



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΙΤΛΟ :

«Μελέτη Αντοχής πτερυγίων ανεμογεννήτριας κατασκευασμένων από σύνθετα υλικά με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων »



Κανελλόπουλος Παναγιώτης
Επιβλέπων καθηγητής: Ρώσσης Κυριάκος

Αθήνα, Οκτώβριος 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Εξεταστική Επιτροπή :

Ρώσσης Κυριάκος

Σαγιάς Βασίλειος

Στεργίου Κωνσταντίνος

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Στεργίου Κωνσταντίνος	ΔΙΔΑΚΤΙΚΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ (ΔΕΠ)	
2	Σαγιάς Βασίλειος	ΕΚΤΑΚΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΨΠΙΚΟ (Ε.Ε.Π.)	
3	Ρώσσης Κυριάκος	ΕΚΤΑΚΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΨΠΙΚΟ (Ε.Ε.Π.)	

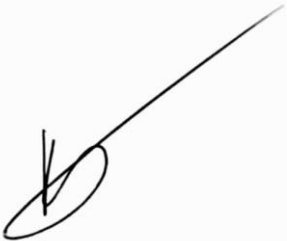
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κανελλόπουλος Παναγιώτης του Νικολάου με αριθμό μητρώου 44061 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανολόγων του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Κανελλόπουλος Παναγιώτης

Δευτέρα, 18/10/2021

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του ΠΑΔΑ. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξη τους σε όλο το κύκλο των σπουδών μου, καθώς και τον επιβλέπων καθηγητή μου που μου εμπιστεύτηκε την παρούσα εργασία.

Περίληψη

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η βιβλιογραφική Επισκόπηση, η καταγραφή και ανάλυση των βασικών θεμάτων, η Μεθοδολογία προσέγγισης, ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση της Ανεμογεννήτριας με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά της αιολικής ενέργειας, καθώς και ιστορική αναδρομή της χρήσης των αιολικών μηχανών ανά τον κόσμο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο προχωράμε στα σύνθετα υλικά, το διαχωρισμό τους ,τις κατασκευαστικές τους απαιτήσεις και το τρόπο επιλογής τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται οι αστοχίες των υλικών και των σύνθετων υλικών.

Στο τέταρτο περιγράφεται η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM), γίνεται αναφορά στη δημιουργία πλέγματος, στα είδη ανάλυσης που μπορούν να πραγματοποιηθούν με αυτή τη μέθοδο, όπως και στα είδη των πεπερασμένων στοιχείων που προκύπτουν βάσει της γεωμετρίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε και ο τρόπος επίλυσης του σε δύο διαφορετικές συνθήκες ανέμου. Αναφέρεται επίσης η επιλογή των υλικών μελέτης και ένας μικρός σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες των αποτελεσμάτων για τη συνολική παραμόρφωση της κατασκευής για κάθε εξεταζόμενο υλικό και αναλύονται τα συμπεράσματα των δύο διαφορετικών συνόλων προσομοιώσεων και η συσχέτισή τους.

Λέξεις κλειδιά :

Ανεμογεννήτρια, σύνθετα υλικά , πεπερασμένα στοιχεία , μηχανικές ιδιότητες

Πίνακας περιεχομένων

.....	2
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ	2
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ	2
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
Περίληψη	5
1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	9
- ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	9
1.1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	9
1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΧΡΗΣΗΣ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ	10
1.3. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	11
1.3.1. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ	11
1.3.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ	15
1.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	17
2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	19
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	19
2.2. ΕΙΔΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	20
2.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ	20
2.4 ΜΗΤΡΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	24
2.5 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ	27
2.6 ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ SANDWICH ΥΛΙΚΑ	32
3. ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	32
3.1 ΑΙΤΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	33
3.2 Επιθεωρήσεις για την δομή και τα υλικά των πτερυγίων των ανεμογεννητριών	34
3.3 Κόπωση	37
3.4 Κόπωση στα σύνθετα υλικά	39
4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	40
4.1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	40
4.2. CAD/CAM	40
4.3. CAE	41
4.4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	42
4.4.1 Στάδια ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων	42
4.4.2 Αυτόματη δημιουργία πλέγματος	46

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	53
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	53
5.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ	54
5.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	54
5.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	56
5.4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	56
5.4.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	57
5.4.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗ, ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ANSYS FLUENT	57
5.5 FLUENT ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	60
5.6 STATIC STRUCTURAL	65
5.7 STRUCTURE ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ για ταχύτητα 12 m/s	68
5.7.1 Total Deformation	68
5.7.2 Μέγιστες διατμητικές τάσεις	72
5.7.3 Μέγιστες κύριες τάσεις	75
5.7.4 Δυνάμεις λόγω αντιδράσεων	78
5.8 STRUCTURE ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ για ταχύτητα 53 m/s	78
5.8.1 Total Deformation	80
5.8.2 Μέγιστες διατμητικές τάσεις	84
5.8.3 Μέγιστες κύριες τάσεις	87
5.9 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	89
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	91
6.1 ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	92
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	92

1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

- ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον. Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν μολύνει το περιβάλλον ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνο από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα έχουν σαν σκοπό την δέσμευση του δυναμικού τους. Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγγώρια πηγή ενέργειας με καλές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Ταυτόχρονα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον αποδειχθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- **ο ήλιος - ηλιακή ενέργεια**, χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας.
- **ο άνεμος - αιολική ενέργεια**, χαρακτηρίζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Η ενέργεια αυτή περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν προκαλούν ρύπους.
- **η γεωθερμία - γεωθερμική ενέργεια**, χαρακτηρίζεται η φυσική θερμική ενέργεια της Γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια. Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

- 1) Με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια με ρυθμό 0,04 - 0,06 W/m²
- 2) Με ρεύματα μεταφοράς, που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων.
- **η βιομάζα**, χαρακτηρίζεται η θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων , τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων
- **οι θάλασσες**, χαρακτηρίζεται η ενέργεια κυμάτων, η ενέργεια των ωκεανών και η παλιρροϊκή ενέργεια από τη διαφορά θερμοκρασίας των υδάτων στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος.

1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΧΡΗΣΗΣ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

Η αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου ξεκίνησε από τα πρώιμα ιστορικά χρόνια και έπαιξε αποφασιστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας με τη χρήση της τόσο στη ναυτιλία όσο και στην άρδευση και τις αγροτικές καλλιέργειες. Οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι επιχείρησαν από τα πολύ παλιά χρόνια να θεμελιώσουν τις γνωσιολογικές βάσεις των φυσικών προβλημάτων. Αρχικά ο Αναξίμανης και έπειτα ο Εμπεδοκλής (5ο αιώνα π.Χ.) θεμελίωσε τη στοιχειακή θεωρία, θεωρώντας ότι ο κόσμος αποτελείται από τέσσερα πρωταρχικά στοιχεία (Πυρ, Αήρ, Ύδωρ και Γη).Ο Αριστοτέλης, τέλος, παραδέχεται ότι δεν υπάρχει διαφορά στη φύση των στοιχείων του Εμπεδοκλή, αλλά τα θεωρεί ενσωματώσεις ιδιοτήτων που συνδυάζονται μεταξύ τους κατά διαφορετικό τρόπο.

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον άνθρωπο για τη κίνηση των ιστιοφόρων πλοίων. Οι ιστορικές αναφορές υποστηρίζουν ότι οι αιολικές μηχανές χρησιμοποιήθηκαν από τους σημαντικότερους αρχαίους λαούς, τους Πέρσες, τους Κινέζους και τους Αιγυπτίους. Με βασικό υλικό κατασκευής το ξύλο, τα πανιά και ειδικές λιθόκτιστες κατασκευές. Το 3ο αιώνα π.Χ. ο Ήρων ο

Αλεξανδρεύς σχεδίασε τον κατά πάσα πιθανότητα πρώτο ανεμόμυλο οριζοντίου άξονα με τέσσερα πτερύγια ,ο οποίος είναι και ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε στην Ευρώπη την εποχή του Μεσαίωνα ως επί το πλείστον .

Τέλος, στις αρχές του αιώνα μας οι Δανοί αρχίζουν να παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο. Στα χρόνια που ακολούθησαν το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο η χρήση της ατομικής ενέργειας και οι χαμηλές τιμές του πετρελαίου περιόρισαν σε μεγάλο βαθμό το ενδιαφέρον για την αιολική ενέργεια. Παρ ‘όλα αυτά η ρύπανση του περιβάλλοντος υποχρέωσαν τις ανεπτυγμένες χώρες να στρέψουν έντονα το ενδιαφέρον τους ξανά στον άνεμο.

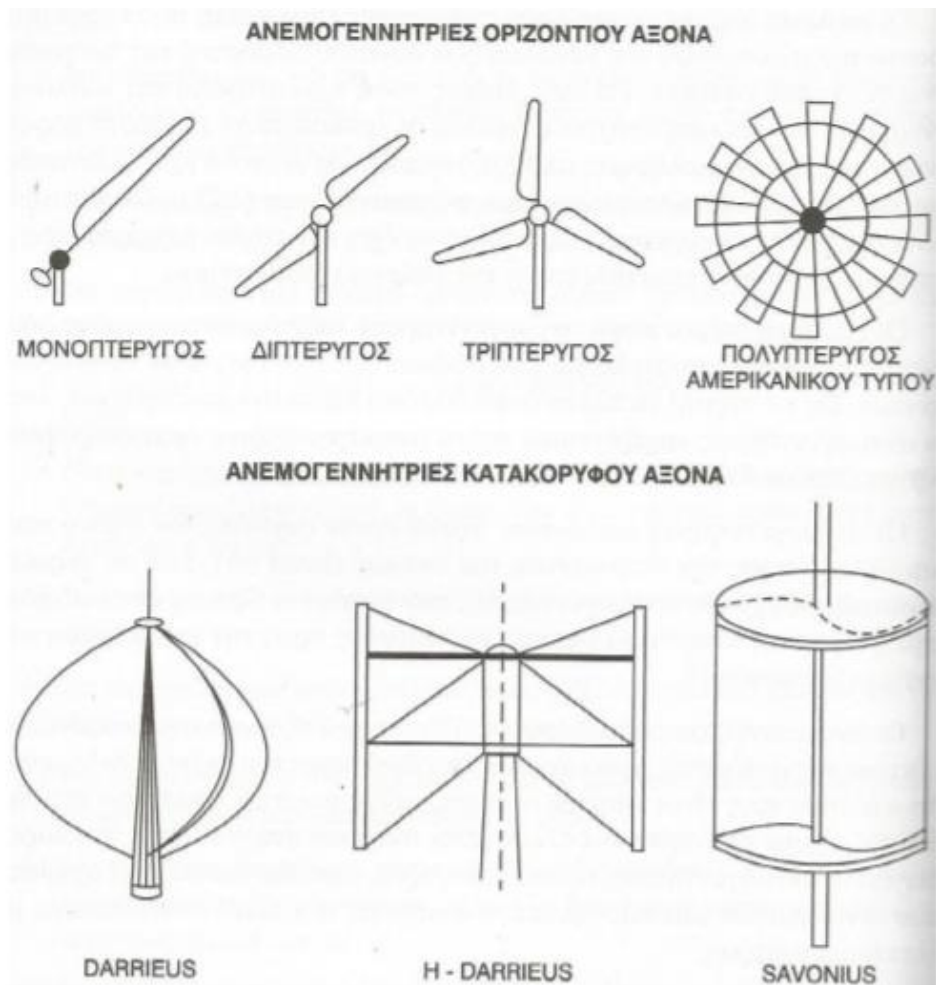
1.3. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι αιολικές μηχανές αποτελούν ανθρώπινες επινοήσεις , που έχουν σαν σκοπό την αξιοποίηση του μεγαλύτερου δυνατού ποσοστού της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Τελικός στόχος είναι η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ωφέλιμη. Λέγεται ότι έχουν επινοηθεί και εφαρμοσθεί περισσότεροι τύποι αεροκινητήρων από οποιονδήποτε άλλο τύπο εφεύρεσης, χωρίς όμως να έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα ο επιθυμητός βαθμός εκμετάλλευσης της ενέργειας του ανέμου. Οι κύριοι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με το προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Οπότε οι πιο διαδεδομένες είναι οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (Horizontal Axis Wind Turbine - HAWT) και τις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα (Vertical Axis Wind Turbine - VAWT).

1.3.1. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονα τους παράλληλο προς τη κατεύθυνση του ανέμου (head on). Σε κάποιες όμως περιπτώσεις έχουμε ανεμογεννήτριες των οποίων ο άξονας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης και κάθετος προς τη διεύθυνση του ανέμου (cross – wind). Για το λόγο ότι ο άξονας των ανεμογεννητριών κατακόρυφου είναι κάθετος στη διεύθυνση του

ανέμου, εμφανίζουν το πλεονέκτημα της αυτόματης περιστροφής προς αυτή. Η ταχύτητα περιστροφής μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από αεροδυναμικές παραμέτρους, καθώς και από το μέγεθος των πτερυγίων της μηχανής εφόσον πρέπει να συμπεριληφθούν λόγοι στατικής αντοχής, φαινόμενα δυναμικών καταπονήσεων και ταλαντώσεων, φυγόκεντρες δυνάμεις κ.λπ.



Σχήμα 1.1 Βασικοί τύποι ανεμογεννητριών

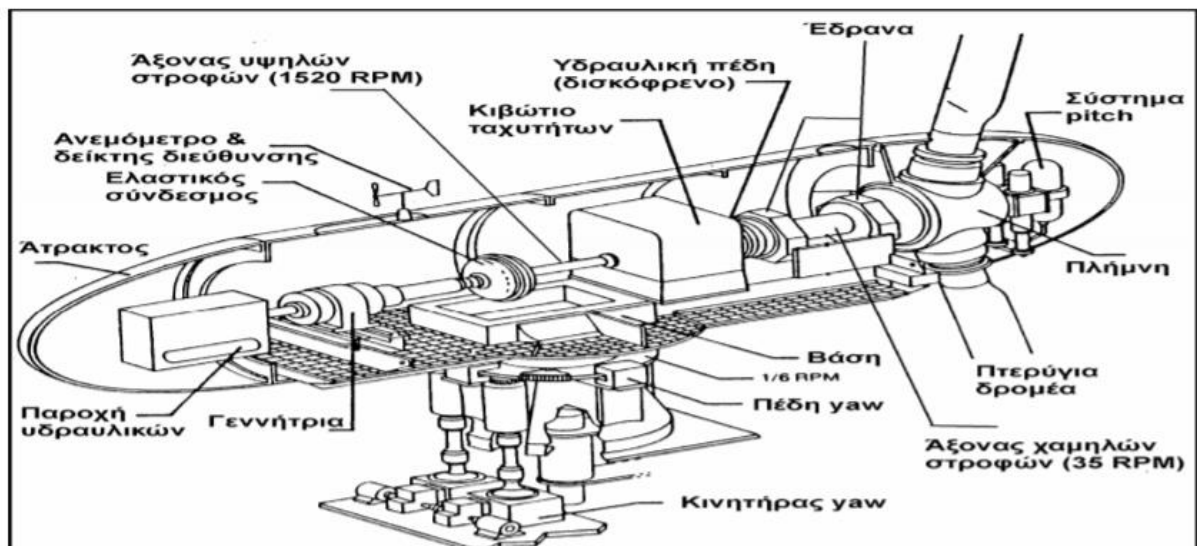
Ανάλογα με τη μηχανική ισχύ που παρέχουν οι αεροκινητήρες στην έξοδο τους κατατάσσονται από πλευρά μεγέθους σαν :

- Μικροί, για ονομαστική ισχύ μεταξύ :
 $50 \text{ W} \leq N_0 \leq 30 \text{ Kw}$
- Μεσαίοι, για ονομαστική ισχύ μεταξύ :
 $30 \text{ W} \leq N_0 \leq 300 \text{ kW}$

- Μεγάλοι, για ονομαστική ισχύ μεταξύ :
- $300 \text{ W} \leq N_0 \leq 5 \text{ MW}$

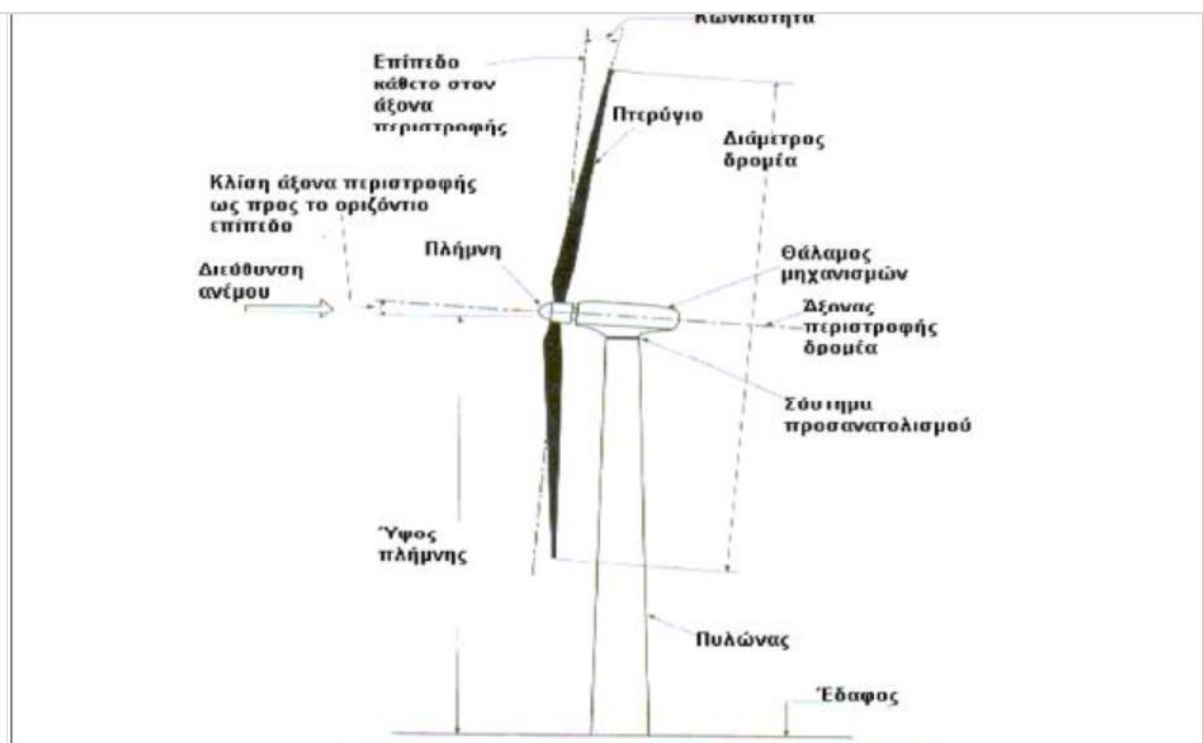
Επιπλέον, οι συγκεκριμένες μηχανές κατατάσσονται και με τον αριθμό των πτερυγίων που έχει η πτερωτή τους. Με βάση αυτό χωρίζονται σε πολυπτέρυγες όπως είναι και οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι με χαμηλές ταχύτητες περιστροφής και οι ολιγοπτέρυγοι που είναι οι πλειοψηφία των σύγχρονων ανεμογεννητριών κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα και με αριθμό πτερυγίων από ένα μέχρι τρία πτερύγια σε κάθε πτερωτή.

Οι πλειοψηφία των μηχανών που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας είναι τύπου « έλικα ». Στις μηχανές αυτές γίνεται ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής και για λόγους προστασίας της σε περιπτώσεις ισχυρών ανέμων. Αυτό συμβαίνει με τη χρήση αεροδυναμικών βοηθημάτων στην άκρη των πτερυγίων ή με τη στροφή της πτερωτής σε γωνία σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου. Η αιολική ισχύς μεταφέρεται από τη πτερωτή ή μέσω μετάδοσης κίνησης (οδοντωτοί τροχοί) στη βάση του πύργου στήριξης, ή από τον άξονα της πτερύγωσης στην ηλεκτρική γεννήτρια. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα εξακολουθούν να αναπτύσσονται και έχουν κατασκευαστεί ήδη και κατασκευάζονται μονάδες μεγάλης ισχύς .



Σχήμα 1.2 Εσωτερικό ατράκτου τυπικής μορφής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζώντιου άξονα είναι, βλέπε Σχήμα 1.2, ο πύργος στήριξης, η περωτή, ο άξονας περιστροφής, το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, το σύστημα μετάδοσης κίνησης, η ηλεκτρική γεννήτρια και το σύστημα προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας. Η περωτή τοποθετείται είτε ανάντη είτε κατάντη του πύργου στήριξης και τα περύγια καλύπτουν ένα μικρό ποσοστό (2% – 10%) του εμβαδού της περιφέρειας που διαγράφουν. Η επιλογή των περυγίων έχει σχέση με την αεροδυναμική φόρτιση των περυγίων, με το κόστος κατασκευής, με το βαθμό απόδοσης, όπως και με την αντοχή και το συντονισμό λόγω ταλαντώσεων. Για τον περιορισμό της κυκλικής μεταβολής του φορτίου των περυγίων δίνεται μια μικρή κλίση σχεδόν 10° του άξονα περιστροφής ως προς τον οριζόντιο. Εν κατακλείδι, για το περιορισμό των καμπτικών τάσεων όπου ασκούνται πάνω στα περύγια συνήθως εφαρμόζεται μια μικρή κωνικότητα της τάξης των 10° (βλέπε Σχήμα 1.3). [2]

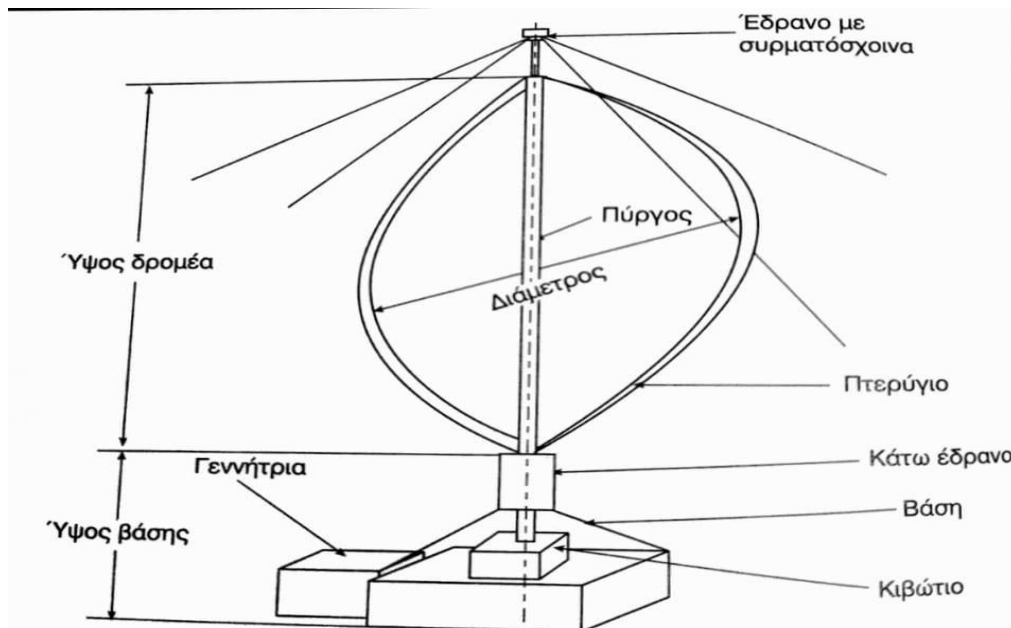


Σχήμα 1.3 Τοποθέτηση Α/Γ οριζώντιου άξονα

1.3.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ

Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα διαθέτουν το μεγαλύτερο πλεονέκτημα προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, παρόλα αυτά αποτελούν και πιο απλές κατασκευές . Οι ποιο γνωστοί τύποι αεροκινητήρων κατακόρυφου άξονα είναι οι μηχανές «Darrieus» (Σχήμα 1.5) και οι μηχανές τύπου “ Savonius ” (Σχήμα 1.3). Να αναφέρουμε εδώ ότι οι μηχανές τύπου “Darrieus” είναι από τους ποιο διαδεδομένους τύπους αεροκινητήρων στη διεθνή αγορά .Οι αιολικές μηχανές του τύπου αυτού διαθέτουν καλή αεροδυναμική απόδοση, χαμηλό κόστος ,ανεξαρτησία στη διεύθυνση του ανέμου και απλά συστήματα ελέγχου. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα περιγραφικά περιστρέφεται από έναν άξονα κάθετο στη διεύθυνση του ανέμου και του εδάφους.

Η αγορά διαθέτει ποικιλία δρομέων κατακόρυφου άξονα ,όμως ο δρομέας «Darrieus» είναι αυτός που έχει εξελιχθεί περισσότερο με αποτέλεσμα να είναι και ο ποιο γνωστός. Με τη βοήθεια αυτών των τύπων μηχανών μπορούμε να κατασκευάσουμε μηχανές με ονομαστική ισχύ της τάξεως του ενός MW. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι οι μηχανισμοί και η γεννήτρια βρίσκονται στο έδαφος με αποτέλεσμα να χρειάζεται ελαφρότερος πυλώνας έτσι ώστε η λειτουργία και η συντήρηση του συνολικού συστήματος να είναι ευκολότερη. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης είναι παρόμοιο με αυτό των μηχανών οριζοντίου άξονα εκτός από το ότι τα εξαρτήματα είναι τοποθετημένα κατακόρυφα. Ο δρομέας είναι τοποθετημένος σε κατάλληλο έδρανο στη βάση του ,όπου ακόμα και σε σταθερή ταχύτητα ανέμου καταπονείται από εναλλασσόμενο φορτίο. Ακόμη η μηχανή βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση με την βοήθεια καλωδίων το οποία ενώνουν την κορυφή του άξονα της μηχανής με το έδαφος. Επιπλέον οι ανεμογεννήτριες τύπου «Darrieus» έχουν υψηλές ταχύτητές εκκίνησης και για μεγάλα συστήματα χρειάζεται βοηθητικός κινητήρας για την εκκίνηση. Ακόμη παρέχουν χαμηλότερο μέσο ετήσιο συντελεστή ισχύος και είναι συγκρίσιμες σε οικονομοτεχνική ελκυστικότητα με τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.

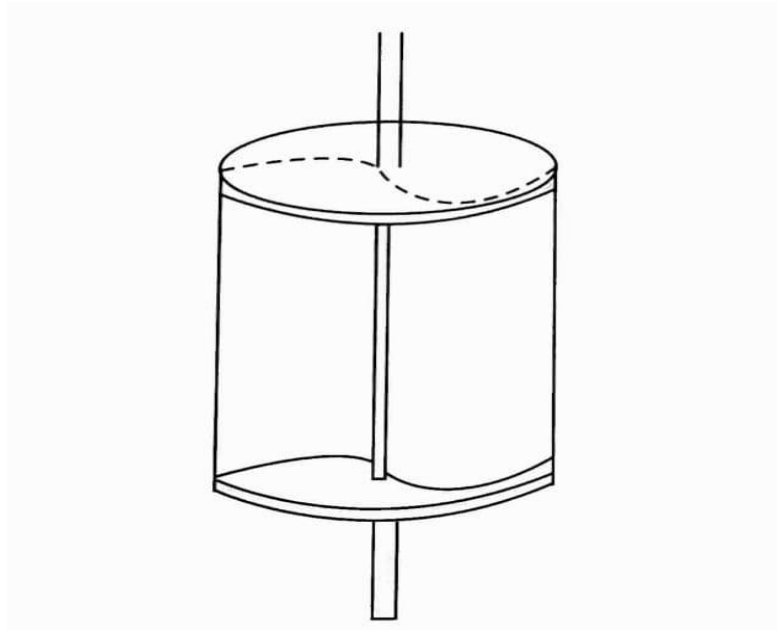


Σχήμα 1.4 Ανεμοκινητήρας «Darrieus» κατακόρυφου άξονα

Από την άλλη οι ανεμοκινητήρες τύπου « Savonius » έχουν χαμηλότερο συντελεστή ισχύος , περιορισμένο μέγεθος, μικρή ακραία περιφερειακή ταχύτητα αλλά απλότητα και οικονομικότητα κατασκευής. Οι μηχανές « Savonius », όπως όλες κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν συμμετρία και αυτόματο προσανεμισμό καταργώντας τις ακριβές διατάξεις προσανατολισμού που έχουν οι μηχανές κατακόρυφου άξονα. Επιπλέον όπως και η « Darrieus » τα όργανα μεταφοράς και μετατροπής της μηχανικής ενέργειας στο έδαφος, παρουσιάζοντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα κόστους. Και ο πύργος στήριξης είναι οικονομικότερος λόγω της απλότητας του.

Στα πλεονεκτήματα του απέναντι στο « Darrieus » παρουσιάζει μεγάλη ροπή εκκίνησης και λειτουργίας, γι' αυτό και χρησιμοποιείται και σαν εκκινητής του δεύτερου. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του είναι η απλότητα και η οικονομικότητα της κατασκευής του. Απλές μηχανές του τύπου αυτού κατασκευάζονται ακόμα και με διαίρεση σε δύο κομμάτια ενός βαρελιού και ενώνοντας τα κομμάτια σε σχήμα « S ».

Σα μειονεκτήματα έχει χαμηλό βαθμό απόδοσης που σύμφωνα με τους ερευνητές δε ξεπερνάει το 0.18 , καθώς και η λειτουργία του σε μικρές τιμές της παραμέτρου περιστροφής $\lambda = 0.18$. Και τέλος έχει μεγάλο βάρος ανά μονάδα ονομαστικής ισχύος και η επιφάνεια των πτερυγίων του είναι έως και τριάντα φορές μεγαλύτερη από άλλους αντίστοιχης ονομαστικής ισχύος ανεμοκινητήρες.



Σχήμα 1.5 Ανεμοκινητήρας «Savonius» κατακόρυφου άξονα

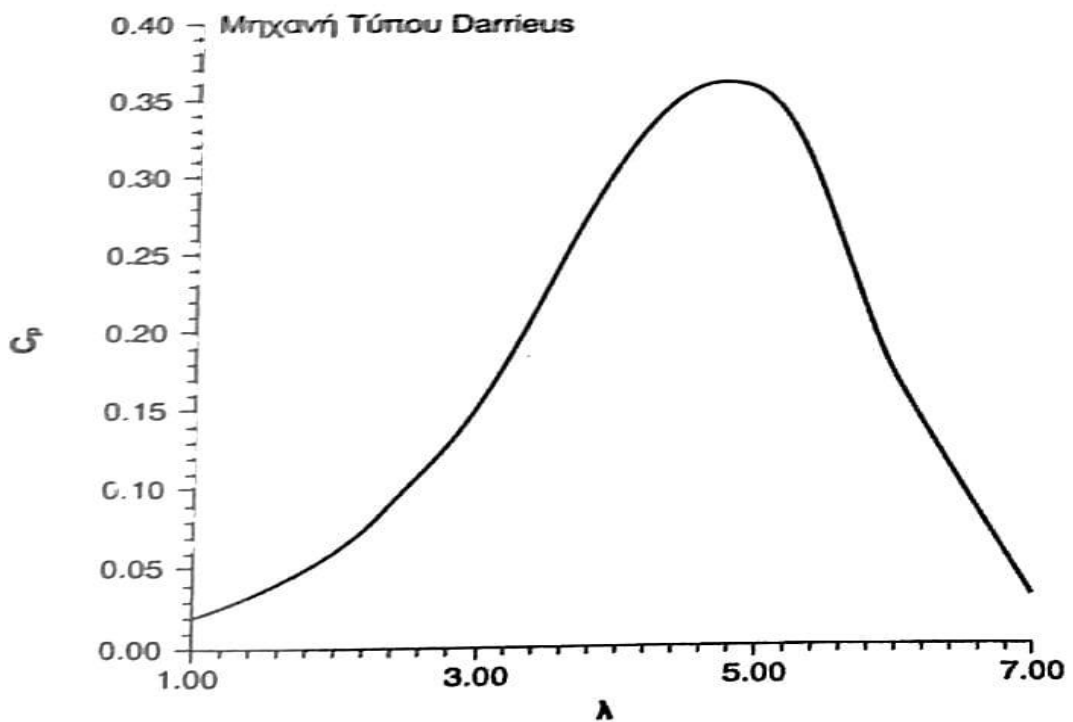
1.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Όπως αναφέραμε οι αιολικές μηχανές χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Η μεγάλη πλειοψηφία των εγκατεστημένων αιολικών μηχανών είναι οριζόντιου άξονα, ενώ στην αγορά διατίθενται και πολυπτερυγες μηχανές αμερικάνικου τύπου καθώς και μηχανές τύπου “ Savonius ”, κυρίως για εφαρμογές μικρής ισχύος.

Συγκεκριμένα τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο κατηγοριών :

- Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα δε χρειάζονται σύστημα προσανεμισμού, κάτι πολύ βασικό για τις μηχανές οριζόντιου άξονα.
- Στις μηχανές κατακόρυφου άξονα το παραγόμενο μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω κατακόρυφου άξονα κατευθείαν στο έδαφος, όπου βρίσκεται τοποθετημένη και η ηλεκτρική γεννήτρια, σε αντίθεση με τις μηχανές οριζόντιου άξονα.

- Στις μηχανές κατακόρυφου άξονα η κατασκευή του πύργου στήριξης είναι απλή, ενώ στις μηχανές οριζόντιου ο πύργος στήριξης έχει ειδικές απαιτήσεις.
- Στις μηχανές κατακόρυφου άξονα δεν υπάρχει η δυνατότητα αλλά ούτε και η ανάγκη ρύθμισης του βήματος της πτερωτής για τον έλεγχο της ισχύος μηχανής, κάτι που είναι απαραίτητο για τις μηχανές οριζοντίου άξονα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη κατάλληλη μορφή της καμπύλης ($C_p - \lambda$) του δρομέα Darrieus (βλέπε Σχήμα 1.7) δεδομένου ότι το “ C_p ” είναι μικρό σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου και επομένως η ισχύς παραμένει σχεδόν σταθερή. Προϋπόθεση των ανωτέρω είναι η σταθερότητα των στροφών, όπως για παράδειγμα, όταν η σύγχρονη ηλεκτρική γεννήτρια εμπλακεί στη συχνότητα του τοπικού δικτύου.



Σχήμα 1.7 Τυπική καμπύλη ($C_p - \lambda$) για A/K Darrieus

- Τέλος οι μηχανές τύποι Darrieus εργάζονται σε μεγάλες τιμές της παραμέτρου “ λ ” γεγονός που εξασφαλίζει μεγάλες τιμές του αριθμού Reynolds και επομένως τυρβώδη ροή και ικανοποιητική αεροδυναμική απόδοση της πτερωτής της μηχανής. Βέβαια η τελευταία παρατήρηση πρέπει να συνδυαστεί και με την επόμενη, η οποία και αφορά την αεροδυναμική συμπεριφορά του συνόλου των αιολικών μηχανών. Πιο συγκεκριμένα :

- Ο συντελεστής ισχύος των μηχανών κατακόρυφου άξονα είναι εν γένει μικρότερος από αυτόν των μηχανών οριζόντιου άξονα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για εμπορικές μηχανές κατακόρυφου άξονα η μέγιστη αναφερθείσα τιμή του συντελεστή ισχύος είναι $C_p = 0,36$ ενώ για τις μηχανές τύπου έλικας η μέγιστη τιμή είναι $C_p = 0,45$.
- Οι μηχανές τύπου Darrieus εμφανίζουν σημαντικό πρόβλημα στην εκκίνηση και απαιτείται εξωτερική βοήθεια, κάτι που δεν εμφανίζεται στις μηχανές οριζόντιου άξονα. [3]

2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

ΟΡΙΣΜΟΣ (Agarwal – 1990): Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους. Με τον όρο "σύνθετο" ορίζεται ένα υλικό που συγκροτείται από τον συνδυασμό δύο ή παραπάνω υλικών σε μακροσκοπική κλίμακα. Πρόκειται για τη συνύπαρξη δύο ή παραπάνω υλικών στα οποία το ένα ονομάζεται συστατικό ενίσχυσης και δίνει στο καινούργιο σύνθετο υλικό τις απαιτούμενες μηχανικές , και όχι μόνο, ιδιότητες ενώ το δεύτερο ονομάζεται μήτρα, έχει συνήθως μικρή πυκνότητα και βοηθά στη βέλτιστη αξιοποίηση των ιδιοτήτων του υλικού ενίσχυσης. Τα υλικά που συμμετέχουν αποτελούν ένα σύνολο βελτιωμένων ιδιοτήτων, τις οποίες κανένα από μόνο του δεν μπορεί επιτύχει. Οι ιδιότητες μπορεί να είναι [4] :

- Στιβαρότητα
- Αντοχή
- Αντοχή στη φθορά
- Αντοχή στη διάβρωση

- Βάρος
- Διάρκεια ζωής
- Ακουστική μόνωση
- Θερμική μόνωση και αγωγιμότητα
- Θερμική συμπεριφορά

Τα σύνθετα υλικά έχουν μεγάλη χρήση από τα αρχαία χρόνια από τον άνθρωπο. Υλικά που με ευκολία βρίσκουμε στη φύση (πέτρα, ξύλο, πηλός, κόκαλα) χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλο βαθμό από τον άνθρωπο, ο οποίος σε σύντομο χρονικό διάστημα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με επιπλέον συστατικά. Αρκετά σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις. Η μία είναι η μήτρα η οποία είναι συνεχής και περιβάλλει την άλλη φάση η οποία ονομάζεται διασπασμένη φάση. Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών αποτελείται από τις ιδιότητες των συνιστωσών των φάσεων των σχετικών ποσών της γεωμετρίας της διασπασμένης φάσης.

2.2. ΕΙΔΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης σε τρεις κατηγορίες:

- Σύνθετα υλικά με ίνες ενίσχυσης
- Στρωματικά σύνθετα υλικά
- Σύνθετα υλικά με σωματίδια ενίσχυσης

Στη βιομηχανία χρησιμοποιούμε τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών καθώς και τα στρωματικά σύνθετα υλικά. Αυτά είναι που θα χρησιμοποιηθούν και στη συγκεκριμένη μελέτη.

2.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ

Έχουν αναπτυχθεί πολλές μεθοδολογίες έτσι ώστε οι κατασκευαστές να είναι σε θέση με μικρό υπολογιστικό κόστος, να καταλήξουν στην καλύτερη επιλογή υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας. Μία

από αυτές τις μεθόδους στηρίζεται στην ανάλυση με την εισαγωγή τριών δεικτών οι οποίοι αντιστοιχούν στις τρεις κύριες απαιτήσεις που θα πρέπει οπωσδήποτε να καλύπτονται και οι οποίες είναι:

- **Η υψηλή αντοχή σε κόπωση**, ώστε να περιοριστεί η υποβάθμιση των υλικών στη διάρκεια της λειτουργία και να διασφαλιστεί η απαιτούμενη εικοσαετής διάρκεια ζωής.
- **Η υψηλή δυσκαμψία του υλικού**, για να εξασφαλιστεί η διατήρηση του καλύτερου αεροδυναμικού σχήματος του πτερυγίου και να αποφευχθεί η σύγκρουσή του με τον πυλώνα. Επιπλέον τοποθετείται σε συνθήκες ισχυρής φόρτισης, όπως και η εκδήλωση τοπικού λυγισμού κάτω από θλιπτικό φορτίο.
- **Η χαμηλή πυκνότητα**, έτσι ώστε να μειώνονται στο ελάχιστο τα φορτία της βαρύτητας.

Ο πρώτος δείκτης για την επιλογή υλικών πρέπει να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της δυσκαμψίας και να έχει ελάχιστη τιμή μάζας. Έτσι έχουμε τον δείκτη [5] :

“ελαφριάς – άκαμπτης δοκού” :

$$M_1 = E^{1/2} / \rho \quad (2.1)$$

με E να είναι το μέτρο Ελαστικότητας και ρ να είναι η πυκνότητα του υλικού.

Με χρήση μόνο αυτού του δείκτη θα υπήρχαν ως πιθανά αποτελέσματα τα αφρώδη υλικά. Η χαμηλή δυσκαμψία που διαθέτουν σύμφωνα με το μέτρο ελαστικότητας τους και σε συνδυασμό με την μικρή πυκνότητα τους έχουν σαν αποτέλεσμα αυξημένη τιμή δείκτη M_1 . Παρ' όλα αυτά, εξαιτίας του όγκου των πτερυγίων σε συνδυασμό με σχεδιαστικά και κατασκευαστικά προβλήματα, τα αφρώδη υλικά δεν είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν.

Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων υπάρχει ο δεύτερος δείκτης με βάση τον οποίο απαιτείται ότι τα υλικά του πτερυγίου θα διαθέτουν ένα ελάχιστο επίπεδο ακαμψίας, σύμφωνα με τον τύπο:

$$M_2 > E \quad (2.2)$$

με κατώτερες επιτρεπόμενες τιμές του μέτρου ελαστικότητας μεταξύ 15–20GPa.

Οι δείκτες που έχουν αναφερθεί δείχνουν τις δύο από τις τρεις ιδιότητες που ορίζουν τη καταλληλότητα του υλικού. Η αντοχή σε κόπωση για τα υλικά πτερυγίου οφείλεται στη χρονικά μεταβαλλόμενη φόρτιση του ανέμου, η οποία είναι ακανόνιστη και στοχαστική, με αποτέλεσμα η ιστορία της φόρτισης να επηρεάζει την αντοχή σε κόπωση με πολύπλοκους τρόπους. Γι' αυτό, όταν απαιτούνται πιο άμεσα διαθέσιμες ιδιότητες των υλικών, τίθεται σε χρήση το "όριο αντοχής", η αντοχή σε κόπωση με σταθερό πλάτος άπειρης διάρκειας. Επιπλέον τα υλικά με μεγαλύτερη αντοχή σε θραύση αστοχούν με ένα πιο σταδιακό τρόπο, παρέχοντας έτσι στο πτερύγιο μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τη στιγμή που θα εμφανιστεί η πρώτη ρωγμή μέχρι την ολοκληρωτική αστοχία. Με αυτό τον τρόπο, πτερύγια που έχουν εμφανίσει βλάβη λόγω κόπωσης, μπορούν να εντοπιστούν κατά τους περιοδικούς Ελέγχους και να αντικατασταθούν, πριν προκληθεί αστοχία του συνόλου της κατασκευής.

Ο τρίτος δείκτης ορίζεται σύμφωνα με το τύπο :

$$M_3 = \sigma_{end} \times G_{ic} \quad (2.3)$$

Με σ_{end} το όριο αντοχής και G_{ic} το ρυθμό εκροής ενέργειας παραμόρφωσης.

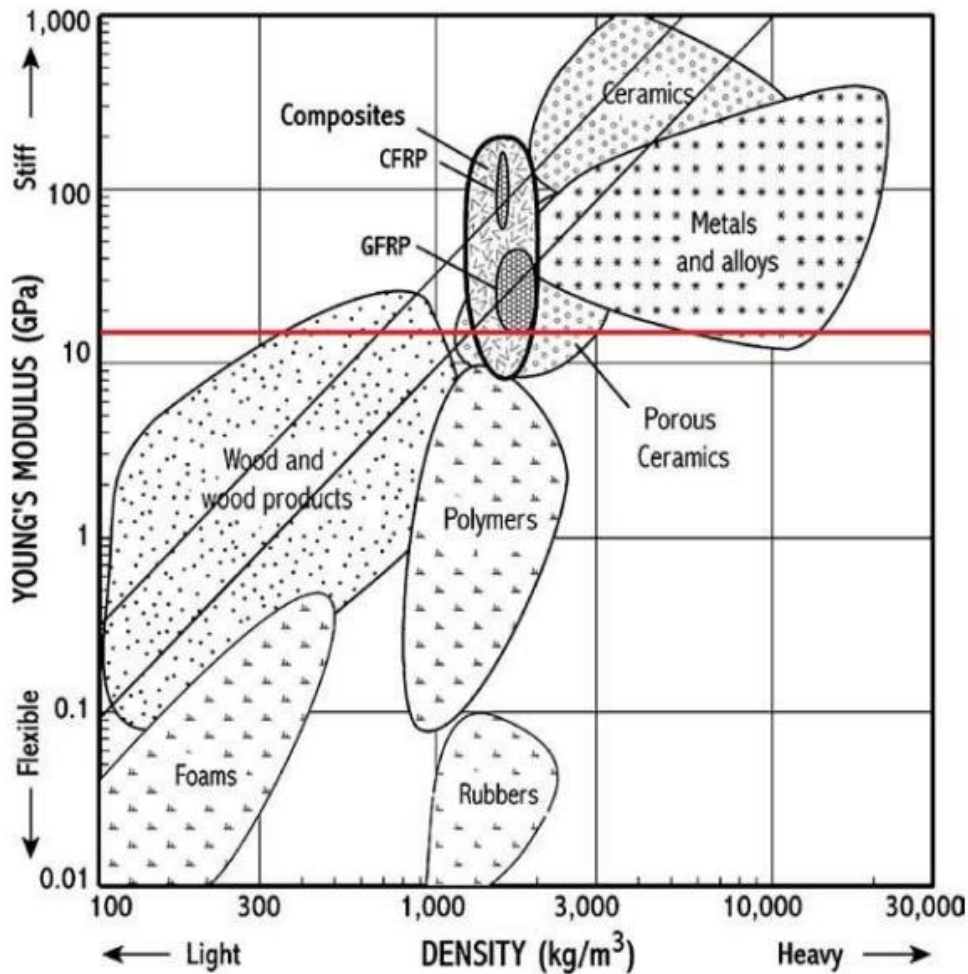
Καταλήγουμε ότι όσο πιο μεγάλοι είναι οι τρεις δείκτες, σημαίνει και πιο ιδανικό το υλικό για χρήση στην ανεμογεννήτρια. Παρ' όλα αυτά κατά τη διαδικασία επιλογής καταλληλότερου υλικού προκύπτουν σαν ιδανικότερα από τις σχέσεις

(2.1) και (2.2) διαφορετικά απ' ότι προκύπτει από τη σχέση (2.3).Οπότε θα χρειαστεί να υπολογίσουμε μια σχέση που να λαμβάνει υπόψη τους δείκτες M_1 και M_3 ταυτόχρονα και που θα είναι της μορφής :

$$\mathbf{M} = w \times \mathbf{M}_1 + (1 - w) \times \mathbf{M}_3 \quad (2.4)$$

w: συντελεστής στάθμισης με τιμή 0,5 για τους συντελεστές M_1 και M_2 .

Τέλος, οι δείκτες εμφανίζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.1) κατά το οποίο οι διαγώνιες γραμμές αντιστοιχούν σε δύο σταθερές τιμές του δείκτη M_1 (κάτω γραμμή : 0,003 και επάνω γραμμή : 0,006).Η οριζόντια γραμμή αντιστοιχεί στο δείκτη M_2 και σε τιμή του μέτρου ελαστικότητας $E=15$ GPa,η οποία είναι το κατώτερο όριο του μέτρου Ελαστικότητας που θα πρέπει να έχει κάποιο υλικό έτσι ώστε να είναι επαρκώς δύσκαμπτο για χρήση στο πτερύγιο της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα απεικόνισης της σχέσης μεταξύ δυσκαμψίας και πυκνότητας

2.4 ΜΗΤΡΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι μήτρες πρέπει να χαρακτηρίζονται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία και σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του υλικού. Επιπλέον, πρέπει αυτές οι ιδιότητες να συμβαδίζουν με τις ιδιότητες των ενισχυτικών ινών. Συνηθίζεται το υλικό της μήτρας να έχει μικρότερη πυκνότητα, δυσκαμψία και αντοχή από τη πυκνότητα των ινών. Ανάλογα με το υλικό της μήτρας διακρίνονται και οι παρακάτω ομάδες υλικών μήτρας για σύνθετα υλικά :

- Οργανικές
- Μεταλλικές
- Κεραμικές

ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ :

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε: (1) Θερμοπλαστικές: Δηλαδή πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, που οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύονται με την άνοδο της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του μικρού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Σαν ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κ.λπ.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής. 16 (2) Θερμοσκληρυνόμενες: Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και πιο ψαθυρά. Τέτοιες μήτρες είναι: Οι πολυεστερικές ρητίνες που ενισχύονται με ίνες γυαλιού. • Εποξυδικές ρητίνες με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200°C, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και χρήση στη αεροναυπηγική. Οι φαινολικές ρητίνες, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400°C.

ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ :

Για υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται οι μήτρες μεταλλικών ή κεραμικών υλικών, εφόσον η μέγιστη θερμοκρασία που επιτρέπεται στις οργανικές μήτρες είναι περίπου 300°C. Από την άλλη οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 500 °C.

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών έναντι των οργανικών μητρών.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερη πυκνότητα και οπότε μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής.
<ul style="list-style-type: none"> • Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου υλικού 	<ul style="list-style-type: none"> • Σε υψηλές θερμοκρασίες, φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα
<ul style="list-style-type: none"> • Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου για ειδικές εφαρμογές 	<ul style="list-style-type: none"> • Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μμεγαλύτερο κόστος
<ul style="list-style-type: none"> • Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου υλικού 	<ul style="list-style-type: none"> • Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη επιφάνειά μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη ρωγμάτωση και τη θραύση των ινών

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών έναντι οργανικών μητρών.

ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

Οι ίνες παρέχουν βελτίωση της αντοχής του κεραμικού και στην αύξηση της μηχανικής αντοχής. Η ολκιμότητα και το ποσοστό των ινών βελτιώνουν την αντοχή της μήτρας. Το μεγαλύτερο πρόβλημα εμφανίζεται στη συνάφεια των ινών και μήτρας.

2.5 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ

Τεχνολογικά τα σημαντικότερα σύνθετα υλικά είναι εκείνα στα οποία η διασπασμένη φάση είναι σε μορφή ίνας. Οι στόχοι του σχεδιασμού των σύνθετων υλικών με ίνες τις περισσότερες φορές αναφέρονται στην υψηλή αντοχή και δυσκαμψία στη φάση του βάρους. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αποδίδονται με όρους ειδικής αντοχής κυβικού μέτρου ελαστικότητας, παράμετροι που επομένως αντιστοιχούν στους λόγους της εφελκυστικής αντοχής με το ειδικό βάρος και στο μετρό της ελαστικότητας με το ειδικό βάρος. Ινώδη σύνθετα υλικά με εξαιρετικά υψηλές τιμές ειδικής αντοχής και μέτρο ελαστικότητας έχουν κατασκευαστεί με τη χρήση χαμηλής πυκνότητας ινών και μητρικών υλικών. Οι ίνες είναι χιλιάδες νήματα διαμέτρου από 5 μm μέχρι 15 μm . Τα συνηθέστερα υλικά των ινών είναι [6] :

- Γυαλί.
- Αραμίδιο ή Kevlar-Πολύ ελαφρύ.
- Άνθρακας- υψηλή αντοχή.
- Βορόνιο- υψηλή αντοχή.
- Καρβίδιο του πυριτίου- καλή αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες.

Κατά την διαδικασία παρασκευής των ινών, οι κατευθύνσεις τους μπορούν να είναι διάφορες, όπως :

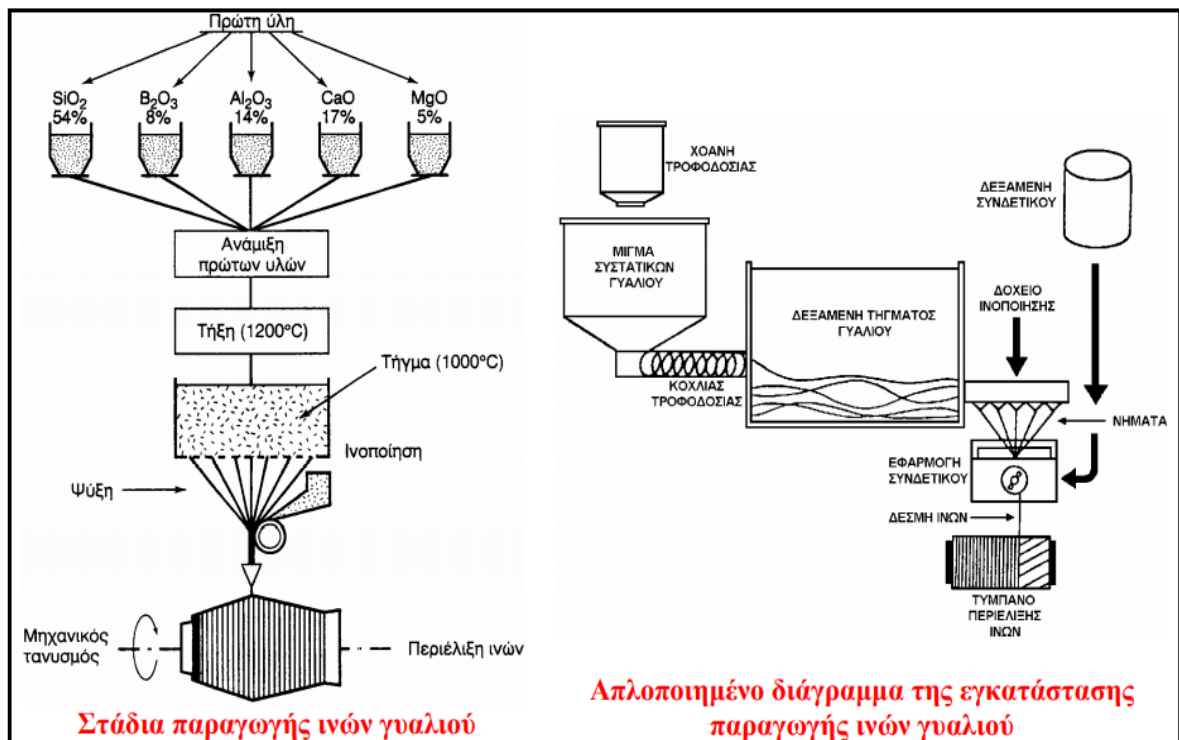
- Προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και στις τρεις διαστάσεις, με διαφορετικά μεγέθη νήματος.
- Σε δύο κατευθύνσεις με τις ίνες πεπλεγμένες ή και όχι πεπλεγμένες.
- Σε περισσότερες από δύο κατευθύνσεις αλλά με τις ίνες πεπλεγμένες

Για τα σύνθετα υλικά ασυνεχών ινών, οι ίνες μπορεί να έχουν υπερβολικά μικρό μήκος για να παρέχουν ουσιαστικά μια βελτίωση της αντοχής. Οι ίνες άνθρακα αντοχή στην κόπωση, έχουν υψηλή ελαστικότητα και ανθεκτικότητα. Παρ' όλα αυτά έχουν μειονέκτημα προς το κόστος. Τις περισσότερες φορές ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται μαζί με ίνες γυαλιού σε περιοχές που ασκούνται περισσότερες τάσεις. Οι ίνες γυαλιού έχουν μεγαλύτερη αντοχή, αλλά μικρότερη ελαστικότητα. Επομένως σε πτερύγια μεγάλης κλίμακας δεν συνιστάται η χρησιμοποίησή τους. Σε σχέση με τις ίνες άνθρακα οι οργανικές ίνες έχουν καλύτερη αντοχή αλλά μειονεκτούν στην συμπεριφορά τους απέναντι στην υγρασία. Επιπρόσθετα η αντοχή σε κόπωση του αρμιδιού δεν έχει εξεταστεί

μέχρι σήμερα και συνεπώς αποκλείεται η χρήση του στα περύγια ανεμογεννητριών.

ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ

Η παραγωγή των ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα (Σχήμα 2.2) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:



Σχήμα 2.2 Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού

1. Τοποθέτηση της πρώτης ύλης σε δεξαμενή που τήκεται.
2. Τροφοδοτείται το τήγμα σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα.
3. Με την επίδραση της βαρύτητας ρέει το γυαλί ανάμεσα από τις οπές του πυθμένα.
4. Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά μέχρι να αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο (1 - 15 μm) και στη συνέχεια γίνεται ελαφρύς ψεκασμός τους με νερό (ψύξη).
5. Έπειτα οι ίνες διέρχονται από ιμάντα και επιβάλλει σ' αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή

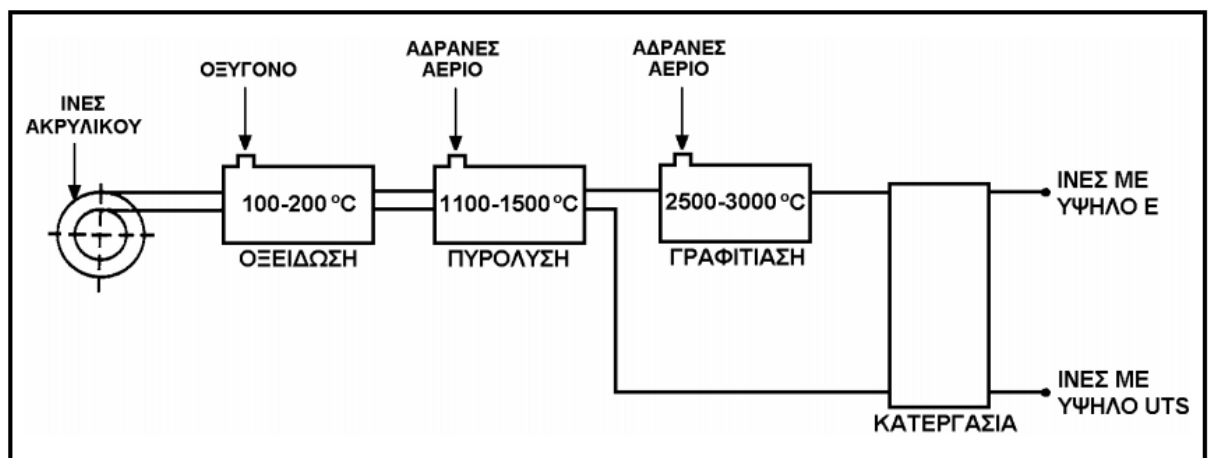
πρόσθετα (size) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν στην καλύτερη πρόσφυση ινών - μήτρας.

6. Οι ίνες περιτυλίσσονται ανά δέσμες (strand ή end) των 204 νηματίων (τυπική τιμή) γύρω από τύμπανο, που περιστρέφεται με μμεγάλη ταχύτητα (50 m/s).

ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι ίνες άνθρακα όταν μιλάμε για υψηλή αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας είναι η επικρατέστερη. Κυρίως όταν χρειάζεται μείωση του βάρους και ο ταχύτερος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς. Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών.

Στη παραγωγή ανθρακονημάτων χρησιμοποιείται πολυμερικές ίνες σαν πρώτη ύλη. Η παραγωγή ινών γραφίτη από ίνες (PAN) πραγματοποιείται σε τρία στάδια όπως το Σχήμα 2.2



Σχήμα 2.2 Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα

Οξείδωση των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200 ο C), με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.

- Πυρόλυση, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100 - 1500 °C. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (High strength carbon fibers) και η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa.

- Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000°C), οπότε πραγματοποιείται γραφίτιωση, με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (High module carbon fibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400 GPa, η δε διάμετρός τους είναι περίπου 10 μm. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος παραγωγής του γραφίτη είναι τουλάχιστον δέκα φορές υψηλότερο από τις ίνες γυαλιού.

ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ

Οι πιο γνωστές είναι οι ίνες από Nylon, Kevlar και πολυαιθυλένιο. Τα Nylon έχουν αντοχή που δε ξεπερνά τα 10 Pa και το μέτρο ελαστικότητας είναι σχεδόν 1000 Pa. Είναι σχετικά δημοφιλείς παρόλο που δεν είναι ίνες υψηλής απόδοσης, εξαιτίας του χαμηλού κόστους παραγωγής τους.

Η πρώτη υψηλής απόδοσης οργανική ίνα αραμιδίου παρασκευάστηκε από την DuPont και έγινε γνωστή με την ονομασία Kevlar που παράγεται σε τρεις τύπους:

- Kevlar-29: Με μέτρο ελαστικότητας 60 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- Kevlar-49: Με μέτρο ελαστικότητας 120 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- Kevlar-149: Με μέτρο ελαστικότητας 180 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa.

Το Kevlar έχει υψηλές μηχανικές ιδιότητες εξαιτίας του ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι πιο ισχυρές και συντάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούν ένα σταθερό πλέγμα σε μορφή επίπεδης ταινίας. Επίσης, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη, όπου σε 0,3 % θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξιοσημείωτο όμως είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων.

ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Αρκετά μέταλλα όπως το βολφράμιο (W) και το βόριο (B), θα μπορούσαν να είναι από τα καλύτερα ενισχυτικά για σύνθετα υλικά εξαιτίας της υψηλής τιμής ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό βάρος τους. Παρ' όλα αυτά οι τεχνικές παραγωγής τους (αναγωγή από αλογονίδιο του βορίου και απόθεση με τεχνική CVD) είναι πολύ δαπανηρές.

ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Έχουν υψηλή αντοχή και στιβαρότητα και χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες. Πιο συχνά χρησιμοποιούνται οι κεραμικές καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλούμινας (Al₂O₃). Τα καρβίδια του πυριτίου παρουσιάζουν σταθερή μηχανική αντοχή μέχρι τους 1400°C, αλλά έχει επιτρεπόμενη θερμοκρασία χρήσης 900°C. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας με διάμετρο 250μm έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και λόγω της φύσεως των χημικών δεσμών η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων παραμένει μέχρι και τους 800°C. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

ΤΡΙΧΙΤΕΣ

Οι τριχίτες είναι νηματικοί μονοκρύσταλλοι που παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας. Η διάμετρος τους είναι της τάξης του 1μm, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά και παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλειου κρυστάλλου. Οι εξωτερικές τους επιφάνειες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλουμίνα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρύλλια και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχιτών σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη. Στο πίνακα γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων ινών τριχιτών από SiC και Al₂O₃.

2.6 ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ SANDWICH ΥΛΙΚΑ

Τα πολυστρωματικά υλικά αποτελούν μια από τις κατηγορίες των στρωματικών σύνθετων υλικών (μαζί με τα επιστρωμένα υλικά και τα διμεταλλικά σύνθετα υλικά), δηλαδή υλικών που αποτελούνται από συνδυασμό άλλων υλικών, προκειμένου να συνθέσουν το τελικό προϊόν. Σχηματίζονται από την επανάληψη ενός στοιχειώδους διστρωματικού υλικού A/B, προκαθορισμένου πάχους, το οποίο ονομάζεται περίοδος. Όπως συμβαίνει και στα υλικά με ενίσχυση ινών, τα Πολυστρωματικά υλικά αποτελούνται από συνδυασμό μετάλλου - κεραμικού, μετάλλου - γυαλιού, μετάλλου - πολυμερούς, αλλά και συνδυασμό διαφορετικών μετάλλων

Τα πολυστρωματικά υλικά παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες προκύπτουν από τις πολλές διεπιφάνειες στο εσωτερικό του συνθέτου, οι οποίες εμποδίζουν την κίνηση των διαταραχών και τη διάδοση των ρωγμών. Έρευνες έχουν αποδείξει ότι η μικροσκληρότητα πολυστρωματικών (A/B, με A : μέταλλο και B : κεραμικό) επιστρωμάτων μικρού πάχους είναι συνάρτηση του πάχους της μεταλλικής στρώσης. Τα sandwich υλικά προκύπτουν από την σύνδεση, κόλληση ή συγκόλληση δύο επιδερμίδων υλικού υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων πάνω σε "ψίχα" υλικού χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων, που ονομάζεται υλικό πλήρωσης και εξασφαλίζει την απόσταση μεταξύ των δύο επιδερμίδων. Το υλικό πλήρωσης είναι είτε κάποιο αφρώδες πολυμερές, ως επί το πλείστον πολυουρεθάνη, είτε κάποιο ελαφρύ μέταλλο, συνήθως Al, διαμορφωμένο σε γεωμετρία κυψέλης. Το κόστος του αφρού πολυουρεθάνης ανέρχεται από 2 έως 5 EUR/kg υλικού, ανάλογα με τον προμηθευτή και την μορφή που έχει (έτοιμα φύλλα δεδομένου πάχους ή πεπιεσμένες φιάλες) [25].

3. ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι αστοχίες στα υλικά συμβαίνουν κυρίως σε εσωτερικές επιφάνειες με αποτέλεσμα να μην είναι ορατές. Προκύπτουν διάφορες αστοχίες όπως αποκολλήσεις στρωμάτων ή επιφανειών με ίνες, αστοχίες λόγω θλίψης και ρωγμές σε διάφορα σημεία. Τα σύνθετα υλικά είναι πιο ανθεκτικά. Στα πτερύγια εμφανίζεται ένα κομμάτι των αστοχιών, κυρίως στα άκρα τους, εξαιτίας των αέριων σωματιδίων που προσκρούουν και διαβρώνουν τις εξωτερικές επιφάνειες,

Πιο συχνά εμφανίζονται αστοχίες στα πτερύγια και στο ρότορα .Η επισκευή ενός πτερυγίου είναι η πιο δαπανηρή εργασία που μπορεί να πραγματοποιηθεί. Λόγω αστοχίας πτερυγίου μπορεί να προκαλέσει ανισοροπία στις περιστροφικές δυνάμεις και μπορεί να καταλήξει μέχρι και σε κατάρρευση ολόκληρου του πύργου [7].

Οι τύποι αστοχιών των πτερυγίων των ανεμογεννητριών είναι :

- Καταστροφή σχήματος και ανάπτυξη αστοχίας μεταξύ συγκόλλησης καλύμματος και κύριας φλάντζας δοκού.
- Καταστροφή σχήματος και ανάπτυξη αστοχίας μεταξύ συγκόλλησης καλύμματος πάνω και κάτω περιφερειακά του κελύφους.
- Καταστροφή σχήματος και ανάπτυξη αστοχίας μεταξύ διεπαφής κορμού και προσώπου σε σύνθετα υλικά με την μορφή σάντουιτς εξωτερικά αλλά και στους κύριους δοκούς.
- Εσωτερική καταστροφή σχήματος και ανάπτυξη αστοχίας σε πολυστρωματικά υλικά περιφερειακά ή στην κύρια δοκό υπό εφελκυστικά ή θλιπτικά φορτία.
- Ταχύτατη διάδοση ρωγμών σε ίνες στην περιφέρεια ή σε κύρια δοκό
- Λογισμός στην περιφέρεια λόγω καταστροφής σχήματος ή ανάπτυξης αστοχίας στην σύνδεση μεταξύ κύριων δοκών και περιφέρειας υπό θλιπτικά φορτία.
- Ανάπτυξη ρωγμών σε στρώσεις και αποχωρισμός των στρώσεων από την επικάλυψη.

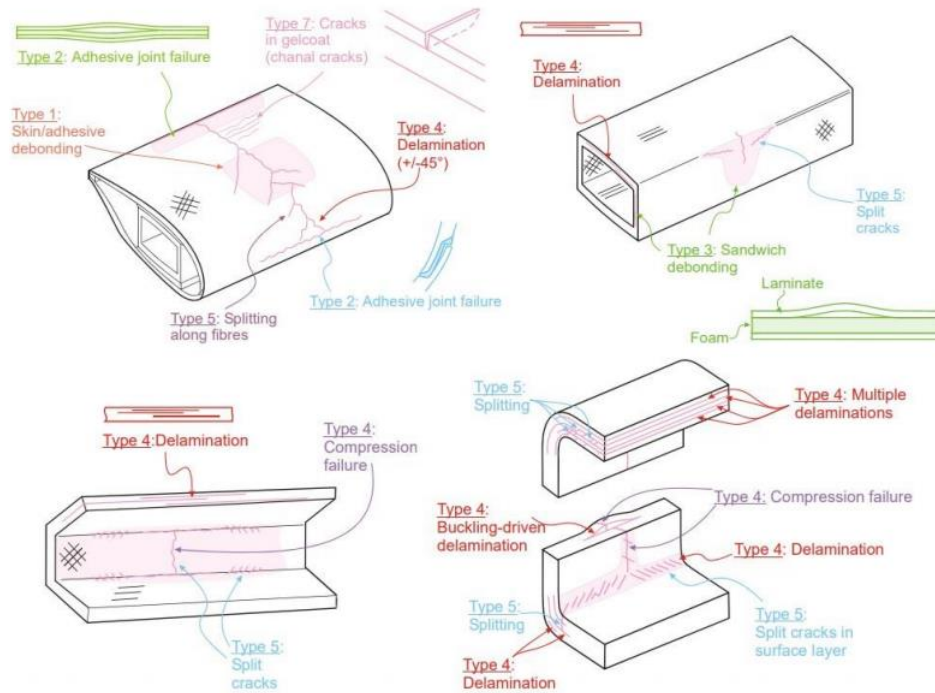
3.1 ΑΙΤΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Τα πτερύγια ανεμογεννητριών μπορούν να αστοχήσουν με διάφορους τρόπους. Οι λεπτομέρειες της αστοχίας και η εξέλιξη των ρωγμών θα διαφέρει από το σχεδιασμό ενός πτερυγίου στο άλλο. Ωστόσο, η εμπειρία δείχνει ότι, ανεξάρτητα από τον οποιοδήποτε σχεδιασμό των πτερυγίων διάφοροι τύποι αστοχιών που σχετίζονται με το υλικό και τις δομικές καταστάσεις μπορούν να αναπτυχθούν. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτές οι καταστάσεις βλάβης μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία του πτερυγίου που απαιτεί αντικατάσταση. [9]

Μπορεί να υπάρχουν πολλές αιτίες που ένα πτερύγιο αστοχεί όπως :

- Γεωμετρικοί παράγοντες που σχετίζονται με λυγισμό, μεγάλη παραμόρφωση ή θραύση.

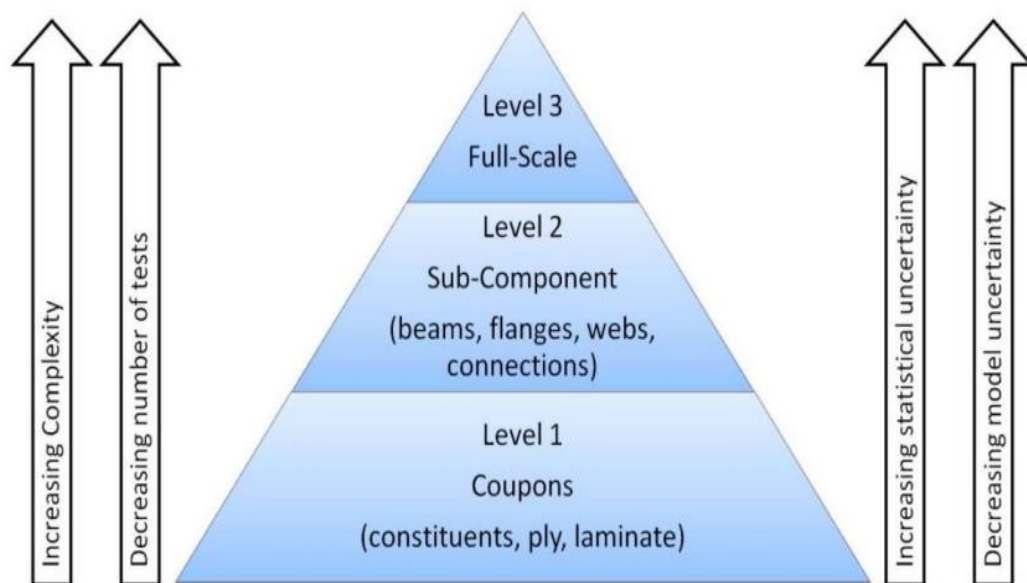
- Αρχικές ατέλειες που σχετίζονται με την κατασκευή, όπως αρχική παραμόρφωση, υπολειπόμενες τάσεις ή ελαττώματα από την παραγωγή.
- Η φθορά λόγω ηλικίας, η οποία προκαλεί κόπωση.
- Κρούση από ιπτάμενα αντικείμενα ή άλλα παρόμοια.
- Γεωμετρικοί παράγοντες που σχετίζονται με λυγισμό, μεγάλη παραμόρφωση ή θραύση.



Σχήμα 3.1 Γραφήματα από διαπιστωμένες αστογίες σε πτερύγια ανεμογεννητριών

3.2 Επιθεωρήσεις για την δομή και τα υλικά των πτερυγίων των ανεμογεννητριών

Κατά τη σχεδίαση και παραγωγή των πτερυγίων των ανεμογεννητριών ποικίλοι έλεγχοι πραγματοποιούνται με σκοπό την εκτίμηση της ποιότητας των υλικών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 έχουν δημιουργηθεί 3 κύρια επίπεδα σε μορφή πυραμίδας. Για να έχουν τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας πιστοποίηση IEC 61400 πρέπει να έχουν περάσει τον έλεγχο του πρώτου και του τρίτου επιπέδου.



Σχήμα 3.2 Επίπεδα επιθεωρήσεων πτερυγίων ανεμογεννητριών

Στο πρώτο επίπεδο ελέγχων, μικρά δείγματα από τα υλικά του πτερυγίου υπόκεινται σε τεστ με σκοπό τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων τους και την αντοχή τους σε κόπωση. Συνήθως δεν κοστίζουν ακριβά αυτοί οι έλεγχοι και είναι εύκολοι στην εκτέλεση. Στο δεύτερο επίπεδο ελέγχων μεγαλύτερα κομμάτια υπόκεινται σε πιο πολύπλοκους ελέγχους. Σκοπός είναι η επαλήθευση των υπολογιστικών μοντέλων για κρίσιμες λεπτομέρειες. Γενικά είναι πιο ακριβή διαδικασία, για αυτό και εκτελείται σπανιότερα. Στο τρίτο επίπεδο ελέγχων, τα πτερύγια εξετάζονται τόσο δυναμικά όσο και στατικά με βάση τις απαιτήσεις του IEC 61400-23. Έλεγχοι πλήρους κλίμακας πραγματοποιούνται τυπικά σε ένα ή δύο πτερύγια με σκοπό την επιβεβαίωση ότι πληρούν τις προδιαγραφές της σχεδίασης. Το συνολικό κόστος των ελέγχων σε αυτό το επίπεδο είναι ιδιαίτερα υψηλό αφού μπορεί να διαρκέσει αρκετούς μήνες μέχρι να πραγματοποιηθεί. Επίσης σημαντικό είναι το κόστος αναμονής προκειμένου το προϊόν να βγει στην αγορά [24].



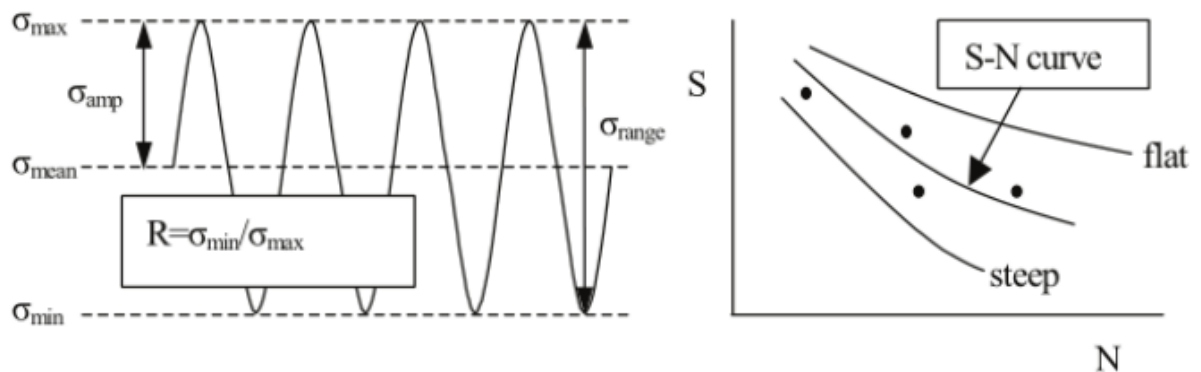
Σχήμα 3.3 Πλήρης στατικός έλεγχος πτέρυγας 32m σε εναλλασσόμενα flapwise και edgewise φορτία

Αυτή τη στιγμή τα στάνταρ ποιότητας IEC 61400-23 και DNVGL-ST-0376 πραγματοποιούν ελέγχους κόπωσης σε δύο κατευθύνσεις flapwise και edgewise, μία κατεύθυνση τη φορά. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους οι πτέρυγες των ανεμογεννητριών υπόκεινται σε υψηλά δυναμικά φορτία το αποτέλεσμα έχουν πολλούς κύκλους φόρτισης σε διαφορετικές κατευθύνσεις, φυγοκεντρικά φορτία, ποικίλους στροβιλισμούς, διατμητικές τάσεις καθώς και απότομες αλλαγές της κατεύθυνσης του αέρα. Όλα τα παραπάνω οδηγούν σε σημαντικές αστοχίες λόγω κόπωσης στη ζωή των περυγίων. Οι τωρινές προσομοιώσεις για τα τεστ κόπωσης δεν αντιπροσωπεύουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις δυνάμεις και τα πραγματικά φορτία που θα δεχτούν.

3.3 Κόπωση

Κατά την διάρκεια των χρόνων οι μηχανικοί σχεδιαστές αναγνώρισαν την ανάγκη για γνώση της αστοχίας των υλικών. Κατάλαβαν ότι η συνεχόμενη εφαρμογή φορτίων, έστω και εντός επιτρεπόμενων ορίων, οδηγεί σε ρωγμή και στην συνέχεια σε αστοχία του υλικού. Το παραπάνω φαινόμενο το ονόμασαν κόπωση. Η κόπωση ορίζεται ως η εξασθένηση ενός υλικού λόγω επαναλαμβανόμενων φορτίων συχνά εμφανιζόμενων με εναλλασσόμενη κυματική μορφή. Την ονομασία του φαινομένου ως κόπωση την έδωσε ο Άγγλος μηχανικός Braithwaite το 1854 ή ο Γάλλος μαθηματικός και μηχανικός Poncelet το 1839. Η κόπωση θεωρείται πολύ σημαντικός τύπος αστοχίας σε ένα υλικό και έχουν πραγματοποιηθεί αμέτρητες μελέτες για την επεξήγησή της. Σαν τεχνικό πρόβλημα έγινε πασιφανές περίπου στα μέσα του 19ου αιώνα. Οι πρώτες γραπτές μελέτες της κόπωσης χρονολογούνται το 1800, επιδοτούμενες από τις δύο μεγάλες βιομηχανίες εκείνης της εποχής, την ορυχεία και την σιδηροδρομικά. Πιθανόν, το πρώτο πείραμα κόπωσης εκτελέστηκε Στην Γερμανία από τον Αλμπέρτο, παρακινούμενο από τις συνεχείς αστοχίες στην μεταφορά βαγονιών στα ορυχεία. Το 1958 ο Γερμανός μηχανικός Wohler, διαπίστωσε ότι η κόπωση εξαρτάται από την επαναλαμβανόμενες τάσεις και το 1870 διατύπωσε τον νόμο Wohler. Ήταν ο πρώτος που κατάλαβε την σύνδεση μεταξύ θλιπτικών δυνάμεων σε σχέση τις αντοχής σε κόπωση του κάθε υλικού. Δεν διατύπωσε τις ιδέες του σε διαγράμματα αλλά σε μορφή πινάκων. Το 1910, ο Αμερικάνος ερευνητής Basquin παρουσίασε τα αποτελέσματα σε λογαριθμική κλίμακα, σε S-N καμπύλες. Ακολούθως την κόπωση την μελέτησε η αεροναυπηγική βιομηχανία μεταξύ του 1939 και 1960 λόγω καταστροφών από κόπωση. Ο Gassner και ο Teichmann πραγματοποίησαν σημαντική έρευνα στην κόπωση. Παρατήρησαν ότι οι πτέρυγες των αεροπλάνων δέχονται επαναλαμβανόμενα εναλλασσόμενα φορτία λόγω στροβιλισμού κατά την διάρκεια των πτήσεων. Προσπάθησαν να μελετήσουν και να μετρήσουν τα φορτία και την παραμόρφωση και να δημιουργήσουν διαγράμματα. Τελικά η ανωτέρω τεχνική μέτρησης επιτεύχθηκε από τους Matsuishi και Endo τριάντα χρόνια αργότερα. Δημοσίευσαν την μέθοδο 'rainflow' η οποία ικανοποιούσε όλες τις προδιαγραφές. Το 1934 ο Σουηδός ερευνητής

Palmgren παρουσίασε τον γραμμικό κανόνα αστοχίας. Ο κανόνας ξανά εμφανίζεται και παρουσιάζεται από τον Miner το 1945, ο οποίος πρωτοτύπησε στο γεγονός ότι έκανε και τεστ για τον υπολογισμό της κόπωσης. Στο Σχήμα 3.2 παρατηρούμε ότι το κύριο χαρακτηριστικό της κυματομορφής αναπαρίσταται σε μορφή τάσης-ζωής (stress-life (S-N)). Για S, συνήθως υποδηλώνει την τάση ή φορτίο ή παραμόρφωση ή μετατόπιση. Σε ομογενή υλικά χρησιμοποιείται η τάση, ενώ στα σύνθετα χρησιμοποιείται η παραμόρφωση. Στο N χρησιμοποιείται ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία. Ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθούν μισοί κύκλοι φόρτισης μέχρι την αστοχία και ο αριθμός της συχνότητας των φορτίων. Στο Σχήμα 3.4 το σ_{max} παρουσιάζει την μέγιστη τάση μέσα σε ένα κύκλο φόρτισης, το σ_{min} την ελάχιστη τάση, το σ_{mean} την μέση τάση, το σ_{range} το εύρος των τάσεων δηλαδή η αλγεβρική διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τάσης, σε το πλάτος της τάσης το μισό του εύρους και R είναι η αναλογία τάσεων δηλαδή $\sigma_{min} - \sigma_{max} = R$. Το Σχήμα 3.4 δείχνει επίσης το διάγραμμα S-N, παρουσιάζοντας την σχέση S με το N. Οι ιδιότητες της κόπωσης μπορούν να παρουσιαστούν από την κλίση της καμπύλης S-N. Μια επίπεδη κλίση αντιπροσωπεύει μια ισχυρές ιδιότητες κόπωσης συγκριτικά με μία απότομη κλίση.



Σχήμα 3.4 Γενική ετυμολογία κόπωσης

Τα επαναλαμβανόμενα φορτία παράγουν τοπικές αστοχίες σε ένα σύνθετο υλικό. Αυτό είναι αποτέλεσμα της αθροιστικής διαδικασίας η οποία περιέχει τρεις διαφορετικές φάσεις:

- Έναρξη ρωγμής
- Εξέλιξη ρωγμής
- Διάσπαση του σύνθετου

Η πλαστική παραμόρφωση προκαλεί μόνιμη ζημιά στο σύνθετο υλικό. Μετά από έναν αριθμό επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης, μια ρωγμή θα υφίσταται, η οποία θα εξελίσσεται όσο συνεχίζονται οι κύκλοι φόρτισης. Μετά από έναν αριθμό θα έχουμε διάσπαση του σύνθετου. Γενικά έχουμε παρατηρήσει ότι η διαδικασία κόπωσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Πυροδότηση ρωγμής
- Μικρή ανάπτυξη ρωγμής
- Μεγάλη ανάπτυξη ρωγμής
- Τελική διάσπαση

3.4 Κόπωση στα σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν ένα μείγμα υλικών, ωστόσο κυριαρχεί ένα υλικό το οποίο προσδίνει την αντοχή του και ένα ακόμα που το συμπληρώνει. Λόγω όλων αυτών η αντοχή ενός σύνθετου εξαρτάται:

- Το ινώδες υλικό.
- Η αναλογία όγκου ινώδους υλικού προς πολυμερικής ρητίνης.
- Ο προσανατολισμός των ινών.
- Ο τύπος της ρητίνης.
- Η ύπαρξη ατελειών, κακής ευθυγράμμισης και πορώδες υλικού.
- Η αντοχή σε υγρασία.
- Η θερμική αντοχή του υλικού.

Τα σύνθετα υλικά αστοχούν σε θλιπτικές ή εφελκύστηκες τάσεις. Το όριο αντοχής τους δεν υπολογίζεται από την μέση τάση. Οι προσανατολισμένες ίνες έχουν καλύτερη αντοχή σε κόπωση προς την διεύθυνση του προσανατολισμού τους από τα άλλα σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα υλικά υπόκεινται σε δύο μηχανισμούς αστοχίας. Στα υψηλά φορτία και χαμηλά φορτία. Για τα υψηλά φορτία, η αστοχία ξεκινάει από κάποιες ίνες όπου υφίστανται συγκέντρωση τάσεων, και παράγει ρήγματα σε γειτονικές ίνες. Στην συνέχεια από το αρχικό ρήγμα, η αστοχία στο σύνθετο συμβαίνει γρήγορα. Για τα χαμηλά φορτία, οι τάσεις στις ίνες είναι

μικρότερες από την αντοχή τους, ωστόσο η παραμόρφωση της μήτρας μπορεί να ξεπεράσει το όριο κόπωσης. Συνεπώς η αστοχία ξεκινάει από την μήτρα. Αυτός ο μηχανισμός συμβαίνει μετά από 106 κύκλους κόπωσης. Για μεσαίες τάσεις, οι μηχανισμοί αστοχίας είναι μια μίξη των προηγούμενων δύο.

4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα προβλήματα που δεν ήταν εφικτό να λύσουν έως τώρα οι επιστήμονες, είναι πλέον εφικτό σε μικρό χρονικό διάστημα με τη χρήση του υπολογιστή και των υπολογιστικών μεθόδων όπως τα πεπερασμένα στοιχεία. Στην Ευρώπη, τις ΗΠΑ και σε όλες τις ανεπτυγμένες χώρες, το κράτος χρηματοδοτεί τα ανώτατα ιδρύματα και τις ερευνητικές εταιρίες, με σκοπό την ανάπτυξη προγραμμάτων Προϊόν της συστηματικής εργασίας των ερευνητών είναι η ανάπτυξη των προγραμμάτων για τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τα εμπορικά προγράμματα αποτελούνται από :

- **Τα γραφικά προγράμματα**, τα οποία χρησιμοποιούνται πριν και μετά την ανάλυση
- **Πρόγραμμα για την ανάλυση – υπολογισμό**, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μελέτη διάφορων προβλημάτων που αφορούν τη μηχανική των στερεών στα ρευστά, στην ακουστική, στην θερμότητα, στη κατεργασία των μετάλλων, στον ηλεκτρισμό και σε διάφορες άλλες περιοχές.

4.2. CAD/CAM

Σχεδίαση με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAD) και παραγωγή με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAM). Με το CAD/CAM σχεδιάζουμε και παράγουμε προϊόντα, αποτέλεσμα μιας διαδικασίας και με προορισμό τον καταναλωτή.

Με το CAD/CAM γίνεται χρήση της πληροφορικής σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του προϊόντος και κυρίως στη δημιουργία, μεταβολή, ανάλυση, βελτιστοποίηση μορφής και προγραμματισμό των παραγωγικών διαδικασιών του προϊόντος.

Γι' αυτό το λόγο μπορεί να ορισθεί και ως σχεδιομελέτη και παραγωγή με τη χρήση Η/Υ που αποσκοπεί στη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου του προϊόντος.

Βασικός παράγοντας στη διαδικασία της σχεδιομελέτης είναι η δημιουργία του τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου του προϊόντος που αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη των κάθετων εφαρμογών (που στηρίζονται στο μοντέλο του προϊόντος και αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση και παραγωγή του).

Ο βασικός λόγος ύπαρξης των CAD/CAM συστημάτων είναι η ανάπτυξη από την αρχή ενός σωστού προϊόντος, στον ελάχιστο δυνατό χρόνο, με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τη καλύτερη δυνατή ποιότητα.

4.3. CAE

Τα συστήματα ανάλυσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι το σύνολο των τεχνολογιών υποβοήθησης του Μηχανικού το οποίο περιλαμβάνει μαζί με άλλα τα συστήματα CAD, που αφήνουν τον σχεδιαστή να μελετήσει και να προσομοιώσει τη συμπεριφορά του προϊόντος που σχεδιάστηκε, έτσι ώστε το προϊόν να επέλθει στο στάδιο της παραγωγής με τη ταχύτερη ακρίβεια. Τα εργαλεία CAE αποτελούνται από προγράμματα ανάλυσης λειτουργίας μηχανών μέχρι και σενάρια απώλειας ψυκτικού υγρού σε πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι από τις πιο γνωστές μεθόδους CAE. Μέσω αυτής είναι δυνατή η στατική και δυναμική ανάλυση τάσεων, ρευστομηχανικές, ακουστικές και ηλεκτρομαγνητικές αναλύσεις.

Επιπλέον, τα εργαλεία βελτιστοποίησης περιλαμβάνονται στα εργαλεία CAE και συνήθως ο σκοπός της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους είτε άμεσα, είτε έμμεσα.

Μέσω της μεθόδου CAE επιτυγχάνεται μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής πρωτοτύπων. Αυτό συμβαίνει επειδή έχει τη δυνατότητα ο μηχανικός να μελετήσει τη συμπεριφορά και και την επίλυση των λαθών που θα προκύψουν.

4.4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

4.4.1 Στάδια ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Για τη μοντελοποίηση μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία διακρίνουμε τα ακόλουθα στάδια:

1^ο Στάδιο → Κατασκευή της γεωμετρίας.

2^ο Στάδιο → Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων και διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία.

3^ο Στάδιο → Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών (μπορεί να γίνει και σε προηγούμενο στάδιο) και επιβολή των οριακών συνθηκών.

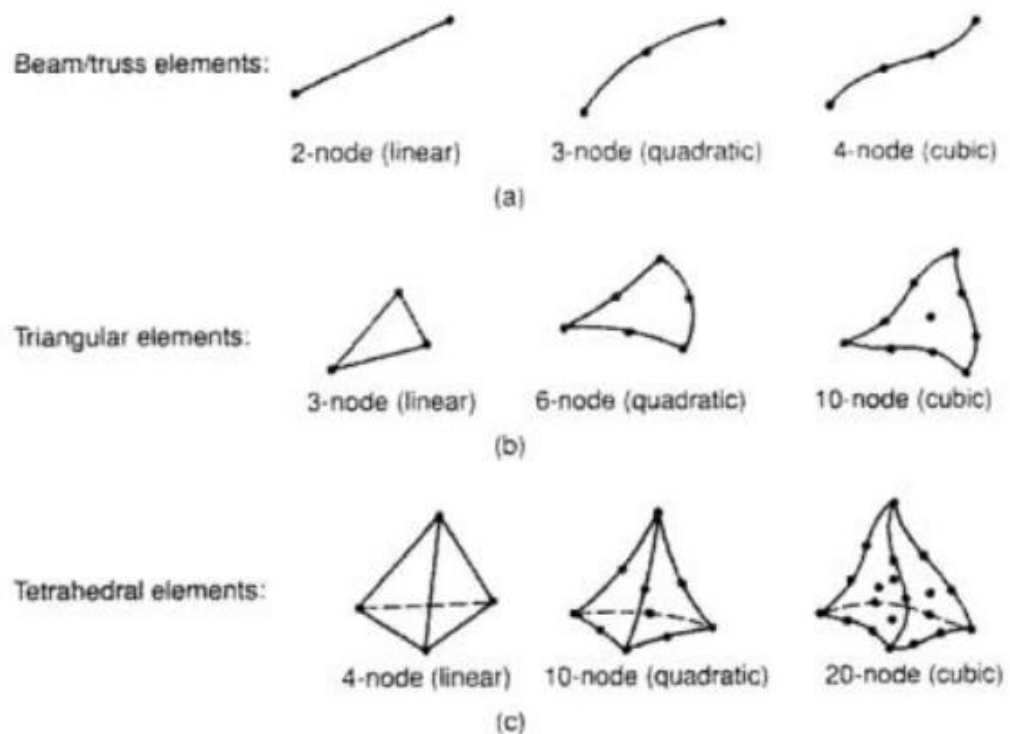
4^ο Στάδιο → Επιλογή του τρόπου επίλυσης (γραμμικό – μη γραμμικό μεταβατικό – υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση.

5^ο Στάδιο → Ανάγνωση των αποτελεσμάτων και γραφική αναπαράστασή τους.

Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλ. η εισαγωγή της γεωμετρίας, η δημιουργία του πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (finite-element modeling), η οποία συνήθως εκτελείται με τη βοήθεια κατάλληλου προ-επεξεργαστή. Πολύ παλαιότερα, η εισαγωγή των δεδομένων δινόταν με γραμμές εντολών με τη βοήθεια ενός αυτόνομου αρχείου δεδομένων (batch file). Ο προ-επεξεργαστής (pre-processor) ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικείμενου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FEA (Finite Element Analysis) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Συστήματα που

στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD ή μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Η απευθείας σύνδεση με CAD κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού-ανάλυσης-αλλαγής. Περαιτέρω, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Πράγματι, σήμερα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μοντελοποίησης (με ολοκληρωμένη μοντελοποίηση όγκου, επιφάνειας και wireframe, και παραμετρικών μεθόδων που στηρίζονται σε features) μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για ανάλυση. Τα περισσότερα συστήματα FEA δίνουν επίσης έμφαση στη δυνατότητα που έχουν να εισάγουν τη γεωμετρία, είτε μέσω τυποποιήσεων όπως το IGES ή απευθείας από συγκεκριμένα συστήματα CAD. Ωστόσο, η απευθείας χρήση δεν είναι πάντα άμεσα εφαρμόσιμη. Το μοντέλο μπορεί να φαίνεται στο μάτι ότι είναι τέλειο αλλά μπορεί στην πραγματικότητα να έχει σφάλματα που αποκαλύπτονται στο σύστημα FEA, κυρίως κατά την διαδικασία δημιουργίας πλέγματος. Μερικά συστήματα προσφέρουν λειτουργίες που μπορούν να «καθαρίσουν» την εισαγόμενη γεωμετρία. Επιπλέον, ακόμη και αν η γεωμετρία CAD δεν περιέχει σφάλματα, η ανάλυση δεν απαιτεί όλες τις λεπτομέρειές του, οπότε μερικές από αυτές (π.χ. ένα fillet) θα μπορούσαν να απαλειφθούν. Μερικά συστήματα διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες απενεργοποίησης γεωμετρικών οντοτήτων. Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία πλέγματος και κατανομής κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η δημιουργία πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης δημιουργίας πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο (κελύφη, επίπεδη εντατική ή επίπεδη παραμορφωτική κατάσταση). Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις 63 παραμέτρους αυτόματης δημιουργίας πλέγματος όπως η πυκνότητα πλέγματος. Αυτές επιπλέον επιτρέπουν τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές. Πολλά συστήματα επιτρέπουν τη διασύνδεση πλέγματος με τη

γεωμετρία έτσι ώστε κάθε αλλαγή αυτής να αντανακλάται αυτόματα στο πλέγμα). Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Το Σχήμα 4.1 δείχνει τυπικά πεπερασμένα στοιχεία που υποστηρίζονται από τους περισσότερους κώδικες. Να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που αποδίδονται σε αυτό. Τέλος, οι ζώνες στις οποίες αναμένεται απότομη μεταβολή στη συμπεριφορά των προς επίλυση αγνώστων (όπως συγκέντρωση τάσεων γύρω από οπές) πρέπει να διακριτοποιηθούν από στοιχεία μεγαλύτερης πυκνότητας πλέγματος από εκείνες που εμφανίζουν προοδευτική μεταβολή [10] .



Σχήμα 4.1 Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (a) μονοδιάστατα, (b) διδιάστατα και (c) τρισδιάστατα προβλήματα

Μια διαφορετική προσέγγιση στο δίλημμα του πλέγματος είναι η χρήση της p-version μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή στηρίζεται σε ένα απλούστερο, αυτόματα γεννημένο πλέγμα, αλλά κατόπιν μεταβάλλει

αυτόματα τον πολυωνυμικό βαθμό των συναρτήσεων μορφής. Παρόλο που σήμερα είναι διαθέσιμα πολλά τέτοια 64 προγράμματα FEA, δύο προγράμματα (PTC's Pro/MECHANICA και CADSI's PolyFEM) σχεδιάστηκαν ειδικά για ανάλυση τύπου p-version. Επιπλέον από το εύκολο πλέγμα, τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η ικανότητα να καθορίσουν όρια ακρίβειας και πλησιέστερης προσέγγισης της γεωμετρίας του μοντέλου CAD. Χρησιμοποιώντας χαμηλότερο επίπεδο ακρίβειας, ο σχεδιαστής μπορεί να πάρει γρήγορα αποτελέσματα ανάλυσης στο προκαταρκτικό στάδιο σχεδιασμού.

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης (π.χ., στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη-γραμμική, επίπεδη εντατική κατάσταση, και επίπεδη παραμορφωτική κατάσταση). Επίσης, οι άγνωστοι ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, κ.ο.κ. Κατόπιν καθορίζονται οι οριακές συνθήκες. Οριακές συνθήκες όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, και θερμοκρασίες συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικειμένου. Αυτές οι οριακές συνθήκες πρέπει να εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να γεννηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young, και ο λόγος του Poisson (για ελαστικές κατασκευές). Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών διαχειρίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα για την αποφυγή επίλυσης του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις. Άλλες ιδιότητες υλικών

περιλαμβάνουν θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα, συντελεστής αγωγιμότητας, λανθάνουσα θερμότητα, κ.λπ.), ιξωδοελαστικότητα, κ.λπ., για άλλου τύπου προβλήματα. Γίνεται μόνο μια απλή παραδοχή: σε διαφορετικές περιοχές στοιχείων αποδίδονται διαφορετικές ιδιότητες υλικών. Αυτό λ.χ. δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναλύσει ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από σύνθετο υλικό. Ένα κρίσιμο ζήτημα στην ανάλυση σύνθετων υλικών είναι η διαχείριση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων προκειμένου να υπολογισθεί η αποκόλληση (delamination).

Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-επεξεργαστής (post-processor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους 65 τρόπους καταλογοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών «ισοτασικών» επιφανειών κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας. Στην περίπτωση δυναμικής ανάλυσης όλα τα πακέτα διαθέτουν animation, τόσο για την εποπτεία των ιδιόμορφων ταλάντωσης όσο και για την προσφερόμενη χρονική ολοκλήρωση που είναι το μοναδικό εργαλείο στην περίπτωση μη-γραμμικών αναλύσεων. Επίσης, πολλά συστήματα διαθέτουν τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε μορφή που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω, σαν κείμενα, παρουσιάσεις, videos, email, ή αποστολή στο διαδίκτυο.

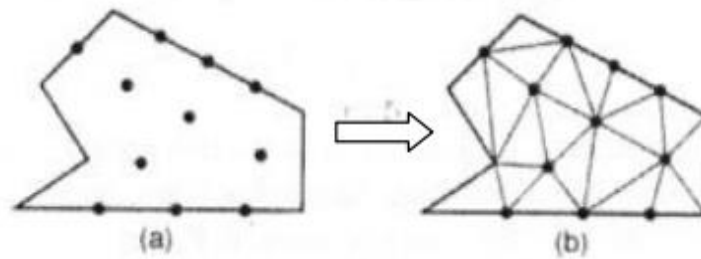
4.4.2 Αυτόματη δημιουργία πλέγματος

Η δημιουργία πλέγματος συνεπάγεται τη δημιουργία κομβικών συντεταγμένων και στοιχείων. Περιλαμβάνει επίσης την αυτόματη αρίθμηση των κόμβων και στοιχείων βασισμένων στην ελάχιστη αλληλεπίδραση με τον χρήστη. Έτσι, υποτίθεται ότι οι μέθοδοι αυτόματης δημιουργίας πλέγματος απαιτούν μόνο το γεωμετρικό μοντέλο (γεωμετρία και τοπολογία) του προς διακριτοποίηση αντικειμένου, τα χαρακτηριστικά του πλέγματος όπως πυκνότητα πλέγματος και τύπος στοιχείου, και τις οριακές συνθήκες,

περιλαμβάνοντας σαν είσοδο συνθήκες φόρτισης. Άλλες μέθοδοι που απαιτούν πρόσθετη είσοδο, όπως υποδιαίρεση του αντικειμένου σε υποχωρία ή υποπεριοχές, ταξινομούνται σαν ημιαυτόματες μέθοδοι. Εν συντομία, εισάγουμε τις μεθόδους δημιουργίας πλέγματος με βάση την ταξινόμηση που πρότεινε ο Ho-Le (1988).

- **Μέθοδος Σύνδεσης Κόμβων (N.C.A.)**

Η μέθοδος σύνδεσης κόμβων (node connection approach) προκειμένου να παράγουν πλέγμα είναι πολύ δημοφιλής διότι είναι πολύ απλή στη σύλληψη της. Οι δύο κύριες φάσεις αυτής της προσέγγισης είναι (i) η δημιουργία κόμβων που δείχνονται στο Σχήμα 4.2 (a), και (ii) η δημιουργία στοιχείων στο Σχήμα 4.2 (b).



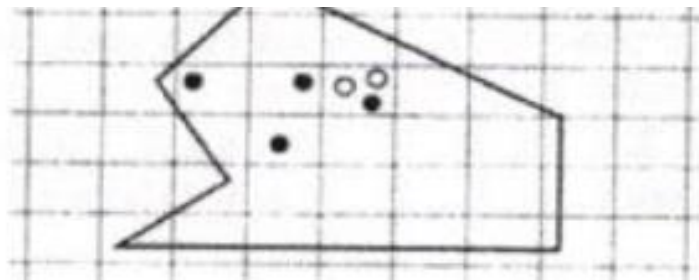
Σχήμα 4.2 Μέθοδος σύνδεσης κόμβων

Δημιουργία κόμβων: Δημοσιευμένα έργα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα :

Μέθοδος του Cavendish (1974). Σε αυτή τη μέθοδο, εισάγονται αρχικά κόμβοι στο σύνορο του αντικειμένου με το χέρι του χρήστη (manually). Κατόπιν οι εσωτερικοί κόμβοι γεννώνται αυτόματα έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις πυκνότητας πλέγματος. Το αντικείμενο υποδιαιρείται σε ένα πλήθος ζωνών διαφορετικών επιθυμητών μεγεθών στοιχείων. Στη ζώνη i , υπερτίθεται ένα τετραγωνικό grid βήματος $r(i)$. Το Σχήμα 4.3 δείχνει ένα υπερτιθέμενο μονό grid, που βασίζεται στην παραδοχή ότι είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη πυκνότητα πλέγματος. Για κάθε τετράγωνο του grid, γεννιέται με τρόπο τυχαίο ένας εσωτερικός κόμβος. Αυτό μπορεί να γίνει παράγοντας τυχαίους αριθμούς μεταξύ 0 και 1 δύο φορές, μια για την κατεύθυνση x και μια για την κατεύθυνση y , και υπολογίζοντας την ισοδύναμη θέση των τιμών x και y . Εάν ο παραγόμενος κόμβος πέφτει μέσα στο αντικείμενο και έχει απόσταση από το σύνορο μεγαλύτερη από το $r(i)$, αλλά και από τους προηγούμενα

παραγόμενους κόμβους, τότε γίνεται αποδεκτός. Εάν όχι, ένας άλλος κόμβος παράγεται τυχαία και ελέγχεται. Εάν δεν καταστεί δυνατόν να βρεθεί ένας αποδεκτός κόμβος μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών (ας πούμε, πέντε), τότε το εν λόγω τετράγωνο παραλείπεται και θεωρείται το επόμενο. Η μέθοδος αυτή είναι επεκτάσιμη και στις 3 διαστάσεις, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται τρισδιάστατο grid.

Μέθοδος του Shimada (1992). Αυτή η μέθοδος γεμίζει το εσωτερικό του προς διακριτοποίηση αντικειμένου με «φυσαλίδες» όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, και λαμβάνει τα κέντρα τους σαν κόμβους. Το μέγεθος κάθε φυσαλίδας προσδιορίζεται από την κατανομή θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στην επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν οι θέσεις των φυσαλίδων προσδιορίζονται από την ικανοποίηση της ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ αυτών.



Σχήμα 4.3 Μέθοδος δημιουργίας κόμβων κατά Cavendish

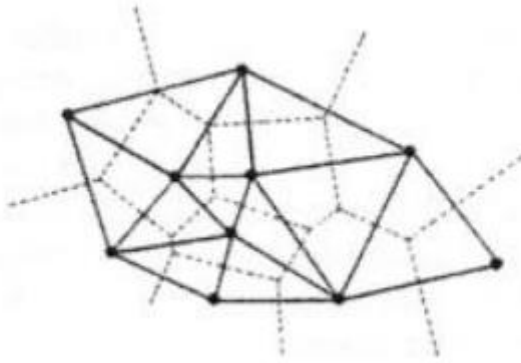
Δημιουργία στοιχείων: Σε αυτή τη δεύτερη φάση, κόμβοι που γεννήθηκαν στην προηγούμενη φάση συνδέονται για να αποτελέσουν στοιχεία έτσι ώστε να μην επικαλύπτονται και να καλύπτεται ολόκληρο το χωρίο. Αναφερόμαστε στη μέθοδο του Lee διότι αυτή μπορεί να οδηγήσει σε τετραπλευρικά στοιχεία. Ωστόσο, η μέθοδος τριγωνοποίησης του Delaunay είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος σύνδεσης 67 κόμβων. Στις επεξηγήσεις που ακολουθούν, θεωρούμε στοιχεία που έχουν κόμβους μόνο στις κορυφές τους. Εάν επιθυμούμε στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους, τότε αυτοί Προκύπτουν εύκολα από τους Γωνιακούς.

- **Μέθοδος Lee (1983).** Σε αυτή τη μέθοδο, επί του αντικειμένου υπερτίθεται ένα τετραγωνικό πλέγμα υποβάθρου (grid) του οποίου το βήμα είναι ίσο προς το επιθυμητό μέγεθος στοιχείων. Κατόπιν οι κόμβοι που παρήχθησαν στην προηγούμενη φάση συσχετίζονται με τα κελιά

του πλέγματος υποβάθρου. Τα κελιά και οι αντίστοιχοι κόμβοι επισκέπτονται στήλη-προς-στήλη από αριστερά προς τα δεξιά και, μέσα στην ίδια στήλη, από τα κάτω προς τα πάνω. Μέσα σε ένα κελί, οι κόμβοι διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τετμημένης x . Κόμβοι με την ίδια τετμημένη x , διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τεταγμένης y . Οι κόμβοι επισκέπτονται κατά σειρά και, για κάθε κόμβο, οι γειτονικοί κόμβοι βρίσκονται έτσι ώστε να διαμορφώνουν τους κόμβους ενός καλοσχηματισμένου τετράπλευρου. Στην περίπτωση αδυναμίας σχηματισμού καλώς ορισμένου τετράπλευρου, δημιουργείται αντίστοιχο τριγωνικό στοιχείο.

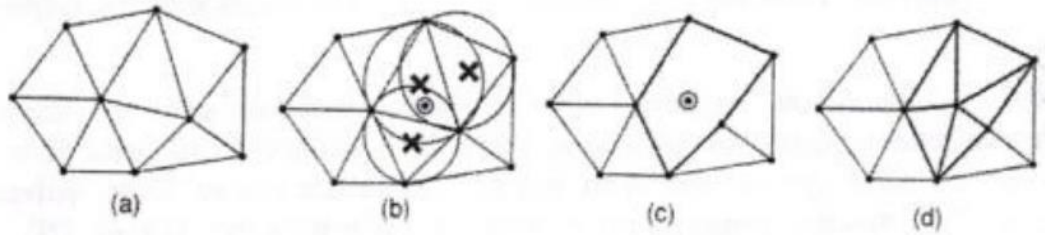
- Μέθοδος τριγωνοποίησης Delaunay.** Αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος δημιουργίας τριγώνων που συνδέει δεδομένους κόμβους διότι μεγιστοποιεί το άθροισμα των μικρότερων γωνιών σε όλα τα τρίγωνα που δημιουργούνται. Έτσι, αποφεύγονται τα λεπτά τρίγωνα. Μια τυπική τριγωνοποίηση Delaunay ξεκινάει από ένα διάγραμμα Voronoi ή Dirichlet tessellation. Ένα Διάγραμμα Voronoi ενός συνόλου N σημείων, $P_i (i=1,2,\dots,N)$, αποτελείται από N πολύγωνα (πολύεδρα στις 3 διαστάσεις), V_i καθένα των οποίων έχει κέντρο το σημείο P_i έτσι ώστε ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του επιπέδου (του χώρου στις 3 διαστάσεις) που είναι πλησιέστερα στον κόμβο i , να περιλαμβάνονται στον V_i . Μαθηματικά, το V_i (επιφάνεια ή όγκος) εκφράζεται ως:

$$V_i = \{x : |x - P_i| < |x - P_j| \text{ για όλα τα } j \neq i\}$$
 όπου $|\dots|$ συμβολίζει το μέτρο του διανύσματος εντός του και κάθε V_i , είναι ένα κυρτό πολύγωνο (πολύεδρο) που περιβάλλεται από γραμμές (επίπεδα) τέμνοντα κάθετα τις γραμμές μεταξύ P_i , και των γειτονικών του κόμβων. Αυτή η διαίρεση του (δισδιάστατου ή τρισδιάστατου) χώρου από ένα σύνολο V_i καλείται Dirichlet tessellation. Κάθε πολύγωνο (πολύεδρο) Voronoi έχει έναν κόμβο που συνδέεται με αυτό. Μετά τη δημιουργία του διαγράμματος Voronoi, μπορούμε να δημιουργήσουμε τριγωνικά (τετραεδρικά, στις 3 διαστάσεις) στοιχεία συνδέοντας τα σημεία που σχετίζονται με γειτονικά πολύγωνα (πολύεδρα) Voronoi. Το Σχήμα 4.4 δείχνει το διάγραμμα Voronoi και την 68 αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay για 10 κόμβους στη δισδιάστατη περίπτωση.



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα Voronoi και η αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay

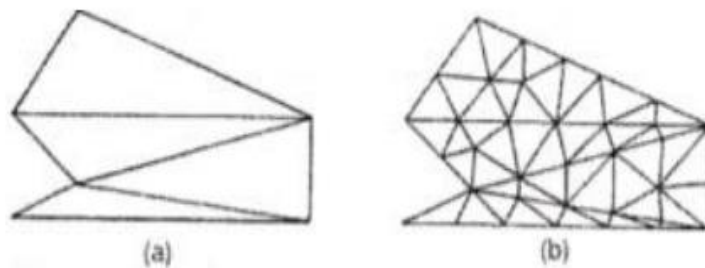
Η τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να γεννηθεί απευθείας από το δεδομένο σύνολο σημείων (κόμβων) χωρίς να είναι απαραίτητη πρώτα να έχει γίνει το διάγραμμα Voronoi, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Watson για τη δισδιάστατη τριγωνοποίηση. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, ένα τρίγωνο διαμορφώνεται από τρία μη-συνευθειακά σημεία όταν ένας κύκλος που περνάει από αυτά, και ονομάζεται περιγεγραμμένος του τριγώνου, δεν περιλαμβάνει καθόλου άλλα σημεία. Ο αλγόριθμος υλοποιείται ως Ακολουθώς. Στην αρχή Διαμορφώνεται ένα τρίγωνο T_0 , που περιέχει όλους τους κόμβους· μπορεί να πρέπει να εισαχθούν επιπλέον σημεία στις κορυφές του T_0 . Τότε εισάγουμε κόμβους από ένα δεδομένο σύνολο, έναν προς ένα, και βρίσκουμε τα τρίγωνα έκαστο των οποίων ο περιγεγραμμένος κύκλος περικλείει τον κόμβο. Αυτά τα πολύγωνα, που ονομάζονται τεμνόμενα πολύγωνα (intersection polygons), απαλείφονται. Στο Σχήμα 4.5 (b), τα τεμνόμενα πολυώνυμα συμβολίζονται με \times όταν ένας νέος κόμβος \odot εισάγεται στα υπάρχοντα τρίγωνα, όπως στο Σχήμα 4.5 (a), που γεννώνται από τους ήδη εισαχθέντες κόμβους. Το Σχήμα 4.5 (c) δείχνει το αποτέλεσμα μετά την απαλοιφή των τεμνόμενων αυτών πολυγώνων. Κατόπιν, νέα τρίγωνα διαμορφώνονται Συνδέοντας τον νέο κόμβο με τις κορυφές των τεμνόμενων επιπέδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5 (d). Τελικά, τα τρίγωνα που είναι συνδεδεμένα με τα επιπλέον σημεία που διαμορφώνουν το T_0 , απαλείφονται. Αυτή η διαδικασία μπορεί εύκολα να επεκταθεί για τρισδιάστατη δημιουργία πλεγμάτων στοιχείων χρησιμοποιώντας περιγεγραμμένες σφαίρες από 4 κόμβους αντί περιγεγραμμένους κύκλους από 3 κόμβους. Ωστόσο, η τρισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να περιέχει πολύ λεπτά τετράεδρα, ενώ η δισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay είναι, με κάποια έννοια, η βέλτιστη τριγωνοποίηση για ένα δεδομένο σύνολο σημείων.



Σχήμα 4.5 Αλγόριθμος τριγωνοποίησης Watson

- **Μέθοδος Αποσύζευξης Τοπολογίας (T.D.A.)**

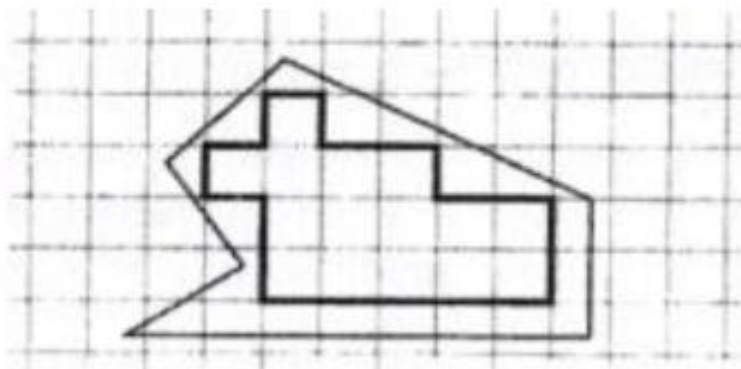
Η δισδιάστατη μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας (topology decomposition approach) αναπτύχθηκε από τον Wordenweber (1984). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύγωνο και το τελευταίο κατακερματίζεται σε ένα σύνολο μεγάλων στοιχείων συνδέοντας τις κορυφές προς διαμόρφωση τριγώνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 (a). Κατόπιν, αυτά τα μεγάλα στοιχεία εκλεπτύνονται ώστε να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη πυκνότητα κατανομής πλέγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 (b). Το μέγεθος των στοιχείων και το σχήμα τους δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν εξωτερικά διότι τα μεγάλα στοιχεία προσδιορίζονται μόνα τους από την αρχική τοπολογία του αντικειμένου, ιδιαίτερα από την κατανομή των κορυφών. Οι κορυφές που ανήκουν στο ίδιο μεγάλο στοιχείο μπορούν να προσδιορισθούν από τη μέθοδο τριγωνοποίησης Delaunay που περιγράφηκε σε παραπάνω ενότητα.



Σχήμα 4.6: Παράδειγμα μεθόδου τοπολογικής αποσύζευξης

- **Μέθοδος Βάσει Πλέγματος (G.B.A.)**

Η μέθοδος βάσει πλέγματος (grid-based approach) προκύπτει από την παρατήρηση ότι ένα grid μοιάζει με ένα πλέγμα και ότι αυτό μπορεί να μετασχηματισθεί στο τελευταίο υπό την προϋπόθεση ότι τα κελιά του grid κατά μήκος του συνόρου του αντικειμένου μπορούν να μετασχηματιστούν σε στοιχεία. Η μέθοδος των Thacker, Gonzalez και Putland (1980) είναι ίσως η πρώτη σχετική δημοσίευση που έκανε χρήση της μεθόδου βάσει grid. Σε αυτή τη μέθοδο ένα αντικείμενο αρχικά επικαλύπτεται από ένα τριγωνικό grid και τα σημεία του grid που πέφτουν εκτός αντικειμένου εξαλείφονται, αφήνοντας ένα σύνορο μορφής zigzag. Τα σημεία του grid που βρίσκονται πάνω στο zigzag σύνορο μετακινούνται προς το σύνορο του αντικειμένου ώστε να αποτελέσουν το τελικό πλέγμα. Οι διαφοροποιήσεις αυτής έγκειται στον τρόπο διαχείρισης του συνόρου. Ο Kikuchi (1986) επέκτεινε τη μέθοδο έτσι ώστε εκτός από κυρίως τετράπλευρα να περιλαμβάνει ακόμη και μερικά τρίγωνα, χρησιμοποιώντας ορθογωνικό grid, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Ένα πρόβλημα και των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι μικρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με πολύ μικρές ακμές σε σχέση με το βήμα του grid, χάνονται. Σε άλλες μεθόδους τα σημεία του zigzag συνόρου δεν μετακινούνται στο σύνορο του αντικειμένου. Αντ' αυτού, δημιουργούνται τριγωνικά στοιχεία στην περιοχή μεταξύ zigzag και συνόρου αντικειμένου μέσω ενός αλγορίθμου τριγωνοποίησης.



Σχήμα 4.7: Χρήση ορθογωνικού grid για τη μέθοδο “grid-based”

- **Μέθοδος Απεικόνισης**

Η μέθοδος απεικόνισης χρησιμοποιείται στις περισσότερες εμπορικές γεννήτριες πλέγματος. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την υποδιαίρεση του

προς διακριτοποίηση αντικειμένου σε περιοχές ειδικής τοπολογίας. Στις 2 διαστάσεις, αυτές οι περιοχές έχουν τέσσερις πλευρές· στις τρεις διαστάσεις, αυτές οι περιοχές είναι μορφής «κουτιού» (boxlike). Μέσα σε κάθε περιοχή, το πλέγμα παράγεται αυτόματα με απεικόνιση της περιοχής προς ένα κανονικοποιημένο χωρίο αναφοράς (ένα κανονικό τρίγωνο ή τετράπλευρο στις δύο διαστάσεις και ένα κύβο στις τρεις διαστάσεις), δημιουργώντας διακριτοποίηση στο κανονικοποιημένο χωρίο με βάση την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος, και επαναπεικόνιση του διακριτοποιημένου χωρίου προς την αρχική περιοχή του πραγματικού αντικειμένου. Κατόπιν, το τελικό πλέγμα προκύπτει από συνένωση των περιοχών που διακριτοποιήθηκαν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι κοινές πλευρές που μοιράζονται σε γειτονικές περιοχές πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό κόμβων έτσι ώστε να ικανοποιούν το συμβιβαστό του πλέγματος (mesh conformity). Η απαίτηση αυτή μπορεί να επιβληθεί με επέμβαση του χρήστη ή αλγοριθμικά την ώρα που παράγονται τα πλέγματα γειτονικών περιοχών. Πολλές μέθοδοι απεικόνισης μπορούν να εφαρμοσθούν.

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη πτερυγίων ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα σε δύο ταχύτητες ανέμου και η μελέτη αντοχής του μοντέλου για τέσσερα σύνθετα υλικά σε πολυεστερική μήτρα.

Με το ANSYS FLUENT θα γίνει προσομοίωση με τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου της τάξης των 53 m/s για την αντοχή σε ακραίες καταστάσεις ανέμου, 20 m/s για μια μέση ταχύτητα και για 12 m/s στην ονομαστική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια, τα πεδία πιέσεων που προκύπτουν για τα τρία παραπάνω σενάρια θα εφαρμοστούν μέσω του εργαλείου Static Structural Analysis του λογισμικού ANSYS στο μηχανικό μοντέλο για πέντε διαφορετικά μοντέλα εμπορικών υλικών κατάλληλων για κατασκευή ανεμογεννητριών, με ιδιότητες που προέκυψαν από ηλεκτρονική Βιβλιοθήκη υλικών www.matweb.com. Τα υλικά υποβάλλονται στα

φορτία που δημιουργούνται στην επιφάνεια του μοντέλου από τα πεδία πιέσεων και αποκλείονται όταν αστοχούν σε κάποια περιοχή ή στο σύνολο του μοντέλου.

5.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ

Για το σχεδιαστικό κομμάτι της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρία της ανεμογεννήτριας GE 1,5XLE σύμφωνα με το πανεπιστήμιο Cornell [11]. Για τη προσομοίωση ταχυτήτων ανέμου και της αντοχής του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS WORKBENCH. Οι διαδικασίες προσομοίωσης και ανάλυσης επιτυγχάνονται με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας ειδικούς αλγορίθμους γι' αυτό το σκοπό.

5.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Rated Capacity	1,500 kW
Cut-in Wind Speed	3,5 m/s
Cut-out Speed	20 m/s
Rated Wind Speed	11,5 m/s
Frequency	50/60 Hz
Voltage	690 V
Rotor Diameter	82,5 m
Swept Area	5346 m ²
Hub Heights	80 m

Πίνακας 5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας

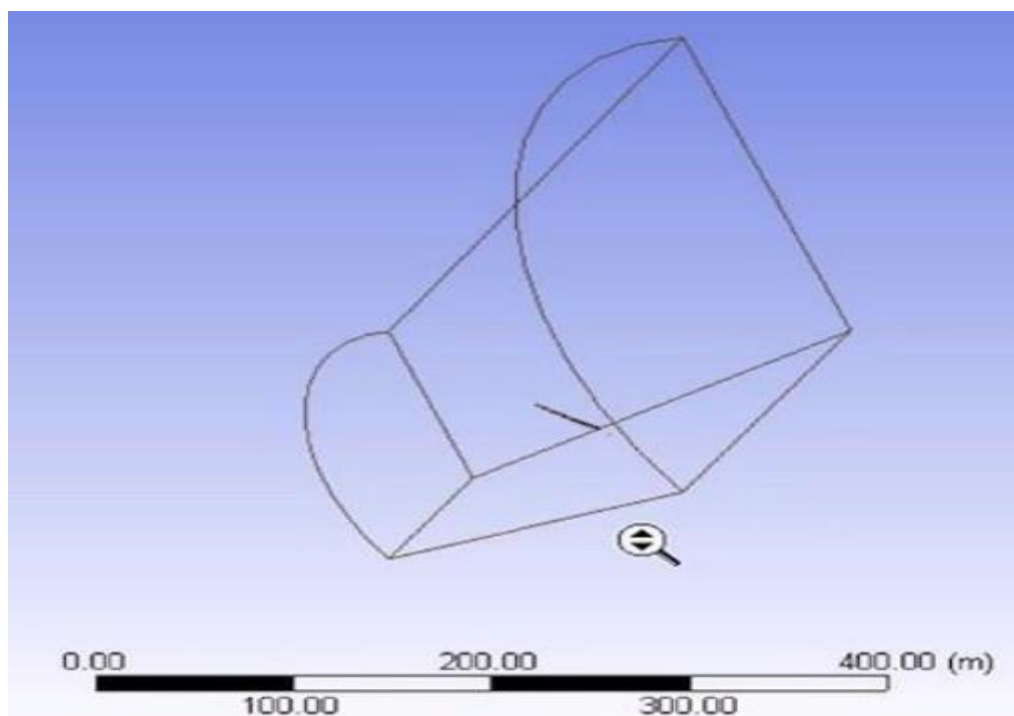


Σχήμα 5.3.1 Ανεμογεννήτρια x1e 1,5 MW

5.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

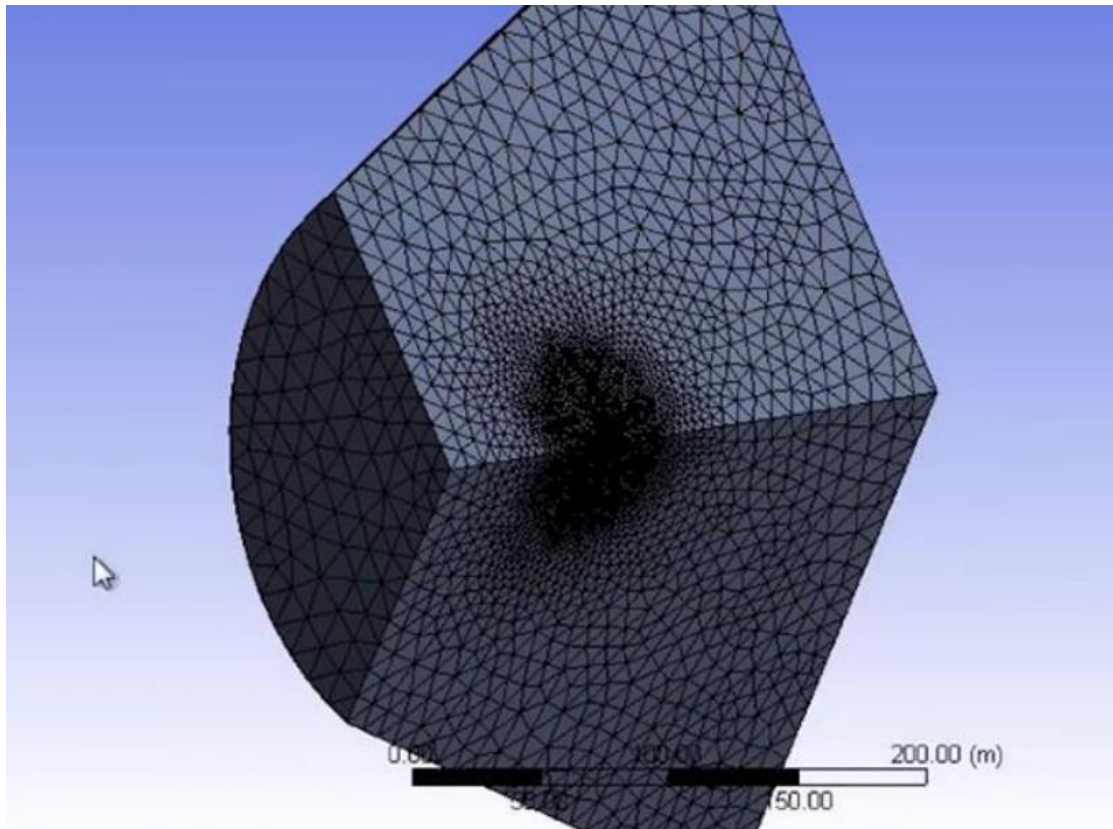
5.4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Αρχικά σχεδιάστηκε η περιοχή ρευστού μέσα στην οποία περιλαμβάνεται το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας. Η περιοχή του ρευστού (fluid domain) έχει κωνικό σχήμα με μικρή ακτίνα 120m και μεγάλη ακτίνα 240m. Το μήκος του είναι 270m και το ρευστό ρέει από την μικρή ακτίνα προς την μεγάλη.



Σχήμα 5.4.1 Σχήμα ρευστού με το πτερύγιο ανεμογεννήτριας εσωτερικά

5.4.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

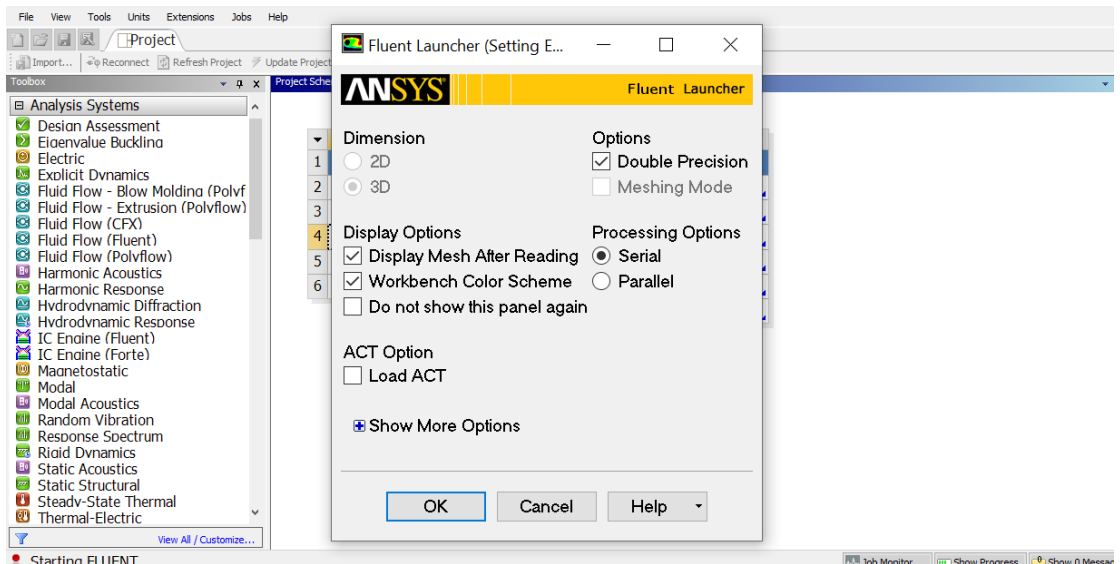


Σχήμα 5.4.2 Απεικόνιση πλέγματος

Έγινε η δημιουργία πλέγματος σε καλό βαθμό όπως φαίνεται και στο παραπάνω Σχήμα 5.4.2 και παρατηρούμαι ότι υπάρχει ικανοποιητική πύκνωση και κοντά στο πτερύγιο της ανεμογεννήτριας. Συνολικά έχουμε 356628 στοιχεία. Έπειτα χρειάζεται η εξέταση της λοξότητας (skewness) η οποία είναι σχεδόν 0,25 άρα το πλέγμα είναι πολύ καλό, όπως και η orthogonal quality είναι σχεδόν 0,95 και μας δίνει και πάλι ένα πολύ καλό πλέγμα.

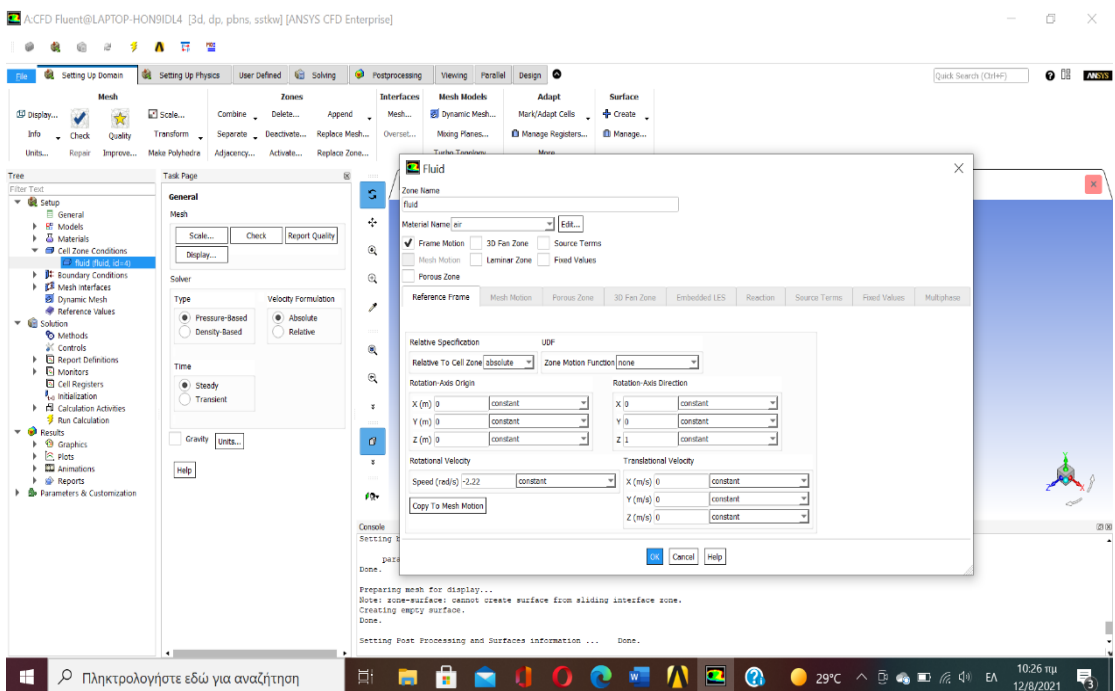
5.4.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗ, ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ANSYS FLUENT

Μετά τη δημιουργία της τελικής μορφής του πλέγματος, το μοντέλο είναι έτοιμο προς προσομοίωση. Με την εισαγωγή του module Fluent και με την επιλογή Setup, καλείται το αρχικό παράθυρο του Fluent Launcher. Επιλέγεται η επεξεργασία του μοντέλου σε σειρά λόγω των απαιτήσεων του υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε. Αυτό καθυστέρησε αρκετά τους υπολογισμούς.



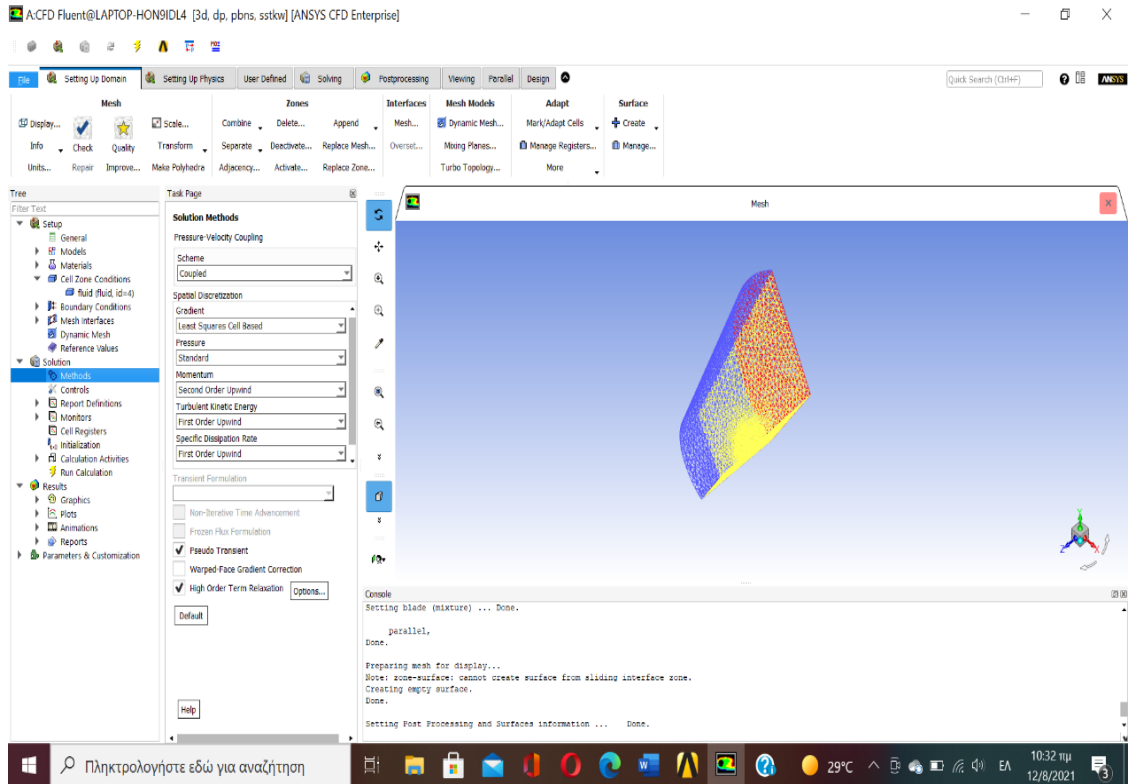
Σχήμα 5.4.3 Αρχικές επιλογές fluent setup

Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για το μοντέλο τύρβης η k - ω εξίσωση σε μορφή SST (Shear Stress Transport). Χρησιμοποιήθηκε σα ρευστό ο αέρας με πυκνότητα $1,225 \text{ kg/m}^3$ και ιξώδες $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$. Έπειτα δηλώνουμε ταχύτητα περιστροφής -2.22 rad/s στο θετικό άξονα Z . Χωρίσαμε το ρευστό μας σε 7 τμήματα (inlet, inlet-top, blade, outlet, period_1, period_2 και interior-fluent) και έγινε εισαγωγή της ταχύτητας 12 m/s στον άξονα Z με αρνητική φορά.



Σχήμα 5.4.4 Στατική επίλυση με $\omega = -2.22 \text{ rad/s}$

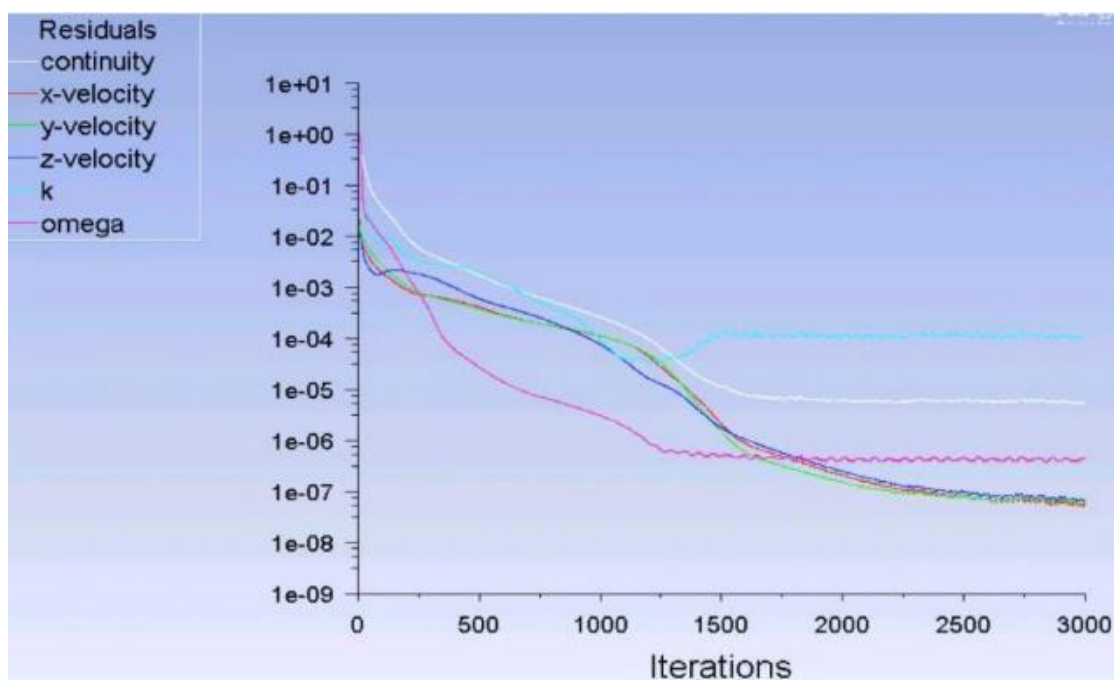
Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.4.5 η πίεση θα γίνει standard ,το σχέδιο σε coupled και θα επιλέξουμε high order relaxation.



Σχήμα 5.4.5 Μέθοδοι επίλυσης

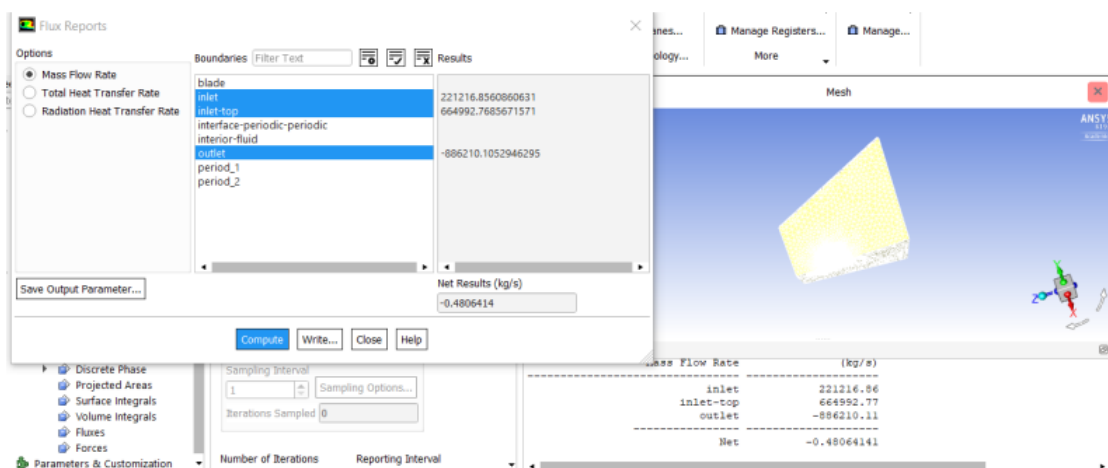
5.5 FLUENT ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρατηρούμαι στο Σχήμα 5.5.1 ότι στις 1500 επαναλήψεις ξεκινάει μια σταθερότητα στα αποτελέσματα οπότε είναι ο ιδανικός αριθμός επαναλήψεων για σωστά αποτελέσματα.



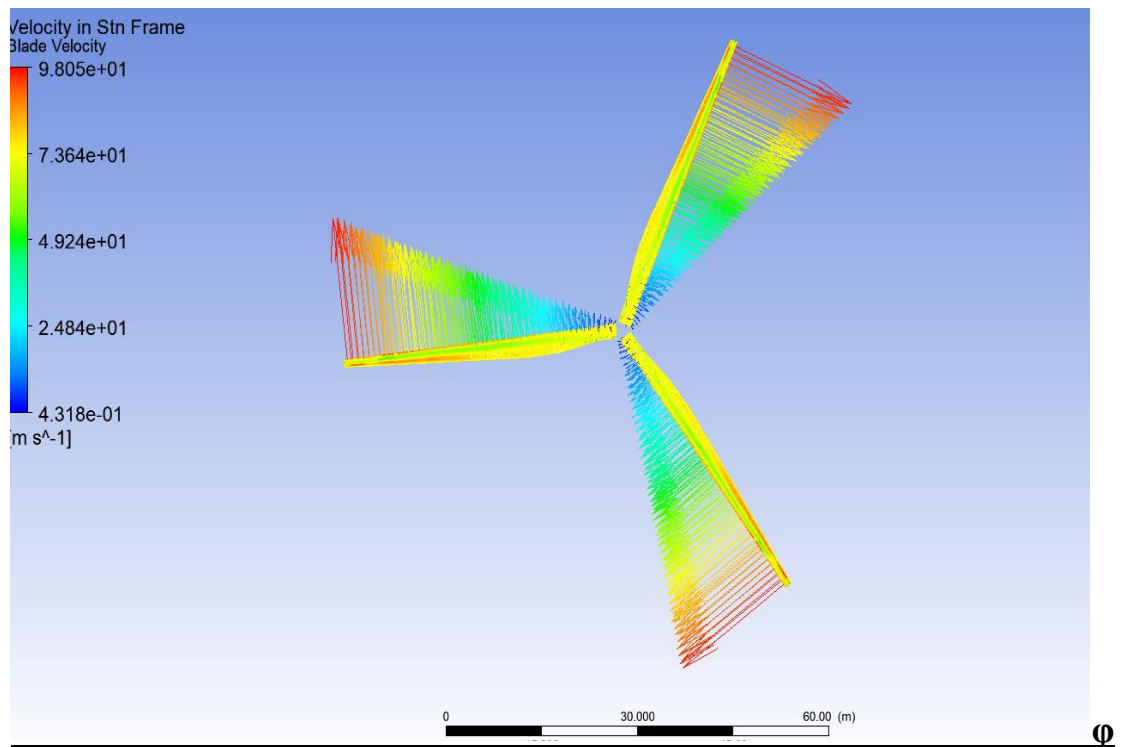
Σχήμα 5.5.1 Αποτελέσματα επίλυσης

Εξετάζοντας την εισερχόμενη μάζα αέρα σε σχέση με την εξερχόμενη και βλέποντας ότι είναι σχεδόν 0,4 αντιλαμβανόμαστε ότι το μοντέλο μας είναι σε ικανοποιητικό επίπεδο.



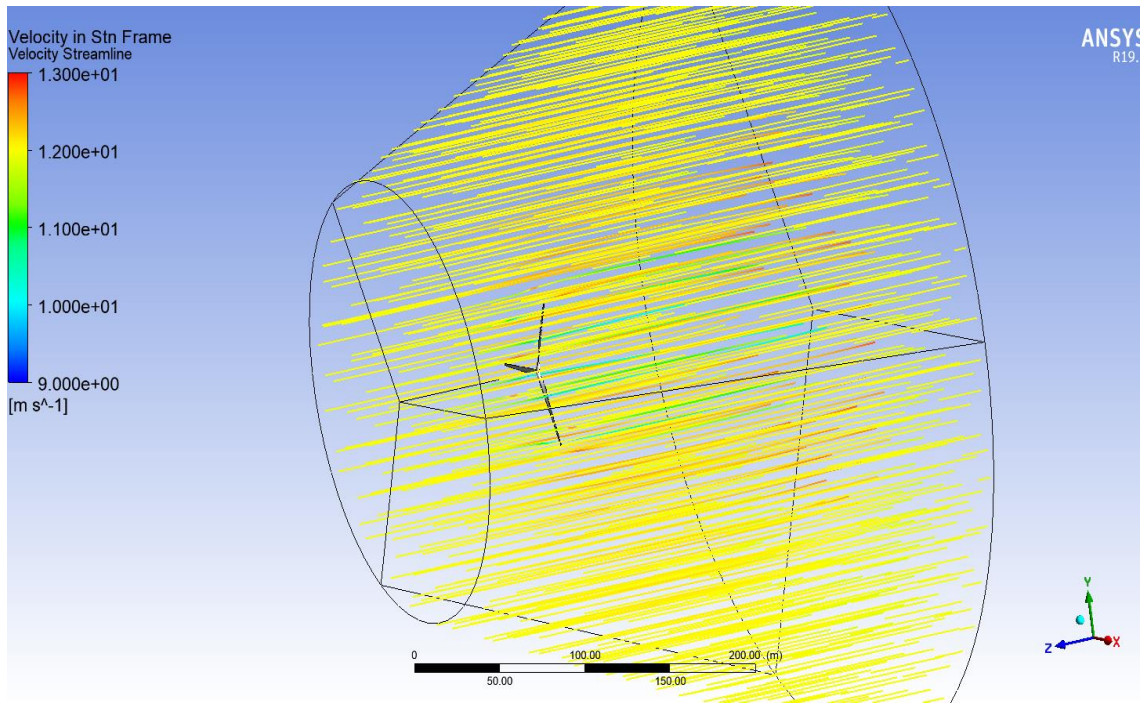
Σχήμα 5.5.2 Έλεγχος σωστής επίλυσης

Έπειτα γίνεται εξέταση των αποτελεσμάτων. Στο παρακάτω Σχήμα 5.5.3 βλέπουμε ότι οι ταχύτητες στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας είναι μεγαλύτερες στα άκρα 98,05 m/s. Από το θεωρητικό υπολογισμό ($U = r \times \omega = 98.124 \text{ m/s}$) επαληθεύεται το αποτέλεσμα από τον θεωρητικό τύπο καθώς έχω μικρή απόκλιση.



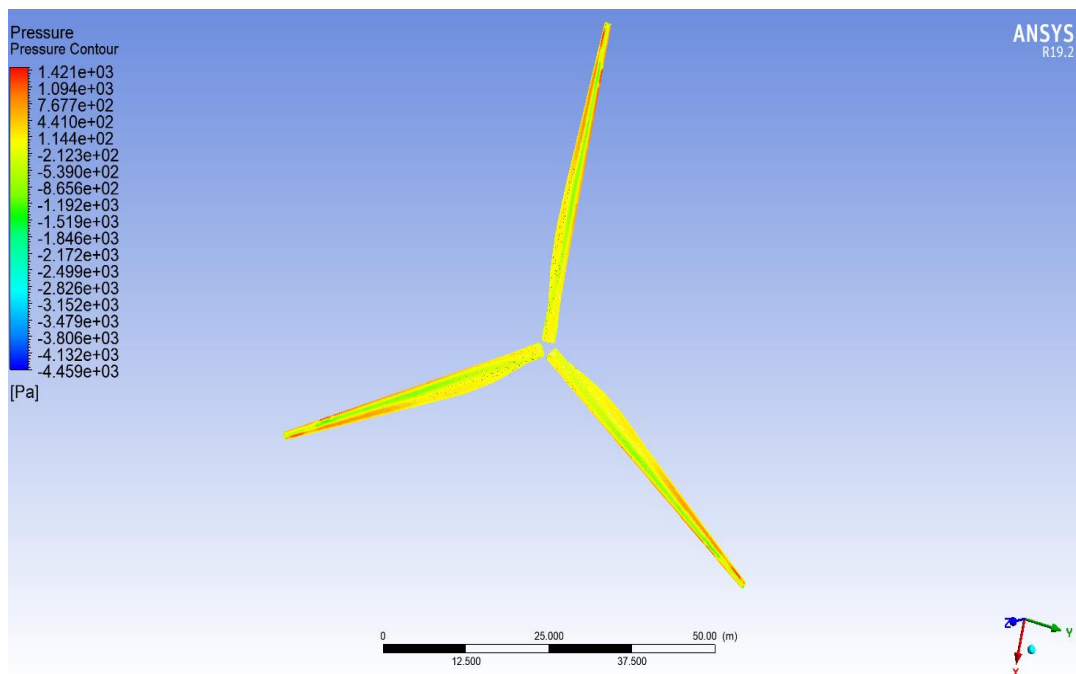
Σχήμα 5.5.3 Ταχύτητα αέρα πάνω στα πτερύγια

Παρακάτω προβάλλεται το προφίλ της ταχύτητας από την είσοδο. Παρατηρείται πίσω από τα πτερύγια κάτι πράσινες γραμμές δηλαδή μείωση της ταχύτητας. Πάνω και κάτω από τα πτερύγια, δηλαδή γύρω από τη περιστροφή των πτερυγίων φαίνεται αύξηση της ταχύτητας, αφού εμφανίζονται κάποιες πορτοκαλί γραμμές.

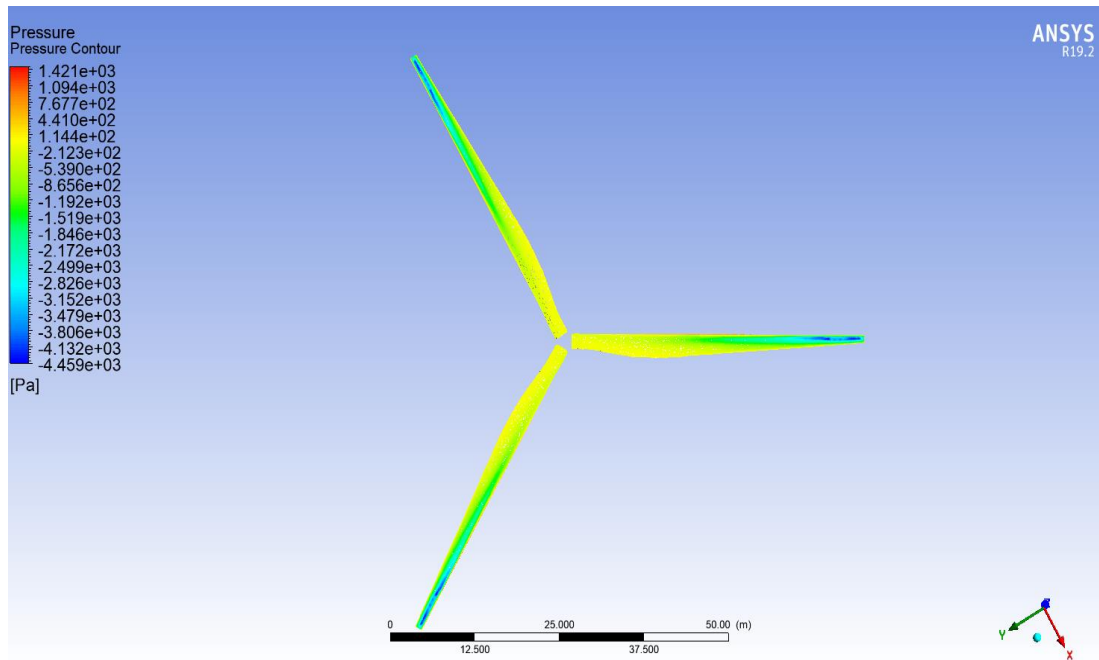


Σχήμα 5.5.4 Προφίλ ταχύτητας του αέρα από την είσοδο

Έπειτα φαίνεται το προφίλ των πιέσεων πάνω στα πτερύγια και από τη μπροστινή (Σχήμα 5.5.4) και από τη πίσω όψη (Σχήμα 5.5.5). Όπως είναι λογικό οι πιέσεις στη μπροστινή όψη είναι μεγαλύτερες από τη πίσω.

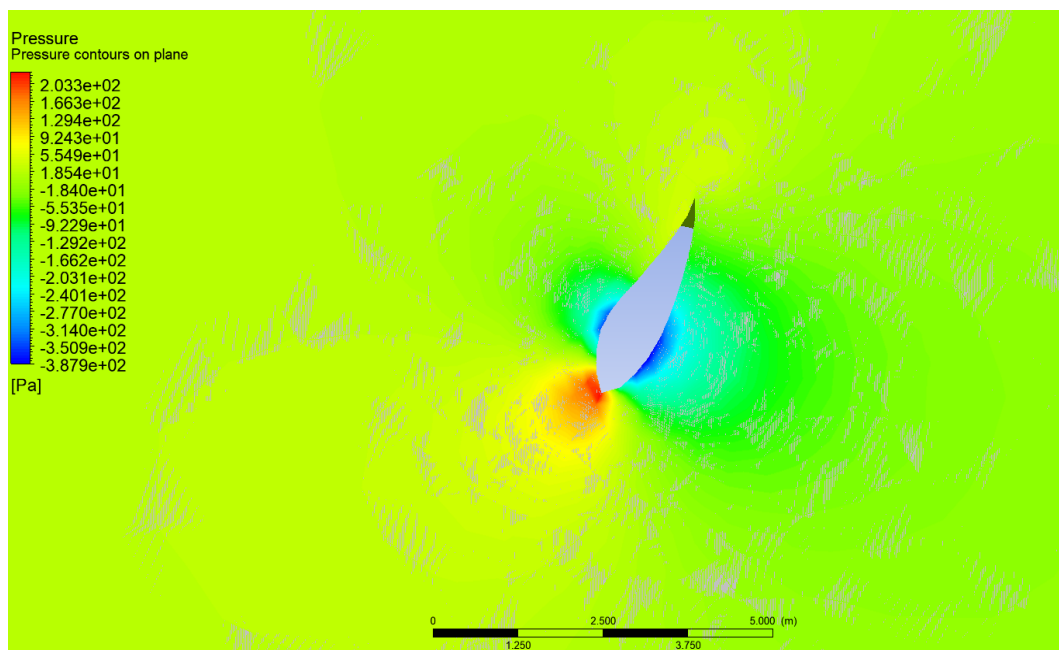


Σχήμα 5.5.5 Προφίλ πιέσεων μπροστινή όψη

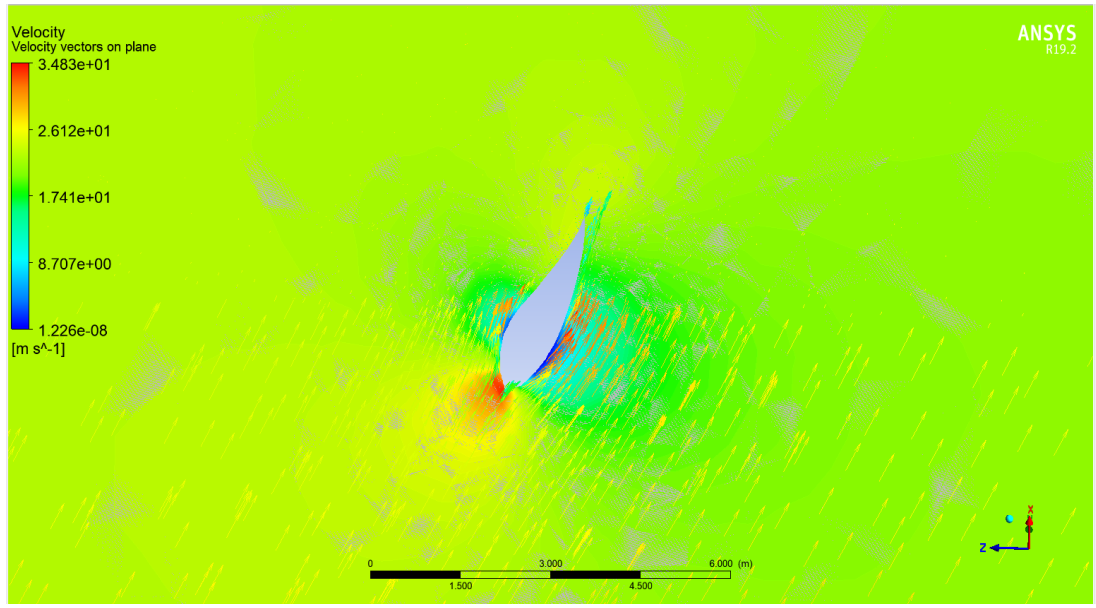


Σχήμα 5.5.6 Προφίλ πιέσεων πίσω όψη

Παρακάτω (Σχήμα 5.5.7) βλέπουμε τις πιέσεις κάθετα κατά μήκος του πτερυγίου ως προς τον άξονα x με τη μεγαλύτερη τιμή να είναι στο πάνω μέρος του πτερυγίου. Στο Σχήμα 5.5.8 φαίνονται τα διανύσματα της ταχύτητας ανέμου από τη κατεύθυνση -Z.



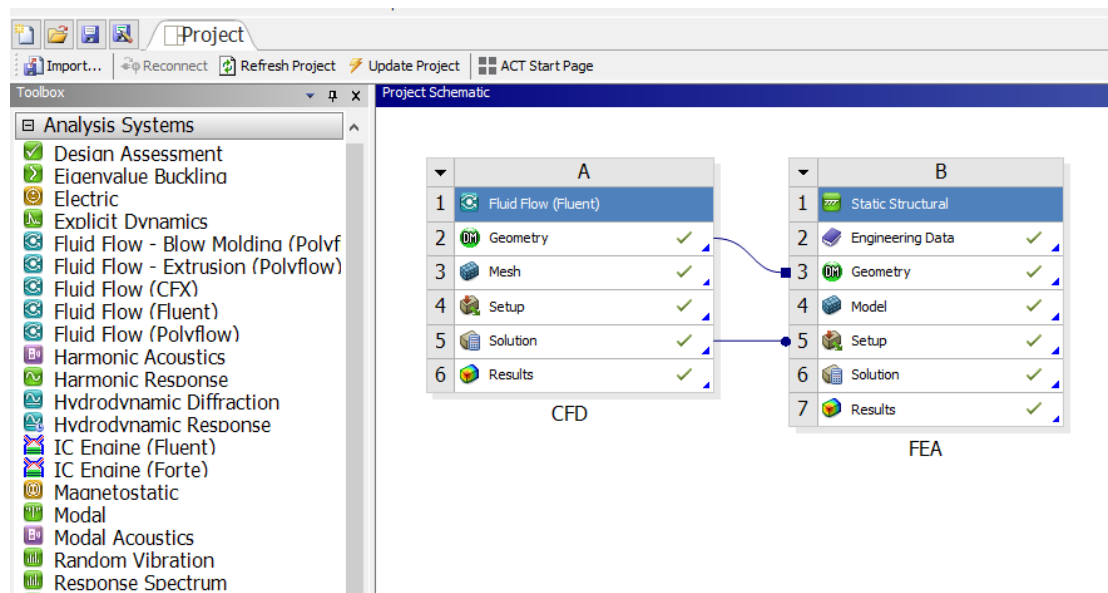
Σχήμα 5.5.7 Πίεση γύρω από το πτερύγιο



Σχήμα 5.5.8 Ταχύτητα ανέμου γύρω από το πτερύγιο

5.6 STATIC STRUCTURAL

Τελειώνοντας τη fluent μελέτη προχωράμε προς τη στατική μελέτη (static structural).



Σχήμα 5.6.1 Τελική μορφή του προγράμματος

Αρχικά θα προσθέσουμε τα 5 υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε μέσω του engineering data με τις ιδιότητες των υλικών που φαίνονται στο πίνακα 5.2

The screenshot shows the Engineering Data interface. The 'Outline of Schematic B2: Engineering Data' table lists materials and their sources. The 'Properties of Outline Row 3: Liquid Crystal Polymer (LCP), 50% Glass Fiber Filled' table shows the material's properties.

1	Contents of Engineering Data	Source	Description
2	Material		
3	Liquid Crystal Polymer (LCP), 50% Glass Fiber Filled	C:\Users\eleni\Desktop\tray_52_5_files\lcp0	
4	30%	C:\Users\eleni\OneDrive\Desktop\ansys tel	
5	50% fiberglass	C:\Users\eleni\Desktop\prospatheia_1_files	
6	dokimi	C:\Users\eleni\OneDrive\Desktop\ansys tel	
7	kevlar29	C:\Users\eleni\Desktop\tray_52_5_files\lcp0	
8	Structural Steel	General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	1740	kg m ⁻³
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus...	
6	Young's Modulus	38500	MPa
7	Poisson's Ratio	0.22	
8	Bulk Modulus	1.101E+10	Pa
9	Shear Modulus	7.582E+09	Pa
10	Tensile Ultimate Strength	124	MPa

Σχήμα 5.6.2 Εισαγωγή σύνθετων υλικών

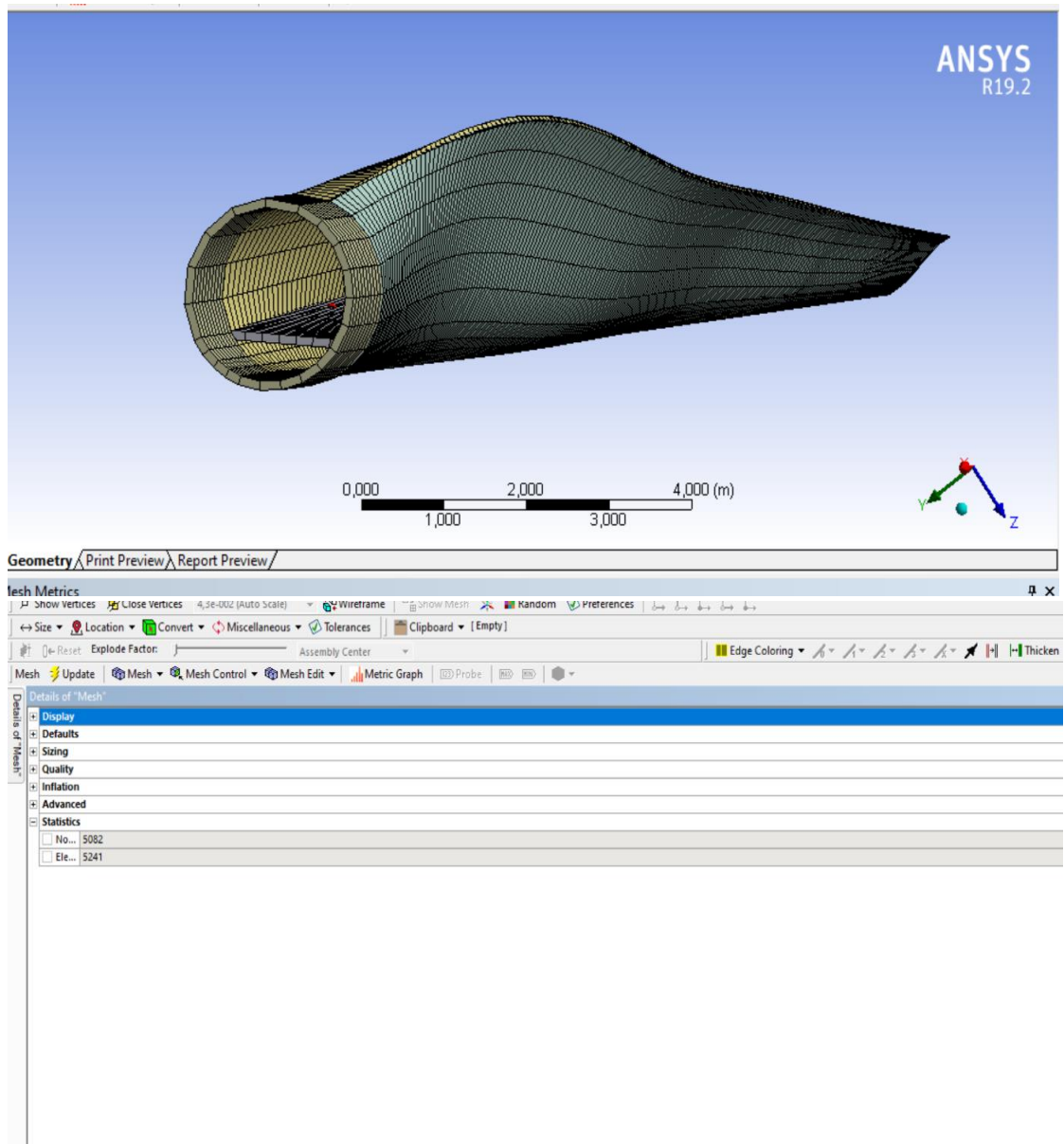
Όλα τα υλικά λαμβάνονται ως "οιωνοί ισότροπα" καθώς δεν προκύπτουν για αυτά διαφορετικές τιμές αντοχής για τις καταπονήσεις σε διαφορετική κατεύθυνση. Οι Ιδιότητες των υπό δοκιμή υλικών της μελέτης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Υλικά	Liquid crystal polymer 50% E-glass Fiber	Polyester SMC 30% E-glass Fiber	Polyester SMC 50% E-glass Fiber	Polyester SMC, Kevlar Reinforced	Polyester SMC 50% S-glass Fiber
Πυκνότητα (kg/m ³)	1740	1800	2000	1440	1750
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	18,5	72	73	91	78
Λόγος Poisson	0,22	0,21	0,21	0,35	0,21
Μέτρο διάτμησης (GPa)	7,58	29	30	34	30

Πίνακας 5.2 Ιδιότητες υλικών

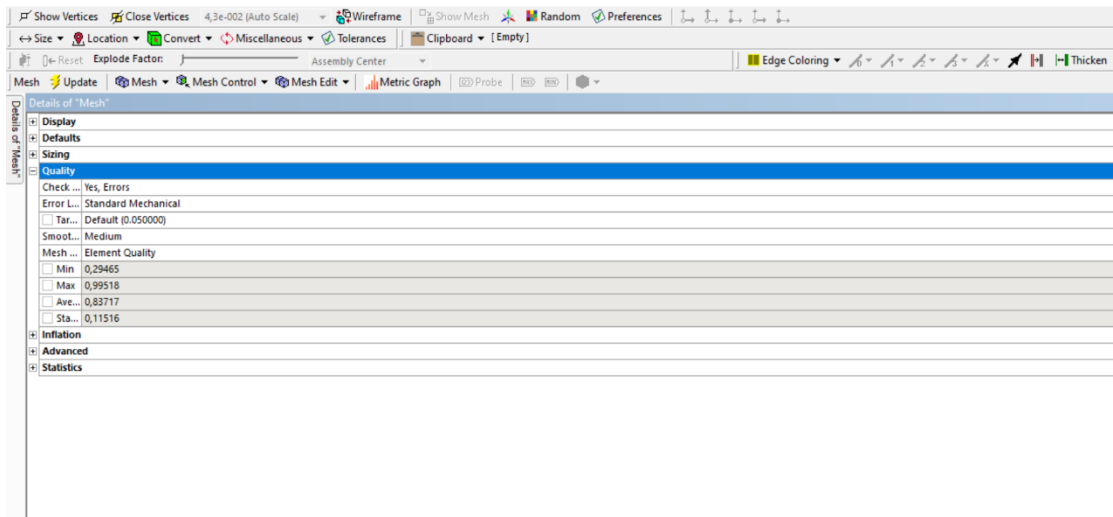
Το πάχος της εξωτερικής επιφάνειας αρχίζει από 0,1 m και μειώνεται σε 0.005 στη μύτη. Η δοκός έχει ίδια συμπεριφορά με 0,1 στη ρίζα και 0,03 στη μύτη. Στο μοντέλο μας χρησιμοποιήθηκε face meshing για την εξωτερική επιφάνεια και σαν μέγεθος στοιχείου 20 cm. Επίσης επιλέχθηκε nonlinear adaptivity ώστε να επιδιορθώνεται αυτόματα το πλέγμα σε θέματα που μπορεί να προκύπτουν σε μεγάλες παραμορφώσεις.

Παρακάτω (Σχήμα 5.6.3) εμφανίζεται το πλέγμα μας και οι ακριβείς αριθμοί κόμβων.



Σχήμα 5.6.3 Πλέγμα και ακριβείς αριθμός κόμβων και στοιχείων

Έπειτα ελέγχουμε την ορθογωνική ποιότητα μας και εφόσον βρίσκεται κοντά στο ένα μας ικανοποιεί (Σχήμα 5.6.4).



Σχήμα 5.6.4 Ορθογωνική ποιότητα

Πλέον περνάμε στο πάχος του πτερυγίου σύμφωνα με το παρακάτω πίνακα:

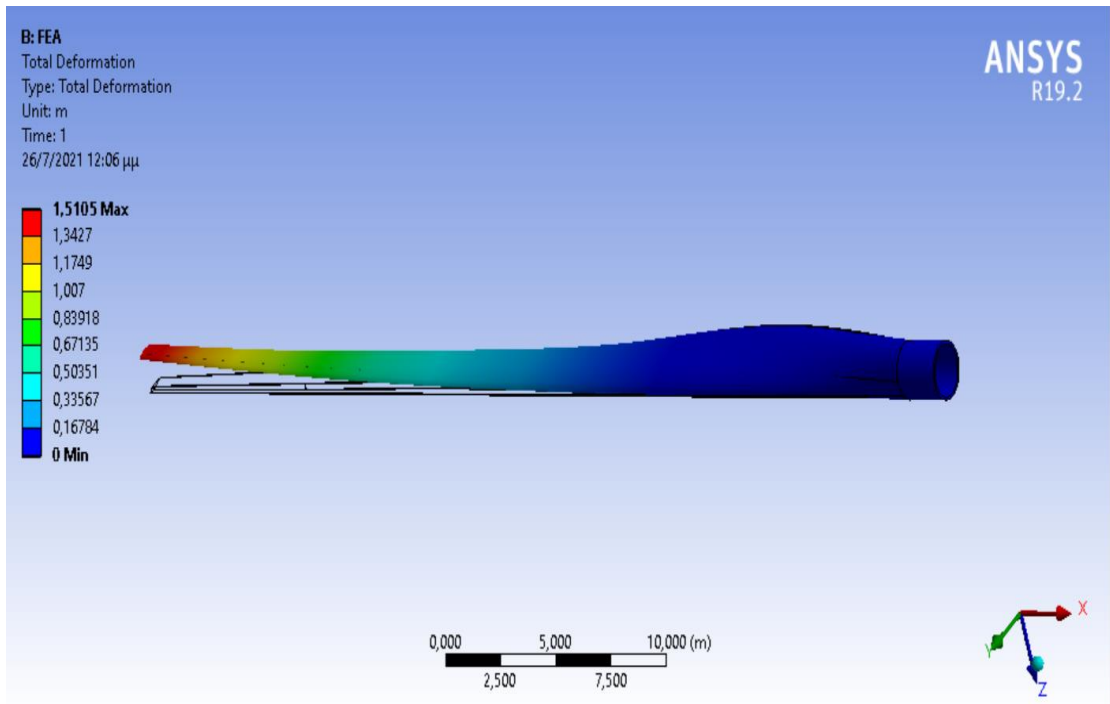
ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ		ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	
x(m)	Πάχος(m)	x(m)	Πάχος(m)
-1	0,1	-3	0,1
-44.2	0,005	-44,2	0,03

Πίνακας 5.3 Πάχος επιφανειών πτερυγίου

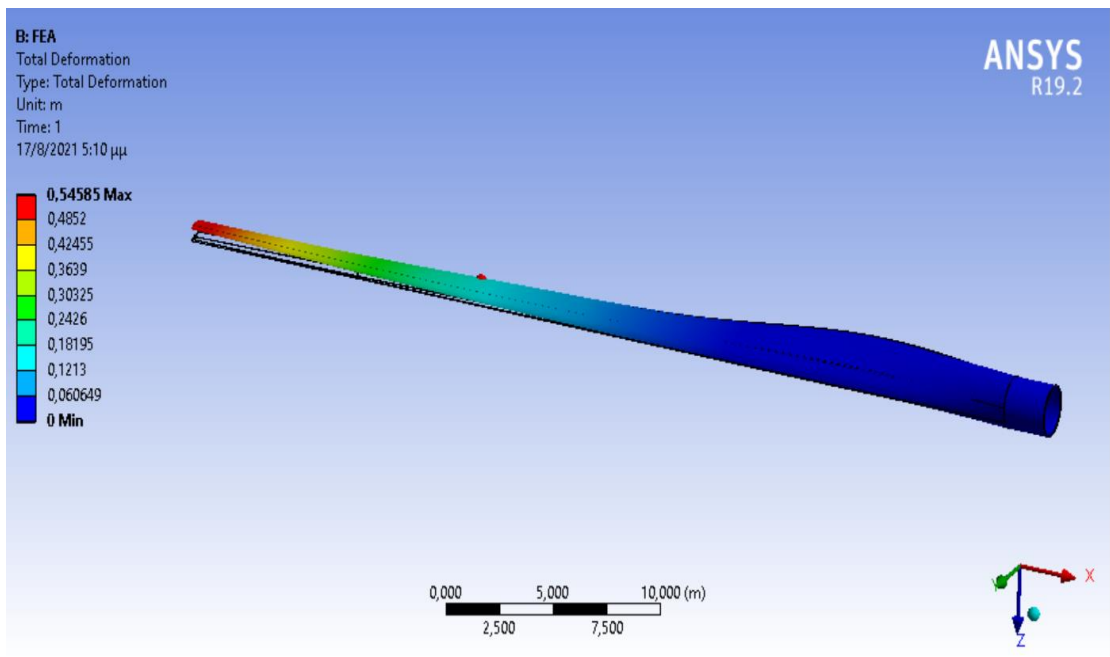
5.7 STRUCTURE ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ για ταχύτητα 12 m/s

5.7.1 Total Deformation

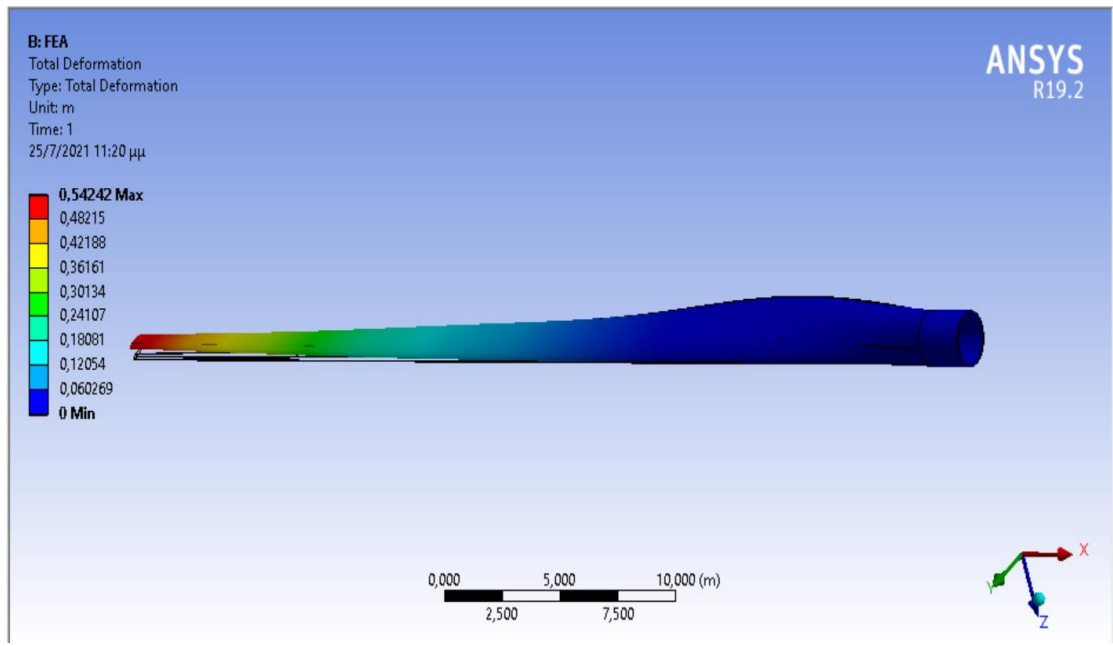
Παρατηρούμαι τις συνολικές μετατοπίσεις του πτερυγίου από την αρχική του θέση για κάθε υλικό για ταχύτητα 12 m/s :



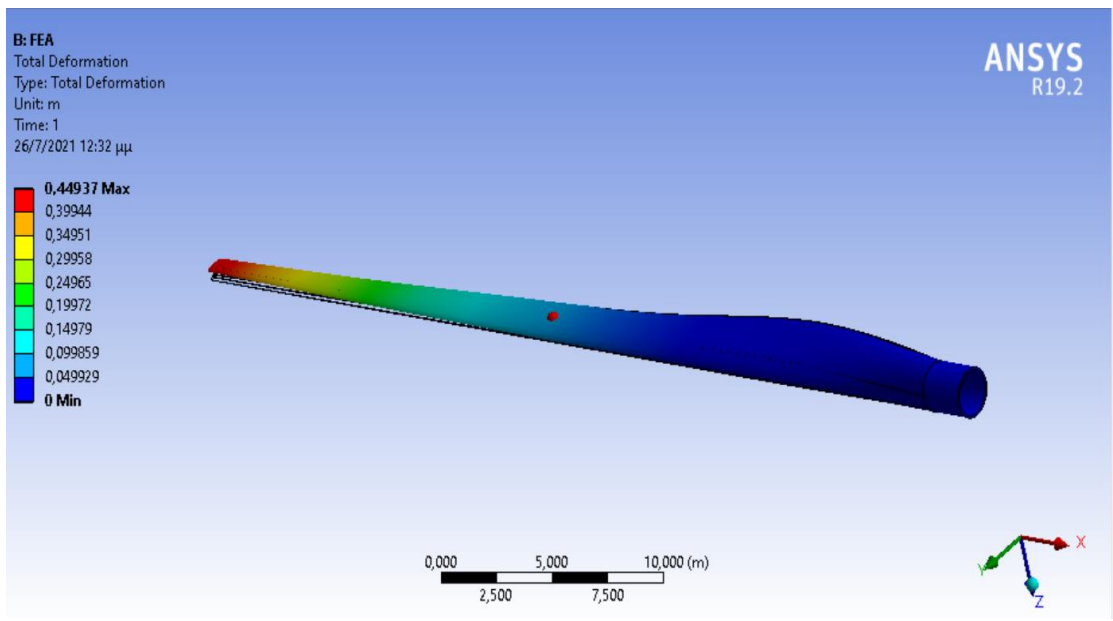
Σχήμα 5.7.1 Μετατόπιση LCP 50% Glass Fiber



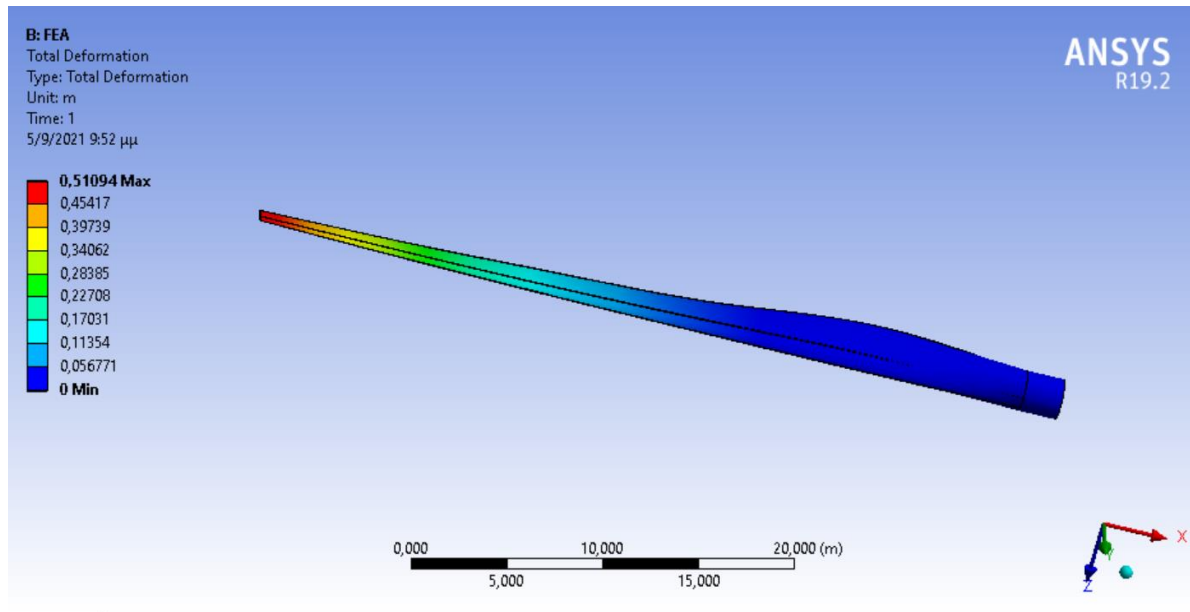
Σχήμα 5.7.2 Μετατόπιση Polyester 30% E-Glass Reinforced



Σχήμα 5.7.3 Μετατόπιση Polyester 50% E-Glass Reinforced

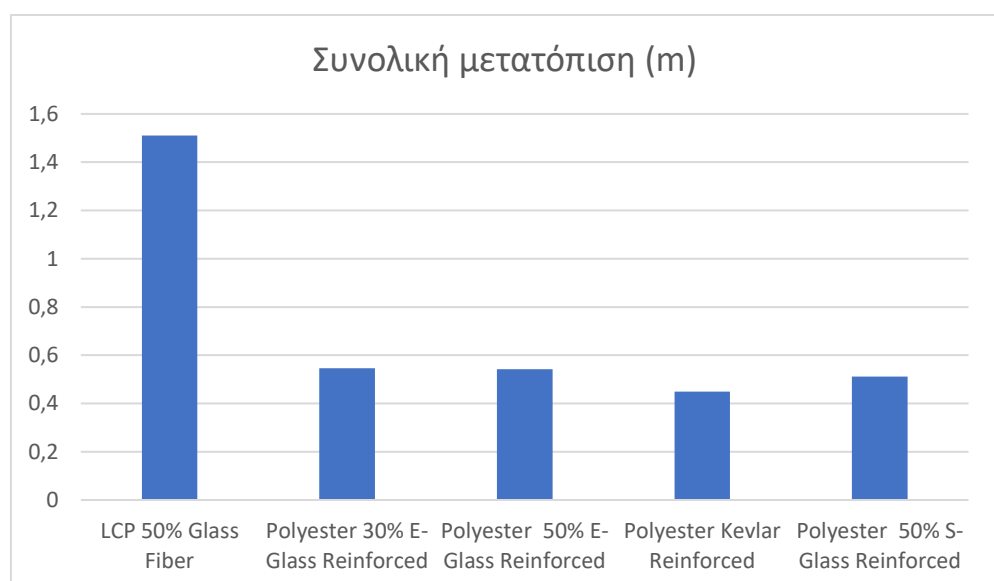


Σχήμα 5.7.4 Μετατόπιση Polyester Kevlar29 Reinforced



Σχήμα 5.7.5 Μετατόπιση Polyester 50% S-Glass Reinforced

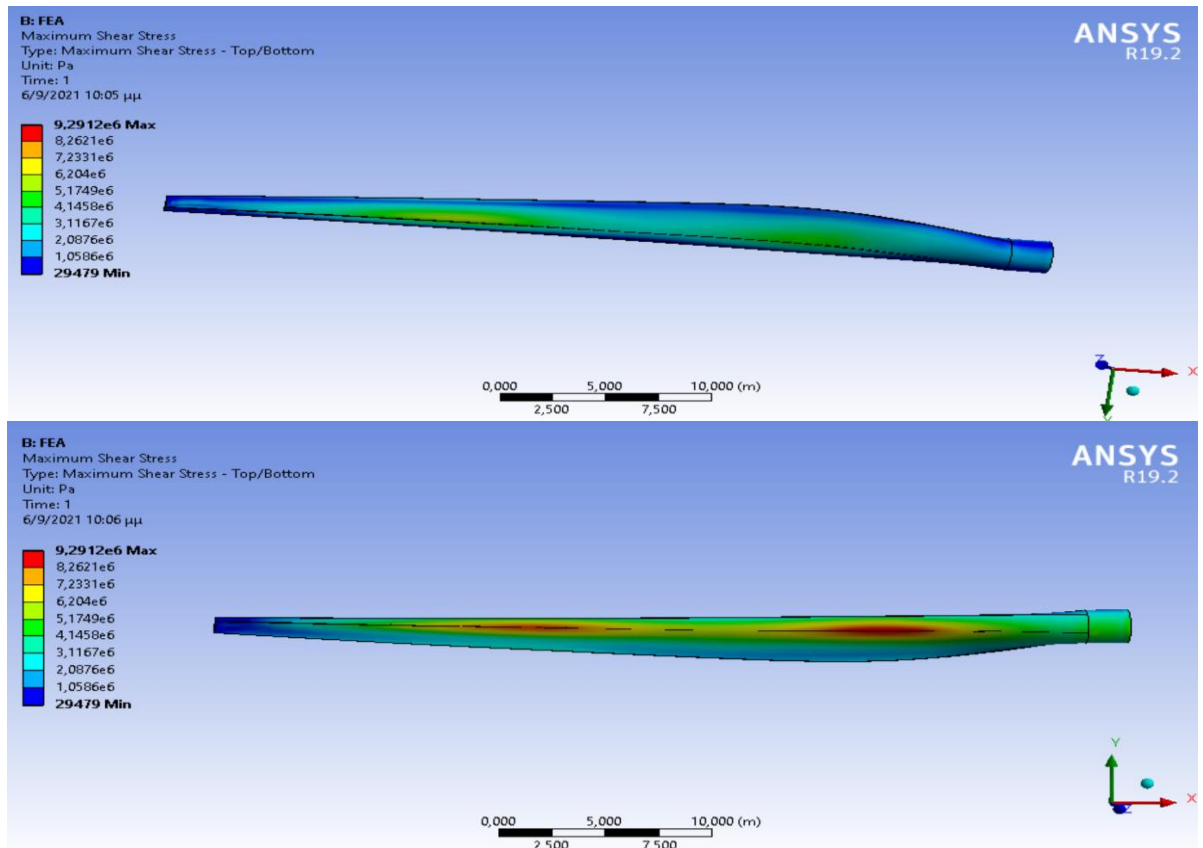
Σαν αποτέλεσμα έχουμε μεγάλη παραμόρφωση στο LCP 50% Glass Fiber. Στα υπόλοιπα υλικά η συνολική τους μετατόπιση είναι αρκετά κοντά, με το Kevlar να παρουσιάζει τη μικρότερη μετατόπιση. Στις ίνες γυαλιού βλέπουμε ότι εκεί που μεγάλωσε το ποσοστό τους μειώθηκε η παραμόρφωση χωρίς όμως μεγάλη διαφορά, ενώ το S-glass υπερಿಸχύει στις ίνες γυαλιού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω Πίνακα 5.4.



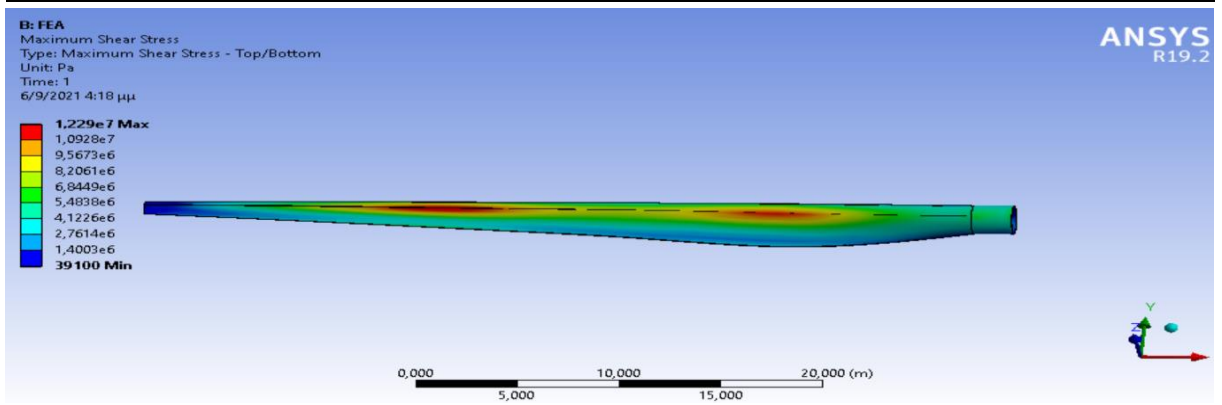
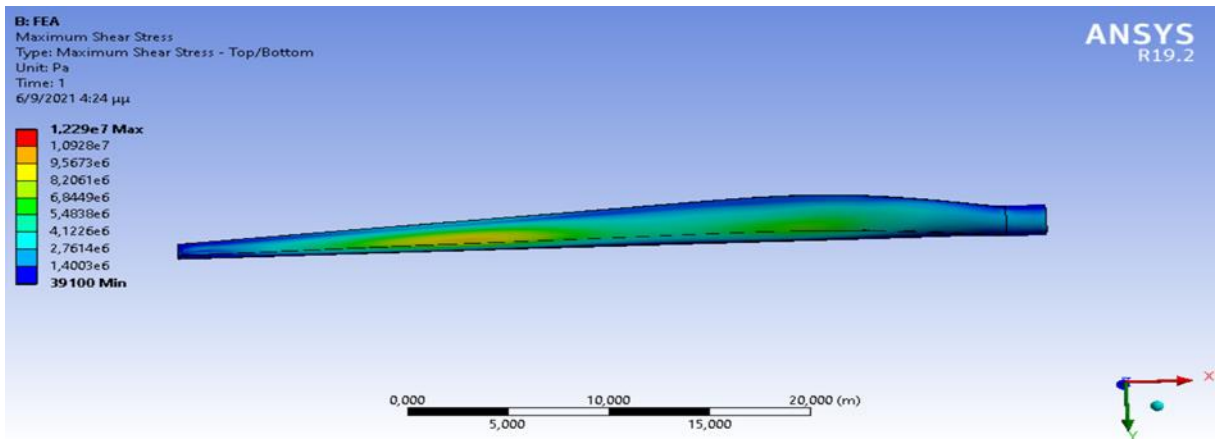
Πίνακας 5.4 Συνολική μετατόπιση για ταχύτητα 12 m/s

5.7.2 Μέγιστες διατμητικές τάσεις

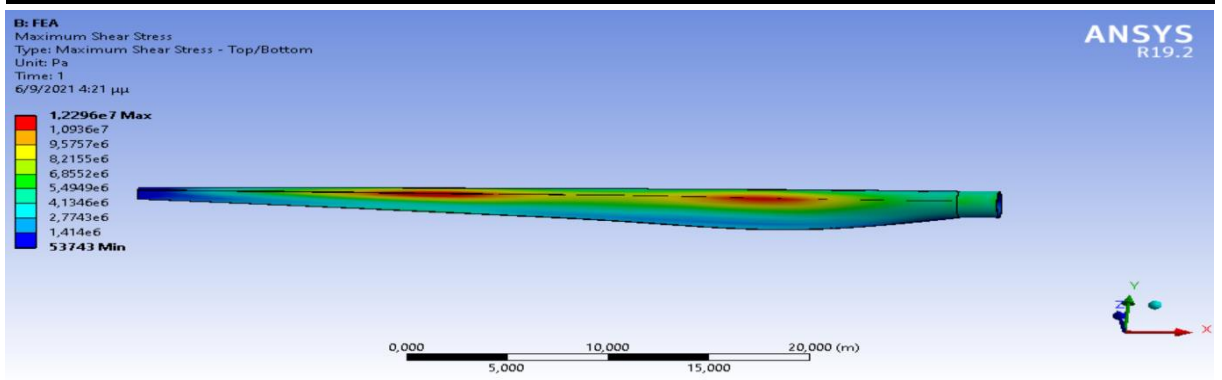
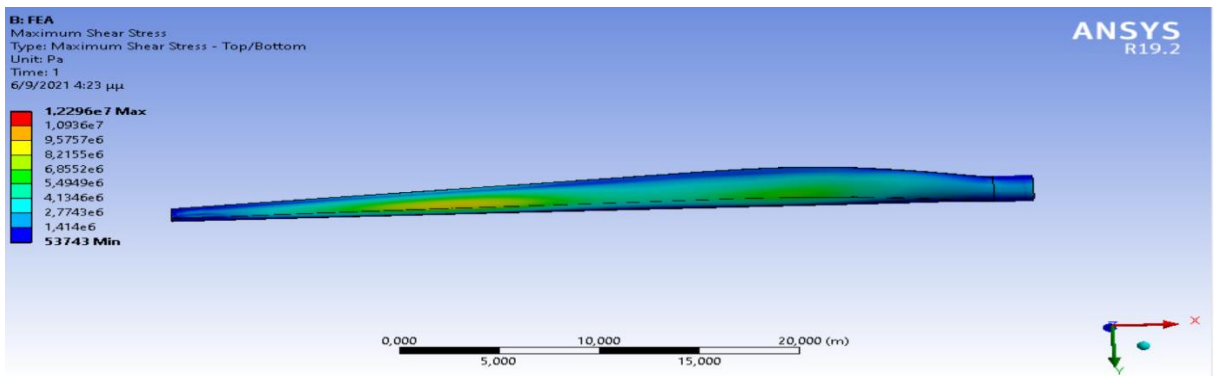
Συνεχίζουμε για την ίδια ταχύτητα 12 m/s και παρουσιάζουμε τις μέγιστες διατμητικές τάσεις πάνω στο περύγιο :



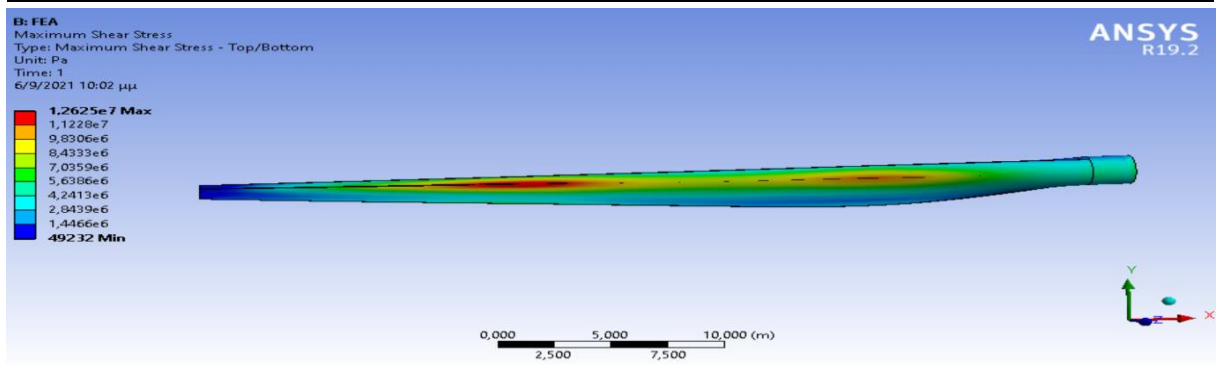
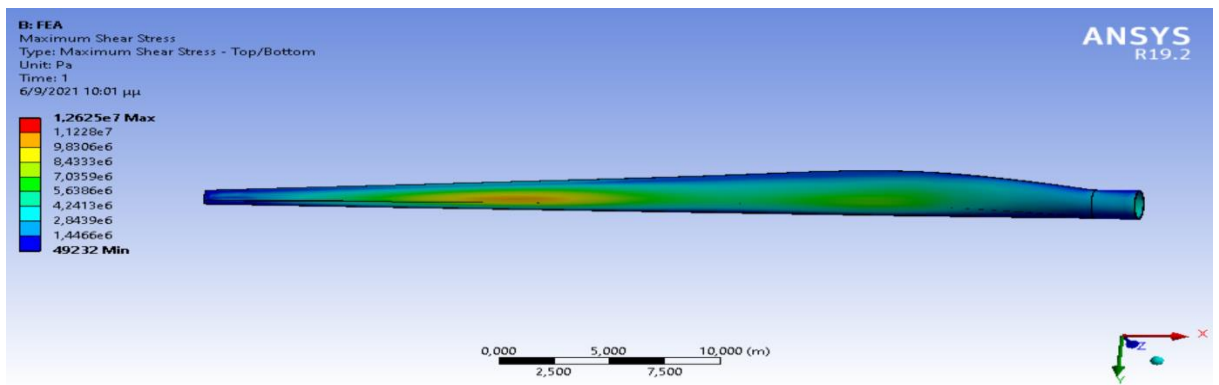
Σχήμα 5.7.6 Τάσεις για LCP 50% Glass Fiber (πίσω και μπροστά όψη)



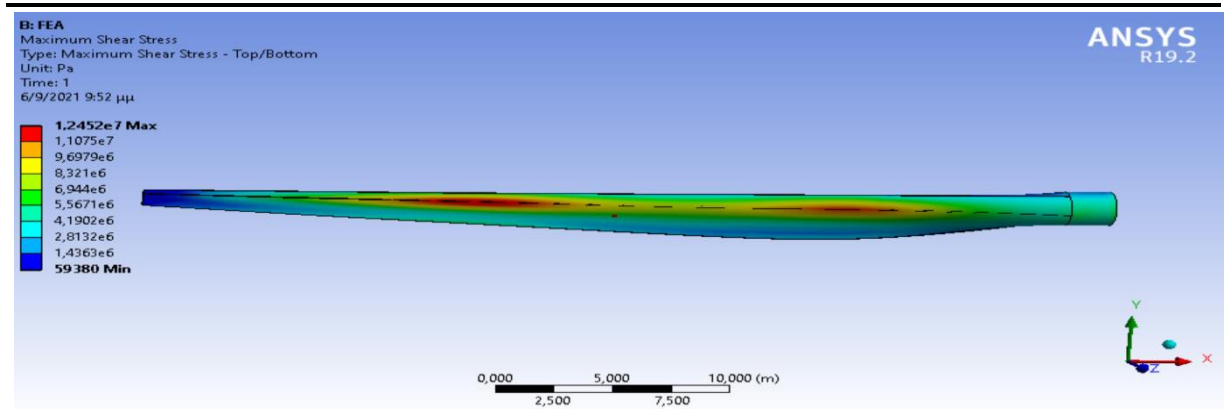
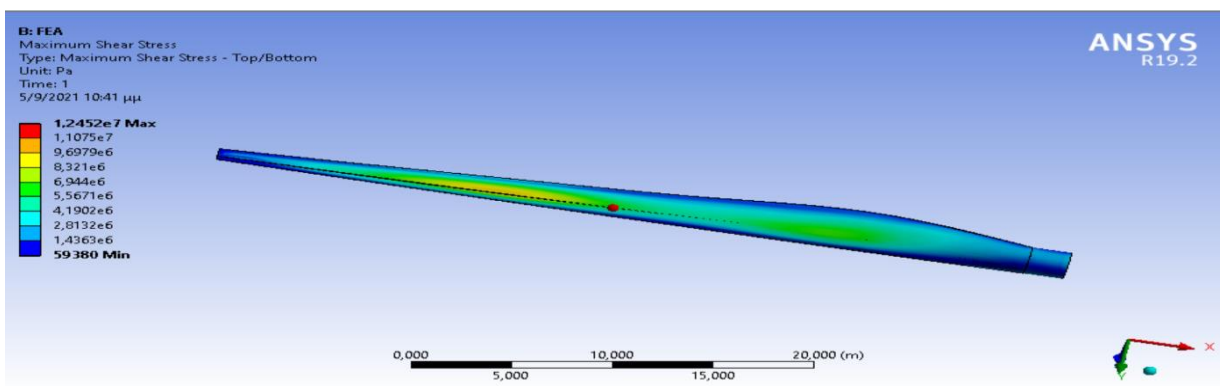
Σχήμα 5.7.7 Τάσεις για Polyester 30% E-Glass Reinforced (πίσω και μπροστά όψη)



Σχήμα 5.7.8 Τάσεις για Polyester 50% E-Glass Reinforced (πίσω και μπροστά όψη)



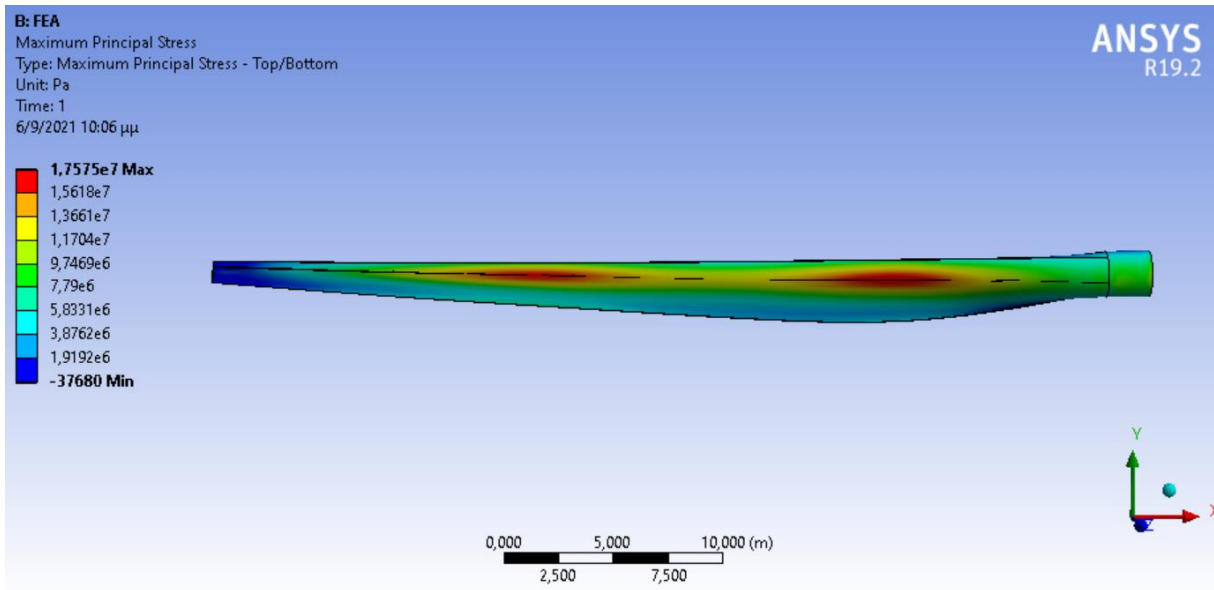
Σχήμα 5.7.9 Τάσεις για Polyester Kevlar29 Reinforced (πίσω και μπροστά όψη)



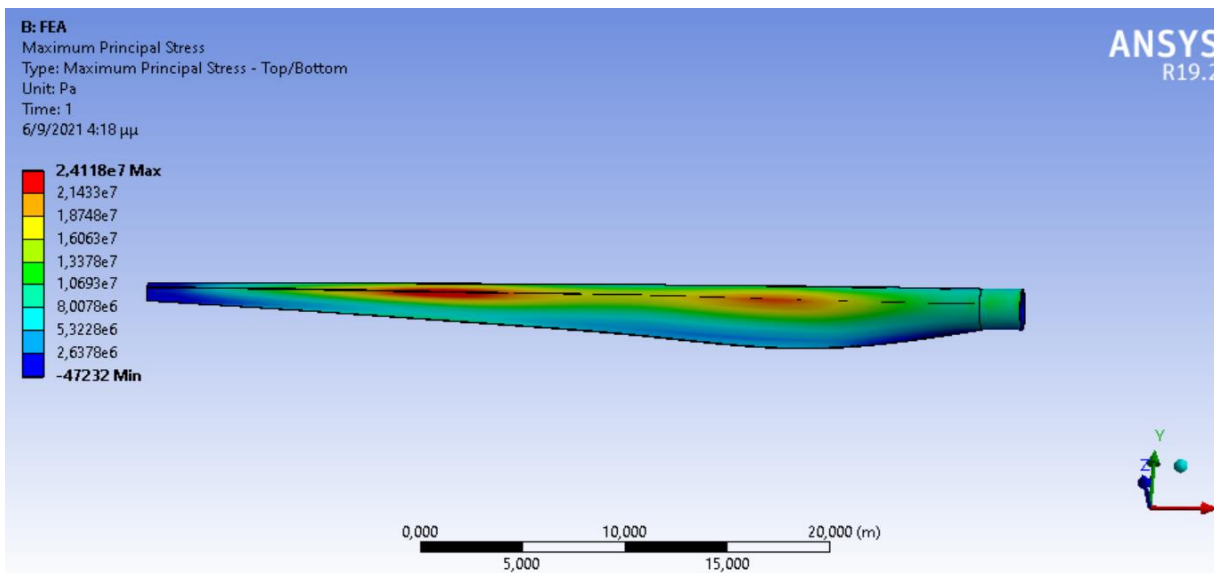
Σχήμα 5.7.10 Τάσεις για Polyester 50% S-Glass Reinforced (πίσω και μπροστά όψη)

5.7.3 Μέγιστες κύριες τάσεις

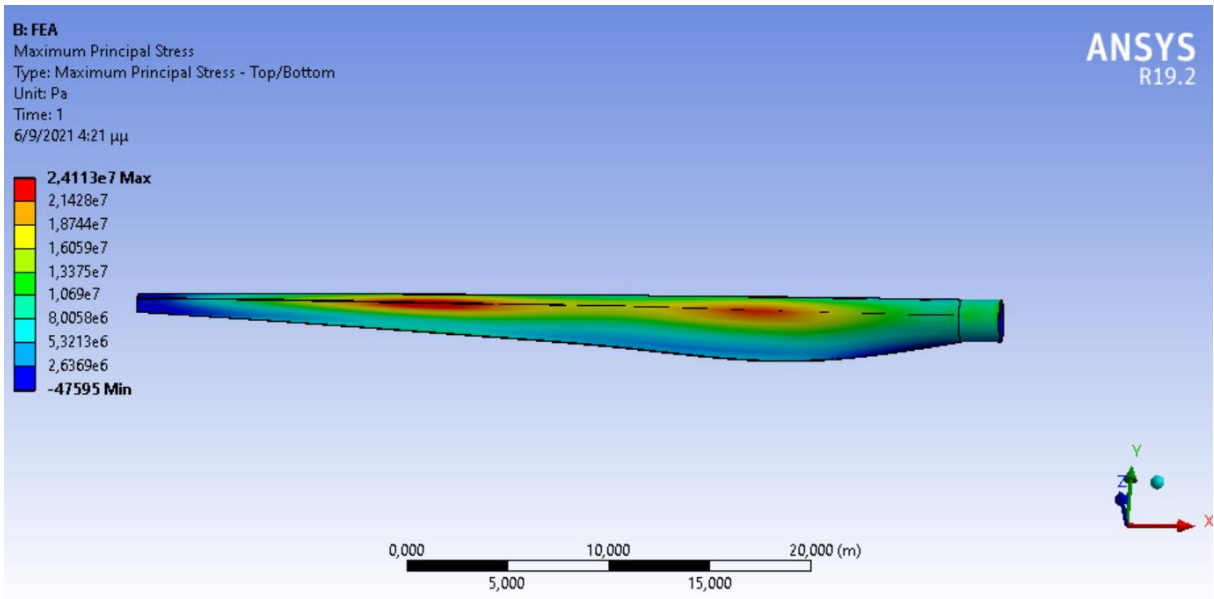
Παρακάτω παρουσιάζονται και οι μέγιστες κύριες τάσεις για τη ταχύτητα των 12 m/s :



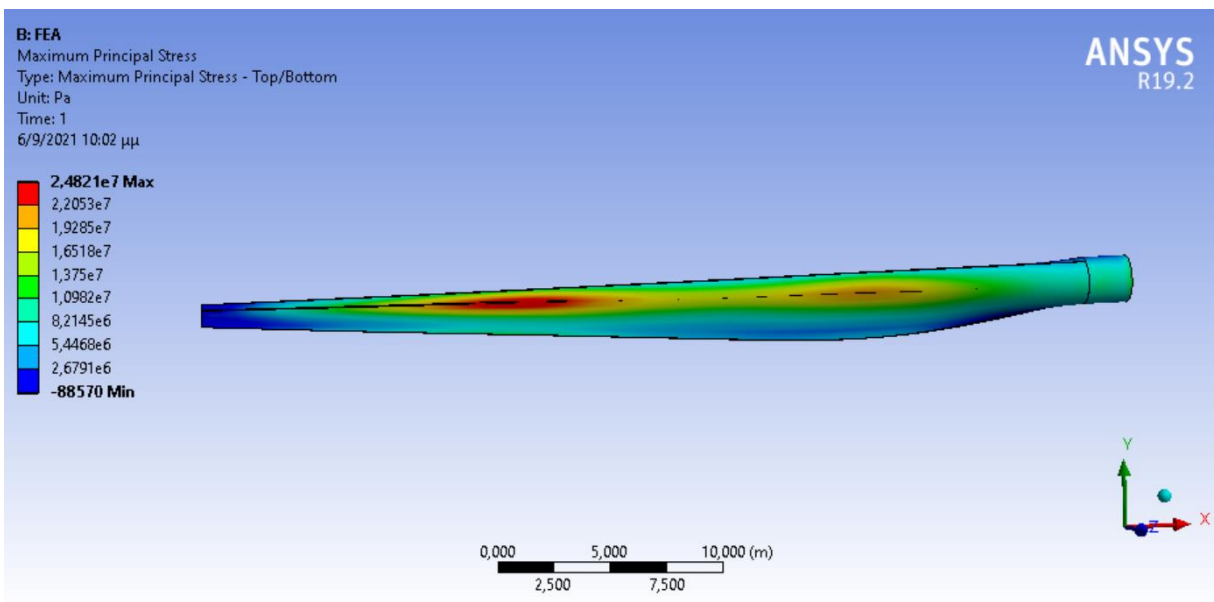
Σχήμα 5.7.11 Τάσεις για LCP 50% Glass Fiber



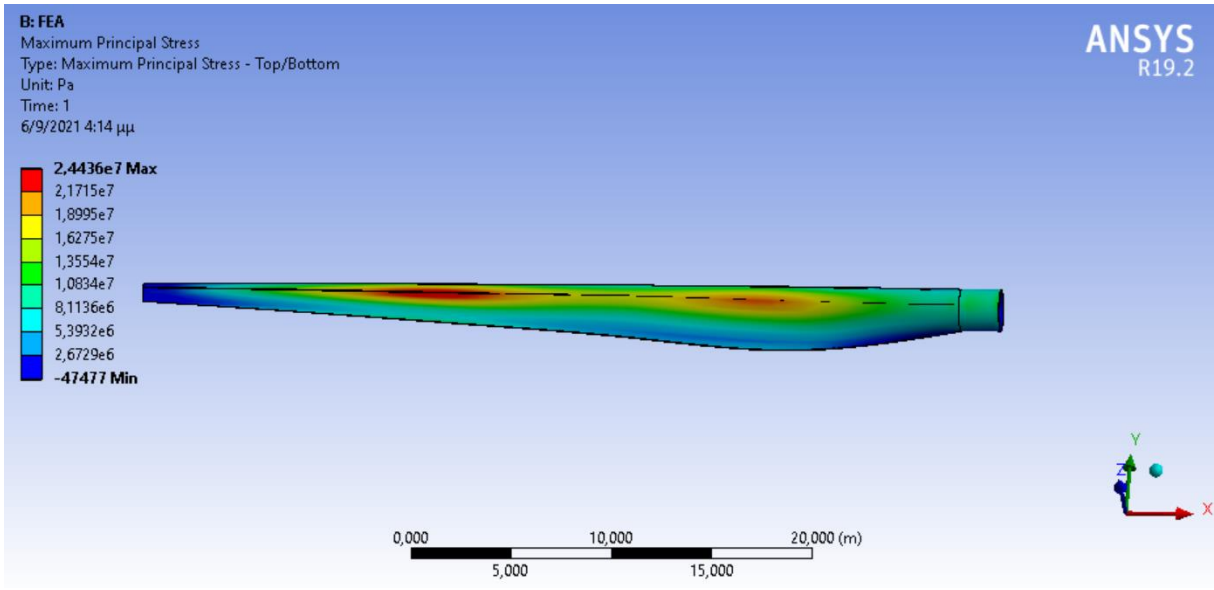
Σχήμα 5.7.12 Τάσεις για Polyester 30% E-Glass Reinforced



Σχήμα 5.7.13 Τάσεις για Polyester 50% E-Glass Reinforced

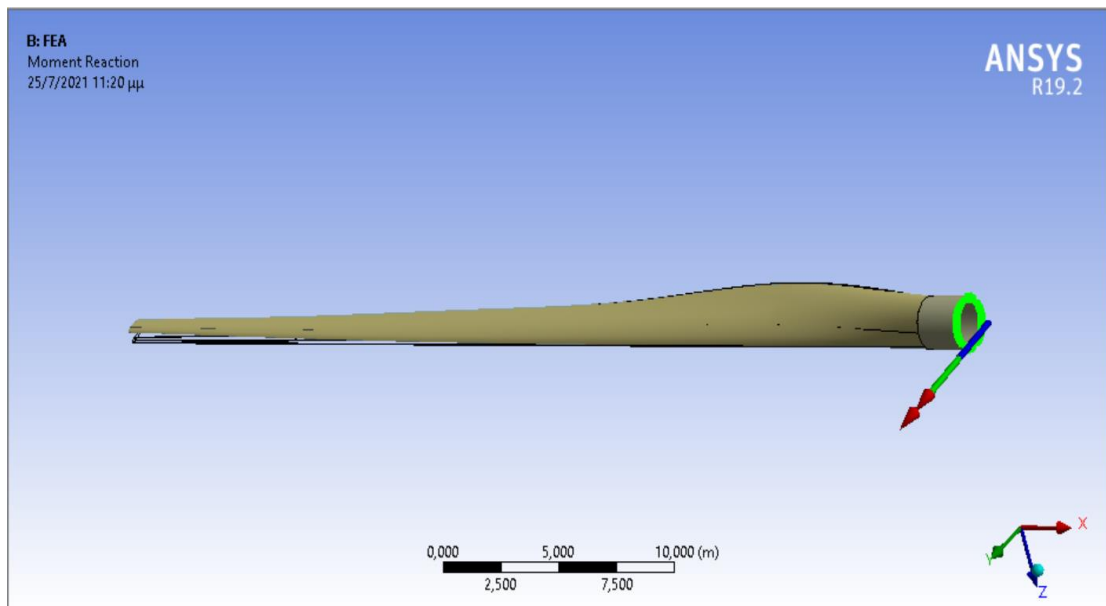


Σχήμα 5.7.14 Τάσεις για Polyester Kevlar29 Reinforced



Σχήμα 5.7.15 Τάσεις για Polyester 50% S-Glass Reinforced

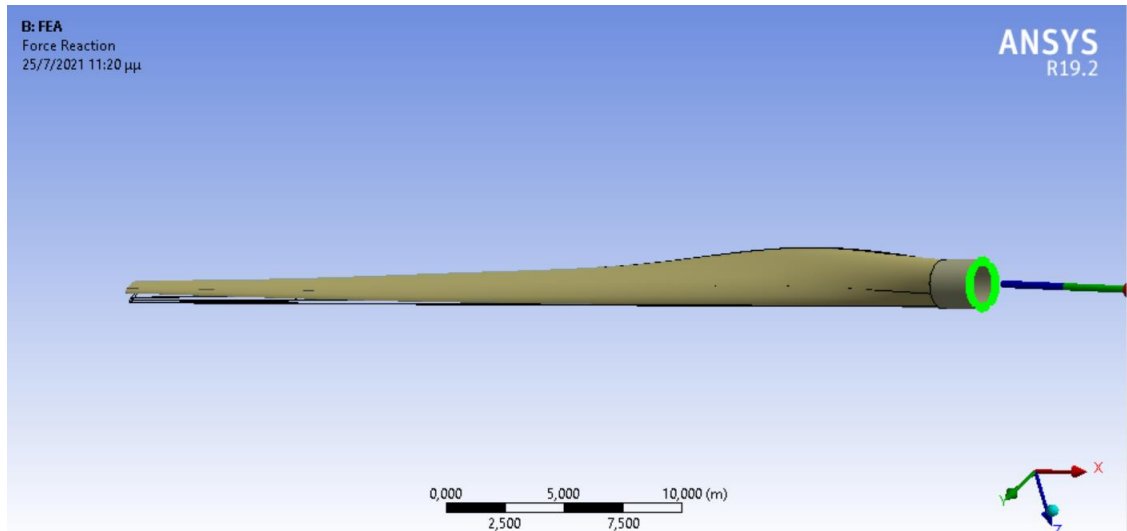
5.7.4 Δυνάμεις λόγω αδράνειας



Σχήμα 5.7.11 Δυνάμεις λόγω αδράνειας

Όλα τα υλικά έχουν το ίδιο αποτέλεσμα (Σχήμα 5.7.11) για δυνάμεις λόγω αδράνειας. Είναι ένα λογικό αποτέλεσμα να έχουμε τις πιο πολλές δυνάμεις στον άξονα των Ψ αν κρίνουμε από τις συνολικές μετατοπίσεις.

5.7.4 Δυνάμεις λόγω αντιδράσεων



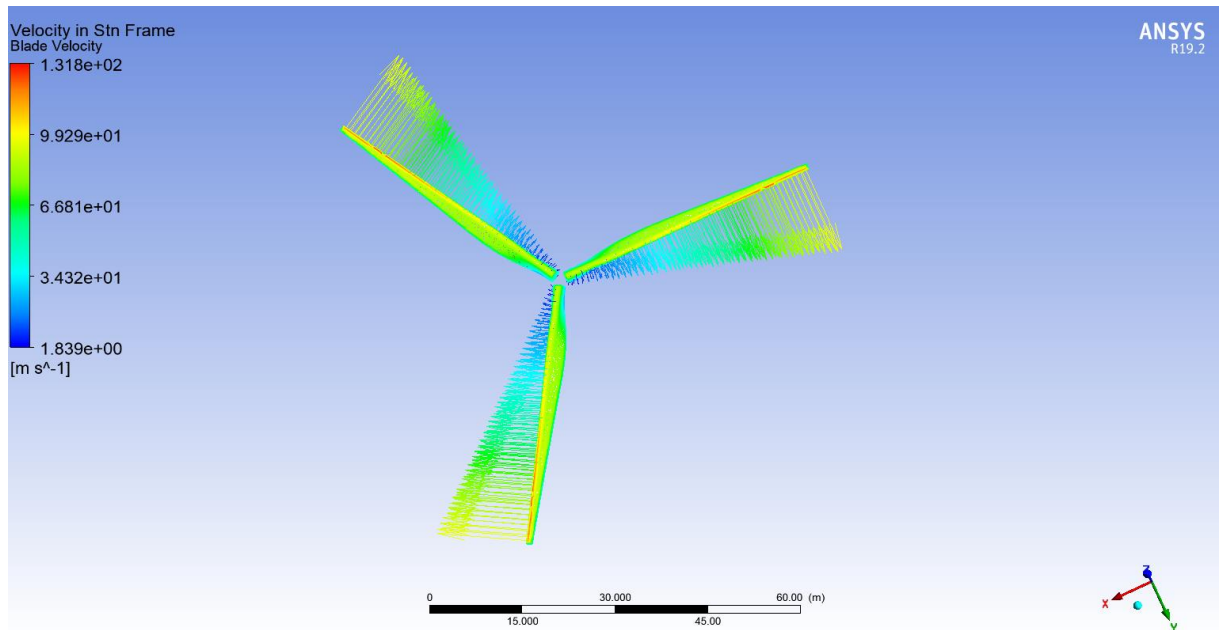
Σχήμα 5.7.12 Δυνάμεις λόγω αντιδράσεων

Όπως και στις δυνάμεις λόγω αδράνειας έτσι και εδώ έχουμε λογικά αποτελέσματα, με τις δυνάμεις αυτή τη φορά να εμφανίζονται ως προς X, λαμβάνοντας υπόψη μας τη γωνιακή ταχύτητα.

5.8 STRUCTURE ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ για ταχύτητα 53 m/s

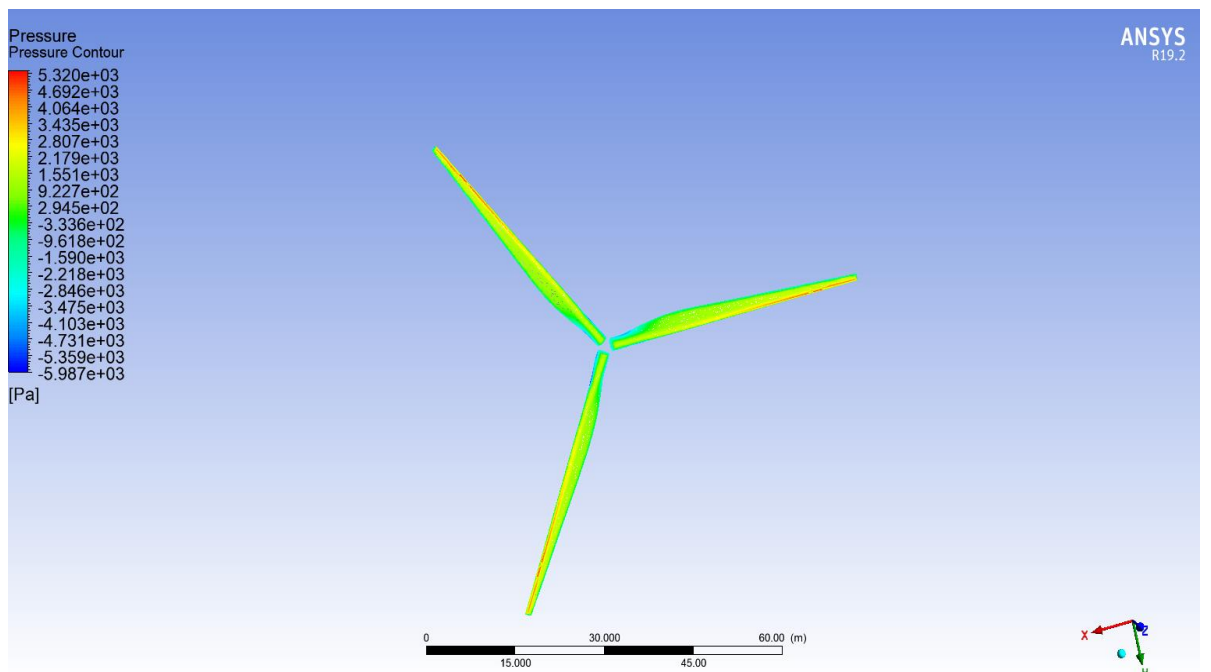
Αυτή τη φορά υποβάλαμε της ανεμογεννήτρια σε ακραίες συνθήκες ανέμου για τις αντοχές της της τάξεως των 53 m/s. , χωρίς να αλλάξουμε κάτι άλλο στις συνθήκες του πειράματος.

Στο παρακάτω Σχήμα 5.8.1 παρατηρείται ότι το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου δεν παρουσιάζει μεταβολές.

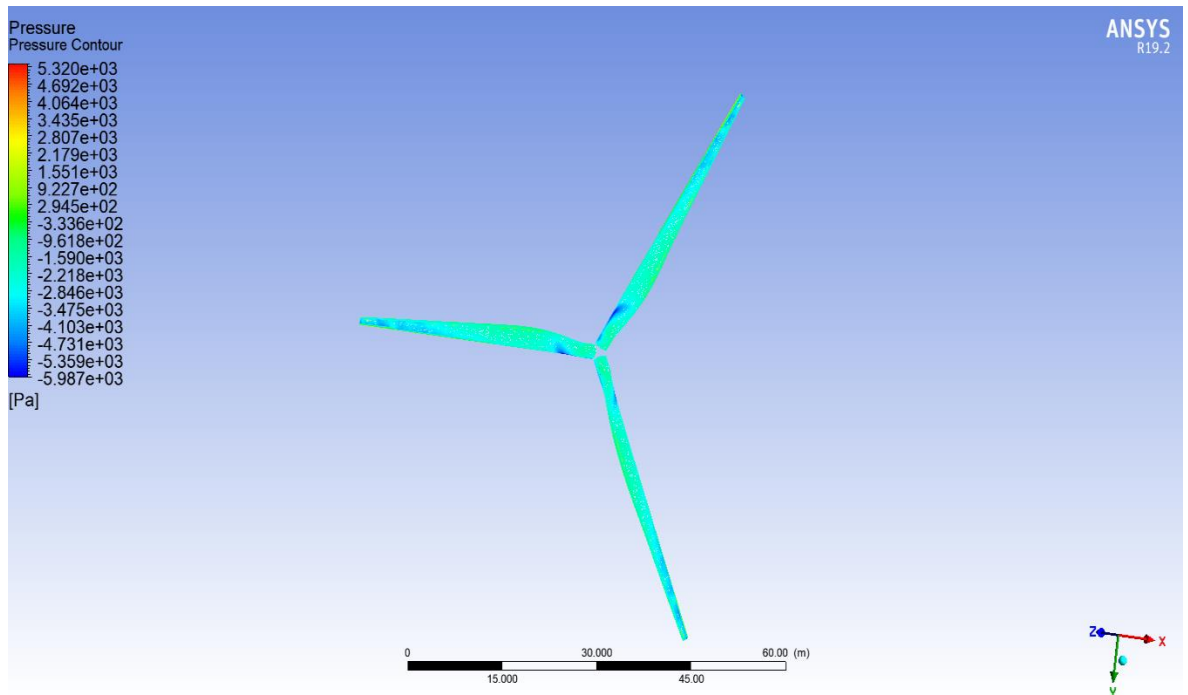


Σχήμα 5.8.1 Ταχύτητα αέρα πάνω στα πτερύγια

Περνώντας στο προφίλ των πιέσεων παρατηρείται ότι μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό και πιο συγκεκριμένα οι μέγιστες τιμές από 1421 Pa φτάνουν τα 5320 Pa. (Σχήμα 5.8.2 και Σχήμα 5.8.3)



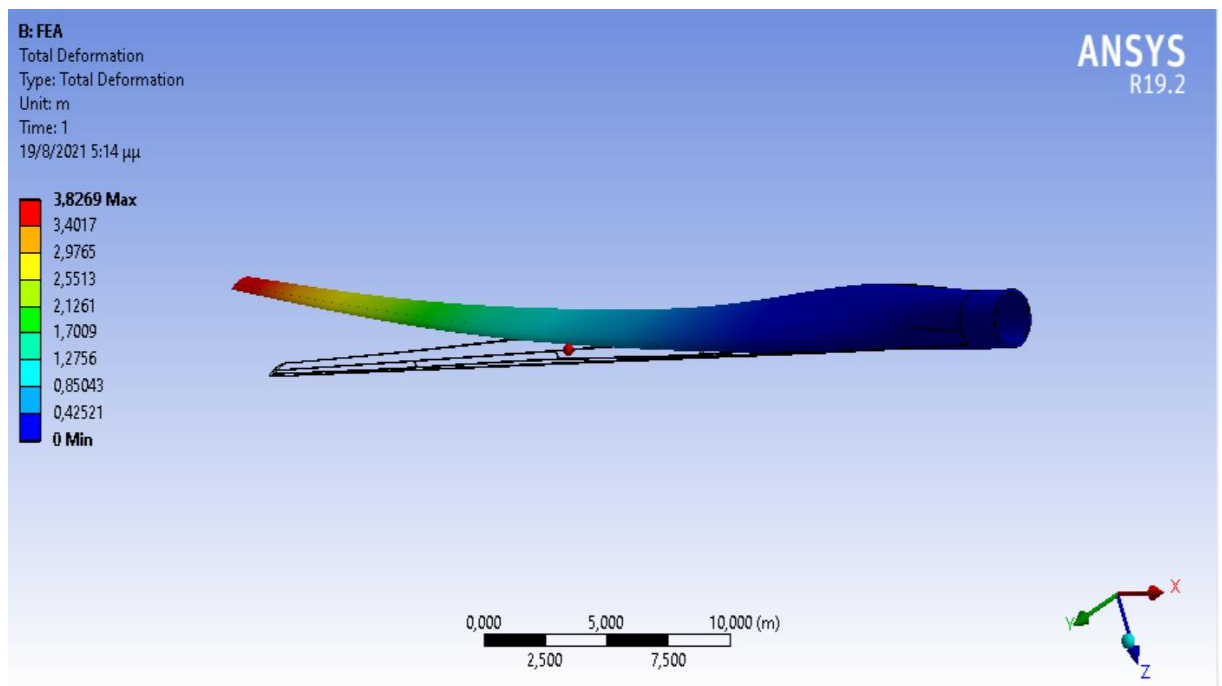
Σχήμα 5.8.2 Προφίλ πιέσεων μπροστινή όψη (U = 53 m/s)



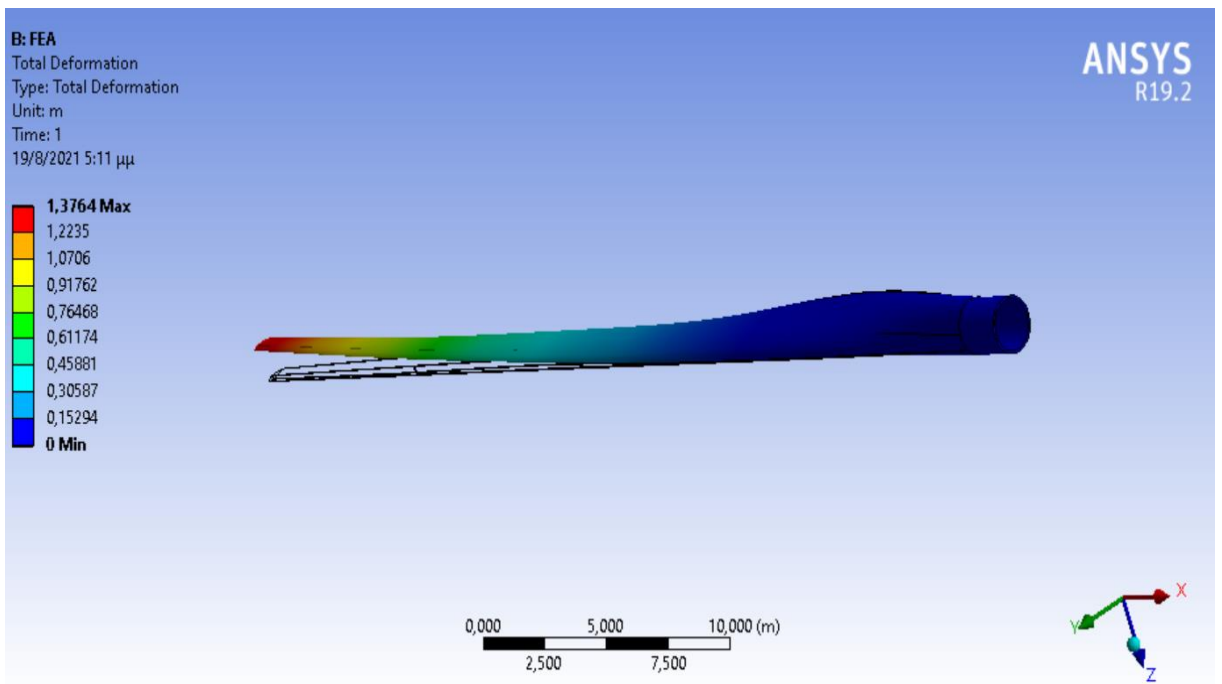
Σχήμα 5.8.3 Προφίλ πιέσεων πίσω όψη (U = 53 m/s)

5.8.1 Total Deformation

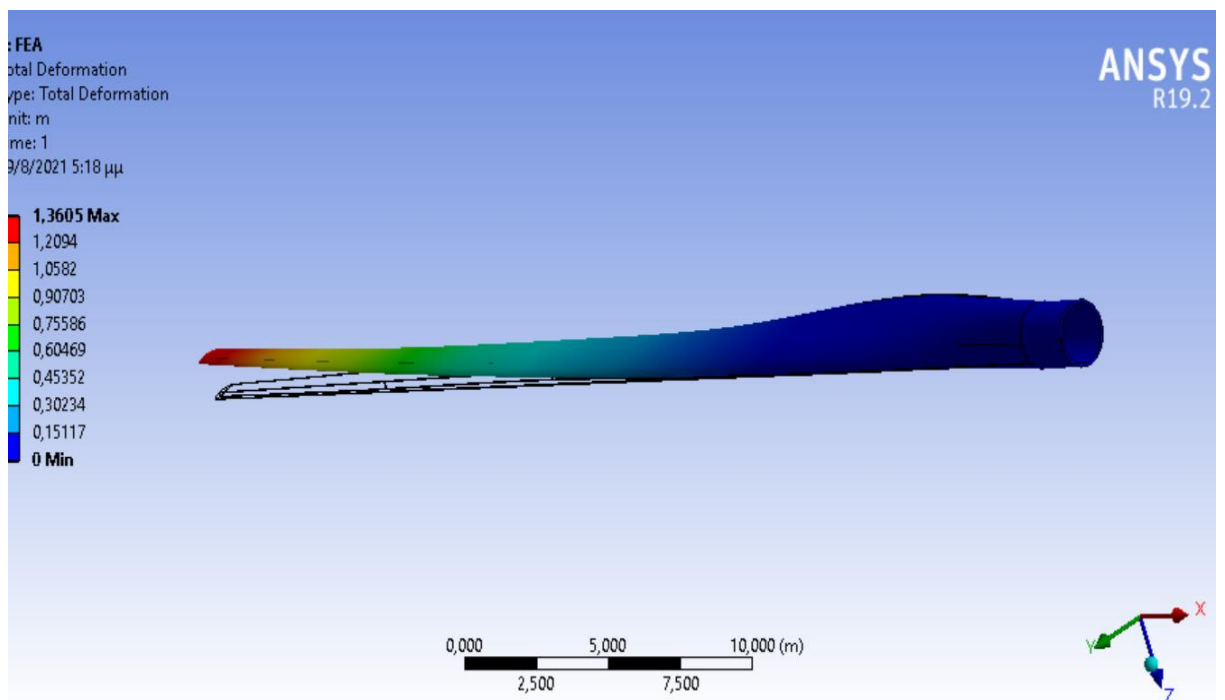
Παρακάτω παρατηρούμαι τις συνολικές μετατοπίσεις του πτερυγίου από την αρχική του θέση για κάθε υλικό για ταχύτητα 53 m/s :



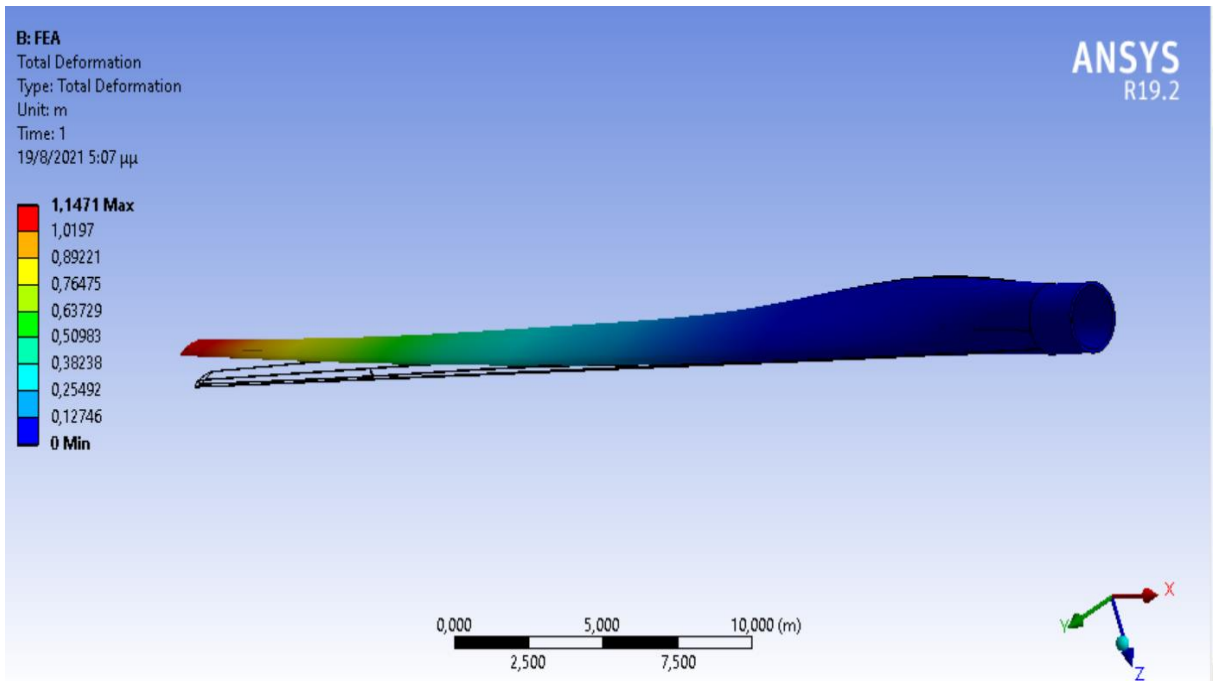
Σχήμα 5.8.4 Μετατόπιση LCP 50% Glass Fiber



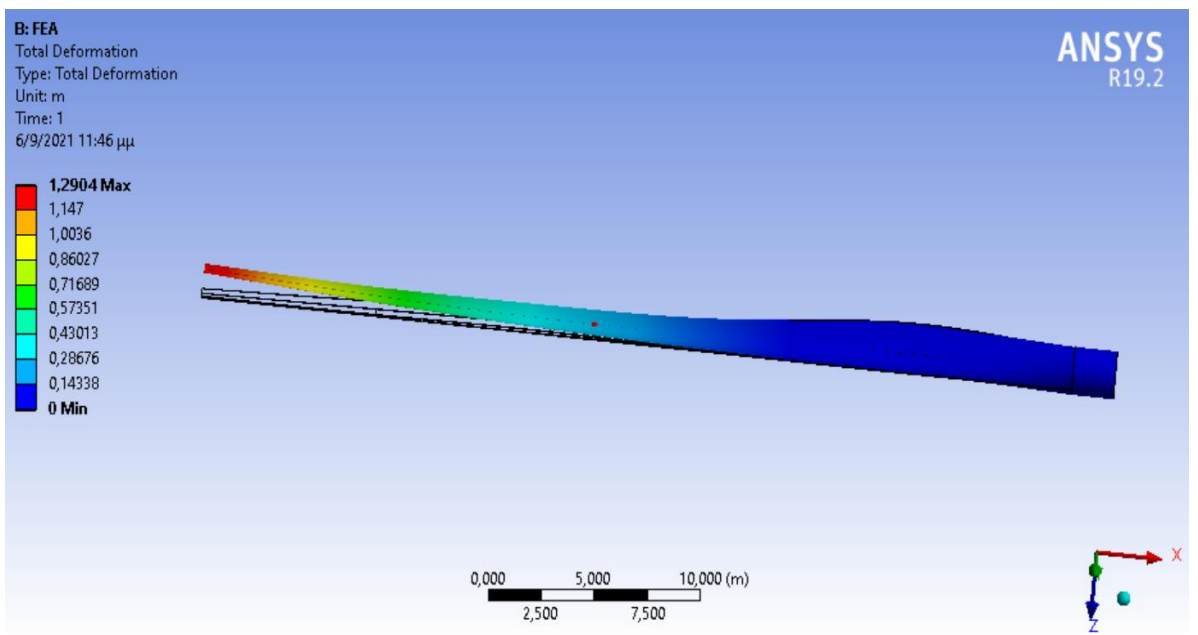
Σχήμα 5.8.5 Μετατόπιση Polyester 30% E-Glass Reinforced



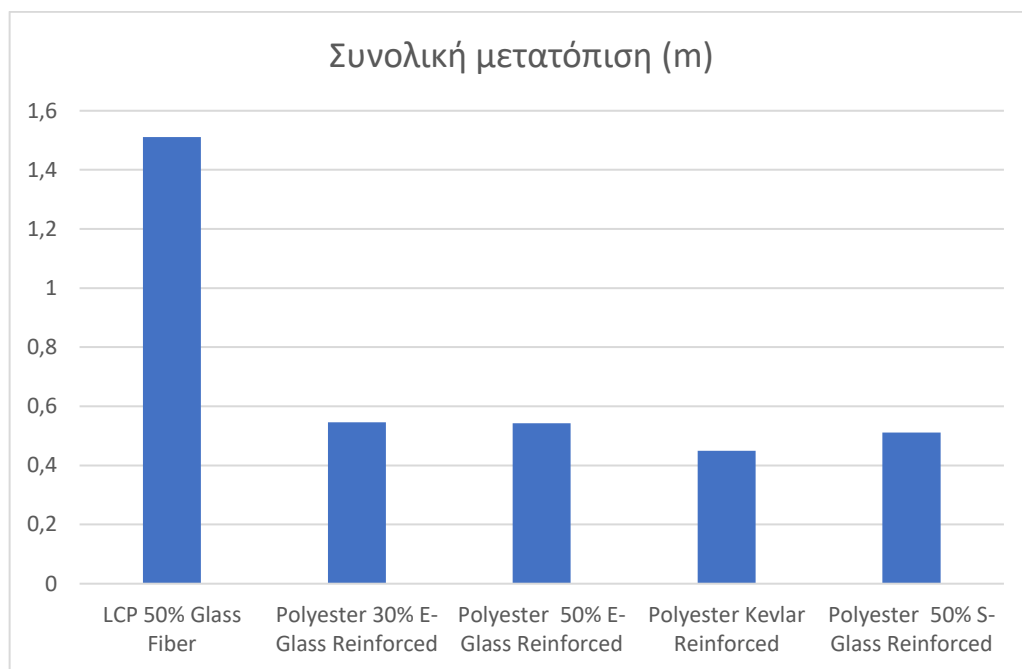
Σχήμα 5.8.6 Μετατόπιση Polyester 50% E-Glass Reinforced



Σχήμα 5.8.7 Μετατόπιση Polyester Kevlar29 Reinforced



Σχήμα 5.8.8 Μετατόπιση Polyester 50% S-Glass Reinforced

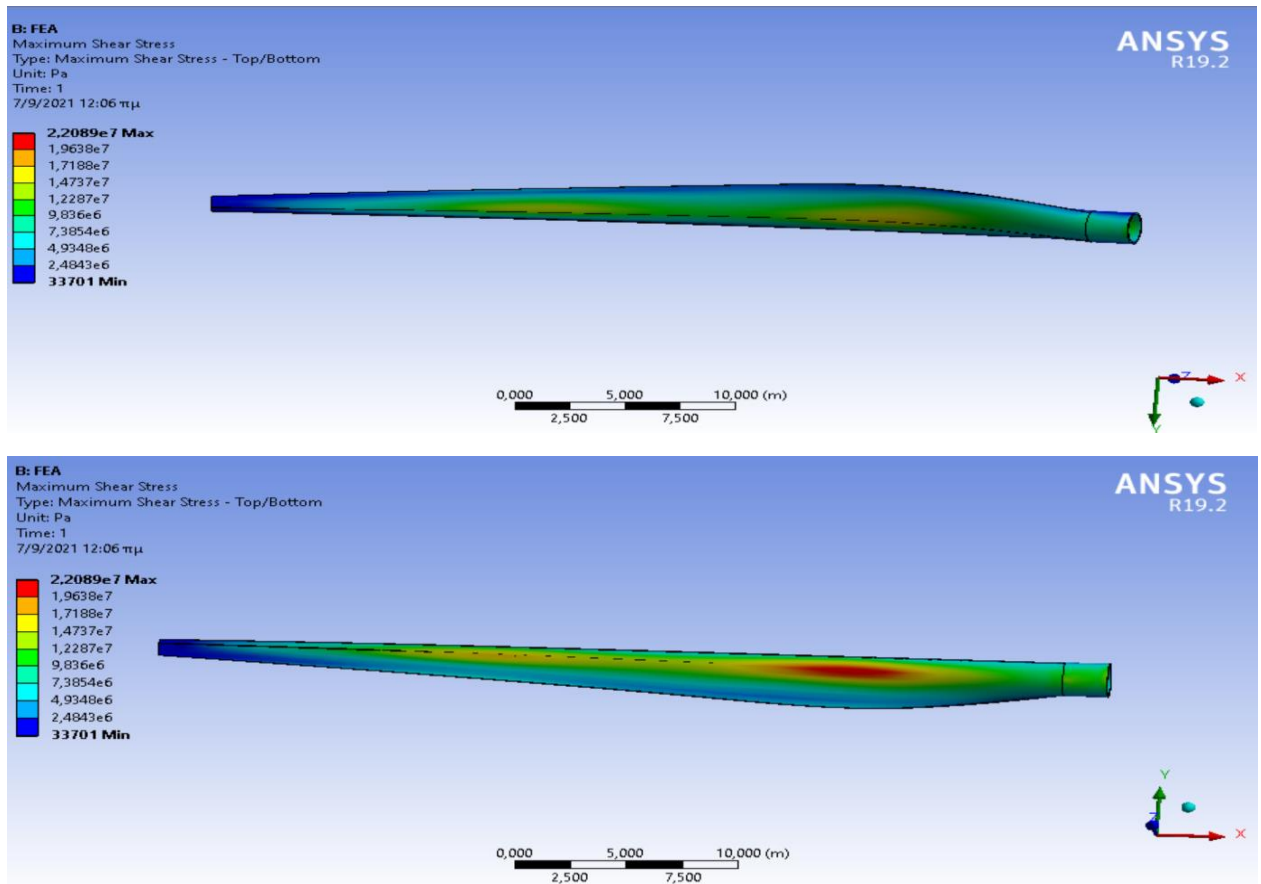


Πίνακας 5.5 Συνολική μετατόπιση για ταχύτητα 53 m/s

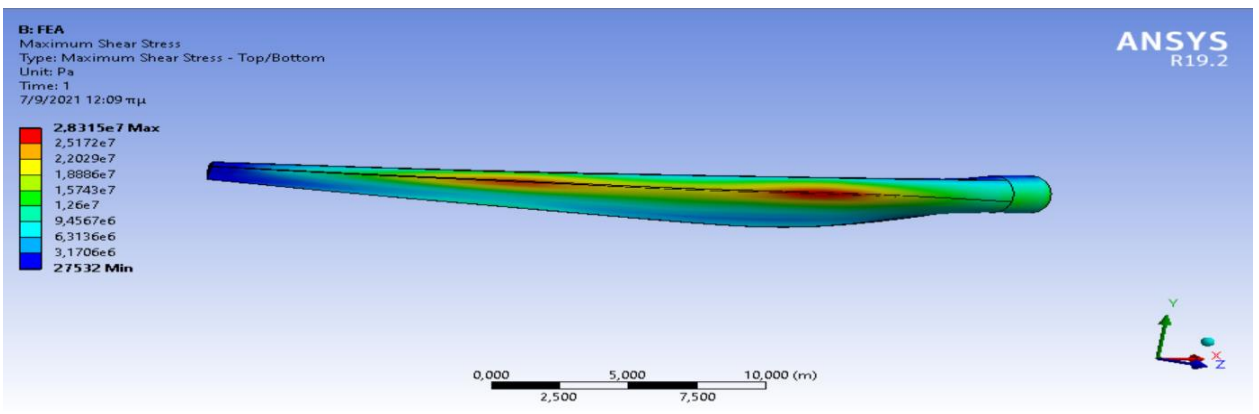
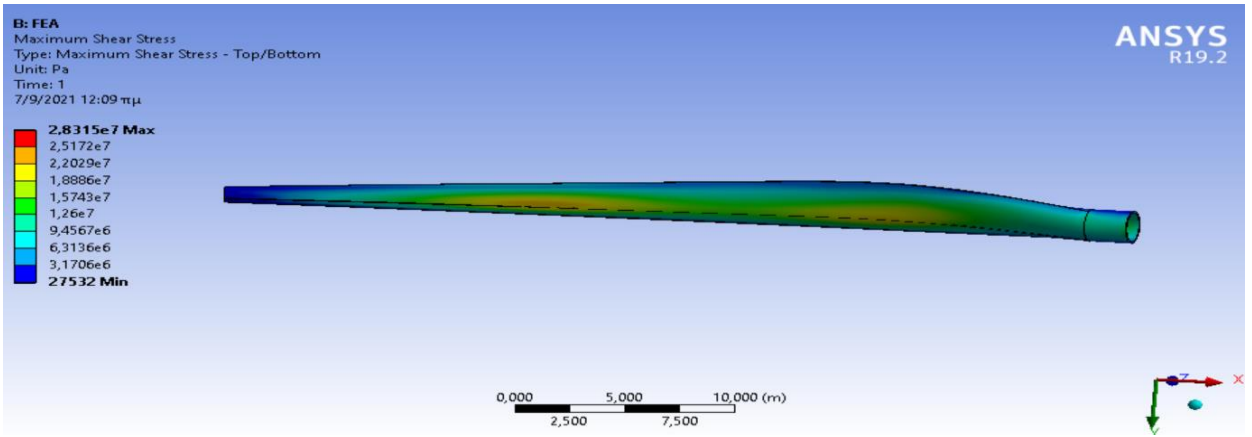
Παρατηρούμαι σε όλες τις περιπτώσεις μια αύξηση της παραμόρφωσης σχεδόν διπλάσια από τη ταχύτητα των 12 m/s.

5.8.2 Μέγιστες διατμητικές τάσεις

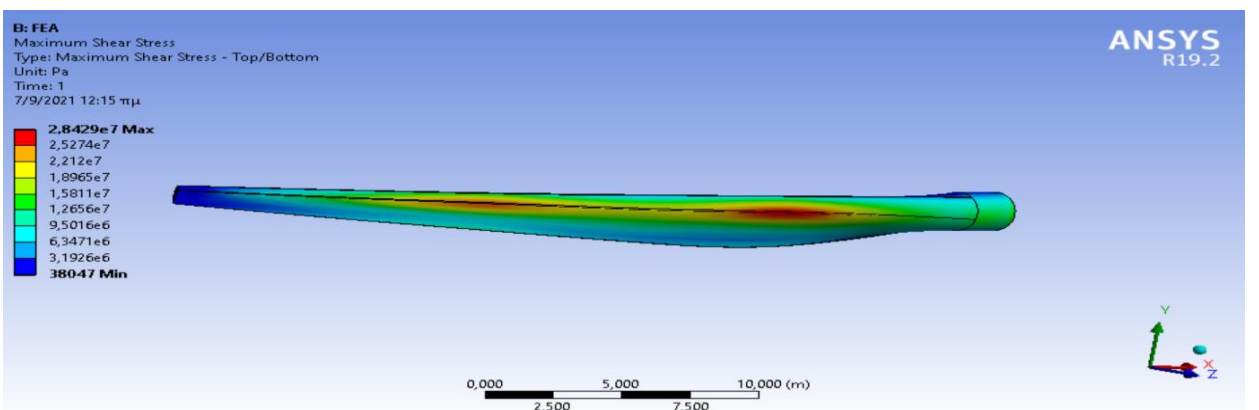
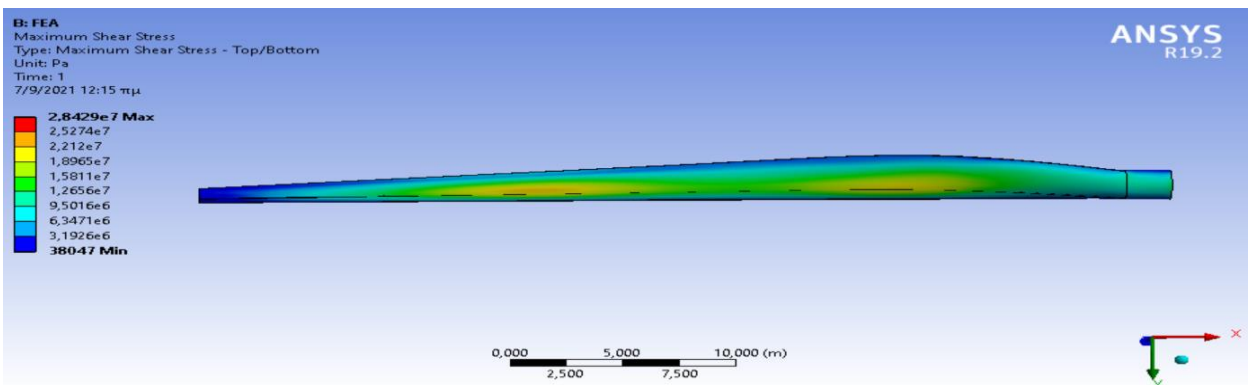
Συνεχίζουμε για την ίδια ταχύτητα 53 m/s και παρουσιάζουμε τις τάσεις πάνω στο περύγιο :



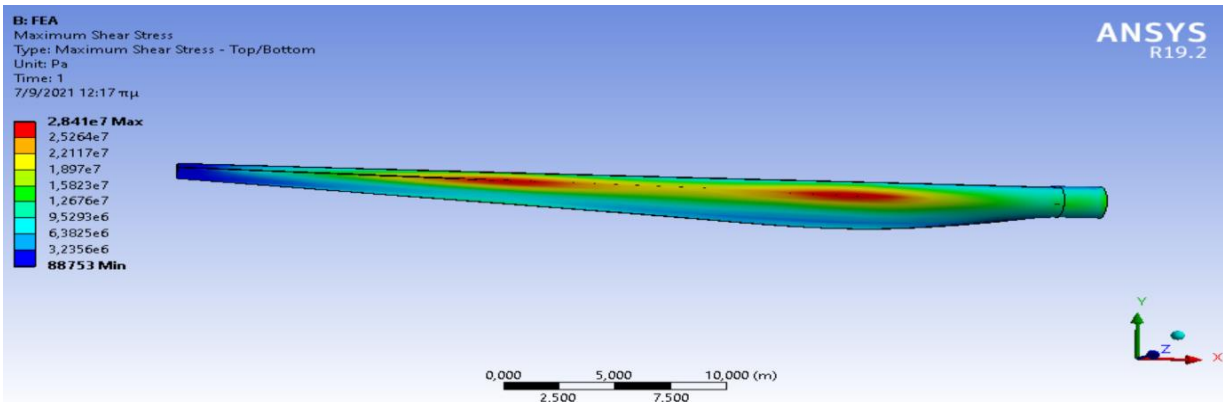
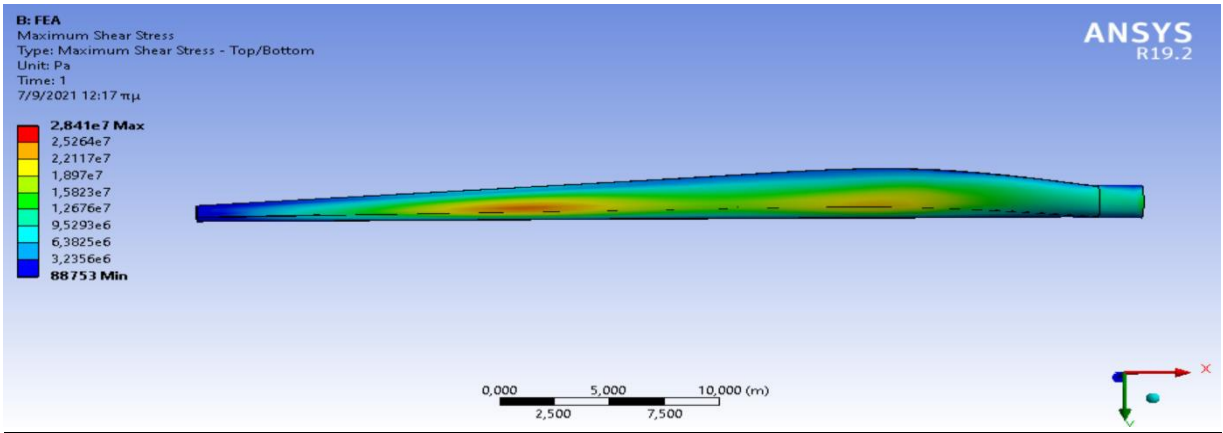
Σχήμα 5.8.9 Τάσεις για LCP 50% Glass Fiber (πίσω και μπροστά όψη)



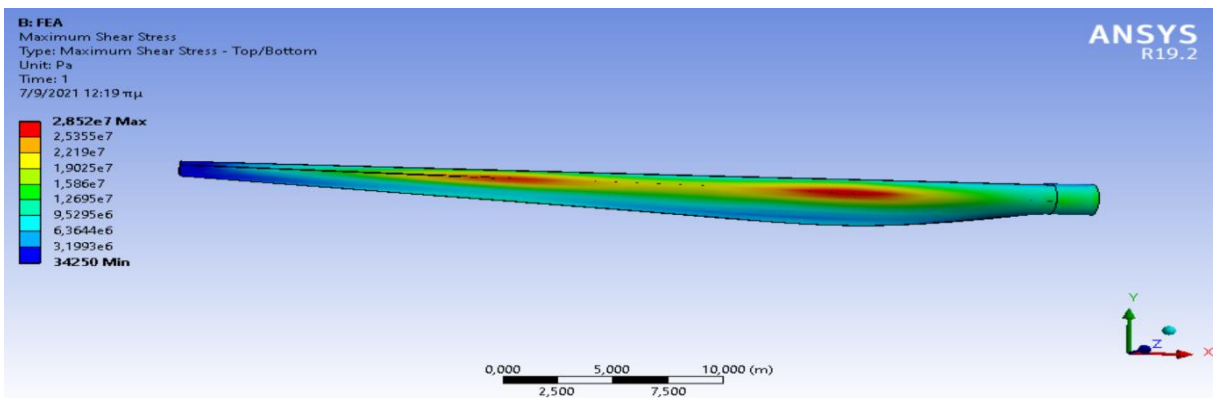
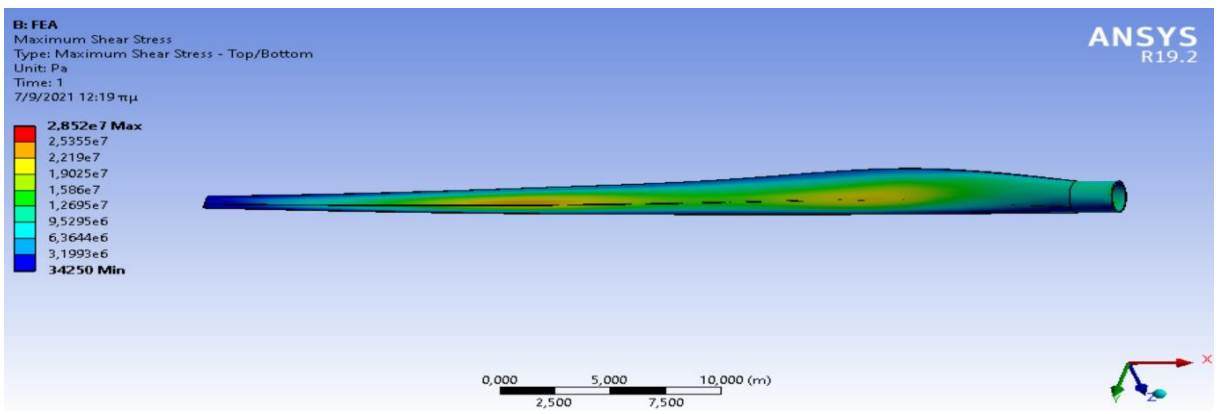
Σχήμα 5.8.10 Τάσεις για Polyester 30% E-Glass Reinforced (πίσω και μπροστά όψη)



Σχήμα 5.8.11 Τάσεις για Polyester 50% E-Glass Reinforced (πίσω και μπροστά όψη)

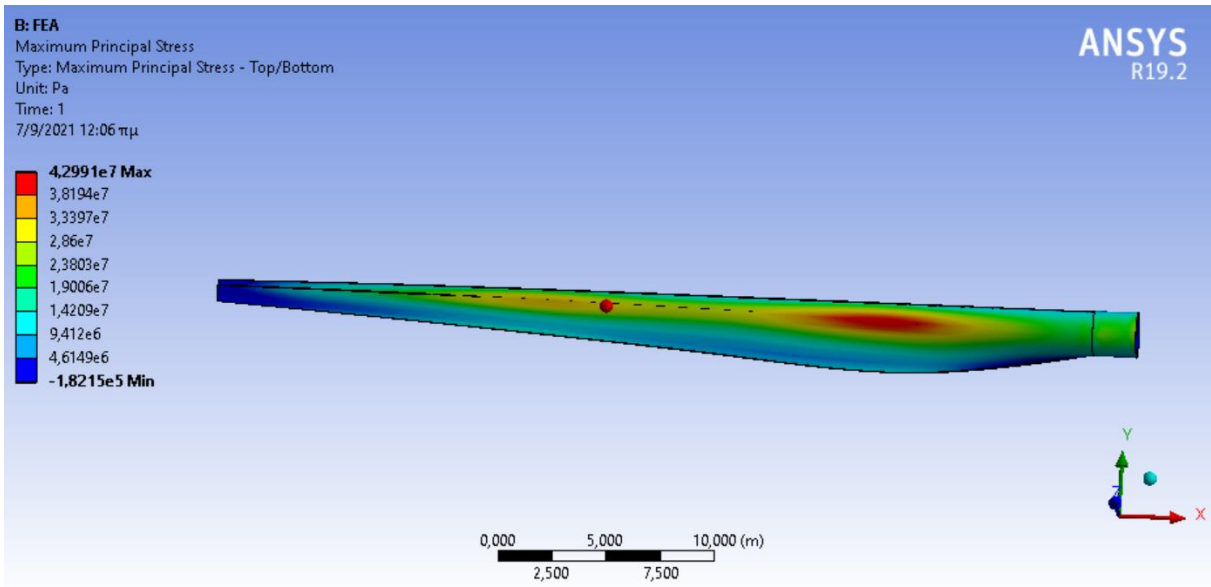


Σχήμα 5.8.12 Τάσεις για Polyester Kevlar29 Reinforced (πίσω και μπροστά όψη)

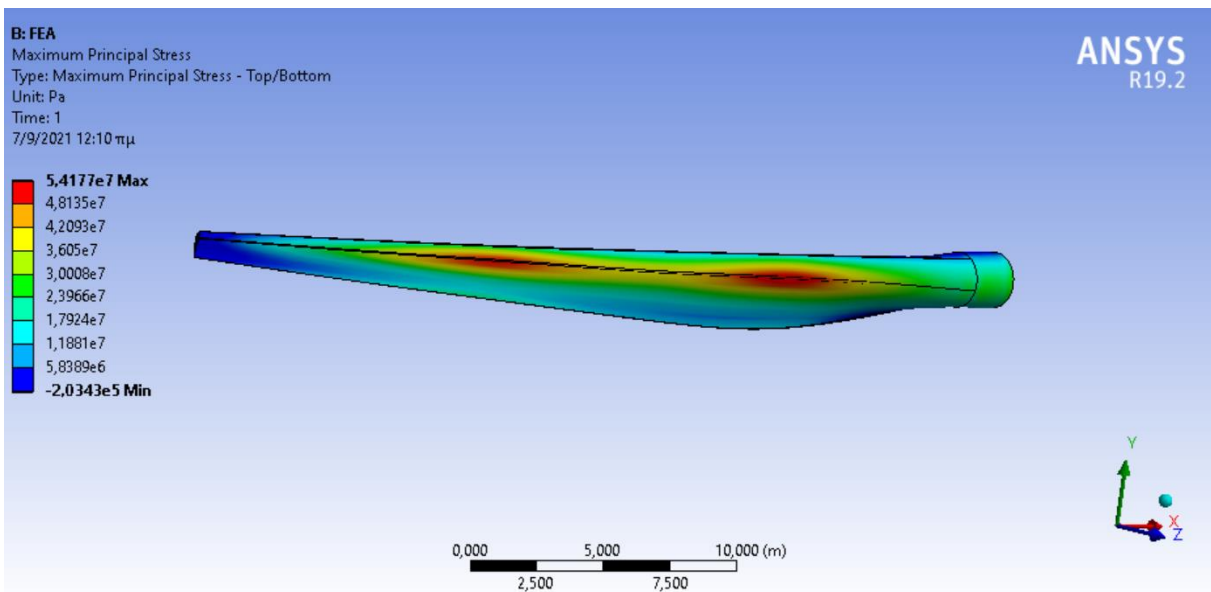


Σχήμα 5.8.13 Τάσεις για Polyester 50% S-Glass Reinforced (πίσω και μπροστά όψη)

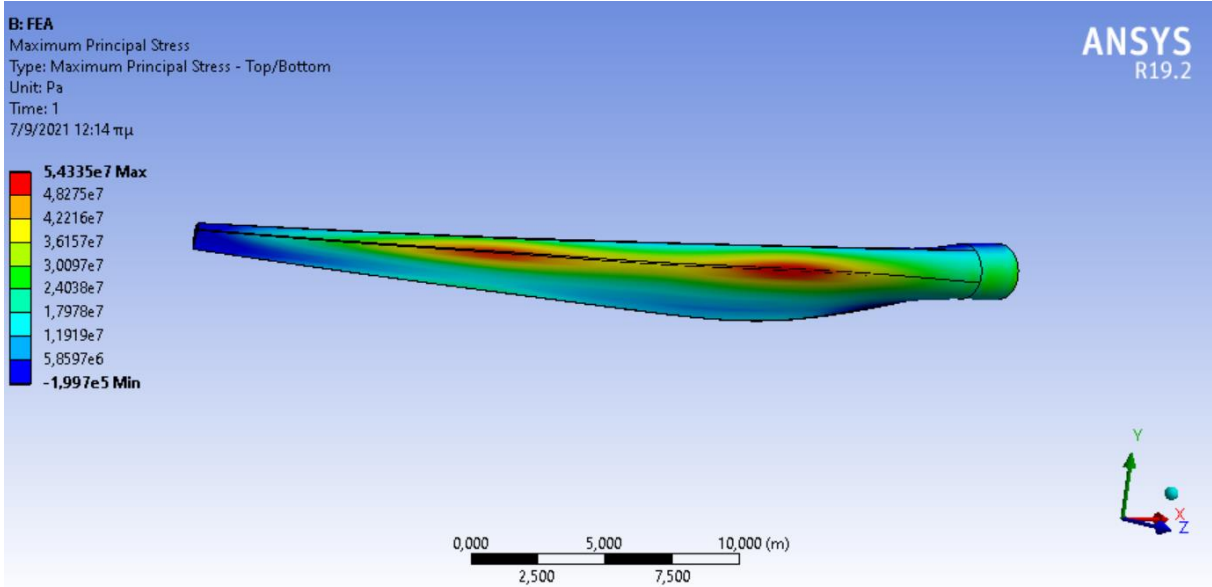
5.8.3 Μέγιστες κύριες τάσεις



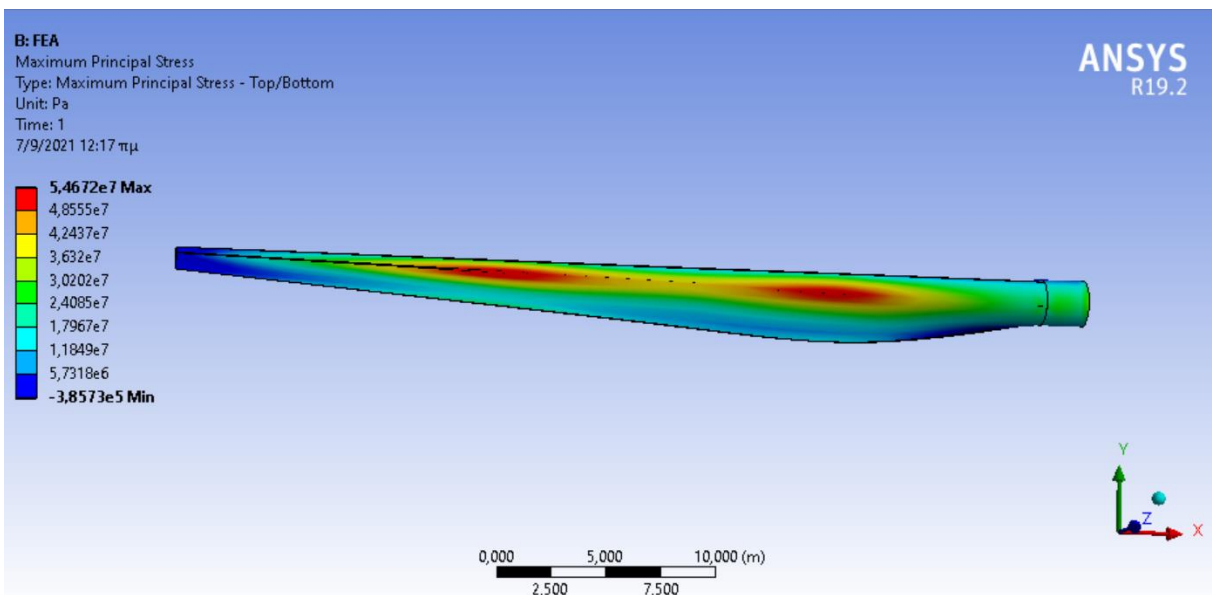
Σχήμα 5.8.14 Τάσεις για LCP 50% Glass Fiber



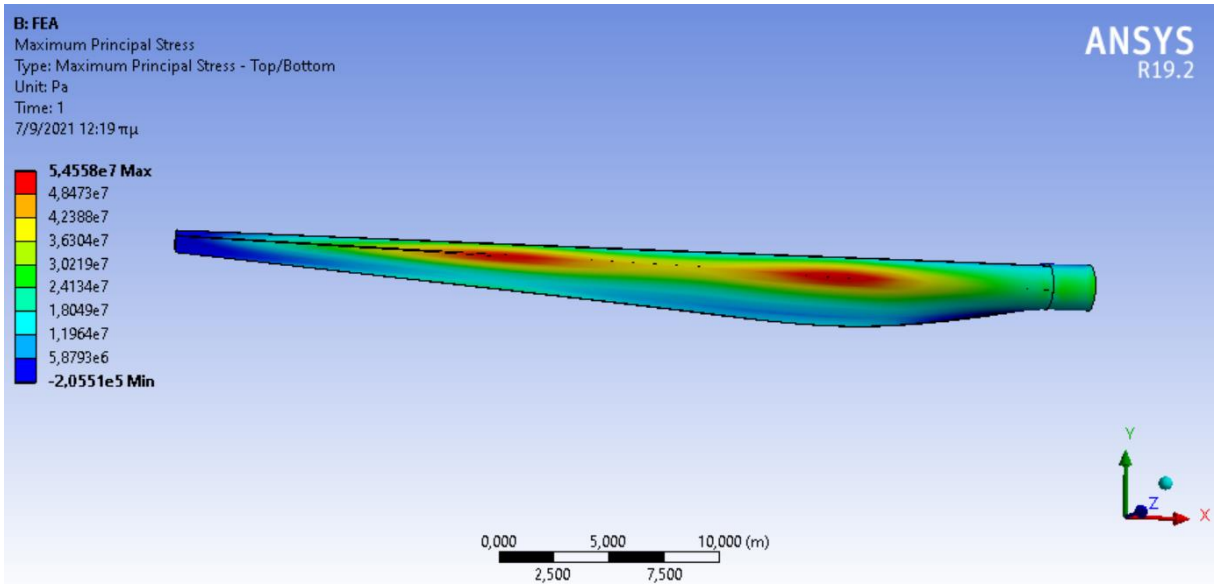
Σχήμα 5.8.15 Τάσεις για Polyester 30% E-Glass Reinforced



Σχήμα 5.8.16 Τάσεις για Polyester 50% E-Glass Reinforced



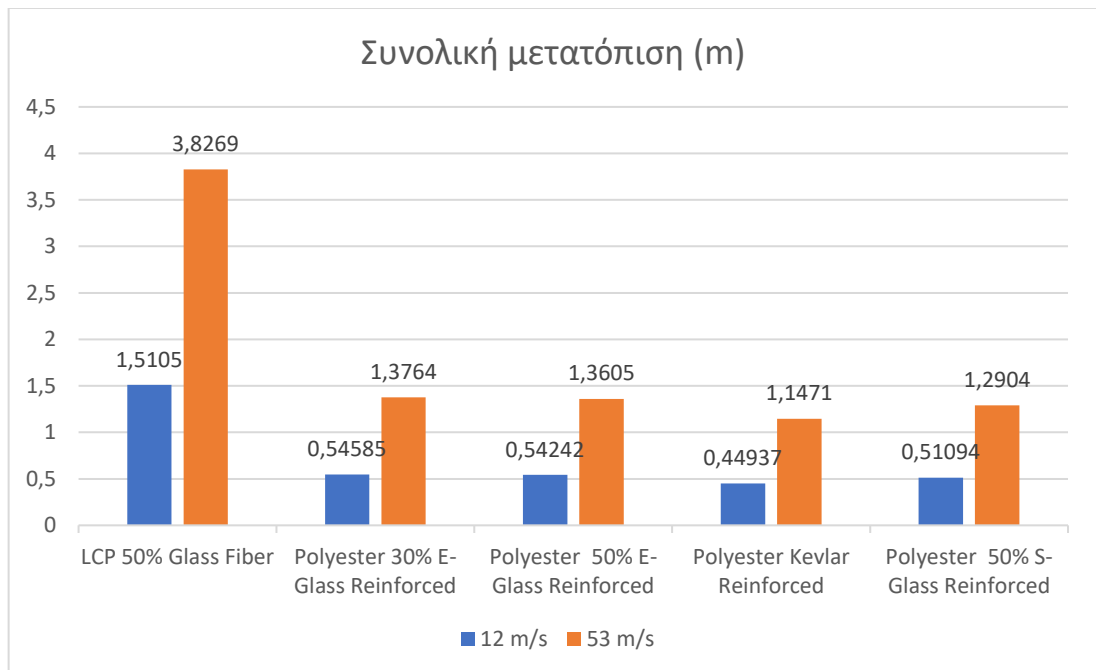
Σχήμα 5.8.17 Τάσεις για Polyester Kevlar29 Reinforced



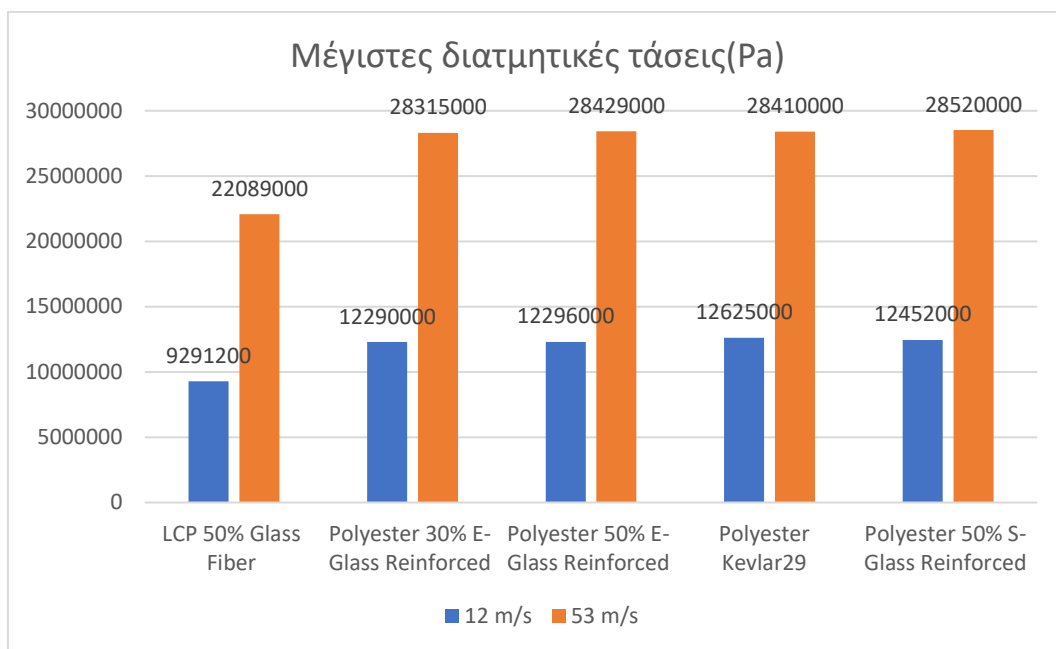
Σχήμα 5.8.18 Τάσεις για Polyester 50% S-Glass Reinforced

5.9 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΕΩΝ

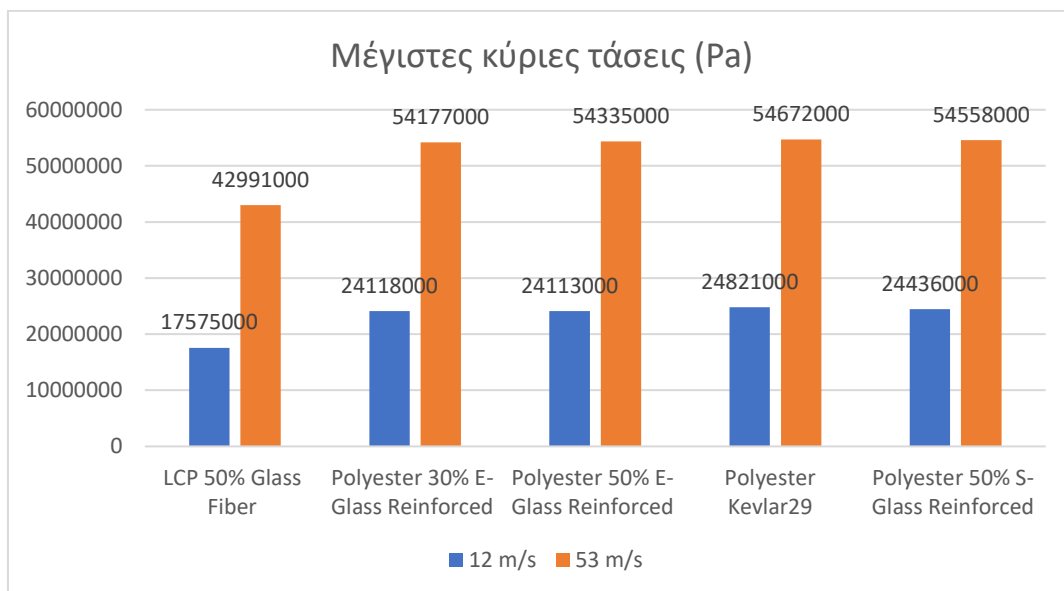
Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων για το σύνολο των υλικών και των ταχυτήτων ανέμου :



Πίνακας 5.6 Μέγιστη παραμόρφωση για όλα τα υλικά ανά ταχύτητα ανέμου.



Πίνακας 5.7 Μέγιστες διατμητικές τάσεις για όλα τα υλικά ανά ταχύτητα ανέμου



Πίνακας 5.8 Μέγιστες κύριες τάσεις για όλα τα υλικά ανά ταχύτητα ανέμου

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα εργασία έγινε μελέτη της ανεμογεννήτριας GE 1.5 XLE μέσω του προγράμματος ANSYS για τέσσερα σύνθετα υλικά (με E-Glass, S-Glass και Kevlar29 ίνες) που αφορούν τις ανεμογεννήτριες και το μέλλον τους καθώς και ένα σύνθετο υλικό που δε χρησιμοποιείται σε αυτές (LCP 50% Glass Fiber). Αρχικά έγινε ανάλυση fluent σε ταχύτητα ανέμου 12 m/s και με τον άνεμο να ασκείται από όλες τις κατευθύνσεις.

Έπειτα χρησιμοποιήθηκαν οι πιέσεις από τη ανάλυση fluent και πραγματοποιήθηκε ανάλυση των πέντε σύνθετων υλικών και σαν αποτελέσματα εξήχθησαν οι συνολικές παραμορφώσεις, οι μέγιστες διατμητικές τάσεις καθώς και οι μέγιστες κύριες τάσεις που ασκούνται πάνω στα υλικά. Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε για ταχύτητα ανέμου 53 m/s, για το λόγο ότι θεωρείται ακραία ταχύτητα ανέμου για το συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννήτριας.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι στις παραμορφώσεις ανεξάρτητα από τη ταχύτητα του ανέμου το LCP 50% Glass Fiber έχει με διαφορά τις μέγιστες μετατοπίσεις. Είναι ένα υλικό που δε χρησιμοποιείται σε πτερύγια ανεμογεννητριών και το αποτέλεσμα μας επιβεβαιώνει ότι δεν είναι κατάλληλο. Οι E-Glass ίνες παρουσιάζουν πολύ καλά αποτελέσματα και όσο αυξάνεται το ποσοστό τους έχουν ακόμα καλύτερα αλλά με μικρή διαφορά. Ακόμα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζουν οι S-Glass ίνες και το Kevlar29 παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα γι' αυτό και έχει μεγαλύτερη τιμή ,ενώ κανένα από τα εξεταζόμενα υλικά δεν αστόχησε.

Όσο αφορά τις τάσεις ,είναι σχεδόν διπλάσιες στη ταχύτητα των 53 m/s και από παραπάνω κεφάλαια (5.7.2, 5.7.3 και 5.8.2, 5.8.3) παρατηρούμαι τα σημεία στα οποία αυτές ασκούνται. Οι τιμές όλων των υλικών εκτός από το LCP 50% Glass Fiber είναι αρκετά κοντά.

Σαν υλικά που μπορούν να εφαρμοστούν στα πτερύγια θα επιλέγαμε και τα τρία με ίνες γυαλιού (Polyester 30% E-Glass Reinforced και Polyester 50% E-Glass Reinforced και Polyester 50% S-Glass Reinforced) καθώς και το ακόμα πιο αποτελεσματικό Kevlar29. Δε συνιστάται το LCP 50% Glass Fiber καθώς παρουσίασε παραμορφώσεις σχεδόν δυόμιση φορές επάνω από τα υπόλοιπα υλικά.

6.1 ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Σα συνέχεια της παρούσας εργασίας υπάρχει η δυνατότητα επιλογής και μελέτης ανισότροπων υλικών (στρεμματικών, τύπου sandwich) για την επέκταση της μελέτης σε άλλες κατηγορίες σύνθετων υλικών, με ακριβέστερη μοντελοποίηση της δομής τους μέσω μεταγενέστερων εκδόσεων του λογισμικού Ansys.

Σημαντικό θα ήταν να μελετηθούν τα υλικά ως προς τη κόπωση που εμφανίζουν και να βρεθεί η διάρκεια ζωής του συγκεκριμένου μοντέλου.

Μπορεί να εξεταστεί από τεχνοοικονομικής πλευράς το συγκεκριμένο μοντέλο ανεμογεννήτριας για κάθε ένα από τα σύνθετα υλικά και κυρίως αυτών που εμφάνισαν τις καλύτερες ιδιότητες.

Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης με τα σχετικά εργαλεία Ansys, μπορεί να γίνει υπολογισμός του βέλτιστου πάχους του κελύφους της ανεμογεννήτριας για δεδομένη ταχύτητα ανέμου.

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα εξακρίβωσης των θεωρητικών μοντέλων και η σύγκρισή τους με το πειραματικό μοντέλο.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] https://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_πηγές_ενέργειας

[2] Ιωάννης Κλεάνθης Καλδέλλης, (2005). «Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας» : Εκδόσεις Αθ.Σταμούλης

[3] Μαστοράκης Π. Μπέτζιος Γ. Καλδέλλης Ι.,1998, «Πρόταση Εγκατάστασης Υβριδικού Αιολικού-Αναστρέψιμου Υδροηλεκτρικού Συστήματος σε Νησιά του Αιγαίου» Εθνικό Συνέδριο για την Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

[4][www.\(ntua.gr\)/4D6963726F736F667420576F7264202D20D3D5CDC8C5D4C120D5CBC9CAC12E646F63](http://www.(ntua.gr)/4D6963726F736F667420576F7264202D20D3D5CDC8C5D4C120D5CBC9CAC12E646F63) Ανακτήθηκε 5 Μαΐου 2021

[5] Rujicic M, Arakere G, Subramanian E, Sellappan V, Vallejo A, Ozen M., “Structural Response Analysis, Fatigue–Life Prediction, and Material Selection for 1MW Horizontal-Axis Wind Turbine Blades”, Journal of Materials Engineering and Performance, 19: 790–801

[6] Materials Science and Engineering an Introduction (EIGHTH EDITION) by William D. Callister, Jr & David G. Rethwisch

[7] Ricardo Emanuel da Rocha Teixeira. 'Fatigue Analysis of Wind Turbine Blades', Porto, July 2014

[8] Herbert J. Sutherland and Paul S. Veers. Fatigue case study and reliability analyses for wind turbines.

[9] Branner, Kim: Ghadirian, Amin. Database about blade faults. 2014

[10] Προβατίδης, Χ., & Αντωνιάδης, Ι. (2004). «Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές». Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

[11]<https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/ANSYS+Learning+Modules> Ανακτήθηκε 10 Ιανουαρίου 2021

[12]<https://geosci.uchicago.edu/~moyer/GEOS24705/Readings/GEA14954C15-MW-Broch.pdf> Ανακτήθηκε 10 Ιανουαρίου 2021

[13]<https://haikalfouzi.com/2020/05/15/Wind-Turbine-CFD-&-FEA-Analysis.htm> Ανακτήθηκε 10 Ιανουαρίου 2021

- [14]https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/139561162/materials_10_01285.pdf Ανακτήθηκε 22 Ιουλίου 2021
- [15]https://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf Ανακτήθηκε 22 Ιουλίου 2021
- [16]<https://www.lookpolymers.com/pdf/Overview-of-materials-for-Liquid-Crystal-Polymer-LCP-50-Glass-Fiber-Filled.pdf> Ανακτήθηκε 3 Αυγούστου 2021
- [17]<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/kevlar> Ανακτήθηκε 22 Ιουλίου 2021
- [18]<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5706232/> Ανακτήθηκε 3 Αυγούστου 2021
- [19] <http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html> Ανακτήθηκε 10 Αυγούστου 2021
- [20] Νικόλαος Μπιλαλης, Εμμανουήλ Μαραβελάκης, «Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση» Εκδόσεις Κριτική
- [21] Πασχαλάκης Κ. Γκότσης, «Πεπερασμένα Στοιχεία », (2018) Εκδόσεις Ζήτη
- [22] Προβατίδης, Χ., & Καναράχος, Α. (2000). «Πεπερασμένα Στοιχεία στη Μηχανολογία», Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

[23] ANSYS. (n.d.) (ANSYS) Ανάκτηση από www.ansys.com

[24] IEC 61400-23 Wind Turbine-Part 23: Full-Scale Structural Testing of Rotor Blades. IEC; Geneva, Switzerland: 2014. Edition 1.0, 2014-04-08, TC/SC 88. [Google Scholar]

[25] Παντελής, Δ. Ι. (2008 Μη μεταλλικά Τεχνικά Υλικά. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου