διαδικασία των πτερυγίων δεν σχετίζεται μόνο με την πληθώρα των κριτηρίων που πρέπει να πληρούνται και τη δυσκολία στον ακριβή προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, αλλά έγκειται και στο γεγονός ότι οι μηχανισμοί αστοχίας, που είναι δυνατόν να εκδηλωθούν σε μια κατασκευή από σύνθετα υλικά και με ειδική γεωμετρία, δεν είναι πάντα πλήρως γνωστοί και κατανοητοί, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των μεταλλικών κατασκευών. Στην κατεύθυνση αυτή έχουν διεξαχθεί, ιδίως τα τελευταία χρόνια, αρκετά πειράματα πλήρους κλίμακας, που έχουν συμβάλλει στο να γίνουν εν μέρει κατανοητοί και να κατηγοριοποιηθούν οι διάφοροι μηχανισμοί αστοχίας που μπορούν να εκδηλωθούν στις δομές σύνθετων υλικών που απαρτίζουν το πτερύγιο και που θα περιγραφούν συνοπτικά στη συνέχεια.

Επιπλέον, μέσω υπολογιστικών μεθόδων, σε συνδυασμό με τα κριτήρια θραύσης σύνθετων υλικών (Tsai–Wu, Tsai–Hill κτλ), είναι δυνατόν να προβλεφθεί το σημείο και το είδος της αστοχίας που θα εκδηλωθεί ή ακόμα και να μοντελοποιηθεί η εξέλιξη της αστοχίας του πτερυγίου, που έχει ανιχνευθεί, και έτσι να ληφθεί η πιο ασφαλής και συμφέρουσα απόφαση σε σχέση με το αν το πτερύγιο θα αντικατασταθεί, θα επισκευαστεί ή θα συνεχίσει να λειτουργεί ως έχει. Αναγκαία προϋπόθεση για τον έγκαιρο και έγκυρο προσδιορισμό βλαβών είναι και η εφαρμογή μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου, όπως η τοποθέτηση αισθητήρων που μπορούν να ανιχνεύσουν (για παράδειγμα με σάρωση μέσω υπερήχων) πιθανές αστοχίες που έχουν εκδηλωθεί στο πτερύγιο. Αυτό επιτάσσεται και από την δυσκολία πρόσβασης στις εγκατεστημένες μονάδες (ιδίως στα υπεράκτια αιολικά πάρκα), που καθιστά περιορισμένες τις δυνατότητες ανθρώπινων επιθεωρήσεων και ελέγχου. Επίσης, έχει αναπτυχθεί ο σχεδιασμός με την προσέγγιση της ανοχής ατελειών (damage tolerance), με βάση τον οποίο ένα τμήμα της κατασκευής θα μπορεί να είναι λειτουργικό και αποδοτικό έχοντας υποστεί βλάβη ή φέροντας μία κατασκευαστική ατέλεια (από χειρισμούς κατά την τοποθέτησή του για παράδειγμα) για το υπόλοιπο της ζωής του.

Όσον αφορά τους μηχανισμούς αστοχίας των σύνθετων υλικών, συνοπτικά ως σημαντικότεροι μπορούν να αναφερθούν οι ακόλουθοι [15,19,28]: αστοχία ινών (που προκαλείται από διαχωρισμό και ψαθυρή θραύση ινών υπό εφελκυστικό φορτίο και από λυγισμό υπό θλιπτικό φορτίο), αστοχία μήτρας, αποκόλληση ινών – μήτρας, αποκόλληση (διαχωρισμός παρακείμενων στρώσεων) και θραύση στρωμάτων του laminate υλικού ή αποκόλληση του εξωτερικού κελύφους από το spar–cap, εκδήλωση τοπικού ή καθολικού λυγισμού υπό θλιπτικό φορτίο. Επιπρόσθετα, στις δομές sandwich αστοχία μπορεί να εκδηλωθεί λόγω θραύσης του πυρήνα ή λόγω αποκόλλησης μεταξύ πυρήνα και γειτονικής στρώσης υλικού. Τέλος, αστοχία είναι δυνατόν να προκληθεί στην συγκόλληση μεταξύ του προσήνεμου και υπήνεμου εξωτερικού κελύφους κατά μήκους του leading ή του trailing edge. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 3.3 εικονίζονται κάποιες από τις μορφές αστοχίας που εκδηλώθηκαν στο κουτί εσωτερικής στηρίξεως πτερυγίου που εξετάστηκε σε πείραμα πλήρους κλίμακας, όπου είναι εμφανής η αστοχία της συγκολλητικής ύλης στη διεπιφάνεια εξωτερικού κελύφους και spar–cap και ο διαχωρισμός στρώσεων της laminate δομής στο τελευταίο (Σχήμα 3.3α), όπως και η αποκόλληση του πυρήνα από τις στρώσεις που τον περιβάλλουν στην sandwich δομή του shear–web (Σχήμα 3.3β).



Σχήμα 3.3: Μορφές αστοχίας που εκδηλώθηκαν στο κουτί εσωτερικής στηρίξεως πτερυγίου κατά την εκτέλεση πειράματος [28]

Στις περισσότερες περιπτώσεις, όπως και στην συγκεκριμένη, δεν εκδηλώνεται μόνο μία από τις προαναφερόμενες μορφές αστοχίας, αλλά συνδυασμός αυτών, ενώ η εκδήλωση μιας μορφής αστοχίας συνήθως οδηγεί στην πρόκληση και άλλων, για παράδειγμα η ρηγματώση του πυρήνα ή η αποκόλληση φύλλων – πυρήνα είναι δυνατόν να προκαλέσει τοπικό λυγισμό στην αντίστοιχη περιοχή του πτερυγίου, η αποκόλληση του εξωτερικού περιβλήματος του πτερυγίου από το κουτί στηρίξεως μπορεί να οδηγήσει σε καθολικό λυγισμό [24] ή αντίστροφα η καμπύλωση των στρώσεων που οφείλεται σε λυγισμό προκαλεί υψηλότερες τάσεις που μπορούν να προκαλέσουν αποκόλληση των στρωμάτων στο θλιβόμενο spar-car [28] (Σχήμα 3.3α). Σε πειράματα πλήρους κλίμακας, όπου η φόρτιση επιβάλλεται μέχρι την ολοκληρωτική αστοχία του εξεταζόμενου μοντέλου, αυτές οι συνδυασμένες μορφές αστοχίας δυσκολεύουν τον εντοπισμό της αστοχίας που εκδηλώθηκε πρώτη και πολύ περισσότερο τον προσδιορισμό αυτής που οδήγησε τελικά στην ολοκληρωτική αστοχία του μέλους. Πάντως, αναλογιζόμενοι ότι οι περισσότεροι από τους μηχανισμούς αστοχίας που προαναφέρθηκαν οδηγούν στην εκδήλωση λυγισμού ή το αντίστροφο, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το κουτί εσωτερικής στηρίξεως, αλλά και το πτερύγιο στο σύνολό του, είναι λεπτότοιχες –και άρα ευπαθείς σε φαινόμενα αστάθειας– κατασκευές, μπορούμε να πούμε ότι ο λυγισμός είναι μία από τις πιο καθοριστικές μορφές αστοχίας [33].

3.4 Λειτουργίες των υλικών στην εσωτερική στήριξη πτερυγίου

Το μέγεθος και το είδος των καταπονήσεων που υφίσταται το εσωτερικό κουτί στηρίξεως του πτερυγίου καθορίζουν τις ιδιότητες και τα πάχη των σύνθετων υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο θα διαταχθούν ώστε να λειτουργήσουν με το βέλτιστο τρόπο και να αξιοποιηθούν στο έπακρο οι ιδιότητές τους. Η διάταξη των στρώσεων σύνθετων υλικών που απαρτίζουν τον εξεταζόμενο μηχανισμό εσωτερικής στηρίξεως, οι μηχανικές τους ιδιότητες, τα πάχη τους κτλ θα δοθούν αναλυτικά στο σχετικό κεφάλαιο.

Τα spar-cars κατασκευάζονται από πολυστρωματικό σύνθετο υλικό, με τις στρώσεις ινών να είναι τοποθετημένες σε διαφορετικούς προσανατολισμούς, για να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυσκαμψία και αντοχή. 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. Αυτό συνδέεται και με την βασική επιλογή που υλοποιείται στα υβριδικά σύνθετα υλικά, όπου τα ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται για τις στρώσεις με προσανατολισμό 0° παρέχοντας υψηλή καμπτική δυσκαμψία, ενώ για τις υπόλοιπες στρώσεις επιλέγονται υαλονήματα, παρέχοντας την απαιτούμενη αντοχή σε λυγισμό. Πέρα από τις διευθύνσεις αυτές, και άλλοι συνδυασμοί διευθύνσεων ινών είναι εφικτοί, αλλά η διεύθυνση $0^\circ/\pm 45^\circ$ είναι η πιο πρακτική από κατασκευαστική άποψη [20], ενώ μεγαλύτερες γωνίες είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση την αντοχή σε κάμψη του spar-cap [15].

Τα shear-webs, όπως και το εξωτερικό κέλυφος του πτερυγίου έχουν δομή υλικού sandwich, που επιλέγεται για μέρος της κατασκευής της ανεμογεννήτριας, επειδή οι δομές αυτές εμφανίζουν πολλά θετικά χαρακτηριστικά, όπως υψηλό λόγο δυσκαμψίας προς βάρος, υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος, εξαιρετικές ιδιότητες κόπωσης. Λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, σε μελέτες ερευνάται η δυνατότητα χρησιμοποίησης sandwich δομής και στα spar-caps [33]. Η εφαρμογή ενός υλικού πυρήνα αυξάνει τοπικά την αντοχή σε κάμψη, η οποία απαιτείται για την αποφυγή εκδήλωσης λυγισμού, όταν το συγκεκριμένο μέλος υποβάλλεται σε θλιπτικά ή διατμητικά φορτία. Ο πυρήνας λειτουργεί ως μοχλοβραχίονας μεταξύ των δύο διαστρωματώσεων και αναλαμβάνει τα διατμητικά φορτία, ενώ οι τελευταίες αναλαμβάνουν τα φορτία εφελκυσμού και θλίψης. Στο εξωτερικό περίβλημα η δομή sandwich χρησιμοποιείται για να ενισχυθεί η αντοχή σε λυγισμό στην edge-wise φόρτιση, ενώ στα shear-webs χρησιμοποιείται για να μεταφέρουν τις διατμητικές δυνάμεις από την flap-wise φόρτιση, συνεπώς αποτελούν λεπτές πλάκες που δέχονται θλιπτικό αξονικό φορτίο στο επίπεδό τους και άρα είναι ευάλωτες σε τοπικό διατμητικό λυγισμό.



Σχήμα 3.4: Πολυστρωματική και sandwich δομή σε spar-cap και shear-web αντίστοιχα [24]

4 Στοιχεία θεωρίας λυγισμού

4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξήχθη το συμπέρασμα ότι μεταξύ των διάφορων μηχανισμών αστοχίας που είναι δυνατόν να εκδηλωθούν στο πτερύγιο ανεμογεννήτριας, και ειδικότερα στο κουτί εσωτερικής στηρίξεως, ο λυγισμός έχει εξέχοντα ρόλο. Αυτό όχι μόνο επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα πολλών πειραμάτων πλήρους κλίμακας, όπου η εκδήλωση λυγισμού είναι είτε πρωταρχική είτε η καθοριστική μορφή αστοχίας (Σχήμα 4.1), αλλά και υποδηλώνεται από την ίδια τη γεωμετρία των κατασκευών αυτών. Συγκεκριμένα, το κουτί εσωτερικής στηρίξεως, όντας κατασκευή λεπτότοιχη και επιμήκης, διαθέτει μεγάλη λυγηρότητα, ικανοποιώντας έτσι τη μία από τις δύο βασικές προϋποθέσεις εμφάνισης λυγισμού (δεύτερη είναι η ύπαρξη θλιπτικών τάσεων), σε τοπικό ή/και σε καθολικό επίπεδο. Έτσι κατά το σχεδιασμό λυγηρών κατασκευών είναι αναγκαία η μελέτη τους σε θέματα ευστάθειας.

Το φαινόμενο του λυγισμού αποτελεί αντικείμενο της ευρύτερης περιοχής της ευστάθειας, βασικό χαρακτηριστικό του οποίου είναι ότι κατά την στιγμή που αυτός λαμβάνει χώρα, η αστοχία δεν οφείλεται σε υπέρβαση τάσεως, αφού η ένταση μπορεί είτε να υπερβαίνει (ανελαστικός λυγισμός) είτε όχι (ελαστικός λυγισμός) το όριο αναλογίας, αλλά σε αστάθεια ισορροπίας μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων και ακολούθως υπερβολική παραμόρφωση, η οποία λαμβάνει χώρα αμέσως μετά το λυγισμό. Συνεπώς, η αποτροπή λυγισμού (ή η αύξηση της φέρουσας ικανότητας) δεν επιτυγχάνεται με αύξηση της αντοχής, αλλά με αύξηση της ακαμψίας ή διαφοροποίηση της γεωμετρίας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής του κρίσιμου φορτίου και τη μείωση των βελών κάμψης και της παραμόρφωσης. Έτσι το πρόβλημα της αντοχής δεν είναι θέμα αποτροπής αναπτύξεως τάσεων ορισμένου μεγέθους, αλλά πρόβλημα αποτροπής εμφάνισης της ανεπιθύμητης κατάστασης αστάθειας, διότι αυτή οδηγεί ακολούθως για μικρή αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου σε απότομη και έντονη αύξηση των τάσεων και των μετατοπίσεων. Γι' αυτό και ο λυγισμός αποτελεί από πρακτικής πλευράς κριτήριο σχεδιασμού [4].

Επομένως, ο λυγισμός ως φαινόμενο αναφέρεται στην ξαφνική μεγάλη αύξηση των παραμορφώσεων ενός φορέα για μικρή αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων. Η μέγιστη τιμή του φορτίου για την οποία ο φορέας παραμένει ευθύγραμμος, πριν καμπυλωθεί, ονομάζεται κρίσιμο φορτίο λυγισμού (critical ή buckling load). Οι διαφορετικές μορφές λυγισμού που είναι δυνατόν να εκδηλωθούν είναι: α) τοπικός λυγισμός, σε θλιβόμενα ή καμπτόμενα μέλη, κατά τον οποίο μια συγκεκριμένη περιοχή του μέλους, όπου η θλίψη είναι μέγιστη, υφίσταται τοπική παραμόρφωση, ενώ μορφή τοπικού λυγισμού θεωρείται και ο διατμητικός λυγισμός, β) καμπτικός λυγισμός, κατά τον οποίο οι διατομές μετατοπίζονται χωρίς να στρέφονται, γ) στρεπτικός λυγισμός, κατά τον οποίο οι διατομές στρέφονται χωρίς να μετατοπίζονται και δ) στρεπτοκαμπτικός (ή πλευρικός λυγισμός), που αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων μορφών.



Σχήμα 4.1: Εκδήλωση τοπικού λυγισμού κατά την εκτέλεση πειράματος πλήρους κλίμακας [24]

4.2 Γραμμική και μη γραμμική ανάλυση λυγισμού

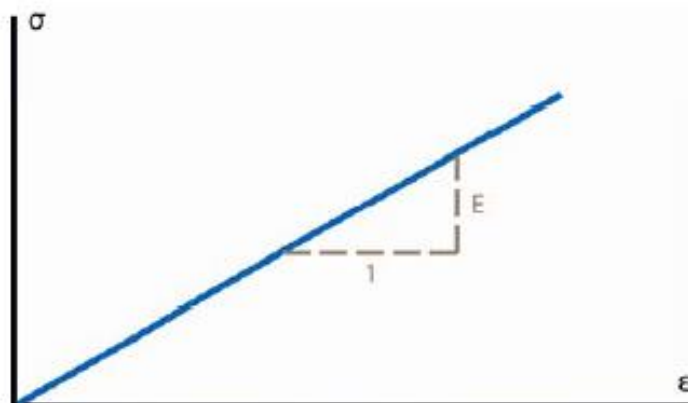
Η ανάλυση λυγισμού μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, μέσω γραμμικής ή μη γραμμικής θεωρίας. Η επιλογή της πλέον πρόσφορης μεθόδου ανάλυσης καθορίζεται από τις συνθήκες που χαρακτηρίζουν ή τις παραδοχές που γίνονται για το εξεταζόμενο πρόβλημα, την ακρίβεια που απαιτείται για τον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου λυγισμού, καθώς και τα μεγέθη που απαιτούνται να εξαχθούν από την ανάλυση.

Μέσω της γραμμικής ανάλυσης ή ανάλυσης ιδιοτιμών (linear ή eigenvalue buckling analysis) προβλέπεται η θεωρητική αντοχή λυγισμού μίας ιδεατά ελαστικής κατασκευής, μέσω του υπολογισμού των ιδιοτιμών (eigenvalues), δηλαδή των διαδοχικών φορτίων Euler και των αντίστοιχων κανονικών μορφών λυγισμού (normal buckling modes) ή ιδιοσυναρτήσεων (eigenfunctions), μέσω των οποίων καθορίζεται μόνο το σχήμα της ελαστικής γραμμής και όχι το μέγεθος της παραμόρφωσης. Από πρακτικής πλευράς, ενδιαφέρει η μικρότερη ιδιοτιμή, που αντιστοιχεί στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού πρώτης τάξης ή απλώς κρίσιμο φορτίο λυγισμού ή φορτίο Euler και η αντίστοιχη ιδιοσυνάρτηση, που αντιστοιχεί στην πρώτη ή θεμελιώδη ιδιομορφή λυγισμού [4]. Συνήθως οι ανώτερες ιδιομορφές λυγισμού και τα αντίστοιχα κρίσιμα φορτία είναι μόνο μαθηματικές λύσεις χωρίς πρακτική σημασία, αφού το φορτίο Euler θα είναι το κρίσιμο ως ελάχιστο. Τα φορτία λυγισμού για περιπτώσεις φορέων με συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης και στήριξης είναι άμεσα διαθέσιμα μέσω πινακοποιημένων λύσεων. Ωστόσο, στην πραγματικότητα κατασκευαστικές ατέλειες και μη γραμμικότητες συνήθως αποτρέπουν τις περισσότερες κατασκευές από το να φτάσουν τις ιδιοτιμές που προβλέπονται από τη γραμμική ανάλυση, αφού μέσω αυτής τα αναμενόμενα φορτία λυγισμού υπερεκτιμώνται. Έτσι η μέθοδος αυτή δε συνίσταται για ακριβείς και αξιόπιστες αναλύσεις λυγισμού, που προορίζονται να εφαρμοστούν σε πραγματικό και όχι θεωρητικό επίπεδο.

Απεναντίας, η μη γραμμική ανάλυση (non-linear buckling analysis) είναι πιο ακριβής από την ανάλυση ιδιοτιμών, επειδή η πρόβλεψη των φορτίων λυγισμού γίνεται μέσω στατικής ανάλυσης μεγάλων παραμορφώσεων. Βασίζεται σε ένα σχετικά απλό υπολογιστικό μοντέλο, μέσω του οποίου το επιβαλλόμενο φορτίο αυξάνεται βαθμιαία, μέχρι να βρεθεί ένα ορισμένο επίπεδο φόρτισης, στο οποίο η κατασκευή γίνεται ασταθής, δηλαδή πλέον μικρή αύξηση της φόρτισης να προκαλεί πολύ μεγάλες παραμορφώσεις. Η πραγματική μη γραμμική φύση αυτής της ανάλυσης επομένως επιτρέπει τη μοντελοποίηση γεωμετρικών ατελειών, κενών και μη γραμμικοτήτων υλικού και γεωμετρίας.

Η γραμμική ανάλυση λυγισμού είναι υπολογιστικά αρκετά απλούστερη και συντομότερη, ιδιαίτερα κατά την εφαρμογή αριθμητικών αλγορίθμων ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για το λόγο αυτό έχει μεγάλη σημασία να είναι σαφές σε ποιες περιπτώσεις τα αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων λυγισμού είναι αξιόπιστα και επαρκή, και επομένως δεν υπάρχει λόγος να πραγματοποιηθούν μη γραμμικές αναλύσεις. Εάν δεν υπάρχει, ή αγνοηθεί, η μη γραμμική συμπεριφορά ενός μέλους ή μίας κατασκευής, τότε γίνεται η θεώρηση ότι η κατασκευή συμπεριφέρεται γραμμικά, και επιτρέπεται να εφαρμόζεται γραμμική ανάλυση. Οι προϋποθέσεις υπό τις οποίες η συμπεριφορά είναι γραμμική, που αποτελούν και παραδοχές που γίνονται στη γραμμική ανάλυση, και οριοθετούν το πεδίο εφαρμογής της, είναι οι εξής δύο [1]:

- Το υλικό συμπεριφέρεται ως γραμμικά ελαστικό. Επομένως, οι ανηγμένες παραμορφώσεις ε είναι ανάλογες των τάσεων σ . Η κλίση της γραφικής παράστασης τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων ισούται με το μέτρο ελαστικότητας E που εκφράζει τη δυσκαμψία του υλικού, δηλαδή την αντίσταση που προβάλλει το υλικό σε παραμόρφωση υπό συγκεκριμένη τάση. Ισχύει δηλαδή ο νόμος του Hooke, που συνδέει γραμμικά τις τάσεις με τις ανηγμένες παραμορφώσεις: $\sigma = E \times \varepsilon$ (Σχήμα 4.2). Για όλα τα συνηθισμένα δομικά υλικά η παραδοχή αυτή ισχύει για το αρχικό μόνο τμήμα του νόμου τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων, ενώ πέραν κάποιου μεγέθους τάσεων η σχέση σ - ε παύει να είναι σχέση γραμμικής αναλογίας και η αντίστοιχη γραφική παράσταση δεν είναι πλέον ευθύγραμμη. Επομένως, η παραπάνω παραδοχή ουσιαστικά αναφέρεται στην απαίτηση να είναι το επίπεδο φόρτισης επαρκώς χαμηλό, ώστε σε όλες τις θέσεις του φορέα οι αναπτυσσόμενες τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις να παραμένουν στην περιοχή γραμμικής αναλογίας.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων γραμμικώς ελαστικού υλικού, που υπακούει στο νόμο του Hooke κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση

- Οι πραγματοποιούμενες μετατοπίσεις όλων των σημείων του φορέα είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τις διαστάσεις της διατομής του μέλους, γι' αυτό και η γραμμική θεωρία λυγισμού είναι θεωρία μικρών βελών. Επομένως, η γεωμετρία του φορέα στην παραμορφωμένη του κατάσταση μοιάζει πολύ με την αντίστοιχη απαραμόρφωτη, ώστε κατά τους υπολογισμούς να μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτές οι δύο γεωμετρίες ταυτίζονται. Έτσι κατά τη στατική ανάλυση αγνοείται η παραμόρφωση και οι εξισώσεις ισορροπίας γράφονται στην απαραμόρφωτη κατάσταση, αν και στην πραγματικότητα κάθε φορτιζόμενος φορέας παραμορφώνεται και ισορροπεί στην παραμορφωμένη κατάσταση.

Εφόσον ισχύουν και οι δύο αυτές παραδοχές, ισχύει η αρχή της επαλληλίας, δηλαδή οι αναπτυσσόμενες εντάσεις και μετατοπίσεις είναι γραμμικώς ανάλογες των επιβαλλόμενων εξωτερικών φορτίων, ενώ η γραφική παράσταση της επιβαλλόμενης εξωτερικής φόρτισης P και κάποιας χαρακτηριστικής αναπτυσσόμενης μετατόπισης δ είναι ευθεία γραμμή και ονομάζεται δρόμος ισορροπίας, διότι κάθε σημείο της δείχνει μία κατάσταση ισορροπίας του συστήματος. Η ισχύς της αρχής της επαλληλίας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή όλων των μεθόδων της κλασικής στατικής ανάλυσης, όπως είναι η μέθοδος των δυνάμεων και η μέθοδος των μετατοπίσεων. Η παραδοχή των μικρών μετατοπίσεων λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό του μητρώου στιβαρότητας \mathbf{K} και του διανύσματος των εξωτερικών δράσεων \mathbf{R} , όπου οι ολοκληρώσεις γίνονται στον αρχικό όγκο των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και κατά τον σχηματισμό του μητρώου παραμορφώσεως \mathbf{B} , όπου οι σχέσεις ανηγμένων παραμορφώσεων – μετατοπίσεων του στοιχείου είναι σταθερές και ανεξάρτητες από τις μετατοπίσεις του στοιχείου. Η παραδοχή του γραμμικού ελαστικού υλικού εμπεριέχεται στη χρήση σταθερού καταστατικού μητρώου \mathbf{C} , ενώ η παραδοχή των σταθερών συννοριακών συνθηκών πραγματοποιείται με τη χρήση μη μεταβαλλόμενων δεσμευμένων σχέσεων στις καθολικές εξισώσεις ισορροπίας.

Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις μία ή και οι δύο αυτές παραδοχές δεν ισχύουν. Εφόσον καταλύεται η πρώτη παραδοχή η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από μη γραμμικότητα υλικού, ενώ όταν καταλύεται η δεύτερη έχουμε μη γραμμικότητα γεωμετρίας και παρατηρείται κυρίως σε δομικά μέλη και φορείς με σημαντική δυσκαμψία και με μεγάλη λυγηρότητα, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται στους υπολογισμούς να επιβάλλονται περιορισμοί στο μέγεθος των μετατοπίσεων. Εάν καταλύονται και οι δύο, υπάρχει ταυτόχρονα μη γραμμικότητα υλικού και μη γραμμικότητα γεωμετρίας. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις οι δρόμοι ισορροπίας δεν είναι πλέον ευθύγραμμοι αλλά καμπύλοι, δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας και απαιτείται η εφαρμογή ειδικών μεθόδων μη γραμμικής ανάλυσης.

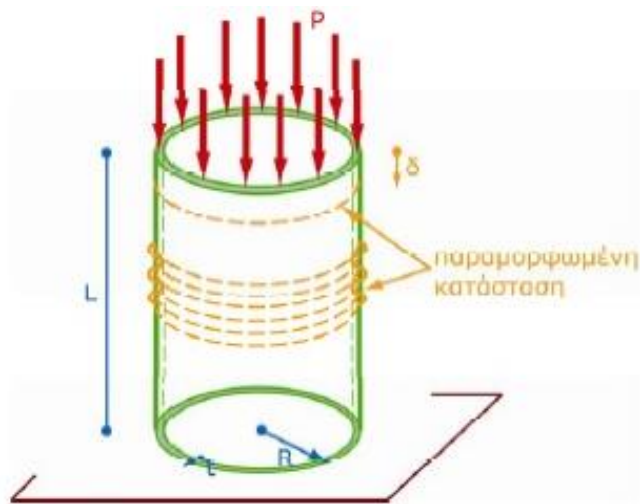
Η επιλογή της μεθόδου ανάλυσης που θα εφαρμοστεί δεν επηρεάζεται μόνο από την ισχύ των παραπάνω προϋποθέσεων και την ακρίβεια που απαιτείται στον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου λυγισμού, αλλά και από τα μεγέθη που επιδιώκεται να εξαχθούν από την ανάλυση. Μέσω της γραμμικής ανάλυσης μπορούμε να προσδιορίσουμε κρίσιμα φορτία, δεν προκύπτουν όμως πληροφορίες για την συμπεριφορά του φορέα μετά το λυγισμό και δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός οποιουδήποτε μεγέθους κινηματικού (βέλος, στροφή) ή εντατικού (ροπή κάμψης, τέμνουσα, αξονική δύναμη) [4]. Τα μεγέθη αυτά μπορούν να υπολογιστούν μόνο με εφαρμογή μη γραμμικής

ανάλυσης, απ' όπου μπορούν να προκύψουν πληροφορίες και για τον δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας, εκτός από τον κύριο, καθιστώντας έτσι δυνατή και τη μελέτη της μεταλυγισμικής αντοχής, η οποία υφίσταται στην περίπτωση του συνήθους ή ήπιου λυγισμού (mild ή gentle buckling), κατά τον οποίο μία κατασκευή μπορεί να φέρει φορτίο μεγαλύτερο του κρίσιμου άνευ κινδύνου αστοχίας, σε αντίθεση με τον ακαριαίο ή βίαιο λυγισμό (snap-through ή violent buckling), ο οποίος οδηγεί άμεσα σε αστοχία. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι με την ανάλυση λυγισμού, είτε αυτή είναι γραμμική είτε μη γραμμική, η διερεύνηση της αστοχίας μπορεί να γίνει μόνο σε επίπεδο μέλους, χωρίς να μπορούν να δοθούν περαιτέρω πληροφορίες για την διαδικασία της αστοχίας σε επίπεδο μικροκλίμακας, όπως για παράδειγμα σε επίπεδο ίνας – μήτρας ή συγκολλητικών δεσμών μεταξύ των στρώσεων του laminate υλικού, δηλαδή για μορφές αστοχίας των ινοπλισμένων σύνθετων υλικών που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι σε περιπτώσεις όπως είναι η εξεταζόμενη, η εκδήλωση μεγάλων παραμορφώσεων επιτάσσει την εφαρμογή μη γραμμικής ανάλυσης λυγισμού, είτε αποκλειστικά είτε σε συνδυασμό και συγκριτικά με γραμμική ανάλυση λυγισμού, ενώ η εκδήλωση μη γραμμικής συμπεριφοράς επιβεβαιώνεται και από αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπρόσθετα, η λυγηρότητα είναι η κρίσιμη παράμετρος για το αν ένα θλιβόμενο μέλος θα είναι επιρρεπές σε μη γραμμικότητα γεωμετρίας, ή σε διαρροή, δηλαδή σε μη γραμμικότητα υλικού. Για μικρή λυγηρότητα, κρίσιμη είναι η μη γραμμικότητα υλικού, για μεγάλες τιμές της λυγηρότητας κρίσιμη είναι η μη γραμμικότητα γεωμετρίας, ενώ για ενδιάμεσες τιμές και λόγω και της επίδρασης από την παρουσία αναπόφευκτων κατασκευαστικών ή άλλων ατελειών, συμβαίνει μία σύνθετη μορφή αστοχίας [1]. Επειδή το κουτί εσωτερικής στηρίξεως πτερυγίου ανεμογεννήτριας, που μελετάται στην παρούσα εργασία, έγκειται στη δεύτερη περίπτωση, αυτή θα αναλυθεί περαιτέρω στη συνέχεια.

4.3 Μη γραμμικότητα γεωμετρίας

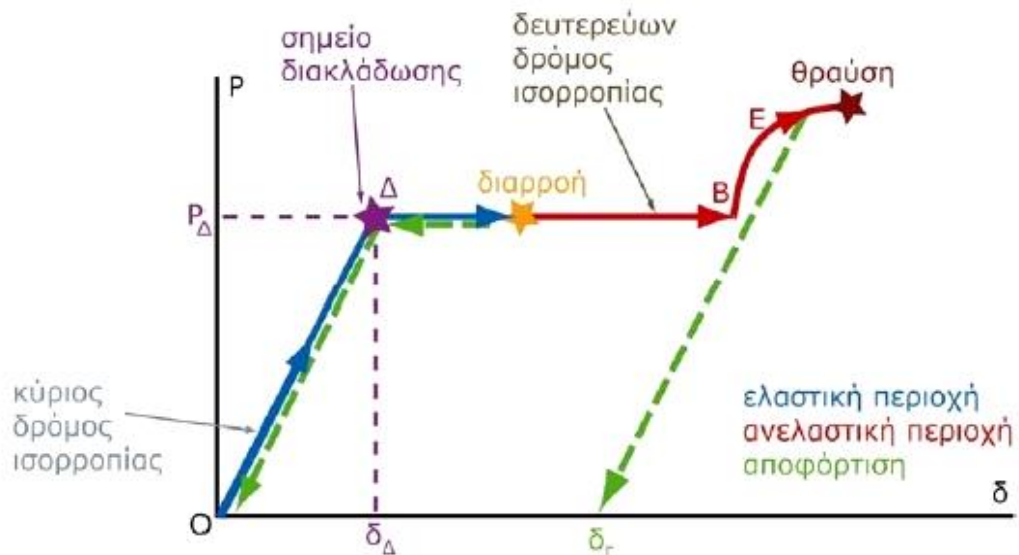
Η έννοια της μη γραμμικότητας γεωμετρίας (ή γεωμετρικά μη γραμμικής συμπεριφοράς) συνδέεται με μεγάλες αποκλίσεις της παραμορφωμένης γεωμετρίας του φορέα από την απαραμόρφωτη. Στις περιπτώσεις αυτές η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας στην απαραμόρφωτη γεωμετρία, όπως γίνεται στις κλασικές μεθόδους στατικής ανάλυσης, οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα και πρέπει να αποφεύγεται, ενώ η ανάγκη διατύπωσης των εξισώσεων ισορροπίας στην παραμορφωμένη γεωμετρία, η οποία δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, απαιτεί ιδιαίτερες μεθόδους στατικής ανάλυσης, και οδηγεί σε κατάργηση της αναλογίας μεταξύ επιβαλλόμενων φορτίων και αναπτυσσόμενης έντασης.



Σχήμα 4.3: Λεπτότοιχος κύλινδρος που υποβάλλεται σε θλίψη [1]

Μία ενδεικτική περίπτωση μη γραμμικότητας γεωμετρίας αναλύεται ακολούθως [1], προκειμένου να δοθούν συνοπτικά οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με τη μη γραμμική συμπεριφορά. Ως παράδειγμα χρησιμοποιείται ο κύλινδρος του Σχήματος 4.3, ο οποίος έχει μήκος L και ακτίνα R της ίδιας τάξης μεγέθους, αλλά είναι λεπτότοιχος, αφού το πάχος του t είναι πολύ μικρότερο από τα L και R , έχει δηλαδή μεγάλη λυγηρότητα. Το δοκίμιο εδράζεται ομοιογενώς στην κάτω επιφάνειά του και υπόκειται σε θλιπτικό φορτίο P , που επιβάλλεται ομοιόμορφα στην άνω επιφάνειά του και έχει σταδιακά αυξανόμενο μέγεθος. Οι εγκάρσιες μετακινήσεις στο άνω άκρο θεωρούνται δεσμευμένες, ενώ οι αξονικές είναι ελεύθερες. Η παραμόρφωση του κυλίνδρου περιγράφεται μέσω της αξονικής του βράχυνσης δ .

Μέσω του δρόμου ισορροπίας που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4, παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές του φορτίου, καταγράφεται ο ευθύγραμμος κλάδος $ΟΔ$, όπου οι μετατοπίσεις δ είναι ανάλογες του φορτίου P . Αυτός είναι ο κύριος ή πρωτεύον δρόμος ισορροπίας, που ονομάζεται και προλυγισμικός κλάδος, με τον άξονα του δοκιμίου να παραμένει ευθύγραμμος και το σχήμα του αμετάβλητο. Για κάποια τιμή P_{Δ} του φορτίου, και για τιμή δ_{Δ} της μετατόπισης, αλλάζει η μορφή παραμόρφωσης του φορέα, ο οποίος απότομα εμφανίζει τοπική ρυτίδωση των τοιχωμάτων και οι μετατοπίσεις δ παύουν να είναι ανάλογες του φορτίου. Για αυτήν δηλαδή την τιμή P_{Δ} του φορτίου συμβαίνει λυγισμός του δοκιμίου, με σημαντική αύξηση των μετατοπίσεων για μικρή αύξηση του φορτίου. Για μετατοπίσεις μεγαλύτερες της δ_{Δ} η παραμορφωμένη γεωμετρία του δοκιμίου διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη, οπότε καταλύεται η δεύτερη από τις δύο βασικές προϋποθέσεις γραμμικής συμπεριφοράς. Το είδος μη γραμμικότητας που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη περίπτωση είναι επομένως γεωμετρική μη γραμμικότητα, ενώ ο λυγισμός που εκδηλώνεται χαρακτηρίζεται ως τοπικός, διότι αφορά τοπική παραμόρφωση μίας περιορισμένης περιοχής του μέλους.



Σχήμα 4.4: Δρόμος ισορροπίας δοκιμίου [1]

Εφόσον η πειραματική δοκιμή ή η αριθμητική ανάλυση διεξάγονται με “έλεγχο του φορτίου” (load control) και όχι της μετατόπισης (displacement control), δηλαδή επιβάλλοντας και προσαυξάνοντας σταδιακά το φορτίο και καταγράφοντας την προκύπτουσα μετατόπιση, τότε για μικρή προσαύξηση του φορτίου πέραν της τιμής P_{Δ} ο φορέας αναζητεί θέση ισορροπίας που αντιστοιχεί σε αυτή την τιμή του φορτίου. Τέτοια θέση δεν υπάρχει πλησίον του σημείου Δ , οπότε, χωρίς προειδοποίηση και σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, οι παραμορφώσεις του φορέα αυξάνονται πολύ, και πραγματοποιείται μεταπήδηση στο μακρινό σημείο ισορροπίας B. Η μετάβαση από το Δ στο B γίνεται μέσω του κλάδου ΔB , που στο συγκεκριμένο παράδειγμα, και όχι κατά κανόνα, είναι οριζόντιος, και αποτελεί τον δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας, που ονομάζεται και μεταλυγισμικός κλάδος. Το σημείο τομής Δ μεταξύ κύριου και δευτερεύοντα δρόμου ισορροπίας, που αντιστοιχεί και σε απότομη μετάβαση του φορέα στην παραμορφωμένη κατάσταση, ονομάζεται σημείο διακλάδωσης (bifurcation ή branching point) και ο παρατηρούμενος λυγισμός ονομάζεται και λυγισμός μέσου σημείου διακλάδωσης. Η ικανότητα του φορέα να παραλάβει μεγαλύτερο φορτίο από εκείνο που προκαλεί λυγισμό λέγεται μεταλυγισμική αντοχή (post-buckling strength) και παριστάνεται γραφικά από την ανοδική μορφή του δευτερεύοντος δρόμου ισορροπίας μετά το σημείο διακλάδωσης. Η μεταλυγισμική αντοχή εκδηλώνεται μόνο μέσω σημείου διακλάδωσης (σημείο P_{Δ}) και στην περίπτωση αυτή η φέρουσα ικανότητα του φορέα δεν εξαντλείται στην τιμή του κρίσιμου φορτίου [5].

Όλα τα σημεία του κλάδου ΔB , εκτός των άκρων Δ και B, δεν είναι θέσεις στατικής ισορροπίας, αλλά θέσεις δυναμικής ισορροπίας, από τις οποίες ο φορέας διέρχεται με μεγάλη ταχύτητα αναζητώντας θέση στατικής ισορροπίας, την οποία και βρίσκει στο B. Λόγω αδράνειας το σύστημα δεν θα σταματήσει στη θέση ισορροπίας B, αλλά θα την προσπεράσει, θα εκτελέσει ταλάντωση περί το B, όπου και τελικά θα ισορροπήσει, λόγω απόσβεσης. Για περαιτέρω αύξηση του φορτίου, πέραν του σημείου B, ακολουθείται ο ανοδικός κλάδος BE, μέχρι τελικά τη θραύση του δοκιμίου.

4.4 Αλγόριθμοι επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων

4.4.1 Γενικά

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, στις περιπτώσεις εφαρμογής μη γραμμικής ανάλυσης λυγισμού, η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας για την επίλυση του προβλήματος γίνεται στην παραμορφωμένη κατάσταση, η οποία όμως δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων και για αυτόν το λόγο απαιτούνται ιδιαίτερες μέθοδοι στατικής ανάλυσης. Στην κατεύθυνση αυτή έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένοι αλγόριθμοι επίλυσης μέσω μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίοι κατά κύριο λόγο βασίζονται σε μία προσαυξητική διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας του φορέα.

Συγκεκριμένα, στις περισσότερες περιπτώσεις εκείνο που απαιτείται από μία μη γραμμική ανάλυση είναι η εντατική κατάσταση και οι μετατοπίσεις σε καθορισμένα επίπεδα φόρτισης ή διακριτές χρονικές στιγμές $0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$ όπου Δt είναι η επαύξηση του χρόνου. Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν απαιτείται ο προσδιορισμός ενδιάμεσων θέσεων ισορροπίας του φορέα. Συνήθως όμως οι εξισώσεις ισορροπίας πρέπει να λυθούν για όλη τη διαδρομή της φόρτισης, από τη χρονική στιγμή $t=0$ (θέση "0") έως τη χρονική στιγμή t (θέση "1"). Τα προβλήματα αυτά, που εξαρτώνται από την ιστορία της φόρτισης, απαιτούν μία βήμα-προς-βήμα επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας από την οποία προκύπτει η πλήρης καμπύλη φορτίου – μετατόπισης του φορέα [8]. Οι βασικές αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων, που χρησιμοποιούνται σε εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, βασίζονται στην επαναληπτική μέθοδο Newton – Raphson. Επίσης χρησιμοποιείται και η μέθοδος μήκους τόξου (arc length), που αποτελεί μέθοδο επίλυσης με περιορισμό στο μέγεθος του επιβαλλόμενου φορτίου και εφαρμόζεται για την υπερπήδηση οριακών σημείων ισορροπίας στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης (τοπικά μέγιστα ή τοπικά ελάχιστα φορτία). Στις περιπτώσεις αυτές, με την επιβολή ενός σταθερού προσαυξητικού φορτίου κατά τη διάρκεια των μη γραμμικών επαναλήψεων παρατηρείται δυσκολία ή αδυναμία σύγκλισης της μη γραμμικής επαναληπτικής διαδικασίας στην περιοχή του οριακού σημείου. Επειδή όμως στην παρούσα εργασία η μέθοδος αυτή δεν εφαρμόζεται κατά την αριθμητική ανάλυση, δε θα αναλυθεί περαιτέρω.

4.4.2 Μέθοδος Newton – Raphson

Στη μη γραμμική ανάλυση η επιβολή του φορτίου συνηθίζεται να επιβάλλεται σταδιακά, ενώ η βασική προσέγγιση σε μία προσαυξητική βήμα-προς-βήμα επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων στηρίζεται στην παραδοχή ότι η λύση είναι γνωστή τη χρονική στιγμή t (θέση "1") και ζητείται η λύση μέσω της αναζήτησης της θέσης ισορροπίας τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$ (θέση "2"), όπου Δt είναι μια κατάλληλα επιλεγμένη προσαύξηση του χρόνου. Η συνθήκη ισορροπίας του συστήματος πεπερασμένων στοιχείων, μέσω του οποίου προσομοιώνεται το εξεταζόμενο πρόβλημα, τη χρονική στιγμή $t="1"$ γράφεται [8]:

$${}^1\mathbf{F} - {}^1\mathbf{R} = \mathbf{0}, \quad (4.1)$$

όπου το διάνυσμα ${}^1\mathbf{R}$ εκφράζει τα εξωτερικά επικόμβια φορτία και το διάνυσμα ${}^1\mathbf{F}$ εκφράζει τις εσωτερικές επικόμβιες δράσεις που αντιστοιχούν στις τάσεις των στοιχείων του φορέα τη χρονική στιγμή $t=1$. Η σχέση (4.1) για τη χρονική στιγμή $t+\Delta t=2$ γίνεται:

$${}^2\mathbf{r} = {}^2\mathbf{F} - {}^2\mathbf{R} = \mathbf{0}, \quad (4.2)$$

Η σχέση (4.2) εκφράζει την ισορροπία του συστήματος στην τρέχουσα παραμορφωμένη γεωμετρία λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μη γραμμικότητες. Στις στατικές εφαρμογές του φορτίου, η παράμετρος χρόνος απλώς ορίζει το μέγεθος της φόρτισης που επιβάλλεται στον φορέα καθώς αυτή μεταβάλλεται από την αρχική στην τελική της τιμή. Στη δυναμική ανάλυση και στη στατική ανάλυση με υλικά των οποίων οι ιδιότητες μεταβάλλονται ως προς τον χρόνο, η παράμετρος χρόνος είναι πραγματική και επηρεάζει ευρύτερα τη διατύπωση των χαρακτηριστικών εξισώσεων. Επειδή η λύση είναι γνωστή τη στιγμή $t=1$, έχουμε:

$${}^2\mathbf{F} = {}^1\mathbf{F} + \mathbf{F}, \quad (4.3)$$

όπου η ποσότητα \mathbf{F} εκφράζει την προσαύξηση των εσωτερικών επικόμβιων φορτίων που αντιστοιχούν στην προσαύξηση των μετατοπίσεων και τάσεων των στοιχείων από τη στιγμή t στην $t+\Delta t$. Αυτό το διάνυσμα, κάνοντας την παραδοχή ότι το ${}^1\mathbf{R}$ είναι ανεξάρτητο των παραμορφώσεων, ισούται με το γινόμενο του εφαπτομενικού μητρώου στιβαρότητας ${}^1\mathbf{K}_T$, που αντιστοιχεί στις γεωμετρικές και συνθήκες του υλικού τη χρονική στιγμή $t=1$, και των προσεγγιστικών προσαυξητικών επικόμβιων μετατοπίσεων \mathbf{U} :

$$\mathbf{F} = {}^1\mathbf{K}_T \mathbf{U}, \quad (4.4)$$

Το εφαπτομενικό μητρώο στιβαρότητας ${}^1\mathbf{K}_T$ δίνεται από τη σχέση:

$${}^1\mathbf{K}_T = \frac{\partial {}^1\mathbf{F}}{\partial {}^1\mathbf{U}}, \quad (4.5)$$

δηλαδή ισούται με την παράγωγο των εσωτερικών επικόμβιων δράσεων ως προς τις επικόμβιες μετατοπίσεις. Με την αντικατάσταση των (4.4) και (4.3) στην (4.2) προκύπτει:

$${}^1\mathbf{K}_T \mathbf{U} = {}^2\mathbf{R} - {}^1\mathbf{F}, \quad (4.6)$$

Μετά την επίλυση της (4.6) ως προς \mathbf{U} , οι προσεγγιστικές μετατοπίσεις τη χρονική στιγμή $t=2$ μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση:

$${}^2\mathbf{U} \cong {}^1\mathbf{U} + \mathbf{U}, \quad (4.7)$$

Έχοντας υπολογίσει μία προσέγγιση των μετατοπίσεων που αντιστοιχούν στο χρόνο $t+\Delta t=2$, μπορούν να υπολογιστούν προσεγγιστικά οι τάσεις και οι αντίστοιχες εσωτερικές επικόμβιες δράσεις στο χρόνο αυτό και να συνεχιστεί η μεθοδολογία αυτή για το επόμενο χρονικό βήμα. Λόγω της παραδοχής που γίνεται στη σχέση (4.4), μία τέτοια λύση μπορεί να επιφέρει σημαντικά σφάλματα και ανάλογα με τα μεγέθη των

χρονικών βημάτων ενδέχεται να είναι και ασταθής. Απαιτείται έτσι μία επαναληπτική διαδικασία μέχρι η επίλυση της σχέσης (4.2) να επιτευχθεί με σημαντική ακρίβεια.

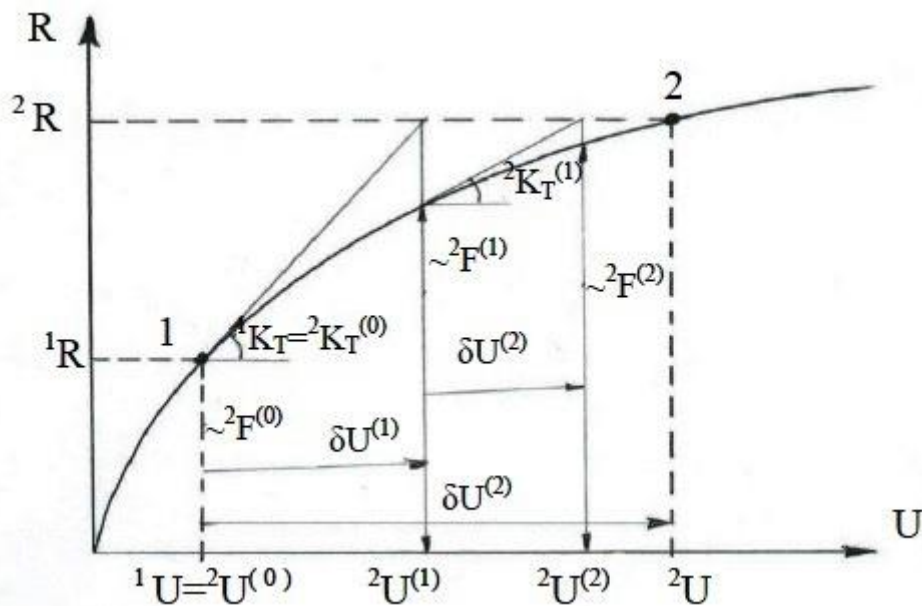
Η μέθοδος Newton – Raphson αποτελεί μία επέκταση της απλής επαυξητικής μεθόδου των εξισώσεων (4.6) και (4.7) και έχει ως εξής:

$${}^2\mathbf{K}_T^{(i-1)}\Delta\mathbf{U}^{(i)} = {}^2\mathbf{R} - {}^2\mathbf{F}^{(i-1)}, \quad (4.8\alpha)$$

$${}^2\mathbf{U}^{(i)} = {}^2\mathbf{U}^{(i-1)} + \Delta\mathbf{U}^{(i)}, \quad (4.8\beta)$$

όπου i είναι ο αριθμός της τρέχουσας επανάληψης, ${}^2\mathbf{K}_T^{(i-1)}$ είναι το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας και $\Delta\mathbf{U}^{(i)}$ είναι μία επαύξηση του τρέχοντος διανύσματος μετατοπίσεων ${}^2\mathbf{U}^{(i)}$. Η επίλυση γίνεται επαναληπτικά με βήμα Δt και οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος είναι: ${}^2\mathbf{U}^{(0)} = {}^1\mathbf{U}$, ${}^2\mathbf{K}_T^{(0)} = {}^1\mathbf{K}_T$, ${}^2\mathbf{F}^{(0)} = {}^1\mathbf{F}$. Η ποσότητα ${}^2\mathbf{R}$ εκφράζει την εξωτερικώς επιβαλλόμενη φόρτιση και η ${}^2\mathbf{F}^{(i-1)}$ τις εσωτερικές δυνάμεις στο τέλος της προηγούμενης επανάληψης. Οι παραμένουσες επικόμβιες δυνάμεις ${}^2\mathbf{R} - {}^2\mathbf{F}^{(i-1)}$ αντιστοιχούν στα επικόμβια φορτία τα οποία δεν έχουν ακόμη εξισορροπηθεί από τις τάσεις των στοιχείων και κατά συνέπεια μία προσαύξηση των επικόμβιων μετατοπίσεων θα απαιτηθεί για να επιτευχθεί η ισορροπία. Έτσι η αναπροσαρμογή των μετατοπίσεων του φορέα συνεχίζεται μέχρι τον μηδενισμό των παραμενουσών δυνάμεων στους κόμβους του φορέα.

Ο ακριβής υπολογισμός των εσωτερικών δυνάμεων ${}^2\mathbf{F}^{(i-1)}$ από τις ${}^2\mathbf{U}^{(i-1)}$ είναι κρίσιμος για τη σωστή προσέγγιση της μη γραμμικής συμπεριφοράς, ενώ ο ακριβής υπολογισμός του ${}^2\mathbf{K}_T^{(i-1)}$ επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης της μη γραμμικής επαναληπτικής διαδικασίας και αποτελεί το πιο χρονοβόρο μέρος της [8]. Η γραφική παράσταση της μεθόδου Newton-Raphson για την περίπτωση φορέα ενός βαθμού ελευθερίας φαίνεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Σχηματική παράσταση της προσαυξητικής μεθόδου Newton – Raphson για φορέα ενός βαθμού ελευθερίας [8]

Η επαναληπτική διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω διεξάγεται μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση, με τη πραγματοποίηση του μέγιστου επιτρεπόμενου αριθμού των επαναλήψεων ισορροπίας. Η σύγκλιση θεωρείται ότι πραγματώνεται όταν ικανοποιούνται κάποια κατάλληλα κριτήρια σύγκλισης, τα βασικότερα από τα οποία είναι τα ακόλουθα τρία [2,12]:

- Κριτήριο μετατοπίσεων:

$$\frac{\|\Delta \mathbf{U}^{(i)}\|_2}{\|{}^{t+\Delta t} \mathbf{U}\|_2} \leq \varepsilon_D, \quad (4.9)$$

όπου σαν ${}^{t+\Delta t} \mathbf{U}$ χρησιμοποιείται η τελευταία υπολογιζόμενη τιμή ${}^{t+\Delta t} \mathbf{U}^{(i)}$ και $\|\dots\|_2$ είναι η ευκλείδεια νόρμα.

- Κριτήριο δυνάμεων:

$$\frac{\|{}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(i)}\|_2}{\|{}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^t \mathbf{F}\|_2} \leq \varepsilon_F, \quad (4.10)$$

- Κριτήριο ενέργειας:

$$\Delta \mathbf{U}^{(i)T} ({}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(i-1)}) \leq \varepsilon_E (\Delta \mathbf{U}^{(i)T} ({}^{t+\Delta t} \mathbf{R} - {}^t \mathbf{F})), \quad (4.11)$$

Στα κριτήρια αυτά, οι σταθερές ε_D , ε_F και ε_E είναι οι ανοχές σύγκλισης και η επιλογή τους προκύπτει από την ανάγκη συμβιβασμού μεταξύ της ακρίβειας της λύσης και της οικονομίας του χρόνου ή της δυνατότητας επίτευξης λύσης.

4.4.3 Έρευνα γραμμής

Στις περιπτώσεις που η μέθοδος Newton – Raphson παρουσιάζει δυσκολίες στη σύγκλιση εφαρμόζεται και η μέθοδος της έρευνας γραμμής (line search), η οποία βελτιώνει την ταχύτητα συγκλίσεως και την ευστάθεια της μεθόδου. Με τη μέθοδο αυτή επιλέγεται ένα βήμα α με το οποίο θα βελτιωθεί η λύση \mathbf{x} επάνω στη διεύθυνση \mathbf{u} . Έτσι, αντί της εξίσωσης [8]:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{u}, \quad (4.12\alpha)$$

χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha \mathbf{u}, \quad (4.12\beta)$$

όπου \mathbf{x} το διάνυσμα της λύσης και \mathbf{u} το διάνυσμα των προσαυξητικών επικόμβιων μετατοπίσεων. Η τιμή του α προκύπτει από την εύρεση της στάσιμη τιμής της συνολικής δυναμικής ενέργειας $\Pi(\alpha) = \Pi(\mathbf{x}_k + \alpha \mathbf{u})$ στο τέλος της k επανάληψης της Newton – Raphson. Η στάσιμη τιμή προκύπτει από τον μηδενισμό της πρώτης μεταβολής $\delta \Pi$ της συνολικής δυναμικής ενέργειας:

$$\delta\Pi = \delta\mathbf{x}^T [\mathbf{K}\mathbf{x} - \mathbf{R}], \quad (4.13)$$

Έτσι εάν θεωρήσουμε την πρώτη μεταβολή του Π ως συνάρτηση του α , τότε από την (4.13) θα έχουμε μία βαθμωτή εξίσωση ως προς α , από την οποία θα μπορεί να υπολογιστεί το βήμα α που ελαχιστοποιεί τη συνολική δυναμική ενέργεια κατά τη διεύθυνση του διανύσματος της προσαυξητικής μετατόπισης $\delta\mathbf{x}=\mathbf{u}$. Η εξίσωση αυτή μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$r(\alpha) = \mathbf{u}^T \mathbf{r}(\mathbf{x}_k + \alpha\mathbf{u}) = 0, \quad (4.14)$$

Συνήθως δεν απαιτείται μία ακριβής λύση της εξίσωσης (4.14), λόγω της αδυναμίας ευρέσεως της, αλλά επιζητείται μία προσεγγιστική λύση η οποία αρκεί να ικανοποιεί ένα κριτήριο της μορφής:

$$|r(\alpha)| < \rho|r(0)|, \quad (4.15)$$

όπου $0,1 < \rho < 0,9$. Για τον σκοπό αυτό ελέγχονται διάφορες τιμές του α με τη μέθοδο της δοκιμής και διόρθωσης έως ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο (4.15).

Μία άλλη τεχνική που επίσης εφαρμόζεται βασίζεται στην προσέγγιση της μη γραμμικής εξίσωσης $r(\alpha)$ με μία δευτεροβάθμια ή τριτοβάθμια εξίσωση της οποίας αναζητούμε τις ρίζες. Στην περίπτωση της δευτεροβάθμιας προσέγγισης απαιτείται η γνώση της τιμής $r(0)$, της παραγώγου $dr/d\alpha$ στη θέση $\alpha=0$, καθώς και μία τρίτη τιμή της $r(\alpha)$ που συνήθως είναι στη θέση $\alpha=1$. Η δευτεροβάθμια εξίσωση $r(\alpha)$ η οποία ορίζεται από τις τιμές $r(0)$, $r(1)$ και $dr/d\alpha=-r(0)$ έχει τη μορφή:

$$r(\alpha) \approx (1-\alpha)r(0) + r(1)\alpha^2 = 0, \quad (4.16)$$

της οποίας οι ρίζες ισούνται με:

$$\alpha = \frac{n}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{n}{2}\right)^2 - n}, \quad n = \frac{r(0)}{r(1)}, \quad (4.17\alpha,\beta)$$

Εάν $n < 0$ ή $n \geq 4$, η ρίζα είναι πραγματική και δίνεται από την σχέση:

$$\alpha_1 = \frac{n}{2} + \sqrt{\left(\frac{n}{2}\right)^2 - n}, \quad (4.17\gamma)$$

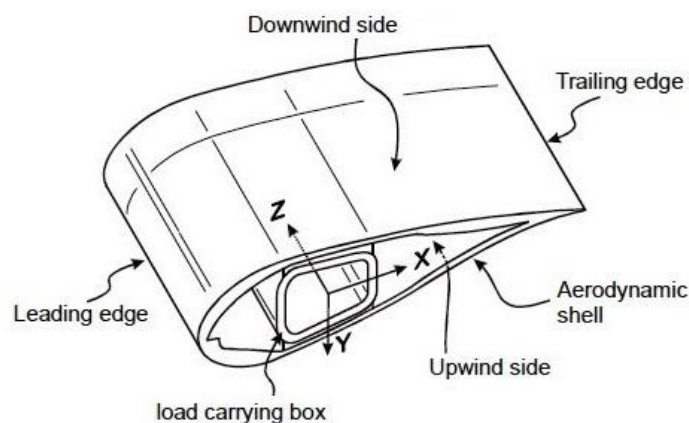
Εάν $0 < n < 4$, τότε δεν έχουμε πραγματική λύση και το α επιλέγεται ως $\alpha_1 = n/2$, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η δευτεροβάθμια εξίσωση ($dr/d\alpha=0$). Στη συνέχεια ελέγχεται η ικανοποίηση της σχέσης (4.15) και αν δεν ικανοποιείται τότε η διαδικασία της δευτεροβάθμιας εξίσωσης επαναλαμβάνεται, μεταξύ των δύο από τα τρία σημεία $r(0)$, $r(1)$ και $r(\alpha_1)$ τα οποία περικλείουν τη λύση, μέχρι την ικανοποίησή της [8].

5 Μοντελοποίηση και ανάλυση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

5.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία της αριθμητικής ανάλυσης στόχο έχει τη διερεύνηση διαφορετικών ινοπλισμένων σύνθετων υλικών από τα οποία αποτελείται ο εσωτερικός μηχανισμός στηρίξεως πτερυγίου ανεμογεννήτριας (box girder) (Σχήμα 5.1) και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς αυτού σε εκδήλωση λυγισμού λόγω κάμψης. Το κουτί εσωτερικής στηρίξεως παρέχει την απαιτούμενη αντοχή και δυσκαμψία στο εξωτερικό περίβλημα του πτερυγίου, τόσο σε τοπικό όσο και σε καθολικό επίπεδο. Έτσι, οι αναπτυσσόμενες εντάσεις σε όλο το τμήμα του πτερυγίου μεταφέρονται, με ιδιαίτερα περίπλοκο τρόπο, στο μηχανισμό στήριξης, με αποτέλεσμα να είναι το πρώτο τμήμα που αστοχεί σε τοπικό επίπεδο. Για το λόγο αυτό το κουτί στηρίξεως επιλέχθηκε να μελετηθεί μεμονωμένα στην παρούσα εργασία, αφού ο τρόπος φόρτισης και παραμόρφωσής του είναι πανομοιότυπος με αυτόν του πτερυγίου στο σύνολό του, ενώ η αυξημένη λυγηρότητα των τοιχωμάτων του το καθιστά επιρρεπές σε εκδήλωση φαινομένων τοπικού λυγισμού, που όπως αναλύθηκε στα σχετικά εδάφια των δύο προηγούμενων κεφαλαίων, μπορεί να αποτελέσει την καθοριστική αιτία καθολικής αστοχίας της κατασκευής.

Για την προσομοίωση και ανάλυση κατασκευάστηκε αριθμητικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ANSYS 14.5, ενώ ως παράμετροι ανάλυσης ελήφθησαν: α) η μορφή της διατομής του μέλους (με και χωρίς καμπύλωση στη διεπιφάνεια spar-cap και shear-web), β) ο τρόπος επιβολής της φόρτισης (ομοιόμορφη πίεση, γραμμικό φορτίο, συγκεντρωμένο φορτίο στο άκρο και δύο συγκεντρωμένα φορτία) και γ) το υλικό των ινών του ινοπλισμένου σύνθετου υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το κουτί στηρίξεως (ίνες γυαλιού, ίνες άνθρακα, ίνες αραμιδίου και συνδυασμός αυτών). Για όλες τις διαφορετικές παραμέτρους πραγματοποιήθηκαν και οι δύο αναλύσεις λυγισμού, γραμμική και μη γραμμική, ενώ από την τελευταία εξήχθησαν οι αντίστοιχοι δρόμοι ισορροπίας (καμπύλες φορτίου – μετατόπισης).

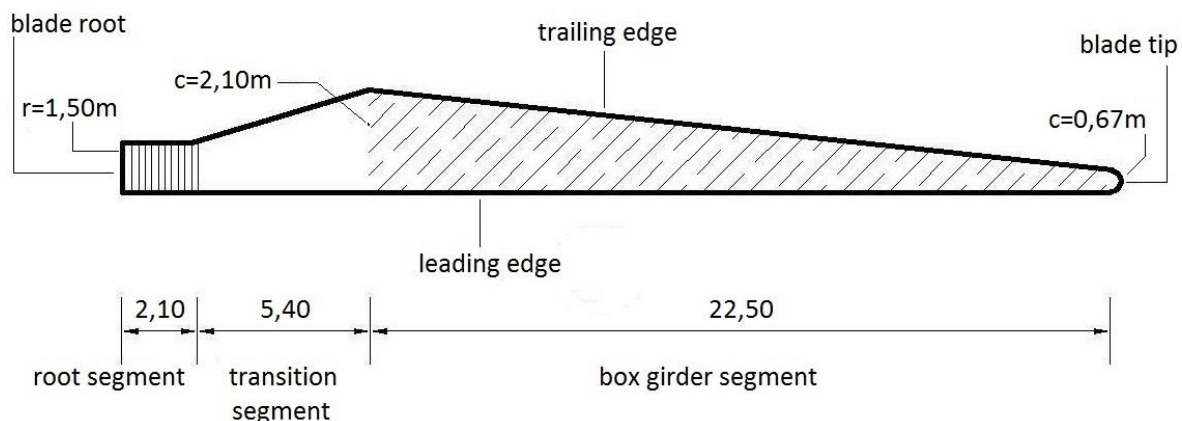


Σχήμα 5.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση πτερυγίου στην περίπτωση της one-piece construction [28]

Τόσο στη γραμμική όσο και στη μη γραμμική ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων τα στάδια που θα πρέπει να ακολουθηθούν είναι τα εξής [8]: Α) Μετάβαση από το φυσικό πρόβλημα, που είναι η κατασκευή, στο μαθηματικό προσομοίωμα, που είναι ο φορέας. Β) Μετάβαση από τον φορέα στο προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων με την επιλογή του κατάλληλου τύπου των στοιχείων και τη μόρφωση του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Γ) Μετάβαση από το προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων στο υπολογιστικό προσομοίωμα με τη μόρφωση και την επίλυση των γραμμικών ή μη εξισώσεων ισορροπίας. Δ) Πιστοποίηση των προσομοιωμάτων που υιοθετήθηκαν στα στάδια Β και Γ. Ο έλεγχος αυτός είναι ιδιαίτερα απαραίτητος στη μη γραμμική ανάλυση και πραγματοποιείται με σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με ανάλογα αποτελέσματα παρόμοιων κατασκευών εφόσον υπάρχουν ή με τον έλεγχο της απόκρισης του προσομοιώματος σε παραδείγματα αναφοράς που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία. Τα στάδια αυτά ακολουθήθηκαν σε γενικό πλαίσιο και στην παρούσα εργασία και θα περιγραφούν αναλυτικά σε αυτό και το επόμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το σχεδιασμό και την προσομοίωση του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, ο τύπος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε, τα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά που απαρτίζουν το φορέα, μαζί με τις χαρακτηριστικές τους ιδιότητες (πάχη, μηχανικές ιδιότητες, αλληλουχία στρώσεων κτλ) και ο τρόπος προσομοίωσης της φόρτισης.

5.2 Γεωμετρικό μοντέλο

Μοντέλο της έρευνας αποτέλεσε ο μηχανισμός εσωτερικής στηρίξεως πτερυγίου ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, ονομαστικής ισχύος 1MW, με πυλώνα ύψους 64,14m και ρότορα διαμέτρου 63,04m, στην περίπτωση που η εσωτερική στήριξη παρέχεται από ενιαία κιβωτιοειδή κατασκευή κοίλης διατομής. Το συνολικό μήκος του πτερυγίου, από τον άξονα περιστροφής μέχρι την άκρη, είναι ίσο με 30m. Έτσι το τμήμα βάσης (root segment) έχει μήκος 2,10m (ίσο με το 7% του μήκους του πτερυγίου), το τμήμα μετάβασης (transition segment) έχει μήκος 5,40m (ίσο με το 18% του μήκους του πτερυγίου) και το κυρίως τμήμα (box girder segment) έχει μήκος 22,50m, το οποίο και ταυτίζεται με το συνολικό μήκος του υπό μελέτη κουτιού εσωτερικής στηρίξεως (γραμμοσκιασμένο τμήμα στο Σχήμα 5.2).

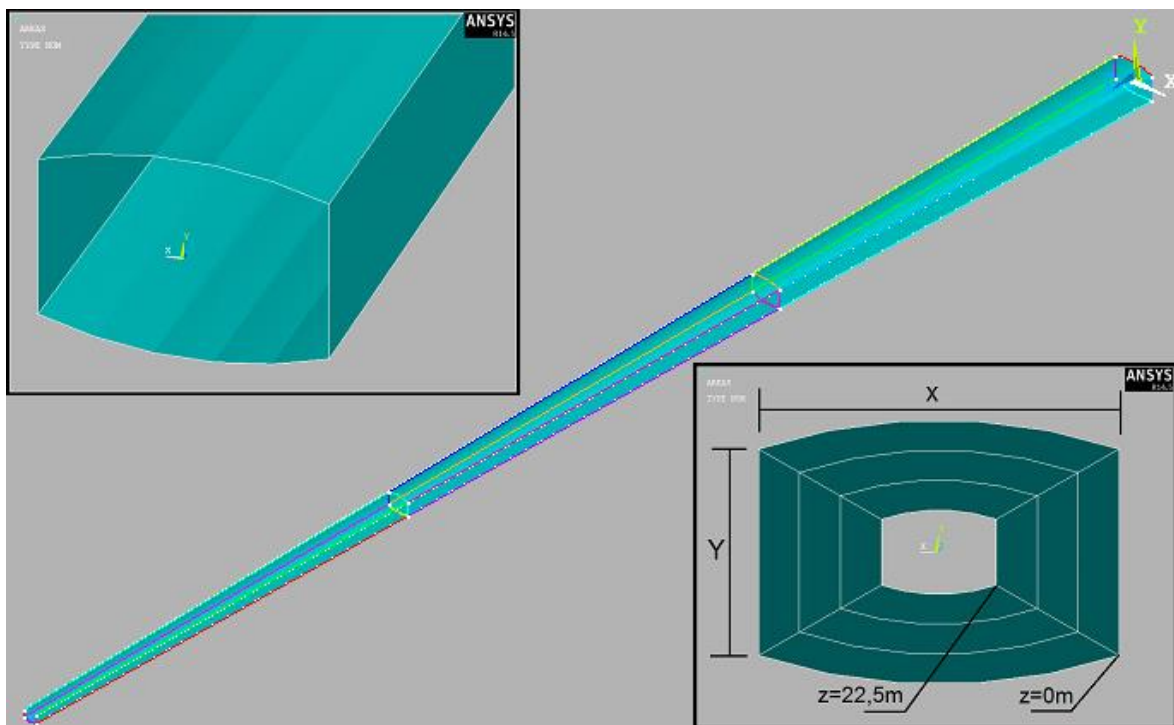


Σχήμα 5.2: Διαστάσεις επιμέρους τμημάτων πτερυγίου για την υπό μελέτη περίπτωση [7]

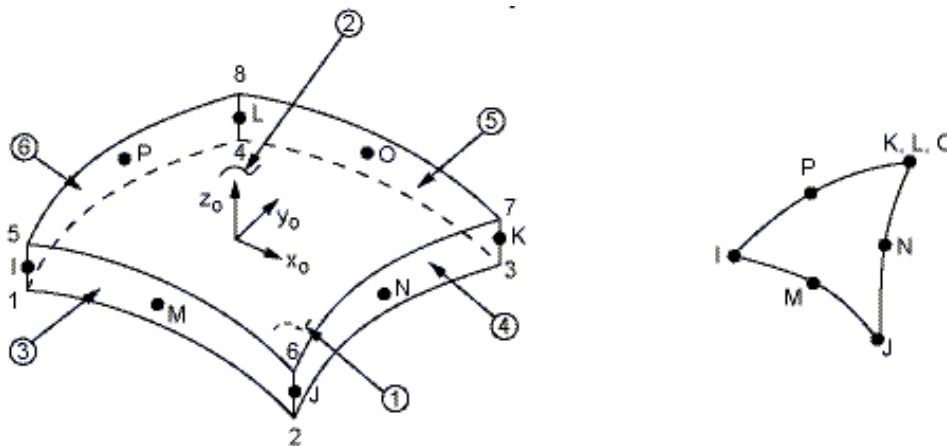
Οι διαστάσεις και οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες του πτερυγίου που εξετάζεται ανήκουν στο πρότυπο αεροτομών S818. Έτσι, με βάση τα διαγράμματα που παρατίθενται στο 2^ο κεφάλαιο (Σχήματα 2.7 και 2.10) υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες 24 σημείων (6 για καθεμιά από τις 4 διατομές) στην αρχή, στο τέλος και σε δύο ενδιάμεσες θέσεις του μηχανισμού στηρίξεως και εν συνεχεία λαμβάνοντας ως δεδομένη τη γραμμική κατά μήκος μεταβολή των διαστάσεων κατασκευάστηκε το μοντέλο στο σύνολό του. Κατά το σχεδιασμό έγινε η παραδοχή ότι υπάρχει διπλή συμμετρία της διατομής ως προς τους άξονες x και y, που στην πραγματικότητα δεν είναι αληθές, όπως είναι εμφανές και στα Σχήματα 2.10 και 5.1, είναι όμως αποδεκτό, αφού αντίστοιχη παραδοχή γίνεται σε σχετικές μελέτες της βιβλιογραφίας [28]. Στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί δίνονται οι διαστάσεις της διατομής στις τέσσερις θέσεις κατά μήκος του φορέα και στο Σχήμα 5.3 η συνολική του όψη μετά το σχεδιασμό στο ANSYS. Στον Πίνακα 5.1 με z συμβολίζεται η κατά μήκος απόσταση στο φορέα λαμβάνοντας ως αρχική θέση ($z=0\text{m}$) την αρχή του κυρίως τμήματος του πτερυγίου (απόσταση 7,5m από τον άξονα περιστροφής) και ως τελική θέση ($z=22,5\text{m}$) την άκρη του πτερυγίου (απόσταση 30m από τον άξονα περιστροφής), ενώ με X συμβολίζεται το συνολικό πλάτος του spar-cap στην αντίστοιχη θέση και με Y το αντίστοιχο συνολικό ύψος του shear-web.

Πίνακας 5.1: Διαστάσεις διατομών κατά μήκος του φορέα

Θέση z (m)	Μήκος χορδής c (mm)	$X=(0,5-0,15)\times c$ (mm)	$Y=0,2\times c$ (mm)
z=0	2100	735	420
z=7,5	1623	568	324,6
z=15	1147	401,45	229,4
z=22,5	670	234,5	134



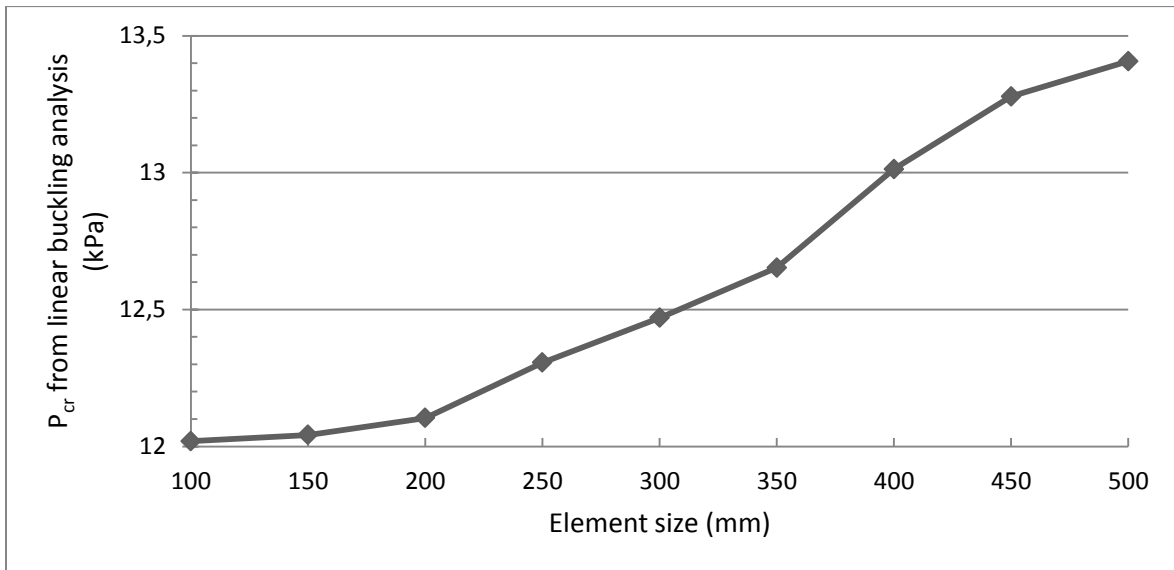
Σχήμα 5.3: Εικόνες γεωμετρίας φορέα



Σχήμα 5.4: Γεωμετρία στοιχείου SHELL281 [12]

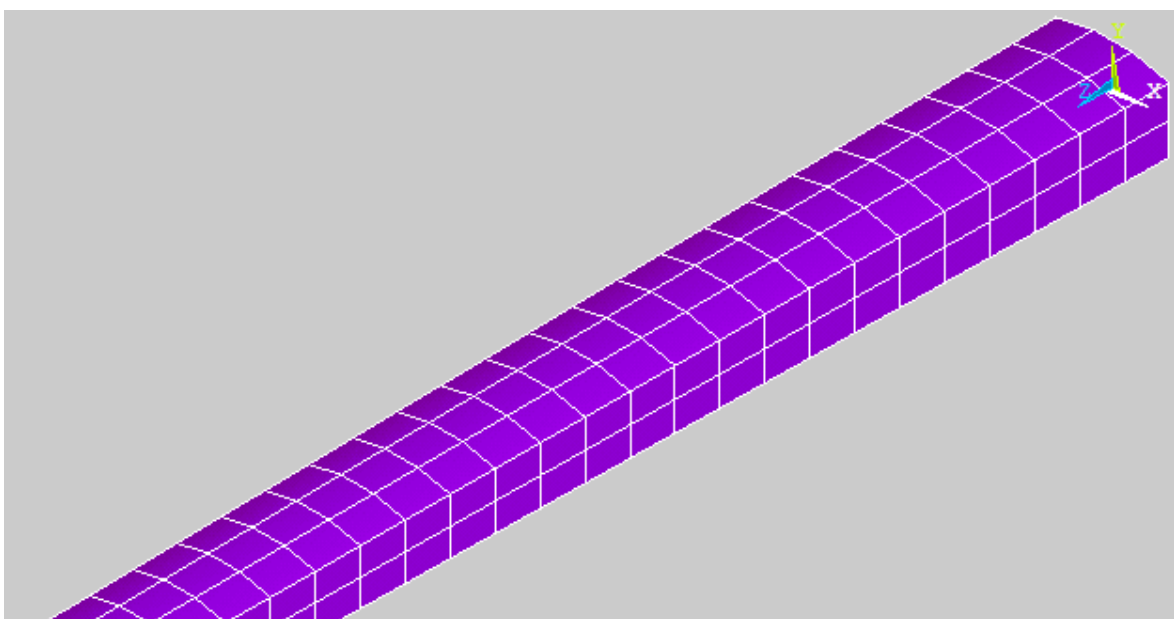
Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους (shell elements), που αποτελούν τον πιο συχνά χρησιμοποιούμενο τύπο πεπερασμένων στοιχείων σε αντίστοιχες αριθμητικές αναλύσεις μελετών είτε του μηχανισμού στηρίξεως είτε του πτερυγίου καθολικά. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο shell281, που είναι κατάλληλο για λεπτές έως μέτριου πάχους κελυφωτές κατασκευές, όπως και για κατασκευές από σύνθετα υλικά, σε πολυστρωματικές ή/και sandwich δομές. Είναι τετράπλευρο στοιχείο 8 κόμβων με 6 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, τρεις μετακινησιακούς κατά τους άξονες x , y και z , και τρεις στροφικούς περί τους άξονες x , y , z (Σχήμα 5.4). Ανταποκρίνεται τόσο σε γραμμικές όσο και σε μη γραμμικές αναλύσεις με υποθέσεις μεγάλων μετατοπίσεων και παραμορφώσεων [12]. Προϋπόθεση για να εφαρμοστεί με ασφάλεια στις αναλύσεις αυτός ο τύπος στοιχείου είναι ο λόγος της μίας από τις δύο πλευρές του στοιχείου προς το πάχος του να είναι μεγαλύτερος του 5. Η προϋπόθεση αυτή ελέγχθηκε και ικανοποιείται στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, για το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων που επιλέχθηκε με βάση τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.

Πριν την επιλογή του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων (element size), πραγματοποιήθηκε μελέτη σύγκλισης της διακριτοποίησης (mesh convergence study) για να διαπιστωθεί για ποιο μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων υπάρχει ικανοποιητικός συμβιβασμός μεταξύ υπολογιστικής ακρίβειας και υπολογιστικού κόστους. Σκοπός ήταν η επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερης ακρίβειας των αποτελεσμάτων, η οποία συνήθως μειώνεται όταν διαμορφώνονται πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων αραιότερα από το επιθυμητό. Ταυτόχρονα όμως όταν το πλέγμα στοιχείων γίνεται πυκνότερο, με μείωση των διαστάσεών τους, αυξάνεται σημαντικά το υπολογιστικό κόστος, ενώ είναι δυνατόν ακόμα και να αποτραπεί η σύγκλιση επίλυσης κατά τη μη γραμμική ανάλυση. Η διαδικασία που ακολουθείται σε μελέτες δύσκολων προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έχει ως εξής [10]: αρχικά χρησιμοποιείται ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και βρίσκεται η λύση. Η λύση αυτή θεωρείται ότι συγκλίνει μόνο όταν χρησιμοποιηθεί ένα πυκνότερο πλέγμα και τα αποτελέσματα από τα δύο πλέγματα δεν έχουν σημαντικές διαφορές. Εάν οι διαφορές είναι σημαντικές σημαίνει ότι η σύγκλιση δεν έχει επιτευχθεί και άρα χρειάζεται μία πιο πυκνή διακριτοποίηση σε στοιχεία.



Σχήμα 5.5: Μεταβολή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού (P_{cr}) με αύξηση των διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων

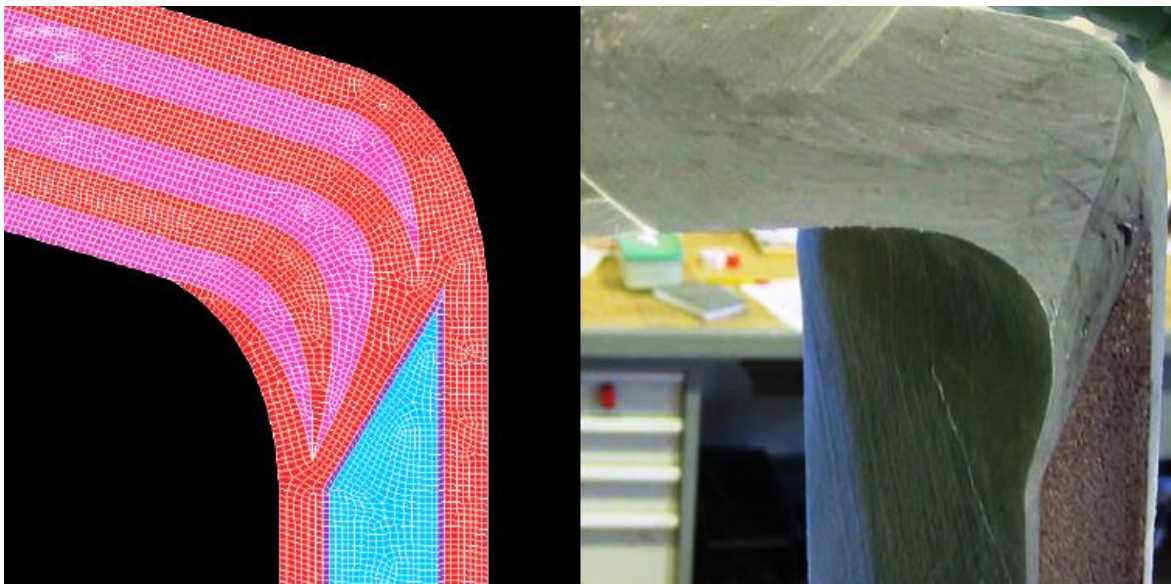
Έτσι για διαφορετικές τιμές του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίστηκε από γραμμική ανάλυση το κρίσιμο φορτίο λυγισμού (Σχήμα 5.5) για το αρχικό μοντέλο, δηλαδή για την περίπτωση χωρίς καμπύλωση στη διεπιφάνεια spar–cap και shear–web, με ινοπλισμένο πολυμερές από ίνες E–glass και καταπόνηση μέσω ομοιόμορφα κατανομημένης πίεσης. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η ποσοστιαία μεταβολή της πρώτης ιδιομορφής λυγισμού μεταξύ μεγέθους στοιχείων 300mm και 250mm είναι 1,32% και μεταξύ 250mm και 200mm είναι 1,64% και επομένως με βάση τα παραπάνω, για τη διακριτοποίηση των μοντέλων κρίθηκαν επαρκή στοιχεία κελύφους διαστάσεων πλευράς 300mm (Σχήμα 5.6). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 1092 και 780 στοιχεία shell281 για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις γεωμετρίας, με και χωρίς καμπύλωση αντίστοιχα.



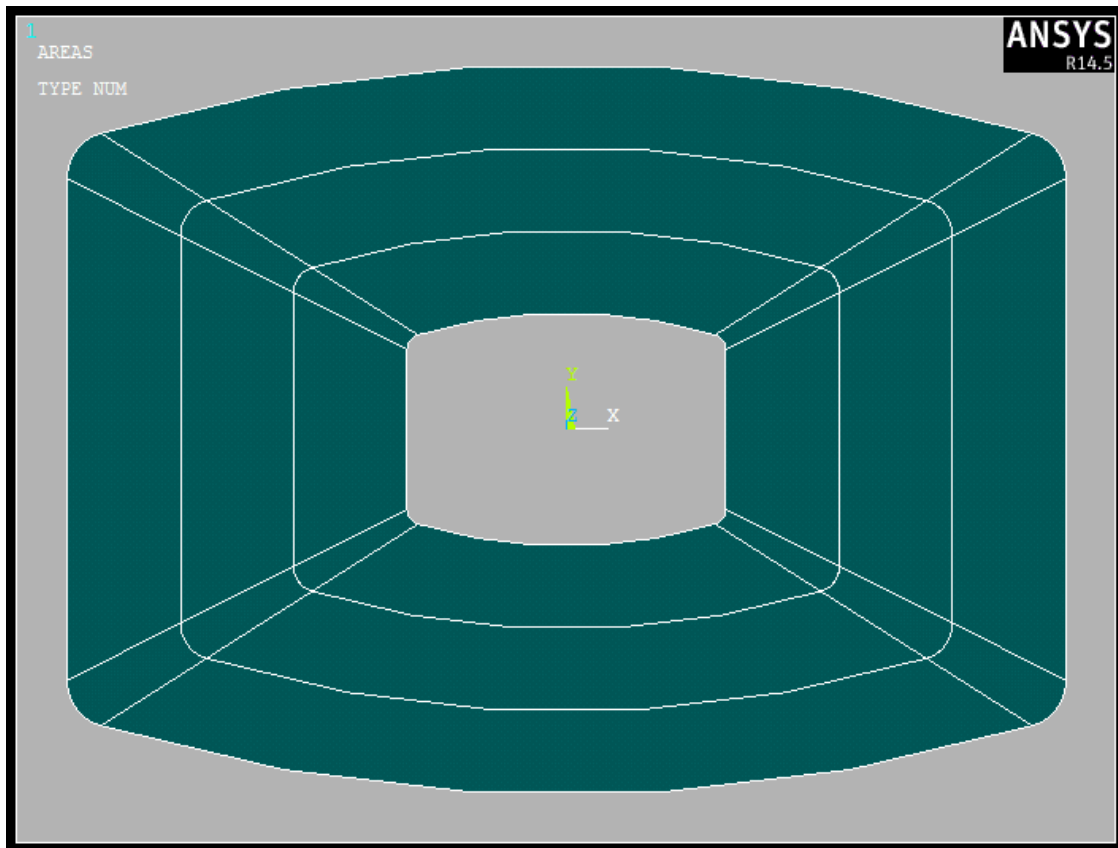
Σχήμα 5.6: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Όπως είναι εμφανές στο Σχήμα 5.3, το γεωμετρικό μοντέλο αρχικά σχεδιάστηκε με την παραδοχή ότι στην περιοχή μετάβασης από το spar-cap στο shear-web σχηματίζεται γωνία. Η παραδοχή αυτή υιοθετείται σε αντίστοιχες μελέτες του box girder [24], στην πραγματικότητα ωστόσο δεν ισχύει, αφού υπάρχει μικρή καμπύλωση στην περιοχή μετάβασης από το spar-cap στο shear-web, ώστε να υπάρχει ομαλή μετάβαση στο μικρότερου πάχους shear-web και να αποφευχθεί η υψηλή συγκέντρωση τάσεων. Η τεχνική που εφαρμόζεται σε αντίστοιχες περιπτώσεις στα σύνθετα υλικά αποτελεί την ανάλυση με την ονομαζόμενη μέθοδο ply-drop (ply-drop analysis) και υλοποιείται μέσω του σταδιακού τερματισμού κάποιων στρώσεων σύνθετου υλικού στην περιοχή όπου απαιτείται μείωση του πάχους της κατασκευής. Η μείωση αυτή των στρώσεων γίνεται από το παχύτερο προς το λεπτότερο μέρος και μέσα σε ένα ορισμένο μήκος, που εξαρτάται από τα πάχη των στρώσεων που πρέπει να αφαιρεθούν. Τα σημεία όπου τερματίζονται οι στρώσεις είναι συχνά κρίσιμες περιοχές όπου εκδηλώνεται αστοχία λόγω αποκόλλησης στρώσεων (delamination) [7].

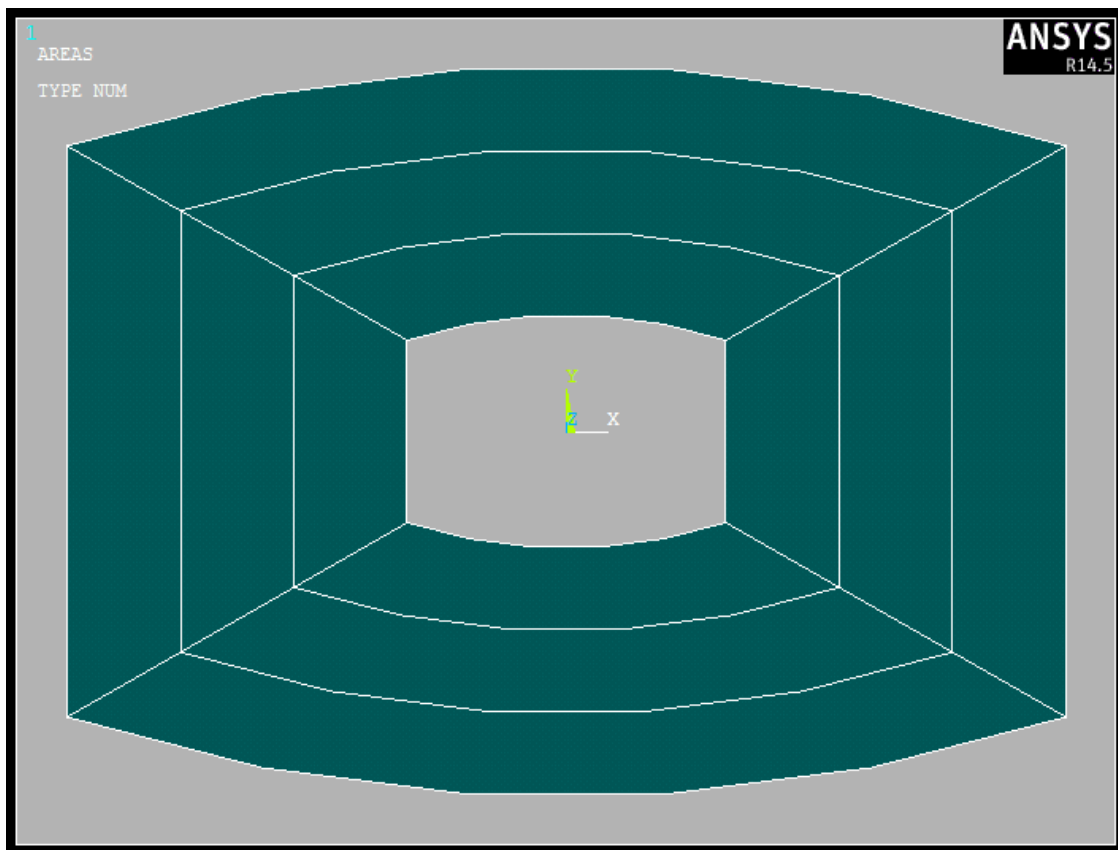
Η μέθοδος ply-drop απαντάται σε αντίστοιχες μελέτες του μηχανισμού εσωτερικής στηρίξεως, είτε για ανάλυση σε επίπεδο διατομής [31,32], είτε σε επίπεδο μέλους [28] (Σχήμα 5.7). Στην παρούσα μελέτη αντί της ply-drop analysis, η οποία είναι δύσκολο να προσομοιωθεί για υπολογιστική ανάλυση σε επίπεδο μέλους, απλουστευτικά δόθηκε μία μικρή καμπύλωση (Σχήμα 5.8) στο αρχικά γωνιακό άκρο του spar-cap (Σχήμα 5.9). Η διαφοροποίηση αυτή στη διαμόρφωση της διατομής του φορέα χρησιμοποιήθηκε σαν παράμετρος ανάλυσης, προκειμένου να ελεγχθεί αν μία μικρή διαφοροποίηση της γεωμετρίας του μοντέλου μπορεί να επηρεάσει το φορτίο λυγισμού και το μέγεθος της παραμόρφωσης των τοιχωμάτων αυτού. Η συγκριτική ανάλυση για διαμόρφωση της γεωμετρίας με και χωρίς καμπύλωση στην περιοχή μετάβασης έγινε χρησιμοποιώντας ως υλικό το πολυμερές από ίνες γυαλιού (GFRP) και με επιβολή της φόρτισης μέσω ομοιόμορφα κατανεμημένης πίεσης.



Σχήμα 5.7: Περιοχή μετάβασης σε υπολογιστικό μοντέλο για μελέτη σε επίπεδο διατομής [32] (αριστερά) και β) πειραματικό μοντέλο για μελέτη σε επίπεδο μέλους [24] (δεξιά)



Σχήμα 5.8: Όψη του φορέα στη θέση $z=0m$ με καμπύλωση στην περιοχή μετάβασης



Σχήμα 5.9: Όψη του φορέα στη θέση $z=0m$ χωρίς καμπύλωση στην περιοχή μετάβασης

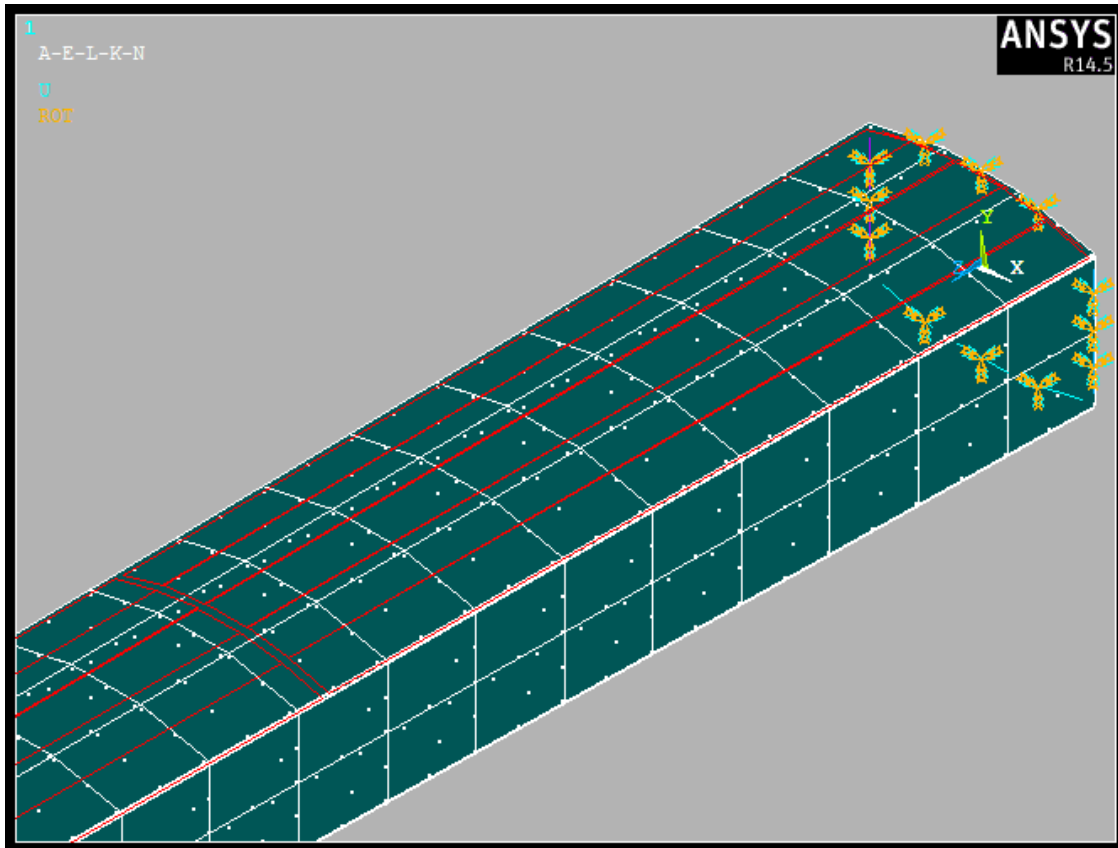
5.3 Συνοριακές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης

Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) του προβλήματος, ο μηχανισμός εσωτερικής στηρίξεως είναι τοποθετημένος και συγκολλημένος με τέτοιο τρόπο στο εσωτερικό τμήμα του πτερυγίου ώστε να καταπονείται και να παραμορφώνεται με τον ίδιο τρόπο με το πτερύγιο, άρα μπορούμε να πούμε ότι έχουν και το ίδιο στατικό προσομοίωμα. Το πτερύγιο στην ουσία είναι δοκός με στατικό προσομοίωμα προβόλου, οπότε αυτό θεωρείται ότι αποτελεί και το στατικό προσομοίωμα για το κουτί εσωτερικής στηρίξεως. Έτσι 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.

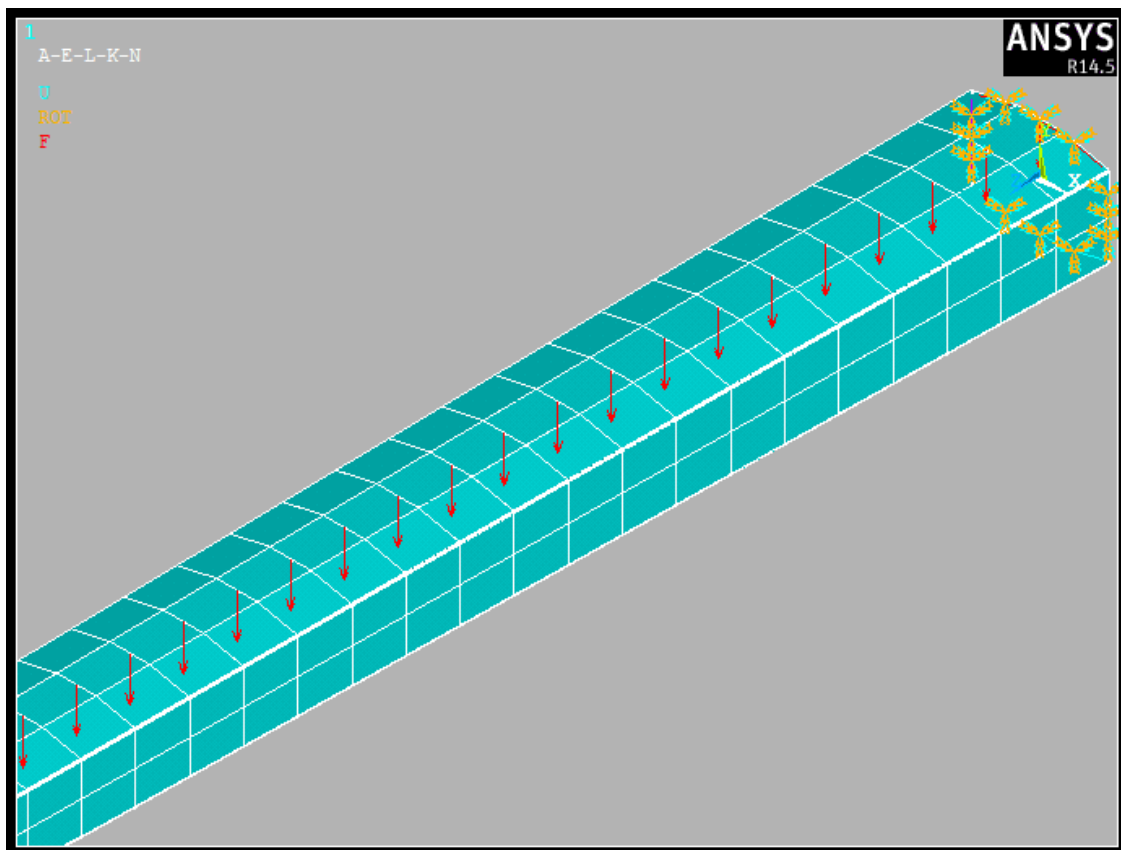
Για την επιβολή της φόρτισης εξετάστηκαν τέσσερις διαφορετικοί τρόποι, προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει απόκλιση τόσο στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού, όσο και στη μορφή και το μέγεθος των παραμορφώσεων του φορέα. Επιπλέον, στην περίπτωση πανομοιότυπων αποτελεσμάτων, θα ήταν χρήσιμο να διαπιστωθεί αν για κάποιο από αυτούς τους τρόπους φόρτισης, έχοντας τα ίδια αποτελέσματα, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση υπολογιστικού κόστους, δεδομένου του σημαντικού χρόνου που δαπανάται κατά τη διεξαγωγή μη γραμμικών αναλύσεων στο πρόγραμμα ANSYS σε έναν συμβατικό υπολογιστή.

Όπως ειπώθηκε στο 2^ο κεφάλαιο, η κάμψη στην οποία υποβάλλεται το πτερύγιο, αλλά και το κουτί στηρίξεως, είναι δύο ειδών: η edge-wise κάμψη, που είναι κάθετη σε μία από τις δύο κόψεις του πτερυγίου (leading edge και trailing edge) και προκαλείται από τα φορτία βαρύτητας του πτερυγίου και η κάμψη flap-wise, που προκαλείται από τα φορτία ανέμου και είναι κάθετη στη μεγάλη επιφάνεια του πτερυγίου, άρα και στα spar-caps. Με βάση το σύστημα συντεταγμένων που φαίνεται στο Σχήμα 5.10, που αποτελεί και το καθολικό σύστημα αναφοράς, η edge-wise είναι κάμψη γύρω από τον άξονα y και η flap-wise είναι γύρω από τον άξονα x . Επίσης το πτερύγιο δέχεται και φυγόκεντρες δυνάμεις λόγω της περιστροφής του ρότορα, οι οποίες όμως δεν είναι σημαντικές και συνήθως αμελούνται κατά το σχεδιασμό.

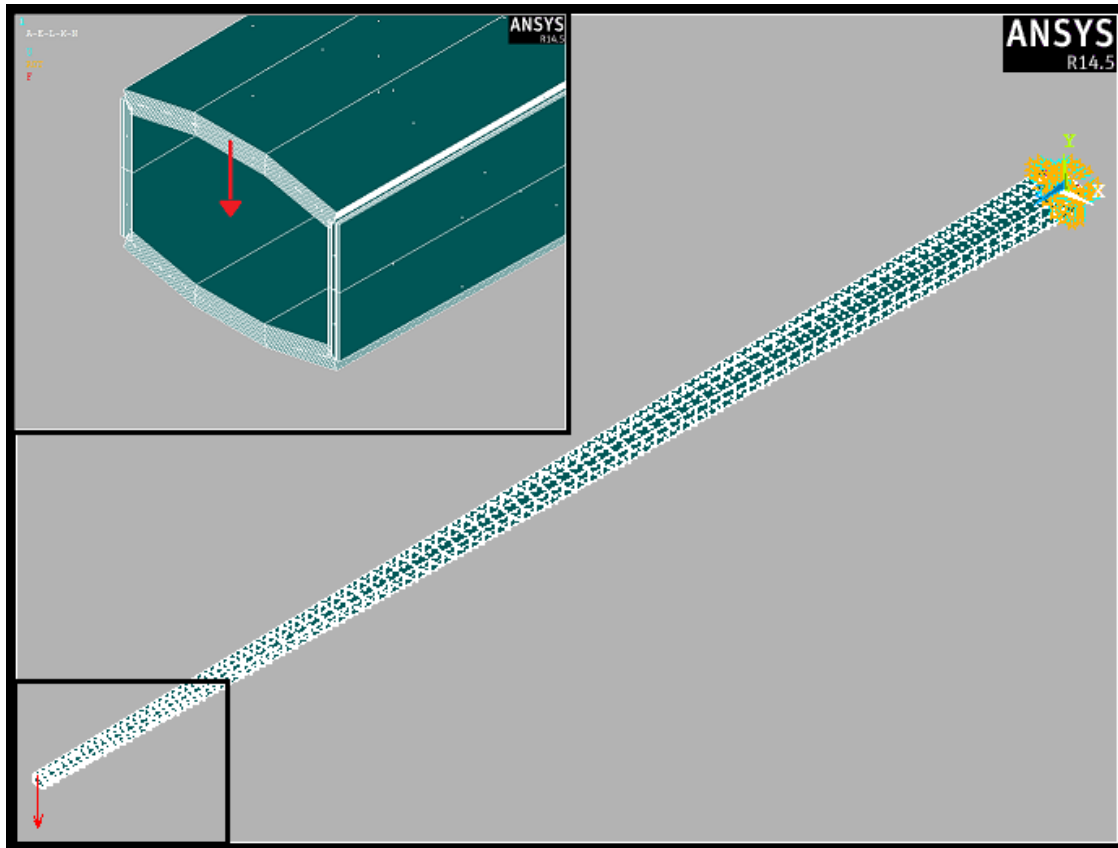
Όλοι οι διαφορετικοί τρόποι εφαρμογής της φόρτισης που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη προκαλούν flap-wise κάμψη στο μηχανισμό στήριξης, επειδή αυτή είναι η σημαντικότερη και αυτή που συνήθως οδηγεί σε αστοχία, σε τοπικό ή/και σε καθολικό επίπεδο. Κατά κύριο λόγο, σε αυτό το είδος κάμψης υποβάλλονται είτε πειραματικά μοντέλα πτερυγίου, είτε υπολογιστικά μοντέλα που αφορούν καθολικά το πτερύγιο ως πρόβολο ή αυτοτελώς το μηχανισμό εσωτερικής στηρίξεως [21, 28]. Συγκεκριμένα, η φόρτιση επιβλήθηκε μέσω: α) ομοιόμορφης πίεσης, κάθετα κατανεμημένης στο άνω spar-cap (πλέγμα κόκκινων γραμμών στο Σχήμα 5.10), β) γραμμικό φορτίο κατά μήκος του φορέα, που επιβλήθηκε στο μέσον του άνω spar-cap (Σχήμα 5.11), γ) συγκεντρωμένο φορτίο στο ελεύθερο άκρο του φορέα (Σχήμα 5.12) και δ) δύο συγκεντρωμένα φορτία ίσου μέτρου, στις θέσεις $z=7,5m$ και $z=15m$ (Σχήμα 5.13). Όλες 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).



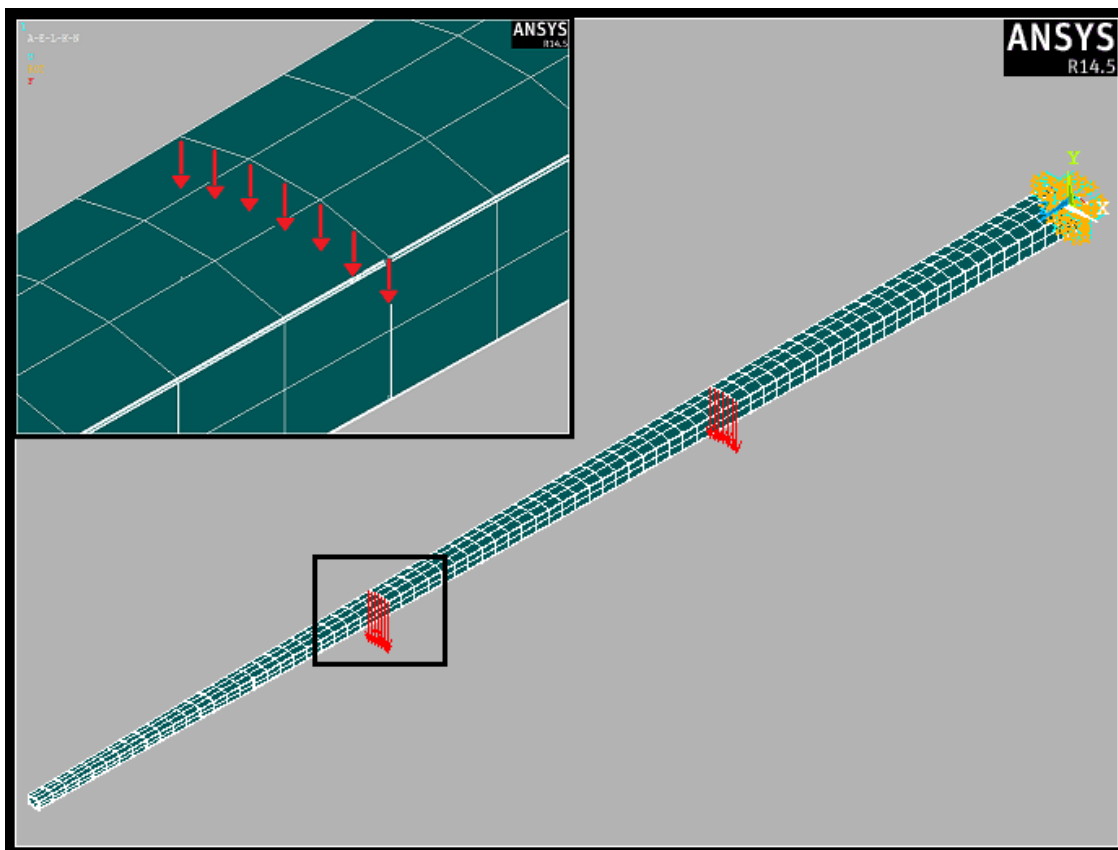
Σχήμα 5.10: Επιβολή φόρτισης μέσω ομοιόμορφα κατανεμημένης πίεσης



Σχήμα 5.11: Επιβολή φόρτισης μέσω γραμμικού φορτίου κατά μήκος του φορέα



Σχήμα 5.12: Επιβολή φόρτισης μέσω συγκεντρωμένου φορτίου στο ελεύθερο άκρο του φορέα



Σχήμα 5.13: Επιβολή φόρτισης μέσω δύο συγκεντρωμένων φορτίων

5.4 Επιλογή ινοπλισμένων σύνθετων υλικών

Τρίτη παράμετρος ανάλυσης είναι το υλικό των ινών του πολυμερούς σύνθετου υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το κουτί εσωτερικής στηρίξεως. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση ανάμεσα σε τρία διαφορετικά ινοπλισμένα πολυμερή: α) πολυμερές με ηλεκτρικές ίνες γυαλιού (E-Glass Fiber Reinforced Polymer – GFRP), β) πολυμερές με ίνες άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Polymer – CFRP), γ) πολυμερές με ίνες αραμιδίου (Aramid Fiber Reinforced – AFRP), καθώς και συνδυασμός αυτών σε υβριδικά συστήματα. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε η ίδια μήτρα από εποξειδική ρητίνη (epoxy), η ίδια διάταξη των υλικών όσον αφορά τις στρώσεις στα spar-caps και τα shear-webs, που επίσης είχαν το ίδιο πάχος σε όλα τα μοντέλα με μόνη αλλαγή την αντικατάσταση των ινών.

5.4.1 Πολυμερές με ίνες γυαλιού (GFRP)

Τα ινοπλισμένα πολυμερή με ίνες γυαλιού είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σε πτερύγια ανεμογεννητριών. Παρ' όλα αυτά λίγες πληροφορίες είναι δημόσια διαθέσιμες σχετικά με τη διαδικασία δομικού σχεδιασμού του πτερυγίου (ιδιότητες, διάταξη και πάχη στρώσεων), αφού παραμένουν εμπιστευτικές για τους κατασκευαστές, με αποτέλεσμα να παρατηρείται έλλειμμα δεδομένων για τις ερευνητικές διαδικασίες. Ως εκ τούτου, οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού GFRP, όπως και τα πάχη και η διάταξη των επιμέρους στρώσεων ελήφθησαν από αντίστοιχη εργασία [32], ενώ έχουν προέλθει από πειραματικά αποτελέσματα για τις δεδομένες κατευθύνσεις ινών και για τη διάταξη των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε μελέτη πτερυγίου ανεμογεννήτριας [23].

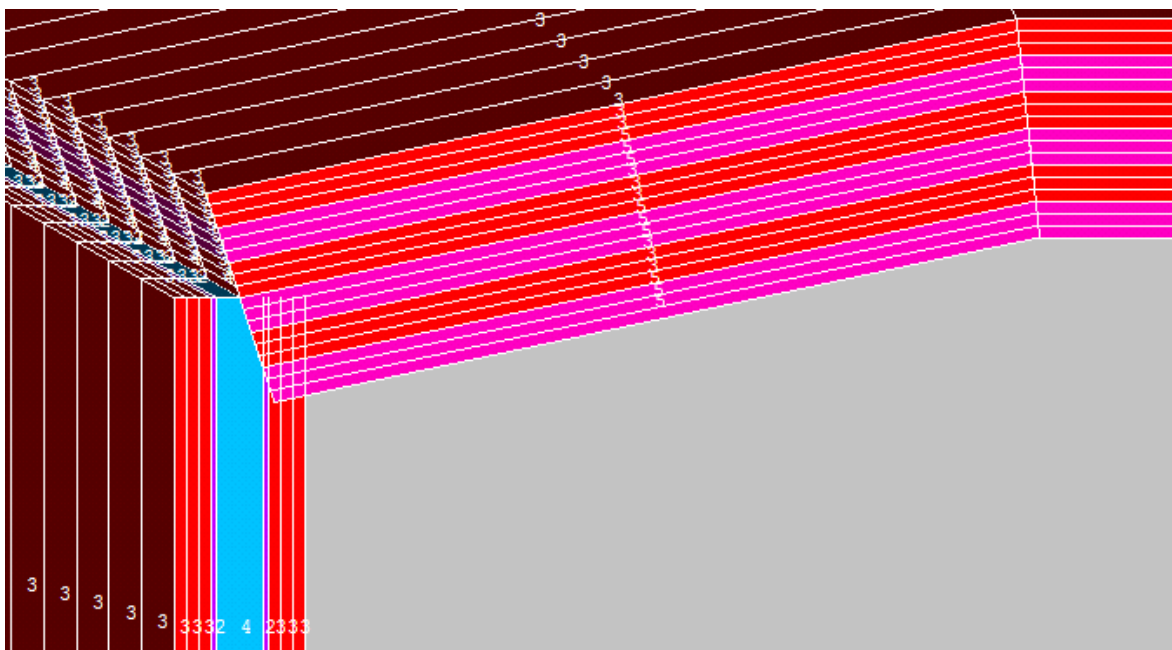
Συγκεκριμένα, η πολυστρωματική δομή στα spar-caps είναι κατασκευασμένη εναλλάσσοντας στρώματα ίσου πάχους από υλικό με ίνες σε τρεις διευθύνσεις (tri-axial), $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$, και από το υλικό με ίνες σε μία διεύθυνση (uni-axial). Τα shear-webs (όπως και το εξωτερικό περίβλημα του πτερυγίου) έχουν δομή υλικού sandwich, που αποτελείται από τρεις στρώσεις σύνθετου laminate υλικού με τις ίνες E-glass σε τρεις διευθύνσεις, $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$, εκατέρωθεν του πυρήνα, που είναι κατασκευασμένος από ξύλο τύπου balsa (τροπικό δέντρο) (Σχήμα 5.14). Όσον αφορά τα πάχη των στρώσεων, λόγω επίσης της έλλειψης δεδομένων δεν έγινε γραμμική μείωση στο πάχος των spar-caps, αλλά μόνο στα shear-webs, ως συνάρτηση του μήκους της χορδής. Έτσι το πάχος του spar-cap είναι σταθερό κατά μήκος και ίσο με 21,6mm, ενώ το πάχος του shear-web είναι 17,69mm στη θέση $z=0m$ και 12,92mm στη θέση $z=22,5m$. Η αλληλουχία και ο προσανατολισμός των στρώσεων που χρησιμοποιούνται δίνονται στα Σχήματα 5.15 και 5.16, όπου η σειρά επίστρωσης είναι από το εξωτερικό προς το εσωτερικό μέρος του box girder, ο χαρακτηριστικός αριθμός κάθε υλικού δίνεται στον Πίνακα 5.2, μαζί με το πάχος της αντίστοιχης στρώσης, ενώ οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι, ομοίως με την σχετική μελέτη [32], έχει γίνει αλλαγή σε σχέση με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας [23], όπου στο shear-web εξωτερικά ήταν τοποθετημένη στρώση gel πάχους 0,68mm και στη συνέχεια στρώση με ίνες τυχούσης διεύθυνσεως (random) πάχους 0,5mm. Οι ακραίες στρώσεις gel και ινών τυχούσης διεύθυνσεως έχουν αφαιρεθεί και έχουν προστεθεί δύο στρώσεις με ίνες τυχούσης διεύθυνσεως εκατέρωθεν του πυρήνα, ίσου συνολικού πάχους, αυξάνοντας έτσι την αντοχή του shear-web σε λυγισμό και ενισχύοντας τον ασθενή πυρήνα.

Πίνακας 5.2: Σύνθετα υλικά πτερυγίου

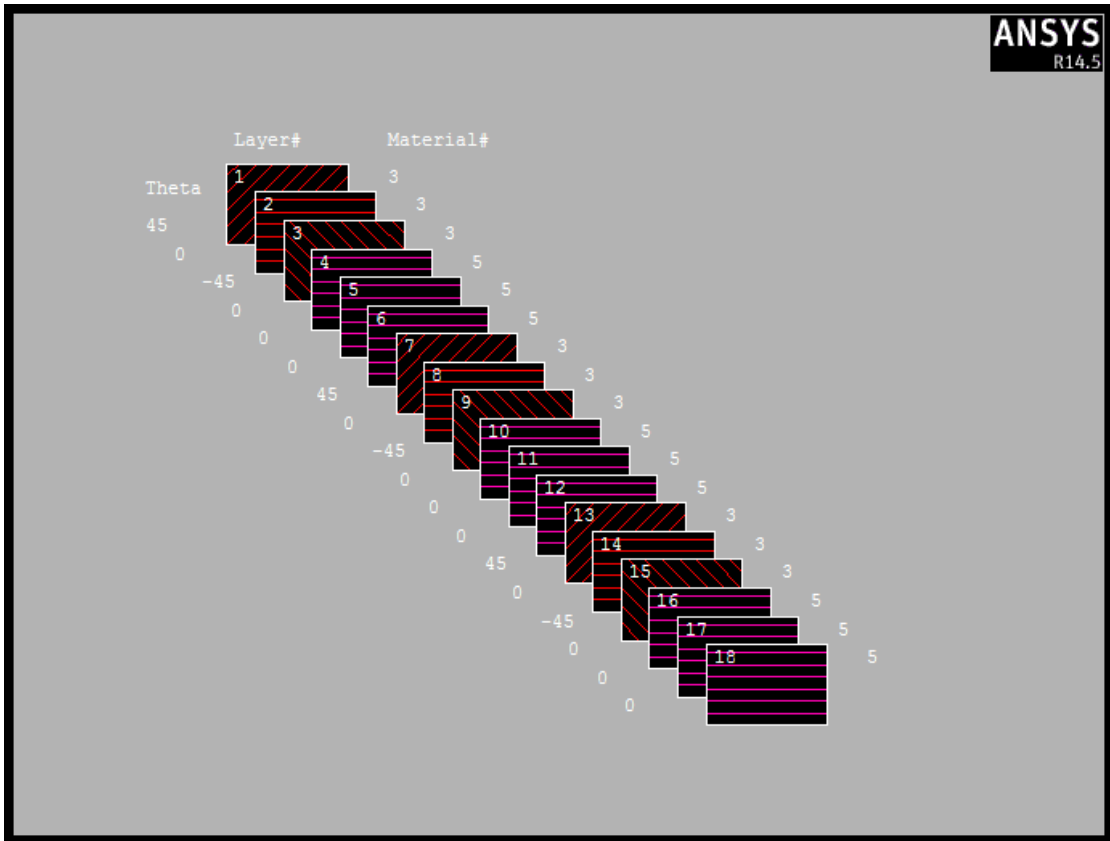
Αριθμός υλικού	Υλικό	Πάχος στρώσης (mm)
1	gel	0,68
2	ίνες τυχούσης διεύθυνσης (random)	0,59
3	ίνες σε τρεις διευθύνσεις (tri-axial)	1,20
4	ξύλο balsa	0,005×μήκος χορδής c
5	ίνες σε μία διεύθυνση (uni-axial)	1,20

Πίνακας 5.3: Ιδιότητες υλικού GFRP

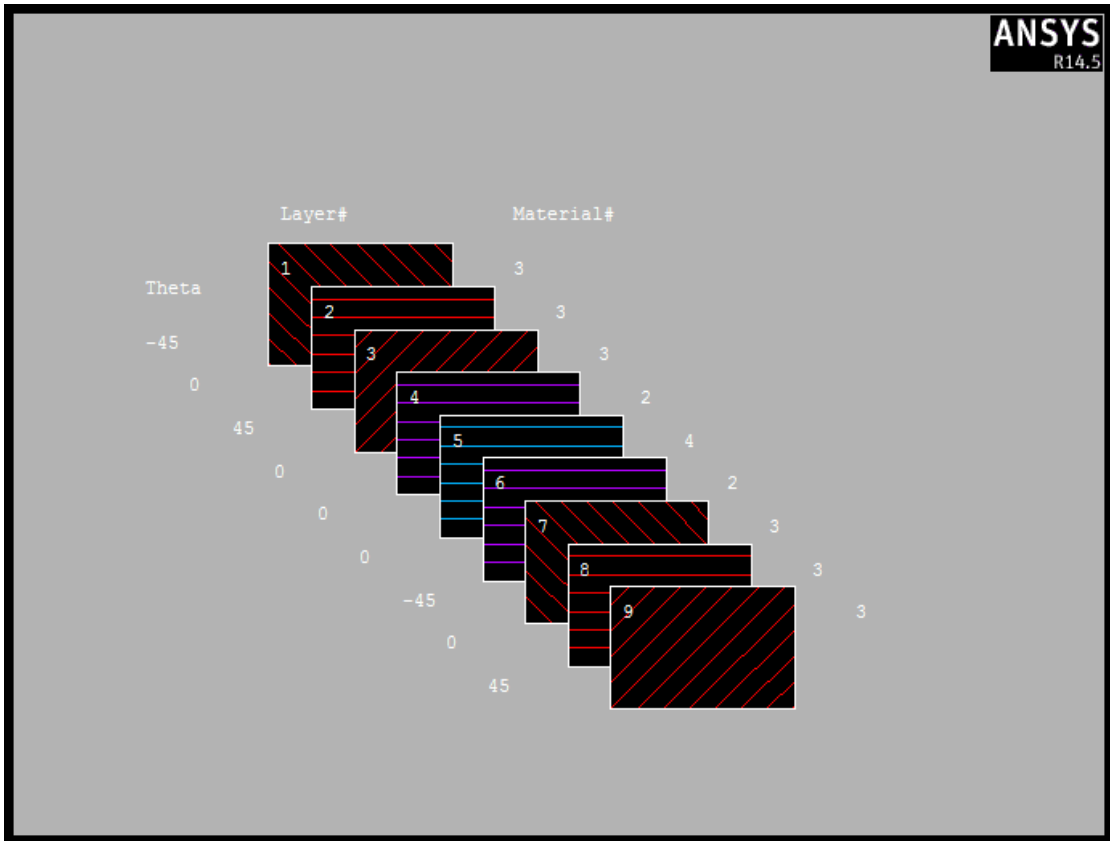
Ιδιότητες	Uni-axial (#5)	Tri-axial (#3)	Random (#2)	Balsa (#4)	Gel (#1)	Epoxy adhesive
E_{xx} (GPa)	31,00	24,20	9,65	2,07	3,44	2,76
E_{yy} (GPa)	7,59	8,97	9,65	2,07	3,44	2,76
G_{xy} (GPa)	3,52	4,97	3,86	0,14	1,38	1,10
ν_{xy}	0,31	0,39	0,30	0,22	0,30	0,30
u_f	0,40	0,40	–	–	–	–
w_f	0,61	0,61	–	–	–	–
ρ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



Σχήμα 5.14: Εικόνα της διατομής του μέλους, όπου είναι εμφανής η πολυστρωματική δομή του spar-cap και η sandwich δομή του shear-web



Σχήμα 5.15: Διάταξη υλικών με σειρά επίστρωσης στην πολυστρωματική δομή του spar-cap



Σχήμα 5.16: Διάταξη υλικών με σειρά επίστρωσης στην sandwich δομή του shear-web

5.4.2 Πολυμερές με ίνες άνθρακα (CFRP)

Λόγω ανεπάρκειας στη διεθνή βιβλιογραφία πειραματικών δεδομένων, αντίστοιχων με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση του GFRP, οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού CFRP προέκυψαν με εφαρμογή τύπων από τη θεωρία σύνθετων υλικών, οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχη εργασία [7], απ' όπου και ελήφθησαν. Ως δεδομένα θεωρήθηκαν οι ιδιότητες ινών άνθρακα τύπου AS4-D και μήτρας από εποξειδική ρητίνη, ίδιας με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στο GFRP υλικό, και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Ιδιότητες ινών άνθρακα AS4-D και μήτρας από εποξειδική ρητίνη

Μέτρο Ελαστικότητας ινών, E_f (GPa)	241
Μέτρο Ελαστικότητας μήτρας, E_m (GPa)	3,50
Μέτρο Διάτμησης ινών, G_f (GPa)	100,42
Μέτρο Διάτμησης μήτρας, G_m (GPa)	1,27
Κατ' όγκο περιεκτικότητα ινών, u_f	0,60
Κατ' όγκο περιεκτικότητα μήτρας, u_m	0,40
Λόγος Poisson ινών, ν_f	0,20
Λόγος Poisson μήτρας, ν_m	0,38

➤ Ίνες σε διεύθυνση 0°

Για τις στρώσεις με ίνες σε διεύθυνση 0° (uni-axial), υπολογίστηκε το διαμήκες μέτρο Ελαστικότητας E_1 του σύνθετου υλικού, με βάση το νόμο της σύνθεσης, όπως δόθηκε στη σχέση (3.11):

$$E_1 = u_f E_f + u_m E_m \Rightarrow E_1 = 146 \text{ GPa} , \quad (5.1)$$

Ο λόγος Poisson ν_{12} του ορθότροπου υλικού υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$\nu_{12} = \nu_f u_f + \nu_m u_m \Rightarrow \nu_{12} = 0,27 , \quad (5.2)$$

Το εγκάρσιο μέτρο Ελαστικότητας E_2 υπολογίστηκε από τη σχέση των Whitney-Riley (1967) [34]:

$$\frac{1 - \nu_2}{E_2} - \frac{2\nu_{12}^2}{E_1} = \frac{1}{E_f} (1 - \nu_f - 2\nu_f^2) u_f + \frac{1}{E_m} (1 - \nu_m - 2\nu_m^2) u_m \Rightarrow E_2 = 18,53 \text{ GPa} , \quad (5.3)$$

όπου ο εγκάρσιος λόγος Poisson ν_2 υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{1}{\nu_2} = \frac{u_f}{\nu_f} + \frac{u_m}{\nu_m} \Rightarrow \nu_2 = 0,25, \quad (5.4)$$

Για τον υπολογισμό του μέτρου διατμήσεως G_{12} εφαρμόστηκε ο τύπος του Tsai (1964):

$$G_{12} = (1-C) \frac{(2G_f - (G_f - G_m)u_m)}{2G_m + (G_f - G_m)u_m} + C \frac{(G_f(G_f + G_m) - (G_f - G_m)u_m)}{(G_f + G_m) + (G_f - G_m)u_m} \quad (5.5)$$

$$\Rightarrow G_{12} = 9,41GPa$$

όπου η ποσότητα C είναι ο συντελεστής γεινιάσεως/συνάφειας (contiguity factor). Ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές από 0 έως 1 και υπολογίστηκε εφαρμόζοντας στη σχέση (5.5) τις πειραματικές τιμές των ιδιοτήτων του υλικού GFRP (Πίνακας 5.3), απ' όπου προέκυψε η τιμή $C=0,082$ [7].

➤ Ύνες τυχούσης διευθύνσεως

Για τις στρώσεις CFRP με ίνες τυχούσης διευθύνσεως (random), που χρησιμοποιούνται εκατέρωθεν του πυρήνα της sandwich δομής στα shear-webs, έγινε η παραδοχή ότι το υλικό συμπεριφέρεται ως ισότροπο και κατά τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα τα παραπάνω αποτελέσματα για το uni-axial υλικό (δηλαδή οι τιμές των E_1 , E_2 , ν_{12} και G_{12}).

Αρχικά υπολογίστηκε ο λόγος Poisson ν_{21} από τη σχέση του Maxwell:

$$E_1 \nu_{21} = E_2 \nu_{12} \Rightarrow \nu_{21} = 0,034, \quad (5.6)$$

Για το μέτρο Ελαστικότητας και το λόγο Poisson εφαρμόστηκαν οι τύποι του Eisenberg (1979):

$$E^{random} = \frac{(Q_{11} + Q_{22} + 2Q_{12})(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} + 4Q_{66})}{3Q_{11} + 3Q_{22} + 2Q_{12} + 4Q_{66}}, \quad (5.7)$$

$$\Rightarrow E^{random} = E_{xx} = E_{yy} = 62,47GPa$$

$$\nu^{random} = \frac{Q_{11} + Q_{22} + 6Q_{12} - 4Q_{66}}{3Q_{11} + 3Q_{22} + 2Q_{12} + 4Q_{66}} \Rightarrow \nu^{random} = \nu_{xy} = 0,29, \quad (5.8)$$

όπου Q_{ij} είναι οι όροι ακαμψίας του μητρώου Ελαστικότητας για επίπεδη εντατική κατάσταση, που υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις [10]:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \Rightarrow Q_{11} = 147,36GPa, \quad (5.9)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \Rightarrow Q_{22} = 18,703GPa, \quad (5.10)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \Rightarrow Q_{12} = 5,055GPa, \quad (5.11)$$

$$Q_{66} = G_{12} = 9,41GPa, \quad (5.12)$$

Για τον υπολογισμό του μέτρου διατμήσεως χρησιμοποιήθηκε η σχέση [10]:

$$G^{random} = \frac{E^{random}}{2(1 + \nu^{random})} = 24,19GPa, \quad (5.13)$$

➤ Ίνες σε τρεις διευθύνσεις

Τέλος, για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του υλικού CFRP με ίνες σε τρεις διευθύνσεις (tri-axial), $-45^\circ/0^\circ/45^\circ$, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα οι τιμές των E_1 , E_2 , ν_{12} και G_{12} που προέκυψαν από τις σχέσεις (5.1) έως (5.5) και εφαρμόστηκαν οι τύποι στροφής για γωνία $\theta=45^\circ$:

$$\frac{1}{E'_1} = \frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} - \frac{2\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_2} \nu_{21} + \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{G_{12}} \Rightarrow E'_1 = 24,48GPa, \quad (5.13)$$

$$\frac{1}{E'_2} = \frac{\sin^4 \theta}{E_1} + \frac{\cos^4 \theta}{E_2} - \frac{2\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_2} \nu_{21} + \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{G_{12}} \Rightarrow E'_2 = 24,48GPa, \quad (5.14)$$

$$E_1^{tri-axial} = \frac{2E'_1 + E_1}{3} = 65GPa, \quad (5.15)$$

$$E_2^{tri-axial} = \frac{2E'_2 + E_2}{3} = 22,50GPa, \quad (5.16)$$

$$-\frac{\nu'_{12}}{E'_2} = \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_1} + \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_2} - \frac{(\cos^4 \theta + \sin^4 \theta)}{E_2} \nu_{21} - \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{G_{12}}, \quad (5.17)$$

$$\Rightarrow \nu'_{12} = 0,3$$

$$\nu_{12}^{tri-axial} = \frac{2\nu'_{12} + \nu_{12}}{3} = 0,29, \quad (5.18)$$

$$\frac{1}{G'_{12}} = \frac{4\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_1} + \frac{4\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_2} + \frac{8(\cos^2 \theta \sin^2 \theta)}{E_2} \nu_{21} + \frac{(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)^2}{G_{12}}, \quad (5.19)$$

$$\Rightarrow G'_{12} = 15,50GPa$$

$$G_{12}^{tri-axial} = \frac{2G'_{12} + G_{12}}{3} = 13,46GPa, \quad (5.20)$$

Οι ιδιότητες του υλικού CFRP που υπολογίστηκαν παραπάνω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.5 που ακολουθεί.

Πίνακας 5.5: Ιδιότητες υλικού CFRP

Ιδιότητες	Uni-axial	Tri-axial	Random
E_{xx} (GPa)	146,00	65,00	62,47
E_{yy} (GPa)	18,53	22,50	62,47
G_{xy} (GPa)	9,41	13,46	24,19
ν_{xy}	0,27	0,29	0,29

5.4.3 Πολυμερές με ίνες αραμιδίου (AFRP)

Τα τελευταία χρόνια οι ίνες αραμιδίου βρίσκουν ευρεία εφαρμογή, αντικαθιστώντας μεταλλικά νήματα και ανόργανες ίνες σε κατασκευές από σύνθετα υλικά στην αεροναυπηγική, στη ναυτιλία και την αυτοκινητοβιομηχανία. Οι ίνες αραμιδίου όχι μόνο παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από το χάλυβα και τα υαλονήματα για ίσο βάρος, αλλά και διατηρούν αυτές τις ιδιότητες σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, αφού παρουσιάζουν υψηλή θερμομόνωση και πυραντοχή. Επιπλέον, τα πολυμερή με ίνες αραμιδίου έχει αποδειχθεί ότι έχουν πολύ μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και καλύτερη αντοχή σε κόπωση από πολυμερή με ίνες γυαλιού [25]. Ωστόσο, παρά τα θετικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν και το εύρος των εφαρμογών που έχουν, ακόμα δεν έχει ερευνηθεί η δυνατότητα χρησιμοποίησης τους στην κατασκευή πτερυγίων ανεμογεννήτριας. Έτσι, στην παρούσα εργασία επιχειρείται να εξεταστεί η συμπεριφορά τους σε λυγισμό, συγκρινόμενα με τα πολυμερή με ίνες γυαλιού και ίνες άνθρακα, που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Το αραμίδιο παρουσιάζει ευρύ φάσμα ιδιοτήτων, ανάλογα με την κατεργασία που υφίσταται και την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Ένα από τα πιο γνωστά παράγωγα του είναι το Kevlar, που είναι και η εμπορική ονομασία του αραμιδίου. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες ινών Kevlar, όπως οι: Kevlar 29, Kevlar 49, Kevlar 68, Kevlar 119, Kevlar 129, Kevlar 149. Οι ίνες Kevlar 149 είναι μία από τις πιο πρόσφατες κατηγορίες στην οικογένεια Kevlar. Έχουν πολύ υψηλότερο μέτρο Ελαστικότητας από τις ίνες Kevlar 29 και 49, έχοντας ίδια περίπου πυκνότητα και διάμετρο, ενώ παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερη ευπάθεια στην υγρασία, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται κυρίως στον τομέα της αεροναυπηγικής. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, οι ίνες Kevlar 149 επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν για το ινοπλισμένο πολυμερές του μηχανισμού εσωτερικής στηρίξεως, με μηχανικές ιδιότητες που δίνονται στον Πίνακα 5.6 [25] μαζί με τις ιδιότητες της μήτρας από εποξειδική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε και στο CFRP, ενώ οι μηχανικές ιδιότητες του πολυμερούς AFRP προέκυψαν με εφαρμογή των σχέσεων (5.1) έως (5.20) και ανάλογη διαδικασία και δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.6: Ιδιότητες ινών αραμιδίου (Kevlar 149) και μήτρας από εποξειδική ρητίνη

Μέτρο Ελαστικότητας ινών, E_f (GPa)	186
Μέτρο Ελαστικότητας μήτρας, E_m (GPa)	3,50
Μέτρο Διάτμησης ινών, G_f (GPa)	68,38
Μέτρο Διάτμησης μήτρας, G_m (GPa)	1,27
Κατ' όγκο περιεκτικότητα ινών, u_f	0,60
Κατ' όγκο περιεκτικότητα μήτρας, u_m	0,40
Λόγος Poisson ινών, ν_f	0,36
Λόγος Poisson μήτρας, ν_m	0,38
Πυκνότητα ινών, ρ_f (g/cm ³)	1,47
Εφελκυστική αντοχή ινών, σ_f (MPa)	3400

Πίνακας 5.7: Ιδιότητες υλικού AFRP

Ιδιότητες	Uni-axial	Tri-axial	Random
E_{xx} (GPa)	113	50,87	48,88
E_{yy} (GPa)	15,24	18,28	48,88
G_{xy} (GPa)	7,46	10,72	18,63
ν_{xy}	0,37	0,34	0,31

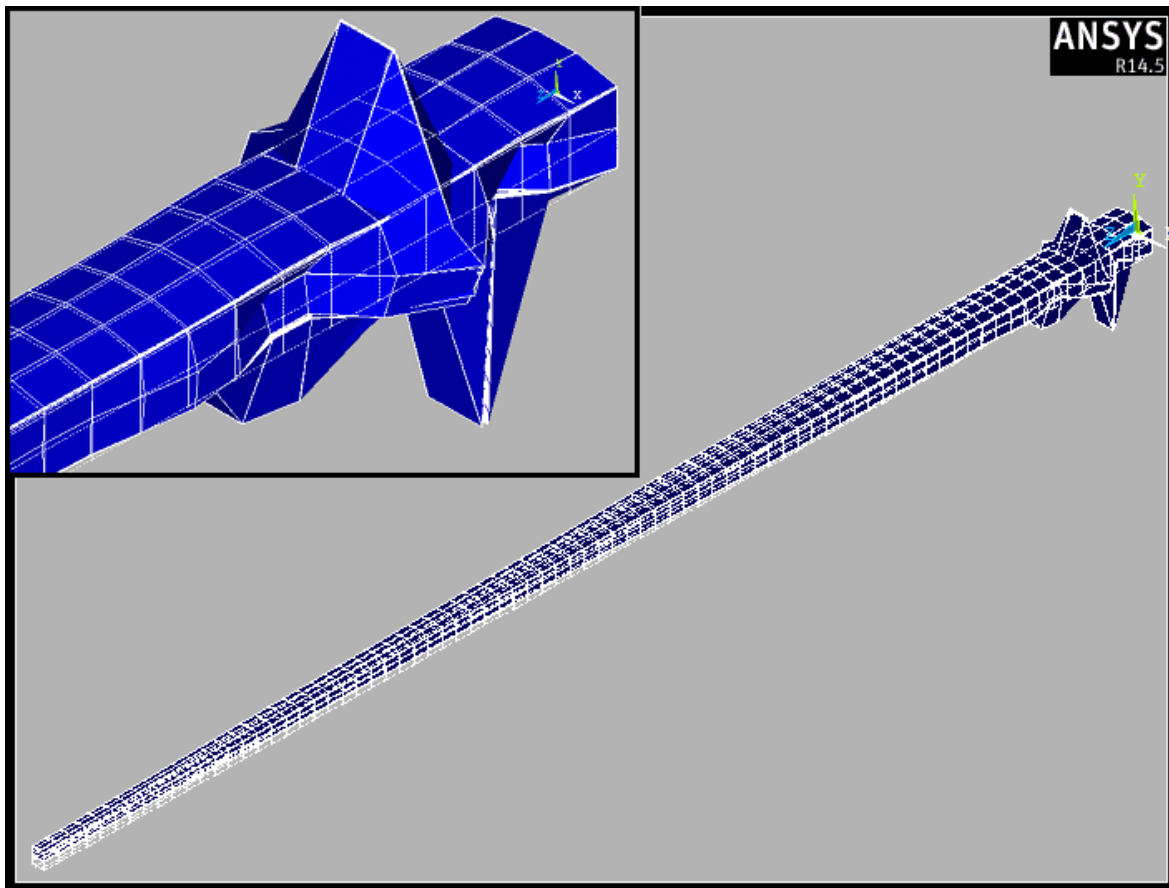
6 Αποτελέσματα αναλύσεων

6.1 Αποτελέσματα ανάλυσης για το βασικό μοντέλο

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το αρχικό μοντέλο της έρευνας, δηλαδή για το γεωμετρικό μοντέλο χωρίς καμπύλωση στην περιοχή μετάβασης από το spar-cap στο shear-web, όπου η επιβολή της φόρτισης γίνεται μέσω ομοιόμορφης πίεσης κάθετα κατανεμημένης στο άνω spar-cap και με υλικό κατασκευής ινοπλισμένο πολυμερές από ίνες E-glass (GFRP). Το μοντέλο αυτό στο εξής θα αναφέρεται ως βασικό μοντέλο. Θα περιγραφούν αρχικά αυτοτελώς τα αποτελέσματα και παρατηρήσεις πάνω σε αυτά, ώστε να σχηματιστεί ένα σημείο αναφοράς σε σχέση με την απόκριση του μοντέλου, ώστε στη συνέχεια να καταστεί δυνατή και μία συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών μοντέλων για καθεμιά από τις τρεις παραμέτρους ανάλυσης.

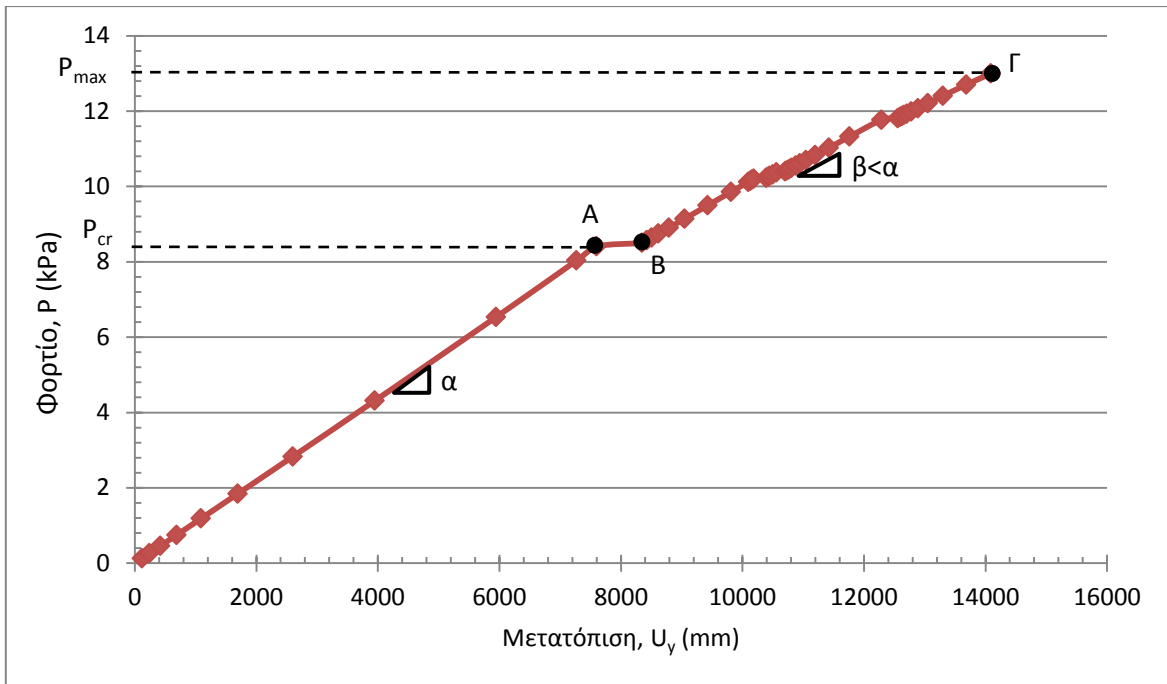
Για το βασικό μοντέλο, όπως και για όλες τις διαφορετικές παραμέτρους, πραγματοποιήθηκαν και οι δύο αναλύσεις λυγισμού, γραμμική και μη γραμμική. Ο λόγος που πραγματοποιούνται και οι δύο αναλύσεις είναι για να αποκτήσουμε μέσω της γραμμικής ανάλυσης αρχικά μια πρώτη άποψη για την τάξη μεγέθους του κρίσιμου φορτίου λυγισμού και την περιοχή εκδήλωσης τοπικού λυγισμού, ενώ επιπλέον αποτελεί και ένα πρόσθετο έλεγχο όσον αφορά τη σωστή κατασκευή και λειτουργία των προσομοιωμάτων. Από τη διεξαγωγή γραμμικής ανάλυσης, προέκυψε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του βασικού μοντέλου, λαμβάνοντας την μικρότερη θετική ιδιοτιμή, ίσο με $P_{cr}=12,47\text{kPa}$, καθώς και η ιδιομορφή λυγισμού που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή αυτή και δίνεται στο Σχήμα 6.1. Από το σχήμα μπορούμε να πάρουμε μία εικόνα για τον παραμορφωμένο φορέα καθώς και για την περιοχή όπου θα εκδηλωθεί ο τοπικός λυγισμός, καμία άλλη πληροφορία ωστόσο δεν προκύπτει ούτε για το μέγεθος των παραμορφώσεων, ούτε για τη μεταλυγισμική αντοχή του φορέα, σε περίπτωση που διαθέτει. Τα αποτελέσματα επομένως επιβεβαιώνουν τη σημαντική επιρροή των μη γραμμικών φαινομένων και άρα τη διαπίστωση ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση φορέα, όπως και σε αντίστοιχες περιπτώσεις, η εκτέλεση μόνο γραμμικής ανάλυσης σίγουρα δεν επαρκεί για την εξαγωγή τελικών συμπερασμάτων σε σχέση με την απόκριση του εξεταζόμενου μοντέλου.

Η τελική και πιο ρεαλιστική συμπεριφορά του φορέα προκύπτει από τη μη γραμμική ανάλυση λυγισμού, όπου λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμικότητα γεωμετρίας. Για την εκτίμηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του φορέα εξάγονται δρόμοι ισορροπίας από τις μη γραμμικές αναλύσεις και επιλέγονται χαρακτηριστικά σημεία επί αυτών, τα οποία συνοδεύονται από φωτογραφίες τάσεων και παραμορφώσεων. Έτσι, με χρήση αυτών των εικόνων αποκτούμε μια πολύ καλή εποπτεία του φορέα, έτσι όπως αυτή μεταβάλλεται σταδιακά σε κάθε βήμα του εκάστοτε δρόμου ισορροπίας κατά την διάρκεια επιβολής της φόρτισης.

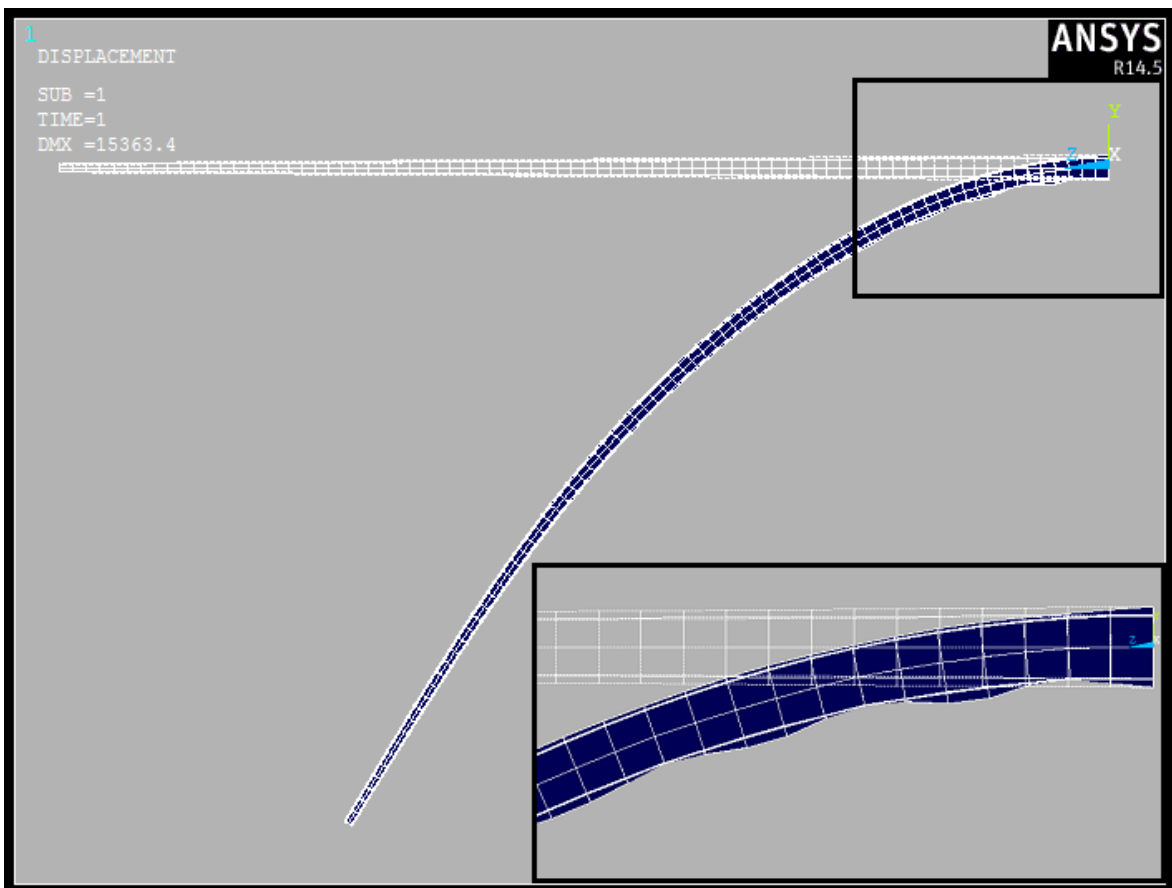


Σχήμα 6.1: Πρώτη ιδιομορφή λυγισμού από γραμμική ανάλυση

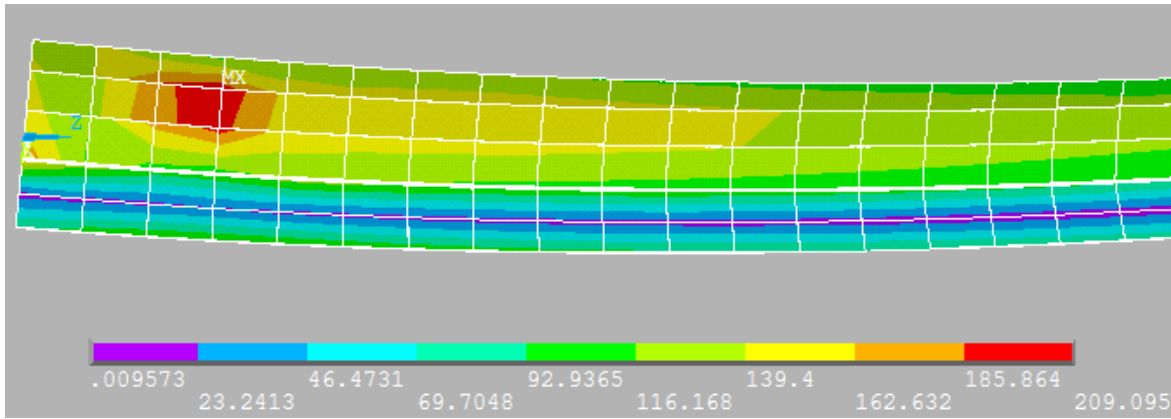
Στη μη γραμμική ανάλυση λυγισμού επιβλήθηκε φορτίο με μέγιστη τιμή $P_{max}=13\text{kPa}$, προσαυξητικά μέσω 50 βημάτων. Η τιμή P_{max} αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του φορτίου για την οποία επιτυγχάνεται σύγκλιση της επίλυσης κατά τη διεξαγωγή μη γραμμικής ανάλυσης στο ANSYS, κατόπιν δοκιμών και με μεγαλύτερες τιμές. Σε όλες τις περιπτώσεις που ακολουθούν η τιμή P_{max} , που κάθε φορά επιβάλλεται, έχει προκύψει με ανάλογη διαδικασία. Η σχέση μεταξύ του εφαρμοζόμενου φορτίου και της μετατόπισης κατά τη διεύθυνση της φόρτισης (άξονας y) απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2, όπου η μετατόπιση αντιστοιχεί σε κόμβο του ελεύθερου άκρου του φορέα (θέση $z=22,5\text{m}$). Το διάγραμμα καταδεικνύει γραμμική συμπεριφορά (προλυγισμικό στάδιο) μέχρι το φορτίο να γίνει ίσο με $8,41\text{kPa}$, φορτίο που αντιστοιχεί στο σημείο διακλάδωσης A (bifurcation point). Κατόπιν αυτού, ο φορέας εμφανίζει έντονη μη γραμμική απόκριση, μέχρι το φορτίο των 13kPa (σημείο Γ) (μεταλυγισμικό στάδιο). Η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης εμφανίζει σταθερή μεταλυγισμική συμπεριφορά μεταξύ των σημείων A και Γ. Επιπλέον, με βάση το διάγραμμα αυτό αλλά και τη συνολική εικόνα του παραμορφωμένου φορέα στο τέλος της φόρτισης (Σχήμα 6.3) είναι εμφανές ότι η καθολική παραμόρφωση του φορέα δεν επηρεάζεται σημαντικά από την εκδήλωση τοπικού λυγισμού. Επομένως είναι δύσκολο να εξαχθεί κάποιο κριτήριο, το οποίο βασιζόμενο στην συνολική εκτροπή του φορέα, θα υποδεικνύει πόσο κοντά είναι το πτερυγίο στην αστοχία. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται και σε σχετική μελέτη [28], όπου γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από πείραμα πλήρους κλίμακας πτερυγίου ανεμογεννήτριας και από υπολογιστική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία του κουτιού εσωτερικής στηρίξεως (περίπτωση μελέτης αντίστοιχη με την παρούσα).



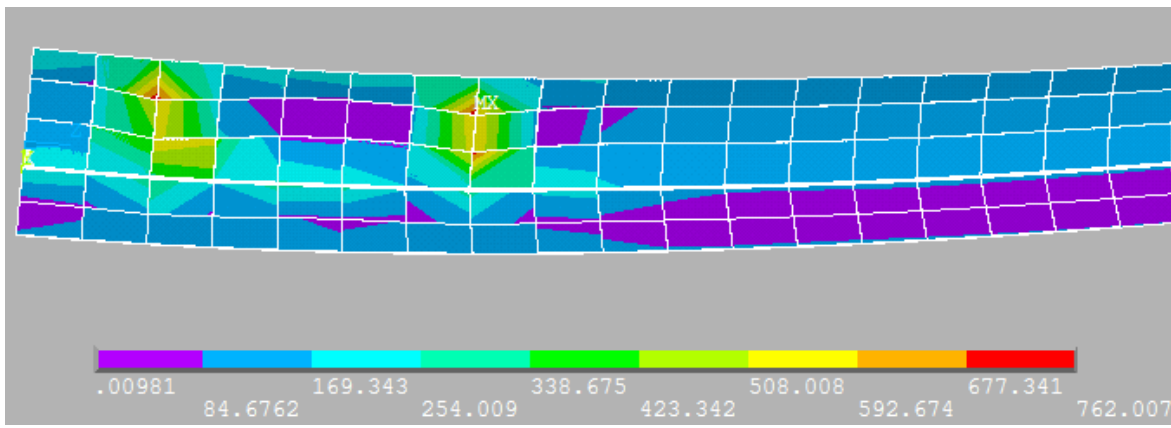
Σχήμα 6.2: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης ελεύθερου άκρου φορέα



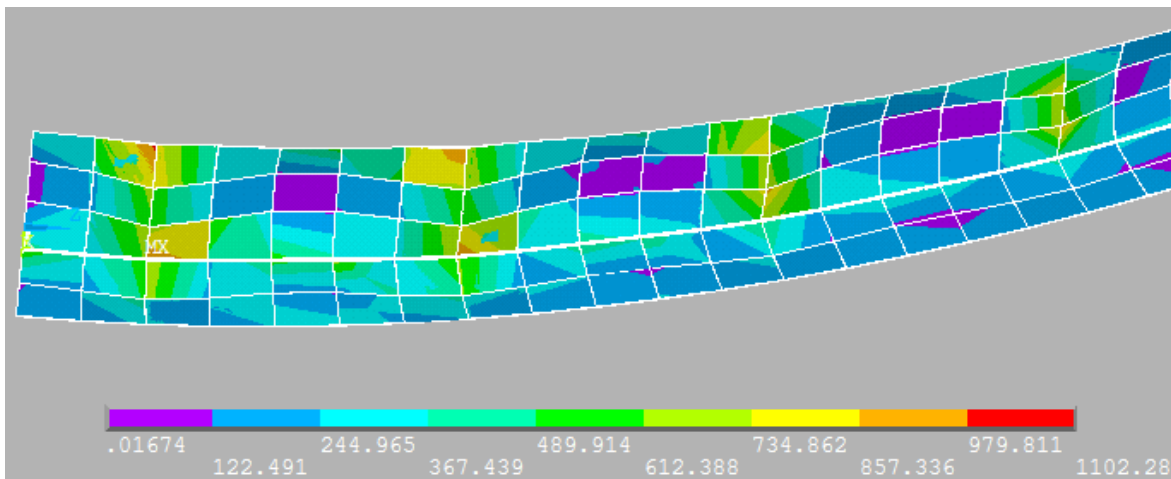
Σχήμα 6.3: Εικόνες καθολικής και τοπικής παραμόρφωσης του φορέα, μετά την ολοκλήρωση της φόρτισης



Σχήμα 6.4: Εικόνα τάσεων von Mises για το σημείο A



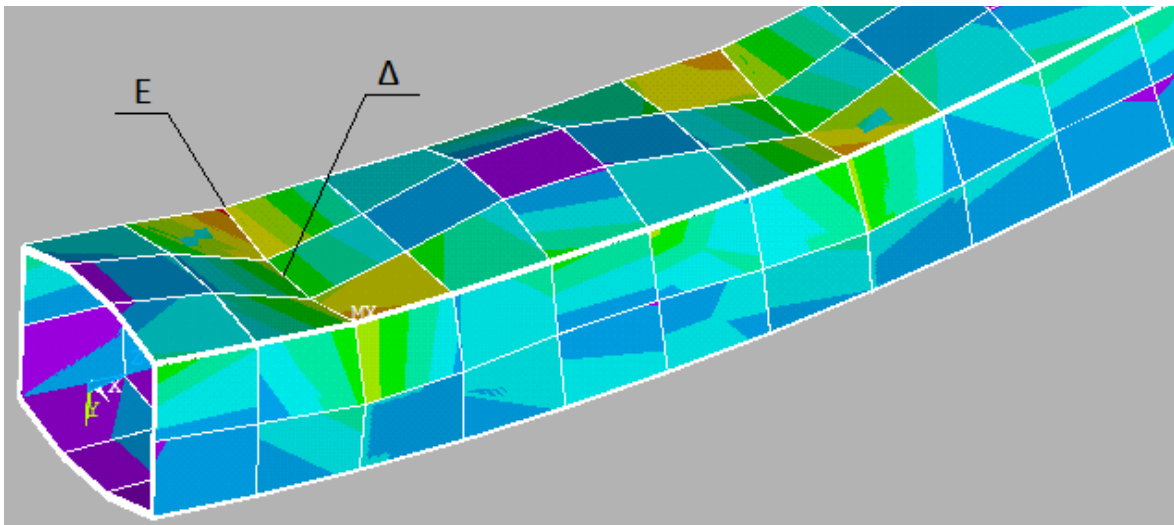
Σχήμα 6.5: Εικόνα τάσεων von Mises για το σημείο B



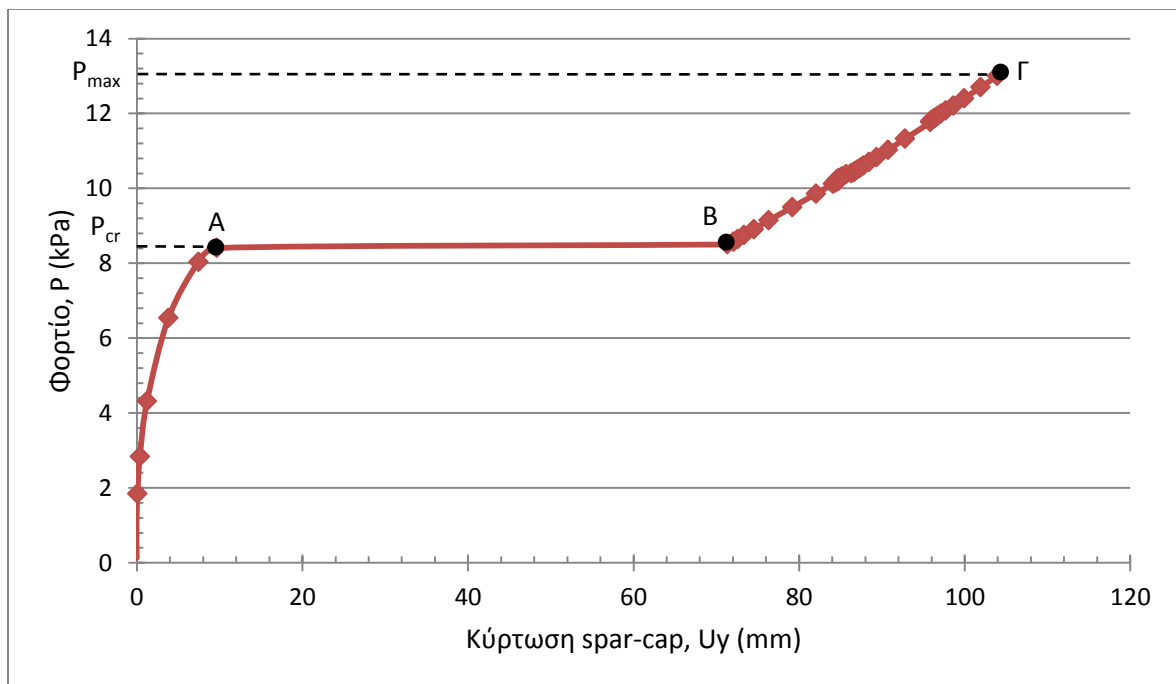
Σχήμα 6.6: Εικόνα παραμορφωμένου φορέα και τάσεων von Mises για το σημείο Γ

Προχωρώντας τώρα σε μία πιο λεπτομερή μελέτη της περιοχής εκδήλωσης τοπικού λυγισμού, βλέπουμε κατ' αρχάς ότι αυτή εντοπίζεται στο θλιβόμενο spar-cap, στο αρχικό τμήμα του φορέα, δηλαδή μεταξύ των θέσεων $z=0\text{m}$ και $z=7,5\text{m}$. Σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα [20], αλλά και μελέτες που αφορούν καθολικά το πτερύγιο σαν πρόβολο, η περιοχή από τη βάση του πτερυγίου μέχρι και 13m κατά μήκος του, προβλέπεται ως η πλέον κρίσιμη και ως το τμήμα στο οποίο η τελική και πλήρης αστοχία

θα λάβει χώρα. Όπως βλέπουμε και στις αντίστοιχες εικόνες του ανεστραμμένου φορέα (Σχήματα 6.4 έως 6.6), η έντονη συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή αυτή (Σχήμα 6.4) προκαλεί τελικά κύρτωση στο θλιβόμενο spar-cap, όταν το φορτίο γίνει ίσο με το κρίσιμο φορτίο λυγισμού ($P_{cr}=8,41\text{kPa}$) (Σχήμα 6.5), η οποία βαθμιαία πολλαπλασιάζεται, μέχρι την ολοκλήρωση της φόρτισης (Σχήμα 6.6). Η τελική εικόνα παραμόρφωσης παρουσιάζει μία σχετικά μεγάλη τοπική παραμόρφωση προς τα μέσα, στο μέσον του θλιβόμενου πέλματος, που αντιστοιχεί στο σημείο Δ του Σχήματος 6.7, η σχέση της οποίας με την επιβαλλόμενη φόρτιση απεικονίζεται στο αντίστοιχο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης (Σχήμα 6.8). Για τον υπολογισμό της τοπικής κύρτωσης προς τα μέσα, η καθολική μετατόπιση κατά τη διεύθυνση y του σημείου E αφαιρέθηκε από την καθολική μετατόπιση κατά y του σημείου Δ για κάθε βήμα φόρτισης.

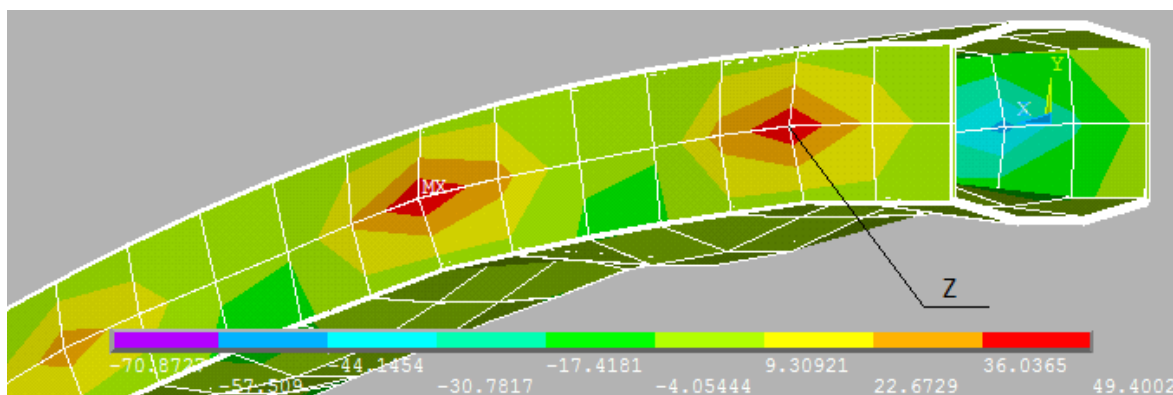


Σχήμα 6.7: Τοπικός λυγισμός θλιβόμενου spar-cap και κατανομή τάσεων von Mises

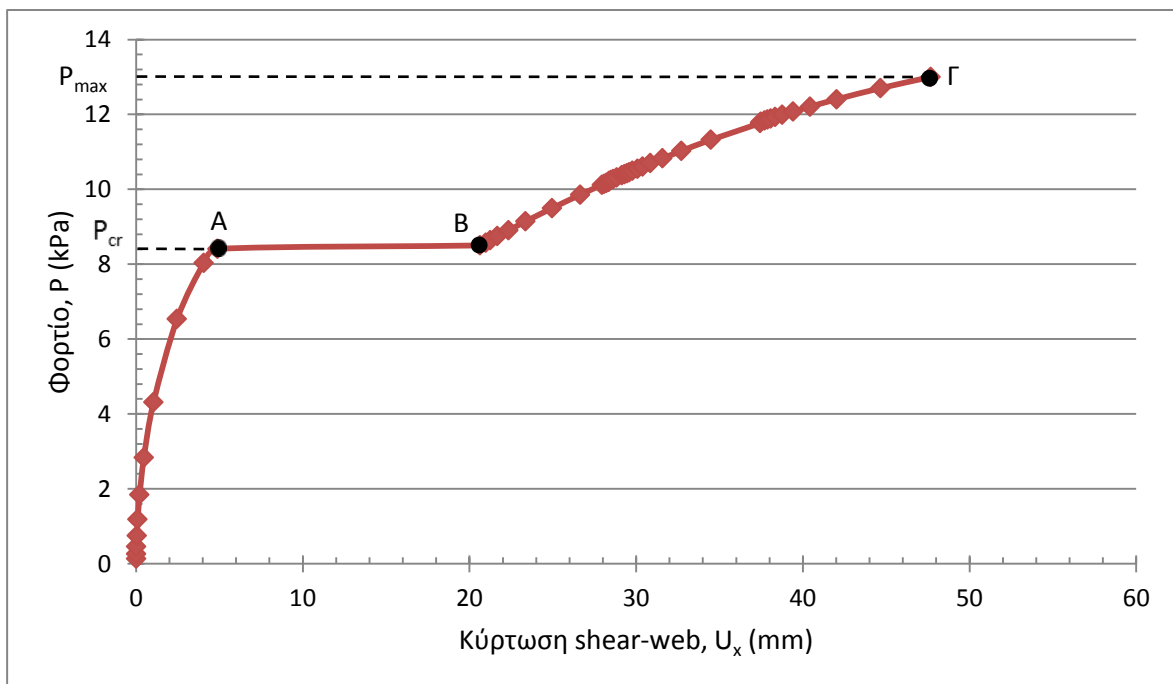


Σχήμα 6.8: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση y

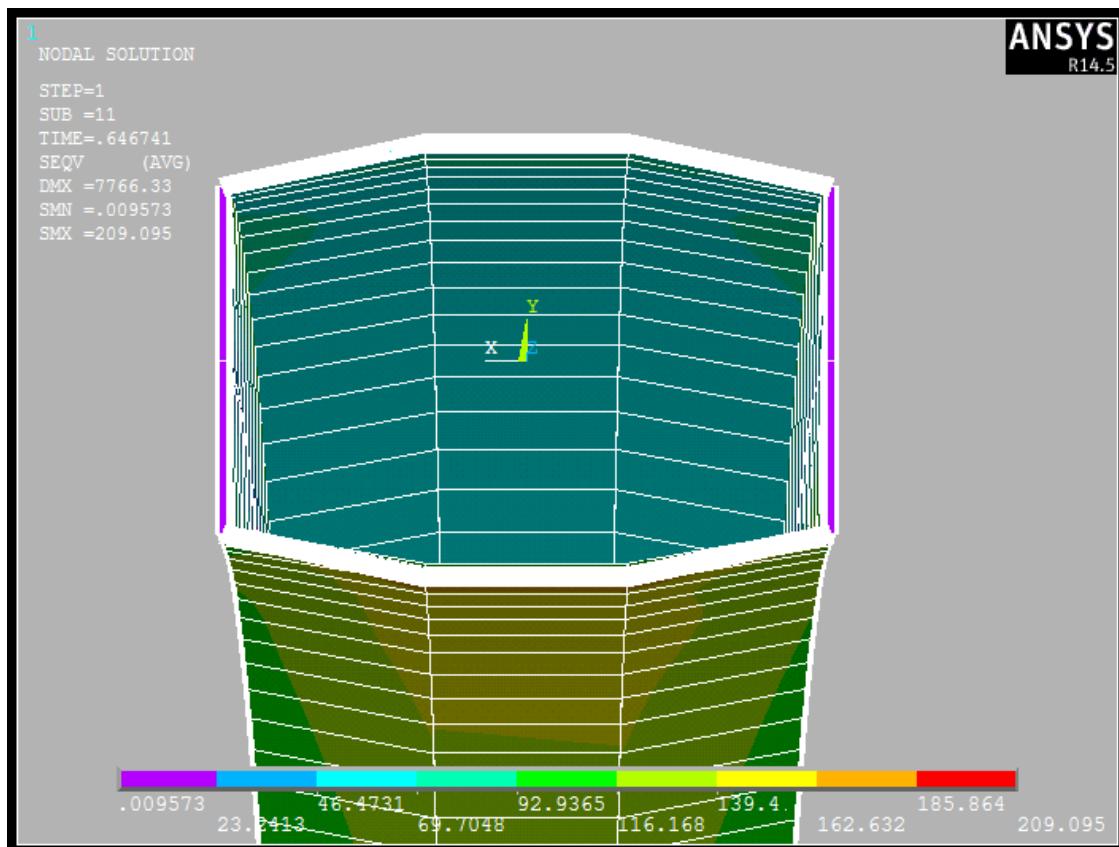
Ανάλογα, στο Σχήμα 6.10 απεικονίζεται η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης κατά τη διεύθυνση x , που αφορά την παραμόρφωση των shear-webs, τα οποία ως λεπτότοιχες πλάκες που καλούνται να μεταφέρουν τις διατμητικές δυνάμεις που προέρχονται από την flap-wise κάμψη, εκδηλώνουν τοπικό διατμητικό λυγισμό, όπως άλλωστε είχε προβλεφθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (παράγραφος 3.4). Η μετατόπιση αντιστοιχεί στον κόμβο του shear-web, που με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, είχε στο τέλος της φόρτισης τη μεγαλύτερη συνολική μετατόπιση κατά τον άξονα x (σημείο Ζ). Η κύρτωση προς τα έξω του shear-web είναι εμφανής και στα Σχήματα 6.9 (μετατοπίσεις κατά τον άξονα x) και 6.12. Το μαύρο περίγραμμα στο Σχήμα 6.12 αποτελεί εικόνα της διατομής του μέλους κατά την ολοκλήρωση της φόρτισης, όπου ο τοπικός λυγισμός των shear-webs και του θλιβόμενου spar-cap έχει προκαλέσει την οβαλοποίησή της (ovalization) σε σχέση με την εικόνα που παρουσιάζει πριν το λυγισμό (Σχήμα 6.11), φαινόμενο που ονομάζεται Brazier effect [24].



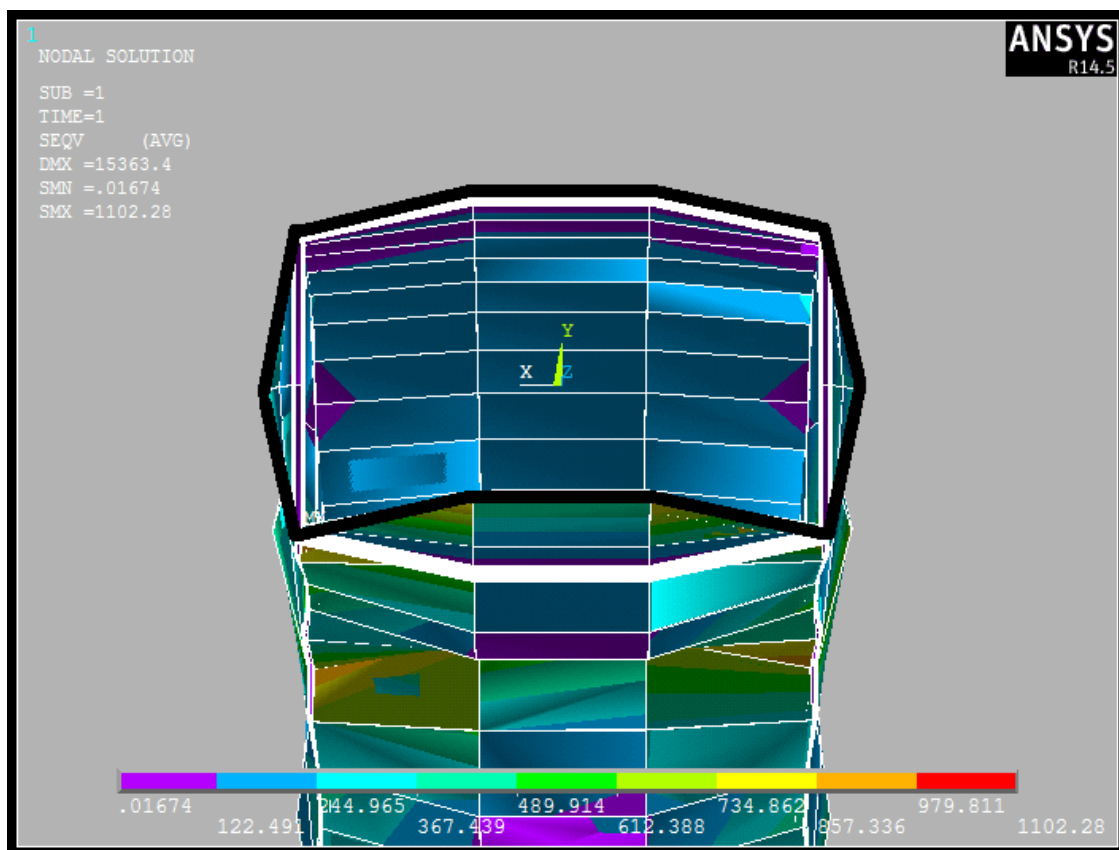
Σχήμα 6.9: Μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση x (κλίμακα μέτρησης σε mm)



Σχήμα 6.10: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση x



Σχήμα 6.11: Εικόνα του φορέα ακριβώς πριν την εκδήλωση λυγισμού



Σχήμα 6.12: Οβαλοποίηση διατομής μετά την ολοκλήρωση της φόρτισης

Συγκεντρωτικά, με βάση τις εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων, αλλά και τα διαγράμματα που προηγήθηκαν (Σχήματα 6.8 και 6.9), βλέπουμε ότι όταν το φορτίο φτάσει σε ένα ορισμένο επίπεδο (P_{cr} – σημείο Α) εκδηλώνεται έντονη παραμόρφωση στο φορέα για μικρή έως μηδενική περαιτέρω αύξηση του φορτίου. Η παραμόρφωση εκδηλώνεται τοπικά στο θλιβόμενο spar-cap και ταυτόχρονα στα shear-webs (σημείο διακλάδωσης που αντιστοιχεί σε ίδιο ακριβώς φορτίο και άρα βήμα φόρτισης στα Σχήματα 6.8 και 6.10). Ακολουθώς ο φορέας βρίσκει νέα θέση ισορροπίας στο σημείο Β, απ' όπου μπορεί ακόμα να φέρει κάποιο φορτίο, αλλά σε χαμηλότερο επίπεδο από πριν, όπως φανερώνει ο μεταλυγισμικός κλάδος ΒΓ, έχοντας μικρότερη κλίση (Σχήμα 6.2) από τον προλυγισμικό κλάδο, που αντιστοιχεί στον κύριο δρόμο ισορροπίας. Η μείωση της φέρουσας ικανότητας του μηχανισμού εσωτερικής στηρίξεως θα επιδράσει καθοριστικά στην αστοχία του πτερυγίου, αν αυτό στο σύνολό του δεν έχει την ικανότητα να φέρει αυτό το επιπλέον φορτίο [28].

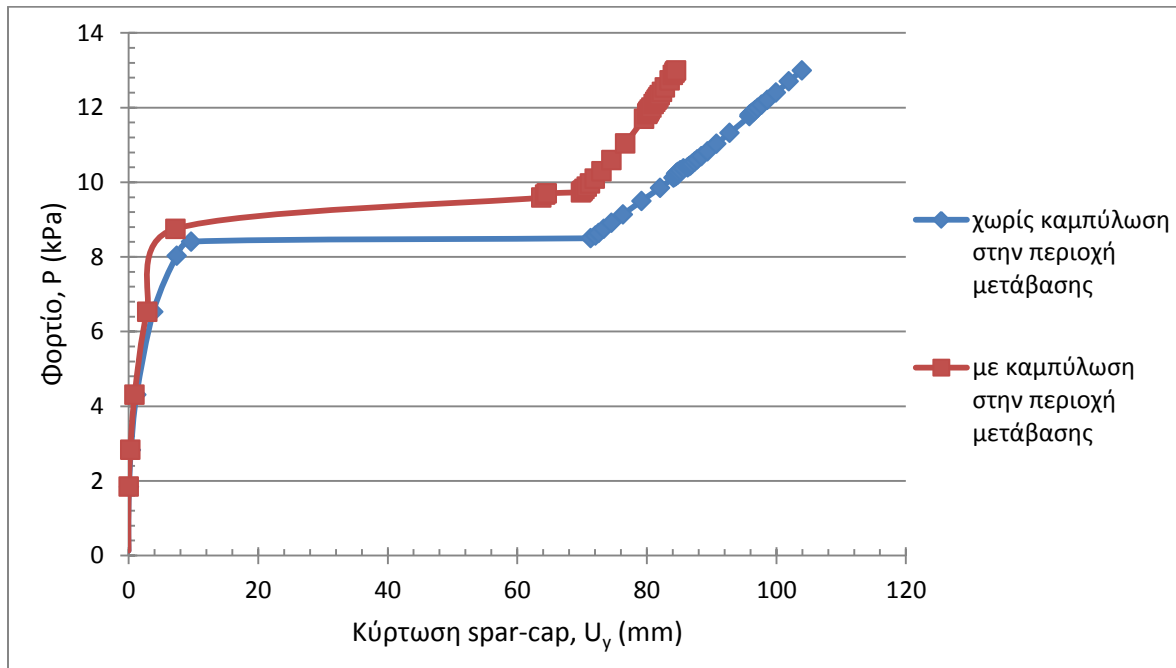
Επιπλέον, παρατηρούμε ότι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στο σημείο διακλάδωσης Α ($P_{cr}=8,41\text{kPa}$) αποκλίνει σημαντικά από αυτό που πρόκυψε από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού ($P_{cr}=12,47\text{kPa}$). Αυτό, σε συνδυασμό με τη σημαντική μεταλυγισμική συμπεριφορά και αντοχή του φορέα, που δε θα μπορούσε να μελετηθεί μέσω της γραμμικής ανάλυσης, επιβεβαιώνουν την επιλογή και την αναγκαιότητα διεξαγωγής μη γραμμικής ανάλυσης, πέρα από τη γραμμική, αφού η τελευταία αποδεικνύεται εξαιρετικά συντηρητική.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι στο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων, φαινόμενα μικροκλίμακας, όπως ατέλειες, μη γραμμικότητες υλικών και υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους (material degradation), αποκόλληση στρώσεων ή ίνας/μήτρας, δεν συμπεριλαμβάνονται. Παρ' όλα αυτά μπορούμε να πούμε ότι οι απλοποιήσεις αυτές είναι αποδεκτές, αφού υιοθετούνται σε αρκετές αντίστοιχες περιπτώσεις της βιβλιογραφίας. Γι' αυτό το λόγο αριθμητικές αναλύσεις πτερυγίων που αφορούν υφιστάμενες ή υπό κατασκευή ανεμογεννήτριες, που πρόκειται να πιστοποιηθούν, συνοδεύονται σχεδόν πάντα από πειράματα πλήρους κλίμακας [19,28]. Στη μελέτη [28], που χρησιμοποιείται για σύγκριση με την παρούσα εργασία (για τον έλεγχο του προσομοιώματος και της απόκρισής του), από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων από το πειραματικό μοντέλο (πτερύγιο) και το αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (κουτί εσωτερικής στηρίξεως), εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα δύο μοντέλα έχουν πανομοιότυπη απόκριση σε λυγισμό μέχρι το σημείο διακλάδωσης, το οποίο μάλιστα αντιστοιχεί σε τιμή που λαμβάνει το φορτίο ακριβώς πριν την ολοκληρωτική αστοχία του πτερυγίου, παρότι στο πτερύγιο είχαν αναπτυχθεί σημαντικές ζημιές, πριν το σημείο αυτό. Επομένως, από την ανάλυση λυγισμού μέσω του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων δεν προκύπτουν πληροφορίες επιπέδου μικροκλίμακας, αλλά το κρίσιμο φορτίο λυγισμού και η μεταλυγισμική συμπεριφορά του φορέα μπορούν να δώσουν ασφαλείς και επαρκείς πληροφορίες σε σχέση με την απόκριση του μηχανισμού εσωτερικής στηρίξεως, αλλά και του πτερυγίου συνολικά.

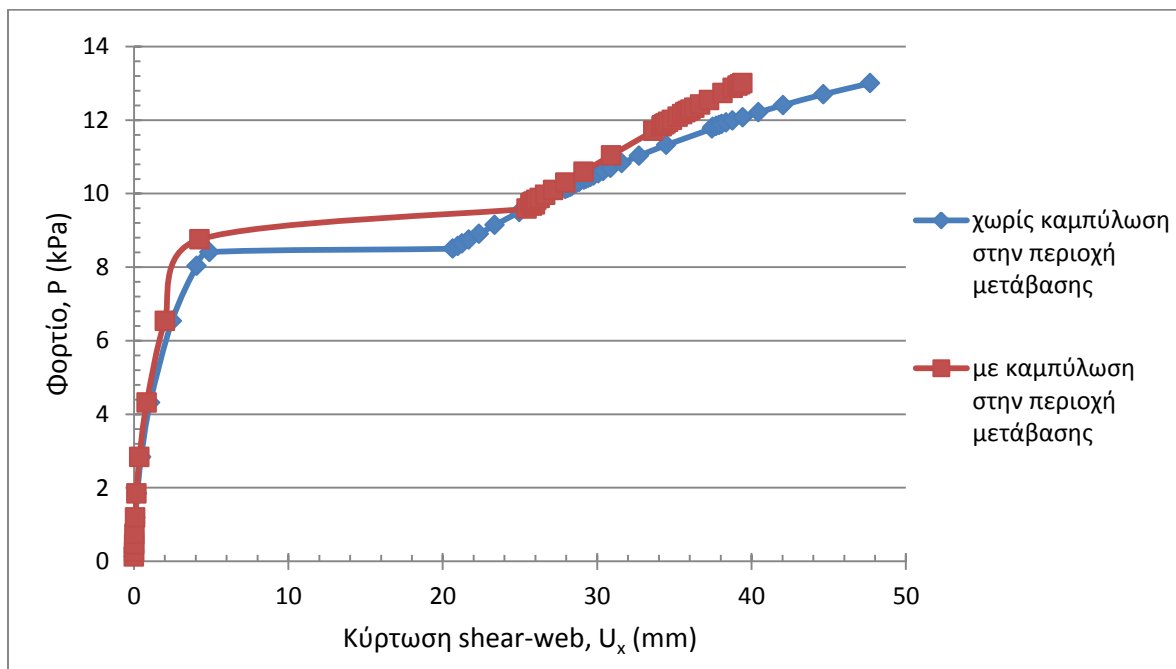
6.2 Αποτελέσματα για διαφορετική διαμόρφωση διατομής μέλους

Για την σύγκριση των μοντέλων με διαφορετική διαμόρφωση γεωμετρίας, στο μοντέλο από E-glass FRP με καμπύλωση στην περιοχή μετάβασης από το spar-cap στο shear-web

(Σχήμα 5.8) επιβλήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση, μέγιστης τιμής $P_{max}=13\text{kPa}$, προσαυξητικά μέσω 43 βημάτων. Βρέθηκαν οι κόμβοι του προσομοιώματος στο spar-cap και στα shear-webs που υπέστησαν τη μεγαλύτερη κύρτωση προς τα μέσα (διεύθυνση y) και προς τα έξω αντίστοιχα (διεύθυνση x) και εξήχθησαν οι καμπύλες φορτίου–μετατόπισης. Οι κόμβοι αυτοί ήταν οι ίδιοι ακριβώς με αυτούς που βρέθηκαν με ανάλογη διαδικασία στο βασικό μοντέλο. Στα Σχήματα 6.13 και 6.14 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης για τα δύο μοντέλο, ώστε να είναι δυνατή η συγκριτική τους αξιολόγηση.

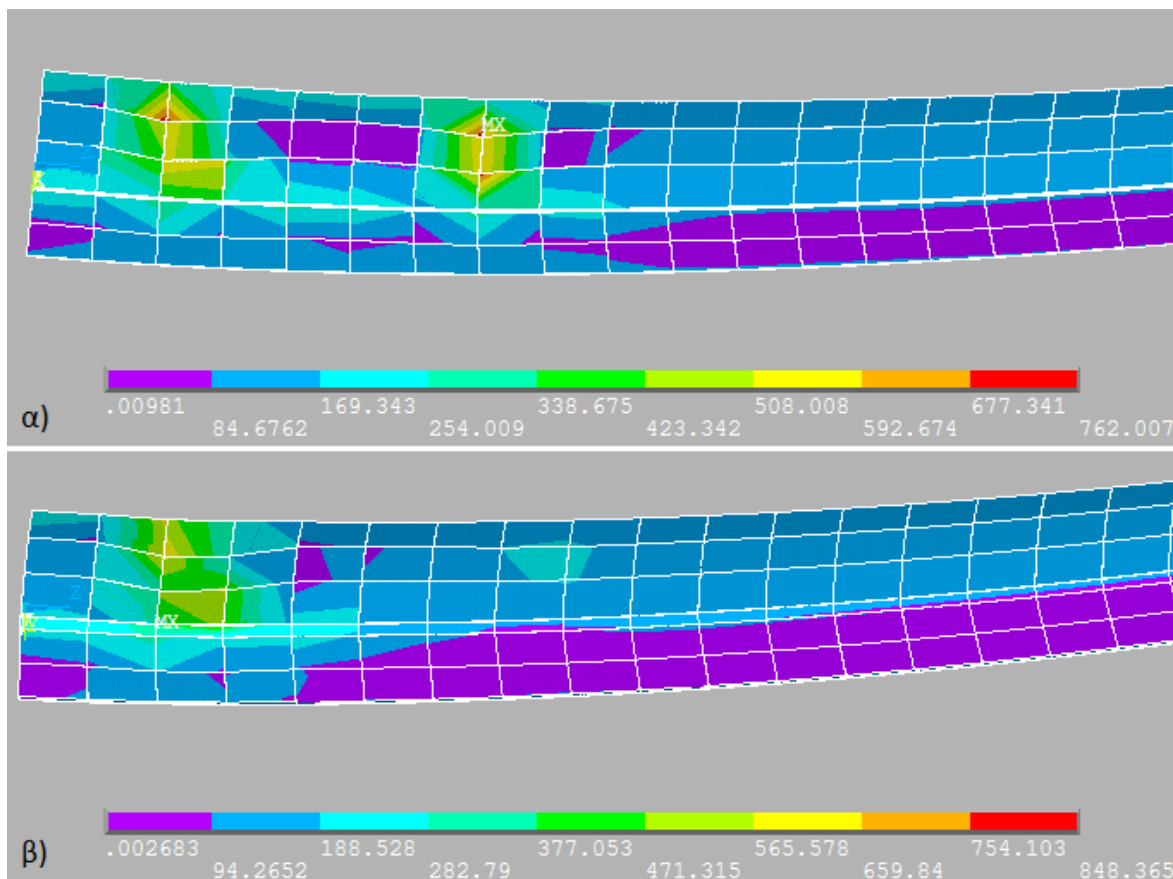


Σχήμα 6.13: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση y



Σχήμα 6.14: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση x

Βλέπουμε ότι τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν γενικά την ίδια συμπεριφορά, τόσο σε προλυγισμικό, όσο και σε μεταλυγισμικό στάδιο. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για το μοντέλο με καμπύλωση προκύπτει ίσο με $P_{cr}=8,76\text{kPa}$ και υπάρχει και εδώ σημαντική απόκλιση μεταξύ αυτού και της τιμής που προέκυψε από τη γραμμική ανάλυση, η οποία είναι ίση με $13,44\text{kPa}$. Το κρίσιμο φορτίο $P_{cr}=8,76\text{kPa}$ είναι ελάχιστα μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του βασικού μοντέλου ($P_{cr}=8,41\text{kPa}$), ενώ οι κύριοι δρόμοι ισορροπίας των δύο μοντέλων έχουν ίδια περίπου κλίση, επομένως διαθέτουν ίση δυσκαμψία. Επίσης, πανομοιότυπη είναι και η εικόνα των δύο παραμορφωμένων μοντέλων στην ολοκλήρωση της φόρτισης, όσον αφορά τη θέση εμφάνισης και τον αριθμό των πτυχώσεων. Τουναντίον, ο μεταλυγισμικός κλάδος του μοντέλου με καμπύλωση έχει μεγαλύτερη κλίση και το μέγεθος των παραμορφώσεων, με βάση και τα Σχήματα 6.13 και 6.14, είναι μικρότερο, ειδικά στο θλιβόμενο spar-cap. Ταυτόχρονα, διαφορά εντοπίζεται και στο στάδιο αμέσως μετά το κρίσιμο φορτίο (Σημείο Β), όπου στο βασικό μοντέλο έχουν προκληθεί δύο πτυχώσεις και στην περιοχή της δεύτερης εντοπίζεται και η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων (Σχήμα 6.15α), ενώ στο μοντέλο με καμπύλωση έχει προκληθεί μία πτύχωση και η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων εντοπίζεται ακριβώς στο καμπύλο τμήμα μετάβασης από το spar-cap στο shear-web (Σχήμα 6.15β). Αυτή η συγκέντρωση τάσεων πιθανώς οφείλεται στο μη λεπτομερή σχεδιασμό μέσω της ανάλυσης ply-drop, η οποία επιτρέπει μία πιο ομαλοποιημένη κατανομή τάσεων, καθώς και στα πεπερασμένα στοιχεία κελύφους που είναι περισσότερο κατάλληλα για επιφάνειες μικρότερης καμπύλωσης από αυτήν που δόθηκε στο άκρο του spar-cap.



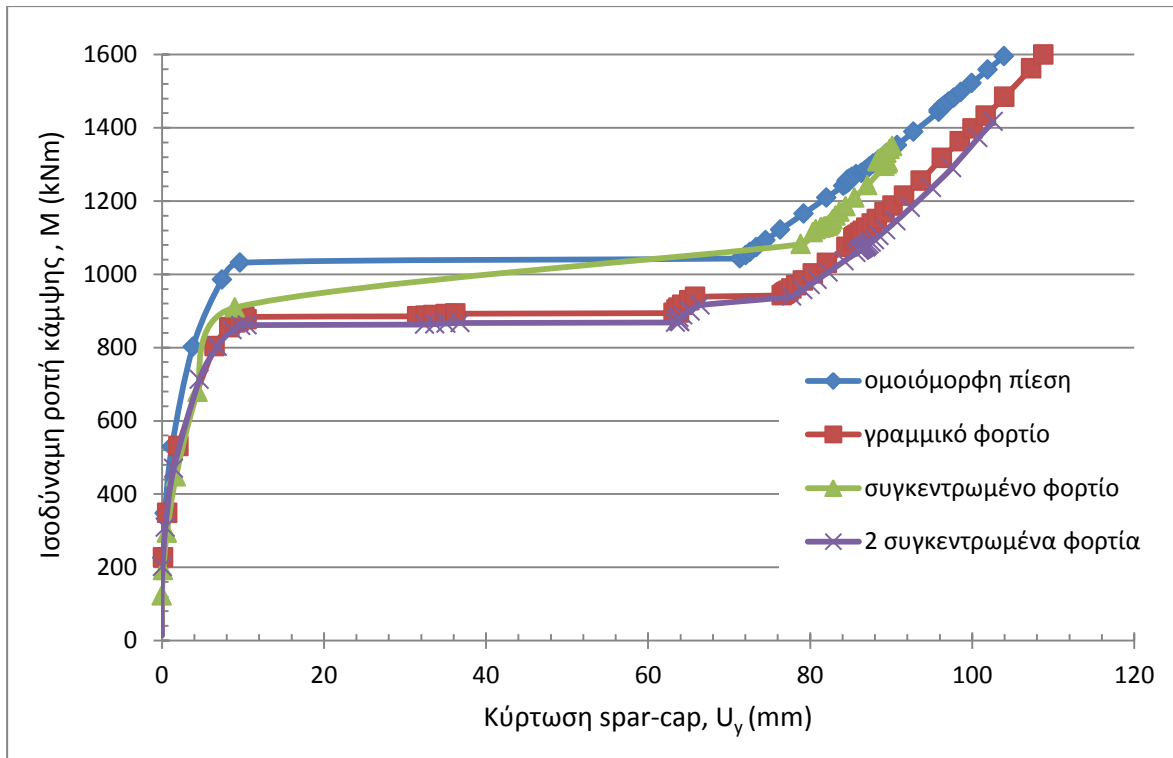
Σχήμα 6.15: Εικόνα παραμορφώσεων και τάσεων von Mises αμέσως μετά την εκδήλωση τοπικού λυγισμού για το μοντέλο: α) χωρίς καμπύλωση και β) με καμπύλωση στην περιοχή μετάβασης

6.3 Αποτελέσματα για διαφορετικούς τρόπους εφαρμογής φόρτισης

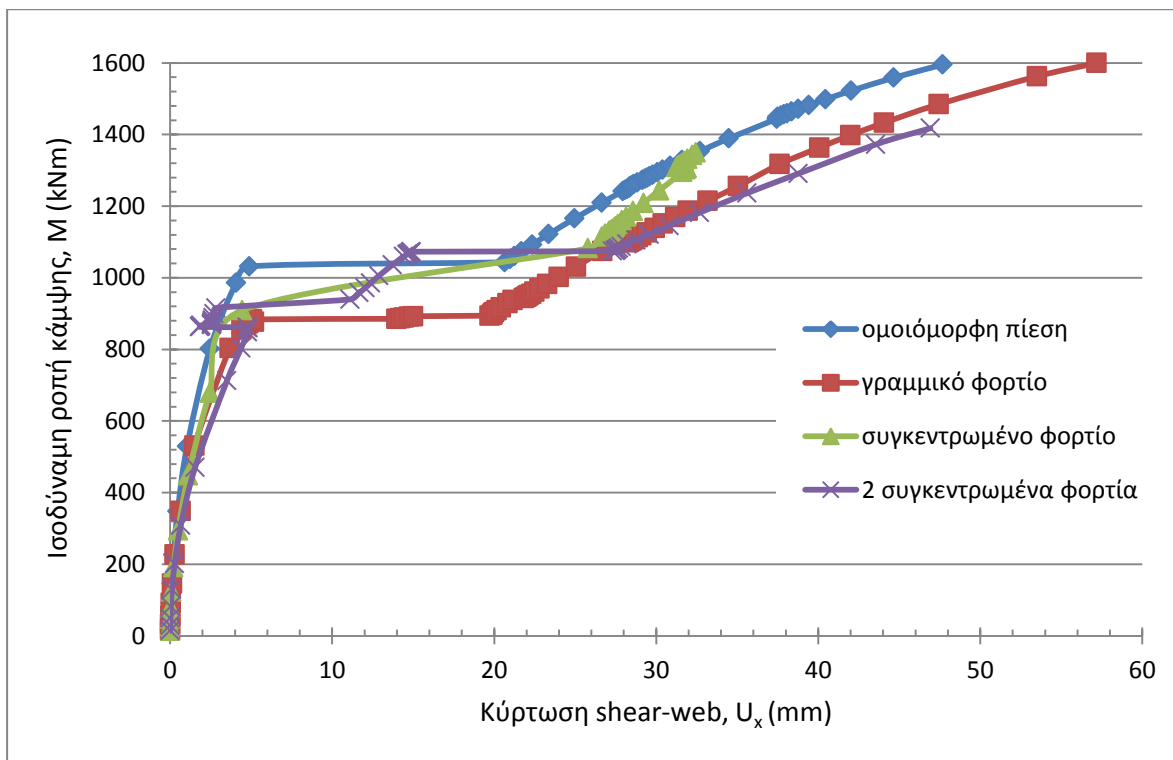
Κατά την αρχική μελέτη του μοντέλου, η φόρτιση αποφασίστηκε να επιβληθεί μέσω ομοιόμορφης πίεσης, κάθετα κατανεμημένης στο άνω (προσήνεμο) spar-cap, επειδή αυτός ο τρόπος φόρτισης αποτελεί την πιο ρεαλιστική προσομοίωση της φόρτισης του ανέμου και επιπλέον μπορεί να ακολουθεί την παραμόρφωση της επιφάνειας κατά την ανάλυση, παραμένοντας κάθετη στη επίπεδο της καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης, κάτι που στο ANSYS δεν είναι εφικτό όταν χρησιμοποιούνται σημειακά φορτία που εφαρμόζονται στους κόμβους του μοντέλου. Ειδικότερα, στην περίπτωση της επιβολής φόρτισης μέσω φορτίου συγκεντρωμένου ή γραμμικού, η πραγματική τοπική ροπή κάμψης είναι διαφορετική, επειδή λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων το φορτίο ασκείται υπό γωνία όχι κάθετη στην επιφάνεια του κελύφους. Επιπλέον διαφορετικά είδη φορτίων, όπως γραμμικό και συγκεντρωμένο, μπορεί μεν να δίνουν ίσες ροπές στρίξεως, αλλά η κατανομή της ροπής κάμψης κατά μήκος του φορέα δεν είναι η ίδια.

Στη βιβλιογραφία απαντώνται διάφοροι τρόποι πρόκλησης flap-wise κάμψης, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην ανάγκη εξασφάλισης κοινών συνθηκών φόρτισης κατά τις περιπτώσεις που πραγματοποιείται σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων, δεδομένων των απαιτήσεων και των περιορισμών σε σχέση με τις συνθήκες στήριξης και φόρτισης που συνοδεύουν τα πειράματα πλήρους κλίμακας. Έτσι, με βάση συγκεκριμένα παραδείγματα της βιβλιογραφίας [19,21,28], εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί τρόποι επιβολής φόρτισης, πέραν της ομοιόμορφης πίεσης, όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.3, προκειμένου να ελεγχθεί αν θα υπάρξουν σημαντικές αποκλίσεις τόσο στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού, όσο και στις προκληθείσες παραμορφώσεις, σε μοντέλα που καμία άλλη διαφορά δεν έχουν, όσον αφορά τα συνοριακές συνθήκες, το υλικό κατασκευής (GFRP), τη διάταξη, τον προσανατολισμό και τα πάχη των στρώσεων, αλλά και τη γεωμετρία (περίπτωση χωρίς καμπύλωση στην περιοχή μετάβασης). Συγκεκριμένα επιβλήθηκαν: γραμμικό φορτίο στο μέσον του άνω spar-cap, μέγιστης τιμής $P_{max}=6,32\text{kN/m}$, συγκεντρωμένο φορτίο στο ελεύθερο άκρο του φορέα, μέγιστης τιμής $P_{max}=60\text{kN}$ και δύο συγκεντρωμένα φορτία σε δύο ενδιάμεσες θέσεις του φορέα, μέγιστης τιμής 63kN το καθένα.

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η σύγκριση μεταξύ πίεσης σε kPa, γραμμικού φορτίου σε kN/m και συγκεντρωμένων φορτίων σε kN, ανάχθηκαν όλα σε ισοδύναμη ροπή κάμψης που αναπτύσσεται στην στήριξη (πάκτωση) του φορέα για κάθε βήμα φόρτισης και εξήχθησαν τα συγκριτικά διαγράμματα φορτίου –μετατόπισης για τις θέσεις που σημειώθηκε η μέγιστη τοπική παραμόρφωση σε spar-cap και shear-web (Σχήματα 6.16 και 6.17 αντίστοιχα). Επίσης, για να υπάρχει μία πιο ακριβής εικόνα σε σχέση με τις αποκλίσεις μεταξύ των κρίσιμων φορτίων λυγισμού, αλλά και των μέγιστων τοπικών παραμορφώσεων στην ολοκλήρωση κάθε φόρτισης, υπολογίστηκε η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και η τυπική τιμή (Z -τιμή = (τιμή μεγέθους – μέση τιμή)/τυπική απόκλιση) για τα μεγέθη αυτά. Η τελευταία αποτελεί μέτρο διασποράς και δείχνει πόσες τυπικές αποκλίσεις πάνω ή κάτω βρίσκεται μία τιμή από το μέσο όρο του δείγματος. Τα αποτελέσματα αυτά δίνονται στον Πίνακα 6.1, όπου η αναγραφόμενη ισοδύναμη ροπή στήριξης M_{cr} αντιστοιχεί στα κρίσιμα φορτία λυγισμού από τις μη γραμμικές αναλύσεις, ενώ οι μετατοπίσεις $U_{y,max}$ και $U_{x,max}$ στις μέγιστες τοπικές παραμορφώσεις σε spar-cap και shear-web μετά την ολοκλήρωση των φορτίσεων.



Σχήμα 6.16: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση y



Σχήμα 6.17: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση x

Πίνακας 6.1: Διασπορά μεγεθών για διαφορετικούς τρόπους επιβολής φόρτισης

Τρόπος επιβολής φόρτισης	Ισοδύναμη ροπή στήριξης, M_{cr}		$U_{y,max}$ στο spar-cap		$U_{x,max}$ στο shear-web	
	kNm	Z-τιμή	mm	Z-τιμή	mm	Z-τιμή
Ομοιόμορφη πίεση	1031,67	1,67	103,93	0,42	47,68	0,21
Γραμμικό φορτίο	883,75	-0,57	108,78	1,20	57,19	1,41
Συγκεντρωμένο φορτίο	909,14	-0,19	90,15	-1,83	32,44	-1,72
Δύο συγκεντρωμένα φορτία	861,41	-0,91	102,63	0,20	46,92	0,11
Μέση τιμή	921,50	–	101,37	–	46,05	–
Τυπική απόκλιση	65,81	–	6,13	–	7,91	–

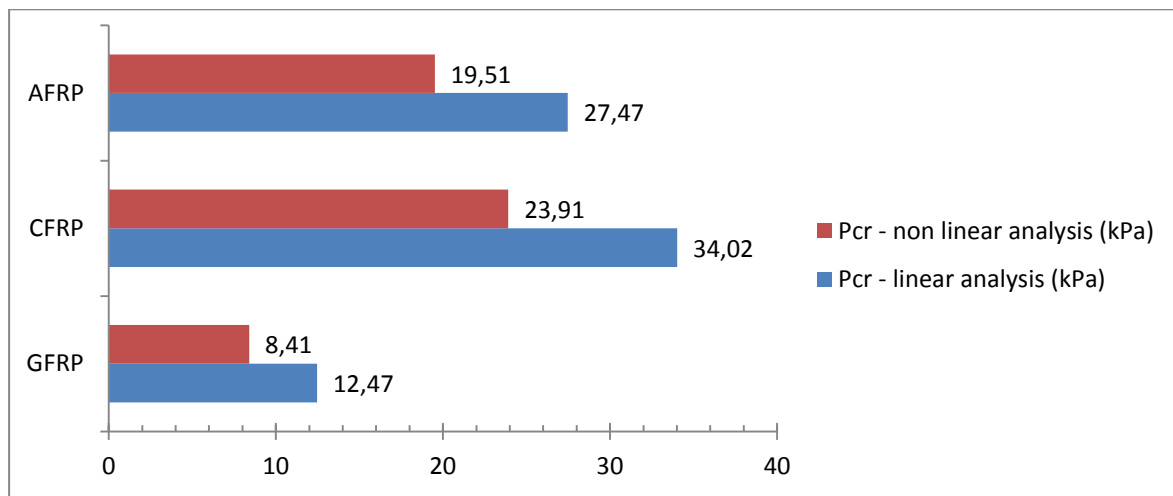
Η εικόνα των μοντέλων μετά την ολοκλήρωση των φορτίσεων δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές και είναι σχεδόν πανομοιότυπη με αυτήν του παραμορφωμένου φορέα υπό ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση (Σχήμα 6.6). Πανομοιότυπη είναι και η συμπεριφορά των μοντέλων τόσο σε προλυγισμικό, όσο και σε μεταλυγισμικό στάδιο, με βάση και τις καμπύλες φορτίου – μετατόπισης. Και στις τέσσερις καμπύλες οι προλυγισμικοί κλάδοι απέχουν ελάχιστα μεταξύ τους, ενώ για τις περιπτώσεις γραμμικού φορτίου και δύο συγκεντρωμένων συμπίπτουν απόλυτα. Παρατηρούνται ωστόσο αποκλίσεις στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού, όπως φαίνεται και από τις ισοδύναμες ροπές κάμψης στον παραπάνω πίνακα, με την μέγιστη οριακή τιμή να προκύπτει από την φόρτιση μέσω πίεσης, ενώ πιο κοντά στο μέσο όρο βρίσκεται το κρίσιμο φορτίο μέσω συγκεντρωμένου στο ελεύθερο άκρο φορτίου. Απεναντίας, κατά την φόρτιση αυτή, το μέγεθος των παραμορφώσεων είναι συντηρητικό συγκριτικά με τους υπόλοιπους τρόπους φόρτισης, με την περίπτωση των δύο συγκεντρωμένων φορτίων να συγκλίνει περισσότερο στη μέση τιμή. Τέλος, θα πρέπει να πούμε ότι δεν σημειώθηκε σημαντική εξοικονόμηση υπολογιστικού κόστους σε κάποια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Έτσι με βάση τις παρατηρήσεις αυτές και τις σχετικά μικρές αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ των προαναφερόμενων τρόπων άσκησης flap-wise κάμψης, συμπεραίνουμε ότι ο διαφορετικός τρόπος επιβολής φορτίου μπορεί μεν να επηρεάζει την κατανομή της φόρτισης κατά μήκος του φορέα, δεν επιδρά ωστόσο σε καθοριστικό βαθμό στη φέρουσα ικανότητα και την απόκρισή του. Και επομένως δεν μπορεί και να προταθεί ή να αποκλειστεί κάποιος από τους τρόπους αυτούς ως καταλληλότερος ή αντίστοιχα ακατάλληλος, αφού η επιλογή του προσφορότερου κρίνεται από τις συνθήκες και τους σκοπούς του εκάστοτε προβλήματος μελέτης.

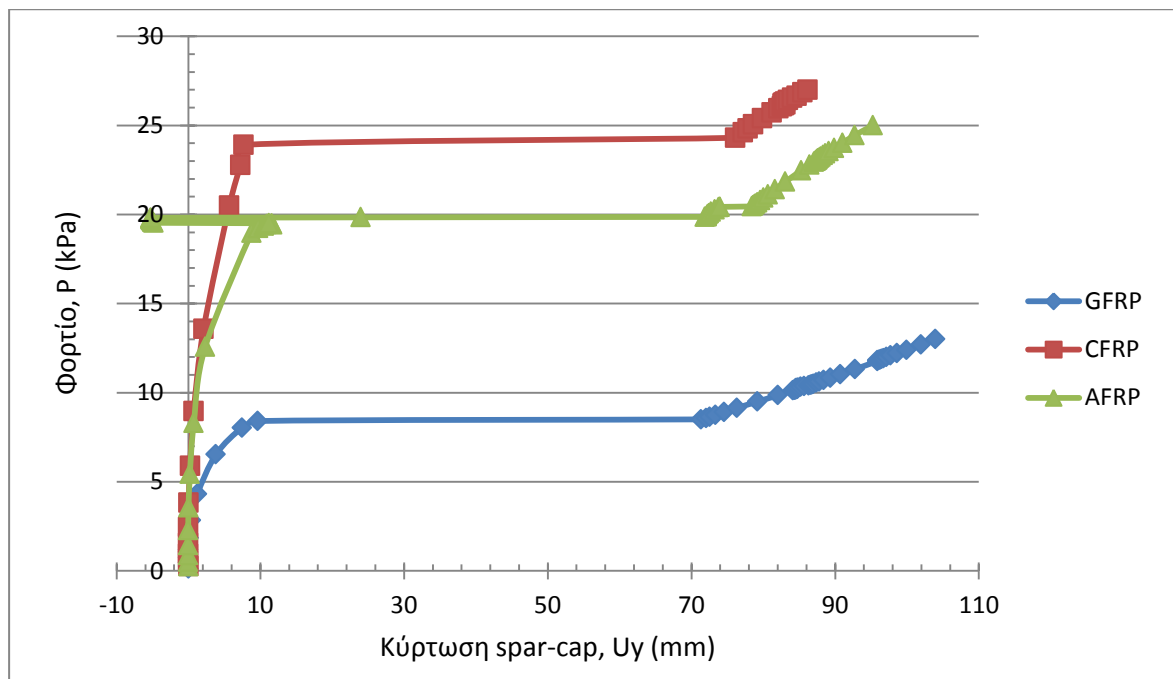
6.4 Αποτελέσματα για διαφορετικά πολυμερή σύνθετα υλικά

6.4.1 Σύγκριση υλικών GFRP – CFRP – AFRP

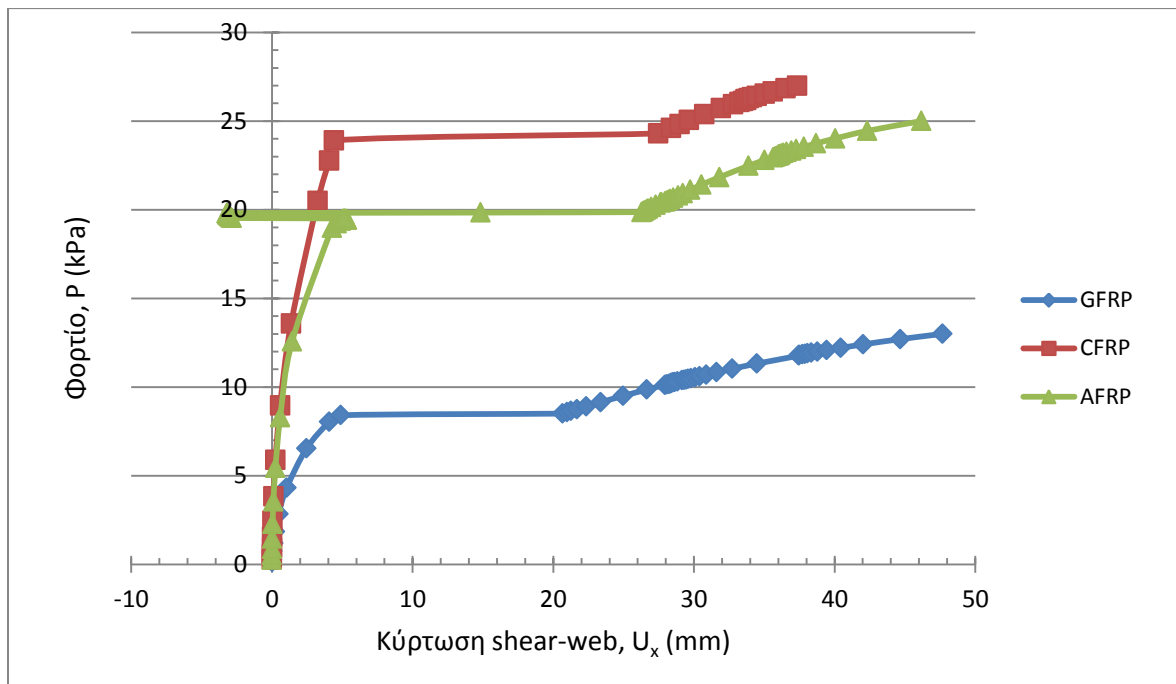
Για την σύγκριση μεταξύ των μοντέλων με διαφορετικά ινοπλισμένα σύνθετα υλικά, στο μοντέλο με ίνες άνθρακα (CFRP) επιβλήθηκε ομοιόμορφη κατανεμημένη πίεση, τιμές $P_{max}=27\text{kPa}$ προσαυξητικά μέσω 30 βημάτων, ενώ στο μοντέλο με ίνες αραμιδίου (AFRP) επιβλήθηκε φορτίο $P_{max}=25\text{kPa}$, μέσω 66 βημάτων. Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 6.18) δίνονται οι τιμές των κρίσιμων φορτίων λυγισμού (P_{cr}) όπως προέκυψαν από τις δύο αναλύσεις, γραμμική και μη γραμμική, για τα δύο αυτά μοντέλα και για το βασικό, ενώ στα Σχήματα 6.19 και 6.20 οι συγκριτικές καμπύλες φορτίου – μετατόπισης.



Σχήμα 6.18: Συγκριτικό διάγραμμα κρίσιμων φορτίων λυγισμού για τα τρία μοντέλα

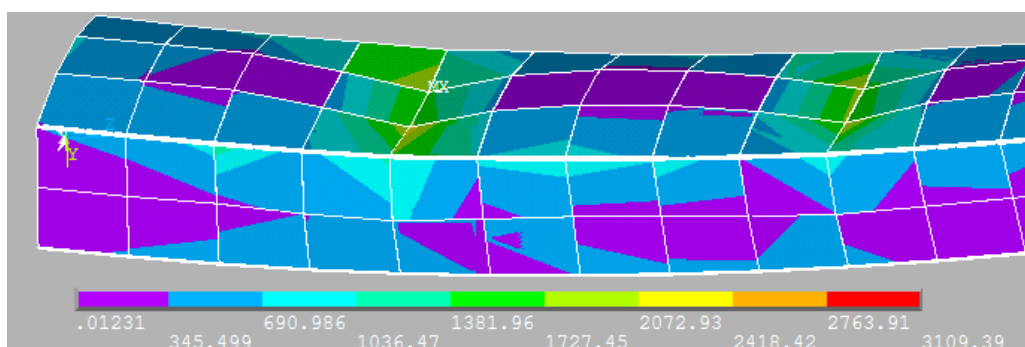


Σχήμα 6.19: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση y



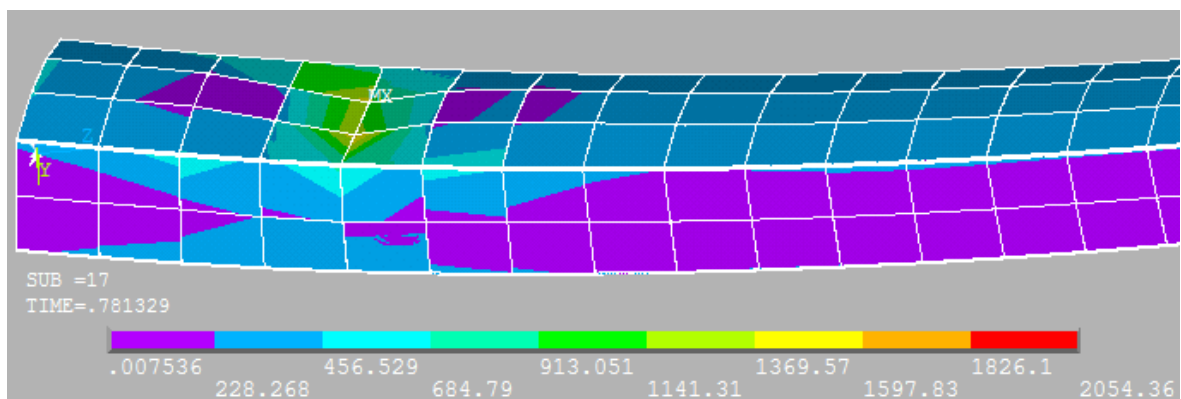
Σχήμα 6.20: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση x

Παρατηρούμε ότι το μοντέλο με ίνες άνθρακα συνολικά παρουσιάζει ανάλογη συμπεριφορά με το βασικό μοντέλο (με ίνες E-glass), με εκδήλωση λυγισμού μέσω σημείου διακλάδωσης, σταθερό μεταλυγισμικό στάδιο και μεταλυγισμική αντοχή, αφού μπορεί να φέρει φορτίο μεγαλύτερο του κρίσιμου. Ο προλυγισμικός κλάδος έχει πολύ μεγαλύτερη κλίση από αυτόν του βασικού μοντέλου που αποδεικνύει την σαφώς μεγαλύτερη δυσκαμψία του, ενώ το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι υπερδιπλάσιο, αφού οι ίνες άνθρακα διαθέτουν ακαμψία και αντοχή, με τιμές κατά πολύ μεγαλύτερες από τις ίνες γυαλιού. Για ίδια τιμή φορτίου οι παραμορφώσεις που εκδηλώνονται στο μοντέλο από ίνες γυαλιού είναι δραματικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στο μοντέλο με ίνες άνθρακα. Επιπλέον στο τελευταίο οι τοπικές παραμορφώσεις τόσο στο θλιβόμενο spar-cap, όσο και στα shear-webs μετά την ολοκλήρωση της φόρτισης είναι μικρότερης έκτασης και τιμής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.21. Τέλος, η συνολική κατακόρυφη εκτροπή του ελεύθερο άκρου του φορέα μειώθηκε κατά 26,67%, που είναι πολύ κοντά στη ποσοστό μείωσης (ίσο με 20%) που έχει υπολογιστεί να σημειώνεται στην παραμόρφωση του άκρου του πτερυγίου (blade tip) όταν στον μηχανισμό εσωτερικής στηρίξεως οι ίνες γυαλιού αντικαθιστώνται πλήρως από ίνες άνθρακα [15].

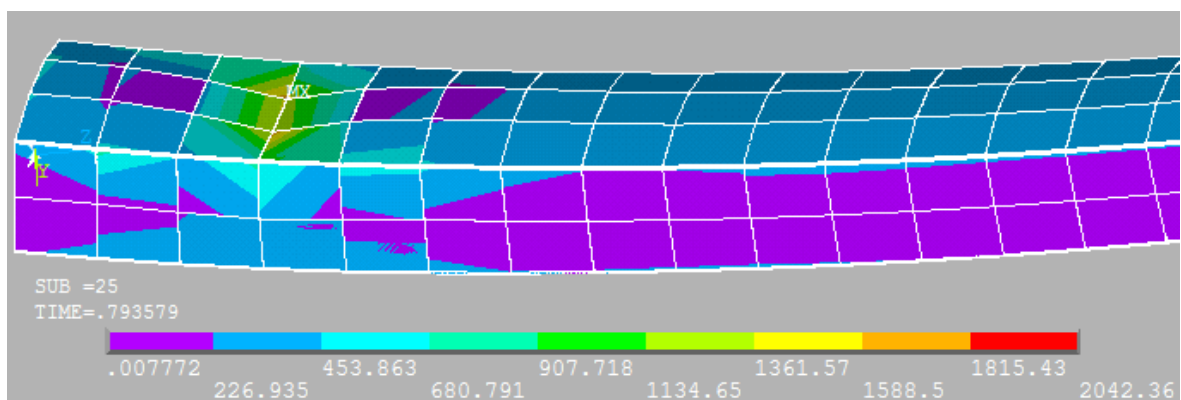


Σχήμα 6.21: Εικόνα τάσεων και παραμορφώσεων για το μοντέλο από υλικό CFRP

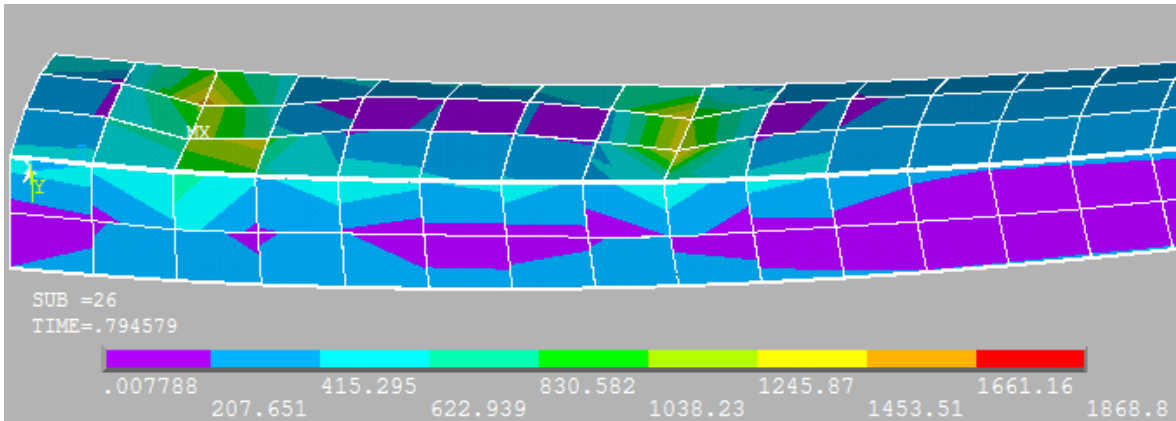
Στο μοντέλο από υλικό AFRP βλέπουμε ότι οι τιμές του κρίσιμου φορτίου λυγισμού και δυσκαμψίας (κλίση στον προλυγισμικό κλάδο) είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από το GFRP και ελαφρώς μικρότερες από το CFRP, γεγονός που οφείλεται στις σημαντικά βελτιωμένες ιδιότητες των ινών Kevlar 149, έναντι των E-glass. Επίσης, στο προλυγισμικό στάδιο, οι προκληθείσες παραμορφώσεις για ίδια επίπεδα φόρτισης είναι κατά πολύ μικρότερες από το μοντέλο GFRP και αρκετά κοντά στις παραμορφώσεις του μοντέλου CFRP. Ωστόσο, το μοντέλο με υλικό AFRP παρουσιάζει ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά όπως υποδεικνύεται από τις αρνητικές τιμές που λαμβάνουν οι μετατοπίσεις στα Σχήματα 6.19 και 6.20, αμέσως μετά το σημείο διακλάδωσης και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα Σχήματα 6.22 έως 6.25, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά βήματα φόρτισης του φορέα. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι η περιοχή του φορέα που αρχικά εκδηλώνεται κύρτωση, όταν το επιβαλλόμενο φορτίο γίνει ίσο με το κρίσιμο (Σχήμα 6.22), σε επόμενο βήμα φόρτισης επανέρχεται στην αρχική της απαραμόρφωτη κατάσταση και η κύρτωση εμφανίζεται στην ακριβώς γειτονική της περιοχή (Σχήματα 6.23 και 6.24). Έτσι η θέση κύρτωσης στο θλιβόμενο spar-cap με την μέγιστη παραμόρφωση στην ολοκλήρωση της φόρτισης (Σχήμα 6.25) δεν συμπίπτει με την αρχική θέση εκδήλωσης λυγισμού, κάτι που δεν έχει παρατηρηθεί σε όλες τις άλλες περιπτώσεις μοντέλων που μέχρι τώρα εξετάστηκαν (GFRP με και χωρίς καμπύλωση, διαφορετικοί τρόποι επιβολής φόρτισης και μοντέλο από CFRP).



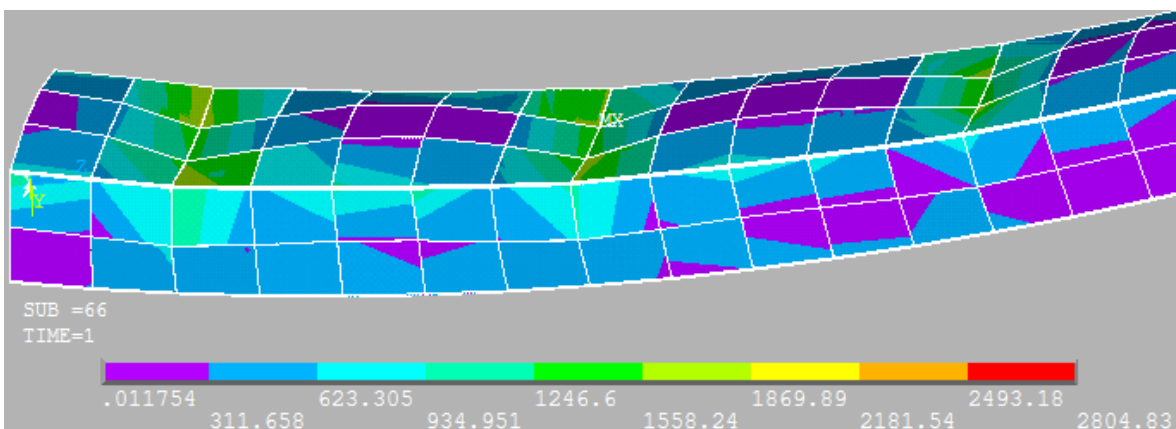
Σχήμα 6.22: Εικόνα τάσεων von Mises του μοντέλου από υλικό AFRP στο βήμα φόρτισης κατά το οποίο εκδηλώνεται λυγισμός



Σχήμα 6.23: Εικόνα τάσεων σε βήμα φόρτισης όπου η θέση εμφάνισης κύρτωσης έχει μεταβληθεί



Σχήμα 6.24: Εικόνα τάσεων στο βήμα φόρτισης που εκδηλώνεται και 2^η κύρτωση στο spar-cap

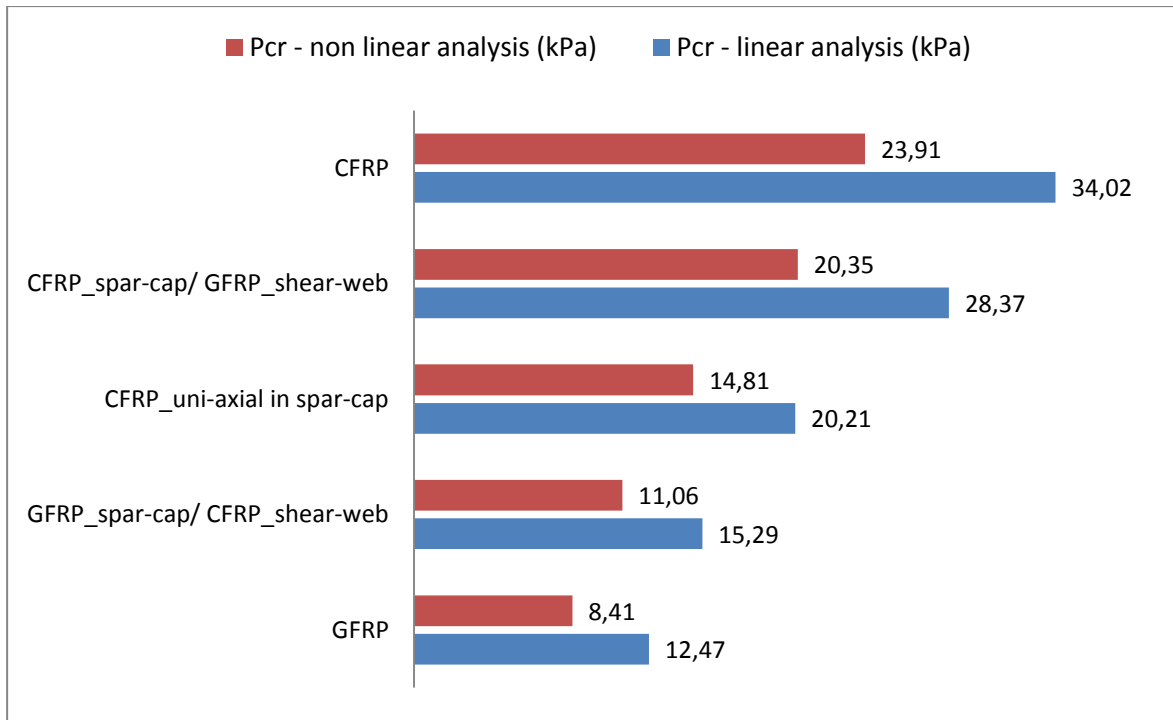


Σχήμα 6.25: Εικόνα τάσεων von Mises στην ολοκλήρωση της φόρτισης (σημείο Γ), με εμφανή την αλλαγή θέσης των πτυχώσεων σε σχέση με την αρχική εικόνα

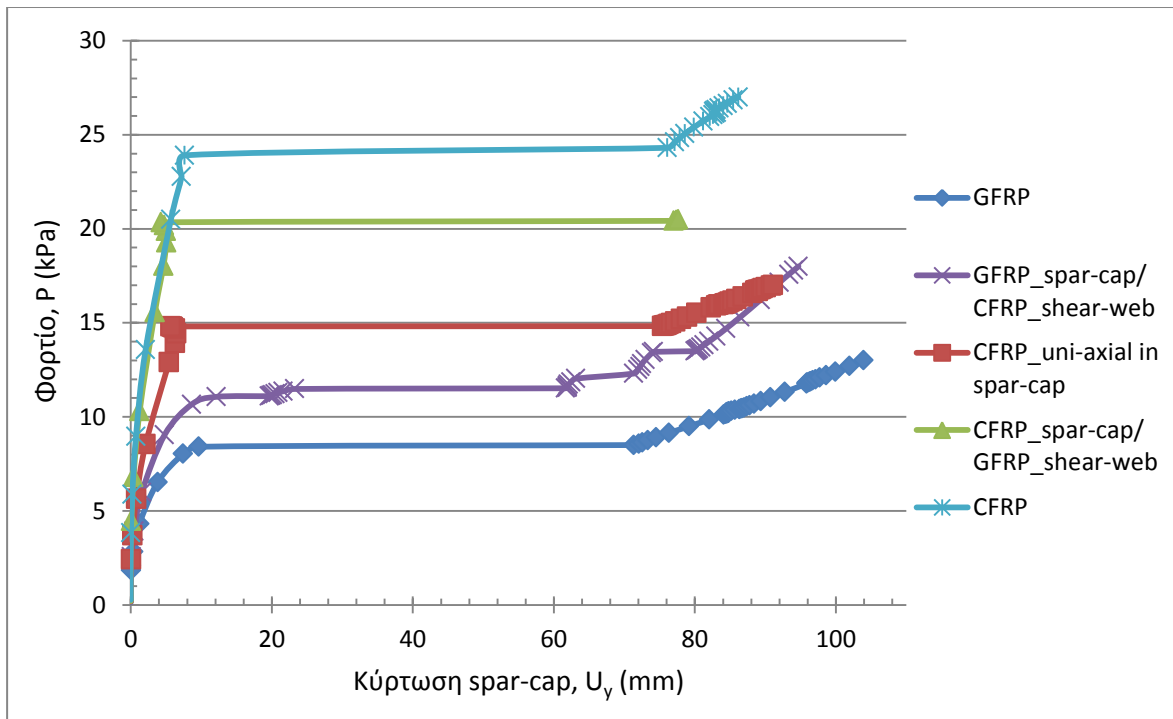
6.4.2 Σύγκριση υβριδικών μοντέλων υλικών GFRP και CFRP

Είδαμε ότι η πλήρης αντικατάσταση των ινών γυαλιού από ίνες άνθρακα στο μηχανισμό στηρίξεως αυξάνει θεαματικά την τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού και ταυτόχρονα περιορίζει σημαντικά τις παραμορφώσεις σε τοπικό και καθολικό επίπεδο. Το αυξημένο κόστος των ανθρακονημάτων ωστόσο παραμένει εμπόδιο, οδηγώντας τη βιομηχανία αεροπορικής ενέργειας στην αναζήτηση λύσεων που θα συνδυάζουν με βέλτιστο τρόπο υψηλότερες τιμές ακαμψίας και αντοχής με χαμηλότερο κόστος. Στην κατεύθυνση αυτή, τα τελευταία χρόνια μελετώνται τα υβριδικά μοντέλα αφού, όπως έχει αναφερθεί, έχει βρεθεί να παρουσιάζουν υψηλότερες αντοχές από πτερύγια που αποτελούνται αμιγώς από GFRP και παράλληλα να έχουν χαμηλότερο συνολικό κόστος από αυτά.

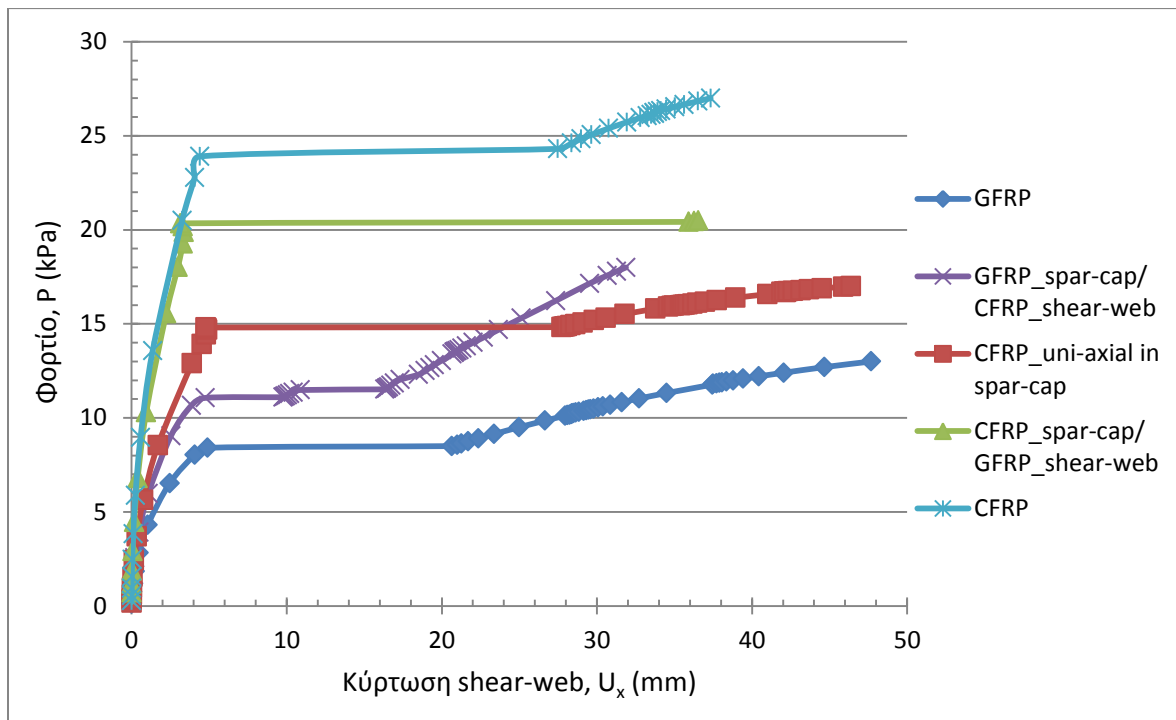
Εδώ εξετάζεται: α) η αντικατάσταση του υλικού GFRP από CFRP στα shear-webs (μοντέλο GFRP_spar-cap/ CFRP_shear-web), β) η αντικατάσταση του υλικού GFRP από CFRP στα spar-caps (μοντέλο CFRP_spar-cap/ GFRP_shear-web) και γ) η αντικατάσταση του GFRP από CFRP στα spar-caps, αλλά μόνο στις στρώσεις με προσανατολισμό 0°, δηλαδή στο uni-axial υλικό (μοντέλο CFRP_uni-axial in spar-cap). Στα μοντέλα αυτά ασκήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση, με μέγιστες τιμές $P_{max}=18\text{kPa}$ στο πρώτο, 20,50kPa στο δεύτερο και 17kPa στο τελευταίο μοντέλο.



Σχήμα 6.26: Συγκριτικό διάγραμμα κρίσιμων φορτίων λυγισμού από γραμμική και μη γραμμική ανάλυση



Σχήμα 6.27: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση γ

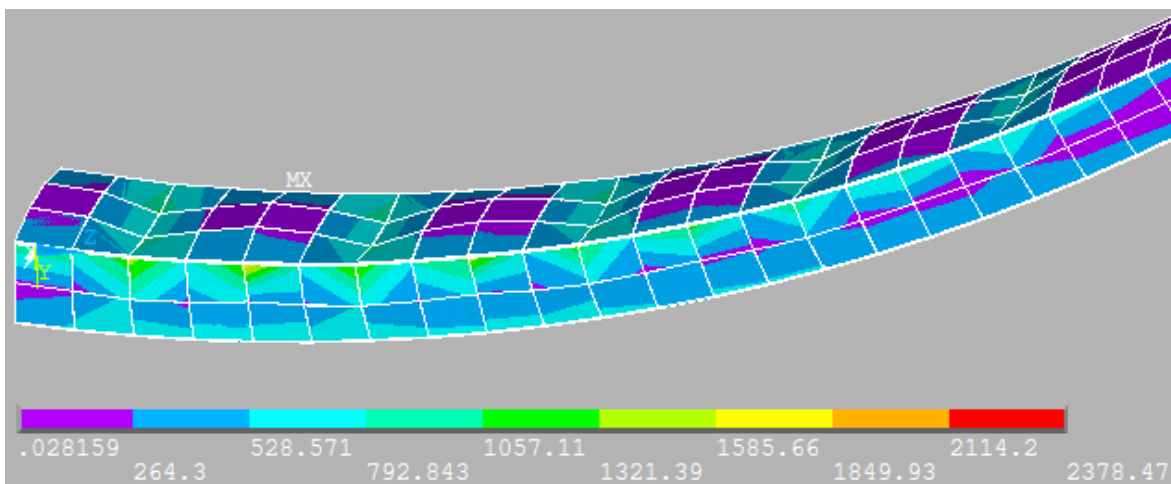


Σχήμα 6.28: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση x

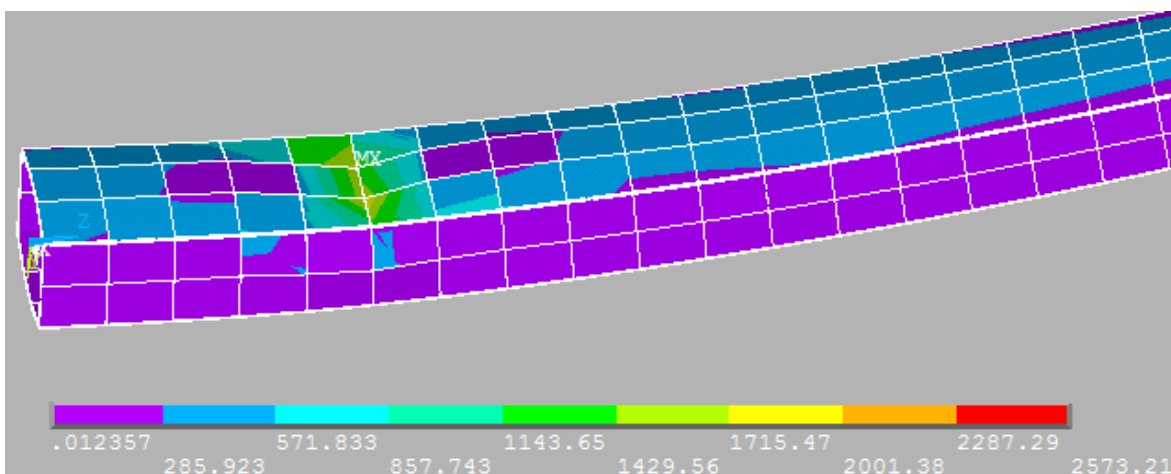
Από τα τρία υβριδικά μοντέλα, το μοντέλο με GFRP στα spar-caps έχει το μικρότερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού, ελαφρώς μεγαλύτερο από το P_{cr} του GFRP μοντέλου. Το μοντέλο αυτό μπορούμε να πούμε ότι έχει ανάλογη απόκριση με το GFRP μοντέλο σε όλη την πορεία της φόρτισης, ενώ ανάλογη είναι και η εικόνα του παραμορφωμένου φορέα στην ολοκλήρωση της φόρτισης (Σχήμα 6.29). Παρουσιάζει ωστόσο βελτιωμένα χαρακτηριστικά από το βασικό μοντέλο, αφού έχει προλυγισμικό κλάδο μεγαλύτερης κλίσεως, ενώ ο κλάδος AB έχει μικρότερο μήκος, που συνεπάγεται ότι ο λυγισμός συνοδεύεται από εκδήλωση τοπικής παραμόρφωσης πολύ μικρότερου μεγέθους (Σχήματα 6.27 και 6.28). Επιπλέον στα shear-webs, για μέγιστο φορτίο κατά πολύ μεγαλύτερο απ' ότι στο GFRP μοντέλο, η μέγιστη τοπική παραμόρφωση στην ολοκλήρωση της φόρτισης έχει περιοριστεί αρκετά, λόγω της υψηλής ακαμψίας του CFRP υλικού που χρησιμοποιήθηκε σε αυτά (Σχήμα 6.28).

Το μοντέλο με CFRP στα spar-caps έχει το μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού από τα υβριδικά μοντέλα που εξετάζονται, η τιμή του οποίου προσεγγίζει το CFRP μοντέλο, όπως και η εικόνα του παραμορφωμένου φορέα (Σχήμα 6.30), ενώ οι προλυγισμικοί τους κλάδοι, μέχρι το σημείο διακλάδωσης συμπίπτουν απόλυτα, γεγονός που φανερώνει ίδια απόκριση σε λυγισμό μέχρι το φορτίο να λάβει την οριακή του τιμή. Ωστόσο, όπως είναι εμφανές και στις καμπύλες των Σχημάτων 6.27 και 6.28, η φέρουσα ικανότητα του υβριδικού αυτού μοντέλου εξαντλείται όταν το επιβαλλόμενο φορτίο γίνει ίσο με το κρίσιμο, χωρίς να μπορεί να αναλάβει επιπλέον φόρτιση, όπως συμβαίνει σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις που μέχρι τώρα έχουν εξεταστεί. Η μηδενική μεταλυγισμική αντοχή είναι σοβαρό μειονέκτημα και μπορεί να οδηγήσει σε ψαθυρή αστοχία που σε κάθε περίπτωση είναι ανεπιθύμητη, αν και αυτό θα μπορούσαμε να πούμε ότι μερικώς αντισταθμίζεται από την συγκριτικά υψηλή τιμή του P_{cr} .

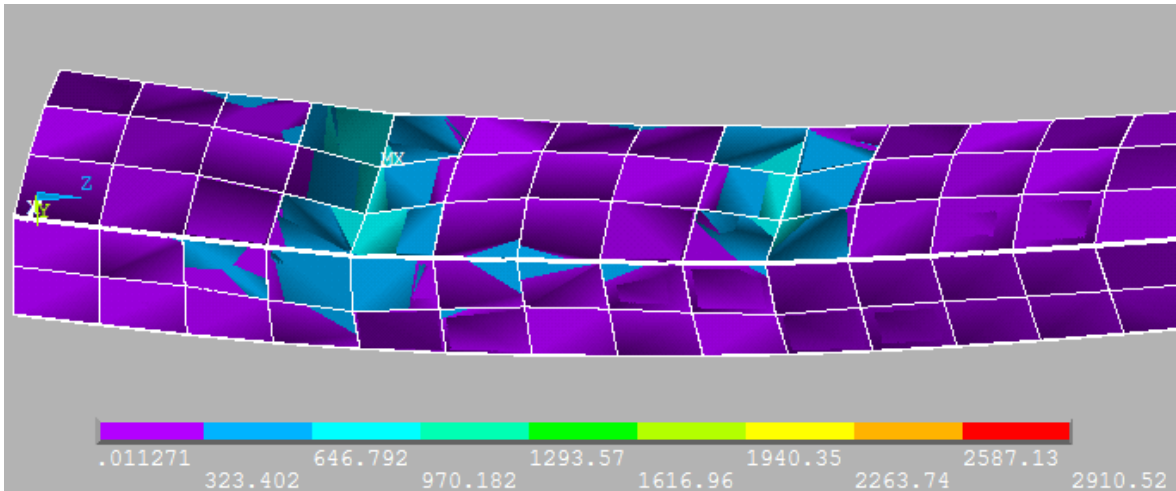
Ο βέλτιστος συνδυασμός ινών άνθρακα και γυαλιού βλέπουμε ότι επιτυγχάνεται στο υβριδικό μοντέλο με ίνες άνθρακα στο υπί-αξιαίο υλικό του spar-cap (ίνες σε διεύθυνση 0°), συμπέρασμα που εξάγεται και σε αναφορές τις βιβλιογραφίας [13, 20]. Η κλίση του πρωτεύοντα δρόμου ισορροπίας και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι ίσα περίπου με το μέσο όρο των αντίστοιχων τιμών των GFRP και CFRP μοντέλων, όπως και η κλίση και το μήκος του μεταλυγισμικού τμήματος ΒΓ. Βέβαια στο Σχήμα 6.28 που αφορά τα shear-webs, βλέπουμε ότι για το ίδιο μέγιστο φορτίο, οι παραμορφώσεις στο μοντέλο GFRP_spar-cap/ CFRP_shear-web είναι κατά πολύ μικρότερες, γεγονός που όπως είπαμε οφείλεται στη χρήση CFRP σε αυτά. Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατανομή τάσεων von Mises στο μοντέλο αυτό, αφού διαφέρει παρασάγγας από τις περιπτώσεις που έχουμε δει μέχρι τώρα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.31, στο εξωτερικό μέρος του box girder οι τάσεις είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα, συγκριτικά μικρή συγκέντρωση τάσεων εντοπίζεται στις θέσεις των δύο πτυχώσεων, ενώ η μέγιστη συγκέντρωση τάσεων εντοπίζεται στη θέση της κύρτωσης στο εσωτερικό του θλιβόμενου πέλματος, όπου υπάρχουν οι στρώσεις του υπί-αξιαίου υλικού που αποτελούνται από CFRP. Έτσι προκύπτει ότι για ίδιο φορτίο οι ίνες άνθρακα στο υπί-αξιαίο υλικό καταπονούνται περισσότερο από τις ίνες γυαλιού σε tri-αξιαία κατεύθυνση, παρόλο που οι τελευταίες διαθέτουν μικρότερη αντοχή.



Σχήμα 6.29: Εικόνα τάσεων von Mises για το μοντέλο GFRP_spar-cap/ CFRP_shear-web



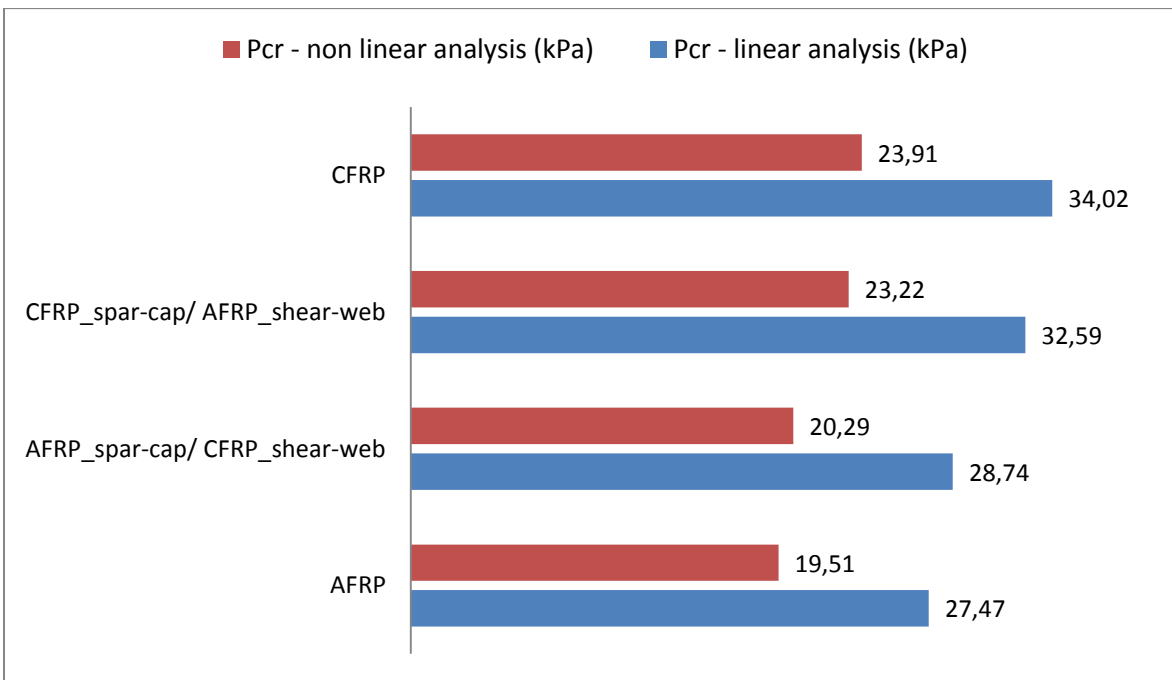
Σχήμα 6.30: Εικόνα τάσεων για το μοντέλο CFRP_spar-cap/ GFRP_shear-web



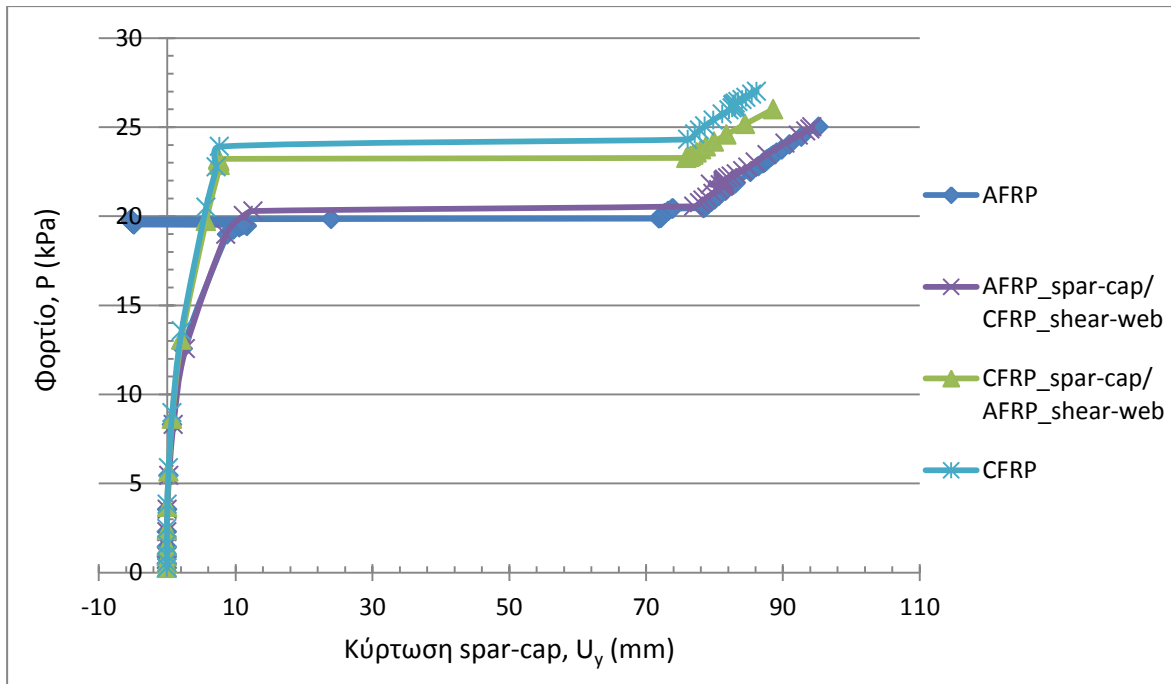
Σχήμα 6.31: Εικόνα τάσεων για το μοντέλο CFRP_uni-axial in spar-cap

6.4.3 Σύγκριση υβριδικών μοντέλων υλικών CFRP και AFRP

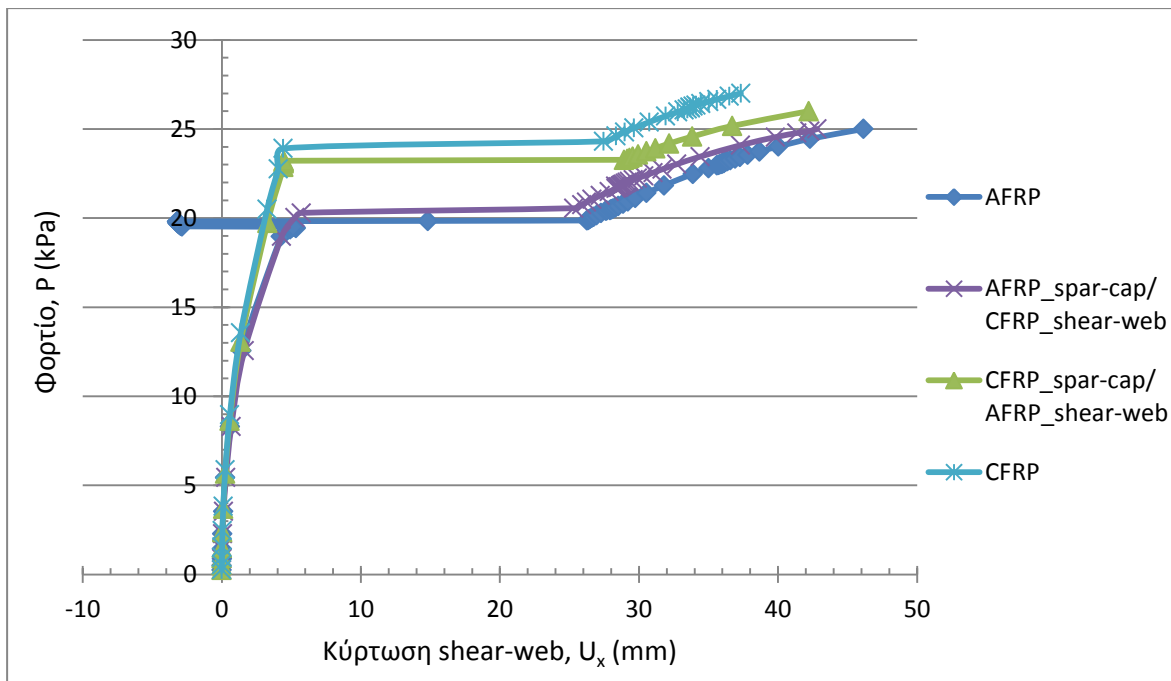
Στην ίδια κατεύθυνση με τα παραπάνω, μελετήθηκε η απόκριση υβριδικών μοντέλων με συνδυασμό ινών άνθρακα και αραμιδίου. Συγκεκριμένα εξετάστηκε: α) η αντικατάσταση του υλικού CFRP από AFRP στα spar-caps (μοντέλο AFRP_spar-cap/ CFRP_shear-web) και β) η αντικατάσταση του υλικού CFRP από AFRP στα shear-webs (μοντέλο CFRP_spar-cap/ AFRP_shear-web). Στα μοντέλα αυτά ασκήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση, με μέγιστες τιμές $P_{max}=25\text{kPa}$ στο πρώτο μοντέλο και 26kPa στο δεύτερο.



Σχήμα 6.32: Συγκριτικό διάγραμμα κρίσιμων φορτίων λυγισμού από γραμμική και μη γραμμική ανάλυση



Σχήμα 6.33: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση γ

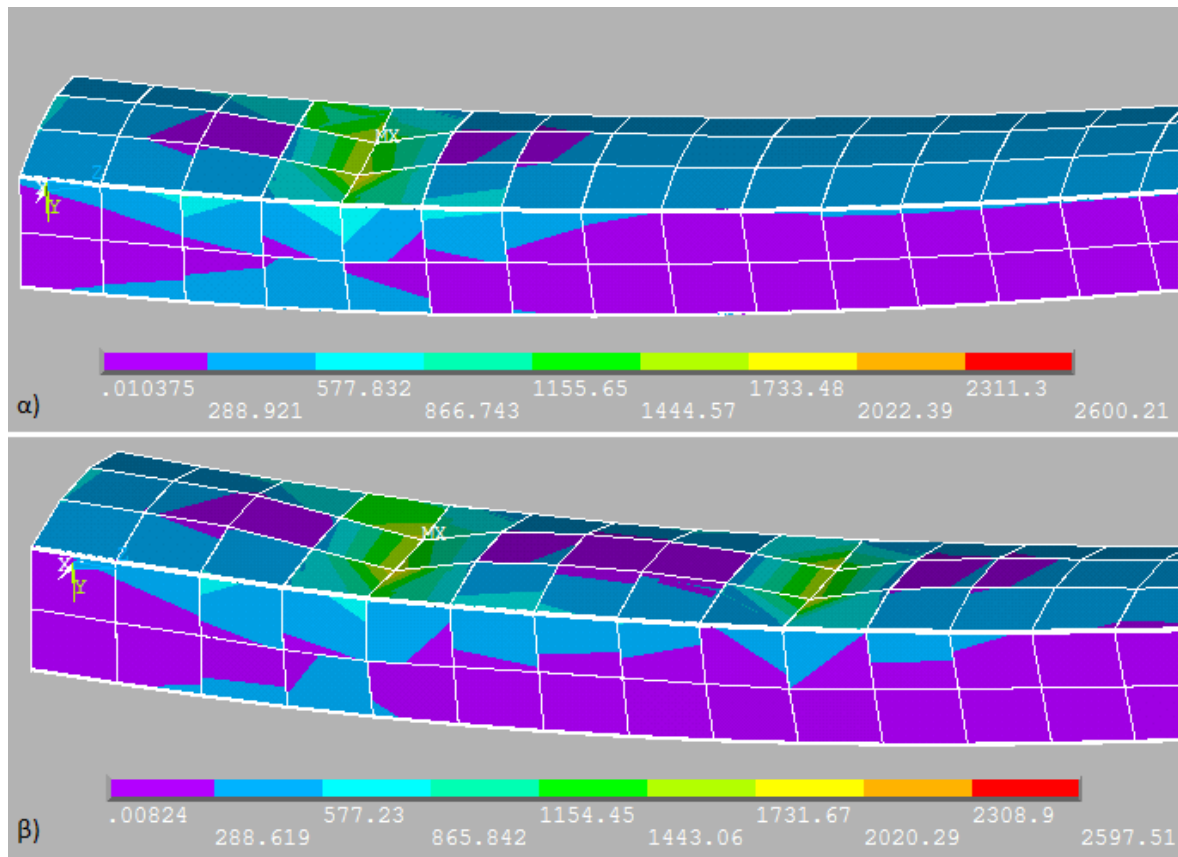


Σχήμα 6.34: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση χ

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων και τα Σχήματα 6.32 έως 6.34 που προηγούνται, βλέπουμε ότι το μοντέλο με ίνες αραμιδίου στο spar-cap έχει ίδια δυσκαμψία (οι προλυγισμικοί τους κλάδοι συμπίπτουν) με το μοντέλο από ίνες αραμιδίου και σχεδόν ίδιο κρίσιμο φορτίο λυγισμού, δεν παρουσιάζει όμως την ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά που το τελευταίο είδαμε να εμφανίζει. Αυτό μπορούμε να το λάβουμε υπόψη ως θετική συμβολή. Επίσης για ίδιο μέγιστο φορτίο P_{max} , οι προκληθείσες παραμορφώσεις στο θλιβόμενο spar-cap δεν παρουσιάζουν διαφορές,

όσον αφορά τον αριθμό και την έκταση τους, μεταξύ των μοντέλων AFRP και AFRP_spar-cap/ CFRP_shear-web, ενώ στο shear-web η κύρτωση προς τα έξω είναι ελαφρώς περιορισμένη, λόγω της χρήσης ινών άνθρακα σε αυτό (Σχήμα 6.34).

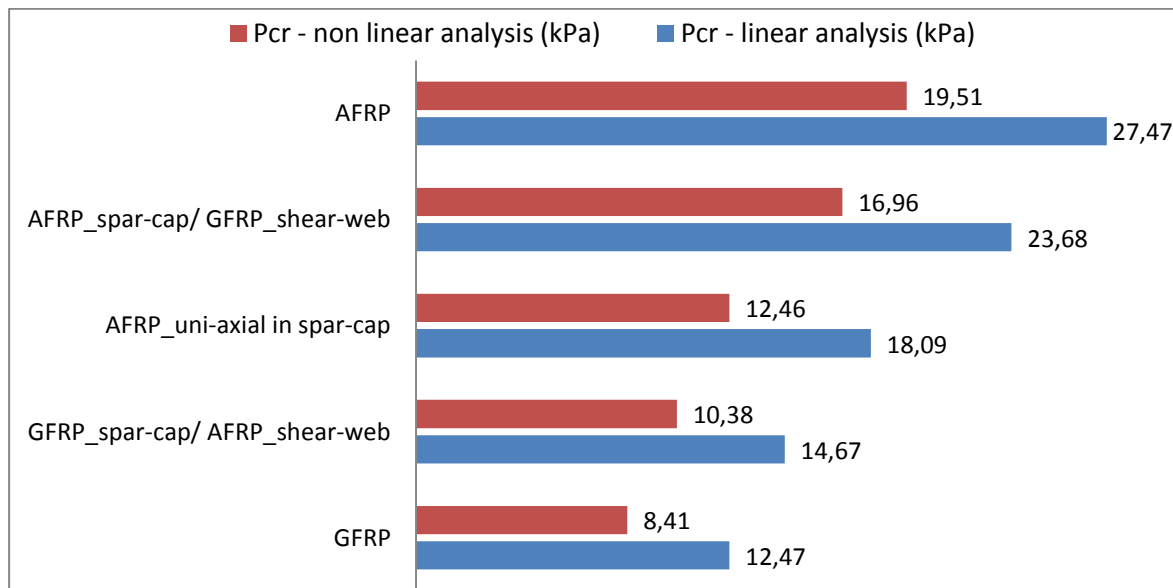
Το μοντέλο με ίνες άνθρακα στα spar-caps και αραμιδίου στα shear-webs, έχει ίση ακριβώς δυσκαμψία με το μοντέλο CFRP, αφού οι προλυγισμικοί τους κλάδοι συμπίπτουν ακριβώς, ίδια μεταλυγισμική συμπεριφορά και κρίσιμο φορτίο λυγισμού ελαφρώς μικρότερο από αυτό (23,22kPa για το πρώτο και 23,91 kPa για το δεύτερο). Στα φορτία λυγισμού οι προκληθείσες παραμορφώσεις στα δύο μοντέλα είναι περίπου ίδιας τιμής, με μόνη διαφορά ότι στο μοντέλο CFRP αμέσως μετά το σημείο διακλάδωσης εκδηλώνεται μία πτύχωση (Σχήμα 6.35α), ενώ στο υβριδικό μοντέλο CFRP_spar-cap/ AFRP_shear-web έχουν εμφανιστεί δύο (Σχήμα 6.35β). Στην ολοκλήρωση της φόρτισης οι εικόνες των δύο παραμορφωμένων φορέων είναι πανομοιότυπες, με τις τοπικές μέγιστες παραμορφώσεις κατά τις διευθύνσεις x και y να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες στο υβριδικό μοντέλο CFRP_spar-cap/ AFRP_shear-web. Εξάγεται έτσι το πολύ χρήσιμο συμπέρασμα ότι αν έχουμε CFRP υλικό στα spar-caps, αλλά στα shear-webs αντί αυτού χρησιμοποιηθεί ινοπλισμένο πολυμερές με ίνες αραμιδίου 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 ($\rho_f=1,47g/cm^3$ για τις ίνες Kevlar 149 και $\rho_f=1,79g/cm^3$ για τις ίνες άνθρακα AS4-D).



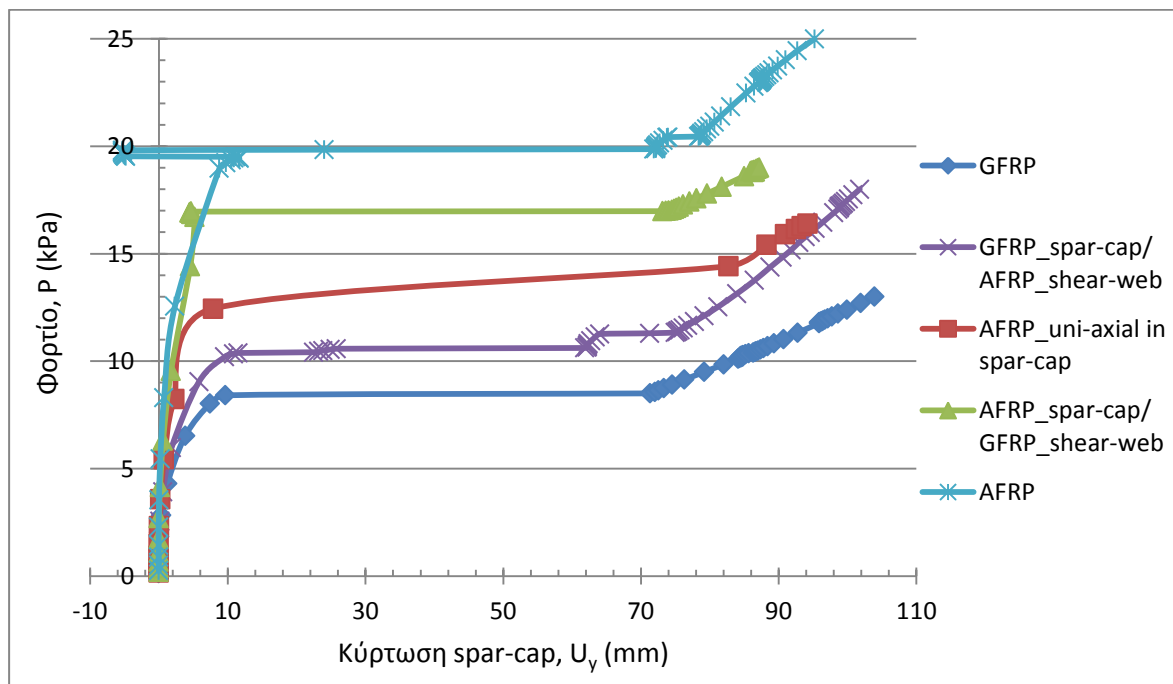
Σχήμα 6.35: Εικόνα παραμορφώσεων και τάσεων von Mises αμέσως μετά την εκδήλωση τοπικού λυγισμού (σημείο B) για τα μοντέλα: α) CFRP και β) CFRP_spar-cap/ AFRP_shear-web

6.4.4 Σύγκριση υβριδικών μοντέλων υλικών GFRP και AFRP

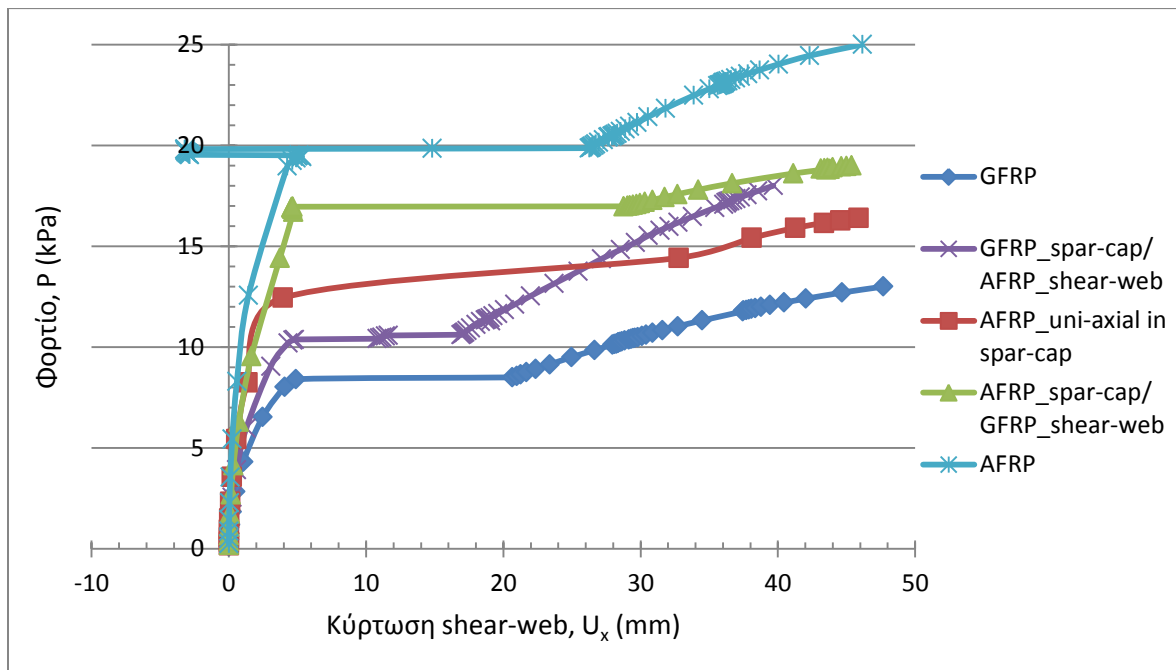
Μελετήθηκαν τέλος υβριδικά μοντέλα από πολυμερή ινοπλισμένα με ίνες γυαλιού και αραμιδιού. Εξετάζεται: α) η αντικατάσταση του υλικού GFRP από AFRP στα shear-webs (μοντέλο GFRP_spar-cap/ AFRP_shear-web), β) η αντικατάσταση του υλικού GFRP από AFRP στα spar-caps (μοντέλο AFRP_spar-cap/ GFRP_shear-web) και γ) η αντικατάσταση του GFRP από AFRP στα spar-caps, αλλά μόνο στις στρώσεις με προσανατολισμό 0°, δηλαδή στο uni-axial υλικό (μοντέλο AFRP_uni-axial in spar-cap). Στα μοντέλα αυτά ασκήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση, με μέγιστες τιμές $P_{max}=18\text{kPa}$ στο πρώτο μοντέλο, 19kPa στο δεύτερο και 16,4kPa στο τελευταίο.



Σχήμα 6.36: Συγκριτικό διάγραμμα κρίσιμων φορτίων λυγισμού



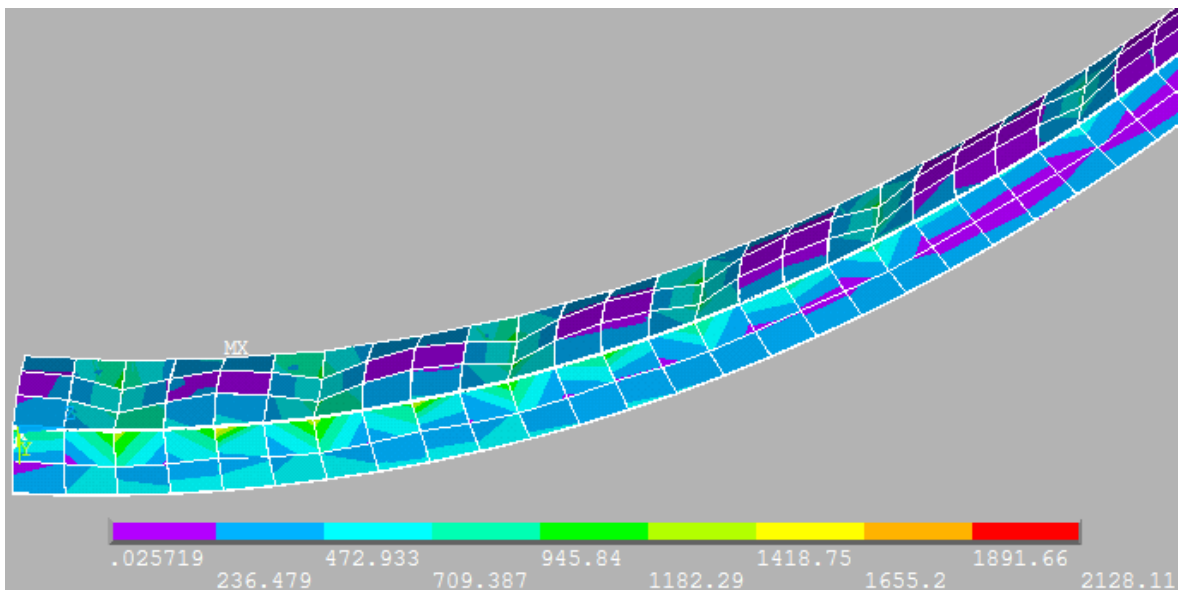
Σχήμα 6.37: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση γ



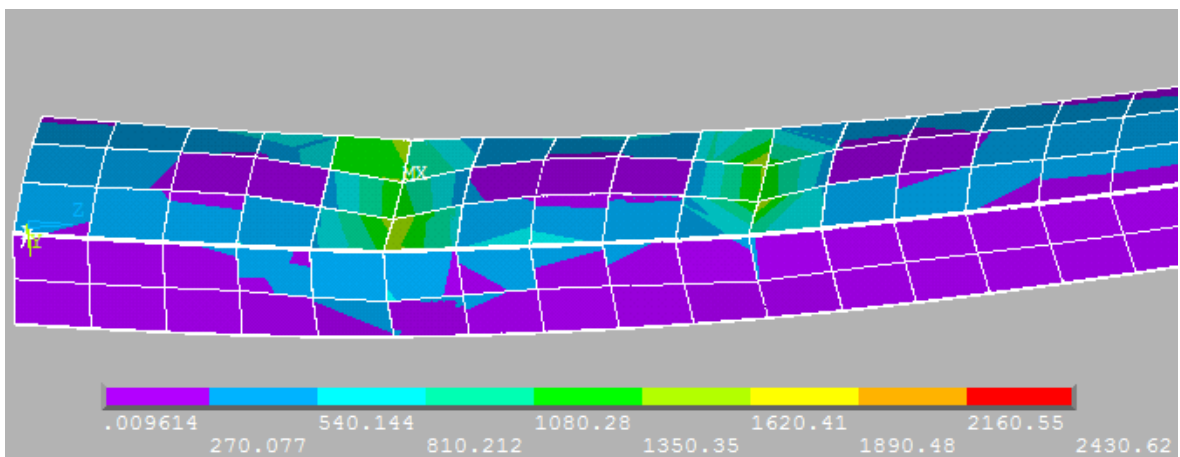
Σχήμα 6.38: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης, με μετατόπιση κατά τη διεύθυνση x

Παρατηρώντας το διάγραμμα του Σχήματος 6.36 και τις καμπύλες φορτίου – μετατόπισης των Σχημάτων 6.37 και 6.38, βλέπουμε να υπάρχει πλήρης αντιστοιχία των υβριδικών μοντέλων από GFRP και AFRP με τα υβριδικά από GFRP και CFRP, που μελετήθηκαν στις παραγράφους 6.4.1 έως 6.4.3. Επίσης με βάση συνολικά τις εξεταζόμενες περιπτώσεις υβριδικών μοντέλων μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η απόκριση και η δυσκαμψία του φορέα επικαθορίζεται από το ινοπλισμένο πολυμερές υλικό του spar-cap, συμπέρασμα αναμενόμενο αφού το τμήμα αυτό του μηχανισμού στηρίξεως είναι που καταπονείται κυρίως και αναλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της flap-wise κάμψης.

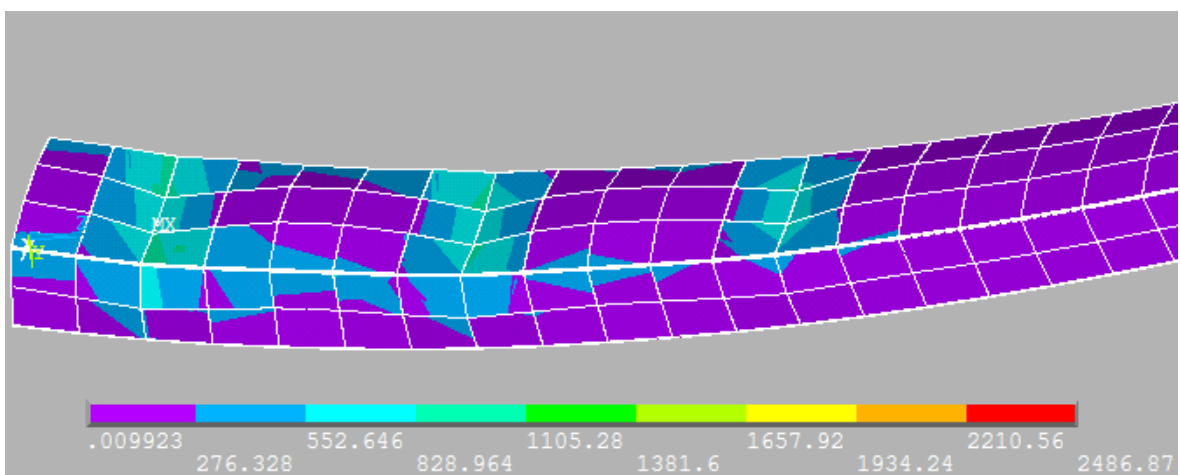
Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο με GFRP στα spar-caps έχει το μικρότερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού από τα τρία υβριδικά μοντέλα, λίγο μεγαλύτερο από το P_{cr} του GFRP μοντέλου και προλυγισμικό κλάδο μεγαλύτερης κλίσεως. Επίσης η πρόκληση τοπικού λυγισμού συνοδεύεται από εκδήλωση τοπικής παραμόρφωσης πολύ μικρότερου μεγέθους, ενώ η μέγιστη τοπική παραμόρφωση στα shear-webs, στην ολοκλήρωση της φόρτισης και για μέγιστο φορτίο κατά πολύ μεγαλύτερο έχει περιοριστεί αρκετά, λόγω της υψηλής ακαμψίας του AFRP υλικού που χρησιμοποιήθηκε σε αυτά (Σχήμα 6.38). Η εικόνα του παραμορφωμένου φορέα στην ολοκλήρωση της φόρτισης (Σχήμα 6.39) είναι πανομοιότυπη με αυτήν του μοντέλου GFRP_spar-cap/CFRP_shear-web (Σχήμα 6.29). Η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης το μοντέλου AFRP_spar-cap/GFRP_shear-web είναι ελαφρώς χαμηλότερα από αυτήν του AFRP, αλλά χωρίς την ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά που το τελευταίο επέδειξε, θετικό χαρακτηριστικό που σημειώθηκε και όταν στο μοντέλο AFRP αντικαταστήσαμε στα shear-webs τις ίνες αραμιδίου με ίνες άνθρακα. Και εδώ, η αντιστοιχία μεταξύ του υβριδικού AFRP_spar-cap/GFRP_shear-web και του CFRP_spar-cap/GFRP_shear-web αποδεικνύεται από την εικόνα του πρώτου στην ολοκλήρωση της φόρτισης (Σχήμα 6.40) και την ομοιότητα που παρουσιάζει με το δεύτερο (Σχήμα 6.30) όσον αφορά τη θέση και το μέγεθος της κύρτωσης στο θλιβόμενο πέλμα.



Σχήμα 6.39: Υβριδικό μοντέλο GFRP_spar-cap/ AFRP_shear-web στην ολοκλήρωση της φόρτισης

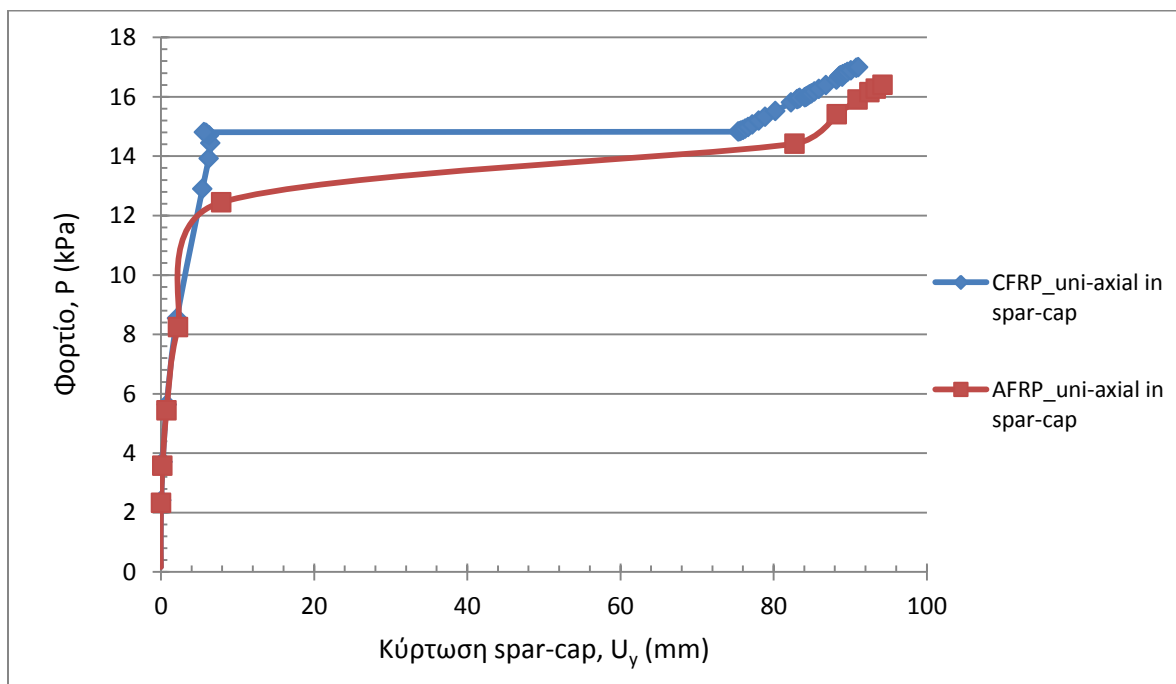


Σχήμα 6.40: Υβριδικό μοντέλο AFRP_spar-cap/ GFRP_shear-web στην ολοκλήρωση της φόρτιση



Σχήμα 6.41: Υβριδικό μοντέλο AFRP_uni-axial in spar-cap στην ολοκλήρωση της φόρτιση

Ως τελευταία περίπτωση υβριδικού μοντέλου εξετάστηκε η αντικατάσταση των υαλονημάτων από ίνες αραμιδίου, αλλά μόνο στις στρώσεις της laminate δομής του spar-cap με διεύθυνση 0° (uni-axial υλικό). Η καμπύλη του φορτίου –μετατόπισης βρίσκεται ακριβώς στο ενδιάμεσο των δρόμων ισορροπίας των μοντέλων GFRP και AFRP και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού προσεγγίζει το μέσο όρο των δύο τελευταίων. Όπως αναμενόταν, και εδώ υπάρχει αντιστοιχία (σε τάσεις και παραμορφώσεις – Σχήμα 6.40) με το υβριδικό μοντέλο με ίνες άνθρακα στο uni-axial υλικό (Σχήμα 6.31). Ιδιαίτερο όμως ενδιαφέρον παρουσιάζει η απεικόνιση σε κοινό διάγραμμα των καμπυλών φορτίου –μετατόπιση αυτών των δύο περιπτώσεων (Σχήμα 6.42), δηλαδή αν στο μοντέλο που αποτελείται αυτοτελώς από GFRP υλικό, αντικαταστήσουμε στις uni-axial στρώσεις του spar-cap τα υαλονήματα, είτε με ανθρακονήματα είτε με ίνες αραμιδίου. Είδαμε (παράγραφος 6.4.2) ότι η πρώτη περίπτωση συνδυάζει με βέλτιστο τρόπο τις ιδιότητες γυαλικού και άνθρακα και γι’ αυτό άλλωστε προτείνεται σε σχετικές μελέτες. Το μοντέλο AFRP_uni-axial in spar-cap έχει κρίσιμο φορτίο λυγισμού ελαφρώς μικρότερο από αυτήν, αλλά την προσεγγίζει θα μπορούσαμε να πούμε σε ικανοποιητικό βαθμό, αφού και η μεταλυγισμική αντοχή επηρεάζεται ελάχιστα. Έτσι η διαδικασία σχεδιασμού βελτιστοποιείται περαιτέρω, αφού μπορούμε να έχουμε παρεμφερή φέρουσα ικανότητα και απόκριση, με μικρότερο κόστος και βάρος, αφού οι ίνες Kevlar είναι οικονομικότερες και ελαφρύτερες από τις ίνες άνθρακα.



Σχήμα 6.42: Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου –μετατόπισης για τα υβριδικά με ίνες άνθρακα (μοντέλο CFRP_uni-axial in spar-cap) είτε ίνες αραμιδίου (μοντέλο AFRP_uni-axial in spar-cap) και υαλονήματα σε όλες τις υπόλοιπες στρώσεις του box girder

7 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που διεξήχθησαν και την επεξεργασία τους, συγκεντρωτικά προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

➤ Αποτίμηση γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

Είδαμε ότι σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις διενεργήθηκαν και οι δύο αναλύσεις λυγισμού, γραμμική και μη γραμμική. Η γραμμική ανάλυση αποδείχτηκε εξαιρετικά συντηρητική, αφού υπερεκτιμά τις τιμές των κρίσιμων φορτίων λυγισμού, οι οποίες μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης προέκυψαν με μικρότερες τιμές για όλα τα μοντέλα. Ταυτόχρονα μέσω των μη γραμμικών αναλύσεων, πέρα από τον πιο ακριβή και επομένως ασφαλή υπολογισμό των κρίσιμων φορτίων, κατέστη δυνατή μια συνολικότερη κατανόηση της συμπεριφοράς των μοντέλων, τόσο σε προλυγισμικό όσο και σε μεταλυγισμικό στάδιο. Συμπεραίνουμε έτσι το πόσο σημαντικό είναι το είδος της ανάλυσης που πραγματοποιείται για την κατανόηση της πραγματικής συμπεριφοράς του φορέα. Επιβεβαιώνεται 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 (περίπτωση γεωμετρικής μη γραμμικότητας). Η γραμμική ανάλυση θα πρέπει είτε να αποφεύγεται είτε να γίνεται προκαταρκτικά, σε επίπεδο προμελέτης.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων, είναι ικανοποιητικά και συμβατά με επιστημονικές μελέτες ανάλογου περιεχομένου [28]. Μέσω των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης που εξήχθησαν και την απόκτηση εικόνας τάσεων και παραμορφώσεων σε όλα τα βήματα της φόρτισης, σχηματίζεται μια συνολική εικόνα για την αρχική δυσκαμψία του φορέα (μέσω της κλίσης του προλυγισμικού κλάδου), το ακριβές φορτίο στο οποίο εκδηλώνεται λυγισμός (μέσω του σημείου διακλάδωσης), καθώς και την ακριβή θέση και το μέγεθος των παραμορφώσεων που προκαλούνται, λόγω της εκδήλωσης τοπικού λυγισμού στο θλιβόμενο spar-car και τοπικού διατμητικού λυγισμού στα shear-webs. Επίσης, μέσω του ανοδικού μεταλυγισμικού κλάδου, που τα μοντέλα στην συντριπτική τους πλειοψηφία παρουσίασαν, γίνεται εμφανής η μεταλυγισμική αντοχή που διαθέτουν, αφού μπορούν να φέρουν φορτίο μεγαλύτερο του κρίσιμου. Με βάση το σύνολο αυτών των πληροφοριών κατέστη δυνατή και η συγκριτική αξιολόγηση της απόκρισης των διαφορετικών ινοπλισμένων σύνθετων υλικών, που χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό προσομοίωμα.

Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι με τη μη γραμμική ανάλυση λυγισμού η διερεύνηση της αστοχίας γίνεται σε επίπεδο μέλους, χωρίς να μπορούν να δοθούν περεταίρω πληροφορίες για την διαδικασία της αστοχίας σε επίπεδο μικροκλίμακας, όπως σε επίπεδο ίνας/μήτρας ή συγκολλητικών δεσμών και αποκολλήσεων μεταξύ των στρώσεων, δηλαδή για μορφές αστοχίας που αναλύθηκαν σε σχετικό εδάφιο (παράγραφος 3.3.4). Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις της βιβλιογραφίας [21,24,28,33]

διατυπώνεται ότι λόγω της μεγάλης λυγηρότητας των τοιχωμάτων του μηχανισμού στηρίξεως, η εκδήλωση τοπικού λυγισμού είναι εξέχουσα μορφή αστοχίας και αυτή που τελικά θα επιδράσει καθοριστικά στην καθολική αστοχία του πτερυγίου. Σε αυτό συντείνουν και μελέτες από τη σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ πειραματικού μοντέλου (πτερύγιο) και αριθμητικού προσομοιώματος (κουτί εσωτερικής στηρίξεως) [28], όπου εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα δύο μοντέλα είχαν πανομοιότυπη απόκριση σε λυγισμό μέχρι το σημείο διακλάδωσης, το οποίο αντιστοιχεί σε τιμή που έλαβε το φορτίο ακριβώς πριν την ολοκληρωτική αστοχία του πτερυγίου, παρότι είχαν αναπτυχθεί σημαντικές ζημιές, πριν το σημείο αυτό. Επομένως, από την ανάλυση λυγισμού δεν προκύπτουν πληροφορίες επιπέδου μικροκλίμακας, αλλά το κρίσιμο φορτίο λυγισμού και η μεταλυγισμική συμπεριφορά του φορέα μπορούν να δώσουν ασφαλείς και επαρκείς πληροφορίες σε σχέση με την απόκριση του μηχανισμού στηρίξεως, αλλά και του πτερυγίου συνολικά.

➤ Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων από τις παραμετρικές αναλύσεις

Μέσω της παραμετρικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, διερευνήθηκε η συμπεριφορά σε λυγισμό λόγω κάμψης του μηχανισμού εσωτερικής στηρίξεως όταν μεταβάλλεται: α) η γεωμετρία, β) ο τρόπος επιβολής φόρτισης που προκαλεί flap-wise κάμψη και γ) τα ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά από τα οποία αποτελείται.

Από την σύγκριση μεταξύ των μοντέλων με διαφορετική διαμόρφωση διατομής μέλους (με και χωρίς καμπύλωση στην περιοχή μετάβασης από το spar-car στο shear-web) δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στην απόκριση και το φορτίο λυγισμού, φάνηκε όμως πώς μικρές διαφοροποιήσεις της γεωμετρίας του μοντέλου είναι δυνατόν να μειώσουν βέλη κάμψης και παραμορφώσεις. Επίσης διαφάνηκε ότι τα στοιχεία κελύφους χρησιμοποιούνται μεν ευρύτατα στον επαγγελματικό σχεδιασμό και στην προσομοίωση πτερυγίων και μηχανισμού στηρίξεως, δεν είναι κατάλληλα ωστόσο για περιοχές ανομοιόμορφης γεωμετρίας ή αυξημένης καμπυλότητας, αφού δεν μπορούν να λειτουργήσουν πλήρως. Έτσι δεν καθίσταται δυνατός και ο λεπτομερής ply-drop σχεδιασμός της περιοχής μετάβασης.

Με βάση τα αποτελέσματα από τους διαφορετικούς τρόπους επιβολής φόρτισης που προκαλεί flap-wise κάμψη και τις σχετικά μικρές αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν, συμπεραίνουμε ότι ο διαφορετικός τρόπος επιβολής φορτίου μπορεί μεν να επηρεάζει την κατανομή της ροπής κάμψεως κατά μήκος του φορέα, δεν επιδρά ωστόσο σε καθοριστικό βαθμό στη φέρουσα ικανότητα και την απόκρισή του. Και επομένως δεν μπορούμε και να προτείνουμε ή να απορρίψουμε κάποιον από τους τρόπους αυτούς ως καταλληλότερο ή ακατάλληλο αντίστοιχα, αφού η επιλογή του προσφορότερου επικαθορίζεται και κρίνεται από τις συνθήκες του εκάστοτε προβλήματος μελέτης.

Μέσω της σύγκρισης που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των μοντέλων με ινοπλισμένα πολυμερή με ίνες γυαλιού, άνθρακα και αραμιδίου (GFRP, CFRP και AFRP αντίστοιχα), προέκυψε ότι, όπως άλλωστε αναμενόταν, το μοντέλο από CFRP υλικό έχει εξαιρετικά μεγαλύτερη δυσκαμψία και αντοχή από το GFRP και αστοχεί σε κρίσιμο φορτίο λυγισμού υπερδιπλάσιο του τελευταίου. Παράλληλα, για ίδια επίπεδα φόρτισης, περιορίζονται σημαντικά οι προκληθείσες παραμορφώσεις σε spar-car και shear-webs, αλλά και η

συνολική κατακόρυφη εκτροπή του ελεύθερου άκρου του φορέα. Θετικά αποτελέσματα προκύπτουν και από την χρήση ινών αραμιδίου (ίνες Kevlar 149), που παρουσιάζουν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες και σημαντικά βελτιωμένες σε σχέση με άλλες κατηγορίες Kevlar. Για το μοντέλο AFRP η δυσκαμψία και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι αρκετά μεγαλύτερα από το μοντέλο GFRP και μικρότερα από τα αντίστοιχα μεγέθη του CFRP μοντέλου, με αρνητικό ωστόσο χαρακτηριστικό την ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά που το πρώτο επέδειξε.

Βέβαια, η ασταθής συμπεριφορά του αραμιδίου αμέσως μετά την εκδήλωση τοπικού λυγισμού είδαμε να εξαλείφεται, όταν χρησιμοποιήθηκε από κοινού με ίνες άνθρακα ή γυαλιού 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. Η δεύτερη σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από τη μελέτη των 8 συνολικά υβριδικών μοντέλων που εξετάστηκαν είναι ότι η απόκριση και η δυσκαμψία του φορέα επικαθορίζεται από το ινοπλισμένο πολυμερές υλικό του spar-cap, συμπέρασμα αναμενόμενο αφού το τμήμα αυτό του μηχανισμού στηρίζεται είναι που κυρίαρχα καταπονείται.

Συγκεκριμένα, στα υβριδικά μοντέλα GFRP_spar-cap/CFRP_shear-web και GFRP_spar-cap/AFRP_shear-web οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης είναι εντελώς ανάλογες με αυτήν του μοντέλου GFRP, αλλά με βελτιωμένα χαρακτηριστικά, δηλαδή μεγαλύτερη δυσκαμψία, υψηλότερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού και περιορισμένες παραμορφώσεις στα shear-webs λόγω της χρήσης CFRP και AFRP αντίστοιχα σε αυτά. Το υβριδικό μοντέλο AFRP_spar-cap/GFRP_shear-web έχει δυσκαμψία και φορτίο λυγισμού ελαφρώς μικρότερα από το AFRP, ενώ στο μοντέλο AFRP_spar-cap/CFRP_shear-web η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης συμπίπτει απόλυτα με αυτήν του AFRP, χωρίς όμως την ασταθή μεταλυγισμική συμπεριφορά που το τελευταίο επέδειξε. Αναφορικά με τα υβριδικά με CFRP στο spar-cap, το μοντέλο CFRP_spar-cap/GFRP_shear-web έχει μεν υψηλή δυσκαμψία και κρίσιμο φορτίο, παρουσιάζει ωστόσο μηδενική μεταλυγισμική αντοχή, κάτι που είναι ιδιαίτερα αρνητικό, αφού μπορεί να οδηγήσει σε ψαθυρή αστοχία, που σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να αποφεύγεται. Τουναντίον, το υβριδικό CFRP_spar-cap/AFRP_shear-web είναι πολύ κοντά στο CFRP μοντέλο, οδηγώντας έτσι στο πολύ χρήσιμο συμπέρασμα ότι αν έχουμε CFRP υλικό στα spar-caps, αλλά στα shear-webs αντί αυτού χρησιμοποιηθεί AFRP μπορούμε να πετύχουμε ένα φορέα με την ίδια φέρουσα ικανότητα και απόκριση σε λυγισμό, αλλά πολύ οικονομικότερο, αφού οι ίνες Kevlar 149 είναι οικονομικότερες και ελαφρύτερες από τα ανθρακονήματα. Τέλος, εξετάστηκαν υβριδικά με ίνες CFRP στις uni-axial στρώσεις του spar-cap και GFRP σε όλες τις υπόλοιπες στρώσεις, όπου φάνηκε ότι οι ιδιότητες των δύο υλικών συνδυάζονται με βέλτιστο τρόπο, επιβεβαιώνοντας και σχετικές μελέτες. Ενώ, ανάλογη ήταν και η απόκριση του μοντέλου, όταν αντί για CFRP χρησιμοποιήθηκε AFRP στις uni-axial στρώσεις, δείχνοντας έτσι δυνατότητες για περαιτέρω βελτιστοποίηση του σχεδιασμού.

➤ Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, αναφέρθηκαν κάποιες παραδοχές που έχουν γίνει, οι οποίες βέβαια σε κάθε περίπτωση είναι αποδεκτές και εντός των ορίων ασφαλείας, αφού υιοθετούνται σε πολλές ανάλογες περιπτώσεις της βιβλιογραφίας. Παρ' όλα αυτά,

στον αντίποδα αυτών των παραδοχών προτείνονται βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν σε μελλοντικές εργασίες. Οι βελτιώσεις αυτές αφορούν το υπολογιστικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων και σχετίζονται με τη ρεαλιστικότερη διαμόρφωση της γεωμετρίας του φορέα, χωρίς την υπόθεση διπλής συμμετρίας κατά τους άξονες x και y , αλλά και με πιο λεπτομερή $ply-drog$ σχεδιασμό στην περιοχή μετάβασης. Επίσης προτείνεται 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 ιών αραμιδίου θα πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω, με διερεύνηση της απόκρισης τους και σε πειραματικά μοντέλα. Τέλος, θα ήταν σκόπιμο να μελετηθεί και η δυνατότητα χρησιμοποίησης ινοπλισμένων πολυμερών σε sandwich δομές και στο spar-cap εκτός από τα shear-webs, στην κατεύθυνση της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του μηχανισμού στηρίξεως, αλλά και του πτερυγίου στο σύνολό του.

8 Βιβλιογραφία

1. Γαντές Χ., Σημειώσεις Μαθήματος “Μη Γραμμική Συμπεριφορά Μεταλλικών Κατασκευών”, 9ο Εξάμηνο Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π..
2. Δημόπουλος Χ., “Ενίσχυση οπών ανθρωποθυρίδων σε χαλύβδινα κελύφη πυλώνων ανεμογεννητριών: πειραματική και αριθμητική διερεύνηση”, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Αθήνα, 2012.
3. Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), “HWEA Wind Energy Statistics – June 2015”.
4. Κουνάδης Α.Ν., “Γραμμική Θεωρία Ελαστικής Ευστάθειας”, Εκδόσεις Συμεών, Β΄ Έκδοση, Αθήνα, 1997.
5. Κουνάδης Α.Ν., “Μη Γραμμική Θεωρία Ελαστικής Ευστάθειας Με Στοιχεία από τη Θεωρία Καταστροφών”, Εκδόσεις Συμεών, Β΄ Έκδοση, Αθήνα, 2004.
6. Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε. (ΛΑΓΗΕ), Μηνιαίο Δελτίο Συστήματος Συναλλαγών ΗΕΠ, Ιούλιος 2015.
7. Μπαλόκας Γ., “Ανάλυση εσωτερικής στηρίξεως πτερυγίου ανεμογεννήτριας από σύνθετα υλικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μηχανικής, Αθήνα, 2013.
8. Παπαδρακάκης Μ., “Μη γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία”, Αθήνα, 1998.
9. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), “Τελικές προτάσεις της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας για την αναδιοργάνωση της εγχώριας αγοράς ενέργειας”, Αθήνα, Νοέμβριος 2012.
10. Τσαμασφύρος Γ.Ι., Θεοτόκογλου Ε.Ε., “Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων Ι”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2005.
11. Τσαμασφύρος Γ., Καντεράκης Γ., “Ειδικά Κεφάλαια Σύνθετων Υλικών”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2004.
12. ANSYS 14.5, User’s manual
13. Ashwill T.D., “Materials and Innovations for Large Blade Structures: Research Opportunities in Wind Energy Technology”, 50th AIAA Structures, Structural Dynamics & Materials Conference Palm Springs, May, 2009.
14. AWEA, BlueGreen Alliance Foundation, Global Wind Network and National Institute of Standards and Technology, “Wind Energy Industry Manufacturing Supplier Handbook”, 2011.
15. Aymerich F., “Composite materials for wind turbine blades: issues and challenges”, Department of Mechanical, Chemical and Materials Engineering University of Cagliari, Italy.
16. Bazilevs Y., Hsu M.-C., Akkerman I., Wright S., Takizawa K., Henicke B., Spielman T. and Tezduyar T.E., “3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part I: Geometry modeling and aerodynamics”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Int. J. Numer. Meth. Fluids 2011, 65: 207–235.
17. Brøndsted P., Lilholt H., Lystrup A., “Composite materials for wind power turbine blades”, Annu. Rev. Mater. Res, 35: 505-538 (2005).

18. Burton T., Sharpe D., Jenkins N. and Bossanyi E., "Wind Energy Handbook", Wiley, USA (1991).
19. Chen X., Zhao W., Zhao X.L. and Xu J.Z., "Failure Test and Finite Element Simulation of a Large Wind Turbine Composite Blade under Static Loading", *Energies* 2014, 7, 2274-2297.
20. Cox K., Echtermeyer A., "Structural design and analysis of a 10MW wind turbine blade", *Energy Procedia* 24: 194–201 (2012).
21. Gaudern N. and Symons D., "Comparison of Theoretical and Numerical Buckling Loads for Wind Turbine Blade Panels", *Wing Engineering*, Volume 34, No. 2, 2010, PP 193–206
22. Griffin D.A., "WindPact Turbine Design Scaling Studies Technical Area 1 – Composite Blades for 80- to 120-Meter Rotor", NREL, Washington, 2001.
23. 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).
24. Jensen F.M., Falzon B.G., Ankersen J., Stang H., "Structural Testing and Numerical Simulation of a 34m Composite Wind Turbine Blade", *Composite Structures*, 76, 52-61, 2006.
25. 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, October 2013.
26. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, "Renewables 2015 Global Status Report." Paris, France.
27. Risø National Laboratory and Det Norske Veritas, "Guidelines for Design of Wind Turbines", Second Edition, Denmark (2002).
28. 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).
29. The European Wind Energy Association (EWEA), "UpWind, Design limits and solutions for very large wind turbines", March 2011.
30. The European Wind Energy Association (EWEA), "Wind in power: 2014 European statistics", February 2015.
31. Theotokoglou E.E. and Balokas G.A., "A Micro-Scale Structural Response Comparison Between GFRP and CFRP Wind Turbine Blades", *Proceedings of the 8th GRACM International Congress on Computational Mechanics*, Volos, Greece, July 12-15 2015.
32. 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).
33. 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).
34. 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)