



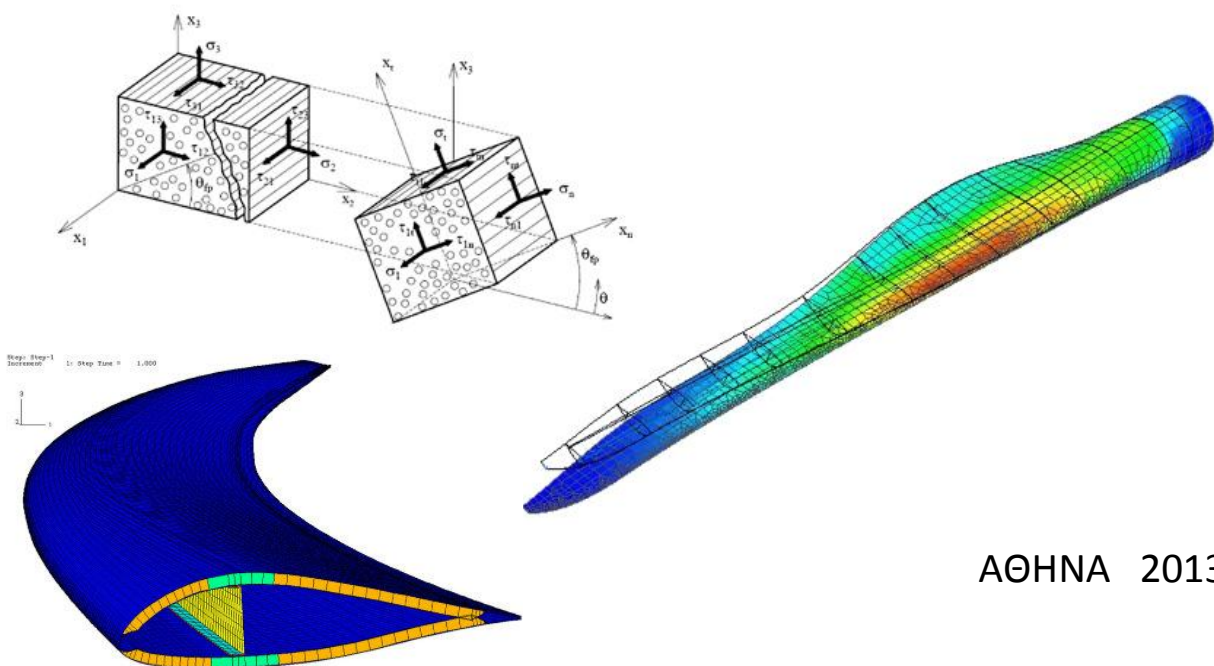
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Α. ΜΠΑΛΟΚΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Ε. ΘΕΟΤΟΚΟΓΛΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ



ΑΘΗΝΑ 2013

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΣΤΗΡΙΞΕΩΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Α.ΜΠΑΛΟΚΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: *ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Ε.ΘΕΟΤΟΚΟΓΛΟΥ*, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Γεώργιος Μπαλόκας

ΑΘΗΝΑ 2013

Πρόλογος

Η περίοδος ασχολίας με την διπλωματική εργασία είναι αναμφισβήτητα η πιο δημιουργική στη πορεία ενός προπτυχιακού φοιτητή. Ειδικότερα σε ένα ερευνητικό θέμα, μη τετριμμένο και κορεσμένο όπως το συγκεκριμένο, όλα τα στάδια που περνάει ο τελειόφοιτος από την έρευνα και τη μελέτη μέχρι την ανάλυση και τη σύνταξη, είναι μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα διαδρομή που προσφέρει γνώση, εμπειρία και ευχαρίστηση για το τελικό αποτέλεσμα. Προσωπικά είναι η δεύτερη φορά που εκπονώ διπλωματική εργασία και θεωρώ τις δύο περιόδους εκπόνησης που έχω βιώσει, τη μία καλύτερη από την άλλη.

Σε αυτό συνέβαλλε περισσότερο από όλους ο καθηγητής κ. Ευστάθιος Θεοτόκογλου, τον οποίο ευχαριστώ θερμά. Όλα αυτά τα χρόνια (από το τρίτο έτος της ΣΕΜΦΕ μέχρι τώρα που αποφοιτώ από τους Πολιτικούς Μηχανικούς) έχουμε μία εκπληκτική συνεργασία και μία σχέση αλληλοεκτίμησης και αλληλοσεβασμού. Ήταν ο άνθρωπος που μου πρότεινε το θέμα των ανεμογεννητριών εξαρχής, με καθοδήγησε και με βοήθησε όλον αυτό τον καιρό, στήριξε τις επιλογές μου σε πολλά θέματα και γενικώς μόνο ωφελημένος μπορώ να αισθανθώ από τη γνωριμία μας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Αιμίλιο Σιδερίδη για την πολύτιμη βοήθειά του πάνω στα σύνθετα υλικά, τον αναπληρωτή καθηγητή και μέλος της τριμελούς επιτροπής κ. Ιωάννη Ραυτογιάννη και τον Υ.Δ. Ηλία Κούλαλη για τη βοήθειά του στον προγραμματισμό με Η/Υ. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον πολιτικό μηχανικό κ. Χρίστο Παπαδόπουλο, υπό την επίβλεψη του οποίου πραγματοποίησα την πρακτική μου άσκηση κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας. Οι αστείρευτες γνώσεις του και ο τρόπος σκέψης του αποτέλεσαν ισχυρή επιρροή για μένα και με ενέπνευσαν να βελτιώνω διαρκώς τον εαυτό μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου (τους γονείς μου και τον αδερφό μου) για την απόλυτη στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η συνεισφορά τους είναι θεμελιώδης και ποτέ δεν θα είχα φτάσει ως εδώ χωρίς αυτούς.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ΙΧ
ABSTRACT	ΧΙ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ – ΤΟΜΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΤΟΜΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	3
1.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ	7
1.4 ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑ	15
2.1 ΤΜΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΣ	15
2.2 ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΤΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ	19
2.3 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ.....	21
2.4 ΦΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ - ΑΝΕΓΕΡΣΗΣ	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΙΚΑ	31
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	31
3.2 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ (<i>MATERIAL SELECTION</i>)	33
3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	35
3.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ, ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	39
3.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	50
4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	50
4.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ – ΑΠΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ	54
4.3 <i>PLY-DROP ANALYSIS</i>	57
4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΕΠΙΠΕΔΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	58
4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ	65
4.6 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	73
4.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ ΚΑΙ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	86
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	86
5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	88
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	91

Περίληψη

Σε μία ανεμογεννήτρια τα πτερύγια είναι ένα πολύ κρίσιμο και σημαντικό τμήμα όσον αφορά τον σχεδιασμό, διότι η επίδοσή της εξαρτάται από παράγοντες όπως τα υλικά του πτερυγίου, το σχήμα, η γωνία συστροφής κτλ.

Εξετάζεται ο σχεδιασμός του εσωτερικού του πτερυγίου όπως επίσης και η κατάλληλη επιλογή των υλικών μίας μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριας που καταπονείται από ένα στατικό φορτίο κάθετο στην μεγάλη επιφάνεια του πτερυγίου (φόρτιση *flap-wise*). Αναπτύσσεται ένα πολύ λεπτομερές μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που προσομοιώνει την εσωτερική στήριξη του πτερυγίου (σε σχήμα «κουτιού»), με δεδομένα το μέγεθος, το αεροδυναμικό σχήμα, τον τύπο και την ακριβή τοποθέτηση των εσωτερικών δοκών (*spar-caps*) και υποστυλωμάτων (*shear-webs*). Για την στήριξη αυτή χρησιμοποιούνται προχωρημένα και καινοτόμα σύνθετα υλικά με υψηλούς λόγους αντοχής – και ακαμψίας – προς βάρος, όπως πολυμερή οπλισμένα με ίνες γυαλιού και ίνες άνθρακα. Με τη βοήθεια εξειδικευμένων λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων παράγονται αποτελέσματα που αφορούν τις τάσεις και τις μετατοπίσεις χρησιμοποιώντας επίπεδα στοιχεία και τρισδιάστατα στοιχεία κελύφους, με γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις (παραδοχές μικρών και μεγάλων μετατοπίσεων). Εφαρμόζεται επίσης ένα κριτήριο αστοχίας σύνθετων υλικών για περαιτέρω συμπεράσματα όσον αφορά τα μεγέθη των τάσεων.

Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του πτερυγίου μίας μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριας σε επίπεδο διατομής, που καταπονείται από στατικό φορτίο ισοδύναμο με μία μέση φόρτιση ανέμου και γενικότερα η έρευνα γύρω από τη συμπεριφορά των κατασκευών αυτών με έμφαση στην επιλογή των υλικών, με σκοπό πάντα τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους.

Abstract

In wind turbines, blades are critical design members because performance depends on blade material, shape, twist angle, etc.

The problem of internal, mechanical design and material selection for a prototypical -high power- horizontal axis wind turbine blade under static, flap-wise loading is investigated in this study. A very detailed finite element model is developed representing the load-carrying box girder of the blade with a given airfoil shape, size, and the type and position of the interior load-bearing longitudinal beams/shear-webs. The materials used in the internal support are innovative, highly advanced composites that have high strength – and stiffness – to weight ratios such as E-Glass fiber reinforced plastic and Carbon fiber reinforced plastic. Results concerning displacements and stresses are generated using both plane and shell finite elements with linear and non-linear analyses. A failure criterion for composite materials is also applied, in order to obtain some more results about the stresses.

The main objective of this study is to help further advance the use of computer – aided engineering methods and tools (e.g. geometrical modeling of the box girder, structural analysis and material-selection methodologies) to the field of design and development of composite wind turbine blades and in general to shed some more light into the behavior of wind turbine blade structures.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ – ΤΟΜΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου από τον άνθρωπο αποτελεί μία πρακτική που βρίσκει τις ρίζες της στην αρχαιότητα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας είναι τα ιστιοφόρα και οι ανεμόμυλοι. Σήμερα για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούμε τις ανεμογεννήτριες.

Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω του πτερυγίου, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια με τη μορφή περιστροφής του άξονα του πτερυγίου και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνουμε την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για την πλήρη κάλυψη ή και τη συμπλήρωση των ενεργειακών αναγκών. Το παραγόμενο από τις ανεμογεννήτριες ηλεκτρικό ρεύμα είτε καταναλώνεται επιτόπου, είτε εγχέεται και διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να καταναλωθεί αλλού. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες, όταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση συχνά αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρόνο, όταν η ζήτηση θα είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή. Η αποθήκευση σήμερα γίνεται με δύο οικονομικά βιώσιμους τρόπους, ανάλογα με το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) είναι η πλέον γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται για μικρής κλίμακας παραγωγικές, μη συνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο, μονάδες. Η άντληση ύδατος με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ανεμογεννήτριες και η ταμίευσή του σε τεχνητές λίμνες κατασκευασμένες σε υψόμετρο το οποίο είναι ικανό να τροφοδοτήσει υδροηλεκτρικό

σταθμό, είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται όταν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι πολύ μεγάλη.

Η χώρα μας διαθέτει αρκετά πλούσιο αιολικό δυναμικό, σε αρκετές περιοχές της Κρήτης, της Πελοποννήσου, της Εύβοιας και φυσικά στα νησιά του Αιγαίου. Σε αυτές τις περιοχές θα συναντήσουμε και τα περισσότερα αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών σε βέλτιστη διάταξη για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.

Η αιολική ενέργεια είναι μία πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η εκμετάλλευση του υψηλού της δυναμικού στη χώρα μας, σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών που ενσωματώνονται στις σύγχρονες αποδοτικές ανεμογεννήτριες, έχει τεράστια σημασία για την βιώσιμη ανάπτυξη, την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, την προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΤΟΜΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Ο λόγος για τον οποίο πολλαπλές εναλλακτικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ερευνώνται αυτή τη χρονική στιγμή, είναι διότι υπάρχει η επιτακτική ανάγκη να συνδυαστούν τρία πράγματα: οι όσο ποτέ άλλοτε αυξανόμενες ανάγκες για ενέργεια στον πλανήτη, με την διαρκή μείωση και εξάντληση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων, και με τους, αυστηρούς πλέον, περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Η αιολική ενέργεια έχει σημαντικό ρόλο σε αυτόν το τομέα και είναι επί του παρόντος, η πιο γρήγορα εξελισσόμενη τεχνολογία παραγωγής εναλλακτικής ενέργειας που έχει εδραιωθεί. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μέχρι το 2030 αναμένεται τουλάχιστον το 20% των ενεργειακών αναγκών των Η.Π.Α. να καλύπτεται από χερσαία ή υπεράκτια αιολικά πάρκα [1,2].

Η αιολική ενέργεια πιστώνεται συνήθως με τα επόμενα βασικά πλεονεκτήματα [3,4,5]:

- Ο άνεμος αποτελεί μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας η οποία μάλιστα παρέχεται δωρεάν.
- Η αιολική ενέργεια είναι μία τεχνολογικά ώριμη, οικονομικά ανταγωνιστική και φιλική προς το περιβάλλον ενεργειακή επιλογή.
- Προστατεύει τη γη, καθώς κάθε μία κιλοβατώρα που παράγεται από τον άνεμο αντικαθιστά μία κιλοβατώρα που παράγεται από συμβατικούς σταθμούς και ρυπαίνει την ατμόσφαιρα με αέρια του θερμοκηπίου.
- Δεν επιβαρύνει το τοπικό περιβάλλον με επικίνδυνους αέριους ρύπους, όπως είναι για παράδειγμα το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου και τα καρκινογόνα σωματίδια, όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την χώρα μας και για την Ευρώπη γενικότερα.
- Βοηθά στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, μειώνοντας έτσι τις απώλειες μεταφοράς ενέργειας.

- Η ένταξη των αιολικών πάρκων στο ήδη υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με μία σχετική ευκολία και αποτελεσματικότητα (σε σχέση πάντα με το κόστος).
- Η αιολική ενέργεια δεν εμποδίζει τις γεωγραφικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες δεδομένου ότι το 99% της γης που φιλοξενεί το αιολικό πάρκο είναι διαθέσιμο για χρήσεις του εδάφους.
- Η αιολική ενέργεια δεν καταστρέφει τα δάση (πάντα βέβαια υπάρχουν και εξαιρέσεις), καθώς τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε ορεινές θέσεις με αραιή ή και καθόλου βλάστηση. Επισημαίνεται ότι η παρουσία υψηλής βλάστησης στην περιοχή (συστάδες δέντρων και δασώδεις εκτάσεις) δεν προσφέρεται για την εγκατάσταση αιολικού πάρκου.
- Παρά την προκατειλημμένη στάση που επικρατεί, διασαφηνίζεται ότι η αιολική ενέργεια ενισχύει τον τουρισμό και αντικαθιστά τις ρυπογόνες μορφές ενέργειας, διαφυλάσσοντας με αυτόν τον τρόπο το φυσικό περιβάλλον.
- Δημιουργούνται θέσεις εργασίας συντελώντας στην ανάπτυξη σε τοπικό επίπεδο. Η συσσωρευμένη εμπειρία της τελευταίας 15ετίας, τόσο διεθνώς (μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση λειτουργούν ήδη πάνω από 33.000MW αιολικών πάρκων), όσο και στην Ελλάδα, όπου λειτουργούν ήδη περίπου 500 αιολικά MW, δείχνει καθαρά ότι η ίδρυση και λειτουργία αιολικών πάρκων εμπορικής κλίμακας δημιουργεί ισχυρούς πόλους τοπικής ανάπτυξης και περιβαλλοντικής αναβάθμισης και παρέχει πολλαπλά, μετρήσιμα και ουσιαστικά οφέλη στις τοπικές κοινωνίες, στις περιοχές των οποίων εγκαθίστανται τα έργα αυτά.
- Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι πολύ ήσυχες. Συγκεκριμένα το επίπεδο της έντασης του ήχου σε απόσταση 40 μέτρων από μία ανεμογεννήτρια είναι της τάξης των 50-60db, το οποίο σημειώνεται ότι είναι αντίστοιχο με την ένταση μιας συζήτησης. Δεδομένης μάλιστα της απαιτούμενης ελάχιστης απόστασης των ανεμογεννητριών από τους γειτονικούς οικισμούς, το επίπεδο αυτό είναι ακόμα χαμηλότερο, της τάξης των 30db.

- Τέλος και ίσως το σημαντικότερο, η αιολική ενέργεια έχει φέρει έναν άνεμο αλλαγής στα ενεργειακά και περιβαλλοντικά δεδομένα όλου του κόσμου, ενώ συγχρόνως δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την οικονομική ανάπτυξη των περιοχών με υψηλό αιολικό δυναμικό και τη διασφάλιση ενός βιώσιμου μέλλοντος για τις επόμενες γενιές.

Η αιολική ενέργεια μέσω των ανεμογεννητριών έχει πολλαπλούς τομείς εφαρμογής. Κατ' εξοχήν ασφαλώς, η εφαρμογή μιας ανεμογεννήτριας είναι η χρήση της μηχανικής ενέργειας του ρότορα για την κίνηση γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το παραγόμενο ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση συσσωρευτών (μικρές μονάδες) ή να διοχετεύεται απ' ευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε στην περίπτωση αυτή γίνεται εξοικονόμηση καυσίμου από τον κεντρικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής.

Χαρακτηριστικά μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- Λειτουργία ανεμογεννήτριας για εξοικονόμηση καυσίμου. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα νησιά όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι, και το κόστος της παραγόμενης κιλοβατώρας είναι υψηλό λόγω του αυξημένου κόστους του καυσίμου εξαιτίας της θαλάσσιας μεταφοράς.
- Λειτουργία ανεμογεννήτριας ως σταθμού βάσης, θεωρώντας ότι η εγκατεστημένη ισχύς της Diesel μειώνεται κατά ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας.
- Λειτουργία ως αντλητικού σταθμού για αποθήκευση νερού και χρησιμοποίησή του στην υδροηλεκτρική εκμετάλλευση.

Μια πιο μοντέρνα παραλλαγή εφαρμογής άντλησης είναι το σύστημα άντλησης με ανεμόμυλους που σχεδιάστηκε στον Καναδά με σκοπό την άντληση νερού και κατόπιν την, με μεγάλη πίεση, εκτόξευσή του ως τεχνητή βροχή για πότισμα. Στις εφαρμογές άντλησης μπορούν να αναφερθούν και σύγχρονα συστήματα αφαλάτωσης (*desalination*) στα οποία η ανεμογεννήτρια μέσω αντλιών προωθεί (υπόγλυκο - θαλασσινό) νερό δια μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης (*osmosis*) και παράγει πόσιμο νερό. Εκτός των αυτόνομων αυτών μονάδων στις εφαρμογές άντλησης, τον τελευταίο καιρό πολλά πειραματικά κέντρα

μελετούν την συνεργασία αιολικών συστημάτων με ντιζελοκίνητες ή ηλεκτροκίνητες μονάδες άντλησης με σκοπό την εξοικονόμηση καυσίμου. Από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα προκύπτει ότι υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Τέλος, μελετάται η συνεργασία αιολικών μηχανών και μικρών υδροστρόβιλων για τη δημιουργία αυτόνομων υδροηλεκτρικών σταθμών. Στην περίπτωση αυτή οι ανεμογεννήτριες θα προωθούν νερό στον ταμιευτήρα υψηλής ενεργειακής στάθμης απ' όπου και όταν απαιτείται, θα τροφοδοτείται ο υδροστρόβιλος του σταθμού. Το ενεργειακό αυτό σχέδιο είναι ελκυστικό, δεδομένου ότι λύνει το πρόβλημα της αποθήκευσης της ενέργειας, ενώ παρέχει συγχρόνως αυτονομία.

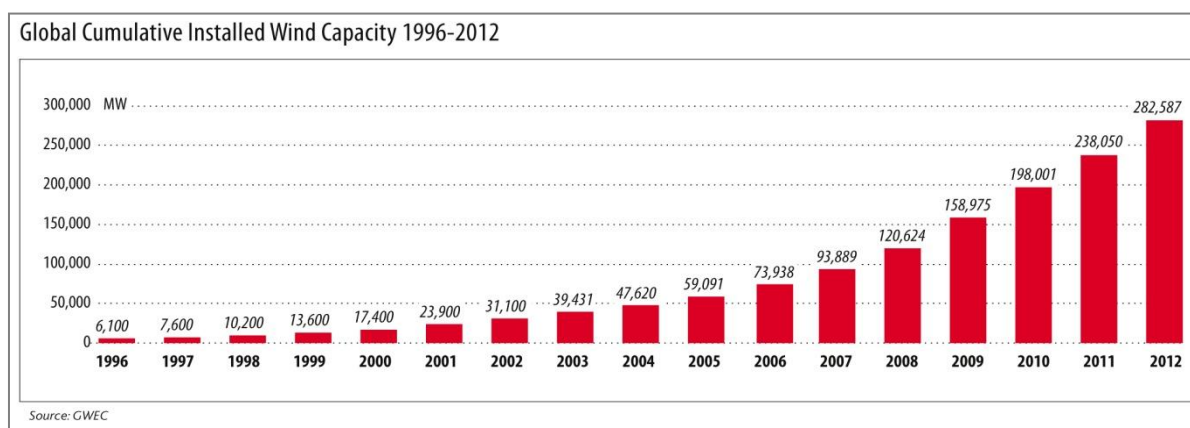
Σχετικά με τις εφαρμογές θερμότητας, η μηχανική κίνηση που παράγεται από την ενέργεια του ανέμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί απ' ευθείας στην παραγωγή θερμότητας είτε με την τριβή μεταξύ των στερεών, είτε με κατάθλιψη υγρών. Η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρων, θερμοκηπίων, στη βιομηχανία, στην αποξήρανση γεωργικών προϊόντων κ.ά.

Μία άλλη δυνατότητα με πολύ καλές προοπτικές είναι η χρήση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για ηλεκτρόλυση νερού και η αποθήκευση του παραγόμενου υδρογόνου. Το υδρογόνο θα μπορούσε να μεταφερθεί σε άλλες θέσεις για καύση (π.χ. κινητήρες αυτοκινήτων) με προϊόν καύσης το νερό [6].

Συμπερασματικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι τομείς εφαρμογής των ανεμογεννητριών και γενικότερα της αιολικής ενέργειας, αποκτούν μέρα με τη μέρα όλο και περισσότερη σημασία, εξαιτίας της αυξανόμενης ζήτησης για ενίσχυση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω παραγόντων όπως η κλιματική αλλαγή, η εξάντληση των πόρων καυσίμου και η ενεργειακή ασφάλεια. Η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας κατέχει ένα ρόλο "κλειδί" σε αυτή τη στροφή προς την "πράσινη" παραγωγή ενέργειας και είναι επί του παρόντος ο ταχύτερα αναπτυσσόμενος τομέας. Για αυτόν το λόγο, μία αξιοσημείωτη ποσότητα πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας, θα παραχθεί μελλοντικά από χερσαία και υπεράκτια αιολικά ενεργειακά πεδία .

1.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ

Τα πρώτα δείγματα ηλεκτροπαραγωγής από αιολική ενέργεια εμφανίστηκαν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, όμως από το 1980 και μετά η τεχνολογία άρχισε να εξελίσσεται σε τέτοιο βαθμό που να μπορεί να υποστηρίξει ηλεκτροπαραγωγή σε υψηλή κλίμακα. Μέχρι το 2012 ο μέσος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας στην τελευταία δεκαετία ήταν περίπου 24%, με 282.587MW εγκατεστημένη ισχύ στο τέλος του 2012 [7].



Διάγραμμα 1.1 Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας 1996-2012

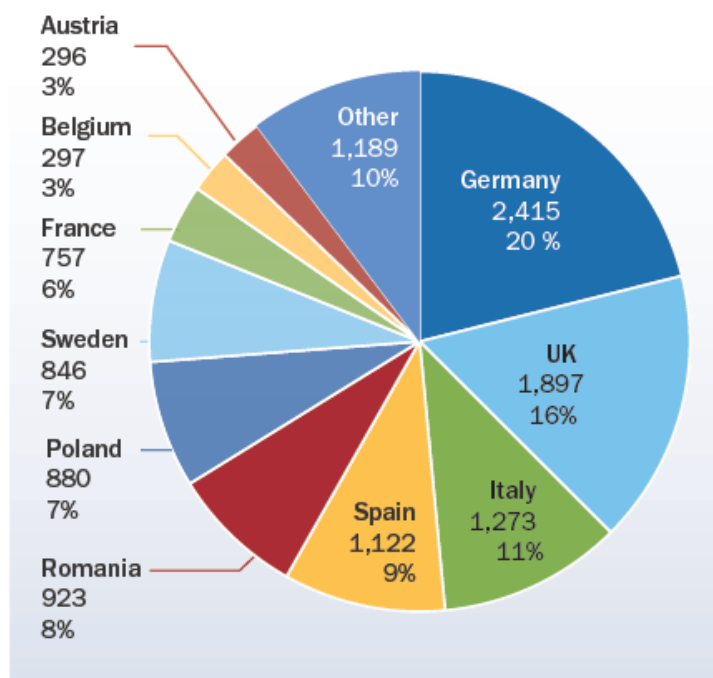
Σε γενικές γραμμές, ο σκοπός ενός επενδυτή σε αιολικά πάρκα είναι η μεγιστοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής και ταυτόχρονα η ελαχιστοποίηση των εξόδων της παραγωγικής διαδικασίας, όπως επίσης και οι μειωμένες περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιδράσεις. Σημαντικοί παράγοντες είναι η δυνατότητα διείσδυσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο, όπως επίσης τα κίνητρα που προσφέρονται από την πολιτεία σε μορφή νομοθεσίας.

Τα κίνητρα στην Ευρωπαϊκή Ένωση μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο οικονομικά συστήματα που υποστηρίζουν τις επενδύσεις σε αιολική ενέργεια. Τα συστήματα σταθερής τιμής (*Fixed Price*) και τα συστήματα σταθερής ποσότητας (*Fixed Quantity*). Στην πρώτη κατηγορία ανήκει το *feed-in model*, όπου ο διαχειριστής του δικτύου εγγυάται μία ελάχιστη τιμή αγοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται σε Γερμανία, Δανία και Ισπανία. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκει το σύστημα «Πράσινων πιστοποιητικών» όπου ορίζεται ενεργειακός στόχος παραγωγής ηλεκτρισμού από αιολική ενέργεια και εκδίδονται πιστοποιητικά για κάθε μονάδα αιολικής ενέργειας που παράγεται

για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος. Τα πιστοποιητικά αυτά είναι εμπορεύσιμα στη διεθνή αγορά πιστοποιητικών.

Μέσα στο 2012 εγκαταστάθηκαν 12.744MW αιολικής ενέργειας σε όλη την Ευρώπη, εκ των οποίων τα 11.895MW ήταν στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Από αυτή την εγκατεστημένη ισχύ, τα 10.729MW βρίσκονται στη ξηρά ενώ τα 1.166MW αποτελούν υπεράκτια αιολικά πάρκα (*offshore*). Η Ευρωπαϊκή επενδυτική δραστηριότητα στα αιολικά πάρκα, κυμάνθηκε από €12.8δισ. έως €17.2δισ. Τα χερσαία αιολικά πάρκα προσέλκυσαν περίπου το 73% των επενδύσεων, με τους υπόλοιπους επενδυτές να στρέφονται στα υπεράκτια.

Σε όρους ετήσιων εγκαταστάσεων, η Γερμανία ήταν πρωταθλήτρια το 2012 με ισχύ 2.415MW (όλα εντός του έτους), το 3,3% των οποίων προήλθαν από παράκτια πάρκα. Δεύτερο σε ισχύ ήταν το Ηνωμένο Βασίλειο με 1.897MW (45% παράκτια) και ακολούθησαν η Ιταλία με 1.273MW, η Ισπανία με 1.122MW, η Ρουμανία με 923MW, η Πολωνία με 880MW, η Σουηδία με 845MW και η Γαλλία με 757MW.



Διάγραμμα 1.2 Εγκατεστημένη ισχύς των μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξολοκλήρου εντός του 2012 (MW, συνολικά: 11.566MW)

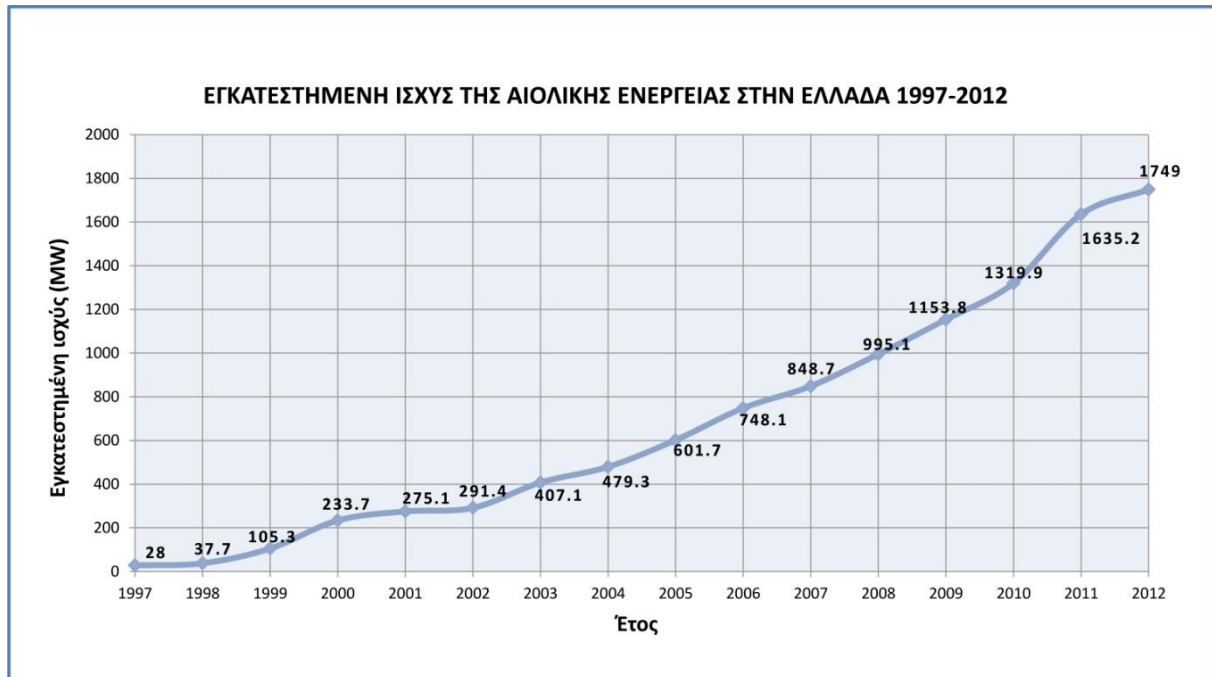
Ανάμεσα στις αναδυόμενες αγορές της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης, η Ρουμανία και η Πολωνία έκαναν ρεκόρ εντός του προηγούμενου έτους, αφού μαζί εγκατέστησαν περίπου το 7.5% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Και οι δύο αγορές είναι πλέον σταθερά στις 10 πρώτες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όσον αφορά τις ετήσιες επενδύσεις και εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων.

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθούν τα μεγέθη των εγκαταστάσεων στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Ιταλία και την Σουηδία. Οι τρεις αυτές αγορές αντιπροσωπεύουν το 16%, 11% και 7% του συνόλου των εγκαταστάσεων στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2012. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αποτελούν περίπου το 10% του συνόλου των εγκαταστάσεων το 2012, μία ποσοστιαία μονάδα παραπάνω από ότι το 2011.



Εικόνα 1.3 Χερσαίο αιολικό πάρκο στο Ηνωμένο Βασίλειο

Στην Ελλάδα η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας αντιμετωπίζει μέχρι τώρα αρκετά προβλήματα, τα οποία έχουν ενταθεί λόγω της παγκόσμιας και εγχώριας οικονομικής κρίσης. Παρά τη σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος τα προηγούμενα χρόνια, είναι κοινά αποδεκτό ότι αυτή η αύξηση είναι πολύ μικρή δεδομένου του πλούσιου αιολικού δυναμικού της χώρας μας.



Διάγραμμα 1.4 Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα 1997-2012

Κύριος λόγος για τη μικρή ανάπτυξη μέχρι το 2011 ήταν το νομοθετικό καθεστώς και το μονοπωλιακό μοντέλο της οικονομίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μετά τις νομοθετικές αλλαγές στον χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η κατάσταση βελτιώθηκε σημαντικά. Η Ελλάδα εφαρμόζει το σύστημα *feed-in* και η νομοθεσία προσφέρει επιπλέον αρκετά ικανοποιητικά κίνητρα για τους επενδυτές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το αυξημένο ενδιαφέρον των επενδυτών για ανάπτυξη πολλών MW αιολικής ενέργειας. Όμως το επενδυτικό ενδιαφέρον είναι φανερό ότι δεν είναι αρκετό. Χαρακτηριστικά, ο στόχος της χώρας μας για το 2010 ως προς την ηλεκτροπαραγωγή από αιολική ενέργεια ήταν η εγκατεστημένη ισχύς να φτάσει περίπου τα 3500MW ενώ στο τέλος του 2010 η πραγματικά

εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε μόλις στα 1320MW [8]. Είναι φανερό ότι σε μία χώρα για την οποία υπάρχει στόχος και καλή θέληση ενώ και οι επενδυτικές προτάσεις δεν είναι λίγες, η ανάπτυξη των αιολικών πάρκων καθυστερεί σημαντικά, με αποτέλεσμα ο στόχος να έχει πλέον μετατεθεί για το 2020 με εγκατεστημένη ισχύ που θα πρέπει να φθάσει περίπου τα 7500MW. Οι προβλέψεις μέχρι τώρα δεν είναι ευοίωνες, οι καθυστερήσεις στην έκδοση αδειών παραγωγής και εγκατάστασης είναι σημαντικές και οι προβλέψεις είναι συγκρατημένες.

Κύριοι λόγοι για αυτές τις καθυστερήσεις είναι η -τουλάχιστον μέχρι το 2009- μακροσκελής και περίπλοκη αδειοδοτική διαδικασία, η αδυναμία του δικτύου σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. Εύβοια, Κρήτη) να υποστηρίξει επιπλέον εγκατεστημένη ισχύ, οι αντιδράσεις των κατοίκων κυρίως για θέματα οπτικής όχλησης και η έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού. Τα παραπάνω προβλήματα έχουν τεθεί υπό συζήτηση και έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες για την επίλυσή τους, όπως η δημιουργία, αρχικά, του νόμου 3468/2006, ο οποίος απλοποίησε κατά ένα μέρος τον τρόπο λήψης άδειας παραγωγής και σε δεύτερη φάση, του νόμου 3851/2010 ο οποίος έχει επιταχύνει σημαντικά την αδειοδοτική διαδικασία (ιδιαίτερα στο τμήμα της περιβαλλοντικής αδειοδότησης), χωρίς όμως να λείπουν και σε αυτή τη περίπτωση κενά ή αντικρουόμενες αρμοδιότητες μεταξύ κρατικών φορέων. Επίσης έχουν δρομολογηθεί επεκτάσεις και ενισχύσεις του δικτύου μεταφοράς ρεύματος, ένα έργο το οποίο ενδέχεται να βοηθήσει μακροπρόθεσμα και την αδειοδότηση αλλά και την γρήγορη εισαγωγή των έργων αιολικής ενέργειας στο δίκτυο. Τα προβλήματα των κοινωνικών αντιδράσεων, εφόσον αυτά οφείλονται σε οπτική όχληση από την ύπαρξη των ανεμογεννητριών είναι πάντα δύσκολο να αντιμετωπιστούν, υπό την έννοια ότι το αν σε κάποιον αρέσει ή όχι η όψη μίας ανεμογεννήτριας είναι κάτι το υποκειμενικό. Είναι βέβαιο όμως ότι ένας επενδυτής ο οποίος θα σχεδιάσει και θα τοποθετήσει τις ανεμογεννήτριες, αποφεύγοντας τις υπερβολές και τις μαζικές παρεμβάσεις στο τοπίο μίας περιοχής και με κατανόηση στις ιδιαιτερότητες των τοπικών κοινωνιών, θα αντιμετωπίσει και τα λιγότερα προβλήματα.

Το θέμα του χωροταξικού σχεδιασμού οριοθετείται από το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού για τις ΑΠΕ το οποίο από τις αρχές του Δεκέμβρη του 2008 βρίσκεται σε εφαρμογή και έχει ενταχθεί στην αδειοδοτική διαδικασία των αιολικών πάρκων.

Στο ήδη προβληματικό περιβάλλον που περιγράφηκε για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα έχει προστεθεί το θέμα της οικονομικής κρίσης, η οποία έχει δημιουργήσει προβλήματα στη χρηματοδότηση των υπό ανάπτυξη έργων, με αποτέλεσμα την καθυστέρησή τους και σε βάθος χρόνου, τη ματαίωσή τους.



Εικόνα 1.5 Ανεμογεννήτριες στην περιοχή της Εύβοιας

1.4 ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Η εγκατεστημένη ισχύς λόγω ανεμογεννητριών στην Ευρώπη το 2012, εκτιμάται ότι θα αποφέρει 231 TWh (τεραβατώρες) ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα έτος, με φυσιολογικές συνθήκες ανέμου. Η ποσότητα αυτή αντιπροσωπεύει το 7% της ετήσιας, ακαθάριστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Τα κράτη τα οποία έχουν τα μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό τους δίκτυο και την μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενη από αιολικά πάρκα είναι κατά σειρά: η Δανία (27,1%), η Πορτογαλία (16,8%), η Ισπανία (16,3%), η Ιρλανδία (12,7%) και η Γερμανία (10,8%). Από τα νεότερα κράτη - μέλη, η Ρουμανία έχει το υψηλότερο ποσοστό διείσδυσης αιολικής ενέργειας με 6,9% [7].

Παρά την αύξηση των ετήσιων εγκαταστάσεων το 2012 και παρά το ότι η συνολική ετήσια αιολική ισχύς έφθασε τα 106GW, η αιολική ενέργεια έμεινε αρκετά πίσω στους στόχους τους οποίους έθεσαν τα ίδια τα κράτη - μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης στα Εθνικά Σχέδια Δράσης Ανανεώσιμων Πηγών (*National Renewable Energy Action Plans – NREAPs*). Ο Πίνακας 1.6 παραθέτει την σύγκριση των στόχων που είχαν τεθεί με την ισχύ που εγκαταστήθηκε στην πραγματικότητα από τις διάφορες χώρες. Ο πίνακας βέβαια δεν λαμβάνει υπόψιν ότι στη πορεία του έτους πιθανότατα υπήρξαν αλλαγές των επιδιώξεων.

Πιο συγκεκριμένα, 18 κράτη μέλη δεν μπόρεσαν να ακολουθήσουν την τροχιά που είχαν χαράξει στον προγραμματισμό τους. Περισσότερο πίσω από τους στόχους τους έμειναν η Σλοβακία (-147MW, -98%), η Ελλάδα (-772MW, -30,6%), η Τσεχία (-83MW, -24,2%), η Ουγγαρία (-116MW, -26,1%), η Πορτογαλία (-1.075MW, -19%) και η Γαλλία (-701MW, -8,5%). Αντιθέτως, τα εναπομείναντα κράτη - μέλη έχουν ξεπεράσει τους στόχους που έθεσαν. Πιο αξιοσημείωτη περίπτωση είναι αυτή της Σουηδίας με 1.336MW περισσότερα από το προβλεπόμενο (+55%).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση σε γενικότερα πλαίσια στερείται των στόχων κατά σχεδόν 1,6GW (-1,5%). Στον πίνακα φαίνεται επίσης ότι η μεγαλύτερη απόκλιση από τους στόχους συμβαίνει στα υπεράκτια αιολικά πάρκα με έλλειμμα -836MW (-14%). Παρόλα αυτά το 2012 οι εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων ήταν περισσότερες από αυτές που εκτιμούσε ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (*European Wind Energy Association – EWEA*) το

2009 (εκτίμηση σε βάθος τριετίας). Ειδικά τα χερσαία αιολικά πάρκα είχαν μεγαλύτερη ανάπτυξη από την εκτιμώμενη κατά 3.048MW (+3%). Τα υπεράκτια είναι κατώτερα των προσδοκιών κατά 307MW (-6%).

	Χερσαία 2012		Υπεράκτια 2012		Σύνολο 2012		Διαφορά 2012			
	Στόχοι	Επιτ/ξη	Στόχοι	Επιτ/ξη	Στόχοι	Επιτ/ξη	Χερσαία	Υπ/τια	Σύνολο	
Αυστρία	1.435	1.378	0	0	1.435	1.378	-57	0	-57	4%
Βέλγιο	720	996	503	380	1.223	1.375	276	-124	152	12,5%
Βουλγαρία	451	684	0	0	451	684	233	0	233	51,7%
Κύπρος	114	147	0	0	114	147	33	0	33	28,9%
Τσεχία	343	260	0	0	343	260	-83	0	-83	-24,2%
Δανία	2.985	3.241	856	921	3.841	4.162	256	65	321	8,4%
Εσθονία	311	269	0	0	311	269	-42	0	-42	-13,5%
Φιλανδία	380	262	0	26	380	288	-118	26	-92	-24,2%
Γαλλία	7.598	7.564	667	0	8.265	7.564	-34	-667	-701	-8,5%
Γερμανία	30.566	31.027	792	280	31.358	31.307	461	-512	-51	-0,2%
Ελλάδα	2.521	1.749	0	0	2.521	1.749	-772	0	-772	-30,6%
Ουγγαρία	445	329	0	0	445	329	-116	0	-116	-26,1%
Ιρλανδία	2.334	1.713	36	25	2.370	1.738	-621	-11	-632	-26,7%
Ιταλία	7.040	8.144	0	0	7.044	8.144	1.104	0	1.104	15,7%
Λετονία	49	68	0	0	49	68	19	0	19	38,8%
Λιθουανία	250	225	0	0	250	225	-25	0	-25	-10%
Λουξεμβ/γο	54	45	0	0	54	45	-9	0	-9	-16,7%
Μάλτα	2	0	0	0	2	0	-2	0	-2	-100%
Ολλανδία	2.727	2.144	228	247	2.955	2.391	-583	19	-564	-19,1%
Πολωνία	2.010	2.497	0	0	2.010	2.497	487	0	487	24,2%
Πορτογαλία	5.600	4.523	0	2	5.600	4.525	-1.077	2	-1.075	-19,2%
Ρουμανία	1.850	1.905	0	0	1.850	1.905	55	0	55	3%
Σλοβακία	150	3	0	0	150	3	-147	0	-147	-98%
Σλοβενία	2	0	0	0	2	0	-2	0	-2	-100%
Ισπανία	23.555	22.796	0	0	23.555	22.796	-707	0	-707	-3,2%
Σουηδία	2.311	3.582	97	164	2.408	3.745	1.269	67	1.336	55,6%
Ην.Βασίλειο	5.970	5.497	2.650	2.948	8.620	8.445	-473	298	-175	-2%
ΕΕ - 27	101.773	101.048	5.829	4.993	107.602	106.041	-725	-836	-1.561	-1,5%
EWEA-2009		98.000		5.300		103.300				
Διαφορά		3.048		-307		2.741				

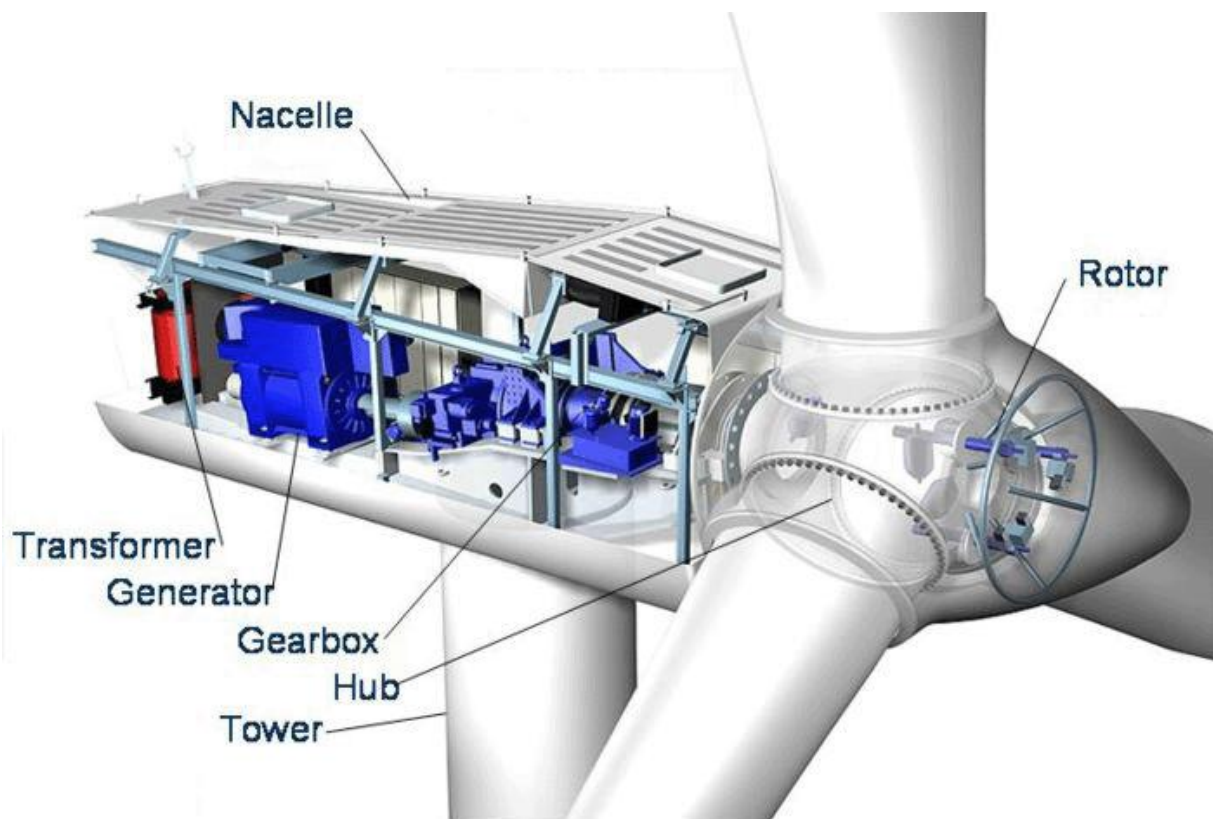
Πίνακας 1.6 Στόχοι των σχεδίων δράσης Ε.Ε. για την αιολική ενέργεια και πραγματικότητα (2012)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑ

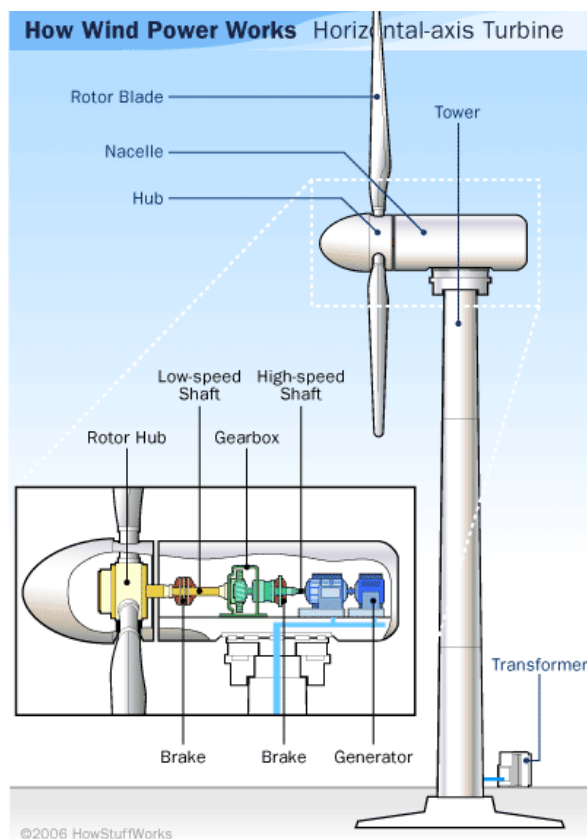
2.1 ΤΜΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΣ

Οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται σε πολλά διαφορετικά μεγέθη και σχηματισμούς και χρησιμοποιείται για αυτές μεγάλο εύρος υλικών. Σε πολύ απλούς όρους, θα μπορούσαμε να πούμε ότι μία ανεμογεννήτρια αποτελείται από έναν ρότορα (*rotor*) (Εικόνα 2.1), ο οποίος έχει πτερύγια με αεροδυναμικό σχεδιασμό (*blades*) συνδεδεμένα στο κέντρο του άξονα του (*hub*). Ακόμη υπάρχει η άτρακτος (*nacelle*) η οποία στεγάζει το σύνολο των στοιχείων που παράγουν ενέργεια, το οποίο αποτελείται από ένα κιβώτιο ταχυτήτων (*gearbox*), διάφορους άξονες σύνδεσης (*connecting shafts*), έδρανα στήριξης (*support bearings*), την γεννήτρια (*generator*) και επιπλέον μηχανισμούς όπως ανεμοδείκτες, κίνηση εκτροπής, συστήματα ελέγχου και άλλα. Όλα αυτά στηρίζονται πάνω στον πύργο (*tower*) ο οποίος έχει ηλεκτρικό εξοπλισμό και στο σημείο επαφής με το έδαφος [5]. Τα πτερύγια του ρότορα, στην πραγματικότητα «μαζεύουν» την ενέργεια από το ρεύμα του αέρα. Ο ρότορας μετατρέπει την κινητική ενέργεια του αέρα σε ενέργεια εκ περιστροφής που εκπέμπεται στην γεννήτρια μέσω του μηχανισμού που περιέχεται εντός της άτρακτου. Στις Εικόνες 2.1 και 2.2 είναι εμφανή τα βασικά χαρακτηριστικά μιας τυπικής, μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριας.

Κυρίως εξ αιτίας οικονομικών λόγων, οι ανεμογεννήτριες έχουν μεγαλώσει αρκετά σε μέγεθος τα τελευταία 30 χρόνια. Και αυτό έχει συμβεί διότι η ταχύτητα του ανέμου και συνεπώς η αιολική ενέργεια που λαμβάνεται, αυξάνεται με το υψόμετρο. Οπότε όσο πιο μεγάλη η ανεμογεννήτρια, τόσο μεγαλύτερη και η απόδοση. Το γεγονός αυτό ελαττώνει τον αριθμό των μεμονωμένων μονάδων σε ένα αιολικό πάρκο. Άρα μειώνεται και το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του πάρκου. Είναι ενδεικτικό ότι το 1980, στις πρώτες σύγχρονες ανεμογεννήτριες η διάμετρος του ρότορα ήταν περίπου 15m με ισχύ 50kW, ενώ η μεγαλύτερη μονάδα που βρίσκεται σε χρήση σήμερα, κυμαίνεται στα 200m και από 8.000 μέχρι 12.000kW αντίστοιχα [9].



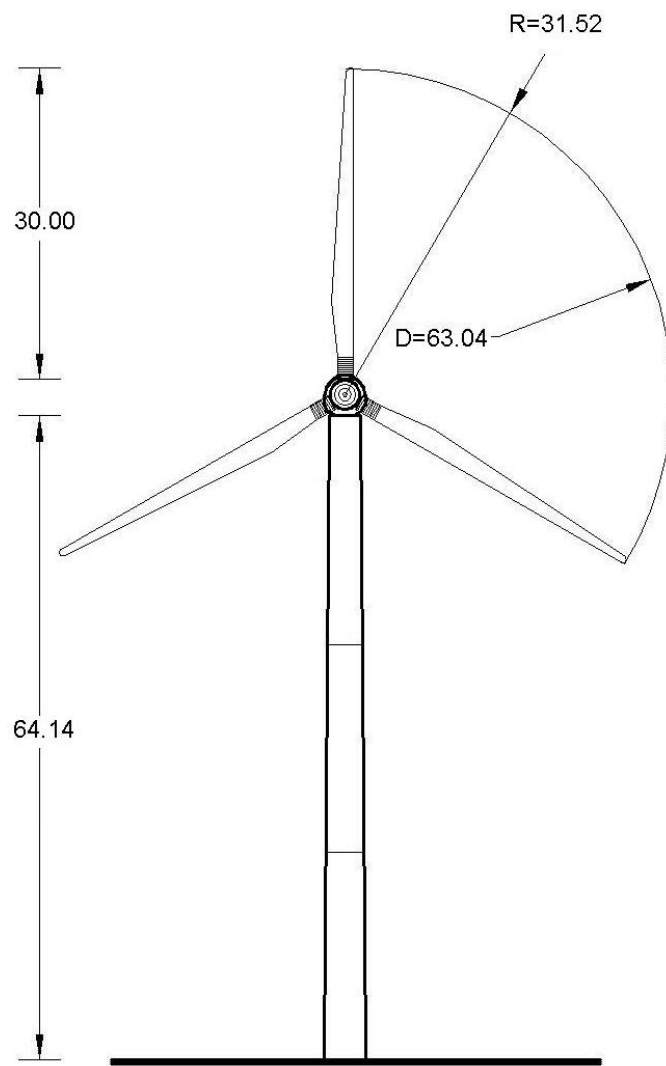
Εικόνα 2.1 Τα μέρη μίας ανεμογεννήτριας



Εικόνα 2.2 Η βασική δομή μίας ανεμογεννήτριας

Από την άλλη μεριά, όσο το μέγεθος του ρότορα σε μια ανεμογεννήτρια μεγαλώνει ανεβαίνουν και οι απαιτήσεις. Τόσο σε κατασκευαστικό επίπεδο αλλά και σε επίπεδο προσδοκιών και απόδοσης. Μέχρι στιγμής δεν έχει ξεκαθαριστεί ποια είναι η βέλτιστη διάμετρος ρότορα που μπορεί να επιτευχθεί με τις παρούσες κατασκευαστικές τεχνολογίες. Είναι πολλές και σύνθετες οι προδιαγραφές που θα πρέπει να τηρεί η ανεμογεννήτρια και αυτό είναι που κάνει πιο δύσκολη την εύρεση της βέλτιστης διαμέτρου, άρα και του μεγέθους γενικότερα. Ο αέρας σαν δυναμική φόρτιση που είναι, συχνά έχει ακραία συμπεριφορά με ξαφνικούς, μεγάλης έντασης, ανέμους. Επίσης είναι απαραίτητο να διατηρείται η δυσκαμψία του πτερυγίου (για να υπάρχει πάντα μία ελάχιστη απόσταση από την άκρη του μέχρι το αντίστοιχο σημείο του πύργου) και βέβαια να προβλέπεται μία διάρκεια ζωής τουλάχιστον 20 έτη, λόγω της καταπόνησης των διαφορετικών φορτίων που επιδρούν, αλλά και των καιρικών συνθηκών (μέσα στα φορτία συμπεριλαμβάνεται και το βάρος των πτερυγίων, αφού η μάζα ενός πτερυγίου 62m μπορεί να φτάσει μέχρι και 18tn). Όλα αυτά συναινούν στο να είναι η ανάπτυξη και η κατασκευή μιας αξιόπιστης ανεμογεννήτριας ένα δύσκολο έργο που απαιτεί λεπτομερή θεωρητική και πειραματική μελέτη [10].

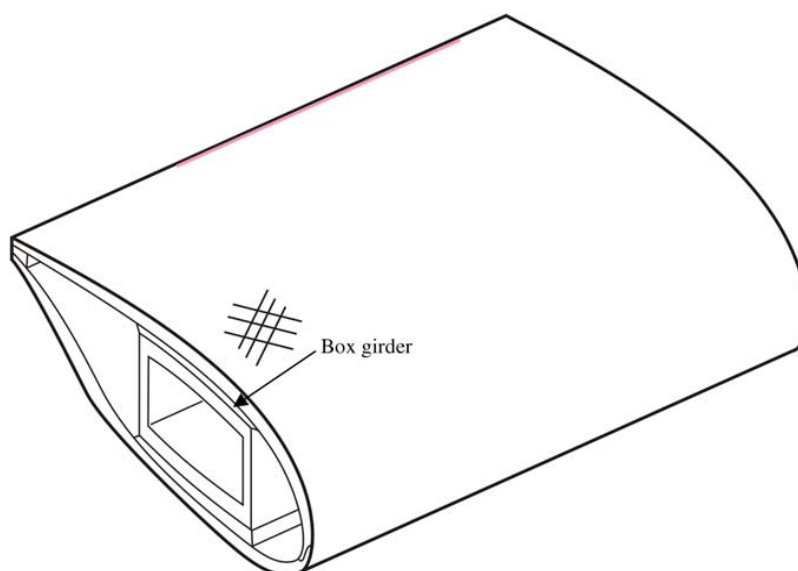
Αναφορικά με τις διαστάσεις της ανεμογεννήτριας, ας θεωρήσουμε κατ' αρχάς μία ανεμογεννήτρια ισχύος 1MW, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3. Το ύψος του πύργου στο παρελθόν είχε ένα εύρος από 20m μέχρι 50m, σαφώς μικρό για τα σημερινά δεδομένα. Το βασικό στοιχείο, που έχει μείνει αναλλοίωτο, είναι ότι ο πύργος κατασκευάζεται πάντα ελαφρώς υψηλότερος από την διάμετρο του ρότορα. Στην δική μας περίπτωση μπορούμε να διακρίνουμε πως ο πύργος έχει ύψος 64.14m, με την διάμετρο του να φθάνει τα 63.04m. Συνεπώς έχουμε μήκος πτερυγίου, από τον κεντρικό άξονα περιστροφής (*hub*) μέχρι την άκρη του πτερυγίου, που ισούται με 30m.



Σχήμα 2.3 Διαστάσεις της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας (ισχύς: 1MW)

2.2 ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΤΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

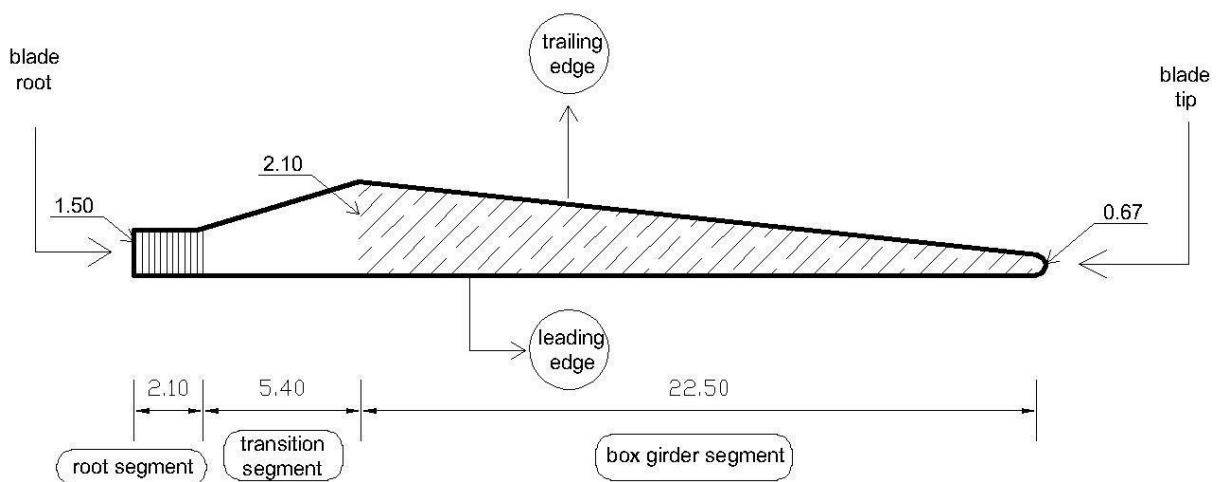
Τα πτερύγια είναι ίσως τα πιο κρίσιμα δομικά συστατικά στον σχεδιασμό μιας μοντέρνας ανεμογεννήτριας. Το πτερύγιο είναι ουσιαστικά μία δοκός (με στατικό προσομοίωμα προβόλου) που στηρίζεται στον περιστρεφόμενο άξονα του ρότορα. Το αεροδυναμικό σχήμα του πτερυγίου επιτυγχάνεται με την βοήθεια ξεχωριστών συνθετικών στρωμάτων, κολλημένων μεταξύ τους (*outer-shells*). Για να μειώνονται οι ροπές κάμψης στο τμήμα του πτερυγίου που είναι μακριά από τον κεντρικό άξονα, το σχήμα που επιλέγεται είναι κωνικό (*tapered*). Ο κωνικός σχεδιασμός περιλαμβάνει όχι μόνο την διατομή αλλά και το πάχος του κελύφους (Σχήμα 2.4). Αυτό εξασφαλίζει ότι τα διάφορα κατά μήκος τμήματα του πτερυγίου θα υφίστανται συγκρίσιμες μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις [11].



Σχήμα 2.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση πτερυγίου

Επιπλέον στα πτερύγια υπάρχει και το πρόβλημα της στρόφης σε σχέση με τη βάση, σε όλο το μήκος τους. Η στρόφη έχει πλεονεκτήματα όσον αφορά την αυτο-εκκίνηση του ρότορα. Επίσης, με τον συνδυασμό των φαινομένων κάμψης και στρέψης που αναπτύσσονται, βοηθά στην βελτίωση της αποδοτικότητας για την άντληση της ενέργειας.

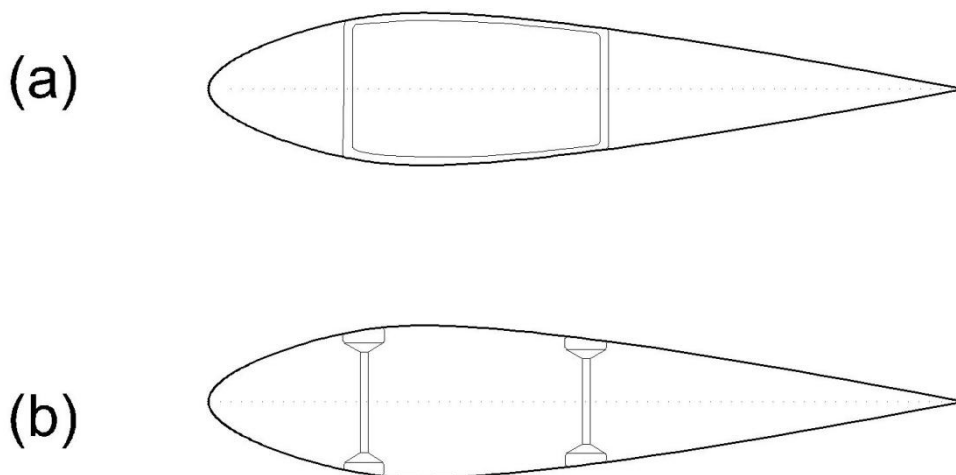
Το πτερύγιο θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρία τμήματα, ανάλογα με την παραμόρφωση που υφίσταται υπό την καταπόνηση των φορτίων. Μετρώντας από την στήριξή του (*root*), στα 2.1m και στα 5.4m έχουμε το τμήμα της βάσης (*root segment*) και το τμήμα “μετάβασης” (*transition segment*) αντίστοιχα και αμέσως μετά, το κυρίως τμήμα όπου βρίσκονται οι εσωτερικές στηρίξεις του πτερυγίου (*box girder segment*) (Σχήμα 2.5, το γραμμοσκιασμένο κομμάτι). Το κάτω μέρος του πτερυγίου καλείται *leading edge*, ενώ το επάνω *trailing edge* (το πρώτο προηγείται και το δεύτερο έπεται καθώς γυρίζει ο ρότορας). Η πλατιά πλευρά τοποθετείται κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου και γενικότερα είναι απαραίτητο για την βέλτιστη απόδοση, να τοποθετηθεί το πτερύγιο έτσι ώστε οι πλευρές με το μεγαλύτερο πλάτος να είναι παράλληλες με το επίπεδο περιστροφής του ρότορα. Στο Σχήμα 2.5 αναγράφονται επίσης και τα μήκη των χορδών σε τρία σημεία (διατομές) του πτερυγίου (στη βάση, στην άκρη και στο τέλος του τμήματος μετάβασης) [12].



Σχήμα 2.5 Διαχωρισμός του πτερυγίου κατά μήκος σε τμήματα

2.3 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Εξίσου σημαντικός και απαιτητικός είναι ο σχεδιασμός στο εσωτερικό μέρος του πτερυγίου. Υπάρχουν επί του παρόντος δύο κυρίαρχες περιπτώσεις σχεδιασμού: (i) η κατασκευή που αποτελείται από ένα ενιαίο μέρος στο εσωτερικό του πτερυγίου (*one-piece construction*) (Σχήμα 2.6a) και (ii) αυτή που αποτελείται αντίστοιχα από δύο (*two-piece construction*) (Σχήμα 2.6b). Οι δύο αυτές κατασκευές διαφέρουν όσον αφορά τον σχεδιασμό και τον τρόπο συγκόλλησης της εσωτερικής κατασκευής που δέχεται την φόρτιση. Η κατασκευή αυτή απλώνεται σχεδόν σε όλο το μήκος του πτερυγίου όπως μπορούμε να αντιληφθούμε και από το Σχήμα 2.5 (τμήμα στηρίξεως).

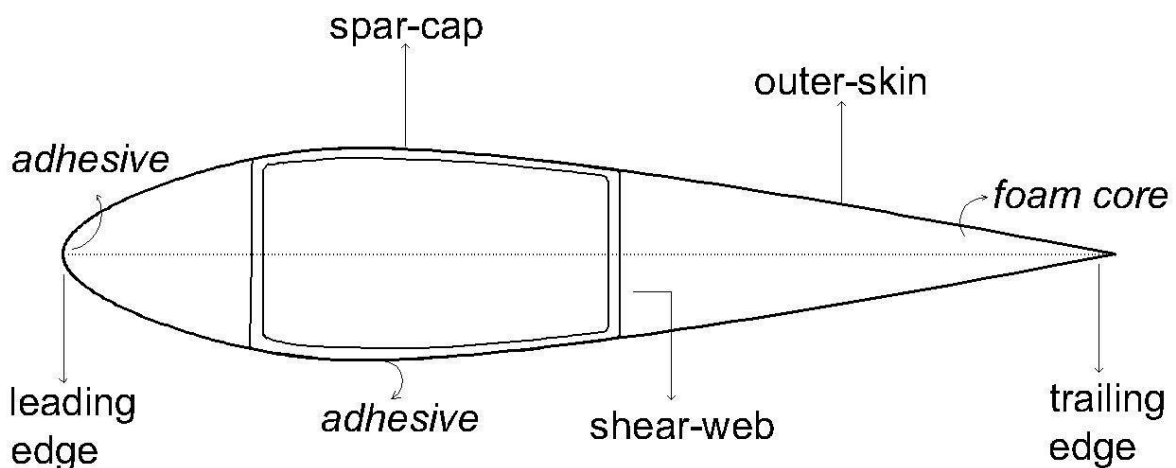


Σχήμα 2.6 Περιπτώσεις εσωτερικών στηρίξεων πτερυγίου

Στην περίπτωση του *one-piece construction* η στήριξη αποτελείται από ένα κλειστό, τετραγωνικό κουτί (*box girder*) το οποίο είναι κολλημένο στο επάνω και στο κάτω μέρος του κελύφους. Το κουτί στηρίξεως ήταν συνήθως χαλύβδινο στο παρελθόν. Χρησιμοποιείται σχετικά αδύναμη κόλλα (π.χ. πολυουρεθάνη) αφού οι τάσεις που μεταφέρονται από τα εξωτερικά περιβλήματα του κελύφους είναι χαμηλές σε μέγεθος. Μια τέτοια περίπτωση απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4 και με αυτήν θα ασχοληθούμε στην συνέχεια.

Στην περίπτωση του *two-piece construction*, η κατασκευή αποτελείται από δύο ενισχυμένες σε διάτμηση επιφάνειες, επίσης κολλημένες στις επιφάνειες του κελύφους. Όμως εδώ, οι κόλλες πρέπει να μεταφέρουν τις τάσεις ανάμεσα στις δύο επιφάνειες αλλά και ανάμεσα στα περιβλήματα και τις επιφάνειες. Συνεπώς πρέπει να χρησιμοποιηθεί ισχυρότερη κόλλα, όπως εποξειδική ρητίνη [11].

Αν μελετήσουμε λίγο πιο αναλυτικά την διατομή του πτερυγίου για την *one-piece construction* περίπτωση (Σχήμα 2.7), παρατηρούμε την εσωτερική κατασκευή στηρίξεως με δοκούς (στην πραγματικότητα επιφάνειες) σε σχήμα κουτιού (*box-shape spar*). Οι δύο δοκοί που βρίσκονται κάθετα στη διατομή, ονομάζονται ιστοί διάτμησης (*shear-webs*) και τοποθετούνται σε αποστάσεις ίσες με το 15% και 50% του μήκους της χορδής που απεικονίζεται στο σχήμα με την διακεκομμένη γραμμή, όπως μετριέται από το *leading edge* του πτερυγίου. Τα δύο αυτά *shear-webs* συνδέονται μεταξύ τους με δύο άλλες δοκούς, που ονομάζονται *spar-caps* ή *flanges*. Το πάχος των *spar-caps* είναι μεγαλύτερο από αυτό των *shear-webs*. Όλες οι διαστάσεις και σχεδιαστικές λεπτομέρειες του πτερυγίου που εξετάζεται ανήκουν στην κατηγορία αεροδυναμικών πτερυγίων S818 (*airfoil shape*) [11].



Σχήμα 2.7 Διατομή πτερυγίου και τμήματα στο εσωτερικό

Περαιτέρω εξέταση της κατασκευής του πτερυγίου, οδηγεί στο συμπέρασμα πως λόγω του σχετικά μεγάλου πλάτους των *spar-caps* και του πάχους των στρώσεων του υλικού τους (*laminates*), αναμένεται μεγάλη αντοχή σε κάμψη φόρτισης *edge-wise*, δηλαδή όταν η διεύθυνση της φόρτισης είναι κάθετη σε μία από τις δύο κόψεις του πτερυγίου και όχι στην μεγάλη επιφάνεια του πτερυγίου (σε εκείνη την περίπτωση η φόρτιση ονομάζεται *flap-wise*). Εντούτοις, αυτό επιτυγχάνεται σε βάρος της αντοχής σε κάμψη με φόρτιση *flap-wise*, η οποία θα μπορούσε να αυξηθεί εάν υπήρχε και ένας τρίτος σύνδεσμος *shear-web* στο μέσον της επιφάνειας των *spar-caps* [13].

Κατά μήκος του πτερυγίου υπάρχει μία μεταβολή στο μήκος της χορδής που εκτείνεται στην διατομή του (Σχήμα 2.7 διακεκομμένη γραμμή). Όπως μπορούμε να διακρίνουμε και από το Σχήμα 2.5, υπάρχει μία γραμμική κωνικοποίηση (*linear taper*) από το τμήμα όπου το μήκος της χορδής γίνεται μέγιστο (7,5m) μέχρι και τα 30m, δηλαδή το *blade tip*. Το *blade root* έχει μήκος 2,1m μετρώντας από τον κεντρικό άξονα περιστροφής (*hub-rotation axis*) και είναι κυκλικής διατομής, με διάμετρο 1,5m. Η διατομή παραμένει κυκλική μέχρι τα 2,1m και μετά υφίσταται μία σταδιακή μετάβαση στο καθαρά αεροδυναμικό τμήμα, που ξεκινά στα 7,5m.

Όπως έχει προαναφερθεί, τα πτερύγια μίας ανεμογεννήτριας καταπονούνται και σε στρέψη (ή συστρόφη - *twist*). Πιο συγκεκριμένα, κατά μήκος του αεροδυναμικού τμήματος του πτερυγίου σε αποστάσεις 7,5m, 15m, 22,5m και 30m οι γωνίες συστρόφης είναι 10°, 2,5°, 0° και -0,5° αντίστοιχα.

2.4 ΦΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ - ΑΝΕΓΕΡΣΗΣ

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναφορά στις φάσεις κατασκευής και ανέγερσης μίας μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριας στην τοποθεσία που έχει αποφασιστεί.

1. Εκσκαφές



2. Όπλιση βάσης μπετόν



3. Μπετόν βάσης



4. Ανέγερση πύργου



5. Κεντράρισμα και τοποθέτηση πύργου (σύνδεση)



6. Συναρμολόγηση ρότορα στο έδαφος και ανέγερση όλης της ατράκτου



Εναλλακτικά γίνεται ανέγερση της ατράκτου και συναρμολόγηση του ρότορα σε ύψος



7. Τοποθέτηση πτερυγίων με ανύψωση ένα – ένα και τοποθέτηση στον ρότορα



Εναλλακτικά γίνεται η τοποθέτηση όλων των πτερυγίων στο έδαφος και ανέγερση στον ρότορα όπου και συνδέονται με την άτρακτο



8. Ολοκλήρωση



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΙΚΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΥΛΙΚΑ

Με την πάροδο του χρόνου και καθώς οι τεχνολογίες εξελίσσονται και βελτιώνονται, τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε μία ανεμογεννήτρια διαφοροποιούνται ακολουθώντας τις εξελίξεις. Η γενική τάση είναι να σχεδιάζονται όσο το δυνατόν ελαφρύτερα συστήματα. Συνεπώς στοχεύουμε σε ελαφριά και φθηνά υλικά, τα οποία είναι σημαντικά τόσο για τα πτερύγια αλλά και για τον πύργο της ανεμογεννήτριας. Τους λόγους για τους οποίους αναζητούμε τέτοιου είδους υλικά, θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε στη συνέχεια.

Τα τελευταία χρόνια τα πτερύγια κατασκευάζονται από ινοπλισμένα πολυμερή σύνθετα υλικά (πολυστρωματικές και *sandwich* δομές). Αποτελούν τα μεγαλύτερα σε μέγεθος περιστρεφόμενα στοιχεία της ανεμογεννήτριας και όπως έχει προαναφερθεί, κατασκευάζονται με προβλεπόμενη διάρκεια ζωής 20 έτη. Οι διαστάσεις των ανεμογεννητριών τείνουν διαρκώς να αυξάνονται, γεγονός που δημιουργεί δυσκολίες διότι το βάρος του πτερυγίου αυξάνεται δραματικά όταν μεγαλώνει το μήκος του. Στα μελλοντικά πτερύγια αναμένεται τα φορτία βαρύτητας να υπερβούν σε μέγεθος τα αεροδυναμικά φορτία. Καθίσταται λοιπόν σημαντική η εξοικονόμηση βάρους στο πτερύγιο. Στη φάση του σχεδιασμού αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ισχυρότερων υλικών (και ασφαλώς με όσο δυνατόν μικρότερο ίδιο βάρος) και με βελτιωμένη σχεδίαση των δομικών λεπτομερειών και της γεωμετρίας. Απαραίτητη προϋπόθεση όλων των παραπάνω είναι οι ακριβείς σχεδιαστικές μέθοδοι και προσομοιώσεις αλλά και ο βελτιωμένος πειραματικός έλεγχος των υλικών (πλήρης περιγραφή των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών από τα πειραματικά μοντέλα).

Ουσιαστικά το πτερύγιο αποτελεί συγκόλληση πολλών τμημάτων από σύνθετα υλικά μεταξύ τους, οπότε είναι μία πρόκληση να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ομοιομορφία. Γενικότερα ο σχεδιασμός με βάση τα σύνθετα υλικά (*composite material design*) μπορεί πολλές φορές να είναι αρκετά πολύπλοκος, αφού στους παραπάνω λόγους

προστίθεται το γεγονός ότι οι μηχανισμοί αστοχίας σε μία κατασκευή από σύνθετα υλικά και με ειδική γεωμετρία, δεν είναι όλοι πλήρως γνωστοί και κατανοητοί [14,15]. Ένας τρόπος να ξεπεραστεί το εμπόδιο αυτό, είναι ο σχεδιασμός με την προσέγγιση της ανοχής ατελειών (*damage tolerance design*) [15]. Με τον τρόπο αυτό, ένα κύριο τμήμα της κατασκευής από σύνθετο υλικό (όπως το πολυστρωματικό, ινοπλισμένο πολυμερές *sparcap* της εσωτερικής στηρίξεως) θα μπορεί να είναι αποδοτικό και να λειτουργεί με μία βλάβη ή μία κατασκευαστική ατέλεια για το υπόλοιπο ζωής του. Μία τέτοια βλάβη θα μπορούσε να προέλθει είτε από παρεκκλίσεις από τον σχεδιασμό στην παραγωγική διαδικασία, είτε από μηχανικούς χειρισμούς και εργαλεία κατά την τοποθέτηση.

Η σωστή επιλογή και σχεδιασμός των υλικών στις ανεμογεννήτριες είναι βασικά ζητήματα διότι σε αρκετές περιπτώσεις (και ιδιαίτερα στα υπεράκτια αιολικά πάρκα), η πρόσβαση στις εγκατεστημένες μονάδες είναι ιδιαίτερα δύσκολη και ακριβή. Συνεπώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν η περιορισμένη δυνατότητα επέμβασης για επικείμενες επισκευές και γενικά οι λιγοστές ανθρώπινες επιθεωρήσεις και έλεγχοι. Αισθητήρες που θα μπορούν να ανιχνεύσουν πιθανές αστοχίες στο πτερύγιο τοποθετούνται έτσι ώστε να προληφθεί οποιουδήποτε είδους βλάβη εγκαίρως. Ακόμη είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση της εξέλιξης της αστοχίας του πτερυγίου, για να είναι δυνατός ένας αξιόπιστος και ακριβής υπολογισμός της αστοχίας που ανιχνεύθηκε. Έτσι χρησιμοποιούνται ειδικά εργαλεία μοντελοποίησης, που αποσκοπούν σε μία λογική και συμφέρουσα απόφαση για το αν το πτερύγιο θα επισκευασθεί, θα αντικατασταθεί ή θα συνεχίσει να χρησιμοποιείται ως έχει.

3.2 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ (*MATERIAL SELECTION*)

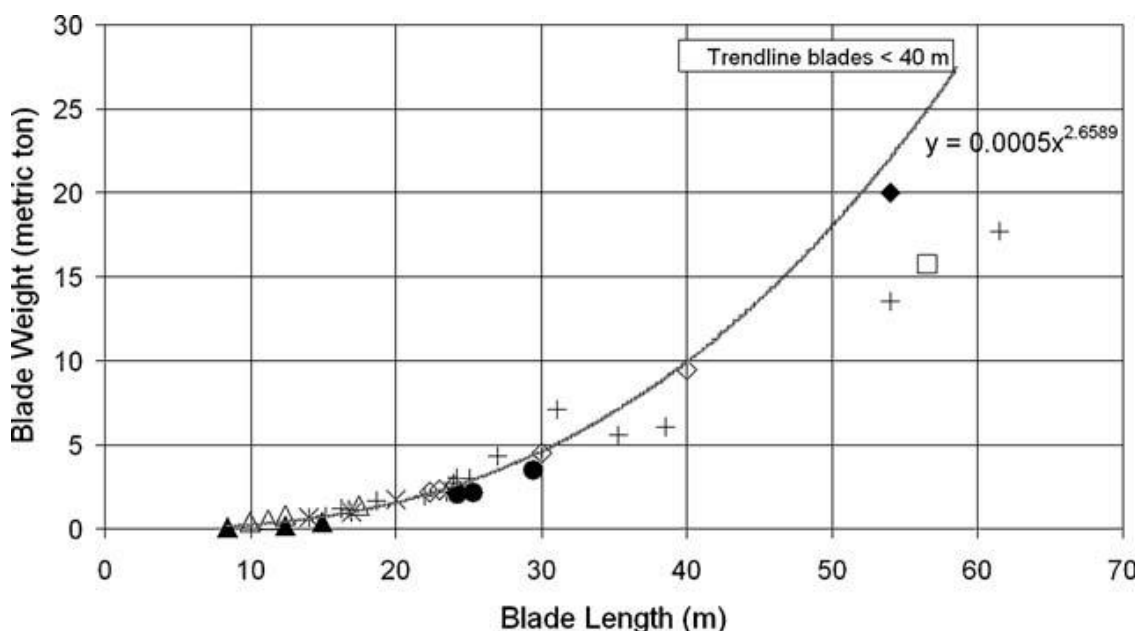
Η επιλογή των υλικών στις εφαρμογές των ανεμογεννητριών επηρεάζεται και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Με τον όρο παράγοντες εννοούμε ιδιότητες των υλικών, απαιτούμενες επιδόσεις, αξιοπιστία των υλικών, ασφάλεια, φυσικά χαρακτηριστικά, περιβαλλοντικές συνθήκες, διαθεσιμότητα, ανακύκλωση και βεβαίως οικονομικούς παράγοντες. Απαριθμούνται και αναλύονται οι βασικότεροι από αυτούς [16]:

1. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή των υλικών για μηχανικό σχεδιασμό, είναι οι ιδιότητες των υλικών. Οι σημαντικές ιδιότητες σε ένα υλικό είναι οι μηχανικές, οι θερμικές, οι χημικές κτλ.
2. Το υλικό που είναι μέρος ενός σύνθετου υλικού θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτελέσει ένα κομμάτι της λειτουργίας της συνολικής κατασκευής με επιτυχία.
3. Ένα υλικό σε μία δεδομένη εφαρμογή θα πρέπει να είναι αξιόπιστο.
4. Το υλικό πρέπει να εκτελεί με ασφάλεια την λειτουργία του.
5. Φυσικά χαρακτηριστικά όπως η διαμόρφωση, το μέγεθος, το βάρος και η εμφάνιση μερικές φορές εξυπηρετούν και αυτά λειτουργικές απαιτήσεις.
6. Το περιβάλλον μέσα στο οποίο ένα προϊόν ενεργεί, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του συστήματος.
7. Το υλικό θα πρέπει να είναι άμεσα και σε μεγάλες ποσότητες διαθέσιμο για την απαιτούμενη εφαρμογή.
8. Το κόστος των υλικών παίζει μεγάλο ρόλο, όπως και το κόστος μεταποίησης αυτών.

Για την ανάπτυξη και την παραγωγή ικανοποιητικών προϊόντων στο ελάχιστο κόστος έχει σημασία να γίνει μία σωστή και οικονομική επιλογή υλικών. Οποιαδήποτε επιλογή έχει τις εξής τρεις βασικές απαιτήσεις - προδιαγραφές που πρέπει οπωσδήποτε να τηρηθούν:

- Υλικά υψηλής δυσκαμψίας για να διατηρηθούν τα βέλτιστα επίπεδα απόδοσης.
- Χαμηλή πυκνότητα για να μειώνονται τα φορτία βαρύτητας.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (αντοχή σε φαινόμενα κόπωσης) για να μειώνεται η υποβάθμιση του υλικού.

Ξεκάθαρα πλέον φαίνεται ότι η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας, είναι σήμερα μία πολυσύνθετη διαδικασία που απαιτεί προσεκτικές επιλογές σε ιδιότητες, επιδόσεις και κόστος [17]. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση μεταξύ του μήκους του πτερυγίου και του ίδιου βάρους του. Όπως προαναφέρθηκε το βάρος αυξάνεται ραγδαία όταν αυξάνεται το μήκος του πτερυγίου, κάτι που φαίνεται και στο Διάγραμμα 3.1 (x:μήκος, γ:βάρος), όπου το κατώτερο άκρο της καμπύλης αντιπροσωπεύει τα σχετικά κοντά πτερύγια ύψους 12 έως 15m, που συνηθίζονταν στα πρώτα χρόνια σχεδιασμού ανεμογεννητριών (δεκαετία 1980). Τα σημεία εκτός καμπύλης αντιπροσωπεύουν πτερύγια διαφόρων μηκών που έχουν καταγραφεί μέχρι σήμερα. Η εμπειρική καμπύλη που διαγράφεται αντιπροσωπεύει πτερύγια κοντύτερα των 40m και βασίζεται σε μία εκθετική σχέση ($y = 0,0005x^{2,6589}$). Τρία σύγχρονα, μεγάλα πτερύγια (54 - 61,5m) απεικονίζονται ως σημεία και δείχνουν την βελτίωση του σχεδιασμού και της παραγωγικής διαδικασίας, αφού βρίσκονται κάτω από την εκτιμώμενη καμπύλη.



Διάγραμμα 3.1 Σχέση μεταξύ μήκους και βάρους πτερυγίου

3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Για την σωστή επιλογή υλικών στο πτερύγιο της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται πολλές και διαφορετικές μέθοδοι και αναλύσεις. Μία από αυτές είναι και η ανάλυση με την βοήθεια κάποιων δεικτών [11,16]. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι τρεις βασικές ιδιότητες που πρέπει να ικανοποιούνται είναι η υψηλή ακαμψία του υλικού (για να εξασφαλίζεται η διατήρηση του βέλτιστου, αεροδυναμικού σχήματος ενώ το πτερύγιο υφίσταται ισχυρές φορτίσεις), η χαμηλή πυκνότητα (για να ελαχιστοποιείται η φόρτιση λόγω βάρους) και η μεγάλη αντοχή σε κόπωση (για να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη διάρκεια ζωής με αξιοπιστία).

Ο πρώτος δείκτης σύμφωνα με την συγκεκριμένη ανάλυση, μπορεί να οριστεί απαιτώντας ότι το πτερύγιο επιτυγχάνει την ελάχιστη τιμή μάζας σε καθορισμένες τιμές ακαμψίας (ή εναλλακτικά ότι το πτερύγιο επιτυγχάνει την μέγιστη τιμή ακαμψίας σε συγκεκριμένα επίπεδα μάζας). Μετά από διάφορους υπολογισμούς, έχει επικρατήσει ο παρακάτω τύπος για αυτόν τον δείκτη:

$$A_1 = E^{1/2} / \rho \quad (1)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και ρ είναι η πυκνότητά του.

Η χρήση του δείκτη A_1 και μόνο, θα υποδείκνυε ως πιθανώς καταλληλότερα τα υλικά που έχουν μορφή αφρού (*foam-like materials*) για τη βέλτιστη επιλογή υλικού για πτερύγιο ανεμογεννήτριας. Στα συγκεκριμένα υλικά, η χαμηλή τους ακαμψία (όπως μετράται από την τιμή του μέτρου ελαστικότητας E) αντισταθμίζεται και με το παραπάνω από την χαμηλή τιμή της πυκνότητάς τους (ρ). Συνεπώς, ο δείκτης A_1 λαμβάνει μεγάλες τιμές στην περίπτωση αφρωδών υλικών, υποδεικνύοντάς τα ως κατάλληλα για τις εφαρμογές που εξετάζουμε. Παρόλα αυτά τα αφρώδη υλικά θα δημιουργούσαν πολύ ογκώδη πτερύγια, με κίνδυνο εμφάνισης σοβαρών σχεδιαστικών, κατασκευαστικών και λειτουργικών προβλημάτων, καθώς και προβλημάτων εγκατάστασης. Επιπλέον, η δομή με τις ανοικτές κυψελίδες (*open-cell structure*) που έχουν αυτά τα υλικά σε συνδυασμό με την σχετικά υψηλή διαπερατότητα στο νερό (που συνεπάγεται την απορρόφηση υγρασίας) μπορούν να τα απορρίψουν από κάθε σκέψη εφαρμογής τους σε πτερύγια ανεμογεννητριών. Για να ξεπεραστούν όλες αυτές οι δυσκολίες, προτάθηκε ένας δεύτερος

δείκτης (πιο συγκεκριμένα ένα κάτω όριο για τις ιδιότητες των υλικών) ο οποίος εξασφαλίζει πως τα υλικά που βρίσκονται εντός του πτερυγίου, κατέχουν ένα ελάχιστο επίπεδο απόλυτης ακαμψίας:

$$A_2 \geq E \quad (2)$$

Τυπικά η ελάχιστη τιμή του μέτρου ελαστικότητας που απαιτείται για δεδομένο υλικό ενός πτερυγίου, κυμαίνεται σε ένα εύρος μεταξύ 15 και 20GPa .

Οι δύο δείκτες που ορίστηκαν παραπάνω, περιέχουν δύο (E και ρ) από τις τρεις, προαναφερθείσες ιδιότητες των υλικών. Το να συμπεριληφθεί η τρίτη ιδιότητα (μεγάλη αντοχή σε κόπωση) σε κάποιον δείκτη, είναι εντούτοις μια αρκετά σημαντική πρόκληση. Αυτό ισχύει διότι ενώ είναι εύκολο να προσδιοριστεί η -σταθερού πλάτους- αντοχή σε κόπωση (*constant-amplitude fatigue strength*) που συνδέεται με την μέση τιμή ενός δεδομένου φορτίου και ενός συγκεκριμένου κύκλου ζωής ανά καταπόνηση, είναι αναγκαία η χρήση μεταβλητού πλάτους αντοχής (*variable-amplitude fatigue life*) στις εφαρμογές ανεμογεννητριών.

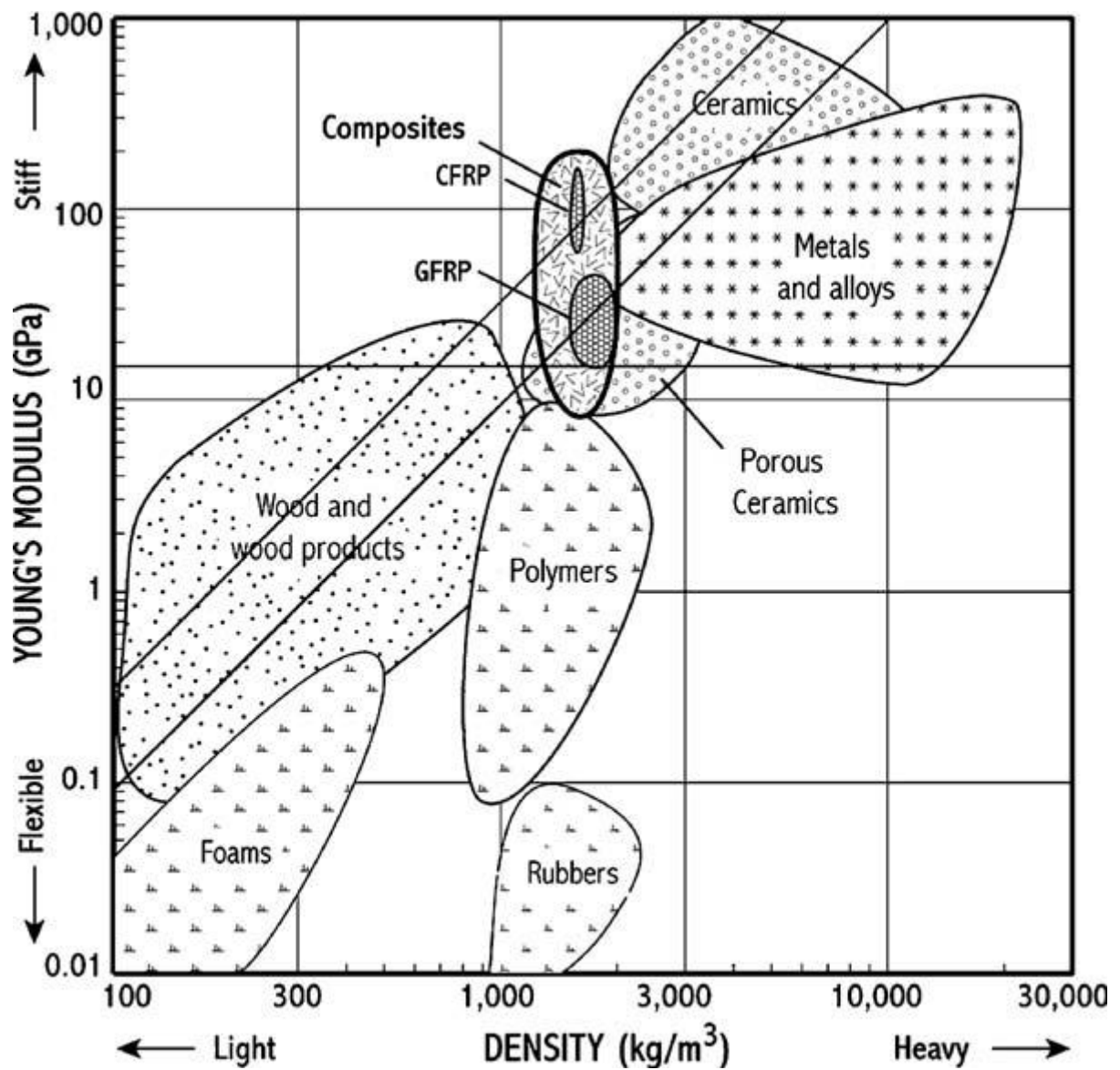
Αντοχή σε μεταβλητό πλάτος καλείται η αντοχή σε κόπωση που υφίσταται το σώμα (πτερύγιο) από καταπονήσεις οι οποίες είναι μη σταθερές (δυναμικές φορτίσεις) και επιπλέον είναι αδύνατο να μοντελοποιηθούν ως σταθερές. Ο άνεμος προφανώς είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας καταπόνησης, αφού είναι μία τελείως ακανόνιστη και στοχαστική φόρτιση. Η αντοχή σε κόπωση με μεταβλητό πλάτος μπορεί κατ' αρχήν να υπολογιστεί για δεδομένο συνδυασμό των φορτίων που διατηρούνται (παραμένουσα αντοχή), είτε αυτά είναι ψευδο-στατικά (*quasi-static*) είτε είναι χρονικώς μεταβαλλόμενα (*time-varying*). Όμως η διαδικασία που χρησιμοποιείται για αυτόν τον υπολογισμό, απαιτεί ακόμη την πλήρη επίγνωση των αποτελεσμάτων της κόπωσης με σταθερό πλάτος πολλών, διαφορετικών φορτίων. Εφόσον η παραγωγή τέτοιου είδους δεδομένων χρειάζεται ένα εκτεταμένο σύνολο από πειράματα (πολλές φορές ακριβά), τα δεδομένα αυτά δεν είναι πάντα διαθέσιμα (σε βιβλιογραφίες κτλ.). Κατά συνέπεια η διαδικασία επιλογής των υλικών για το πτερύγιο ανεμογεννήτριας που αναλύουμε στην παρούσα φάση, έπρεπε να βασιστεί σε ιδιότητες υλικών με μεγαλύτερη και πιο εύκολη πρόσβαση.

Συγκεκριμένα, θα τεθεί σε χρήση το “όριο αντοχής” (*endurance limit*) δηλαδή η αντοχή σε κόπωση με σταθερό πλάτος άπειρης διάρκειας [18]. Είναι γνωστό ότι τα υλικά με την υψηλότερη αντοχή σε θραύση αστοχούν με έναν πιο σταδιακό τρόπο, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο μία μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στο πτερύγιο, από τη στιγμή που θα εμφανιστεί η πρώτη ρωγμή μέχρι την πλήρη αστοχία (κατάρρευση). Αυτή η καθυστέρηση επιτρέπει σε πτερύγια που έχουν υποστεί φθορά λόγω κόπωσης να εντοπιστούν μέσα από περιοδικές επιθεωρήσεις και να αντικατασταθούν, προλαμβάνοντας έτσι σοβαρές επιπτώσεις που μπορούν να προκύψουν από την απροσδόκητη αστοχία τους ενώ βρίσκονται σε χρήση. Με βάση όλα τα παραπάνω, ο τρίτος και τελευταίος δείκτης για την επιλογή των βέλτιστων υλικών μπορεί να οριστεί ως:

$$A_3 = \sigma_{\text{end}} \cdot G_{\text{Ic}} \quad (3)$$

όπου σ_{end} είναι το όριο αντοχής και G_{Ic} είναι ο ρυθμός εκροής της ενέργειας παραμόρφωσης (*strain energy release rate*) τύπου-I .

Είναι φανερό, σύμφωνα με την ανάλυση που παρουσιάστηκε πως όσο πιο υψηλή είναι η τιμή του καθενός από τους τρεις δείκτες, τόσο καταλληλότερο είναι το υλικό που έδωσε τα συγκεκριμένα αποτελέσματα. Οι δύο πρώτοι από αυτούς τους δείκτες απεικονίζονται στο Διάγραμμα 3.2, όπου εμφανίζονται οι σχέσεις πυκνότητας και δυσκαμψίας των πιο διαδεδομένων υλικών στις ανεμογεννήτριες. Οι δύο διαγώνιες γραμμές που διαγράφονται αποτελούν δύο συγκεκριμένες τιμές του δείκτη A_1 της μεθόδου οι οποίες θεωρούνται χαρακτηριστικές και ανάμεσα στις οποίες μπορούν να εντοπιστούν τα κατάλληλα υλικά σε συνδυασμό βάρους και δυσκαμψίας. Η χαμηλότερη από τις δύο γραμμές αντιστοιχεί στην τιμή 0,003 ενώ η υψηλότερη σε 0,006 (E σε GPa και ρ σε kg/m³). Ο δεύτερος δείκτης A_2 της μεθόδου εισέρχεται στο διάγραμμα με τη μορφή μίας οριζόντιας γραμμής, που αντιπροσωπεύει το κάτω όριο του μέτρου ελαστικότητας που θα πρέπει να τηρεί το υλικό για να χαρακτηριστεί ως κατάλληλο σε όρους δυσκαμψίας, για να εφαρμοστεί στο πτερύγιο μίας ανεμογεννήτριας. Η γραμμή στο διάγραμμα αντιστοιχεί σε τιμή E = 15GPa. Ξύλο, κεραμικά και σύνθετα υλικά είναι αυτά που τηρούν τα κριτήρια σύμφωνα με τη μέθοδο και το διάγραμμα.



Διάγραμμα 3.2 Σχέση μεταξύ δυσκαμψίας και πυκνότητας υλικών σύμφωνα με τη μεθοδολογία

3.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ, ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Παλαιότερα το υλικό κατασκευής των πτερυγίων ήταν το ξύλο, αλλά εξαιτίας της ευαισθησίας του στην υγρασία και του κόστους μεταποίησής του, αντικαταστάθηκε σταδιακά. Πλέον μοντέρνα υλικά όπως πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (*glass fiber reinforced plastic*) ή ίνες άνθρακα (*carbon fiber reinforced plastic*), χάλυβας και αλουμίνιο παίρνουν την θέση των παραδοσιακών ξύλινων μονάδων [19]. Το ξύλο είναι σύνθετο υλικό από κυτταρίνη και λιγνίνη. Βρίσκει πολλές εφαρμογές και είναι παραδοσιακό κατασκευαστικό υλικό. Τα ξύλα έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας, όμως η σχετικά χαμηλή ακαμψία κάνει πολύ δύσκολο τον περιορισμό των ελαστικών παραμορφώσεων για μακριά πτερύγια. Τη μέγιστη δυνατή απόδοση που μπορεί να έχει ένα ξύλινο πτερύγιο, πλησιάζουν τα υλικά από ξύλο με κυτταρινούχες ίνες ευθυγραμμισμένες στις κατευθύνσεις που φέρουν το μέγιστο φορτίο. Εντούτοις, υπάρχουν δυσκολίες στην προμήθεια μεγάλων ποσοτήτων με δυνατότητα αναπαραγωγής, κάτι το οποίο επιβάλλεται εφόσον ο στόχος είναι μία σταθερή και οικονομικά συμφέρουσα παραγωγή πτερυγίων, άρα και αιολικής ενέργειας. Το ξύλο βέβαια εξακολουθεί να είναι περιβαλλοντικά ελκυστικό, αφού αποτελεί φυσικό και όχι τεχνητό υλικό.

Ο χάλυβας είναι κράμα σίδηρου και άνθρακα. Οι παλαιότερου τύπου ανεμογεννήτριες σχεδιάζονταν με βαριά, χαλύβδινα πτερύγια ή χαλύβδινο κράμα νικελίου, τα οποία είχαν σαφώς μεγαλύτερη αδράνεια. Η ταχύτητα περιστροφής τους εξαρτιόταν από την συχνότητα των γραμμών μεταφοράς ενέργειας. Η μεγάλη αδράνεια άμβλυνε κάπως τις αλλαγές στην ταχύτητα περιστροφής και αυτό έκανε την ισχύ εξόδου σταθερότερη. Ο σκοπός του κράματος νικελίου ήταν να ελαττώσει την στρέβλωση σε ψύξη, να μειώσει τις κρίσιμες θερμοκρασίες του χάλυβα και να διευρύνουν το φάσμα των επιτυχημένων θερμικών διεργασιών. Τα κράματα νικελίου έχουν μεγάλη αντοχή στην διάβρωση και την οξειδωση.

Ενώ κάποτε ο χάλυβας φαινόταν ως η καλύτερη επιλογή για την κατασκευή και παραγωγή των πτερυγίων, σύντομα άλλαξαν τα δεδομένα λόγω του μεγάλου βάρους και της μικρής αντοχής σε κόπωση. Το αλουμίνιο είναι ένα αργυροειδές, λευκό μέταλλο (*silvery-white metal*) με πυκνότητα περίπου ίση με το 1/3 αυτής του χάλυβα. Τέθηκε όμως σε εφαρμογή μόνο σε δοκιμαστικά στάδια, διότι βρέθηκε να έχει πολύ χαμηλότερη

διάρκεια ζωής από τον χάλυβα. Το αλουμίνιο είναι ελατό, καλός αγωγός της θερμότητας και γενικά ένα σχετικά φθινό μέταλλο, αξιόπιστο, με μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό. Παραμένει όμως εύκαμπτο και πιο αδύναμο από τον χάλυβα.

Αναζητώντας λοιπόν ένα υλικό που να είναι ταυτόχρονα δύσκαμπτο και ελαφρύ, η βιομηχανία της αεροναυτικής ενέργειας οδηγήθηκε στα σύνθετα υλικά (*composites*). Τα βασικότερα γενικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών είναι η μείωση του βάρους, η αυξημένη αντοχή, η βελτιωμένη αντοχή σε διάβρωση, αλλά και πλεονεκτήματα όπως η ηλεκτρομαγνητική διαφάνεια, η αντοχή σε φθορές, η αυξημένη αντοχή έναντι κόπωσης, η θερμική - ακουστική μόνωση, η χαμηλή θερμική διαστολή και η χαμηλή ή υψηλή μετάδοση της θερμότητας ανά περίπτωση. Τα πλέον συνήθη σύνθετα υλικά είναι αυτά που γίνονται με ισχυρές ίνες (λειτουργούν ως ενισχύσεις) που συγκρατούνται με ένα συνδετικό υλικό (μήτρα). Τα υλικά αυτά είναι ελαφρότερα από τα συμβατικά επειδή τόσο οι ίνες όσο και τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται ως συνδετικά υλικά έχουν χαμηλό ειδικό βάρος. Λεπτομερέστερα, οι ίνες έχουν υψηλότερες τιμές στους λόγους αντοχής - βάρους και δυσκαμψίας - βάρους από τα περισσότερα υλικά [20].

Πάντως οι ισχυρές ίνες δεν χρησιμοποιούνται από μόνες τους επειδή δεν αντέχουν σε θλιπτικά ή εγκάρσια φορτία. Το συνδετικό υλικό συγκρατεί τις ίνες στην προβλεπόμενη τους θέση και τις προστατεύει από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις. Η αντοχή και η δυσκαμψία αυτού του συνδετικού υλικού είναι ασήμαντες σε σχέση με αυτές των ινών, συνεπώς οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι κάπως χαμηλότερες από αυτές των ινών. Η μείωση αυτή των μηχανικών ιδιοτήτων με βάση αναφοράς τις ίνες προς το τελικό προϊόν (το σύνθετο υλικό) είναι ανάλογη της ποσότητας του συνδετικού υλικού που χρησιμοποιείται, σύμφωνα με τον νόμο της σύνθεσης (*rule of mixtures*).

Ο νόμος αυτός εκφράζει τα ποσοστά συμμετοχής ινών και μήτρας στο τελικό προϊόν και χρησιμοποιείται στην πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Έστω σύνθετο υλικό για το οποίο ορίζονται:

V : συνολικός όγκος

V_f : όγκος ινών

V_m : όγκος μήτρας

V_v : όγκος κενών

όπου προφανώς: $V = V_f + V_m + V_v$

Ορίζονται οι λόγοι u_f , u_m , και u_v ως εξής:

u_f : λόγος όγκου ινών (*fiber volume fraction*) $u_f = \frac{V_f}{V}$

u_m : λόγος όγκου μήτρας (*matrix volume fraction*) $u_m = \frac{V_m}{V}$

u_v : λόγος όγκου κενών (*void volume fraction*) $u_v = \frac{V_v}{V}$

για τα οποία ισχύει: $u_f + u_m + u_v = 1$.

Αν W είναι το συνολικό βάρος ενός κομματιού υλικού, W_f το βάρος ινών και W_m το βάρος της μήτρας, τότε ορίζονται οι ακόλουθοι λόγοι:

w_f : λόγος βάρους ινών $w_f = \frac{W_f}{W}$

w_m : λόγος βάρους μήτρας $w_m = \frac{W_m}{W}$

και είναι: $w_f + w_m = 1$.

Έστω ρ_f η πυκνότητα των ινών και ρ_m η πυκνότητα της μήτρας, τότε η συνολική πυκνότητα ρ του σύνθετου υλικού ορίζεται ως εξής:

$$\rho = \rho_f u_f + \rho_m u_m \quad (4)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο λόγος όγκου κενών u_v υπολογίζεται από:

$$u_v = 1 - u_f - u_m = 1 - \frac{W_f / \rho_f}{V} - \frac{W_m / \rho_m}{V} \quad (5)$$

Αφού οι ίνες δεν συνεισφέρουν στην αντοχή κατά την εγκάρσια στη διεύθυνση των ινών έννοια, και με δεδομένο ότι η αντοχή του συνδετικού υλικού είναι πολύ μικρή, καθίσταται αναγκαίο να προστεθούν στρώσεις με διάφορους προσανατολισμούς ώστε να παραλαμβάνονται τα επιβαλλόμενα φορτία. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι να δημιουργηθεί μία διαστρωμάτωση με αλληλουχία στρώσεων με διάφορους προσανατολισμούς. Παρόλο που τέτοια διαστρωμάτωση μπορεί να παραλάβει φορτία επίπεδης έντασης, η αντοχή και η δυσκαμψία της ανά μονάδα βάρους για δεδομένη διεύθυνση είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες τιμές μιας μεμονωμένης στρώσης.

Υβριδικά σύνθετα υλικά (*hybrids*) χρησιμοποιούνται όταν υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα στην εξωτερική επιφάνεια μίας διαστρωμάτωσης οπλισμένης με ίνες άνθρακα τοποθετούνται στρώσεις οπλισμένες με γυαλί ή αραμίδιο (*aramid*) για λόγους προστασίας [20]. Οι ίνες άνθρακα παρέχουν δυσκαμψία και αντοχή ενώ οι ίνες γυαλιού προσδίδουν προστασία έναντι πρόσκρουσης αντικειμένων ή βλημάτων. Ένα άλλο παράδειγμα αποτελούν στρώσεις ενισχυμένες με βόριο ανάμεσα σε άλλες στρώσεις ενισχυμένες με ίνες άνθρακα (*sandwich*). Οι ίνες βορίου παρέχουν υψηλή αντοχή σε θλίψη, αλλά είναι πολύ ακριβές και δύσκολες στο χειρισμό. Παρόλα αυτά, οι επιφάνειες με ενισχύσεις άνθρακα παρέχουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και απλοποίηση της κατασκευής ενώ μειώνουν το συνολικό κόστος. Τελικά το πιο κοινό υβριδικό σύνθετο υλικό είναι η κατασκευή *sandwich*. Ένας ασθενής πυρήνας από στερεοποιημένο αφρό ή με κυψελωτή διάταξη περικλείεται μεταξύ δύο ισχυρών και δύσκαμπτων διαστρωματώσεων. Ο πυρήνας μεταξύ των δύο διαστρωματώσεων παίζει το ρόλο μοχλοβραχίονα αυξάνοντας τη ροπή αδράνειας των δύο επιμέρους διαστρωματώσεων, υπό την προϋπόθεση ότι εξασφαλίζεται η μεταξύ τους συνεργασία, και τελικώς καταλήγει σε αυξημένη καμπτική δυσκαμψία (*bending stiffness*) του όλου συστήματος με πολύ μικρή επιβάρυνση στο βάρος και το κόστος του τελικού προϊόντος, αλλά και με αυξημένη αντοχή σε λυγισμό (*high buckling resistance*).

Όσον αφορά τα επιμέρους υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στις εφαρμογές των ανεμογεννητριών (πτερύγια), αυτά είναι οι ηλεκτρικές ίνες γυαλιού, οι ίνες άνθρακα και για τη μήτρα οι εποξειδικές ρητίνες. Οι ίνες γυαλιού παρουσιάζουν τις τυπικές ιδιότητες του γυαλιού, όπως σκληρότητα και αντοχή σε διάβρωση. Επίσης είναι εύκαμπτες, ελαφρές και σχετικά φθηνές. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τις ίνες γυαλιού τον πλέον

συνήθη τύπο ινών που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές μικρού κόστους. Η υψηλή αντοχή των ινών γυαλιού αποδίδεται στον μικρό αριθμό και το μικρό μέγεθος των ατελειών στην επιφάνειά τους. Όλες οι ίνες γυαλιού έχουν παρόμοιες δυσκαμψίες αλλά διαφορετικές τιμές αντοχής και διαφορετική αντοχή σε περιβαλλοντικές επιδράσεις. Οι ίνες *E-glass* (*E=electrical=ηλεκτρικές*) χρησιμοποιούνται όταν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις για εφελκυστική τάση και καλή χημική αντοχή. Οι ίνες *E-glass* είναι το είδος ενίσχυσης που προτιμάται επειδή συνδυάζει μηχανική απόδοση, αντοχή στη διάβρωση και μικρό κόστος.

Οι ίνες άνθρακα (επίσης ονομαζόμενες ανθρακονήματα ή ίνες γραφίτη) έχουν μικρό βάρος και είναι ισχυρές, με εξαιρετική χημική αντοχή. Επικρατούν στον χώρο της αεροδιαστημικής. Σε αντίθεση με τις ίνες γυαλιού, οι ίνες άνθρακα είναι διαθέσιμες σε ένα μεγάλο εύρος τιμών δυσκαμψίας. Οι ιδιότητες τους εξαρτώνται από το ακατέργαστο υλικό και την πορεία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους. Δύο βασικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι τα *polyacrylonitrile* (PAN) και *pitch* (πίσσα). Οι ίνες πίσσας είναι λιγότερο ακριβές αλλά έχουν μικρότερη αντοχή από τις ίνες PAN. Οι ίνες PAN επικρατούν, με υψηλή απόδοση, στις αεροδιαστημικές εφαρμογές γιατί μπορούν να κατασκευάζονται με ποικίλες τιμές δυσκαμψίας και αντοχής. Ο σημαντικότερος περιορισμός στη χρήση των ινών άνθρακα είναι το κόστος. Γενικά, το κόστος των ινών άνθρακα υψηλής δυσκαμψίας μπορεί να δικαιολογηθεί καθώς η οικονομία σε βάρος προσφέρει μεγάλη απόδοση, όπως στις εφαρμογές ανεμογεννητριών και αεροδιαστημικής, ή όταν απαιτείται υψηλή θερμοκρασιακή μόνωση, αντοχή και βελτιωμένο όριο διαρροής ή εάν μεγάλο χρονικό διάστημα διατήρησης της αντοχής είναι καθοριστικό για την προκείμενη εφαρμογή. Οι ίνες άνθρακα είναι ελαφρύτερες και πιο άκαμπτες από τις ίνες γυαλιού, αλλά δεν έχουν το οικονομικό πλεονέκτημα όταν τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται για να υποκαταστήσουν ένα συμβατικό υλικό όπως ο χάλυβας στις κατασκευές όπου το βάρος δεν είναι κρίσιμο (το υψηλό κόστος δικαιολογείται καλύτερα όταν το υλικό χρησιμοποιείται σαν ενισχυτικό παρά σαν υποκατάστατο υλικό) [21].

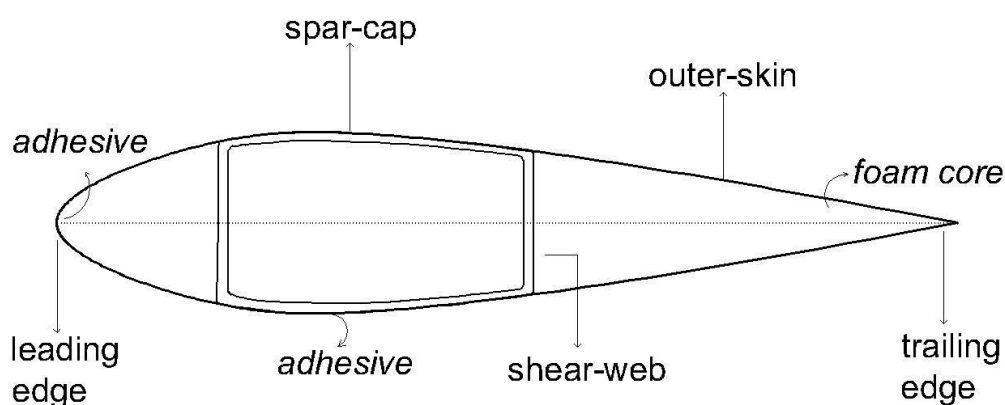
Αναφορικά με το υλικό της μήτρας (*matrix*), δηλαδή το συνδετικό υλικό, οι εποξειδικές ρητίνες (*epoxy*) χρησιμοποιούνται ευρύτατα λόγω της μεγάλης τους ικανότητας προσαρμογής, των υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων και της μεγάλης αντοχής σε διάβρωση. Οι εποξειδικές συρρικνώνονται λιγότερο από ότι άλλα υλικά (1,2 έως 4% του όγκου), πράγμα το οποίο βοηθά στο να εξηγηθούν τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά δεσμού όταν

χρησιμοποιούνται σαν συγκολλητικά (*adhesives*). Επηρεάζονται λιγότερο από την υγρασία και τη θερμοκρασία σε σχέση με άλλα πολυμερή συνδετικά. Προτιμώνται επίσης για την απλή διαδικασία στερεοποίησης που μπορεί να γίνει σε θερμοκρασίες μεταξύ 5° και 150°C. Εποξειδικά συνδετικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες λειτουργίας (*service*) μεταξύ 125° και 175°C. Για να αυξηθεί η σκληρότητα της ρητίνης και του σύνθετου υλικού, αυτό γίνεται με πρόσθετα στις βασικές εποξειδικές ρητίνες θερμικής διαμόρφωσης (*thermoset*), συμπεριλαμβανομένης και της προσθήκης θερμοπλαστικών (*thermoplastics*).

Σε αντίθεση με τα μέταλλα, τα πολυμέρη υφίστανται ερπυσμό σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας. Επίσης οι μηχανικές τους ιδιότητες εξαρτώνται σημαντικά από την θερμοκρασία και την υγρασία. Ο ερπυσμός μπορεί να οριστεί ως η προοδευτική παραμόρφωση με το χρόνο υπό σταθερό φορτίο και είναι η εκδήλωση της βισκοελαστικής (*viscoelastic*) συμπεριφοράς των πολυμερών. Η βισκοελαστική συμπεριφορά των πολυμερών είναι απόδειξη της επίδρασης του ρυθμού φόρτισης (*load rate*). Αν το φορτίο δεν εφαρμοστεί ξαφνικά αλλά σε συγκεκριμένο χρόνο, το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης αλλάζει ως αποτέλεσμα του ρυθμού φόρτισης. Όσο πιο αργή είναι εφαρμογή του φορτίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση.

3.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ

Όσον αφορά την 1MW ανεμογεννήτρια που εξετάζουμε στην ανάλυσή μας, ας δώσουμε μία πιο αναλυτική σκοπιά των υλικών του πτερυγίου με τη βοήθεια του Σχήματος 3.3 (διατομή πτερυγίου με εμφανή τα χαρακτηριστικά δομικά στοιχεία του εσωτερικού του).



Σχήμα 3.3 Διατομή πτερυγίου και τμήματα

Ο εξωτερικός φλοιός του πτερυγίου (*outer/exterior skin* ή *wing shells*) όπως επίσης και τα κάθετα *shear-webs* που βρίσκονται στο εσωτερικό, έχουν δομή υλικού *sandwich* που αποτελείται από τρεις στρώσεις σύνθετου *laminated* υλικού με ίνες ύαλου σε τρεις διευθύνσεις (*tri-axial*), -45° , 0° , 45° [11]. Οι στρώσεις διαχωρίζονται μεταξύ τους από τον πυρήνα, που κατασκευάζεται από ξύλο τύπου *balsa* (τροπικό δέντρο). Στα *wing shells* χρησιμοποιείται η *sandwich* δομή για να ενισχυθεί η αντοχή σε λυγισμό στην *edge-wise* φόρτιση (φόρτιση κάθετη στην κόψη του πτερυγίου, δηλαδή στο επίπεδο του *wing shell*). Στα *shear-webs* έχει καθιερωθεί η *sandwich* δομή, διότι η λειτουργία τους είναι να μεταφέρουν τις διατμητικές δυνάμεις από την *flap-wise* φόρτιση (φόρτιση στην πλατιά πλευρά του πτερυγίου). Συνεπώς αποτελούν λεπτές πλάκες που δέχονται θλιπτικό αξονικό φορτίο στο επίπεδό τους, άρα είναι ευάλωτες σε τοπικό (διατμητικό) λυγισμό (*local/shear buckling*) [22].

Τα *spar-caps* κατασκευάζονται εναλλάσσοντας στρώματα ίσου πάχους από το υλικό με τις ίνες σε τρεις διευθύνσεις (που αναφέρθηκε παραπάνω) και από υλικό *laminat* με ίνες σε μία διεύθυνση (*uni-axial*). Το υλικό που βγαίνει από αυτή τη μίξη έχει το 70% των ινών του σε κατεύθυνση 0°, ενώ το υπόλοιπο 30% των ινών βρίσκεται εκτός του συγκεκριμένου άξονα. Πρωταρχικός στόχος των *spar-caps* είναι να αναλάβουν τις καμπτικές ροπές που προέρχονται από την *flap-wise* φόρτιση. Συνεπώς επιλέγεται πολυστρωματικό σύνθετο υλικό (*composite laminate*), όπου υπάρχουν στρώσεις με ίνες σε διεύθυνση 0° (*uni-axial*) για να εξασφαλιστεί η καμπτική δυσκαμψία της επιφάνειας, αλλά και στρώσεις με ίνες υπό γωνία (*tri-axial*) για να εξασφαλιστεί η αντοχή σε λυγισμό της επιφάνειας που θλίβεται.

Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται εκτενώς οι στρώσεις των σύνθετων υλικών, με την σειρά που χρησιμοποιούνται για κάθε ένα από τα τμήματα του πτερυγίου, καθώς και τα πάχη του κάθε φύλλου [11].

Πίνακας 3.4 Σύνθετα υλικά του πτερυγίου με τη σειρά επίστρωσης

<u>Αριθμός στρώσης</u>	<u>Υλικό</u>	<u>Πάχος</u>
<i>Wing shells και shear-webs</i>		
1	gel	0.68 mm
2	ίνες τυχούσης διεύθυνσεως	0.5 mm
3	ίνες σε 3 διευθύνσεις	1.2 mm
4	ξύλο balsa	0.005 x μήκος χορδής
5	ίνες σε 3 διευθύνσεις	1.2 mm
<i>Spar-caps</i>		
1	ίνες σε 3 διευθύνσεις	1.2 mm
2	ίνες σε μία διεύθυνση	1.2 mm
Συνεχής εναλλαγή των στρώσεων 1,2		

Έχουμε αναφέρει ότι όλα τα σύνθετα πολυστρωματικά υλικά (*laminates*) που καταγράφηκαν παραπάνω, βασίζονται σε εποξειδική μήτρα (*epoxy*) ενισχυμένη με ίνες από *E-glass* (ηλεκτρικός ύαλος). Όσον αφορά τις στρώσεις κόλλας (*adhesive layers*) που συνδέουν τα *spar-caps* με την εσωτερική όψη του περιβλήματος του πτερυγίου, είναι κυρίως από εποξειδική ρητίνη (Σχήμα 3.3). Οι κυριότερες ιδιότητες των υλικών που αποτελούν το πτερύγιο (ακαμψία, μάζα και ιδιότητες σύνθετου υλικού), παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5 [11].

Πίνακας 3.5 Συνοπτική παρουσίαση ιδιοτήτων των υλικών

Ιδιότητες	<i>Uni</i>	<i>Tri</i>	<i>Mix</i>	<i>Random</i>
E_{xx} (GPa)	31.0	24.2	27.1	9.65
E_{yy} (GPa)	7.59	8.97	8.35	9.65
G_{xy} (GPa)	3.52	4.97	4.70	3.86
ν_{xy}	0.31	0.39	0.37	0.30
u_f	0.40	0.40	0.40	...
w_f	0.61	0.61	0.61	...
ρ (g/cm ³)	1.70	1.70	1.70	1.67

Πίνακας 3.5 συνέχεια

Ιδιότητες	<i>Balsa</i>	<i>Gel</i>	<i>Epoxy adhesive</i>
E_{xx} (GPa)	2.07	3.44	2.76
E_{yy} (GPa)	2.07	3.44	2.76
G_{xy} (GPa)	0.14	1.38	1.10
ν_{xy}	0.22	0.3	0.3
u_f	—	—	—
w_f	—	—	—
ρ (g/cm ³)	0.144	1.23	1.15

όπου: *uni* = σύνθετο υλικό με ίνες σε μία διεύθυνση

tri = σύνθετο υλικό με ίνες σε τρεις διευθύνσεις (-45°,0°,45°)

mix = ανάμιξη του πρώτου με το δεύτερο για τα *spar-caps*

random = σύνθετο υλικό με ίνες τυχούσης διευθύνσεως

balsa = είδος ξύλου

gel = γέλη

epoxy adhesive = κόλλα από εποξειδική ρητίνη

Όσον αφορά τα σύμβολα στην στήλη των ιδιοτήτων, έχουν ως εξής:

E_{xx} = διάμηκες μέτρο Ελαστικότητας (Young)

E_{yy} = εγκάρσιο μέτρο Ελαστικότητας (Young)

G_{xy} = μέτρο Διατμήσεως

ν_{xy} = λόγος Poisson

u_f = κατ' όγκο περιεκτικότητα του εγκλείσματος (ίνες)

w_f = κατά βάρος περιεκτικότητα του εγκλείσματος (ίνες)

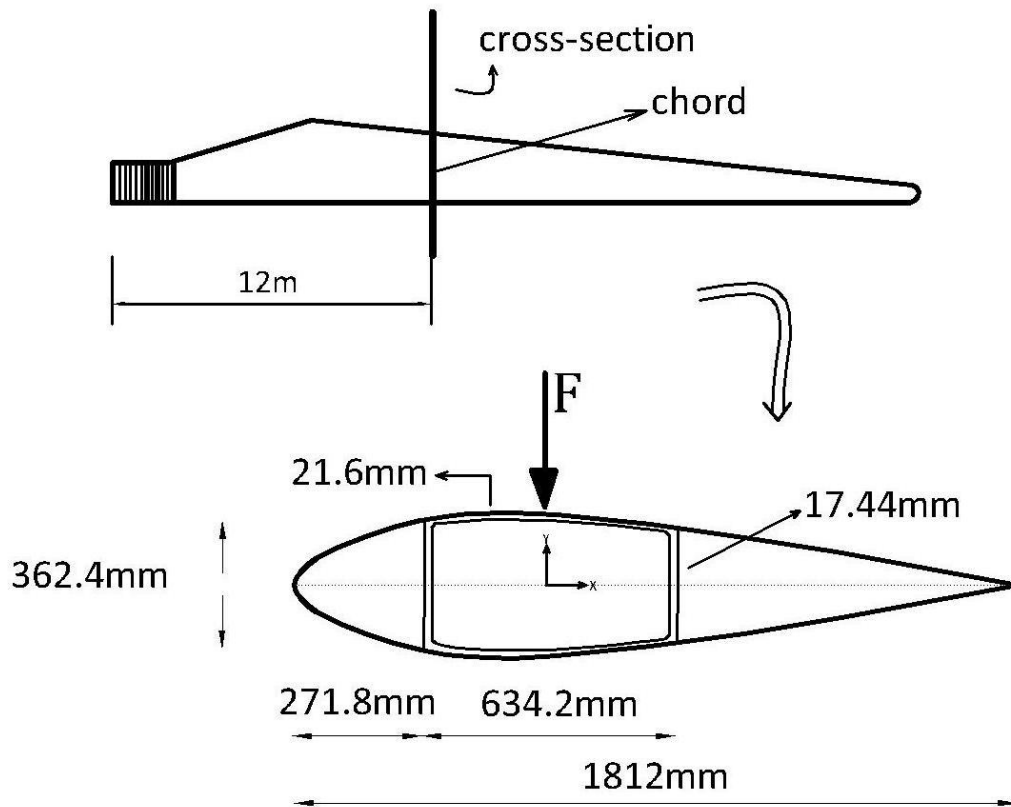
ρ = πυκνότητα του υλικού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Εξετάζεται η εφαρμογή των υλικών που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο στην εσωτερική στήριξη του πτερυγίου μίας μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριας. Πραγματοποιήθηκε μία πλήρης ανάλυση (*structural analysis*) σε όρους διατομής (μικροκλίμακα), με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 11.0 [23]. Για την επίλυση κάποιων προβλημάτων είναι δυνατό να καταφύγουμε σε απλοποιητικές παραδοχές ή απλοποιητικές θεωρίες, όπως η αντοχή υλικών, η θεωρία πλακών κτλ. Όσο όμως η κατασκευή γίνεται συνθετότερη τόσο και η δυνατότητα επίλυσης με τέτοιες θεωρίες λιγοστεύει. Αναπόφευκτα λοιπόν χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για κατασκευές όπως το πτερύγιο μίας ανεμογεννήτριας, διότι είναι πολύ εύκολα προσαρμόσιμη και επιτρέπει να περιγραφούν οποιοσδήποτε οριακές συνθήκες και να επιλυθούν προβλήματα με ασυνέχειες που οφείλονται στο υλικό (εγκλείσματα, σύνθετα σώματα κτλ.). Και όλα αυτά για υλικά ισότροπα ή ανισότροπα με συμπεριφορά ελαστική, πλαστική ή βισκοελαστική κάτω από στατική ή δυναμική φόρτιση.

Στην ανάλυσή μας επιλέξαμε να μοντελοποιήσουμε μία διατομή του πτερυγίου που βρίσκεται σε απόσταση 12m από τη βάση του (Σχήμα 4.1). Το μήκος της χορδής (*chord length*) στη συγκεκριμένη διατομή είναι 1,812m. Το πάχος του *shear-web* είναι 17,44mm, ενώ αυτό του *spar-cap* 21,6mm. Σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα [12,24] αλλά και μελέτες που αφορούν καθολικά το πτερύγιο σαν πρόβολο (*full-scale test*), η περιοχή από τη βάση του πτερυγίου μέχρι και 13m κατά μήκος του, προβλέπεται ως η πλέον κρίσιμη και επιπλέον ως το τμήμα στο οποίο η τελική και πλήρης αστοχία θα λάβει χώρα. Σε καθολικό επίπεδο (μακρο-κλίμακα) όταν το πτερύγιο καταπονηθεί πειραματικά σε αυξανόμενη φόρτιση, λόγω των ροπών που ασκούνται από τα μηχανήματα που προσομοιώνουν τις πιέσεις του ανέμου (*flap-wise loading*) εμφανίζει αρχικώς μία αποκόλληση ή αποστρωματοποίηση (*delamination*) του εξωτερικού κελύφους (*outer skin*) από τον εσωτερικό μηχανισμό στήριξης και έπειτα έρχεται η πλήρης αστοχία σε λυγισμό του πτερυγίου (*delamination buckling*) όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.2.

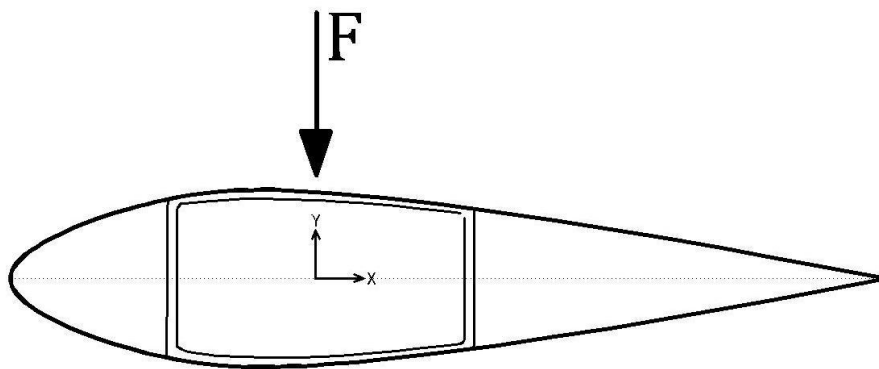


Σχήμα 4.1 Θέση και διαστάσεις διατομής



Εικόνα 4.2 Αστοχία πτερυγίου σε λυγισμό μετά από πείραμα (full-scale test)

Ο ρότορας και τα πτερύγια δέχονται εξωτερικές φορτίσεις που προέρχονται από τον άνεμο και τη βαρύτητα. Όπως έχει προαναφερθεί, τα πτερύγια τοποθετούνται γενικώς με τέτοιο τρόπο ώστε η πλατιά τους επιφάνεια να βρίσκεται στο επίπεδο περιστροφής του ρότορα. Το αεροδυναμικό σχήμα και η στροφή με την οποία έχει σχεδιαστεί το πτερύγιο αναπτύσσουν μεγάλες ταχύτητες σε αυτό, με την εφαπτομενική ταχύτητα στην άκρη του πτερυγίου (*blade tip*) να κυμαίνεται από 75 - 85m/s, πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ανέμου ακόμη και σε συνθήκες καταιγίδας (25m/s). Έτσι τα πτερύγια αντιλαμβάνονται την διεύθυνση της ταχύτητας στο επίπεδο περιστροφής, ενώ στην πραγματικότητα η διεύθυνση της ταχύτητας είναι σχεδόν κάθετη σε αυτό το επίπεδο. Συνέπεια των πιέσεων του ανέμου στη πλατιά πλευρά του πτερυγίου είναι η *flap-wise* κάμψη. Τα φορτία αυτά είναι ταυτόχρονα στατικά, προκαλώντας μόνιμη κάμψη στα πτερύγια, και δυναμικά, προκαλώντας κόπωση σε φόρτιση *flap-wise* λόγω των φυσικών εναλλαγών στην ταχύτητα του ανέμου. Επίσης υπάρχουν εναλλαγές στα μέτρα και τις διευθύνσεις τόσο των στατικών όσο και των δυναμικών φορτίσεων σε ένα δεδομένο πτερύγιο λόγω της περιστροφής του, ανάλογα με τη θέση στην οποία βρίσκεται κάθε φορά.



Σχήμα 4.3 Είδος φορτίσεως στη διατομή

Τα πτερύγια δέχονται επίσης και φορτία βαρύτητας, με τη δυσμενέστερη περίπτωση να πραγματοποιείται όταν βρίσκονται σε οριζόντια θέση. Τα φορτία βαρύτητας προκαλούν και αυτά κάμψη στο πτερύγιο αλλά διαφορετικού είδους, η οποία ονομάζεται *edge-wise* κάμψη (με το σύστημα αναφορά του Σχήματος 4.1 η *flap-wise* είναι κάμψη γύρω από τον άξονα X, ενώ η *edge-wise* γύρω από τον άξονα Y). Στην περίπτωση αυτής της

κάμψεως προκαλείται και πάλι το φαινόμενο της κόπωσης, διότι το πτερύγιο κάμπτεται λόγω βάρους μία θετικά και μία αρνητικά, κάθε φορά που εκτελεί μία πλήρη περιστροφή στο επίπεδο του ρότορα. Ακόμη, ένα πτερύγιο δέχεται και φυγόκεντρες δυνάμεις λόγω της περιστροφής του ρότορα αλλά δεν θεωρούνται σημαντικές και δεν λαμβάνονται υπόψιν στο σχεδιασμό.

Το 97% των βλαβών σε ένα πτερύγιο οφείλεται στα δύο είδη κάμψεων που αναλύσαμε παραπάνω. Στην μελέτη μας θα εφαρμόσουμε μία στατική, γραμμική καταπόνηση που προκαλεί *flap-wise* κάμψη στο πτερύγιο, διότι σε γενικές γραμμές είναι η σημαντικότερη και αυτή που προκαλεί την αστοχία τοπικά αλλά και καθολικά. Το μέτρο της φόρτισης είναι 16,25N/mm έτσι ώστε τα μεγέθη των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν να μπορούν να είναι άμεσα συγκρίσιμα με πειραματικά αλλά και με θεωρητικά δεδομένα στα οποία στηρίξαμε την ανάλυσή μας [11,12,25]. Το φορτίο είναι γραμμικό κατά μήκος του πτερυγίου και η κατεύθυνση με το σημείο εφαρμογής του είναι εμφανή στο Σχήμα 4.3.

4.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ – ΑΠΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ

Ο σκοπός της εσωτερικής στήριξης του πτερυγίου (*box girder*) είναι να του παρέχει την απαραίτητη αντοχή και ακαμψία, τόσο τοπικά όσο και καθολικά. Καθολικά το πτερύγιο θα πρέπει να είναι ικανοποιητικά άκαμπτο έτσι ώστε να μην έρχεται σε επαφή με τον πύργο όταν η ανεμογεννήτρια θα βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία (δηλαδή με ενεργές όλες τις πιθανές φορτίσεις). Σε τοπικό επίπεδο, το κουτί στηρίξεως σε συνεργασία με την δυσκαμψία που προσφέρει το εξωτερικό κέλυφος, εξασφαλίζει τη διατήρηση του αεροδυναμικού σχήματος το οποίο έχει αποδοθεί στον σχεδιασμό.

Οι εντάσεις που δημιουργούνται σε όλο το μήκος του πτερυγίου από τις φορτίσεις, μεταφέρονται στον μηχανισμό στήριξης με μία ιδιαίτερη πολυπλοκότητα (που ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας εργασίας). Η έρευνα προηγούμενων ετών δείχνει ότι η εσωτερική στήριξη αφού απορροφά την πλειονότητα των τάσεων είναι το πρώτο τμήμα που αστοχεί σε τοπικό επίπεδο. Ειδικά τα *spar-caps (flanges)* (αλλά και τα *shear-webs*) κινδυνεύουν από τοπικό λυγισμό (κύρτωση) αφού αποτελούν πολύ λεπτές σύνθετες πλάκες με μεγάλο μήκος. Αυτός ο τρόπος αστοχίας ενισχύεται από την παρουσία ατελειών που εμφανίζονται λόγω της απαιτητικής κατασκευαστικής διαδικασίας. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευαστικών ατελειών είναι η μη σταθερότητα στο πάχος του πυρήνα του *sandwich* υλικού των *shear-webs*, εκτροπές από τον σχεδιασμό όσον αφορά την γωνία των ενισχυτικών ινών στο πολυστρωματικό υλικό των *flanges* και γενικότερες γεωμετρικές ατέλειες λόγω των πολλών παραλλαγών και λεπτομερειών.

Για τους παραπάνω λόγους αλλά και επειδή μας ενδιαφέρουν τα φαινόμενα στο τοπικό-εγκάρσιο επίπεδο (*transverse direction*), θεωρείται σκόπιμο να εξεταστεί μεμονωμένα ο μηχανισμός στήριξης *box girder*, υπό την υπόθεση της επίπεδης παραμόρφωσης (*plane strain assumption*). Η υπόθεση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε μία δοκό απεριόριστου μήκους που οι πλευρές της υπόκεινται σε ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία εφόσον, εξαιτίας της συμμετρίας, τα στοιχεία που βρίσκονται σε ένα δεδομένο εγκάρσιο επίπεδο δεν μπορούν να κινηθούν έξω από αυτό το επίπεδο. Συνεπώς στη περίπτωση μίας μεγάλης μήκους δοκού που υπόκειται σε ομοιόμορφα εγκάρσια κατανεμημένα φορτία, υπάρχει μία κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης σε κάθε εγκάρσια διατομή η οποία δεν βρίσκεται πολύ κοντά σε ένα από τα άκρα της. Κατάσταση η οποία

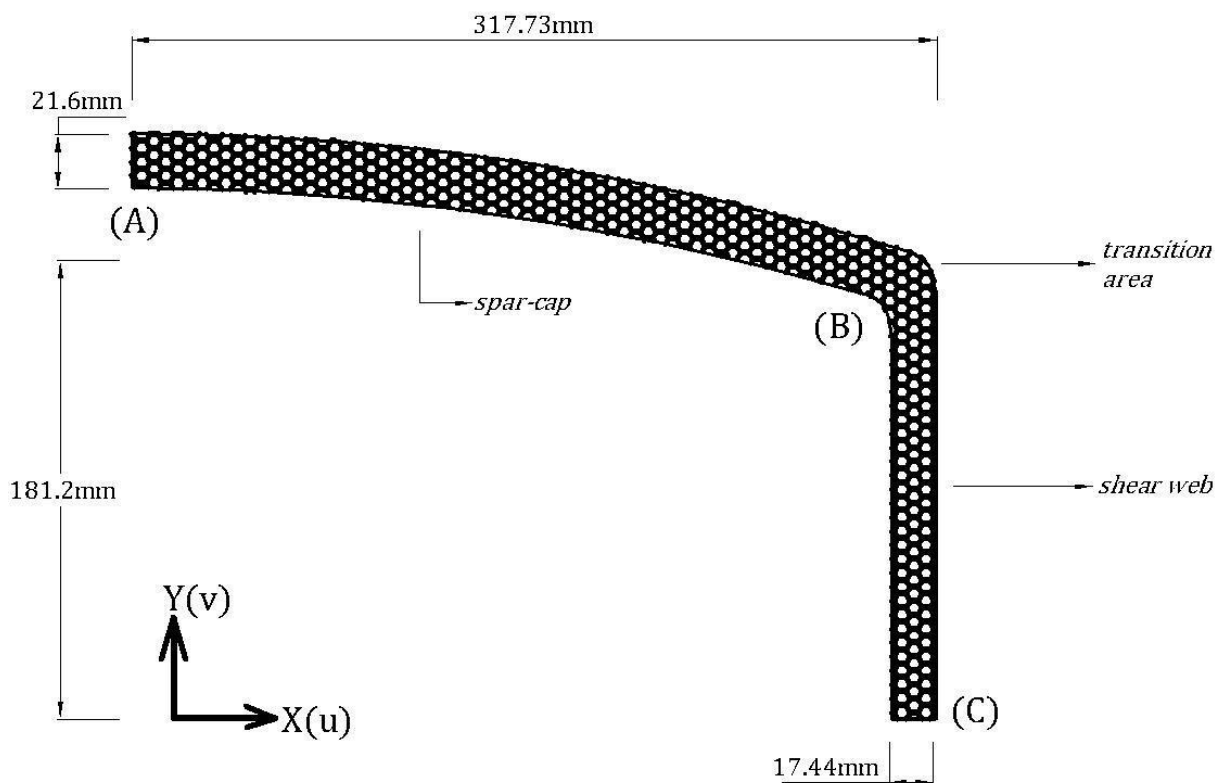
ταιριάζει με την περίπτωση μας, αφού έχουμε ουσιαστικά μία δοκό - πρόβολο με μήκος 30m, η οποία δέχεται ομοίμορφο γραμμικό φορτίο 16,25N/mm στο εγκάρσιο επίπεδο της και συγκεκριμένα στο κέντρο του *spar-cap* (Σχήμα 4.3). Παρόλα αυτά ελέγχεται η υπόθεση της επίπεδης παραμόρφωσης καθώς έγιναν επιλύσεις και με την υπόθεση της επίπεδης εντατικής κατάστασης (*plane stress*), για λόγους σύγκρισης. Επίσης, αναγνωρίζοντας το γεγονός ότι η παραπάνω υποθέσεις αγνοούν σημαντικά φαινόμενα στην διαμήκη έννοια (δηλαδή στην τρίτη διάσταση) όπως κάμψη και στρέψη, προσομοιώθηκε η κατασκευή και με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων κελύφους έτσι ώστε να ελεγχθούν οι υποθέσεις επιπεδότητας αλλά και επειδή τα στοιχεία κελύφους είναι αυτά που χρησιμοποιούνται πρακτικώς στον σχεδιασμό και στις προκατασκευαστικές αναλύσεις.

Για να απλοποιηθεί το πρόβλημα και η μοντελοποίησή του, υποθέτουμε συμμετρία γύρω από τους δύο εγκάρσιους άξονες της διατομής (X και Y στο Σχήμα 4.3). Αυτό στην πραγματικότητα δεν είναι πάντα αληθές καθώς μπορούν να παρατηρηθούν μεταβολές και διαφοροποιήσεις μεταξύ του πάνω και του κάτω *spar-cap* αλλά και μεταξύ των δύο *shear-webs*. Εντούτοις είναι μία πολύ καλή προσέγγιση και μία συνηθισμένη τακτική σε παρόμοιες έρευνες [25,26]. Μετά την εισαγωγή όλων των παραπάνω παραδοχών, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση και η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων μόνο στο ¼ της κατασκευής της στήριξης, με τις συνοριακές συνθήκες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Περιοχή	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
Spar-cap (μέσον)	X	√	X	X	X	X
Shear-web (μέσον)	√	X	X	X	X	X

Πίνακας 4.4 Συνοριακές συνθήκες του μοντέλου (√: ελευθερία, X: δέσμευση)

Οι συνοριακές συνθήκες αναφέρονται στο σύστημα συντεταγμένων του Σχήματος 4.5 (που είναι και το καθολικό σύστημα του μοντέλου - *global coordinates system*) όπου βέβαια απεικονίζονται και τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία βασίζονται στο αεροδυναμικό μοντέλο S818 [11]. Τα σύμβολα u , v , w αναφέρονται σε μετακινήσεις κατά τον X , Y και Z άξονα αντίστοιχα, ενώ τα σύμβολα θ_x , θ_y , θ_z αναφέρονται σε στροφές γύρω από τον X , Y και Z άξονα αντίστοιχα. Η ακρίβεια των συνοριακών συνθηκών ελέγχθηκε και επαληθεύτηκε μέσω επιλύσεων κάποιων μοντέλων με μονή και όχι διπλή συμμετρία γύρω και από τους δύο άξονες με τις κατάλληλες κάθε φορά δεσμεύσεις και τις αντίστοιχες φορτίσεις σύμφωνα με τη Στατική και τη θεωρία πλαισίων (για παράδειγμα στο μοντέλο μονής συμμετρίας γύρω από τον άξονα Y ελήφθη διπλάσια δύναμη σε σχέση με το μοντέλο διπλής συμμετρίας). Οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων για τα μοντέλα διπλής και μονής συμμετρίας ήταν ασήμαντες.

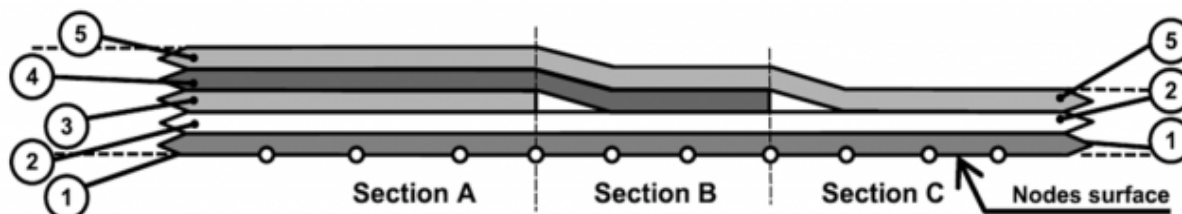


Σχήμα 4.5 Μοντέλο επίπεδων πεπερασμένων στοιχείων με γεωμετρικά χαρακτηριστικά

4.3 PLY - DROP ANALYSIS

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μοντελοποίηση της γωνιακής μεταβατικής περιοχής του μοντέλου (*transition area B* στο Σχήμα 4.5). Στο Κεφάλαιο 3 όπου μελετήθηκαν τα υλικά της κατασκευής στήριξης, είδαμε πως στο *spar-cap* έχουμε πολυστρωματικό *laminated* υλικό συνολικού πάχους 21,6mm, ενώ στο *shear-web* υλικό τύπου *sandwich* πάχους 17,44mm. Τίθεται λοιπόν το ζήτημα του τρόπου μετάβασης από το ένα υλικό στο άλλο, δεδομένων των διαφορών στο πάχος αλλά και στη δομή.

Η τεχνική που ακολουθείται σε τέτοιες περιπτώσεις στα σύνθετα υλικά είναι η ανάλυση με τη μέθοδο *ply - drop* (*ply - drop analysis*). Η μέθοδος αυτή συνιστά έναν σταδιακό τερματισμό κάποιων συγκεκριμένων στρώσεων ενός σύνθετου υλικού, στη περίπτωση που επιδιώκεται μείωση του πάχους της κατασκευής από τον σχεδιασμό (Σχήμα 4.6). Η μείωση των στρώσεων (*plies*) γίνεται ασφαλώς από το παχύ στο λεπτότερο μέρος και μέσα σε κάποιο ορισμένο μήκος, που εξαρτάται από το πάχος των στρώσεων που πρέπει να αφαιρεθούν. Τα σημεία στα οποία τερματίζονται οι στρώσεις είναι συνήθως σημεία με συγκεντρώσεις τάσεων και μελέτες έχουν δείξει πως συχνά είναι σημεία που ξεκινούν αστοχίες με τη μορφή αποκόλλησης των στρώσεων (*delamination*) [27].

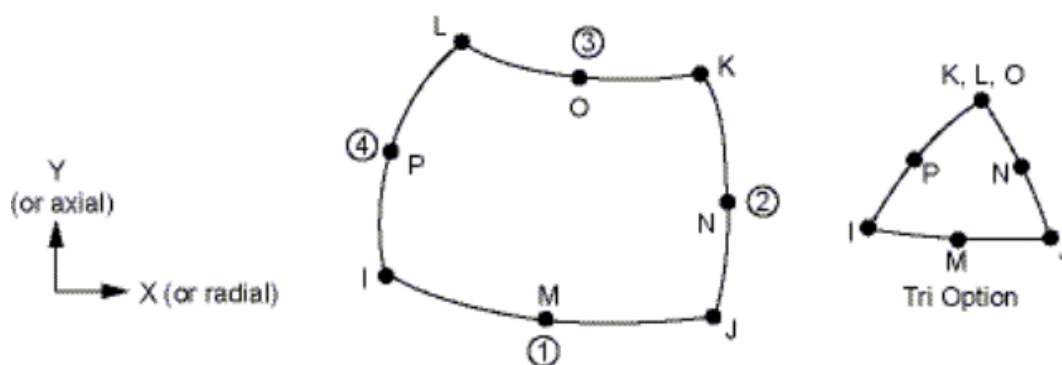


Σχήμα 4.6 Πολυστρωματικό υλικό με *ply - drop analysis*

Στη περίπτωση της δικής μας ανάλυσης έπρεπε να αντιμετωπίσουμε το ζήτημα της ανομοιομορφίας των υλικών, αφού ήταν αναγκαία μία μετάβαση από *laminated* υλικό σε *sandwich* υλικό και οι περισσότερες στρώσεις δεν συνεχίζουν από το ένα στο άλλο. Επίσης ένα ενδιαφέρον και απαιτητικό θέμα στην *ply - drop* ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ήταν ότι η μετάβαση στο μηχανισμό του πτερυγίου λαμβάνει χώρα πάνω σε μία καμπύλη και όχι σε ευθεία, αφού στο σημείο που τερματίζουν οι στρώσεις του *spar-cap* και ξεκινούν οι στρώσεις του *shear-web* υπάρχει γωνία (βλ. §4.4).

4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΕΠΙΠΕΔΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

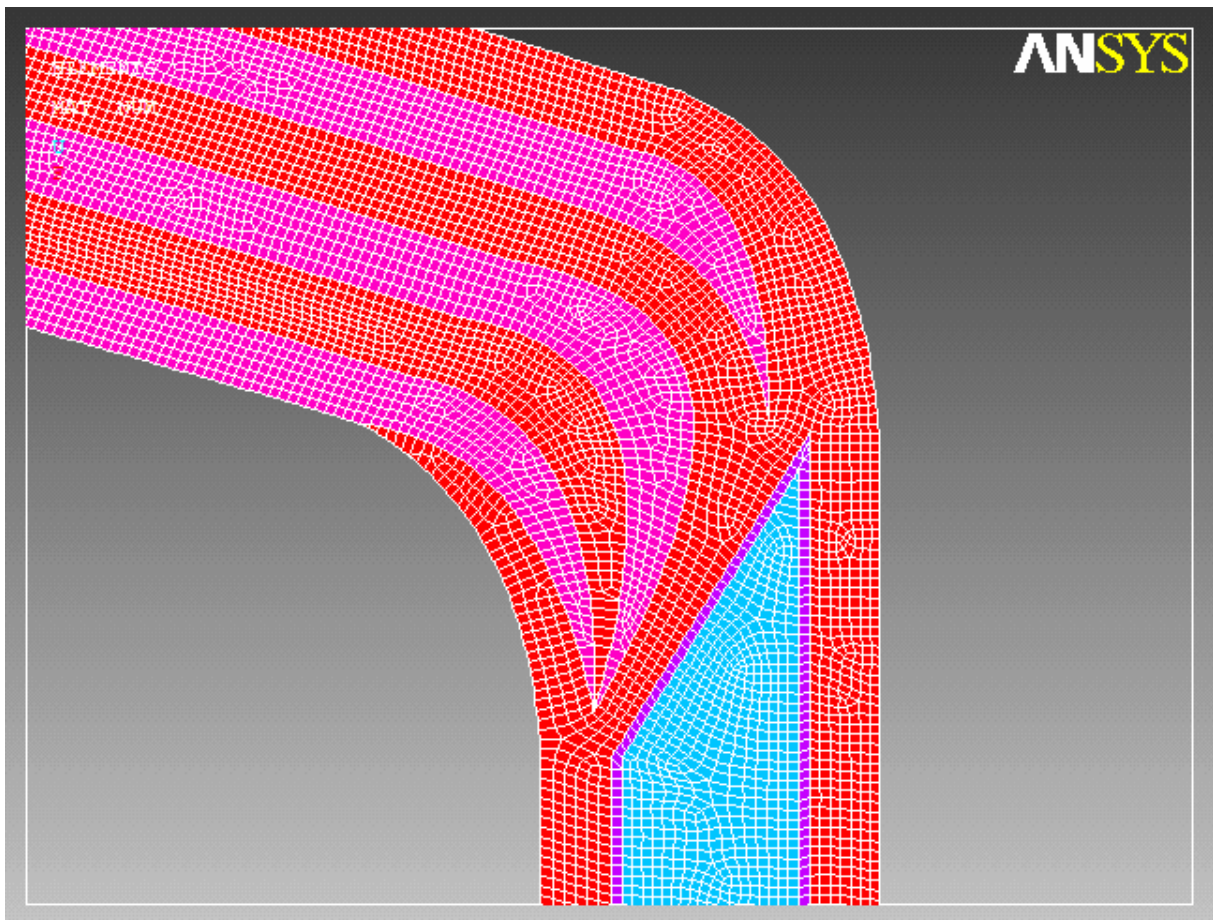
Αρχικά μελετήθηκαν διάφορα μοντέλα δύο διαστάσεων (*Solid Plane Finite Element Analysis*) με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 11.0 [23]. Σε όλα τα μοντέλα εφαρμόστηκαν τα υλικά του Κεφαλαίου 3 ως προς τις ιδιότητες αλλά και τις στρώσεις. Μετά από δοκιμές διάφορων επίπεδων στοιχείων του λογισμικού, χρησιμοποιήθηκε τελικώς το στοιχείο *plane 183*, το οποίο είναι ένα ανώτερης τάξης, επίπεδο, 8-κομβικό στοιχείο (ή 6-κομβικό για τα τριγωνικά) (Σχήμα 4.7), με τους κόμβους στις κορυφές του και στα μέσα των πλευρών του. Το *plane 183* έχει πλήρες τετραγωνικό πολυώνυμο παρεμβολής *Lagrange* σε καμπυλόγραμμες συντεταγμένες, και είναι κατάλληλο για γεωμετρίες και διακριτοποιήσεις με ιδιομορφίες (*irregular meshes*) που συνήθως προέρχονται από σχεδιαστικά λογισμικά τύπου CAD.



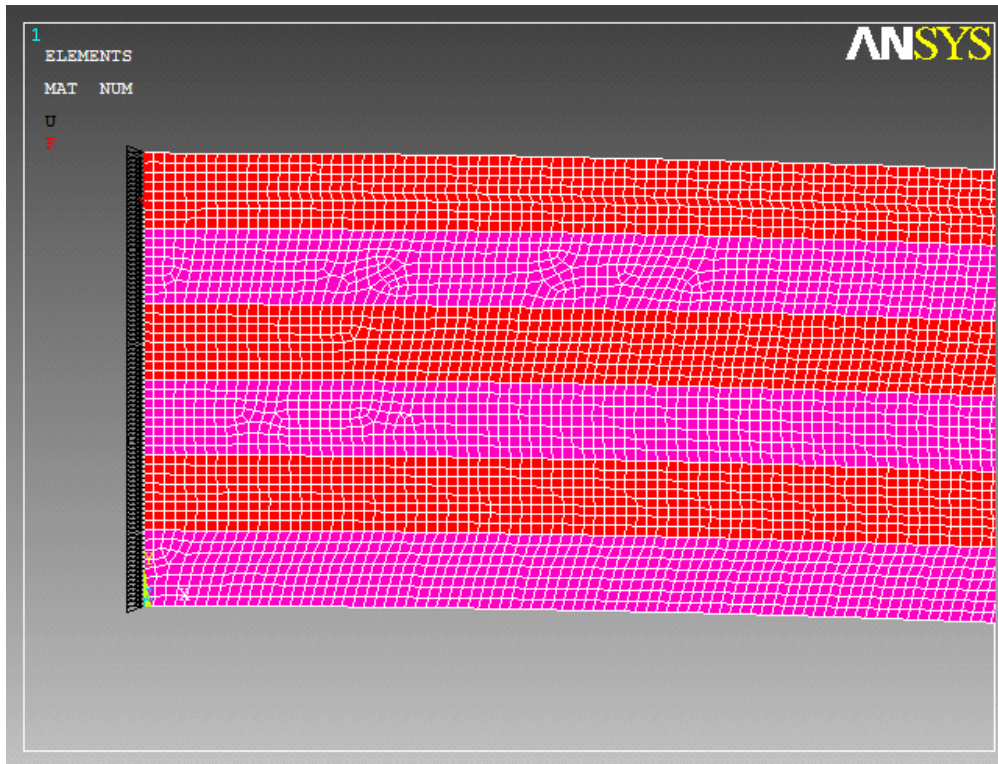
Σχήμα 4.7 Επίπεδο στοιχείο *plane 183*

Σε κάθε κόμβο υπάρχουν δύο μετακινησιακοί βαθμοί ελευθερίας κατά X και Y, άρα συνολικά 16 για το τετραπλευρικό και 12 για το τριγωνικό στοιχείο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επίπεδο στοιχείο με υπόθεση επίπεδης έντασης και επίπεδης παραμόρφωσης αλλά και ως αξονοσυμμετρικό στοιχείο. Επίσης ανταποκρίνεται σε ιδιότητες πλαστικότητας, υπερελαστικότητας, ερπυσμού, υποθέσεις μεγάλων μετατοπίσεων και μεγάλων παραμορφώσεων και έχει τη δυνατότητα σύνθετων σχηματισμών για προσομοιώσεις σχεδόν ασυμπιέστων ελαστοπλαστικών υλικών και πλήρως ασυμπιέστων υπερελαστικών υλικών.

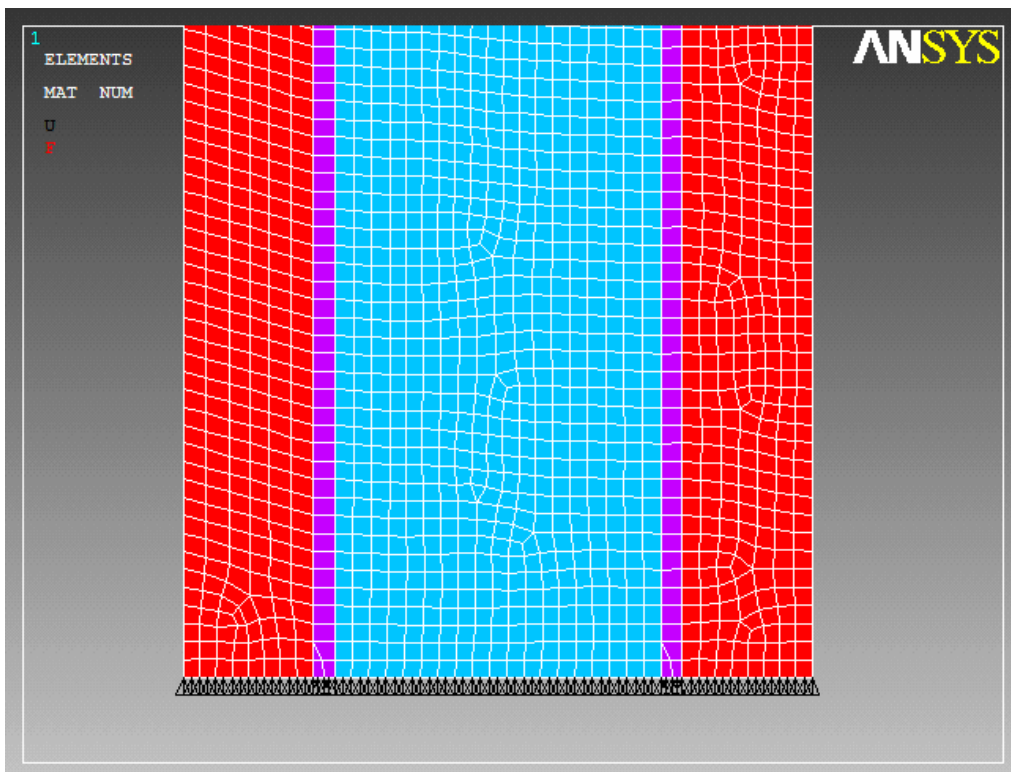
Σε μία προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα που προκύπτει από τη χρήση των προσεγγιστικών παρεμβολικών τύπων, το τελικό επίπεδο μοντέλο μελετήθηκε με μία πολύ πυκνή διακριτοποίηση (*very fine mesh*), με το μέγιστο μέγεθος κάθε πεπερασμένου στοιχείου να είναι 0,5mm. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 39.230 στοιχεία σε όλο τον κάναβο. Η διακριτοποίηση στις περιοχές A, B και C (βλ. Σχήμα 4.5) είναι εμφανής στις Εικόνες 4.8 - 4.10.



Εικόνα 4.8 Διακριτοποίηση του μοντέλου στη περιοχή B, όπου φαίνεται και ο *ply-drop* σχεδιασμός που πραγματοποιήθηκε



Εικόνα 4.9 Διακριτοποίηση του μοντέλου στη περιοχή A, με εμφανείς τις στρώσεις του *laminate* υλικού



Εικόνα 4.10 Διακριτοποίηση του μοντέλου στη περιοχή C, με εμφανή τη δομή του υλικού *sandwich*

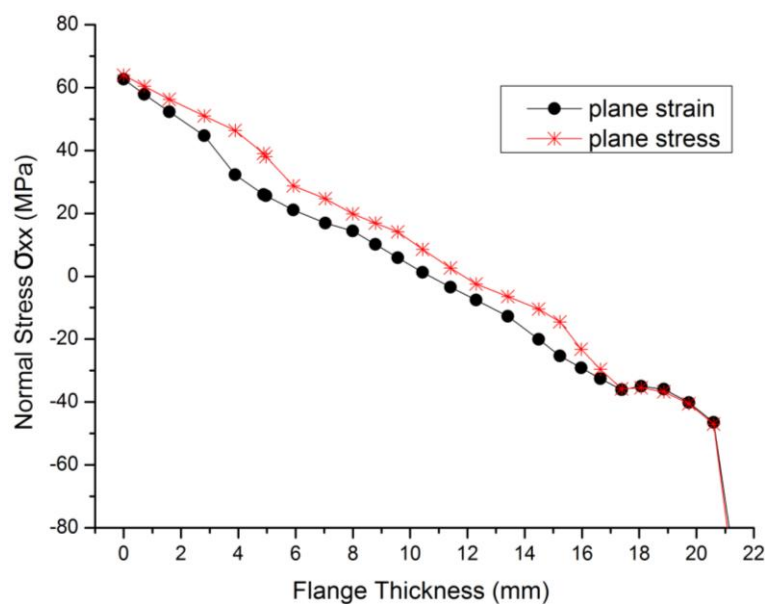
Συγκεκριμένα στην Εικόνα 4.8 βλέπουμε την περιοχή μετάβασης (περιοχή Β - Σχήμα 4.5) όπου εφαρμόστηκε σχεδιασμός και ανάλυση με τη μέθοδο *ply-drop* (βλ. §4.3). Για να πραγματοποιηθεί η αλλαγή του πάχους από 21,6mm (*flange*) σε 17,44mm (*shear-web*) έπρεπε κάποιες στρώσεις του *laminated* υλικού να “σβήσουν” σταδιακά, έτσι ώστε να δημιουργούνται ομαλές διαδρομές των τάσεων. Σκόπιμα επιλέχθηκε να συνεχίζουν οι στρώσεις από υλικό με ίνες σε τρεις διευθύνσεις που περικλείουν τον πυρήνα του sandwich υλικού, έτσι ώστε να ενισχυθεί το ασθενές *balsa* υλικό. Ο πυρήνας έχει ένα τριγωνικό σχήμα στη περιοχή όπου τελειώνει για να ομαλοποιηθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις και να αποφευχθούν οι συγκεντρώσεις. Με παρόμοιο τρόπο σχεδιάζονται και τα μοντέλα που προορίζονται για πείραμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.11.



Εικόνα 4.11 Πειραματικό μοντέλο με *ply-drop* στη μεταβατική περιοχή

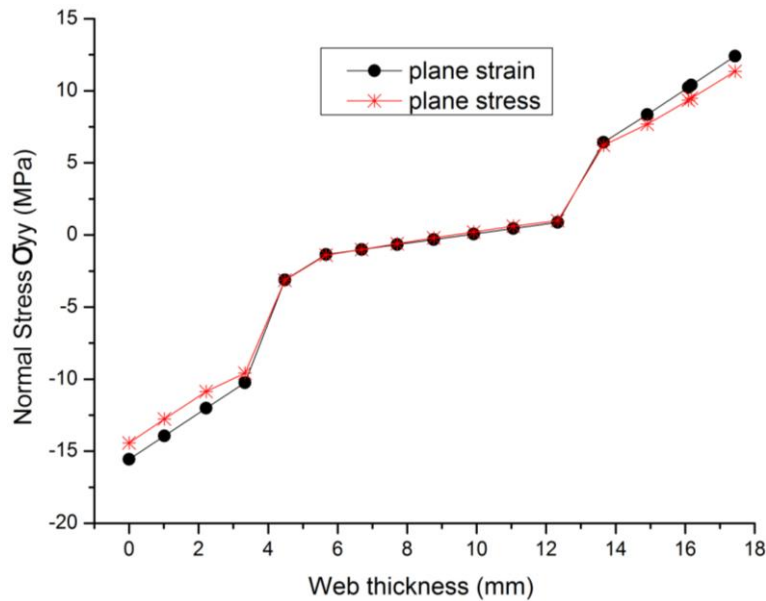
Όσον αφορά τις Εικόνες 4.9 και 4.10, εμφανίζονται οι υπόλοιπες δύο περιοχές του μοντέλου που μας ενδιαφέρουν, που είναι και οι περιοχές στις οποίες εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος (βλ. §4.2). Στην περιοχή C και σε όλο το *shear-web* όπου υπάρχει το υλικό *sandwich* έχει γίνει μία αλλαγή σε σχέση με τα δεδομένα του Πίνακα 3.4 (§3.5) και της βιβλιογραφίας [11], αφού όπως και στην προηγούμενη εργασία του γράφοντος [1,2] έχουν αφαιρεθεί οι ακραίες στρώσεις *gel* και υλικού με ίνες τυχούσης διευσθύνσεως και έχουν προστεθεί δύο στρώσεις ίσου συνολικού πάχους εκατέρωθεν του πυρήνα, από υλικό με ίνες τυχούσης διευσθύνσεως. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η αντοχή του *shear-web* σε λυγισμό και ενισχύεται ο πυρήνας που αποτελείται από ασθενές υλικό και είναι ευαίσθητος σε ρωγμές (*cracks*).

Αρχικός σκοπός της ανάλυσης ήταν να προκύψουν η κατανομή των τάσεων και οι μετατοπίσεις στις τρεις περιοχές ανάλυσης του φορέα A, B και C (Σχήμα 4.5). Όλες οι τάσεις έχουν υπολογιστεί διαμέσου του πάχους της εκάστοτε περιοχής. Η περιοχή A είναι αυτή στην οποία ασκείται το φορτίο και αυτή με τις μεγαλύτερες δρώσες τάσεις, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.12, με θλίψη στη πάνω ίνα και εφελκυσμό στην κάτω. Στην περιοχή A και συγκεκριμένα στην πάνω ίνα (θλίψη) εμφανίστηκε η μεγαλύτερη ορθή τάση της ανάλυσης ($\sigma_{xx} = -62,5\text{MPa}$). Αυτό είναι και το σημείο όπου ξεκινά η αστοχία σε μορφή αποστρωματοποίησης στο μηχανισμό στήριξης σύμφωνα με ανάλογες πειραματικές και θεωρητικές μελέτες. Όπως μπορούμε να δούμε οι διαφορές μεταξύ επίπεδης παραμόρφωσης (*plane strain*) και επίπεδης έντασης (*plane stress*) είναι αμελητέες.



Διάγραμμα 4.12 Ορθή τάση (σ_{xx}) στη περιοχή A

Στην περιοχή C και στο *shear-web* κυριαρχούν οι ορθές τάσεις, όπως και στη περιοχή A, με τις διατμητικές τάσεις της περιοχής να είναι αμελητέες. Η κατανομή των τάσεων σ_{yy} φαίνεται στο Διάγραμμα 4.13. Από τη καμπύλη διακρίνουμε πως οι στρώσεις εκατέρωθεν του πυρήνα αναλαμβάνουν σχεδόν από μόνες τους τις ορθές τάσεις με τον πυρήνα να έχει σχεδόν μηδενική καταπόνηση. Η αριστερή ίνα θλίβεται και η δεξιά εφελκύεται.

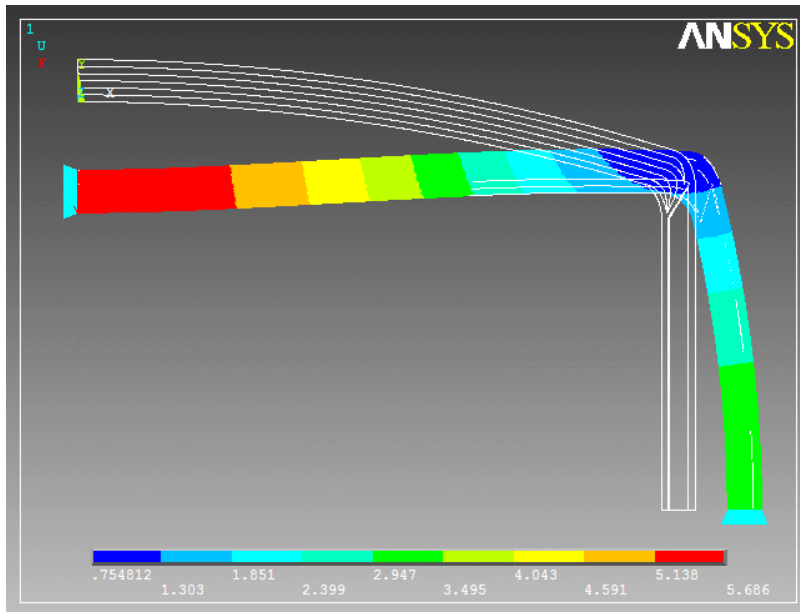


Διάγραμμα 4.13 Ορθή τάση (σ_{yy}) στη περιοχή C

Όσον αφορά τις μετατοπίσεις, μετρήθηκαν στις περιοχές A και C και αποτελούν ουσιαστικά τα βέλη κάμψεως του *spar-cap* και του *shear-web* ως προς τον διαμήκη άξονα Z (Πίνακας 4.14). Οι μετατοπίσεις αυτές οδηγούν το *box-shape spar* σε ένα σχήμα οβάλ όσο αυξάνεται η φόρτιση, φαινόμενο το οποίο αποκαλείται *Brazier effect* [12]. Η παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα φαίνεται στην Εικόνα 4.15 μαζί με τα μεγέθη των μετατοπίσεων.

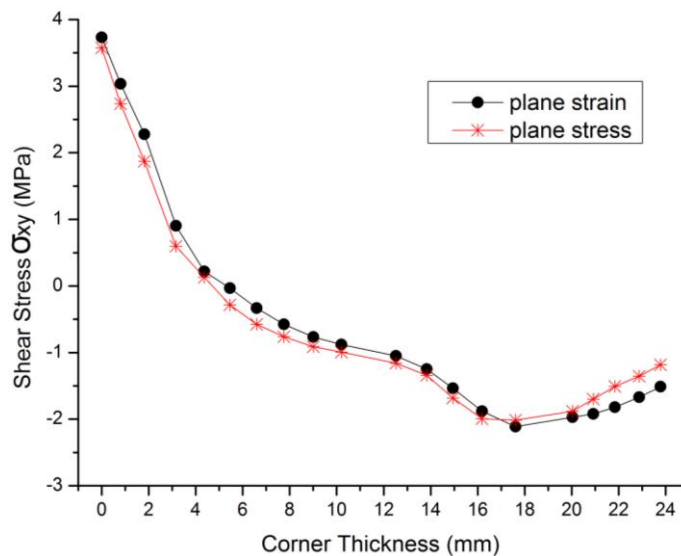
	Μετατοπίσεις	
	v (Y)	u (X)
περιοχή A (<i>spar-cap</i>)	-5.68 mm	—
περιοχή C (<i>shear-web</i>)	—	3.38 mm

Πίνακας 4.14 Μετατοπίσεις σύμφωνα με το καθολικό σύστημα αναφοράς



Εικόνα 4.15 Παραμορφωμένη κατάσταση μοντέλου και μετατοπίσεις (*deformed shape*)

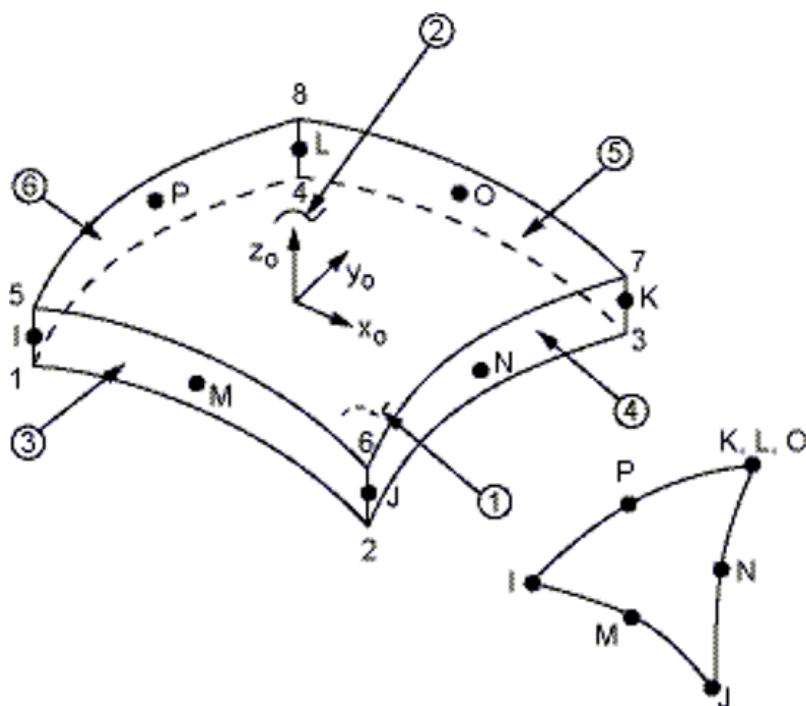
Η περιοχή Β αποτελεί την περιοχή μετάβασης από το πολυστρωματικό στο *sandwich* υλικό. Κυριαρχεί το φαινόμενο της διάτμησης έναντι της κάμψης, συνεπώς στο Διάγραμμα 4.16 παρουσιάζονται οι τάσεις σ_{xy} . Παρατηρούμε ότι η καμπύλη των τάσεων διαμέσου του πάχους είναι αρκετά ομαλή χωρίς πολλές ιδιομορφίες, κάτι που οφείλεται στον *ply-drop* σχεδιασμό που πραγματοποιήθηκε, όπως επίσης και στο πολύ πυκνό *meshing* του καννάβου. Σε μία προσομοίωση χωρίς *ply-drop* αλλά με μία λεπτή περιοχή μετάβασης (*gel*) από το ένα υλικό στο άλλο με κινηματικές δεσμεύσεις [1,2], τα αποτελέσματα είναι τελείως διαφορετικά, χωρίς καμία σύγκλιση, με πολλές ιδιομορφίες και συγκεντρώσεις τάσεων (*stress concentration*).



Διάγραμμα 4.16 Διατμητική τάση (σ_{xy}) στη περιοχή Β

4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

Η προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (*3-D Shell Finite Element Analysis*) είναι μία διαδομένη τεχνική στις εφαρμογές των ανεμογεννητριών και κυρίως σε αυτές που αφορούν ολόκληρο το πτερόγιο σαν πρόβολο. Στην ανάλυσή μας χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο *shell 281*, ένα στοιχείο κατάλληλο για λεπτές κελυφωτές κατασκευές από σύνθετα υλικά, πολυστρωματικά και *sandwich*. Είναι ένα 8-κομβικό στοιχείο με 6 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο: τρεις μετακινησιακούς κατά X,Y και Z και τρεις στροφικούς γύρω από τους X,Y και Z άξονες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.17. Ανταποκρίνεται σε γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις με την υπόθεση των μεγάλων παραμορφώσεων (*large strain non-linear analysis*).



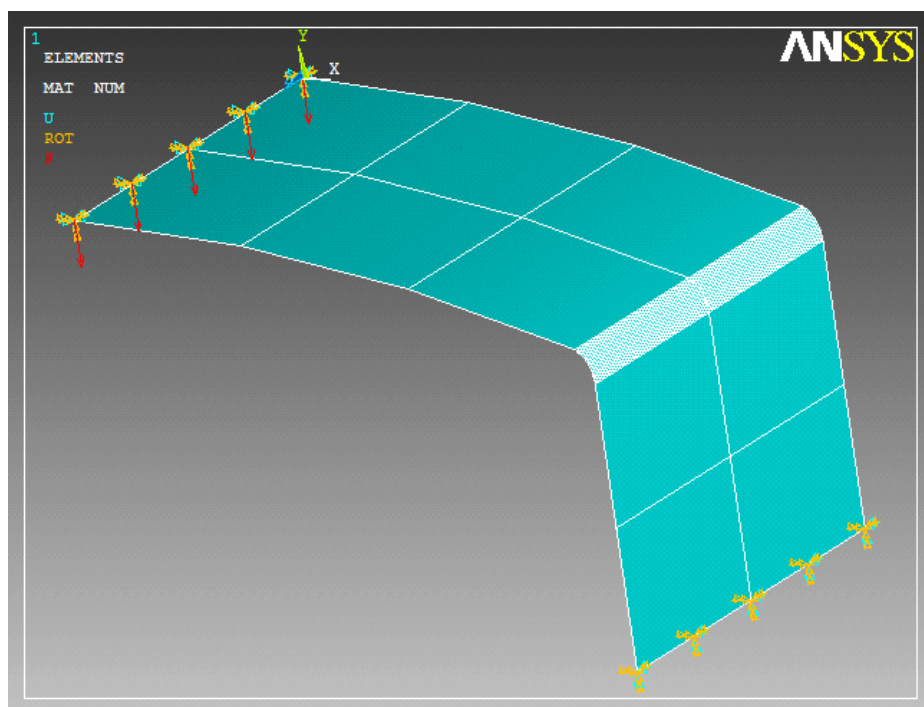
Σχήμα 4.17 Στοιχείο κελύφους *shell 281*

Το συγκεκριμένο στοιχείο χρησιμοποιεί την θεωρία του *Mindlin* για την εισαγωγή της διατμητικής παραμόρφωσης στον σχηματισμό των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων [28]. Ο *Mindlin* αντίθετα από την ελαστική θεωρία πλακών, θεωρεί ότι οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες αλλά όχι κάθετες στην μέση επιφάνεια. Οπότε η μέση στροφή μιας διατομής λαμβάνεται σαν το άθροισμα μιας στροφής στην οποία η διατομή θεωρείται κάθετη στη μέση επιφάνεια, συν μία επιπλέον στροφή που οφείλεται

στη διατμητική παραμόρφωση. Η σταθερή στροφή όμως της διατομής σημαίνει ότι η διατμητική παραμόρφωση είναι ομοιόμορφη και άρα και η διατμητική τάση είναι ομοιόμορφη. Συνοπτικά οι τρεις βασικές παραδοχές της θεωρίας του Mindlin είναι οι ακόλουθες:

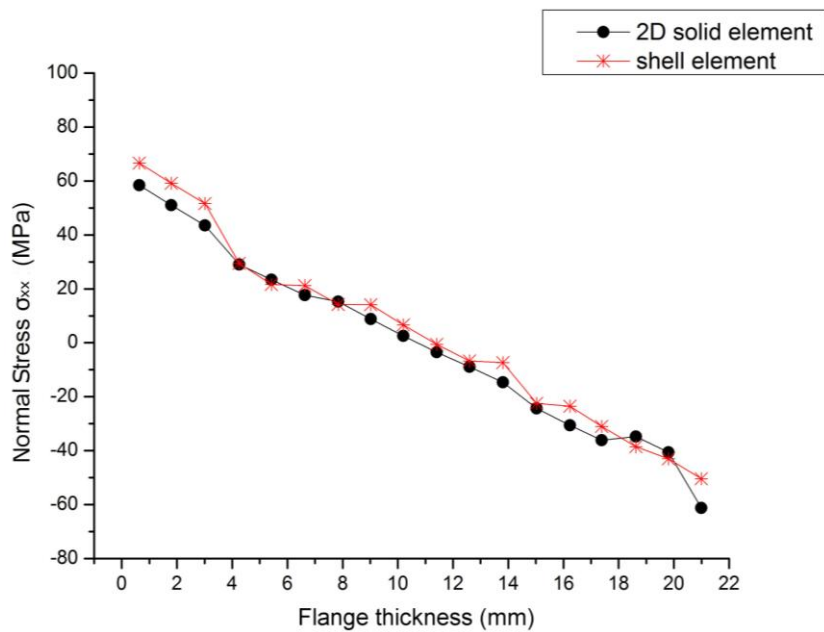
- i. Οι μετατοπίσεις της πλάκας είναι μικρές σε σχέση με το πάχος της
- ii. Τα κάθετα επίπεδα στην μέση επιφάνεια της πλάκας παραμένουν επίπεδα μετά την παραμόρφωση αλλά όχι κάθετα στη μέση επιφάνεια
- iii. Οι κάθετες τάσεις στη μέση επιφάνεια είναι αμελητέες.

Προϋπόθεση για να ικανοποιούνται οι παραπάνω παραδοχές και να οδηγηθούμε σε σωστές λύσεις είναι το μεγάλο *aspect ratio* κάθε στοιχείου κελύφους, δηλαδή ο λόγος της μίας από τις δύο πλευρές της επιφάνειας του στοιχείου προς το πάχος του. Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε (Εικόνα 4.18) ο λόγος αυτός διατηρείται παντού μεγαλύτερος του 5, για να μπορεί το στοιχείο να καμφθεί καταλλήλως και να αποδώσει τα κατάλληλα αποτελέσματα. Η πύκνωση στη περιοχή μετάβασης οφείλεται στις πολλές περιοχές που φτιάχτηκαν έτσι ώστε να εφαρμοστεί παρόμοιος *ply-drop* σχεδιασμός όπως στα επίπεδα στοιχεία.

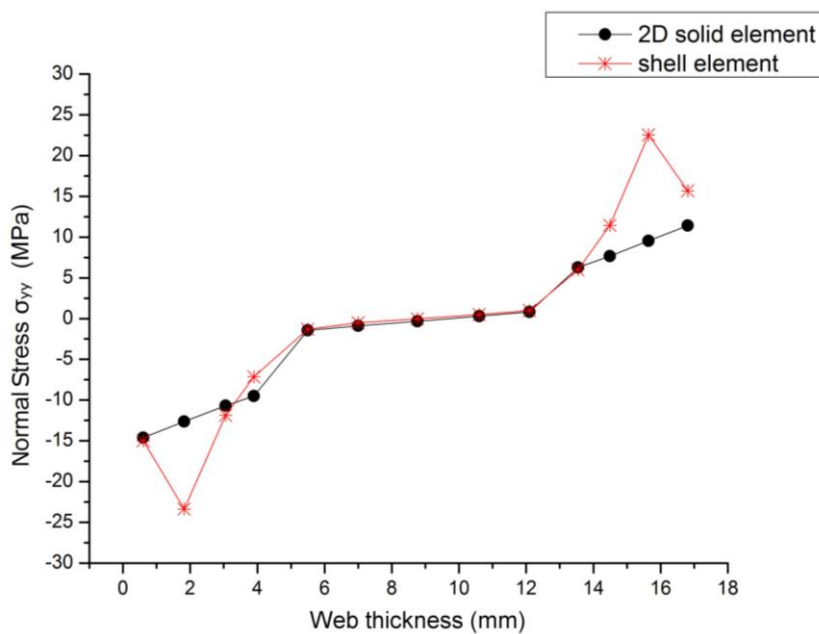


Εικόνα 4.18 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κελύφους

Όλες οι τάσεις που υπολογίστηκαν με τα στοιχεία κελύφους αφορούν την μέση επιφάνεια κάθε στρώσης και συγκρίνονται με τις τάσεις που προέκυψαν από τα επίπεδα στοιχεία στις αντίστοιχες θέσεις. Στις περιοχές A και C όπως έχει προαναφερθεί, κυριαρχούν οι ορθές τάσεις λόγω κάμψης και παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση ανάμεσα στην επίπεδη και την τρισδιάστατη ανάλυση (Διάγραμμα 4.19 και 4.20).

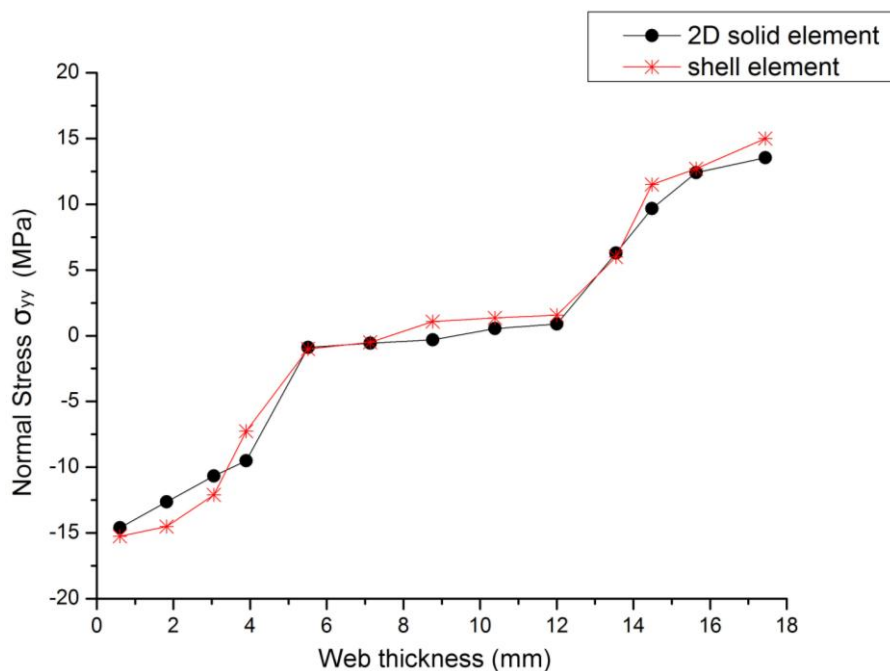


Διάγραμμα 4.19 Ορθή τάση (σ_{xx}) στη περιοχή A



Διάγραμμα 4.20 Ορθή τάση (σ_{yy}) στη περιοχή C

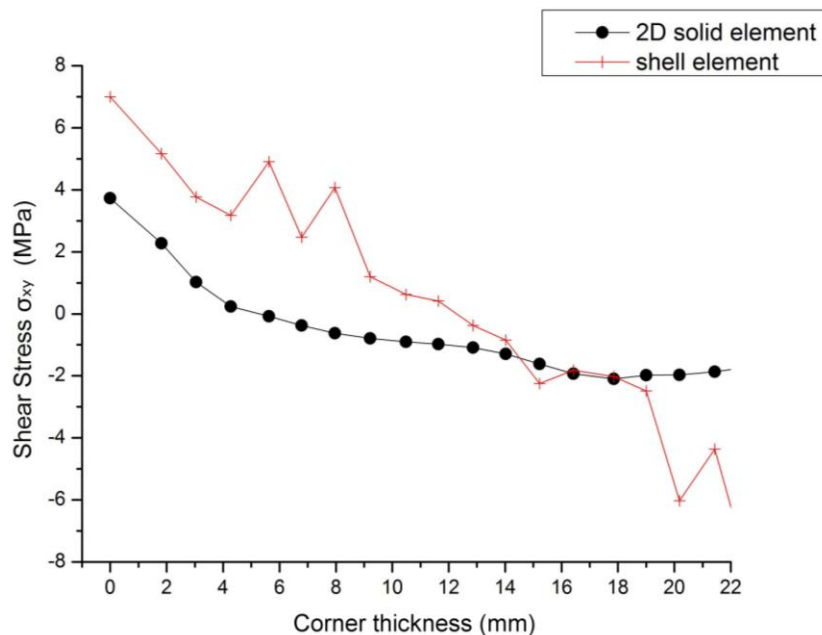
Στο Διάγραμμα 4.20 που αφορά τις τάσεις εντός του πάχους του *shear-web* παρατηρείται μία αύξηση των τάσεων στις στρώσεις του *tri-axial* υλικού που περιβάλλει τον πυρήνα της *sandwich* δομής στην περιοχή C. Συγκεκριμένα η αύξηση μετρήθηκε στη στρώση που έχει τις ενισχυτικές ίνες σε διεύθυνση 0°, δηλαδή στην ίδια διεύθυνση με την τροχιά των τάσεων σ_y . Οι ίνες που βρίσκονται στην ίδια διεύθυνση με τις τάσεις λαμβάνουν μεγαλύτερη ένταση σε σχέση με τις ίνες που τοποθετούνται υπό γωνία και αυτό φάνηκε μόνο στα στοιχεία κελύφους όπου εισέρχεται και η γωνία των ινών στους κώδικες της ανάλυσης εκτός από το μέτρο ελαστικότητας του κάθε υλικού. Σε αρκετές μελέτες τοποθετείται *bi-axial* υλικό ($\pm 45^\circ$) εκατέρωθεν του πυρήνα για αυτόν το λόγο [22]. Πραγματοποιήθηκε η μετατροπή του *tri-axial* σε *bi-axial* στο μοντέλο της ανάλυσης μας και προέκυψε το διάγραμμα των τάσεων που φαίνεται στο Διάγραμμα 4.21, όπου οι απότομες αλλαγές των τάσεων δεν εμφανίζονται πλέον.



Διάγραμμα 4.21 Ορθή τάση (σ_{yy}) στη περιοχή C με μετατροπή του υλικού sandwich

Στη γωνιακή περιοχή μετάβασης (περιοχή Β) συνυπάρχουν τα φαινόμενα της διάτμησης και της κάμψης. Τα σχετικά απλά στοιχεία κελύφους όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση δεν έχουν τη δυνατότητα να μοντελοποιήσουν περιοχές με μεγάλη σχεδιαστική λεπτομέρεια και ιδιόμορφη γεωμετρία. Είναι περισσότερο κατάλληλα για προσομοιώσεις ολόκληρων λεπτότοιχων κατασκευών (*global structures*) με ομοιόμορφη σχετικά γεωμετρία, χωρίς πολλές γωνίες και καμπυλότητες. Οι τάσεις που προέκυψαν από αυτά τα στοιχεία δεν συγκλίνουν με τις τάσεις από τα επίπεδα στοιχεία (που είναι πιο κατάλληλα για τη συγκεκριμένη περιοχή) και περιέχουν πολλές ιδιομορφίες και ασυνέχειες (Διάγραμμα 4.22).

Όσον αφορά τις μετατοπίσεις στις περιοχές των συνοριακών συνθηκών (Α και Β) που προέκυψαν με την τρισδιάστατη ανάλυση των στοιχείων κελύφους, σχεδόν ταυτίζονται με αυτές από τα επίπεδα στοιχεία και παρουσιάζονται συγκριτικά στον Πίνακα 4.23.

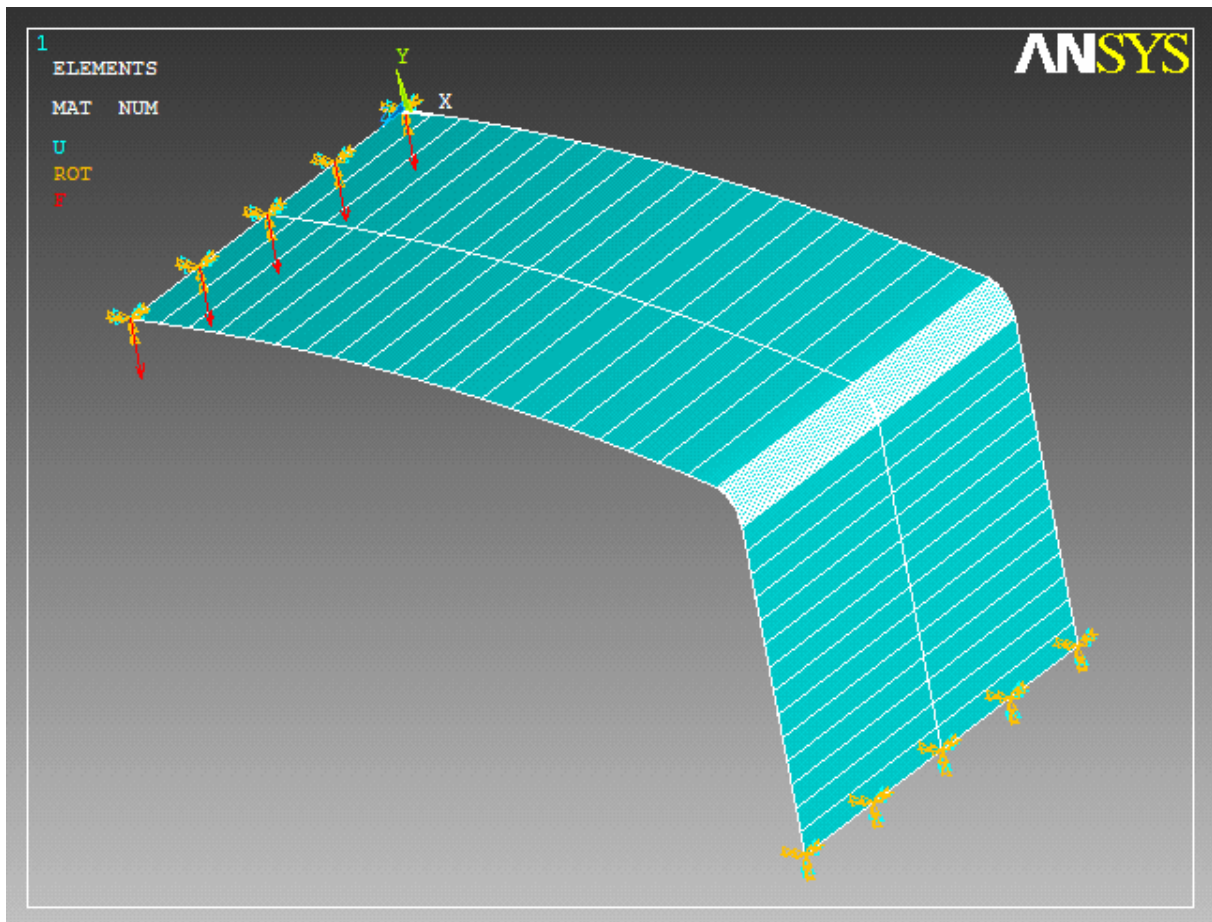


Διάγραμμα 4.22 Διατμητικές τάσεις (σ_{xy}) στη περιοχή Β

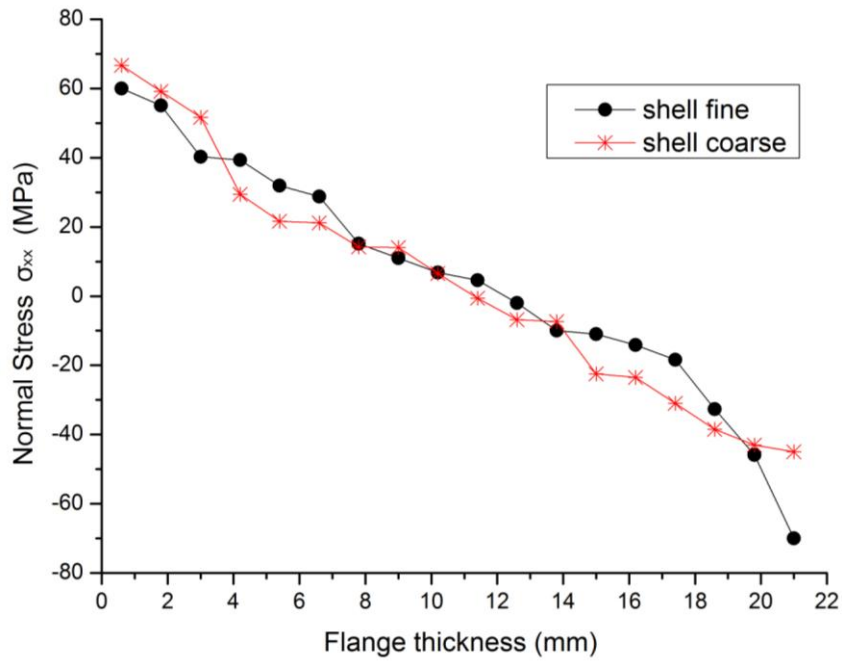
	Επίπεδα στοιχεία		Στοιχεία κελύφους	
	v (Y)	u (X)	v (Y)	u (X)
περιοχή Α (spar-cap)	-5.68 mm	—	-5.688 mm	—
περιοχή C (shear-web)	—	3.38 mm	—	3.192 mm

Πίνακας 4.23 Μετατοπίσεις και σύγκριση των αναλύσεων (ως προς το καθολικό σύστημα αναφοράς)

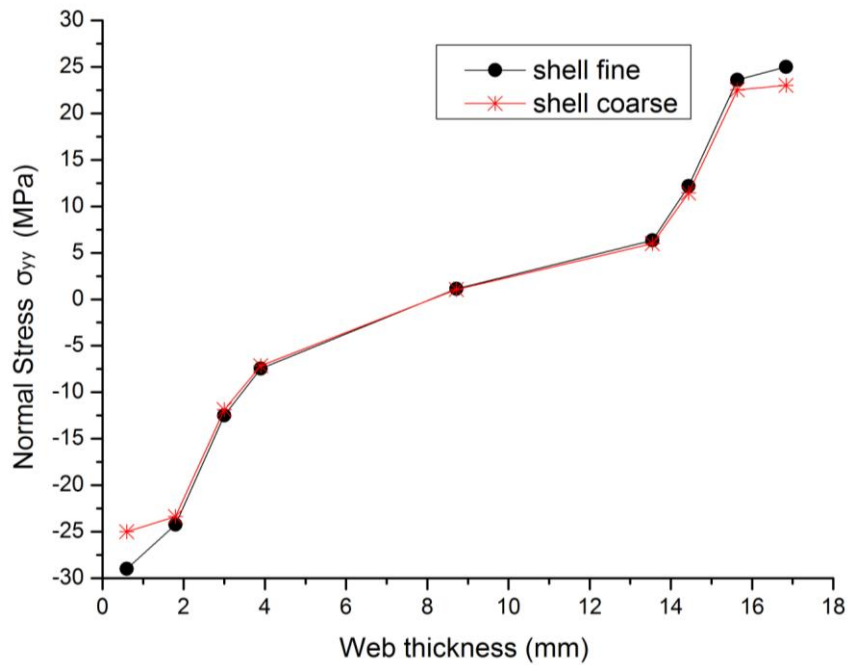
Στις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται η μέθοδος των μετατοπίσεων από το λογισμικό, η οποία υπολογίζει με ακρίβεια τις μετατοπίσεις αλλά με όχι μεγάλη ακρίβεια τις τάσεις [28]. Θεωρήθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μία σύγκριση μεταξύ του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων κελύφους που παρουσιάστηκε παραπάνω, με ένα μοντέλο με πιο πυκνή διακριτοποίηση (*fine mesh*) στο *flange* και το *web* (Εικόνα 4.24) που όμως θα τηρεί τις απαιτήσεις του *aspect ratio* που αναφέρθηκαν στην αρχή της ενότητας. Όπως φαίνεται από τις κατανομές των τάσεων στα Διαγράμματα 4.25 και 4.26 υπάρχει σύγκλιση μεταξύ του αραιού και του πυκνού κάρναβου.



Εικόνα 4.24 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κελύφους με πυκνή διακριτοποίηση (*fine shell*)

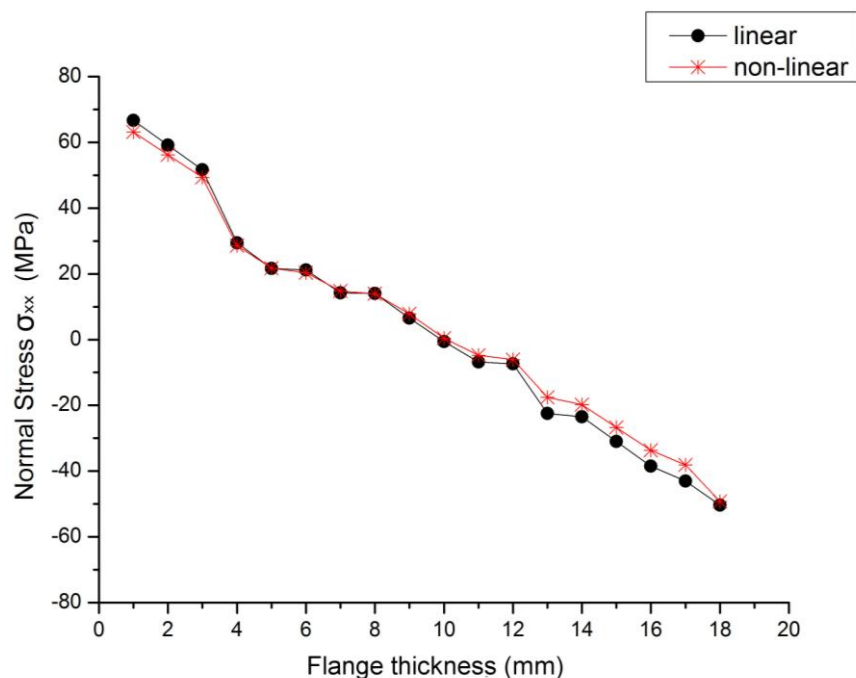


Διάγραμμα 4.25 Ορθή τάση (σ_{xx}) στη περιοχή Α (αραιός και πυκνός κάρναβος)



Διάγραμμα 4.26 Ορθή τάση (σ_{yy}) στη περιοχή C (αραιός και πυκνός κάρναβος)

Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις μοντέλων με επίπεδα στοιχεία και στοιχεία κελύφους θεωρήθηκε σκόπιμο να επιλυθούν και με παραδοχή μη γραμμικής ανάλυσης ως προς τις μετατοπίσεις. Συγκεκριμένα το λογισμικό ANSYS 11.0 διαθέτει την επιλογή επίλυσης ενός μοντέλου με την παραδοχή μεγάλων μετατοπίσεων, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψιν κάποιες πλαστικοποιήσεις ή παραμένουσες παραμορφώσεις που μπορεί να υφίσταται η κατασκευή μετά από κάποια μεγάλη μετατόπιση (βέλος) ή στροφή. Αιτία μπορεί να είναι κάποια κατασκευαστική ατέλεια ή πιθανή μη γραμμικότητα ενός υλικού. Στις εσωτερικές στηρίξεις των πτερυγίων των ανεμογεννητριών έχουν παρατηρηθεί τέτοιου είδους φαινόμενα, αφού όπως έχει προαναφερθεί μετά από κάποια επίπεδα φορτίσεων πραγματοποιείται μία οβαλοποίηση της κατασκευής που ασφαλώς είναι μη αντιστρέψιμη και οδηγεί σε αστοχία (το φαινόμενο αποκαλείται *Brazier effect*). Για το συγκεκριμένο φορτίο της ανάλυσής μας η μη γραμμική ανάλυση δεν έδωσε αλλαγές σε σχέση με τη γραμμική ανάλυση, κάτι το οποίο φανερώνει ότι δεν προκαλούνται τέτοια φαινόμενα. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσεων 4.27 στη περιοχή Α με στοιχεία κελύφους, για γραμμική και μη γραμμική ανάλυση.



Διάγραμμα 4.27 Ορθή τάση (σ_{xx}) στη περιοχή Α (*shell elements*)

4.6 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Με υπολογισμένες πλέον τις τάσεις σε κάθε στρώση της διάταξης και μέσω των πεπερασμένων στοιχείων κελύφους, καθίσταται δυνατή η εφαρμογή κριτηρίων αστοχίας μέσω του ANSYS 11.0 για τα ορθότροπα υλικά της στήριξης του πτερυγίου. Με αυτό τον τρόπο εξάγονται συμπεράσματα για τα μεγέθη των τάσεων που δρουν στην κατασκευή αλλά και για τις στρώσεις των σύνθετων υλικών (ποιες από αυτές είναι περισσότερο ευάλωτες και σε ποιο φορτίο αστοχούν).

Εφαρμόζεται το τετραγωνικό κριτήριο *Tsai - Wu* (1971), ένα γενικό κριτήριο για τρισδιάστατη καταπόνηση που είναι αρκετά αξιόπιστο και χρησιμοποιείται κατά κόρον στα σύνθετα ορθότροπα υλικά. Εκφράζεται με τη μορφή τάσεων και παραμορφώσεων ως εξής [20]:

$$F_{ij}\sigma_i\sigma_j + F_i\sigma_i \leq 1 \quad (6)$$

$$G_{ij}\varepsilon_i\varepsilon_j + G_i\varepsilon_i \leq 1 \quad (7)$$

Θεωρώντας την πρώτη έκφραση ως προς τις τάσεις και αναπτύσσοντας προκύπτει:

$$F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{16}\sigma_1\tau_{12} + 2F_{26}\sigma_2\tau_{12} + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\tau_{12} \leq 1 \quad (8)$$

Η αλλαγή προσήμου της διατμητικής τάσης τ_{12} δεν πρέπει να επηρεάζει το κριτήριο, άρα οι όροι $F_{16}=F_{26}=F_6=0$.

Έτσι η Σχέση 8 απλοποιείται στην:

$$F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 \leq 1 \quad (9)$$

Οι έξι παράγοντες που περιέχονται στη σχέση αυτή συσχετίζονται με τις κρίσιμες τάσεις αστοχίας του υλικού μέσω απλών πειραμάτων μονοαξονικού εφελκυσμού, θλίψης και καθαρής διάτμησης ως εξής:

$$F_{11} = \frac{1}{XX'} \quad (10)$$

$$F_1 = \frac{1}{X} - \frac{1}{X'} \quad (11)$$

$$F_{22} = \frac{1}{YY'} \quad (12)$$

$$F_2 = \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'} \quad (13)$$

$$F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad (14)$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}} \quad (Tsai - Hahn) \quad (15)$$

όπου:

- X τάση αστοχίας σε μονοαξονικό εφελκυσμό κατά X
- X' τάση αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη κατά X
- Y τάση αστοχίας σε μονοαξονικό εφελκυσμό κατά Y
- Y' τάση αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη κατά Y
- S τάση αστοχίας σε καθαρή διάτμηση

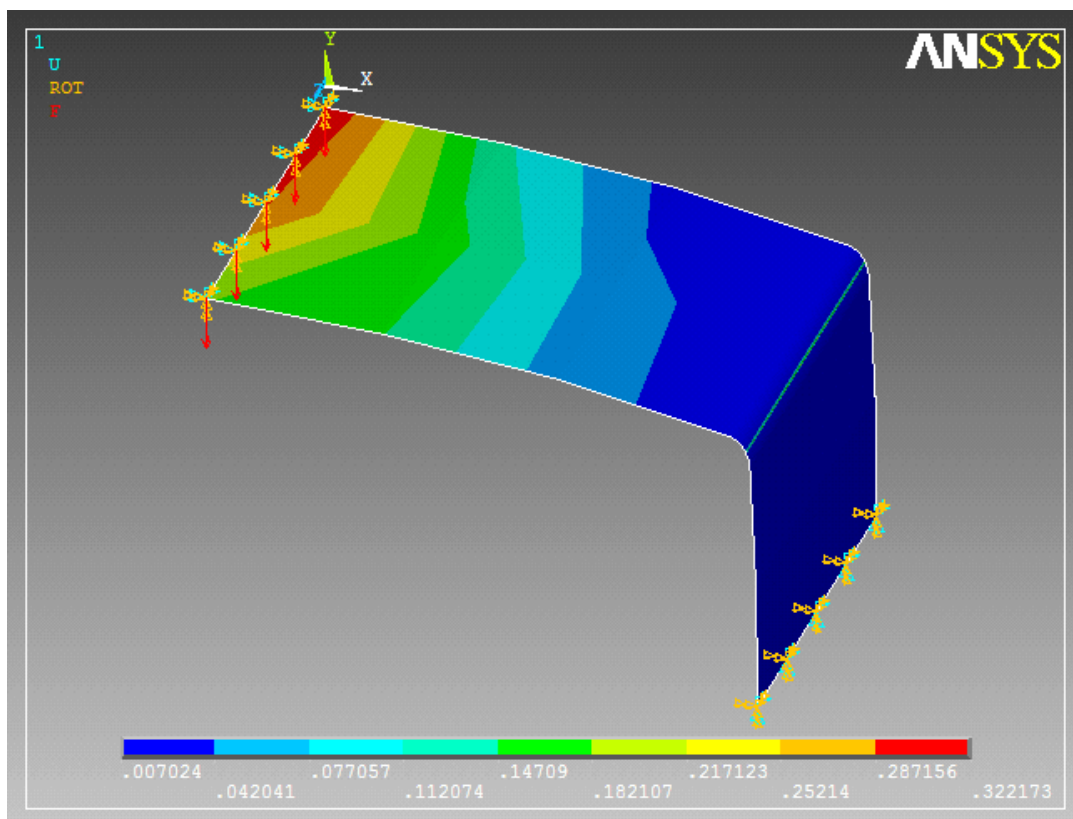
Οι παραπάνω σχέσεις καθώς και ο υπολογισμός τάσεων - παραμορφώσεων στα πολυστρωματικά σύνθετα υλικά αναφέρονται σε μία μόνο στρώση. Επομένως με τέτοιου είδους μεθόδους μπορεί να ελεγχθεί αν θα αστοχήσει κάποια από τις στρώσεις, ή αντίστροφα ποια στρώση θα αστοχήσει πρώτα σε συγκεκριμένο φορτίο. Οι στρώσεις αστοχούν με τη σειρά, ξεκινώντας από τις πιο ευαίσθητες, που είναι συνήθως εκείνες που έχουν ίνες διατεταγμένες κάθετα στη διεύθυνση του φορτίου. Έτσι η αστοχία πρώτης στρώσης μπορεί να συμβεί σε σχετικά μικρό φορτίο, χωρίς το πολυστρωματικό να κινδυνεύει ολοκληρωτικά. Μερικές φορές η επίδραση αστοχίας πρώτης στρώσης μπορεί να μην είναι εμφανής στη μακροσκοπική συμπεριφορά του πολυστρωματικού υλικού. Καθώς όμως αστοχούν περισσότερες στρώσεις η μείωση της δυσκαμψίας γίνεται εμφανής και η απόκριση του υλικού αποκλίνει από την αρχική συμπεριφορά. Εντούτοις το πολυστρωματικό είναι ικανό να φέρει ακόμη φορτία τα οποία προκαλούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από εκείνες που θα προκαλούσαν πριν την αστοχία πρώτης στρώσης. Σταδιακά με αυτόν τον τρόπο αστοχούν όλο και περισσότερες στρώσεις, με αντίστοιχη περαιτέρω μείωση της δυσκαμψίας του υλικού.

Οι αντοχές που χρησιμοποιήθηκαν για το *E-glass/epoxy* υλικό φαίνονται στον Πίνακα 4.28 [20]. Αρχικά έγινε έλεγχος στο μοντέλο για το φορτίο με το οποίο πραγματοποιήθηκαν όλες οι αναλύσεις (δηλαδή 16,25N/mm). Βρέθηκε ότι καμία στρώση

δεν αστοχεί με αυτό το φορτίο και επίσης, όπως αναμενόταν και παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.29, η περιοχή του *spar-cap* παρουσιάζει τους μεγαλύτερους λόγους στο σημείο επιβολής της φόρτισης (περιοχή Α), όπου βεβαίως βρέθηκαν και οι μέγιστες τάσεις του μοντέλου.

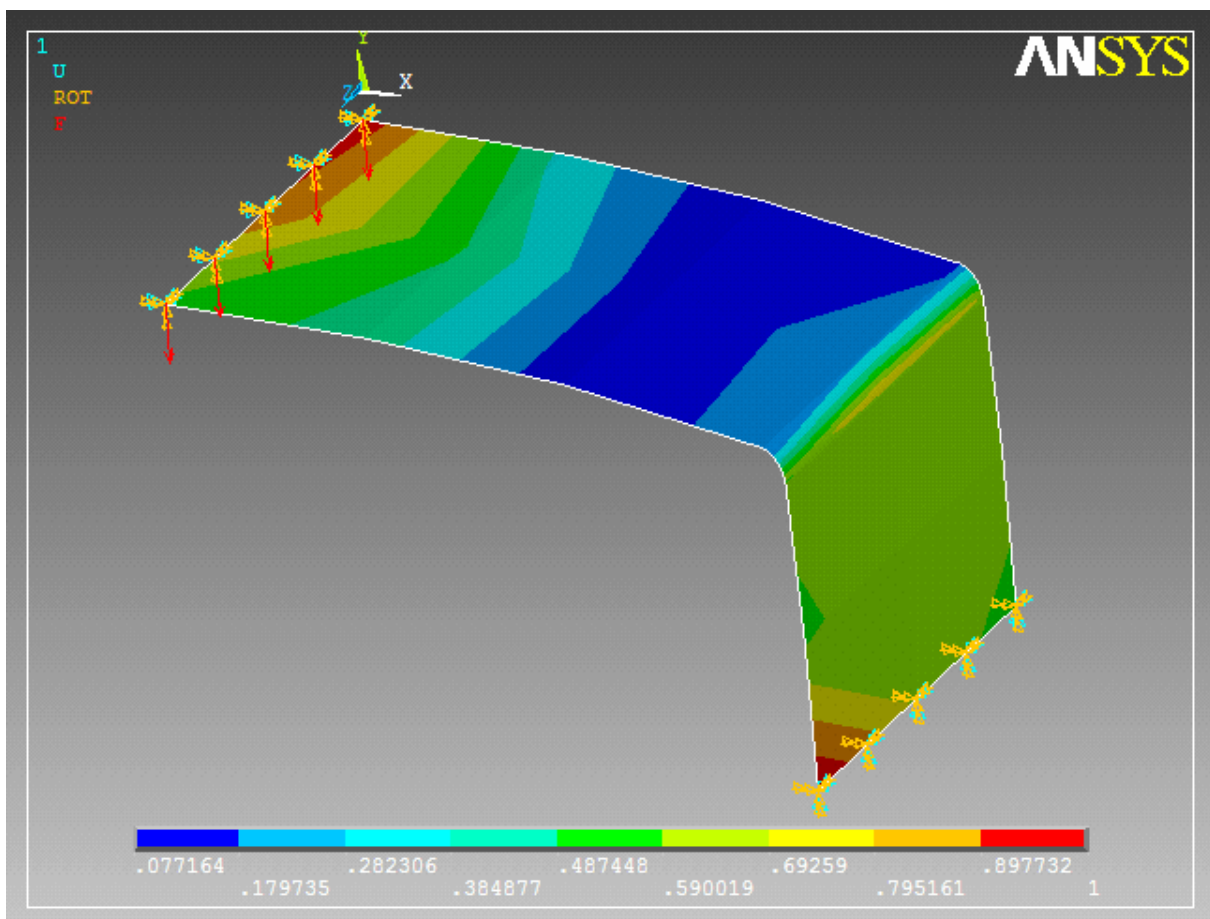
Τάσεις αστοχίας <i>E-glass/epoxy</i> (MPa)	
X	1062
X'	610
Y	31
Y'	118
S	72

Πίνακας 4.28 Τάσεις αστοχίας για *GFRP* υλικό



Εικόνα 4.29 Κριτήριο *Tsai-Wu* για φορτίο $N=16.25\text{N/mm}$

Έπειτα διερευνήθηκε το κρίσιμο φορτίο για το οποίο αστοχεί κάποια στρώση του μοντέλου. Προέκυψε πως σε φορτίο 49N/mm υπάρχει αστοχία στις περιοχές A και C (Εικόνα 4.30). Συγκεκριμένα στην περιοχή A που υπάρχει το *laminated* υλικό αστόχησε η 15^η στρώση (στρώση με ίνες σε διεύθυνση -45°), ενώ στην περιοχή C του *sandwich* υλικού αστόχησε η εξωτερική στρώση (ίνες σε διεύθυνση 45°). Οι περιοχές αυτές βρίσκονται πάνω στα επίπεδα συμμετρίας και λόγω των στρώσεων στις οποίες παρουσιάστηκε αστοχία γίνεται αντιληπτό ότι σημαντικότερο ρόλο παίζει ο συνδυασμός των τάσεων σε κάθε στρώση (εναλλαγές προσήμων στο κριτήριο) παρά το μέγεθος των τάσεων οι οποίες κάθε φορά κυριαρχούν (ορθές ή διατμητικές).



Εικόνα 4.30 Κριτήριο Tsai-Wu για φορτίο $N = 49\text{N/mm}$

4.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ ΚΑΙ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Με την άυξηση των τελευταίων ετών στο μέγεθος των πτερυγίων, αναζητούνται λύσεις για τις νέες απαιτήσεις που αυτή προκαλεί. Αύξηση στο μήκος ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας σημαίνει εκθετική αύξηση των ιδίων βαρών του και βέβαια ανάγκη για ένα πιο δύσκαμπτο πτερύγιο. Συνεπώς ενίσχυση και στους δύο κύριους τρόπους κάμψευς (*flap - wise* και *edge - wise*). Οι ίνες άνθρακα λόγω των χαρακτηριστικών τους έδωσαν λύση μέχρι στιγμής στο ζήτημα, όντας πιο σκληρές/δύσκαμπτες (μεγαλύτερο μέτρο Ελαστικότητας). Εντούτοις λόγω του υψηλού (παλαιότερα) κόστους και της συχνά χαμηλότερης αντοχής από τις ίνες γυαλιού, χρησιμοποιήθηκαν αρχικά από κοινού με τις ίνες γυαλιού σε υβριδικές κατασκευές πτερυγίων.

Πραγματοποιήθηκε μία σύγκριση ανάμεσα στα δύο ινοπλισμένα πολυμερή (*Glass Fiber Reinforced Plastic - GFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastic - CFRP*) με βάση το μοντέλο από πεπερασμένα στοιχεία κελύφους. Χρησιμοποιήθηκε η ίδια μήτρα από εποξειδική ρητίνη, η ίδια διάταξη των υλικών όσον αφορά τις στρώσεις στο *spar - cap* και το *shear - web*, με μόνη αλλαγή την αντικατάσταση των ινών γυαλιού με ίνες άνθρακα. Οι ιδιότητες των ινών γυαλιού που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση [11] έχουν προέλθει από πειραματικά δεδομένα για τις δεδομένες κατευθύνσεις των ινών και γενικά για τη διάταξη των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Λόγω της ανεπάρκειας αντίστοιχων πειραματικών δεδομένων στη διεθνή βιβλιογραφία, οι ιδιότητες του *CFRP* προέκυψαν με εφαρμογή τύπων από τη θεωρία των συνθέτων υλικών οι οποίοι παρουσιάζονται ακολούθως.

Ως δεδομένα θεωρήθηκαν τα εξής:

- μέτρο Ελαστικότητας ινών E_f
- μέτρο Ελαστικότητας μήτρας E_m
- μέτρο Διατμήσεως ινών G_f
- μέτρο Διατμήσεως μήτρας G_m
- κατ' όγκο περιεκτικότητα ινών u_f
- κατ' όγκο περιεκτικότητα μήτρας u_m

- λόγος Poisson ινών ν_f
- λόγος Poisson μήτρας ν_m

Για το υλικό *CFRP* με ίνες σε διεύθυνση 0° (*uni-axial*) βρέθηκε πρώτα το μέτρο Ελαστικότητας στη διεύθυνση των ινών E_1 από τον νόμο της σύνθεσης (§3.4):

$$E_1 = E_f u_f + E_m u_m \quad (16)$$

Έπειτα ο λόγος Poisson ν_{12} του ορθότροπου υλικού:

$$\nu_{12} = \nu_f u_f + \nu_m u_m \quad (17)$$

Για το εγκάρσιο μέτρο Ελαστικότητας E_2 χρησιμοποιήθηκε η σχέση των *Whitney - Riley* (1967) [29]:

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

όπου χρειάζεται ο εγκάρσιος λόγος Poisson ν_2 , ο οποίος υπολογίστηκε:

$$\frac{1}{\nu_2} = \frac{u_f}{\nu_f} + \frac{u_m}{\nu_m} \quad (19)$$

Όσον αφορά το μέτρο Διατμήσεως εφαρμόστηκε ο τύπος του *Tsai* (1964) [30]:

$$G_{12} = (1 - C) \frac{[2G_f - (G_f - G_m)u_m]}{2G_m + (G_f - G_m)u_m} + C \frac{[G_f(G_f + G_m) - (G_f - G_m)u_m]}{(G_f + G_m) + (G_f - G_m)u_m} \quad (20)$$

όπου C είναι ο συντελεστής γειτνιάσεως/συνάφειας (*contiguity factor*). Ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές από 0 έως 1 και υπολογίστηκε εφαρμόζοντας τη Σχέση 20 με τις πειραματικές τιμές των ιδιοτήτων του υλικού *GFRP* με το οποίο έγινε η ανάλυση (προέκυψε $C = 0.082$).

Για τον υπολογισμό του υλικού *Carbon/Epoxy* με ίνες τυχούσης διευθύνσεως (*random mat fibers*) που χρησιμοποιείται εκατέρωθεν του πυρήνα της δομής *sandwich* στο *shear-web*, έγινε παραδοχή ότι το υλικό συμπεριφέρεται ως ισότροπο και χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα τα αποτελέσματα των παραπάνω τύπων για το *uni-axial*

υλικό, δηλαδή τα E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} . Συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν οι τύποι του *Eisenberg* (1979) [31] για το μέτρο Ελαστικότητας και τον λόγο Poisson:

$$\frac{1}{E} = \frac{(Q_{11} + Q_{22} + 2Q_{12})(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} + 4Q_{66})}{3Q_{11} + 3Q_{22} + 2Q_{12} + 4Q_{66}} \quad (21)$$

$$\nu = \frac{Q_{11} + Q_{22} + 6Q_{12} - 4Q_{66}}{3Q_{11} + 3Q_{22} + 2Q_{12} + 4Q_{66}} \quad (22)$$

όπου: Q_{ij} είναι οι όροι ακαμψίας του μητρώου ελαστικότητας για επίπεδη εντατική κατάσταση που ορίζονται ως εξής [32]:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (23)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (24)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (25)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (26)$$

Ο λόγος Poisson ν_{21} υπολογίστηκε από τη σχέση του *Maxwell*: $E_1\nu_{21} = E_2\nu_{12}$

Τέλος για τον υπολογισμό του υλικού *Carbon/Epoxy* με ίνες σε διευθύνσεις $45^\circ/0^\circ/-45^\circ$ (*tri-axial*) χρησιμοποιήθηκαν και πάλι ως δεδομένα τα αποτελέσματα των τύπων για το *uni-axial* υλικό, δηλαδή τα E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} , και εφαρμόστηκαν οι τύποι στροφής για γωνία 45° [32]:

$$\frac{1}{E_x} = \frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^4 \theta}{E_2} - \frac{2\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_2} \nu_{21} + \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{G_{12}} \quad (27)$$

$$\frac{1}{E_y} = \frac{\sin^4 \theta}{E_1} + \frac{\cos^4 \theta}{E_2} - \frac{2\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_2} \nu_{21} + \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{G_{12}} \quad (28)$$

$$-\frac{v_{yx}}{E_y} = \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_1} + \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_2} - \frac{(\cos^4 \theta + \sin^4 \theta)}{E_2} v_{21} - \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{G_{12}} \quad (29)$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{4 \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_1} + \frac{4 \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{E_2} + \frac{(8 \cos^2 \theta \sin^2 \theta)}{E_2} v_{21} + \frac{(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)^2}{G_{12}} \quad (30)$$

Το υλικό από ανθρακονήματα εφαρμόστηκε σε όλες τις αναλύσεις που είχαν γίνει μέχρι τώρα για το *GFRP* με στοιχεία κελύφους, δηλαδή τασικές αναλύσεις, υπολογισμό μετατοπίσεων και εφαρμογή του κριτηρίου αστοχίας *Tsai - Wu*. Χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες των ινών άνθρακα τύπου AS4-D που εμφανίζονται στον Πίνακα 4.31 [20]. Μετά από εφαρμογή όλων των τύπων που αναφέρθηκαν παραπάνω, προέκυψαν οι ιδιότητες του υλικού *CFRP* που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.32. Όσον αφορά τις αντοχές (κρίσιμες τάσεις) που χρησιμοποιήθηκαν στο κριτήριο αστοχίας, εμφανίζονται στον Πίνακα 4.33 [20].

Ιδιότητες Ινών Άνθρακα AS4-D	
E_f (GPa)	241
E_m (GPa)	3.5
G_f (GPa)	100.42
G_m (GPa)	1.27
ν_f	0.6
ν_m	0.4
ν_f	0.2
ν_m	0.38

Πίνακας 4.31 Ιδιότητες ινών άνθρακα τύπου AS4-D

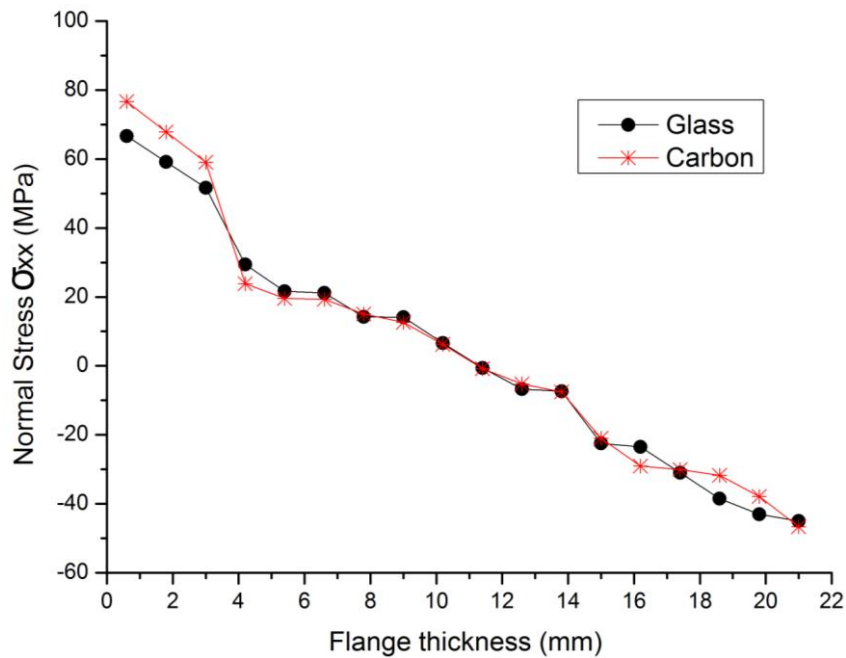
Ιδιότητες	<i>Uni</i>	<i>Tri</i>	<i>Random</i>
E_{xx} (GPa)	146.0	65.0	62.47
E_{yy} (GPa)	18.53	22.5	62.47
G_{xy} (GPa)	9.41	13.46	24.19
ν_{xy}	0.27	0.29	0.29

Πίνακας 4.32 Ιδιότητες υλικού CFRP (Material Properties)

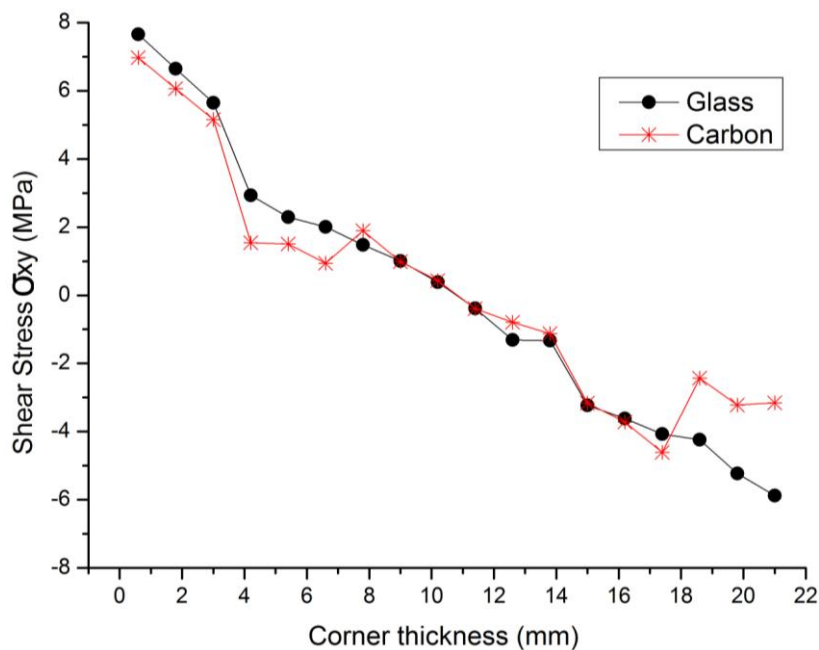
Τάσεις αστοχίας Carbon/epoxy (MPa)	
X	1830
X'	1096
Y	57
Y'	228
S	71

Πίνακας 4.33 Τάσεις αστοχίας για CFRP υλικό

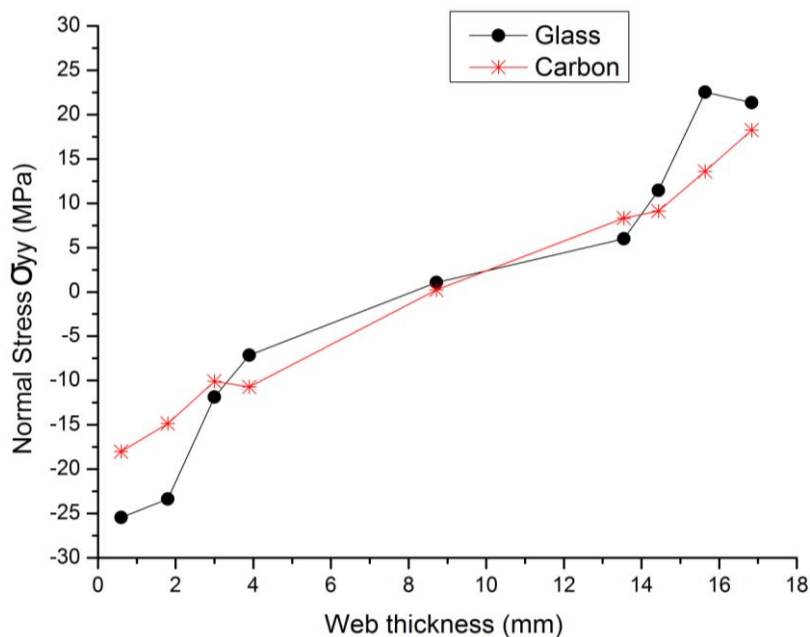
Οι αναπτυσσόμενες τάσεις που υπολογίστηκαν, τοποθετήθηκαν σε συγκριτικά διαγράμματα με τις αντίστοιχες τάσεις του υλικού από ίνες γυαλιού. Οι διαφορές που προέκυψαν δεν είναι σημαντικές (ελάχιστα μεγαλύτερες σε κάποια σημεία οι τάσεις με το υλικό *Carbon/epoxy*). Τα διαγράμματα 4.34 - 4.36 αφορούν τις τάσεις στις τρεις περιοχές ανάλυσης.



Διάγραμμα 4.34 Ορθές τάσεις σ_{xx} στην περιοχή Α



Διάγραμμα 4.35 Διατμητικές τάσεις σ_{xy} στην περιοχή Β



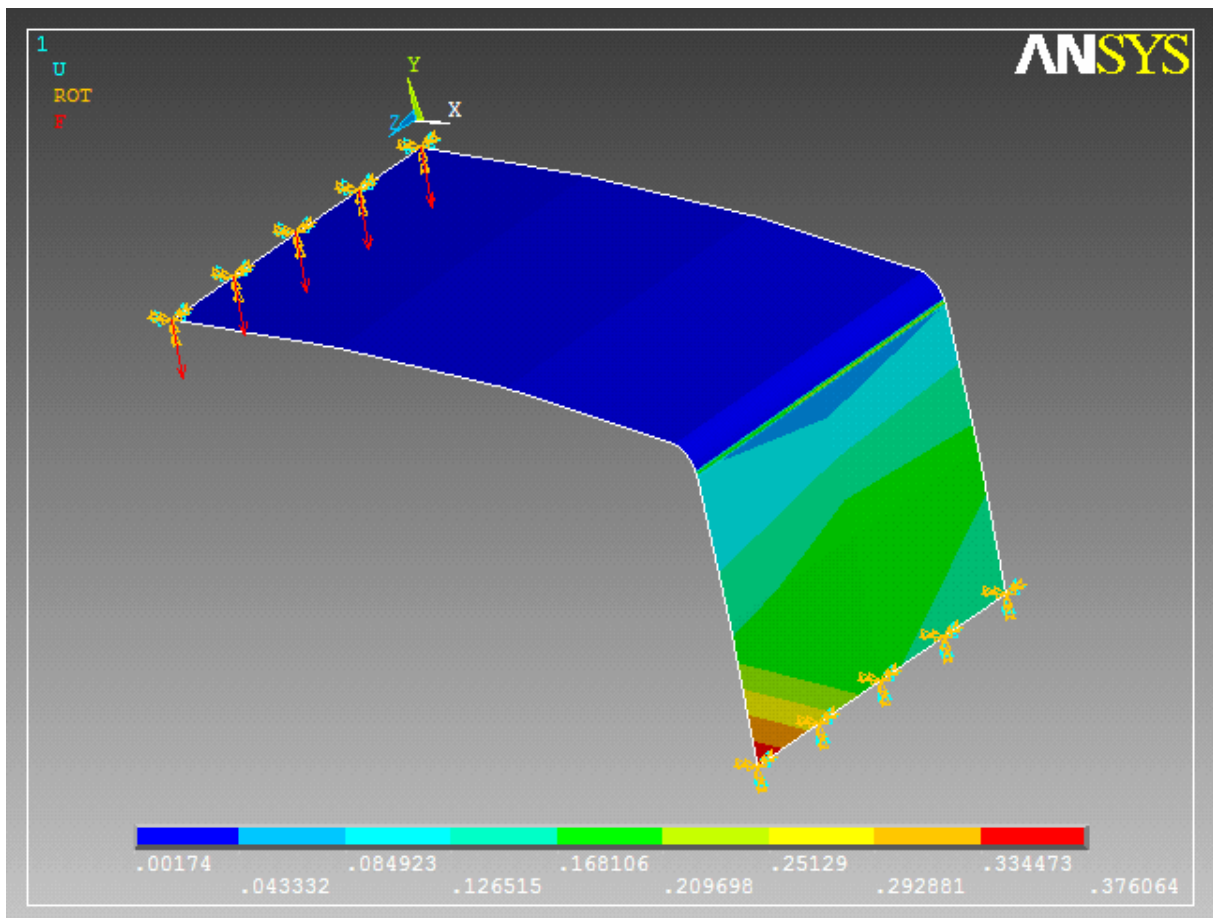
Διάγραμμα 4.36 Ορθές τάσεις σ_{yy} στην περιοχή C

Το αναμενόμενο αποτέλεσμα με βάση τις ιδιότητες των ινών από άνθρακα ήταν αξιοσημείωτη μείωση στις μετατοπίσεις συγκριτικά με τις ίνες γυαλιού. Τα αποτελέσματα δικαιώνουν τις προβλέψεις, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.37, αφού παρατηρείται μείωση που αγγίζει το 74% στις μετατοπίσεις του μοντέλου στις περιοχές A (*spar - cap*) και C (*shear - web*).

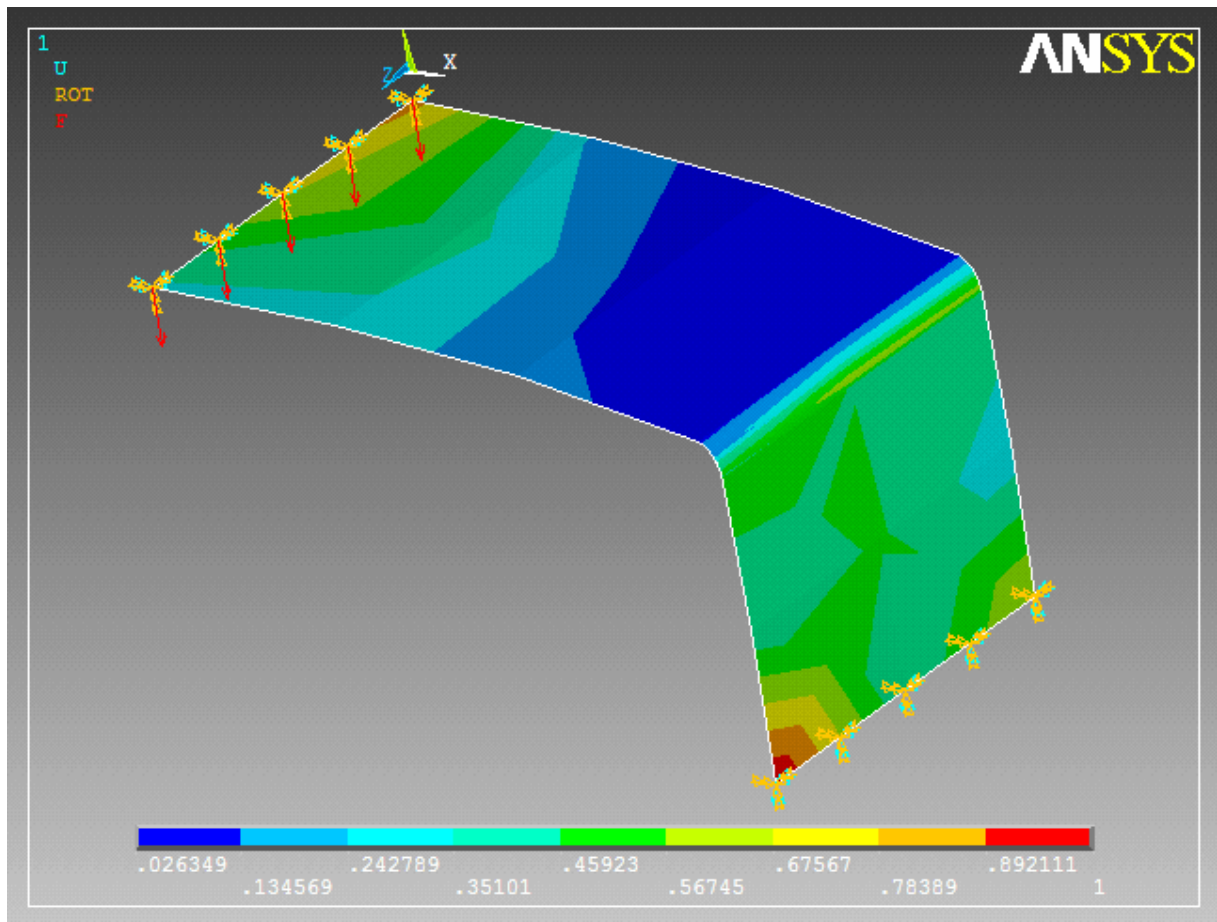
	<i>Glass/epoxy</i>	<i>Carbon/epoxy</i>	
περιοχή A (mm)	-5.688	-1.484	-73,9%
περιοχή C (mm)	3.192	0.870	-72,7%

Πίνακας 4.37 Σύγκριση των μετατοπίσεων μεταξύ *GFRP* και *CFRP*

Εφαρμόζοντας το κριτήριο αστοχίας *Tsai - Wu* στο μοντέλο από *CFRP* για το φορτίο της ανάλυσης ($N = 16,25\text{N/mm}$) δεν αστοχεί καμία στρώση όπως αναμενόταν, όμως σε αντίθεση με το μοντέλο από ίνες γυαλιού, ο υψηλότερος λόγος του κριτηρίου εμφανίζεται στην εξωτερική στρώση του *shear - web* και όχι στο σημείο επιβολής του φορτίου στο *spar - cap* (Εικόνα 4.38). Για το φορτίο αυτό η τιμή του λόγου για το *CFRP* είναι μεγαλύτερη από το *GFRP*, κάτι που μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως το *Carbon/epoxy* υλικό θα αστοχήσει σε μικρότερο φορτίο από το *Glass/epoxy*. Όντως η εξωτερική στρώση του *sandwich* υλικού αστοχεί για φορτίο $43,225\text{N/mm}$ (Εικόνα 4.39) έναντι 49N/mm του *GFRP*, χωρίς όμως να έχει αστοχήσει το *spar - cap*. Αυτό συμβαίνει λόγω χαμηλής τιμής της αντοχής σε διάτμηση σχετικά με τις υπόλοιπες κρίσιμες τάσεις και δεδομένου ότι στο *shear - web* είναι έντονο το φαινόμενο αλληλεπίδρασης ορθών και διατμητικών τάσεων.



Εικόνα 4.38 Κριτήριο *Tsai - Wu* για φορτίο $N = 16,25\text{N/mm}$



Εικόνα 4.39 Κριτήριο *Tsai - Wu* για φορτίο $N = 43,225\text{N/mm}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της εργασίας είναι η έρευνα της συμπεριφοράς του πτερυγίου μίας μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριας, που καταπονείται από στατικό φορτίο ισοσύναμο με μία μέση φόρτιση ανέμου. Η ανάλυση γίνεται σε τοπικό επίπεδο και συγκεκριμένα σε μία διατομή του πτερυγίου επιδιώκοντας να δοθεί έμφαση στη λεπτομέρεια και σε τοπικά φαινόμενα που πιθανόν να μην γίνουν αντιληπτά σε μία καθολική προσομοίωση ενός πτερυγίου ως προβόλου, λόγω του μικρού αριθμού πεπερασμένων στοιχείων στην εγκάρσια διεύθυνση. Εφαρμόζονται προχωρημένα σύνθετα υλικά και δομές με ιδιαίτερη αναφορά στην επιλογή τους, στις ιδιότητές τους και στην υπολογιστική τους προσομοίωση. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ καινοτόμων ινοπλισμένων πολυμερών και εφαρμόστηκε κριτήριο αστοχίας με σκοπό να προβλέψει πιθανές αστοχίες στο τοπικό επίπεδο των στρώσεων των προαναφερθέντων υλικών. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις στην προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία, καθώς χρησιμοποιήθηκαν επίπεδα αλλά και τρισδιάστατα στοιχεία κελύφους.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν όσον αφορά τις τάσεις και τις μετατοπίσεις είναι ικανοποιητικά και συμβατά με επιστημονικές μελέτες ανάλογου περιεχομένου. Η μέγιστη τάση αναπτύσσεται στην κορυφή του *spar - cap*, σημείο το οποίο είναι ευαίσθητο λόγω της επαφής του με το εξωτερικό κέλυφος του πτερυγίου. Η σύνδεση των δύο αυτών τμημάτων (δηλαδή η ρητίνη που χρησιμοποιείται) είναι σημείο πιθανής αστοχίας αφού καλείται να μεταφέρει τις υψηλές τάσεις που προέκυψαν από την ανάλυση. Η εφαρμογή των κριτηρίων αστοχίας στα μοντέλα υποδηλώνει και άλλα σημεία πιθανής αστοχίας των στρώσεων λόγω συνδυασμού διατμητικών και ορθών τάσεων, εκτός του προαναφερθέντος. Τα διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν (πολυμερή ινοπλισμένα με ίνες γυαλιού και ίνες άνθρακα) επιβεβαιώνουν τις λειτουργίες και ιδιότητες για τις οποίες ενδείκνυται το

καθένα σχετικά με αντοχές και δυσκαμψίες, καθώς οι μετατοπίσεις σε τοπικό επίπεδο μειώθηκαν κατακόρυφα όταν εφαρμόστηκαν οι ίνες άνθρακα στο μοντέλο.

Οι βελτιώσεις και αλλαγές που έγιναν στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων (αεροδυναμικό σχήμα, ανακατασκευή του *shear - web*, ανάλυση *ply - drop* στη μεταβατική περιοχή της γωνίας) προσέφεραν λεπτομερέστερα και πιο ακριβή αποτελέσματα με ικανοποιητικές συγκλίσεις. Δόθηκε έμφαση στη λεπτομέρεια και σε κατασκευές πειραματικών μοντέλων. Η πυκνές διακριτοποιήσεις που εφαρμόστηκαν όπου θεωρήθηκε απαραίτητο, συνέβαλαν στην εξαφάνιση των ιδιομορφιών στις κατανομές των τάσεων και στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος της μεθόδου.

Η σύγκριση που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των αναλύσεων με επίπεδα στοιχεία και στοιχεία κελύφους έδωσε αξιοσημείωτη σύγκλιση αποτελεσμάτων σε περιοχές που κυριαρχεί η κάμψη. Σε περιοχές που κυριαρχεί η διάτμηση όπως η περιοχή μετάβασης από το πολυστρωματικό υλικό στο υλικό *sandwich*, προέκυψαν πολλές ιδιομορφίες στην ανάλυση με στοιχεία κελύφους και καμία σύγκλιση με τα επίπεδα στοιχεία. Γενικά για τον επαγγελματικό σχεδιασμό χρησιμοποιούνται τα στοιχεία κελύφους που όμως σε περιοχές με ανομοιόμορφη γεωμετρία και καμπυλότητες δεν μπορούν να λειτουργήσουν πλήρως, καθώς από τη φύση τους είναι στοιχεία για ομοιόμορφα κελυφωτές κατασκευές με μεγάλη έκταση. Αντιθέτως από άποψη υπολογιστικού κόστους, τα στοιχεία κελύφους υπερτερούν έναντι των επίπεδων στοιχείων αφού είναι πολύ λιγότερα και χρειάζεται λιγότερος χρόνος για να λυθούν τα μητρώα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Με την πραγματοποίηση της μελέτης αυτής είναι πλέον εφικτό να συγκριθούν λεπτομερή μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων της στήριξης ενός πτερυγίου, που διαφοροποιούνται στα υλικά ή τη γεωμετρία τους, αφού για όλες τις αναλύσεις αναπτύχθηκαν κώδικες H/Y στο πρόγραμμα ANSYS που καθιστούν τις παραπάνω συγκρίσεις εύκολες και γρήγορες. Συνεπώς με πολύ μικρές επεμβάσεις στον κώδικα είναι δυνατό να εφαρμοστούν στατικές αναλύσεις με οποιοδήποτε συνδυασμό σύνθετων υλικών και φορτίων στο πτερύγιο που θα αποδίδουν τάσεις, μετατοπίσεις και εποπτεία στην αντοχή της κατασκευής μέσω εφαρμογής κριτηρίου αστοχίας.

5.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η ανάλυση που αναπτύχθηκε στις παραπάνω σελίδες είναι ένα πρώτο βήμα για την κατανόηση των κατανομών των τάσεων εντός της κατασκευής στήριξης του πτερυγίου μίας ανεμογεννήτριας, με κάποιες προεκτάσεις σχετικά με τα υλικά, την υπολογιστική προσομοίωση και ορισμένες κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Αναδύονται συνεχώς καινούρια θέματα και προβλήματα με πολύ ενδιαφέρον τα οποία θα βοηθήσουν στην περαιτέρω εξέλιξη στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά κάποια από αυτά τα θέματα, τα οποία είναι ένας συνδυασμός βιβλιογραφικής αναζήτησης αλλά και προσωπικών διερωτήσεων που έχουν προκύψει κατά τη διάρκεια της έρευνας και ασχολίας με το αντικείμενο:

- Αντισεισμικός σχεδιασμός πύργου ανεμογεννήτριας με εφαρμογή δυναμικών φασματικών αναλύσεων , γραμμικών και μη γραμμικών και κατά κύριο λόγο στατική υπερωθητική ανάλυση (*Pushover Analysis*).
- Έλεγχος ιδιοσυχνοτήτων των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας και συσχέτιση με αυτές του πύργου (πιθανός συντονισμός και συνέπειες αυτού).
- Πιθανή μίξη εντός του πτερυγίου των σύνθετων υλικών από γυαλί και άνθρακα (*GFRP* και *CFRP*).
- Έρευνα γύρω από γεωμετρικές αλλαγές στον αεροδυναμικό σχεδιασμό του πτερυγίου (στη διατομή αλλά και κατά μήκος) με σκοπό την μεγαλύτερη απόδοση.
- Αντικατάσταση του κιβωτίου ταχυτήτων της ανεμογεννήτριας με γεννήτρια χαμηλότερης συχνότητας (τεχνολογία άμεσης κίνησης).
- Τοποθέτηση αισθητήρων σε διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας για παρακολούθηση διάφορων φαινομένων και καλύτερη εποπτεία απόδοσης και πιθανών σφαλμάτων στη λειτουργία της.
- Σχεδιασμός προσθετικών μελών των πτερυγίων για παλαιότερης τεχνολογίας ανεμογεννήτριες, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αντικατάσταση, με σκοπό τη μεγαλύτερη απόδοση ενέργειας. Τα προσθετικά αυτά μέλη επεμβαίνουν στην γεωμετρία του υπάρχοντος πτερυγίου (μεγαλύτερη επιφάνεια ή και μήκος).

- Εφαρμογή εμπειρικών κριτηρίων αστοχίας [33] τα οποία συντάχθηκαν ειδικά για πτερύγια ανεμογεννητριών.
- Εφαρμογή *sandwich* υλικού στα *spar - caps* εκτός από τα *shear - webs*.
- Ανάπτυξη μαθηματικών στοχαστικών μοντέλων για καλύτερη προσομοίωση της φόρτισης του ανέμου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] E.E.Theotokoglou, G.A.Balokas, "Structural Analysis and Material Selection in Cross-Section of Wind Turbine Blade", Proceeding of the 16th International Conference on Composite Structures (ICCS-16), Porto, Portugal, June 28-30 2011, A.J.M.Ferreira editor, paper #187 (2011)
- [2] Γ.Μπαλόκας, Ε.Θεοτόκογλου, "Ανάλυση πτερυγίου ανεμογεννήτριας υπό την καταπόνηση στατικού φορτίου", Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών ΕΜΠ, Αθήνα, 2010
- [3] T.Burton, D.Sharpe, N.Jenkins and E.Bossanyi, "Wind Energy Handbook", Wiley, USA (1991)
- [4] Ν.Βασιλάκος, "Αιολική Ενέργεια: Μια σημαντική συμβολή για τη βιώσιμη ανάπτυξη και την απασχόληση στη χώρα μας", Δρ. Αντιπρόεδρος της Ευρωπαϊκής Συνομοσπονδίας Παραγωγών ΑΠΕ (EREF) & Αντιπρόεδρος του Ομίλου για τη Διάδοση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ELFORES), <http://www.ekke.gr>
- [5] M.R.Patel, "Wind and Solar Power Systems", ED. CRC Press, Boca Raton, 98-47934 (1999)
- [6] Γ.Μπεργελές, "Ανεμοκινητήρες", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2005
- [7] European Wind Energy Association, [www.ewea.org/STATISTICS/EUROPEAN STATISTICS](http://www.ewea.org/STATISTICS/EUROPEAN_STATISTICS). (2012)
- [8] Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας, www.eletaen.gr
- [9] D.Ancona, J.McVeigh, "Wind Turbine-Materials and Manufacturing Fact Sheet", Office of Industrial Technologies, US Department of Energy, (2005)
- [10] Risoe National Laboratory and Det Norske Veritas, "Guidelines for Design of WindTurbines", Second Edition, Jydsk Cenrtaltrykkeri, Denmark (2002)
- [11] M.Grucijic, G.Arakere, E.Subramanian, V.Sellappan, A.Vallejo, M.Ozen, "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)
- [12] F.M.Jensen, B.G.Falzon, J.Ankersen, H.Stang, "Structural Testing and Numerical Simulation of a 34m Composite Wind Turbine Blade", Composite Structures, 76, 52-61, (2006)
- [13] V.A.Fedorov, N.Dimitrov, C.Berggreen, S.Krenk, K.Branner and P.Berring, "Investigation of Structural Behavior due to Bend-Twist Couplings in Wind Turbine Blades", Energy Research Programme (EFP 2007), 33033-0075 (2009)
- [14] M.A.Rumsey, J.A.Paquette, "Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades", Proc.of SPIE, 6933, 69330E-1 – 69330E-15 (2008)
- [15] B.F.Sorensen, E.Jorgensen, C.P.Debel, F.M.Jensen, F.M.Jensen, T.K.Jacobsen and K.M.Halling, "Improved design of large wind turbine blade of fiber composites based on studies of scale effects(Phase 1)-Summary Report", Riso-R-1390(EN), Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark (2004)
- [16] P.Brondsted, H.Lilholt, A.Lystrup, "Composite materials for wind power turbine blades", Annu. Rev. Mater. Res, 35, 505-538 (2005)
- [17] D.A.Griffin, T.D.Ashwill, "Alternative composite materials for megawatt-scale wind turbine blades: design considerations and recommended testing", AIAA-2003-0696, 1-11 (2003)

- [18] J.F.Mandell, D.D.Samborsky, D.W.Combw, M.E.Scott, D.S.Cairns, "Fatigue of Composite Material Beam Elements Representative of Wind Turbine Blade Substructure", Report National Renewable Energy Laboratory, 1-159 (1998)
- [19] J.Selwin Rajadurai, G.Thanigaiyarasu, "Structural Analysis, Failure Prediction, and Cost Analysis of Alternative Material for Composite Wind Turbine Blades", *Mechanics of Advanced Material and Structures*, 16, 467-487 (2009)
- [20] Ι.Ραυτογιάννης, "Σύνθετα Υλικά", Εκδόσεις ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Δομοστατικής, Αθήνα, 2009
- [21] C.H.Ong, S.W.Tsai, "The use of carbon fibers in wind turbine blade design: a seri-8 blade example", Report SAND2000-0478, 1-74 (2000)
- [22] O.T.Thomsen, "Sandwich Materials for Wind Turbine Blades - Present and Future", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2009; 11; 7, DOI: 10.1177/1099636208099710
- [23] ANSYS Engineering Analysis System, User's Manual, Swanson Analysis System Inc., (2007)
- [24] P.L.Hansen, S.Giannis and R.H.Martin, "Testing and Analysis of Advanced Composite Materials and Structures in Wind Turbine Applications", UK Technology Strategy Board, TP/2/MS/6/I/10060 (2010)
- [25] D.R.Pardo and K.Branner, "Finite element analysis of the cross-section of wind turbine blades; a comparison between shell and 2d-solid model", *Wind Engineering*, 29, 25-32 (2005)
- [26] D.I.Chortis, "Nonlinear Mechanics and Finite Element with Material Damping for the Static and Dynamic Analysis of Composite Wind Turbine Blades", Ph. D. Dissertation, University of Patras, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, Structural Analysis and Active Materials Group, Applied Mechanics Laboratory
- [27] P.Dhurvey, N.D.Mittal, "Finite Element Analysis of Internally Ply Drop-off Composite Laminates", *International Journal of Engineering Research*, Volume No.1, Issue No.1, pp:12-16, Department of Applied Mechanics, Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal, India (2012)
- [28] Γ.Ι.Τσαμασφύρος, Ε.Ε.Θεοτόκογλου, "Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων Ι", Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2005
- [29] J.E.Zimmer, J.R.Cost, "Determination of the Elastic Constants of a Unidirectional Fiber Composite using Ultrasonic Velocity Measurements", *J.Acoust. Soc. Am.* 47, 795 (1970)
- [30] E.Sideridis, "The In-Plane Shear Modulus of Fiber Reinforced Composites as Defined by the Concept of Interphase", *Composites Science and Technology*, 31 (1988) 35-53
- [31] M.A.Eisenberg, "Theory of Fabrication-Induced Anisotropy of Chopped-Fiber/Resin Panels", *Composites Science and Technology*, 12 (1979)
- [32] L.P.Kollar, G.S.Springer, "Mechanics of Composite Structures", Cambridge University Press (2003)
- [33] M.Leong, L.C.T.Overgaard, O.T.Thomsen, E.Lund, I.M.Daniel, "Investigation of failure mechanisms in GFRP sandwich structures with face sheet wrinkle defects used for wind turbine blades", *Composite Structures* 94 (2012) 768-778