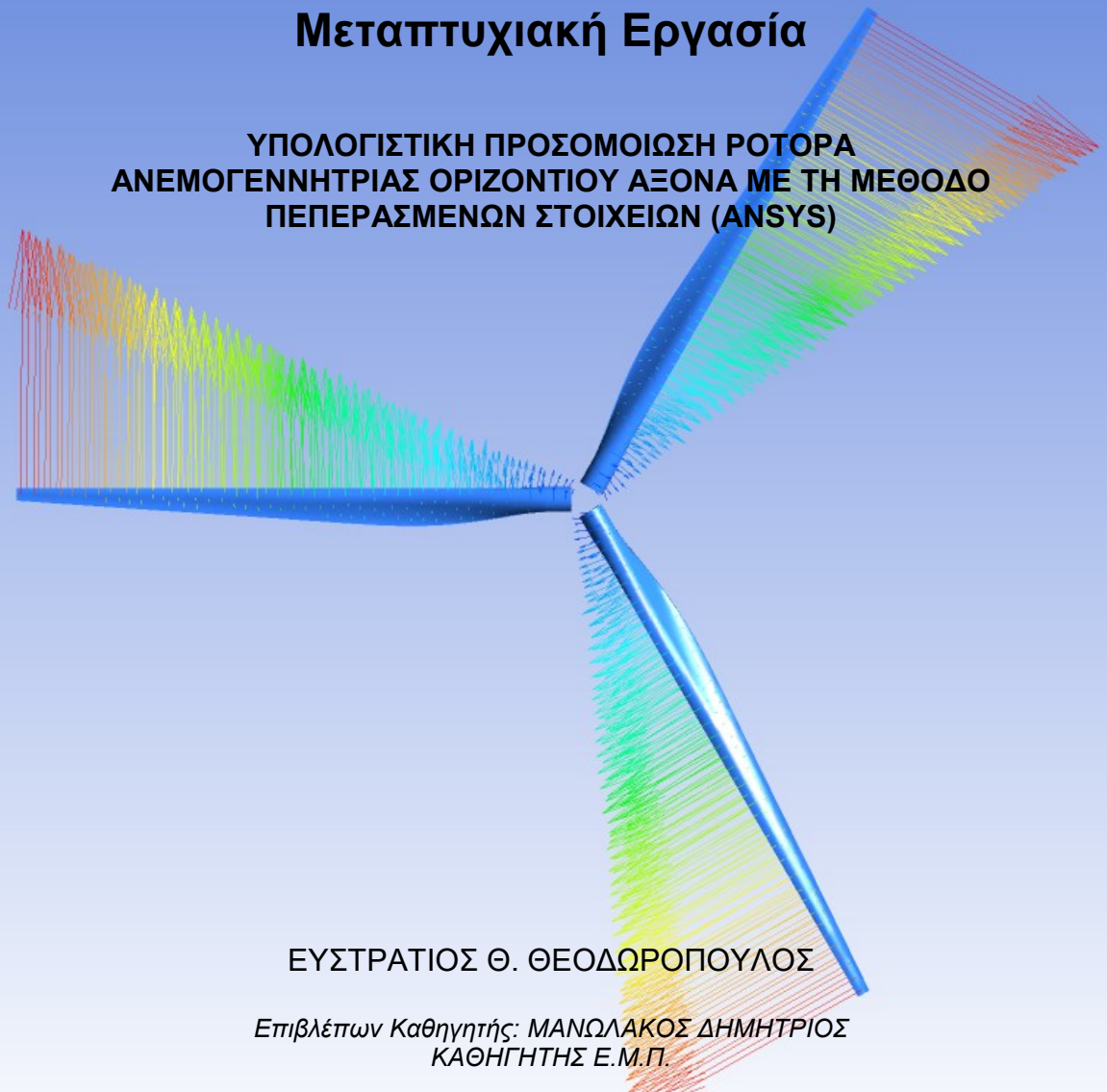




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

## Μεταπτυχιακή Εργασία

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΤΟΡΑ  
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ  
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (ANSYS)



ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ Θ. ΘΕΟΔΩΡΟΠΟΥΛΟΣ

*Επιβλέπων Καθηγητής: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.*

ΑΘΗΝΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2018

# Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση μοντέλου ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα σε συνθήκες ανέμου και η προσομοίωση της επίδρασης των παραγόμενων πεδίων πιέσεων στη κατασκευή με χρήση σύνθετων υλικών, με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων και των πεπερασμένων στοιχείων για κάθε περίπτωση. Όλα τα παραπάνω επιτεύχθηκαν με τη χρήση του πακέτου λογισμικού Ansys 17. Πολλά στοιχεία των προσομοιώσεων λήφθηκαν από βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στις τελευταίες εξελίξεις παρόμοιων τεχνολογικών θεμάτων.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη χρήση της αιολικής ενέργειας και την ιστορική εξέλιξη των μεθόδων αξιοποίησής της καθώς και περιγραφή των σύγχρονων τύπων ανεμογεννητριών.

Στο 2ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ανεμολογική ανάλυση, τη θεωρία περυύγωσης, τη διμή των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα και άλλων χαρακτηριστικών μεγεθών για την παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται τα σύνθετα υλικά, οι κατηγορίες του, οι ιδιότητες τους, η μηχανική τους συμπεριφορά, ο τρόπος κατασκευής τους όπως και διάφορες χρήσεις τους. Στο 4ο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην επιστήμη της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής και την ιστορική της εξέλιξη, και στα υπολογιστικά μοντέλα τύρβης που αξιοποιούνται από τα εμπορικά λογισμικά.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του μοντέλου της Α/Γ, της υπολογιστικής διάταξης που αξιοποιήθηκε όπως και των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα μελέτη. Γίνεται επίσης περιγραφή των συνθηκών των προσομοιώσεων ταχυτήτων ανέμου για την CFD προσομοίωση και τη γένεση των πεδίων πιέσεων που ασκούνται στην επιφάνεια της Α/Γ και γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για την κάθε περίπτωση ταχύτητας ανέμου. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της επίδρασής τους στο μηχανικό μοντέλο της Α/Γ για ένα σύνολο ιδιοτήτων υλικών με σκοπό την εύρεση των καταλληλότερων εξ αυτών για την κατασκευή της Α/Γ.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρατίθενται συγκεντρωτικοί πίνακες των αποτελεσμάτων για τη συνολική παραμόρφωση της κατασκευής για κάθε εξεταζόμενο υλικό και αναλύονται τα συμπεράσματα των διαφορετικών συνόλων προσομοιώσεων και η συσχέτισή τους.

Τέλος, στα παραρτήματα της εργασίας, περιγράφονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνησή της.

Λέξεις-κλειδιά: ανεμογεννήτρια, πεδία πίεσης, σύνθετα υλικά, πεπερασμένα στοιχεία, υπολογιστική ρευστομηχανική, μηχανική ανάλυση.

# Abstract

The aim of this diploma thesis is to simulate a wind turbine model in wind conditions and to simulate the effect of the generated pressure fields on the structure using composite materials, the finite volume method and the finite elements for each case. All of the above was achieved using the Ansys 17 software package. Many elements of the simulations were taken from a bibliographic review of the latest developments of similar technological issues.

The first chapter refers to the use of wind energy and the historical evolution of its utilization methods, as well as a description of modern types of wind turbines.

In the second chapter we refer to the wind analysis, the wing theory, the dimension of the horizontal axis wind turbines and other characteristic sizes for the generation of wind energy.

The third chapter describes the composite materials, their categories, their properties, their mechanical behavior, the way of their construction and their various uses.

In the 4th chapter, reference is made to the science of Computational Fluid Mechanics and its historical evolution, and to the computed models of turbine exploited by commercial software.

In the 5th chapter we describe the model of the W / C, the computational device used as well as the software used for the present study. A description of the conditions of the wind speed simulations for CFD simulation and the generation of the pressure fields exerted on the surface of the wind turbine is also presented and the results of each wind speed are presented. Then the results of these simulations are used to simulate their effect on the mechanical model of the W / A for a set of material properties in order to find the most suitable ones for the construction of the W / C.

In Chapter 6, aggregate tables of results are presented for the overall deformation of the structure for each material under consideration, and the conclusions of the different sets of simulations and their correlation are analyzed.

Finally, in the annexes of the paper, the materials used are described and the bibliography used for its elaboration is presented.

Keywords: wind turbine, HAWT, pressure fields, composite materials, finite elements, computational fluid mechanics, mechanical analysis.

Κι ένα τέταρτο μητέρας,  
Αρκεί για δέκα γνές.

Οδυγέας Ελίσης

Στη μητέρα μου Δέσποινα...

# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Συστήματα Αυτοματισμού» του Ε.Μ.Π., στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για τις πολύτιμες και ουσιαστικές συμβουλές του κατά τη διάρκεια της μελέτης και τη διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση σε κάθε μου εγχείρημα.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2018  
Ευστράτιος Θ. Θεοδωρόπουλος  
Διπλ. Μηχανολόγος Μηχανικός

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract.....	4
Πρόλογος.....	6
Περιεχόμενα.....	7
Κατάλογος Σχημάτων .....	10
Κατάλογος Πινάκων.....	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....</b>	<b>14</b>
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	14
1.1.1 Προέλευση του ανέμου .....	15
1.1.2 Ιστορική αναδρομή.....	16
1.2 Αιολική ενέργεια και εφαρμογές αυτής.....	18
1.3. Εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας- εφαρμογές ανεμοκινητήρων .....	20
1.3.1. Παρούσα κατάσταση και προοπτικές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα .....	20
1.3.2. Σύγχρονες εφαρμογές των ανεμοκινητήρων .....	22
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....</b>	<b>23</b>
2.1. Ανεμολογικά στοιχεία .....	23
2.1.1. Κατανομή ταχύτητας ανέμου .....	23
2.1.2. Ισχύς του ανέμου .....	25
2.1.3. Μέγιστη θεωρητική τιμή του συντελεστή ισχύος $C_p$ .....	26
2.1.4. Άντωση και Αντίσταση .....	29
2.1.5. Θεωρία πτερύγωσης.....	31
2.1.6. Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου .....	33
2.1.7. Συντελεστής $C_p$ και ταχύτητα του ανέμου .....	34
2.1.8. Μέγιστος συντελεστής $C_p$ .....	35
2.1.9. Μέγιστη παραγόμενη ενέργεια .....	36
2.2 Συστήματα αιολικής ενέργειας.....	38
2.2.1 Ανεμογεννήτριες.....	38
2.2.2 Δομή ανεμογεννήτριας .....	38
2.2.3 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών.....	43

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....</b>	<b>45</b>
3.1 Γενικά.....	45
3.2 ΕΙΔΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	45
3.3 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ (FIBROUS COMPOSITES)	46
3.3.1 Ταξινόνηση συνθέτων υλικών με ενίσχυση ινών.....	46
3.3.2 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ: ΜΗΤΡΕΣ....	53
3.3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗΤΡΑΣ.....	56
3.3.4 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ..	60
3.3.5 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ .....	69
3.4 ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ SANDWICH ΥΛΙΚΑ (MULTILAYERS AND SANDWICH MATERIALS).....	73
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ.....</b>	<b>75</b>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	75
4.2 Το μοντέλο τύρβης Shear-Stress Transport (SST) k- $\omega$ .....	75
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΤΟΡΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΕΜΟΥ.....</b>	<b>82</b>
5.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	82
5.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΑΚΕΤΑ.....	83
5.2.1 Πακέτο Λογισμικού ANSYS WORKBENCH 17.....	83
5.2.2 Σχεδιαστικό Πακέτο Solidworks 2016.....	86
5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	87
5.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.....	87
5.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	89
5.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ANSYS FLUENT.....	90
5.6.1 Μαθηματικό μοντέλο.....	90
5.6.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ANSYS DESIGN MODELER....	93
5.6.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΟΓΚΩΝ ΡΕΥΣΤΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (CFD).....	95
5.6.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ANSYS FLUENT.....	99
5.6.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ANSYS FLUENT.....	103
5.6.6 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΟΥ MODULE ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	107
5.6.7 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	107



<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>111</b>
6.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	111
6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ .....	122
6.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	123
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ .....</b>	<b>125</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>128</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα: 1.1:Διάγραμμα Συνολικής εγκαταστημένης αιολικής ενέργειας σε MW .....	17
Σχήμα: 1.2:Διάγραμμα Συνολικής εγκαταστημένης ισχύος ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα.....	18
Σχήμα: 1.3:Τοπική διάταξη μετατροπής αιολικής ενέργειας .....	20
Σχήμα: 1.4:Χάρτης αιολικού δυναμικού Ελλάδας.....	20
Σχήμα: 1.5:Προοπτικές εκμετάλλευσης ΑΠΕ μέχρι το 2020.....	21
Σχήμα: 2.1:Κατανομή Rayleigh .....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα: 2.2:Σωλήνας ροής της ανεμογεννήτριας. ....	26
Σχήμα: 2.3:Διάγραμμα των δυνάμεων που εμφανίζονται κατά την προσβολή μιας27	
Σχήμα: 2.4:Ανατομή ενός πτερυγίου .....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα: 2.5:Διάγραμμα του συντελεστή ισχύος $C_p$ συναρτήσει του λόγου ταχύτητας .....	34
Σχήμα: 2.6:Διάγραμμα του συντελεστή ισχύος $C_p$ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου .....	35
Σχήμα: 2.7:Διάγραμμα του λόγου ακροπτερυγίου $\lambda$ με το συντελεστή ισχύος $C_{P36}$	
Σχήμα 3 1:Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού. (Παντελής, 2008) .....	49
Σχήμα: 3.2: Ιδιότητες ινών άνθρακα .....	50
Σχήμα: 3.3: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα. (Παντελής, 2008).....	51
Σχήμα: 3.4:α) Καμπύλες εφελκυσμού χαρακτηριστικών τύπων ενισχυτικών ινών. (β) Σύγκριση διαφόρων ινών ως προς την ειδική αντοχή και την ειδική ακαμψία τους. ( <a href="http://courseware.mech.ntua.gr">http://courseware.mech.ntua.gr</a> ) .....	58
Σχήμα 3.5: Περιοχές ειδικής αντοχής και ειδικού μέτρου ελαστικότητας χαρακτηριστικών τύπων συνθέτων υλικών με ενίσχυση ινών. (Παντελής, 2008) ...	60
Σχήμα: 3.6(α) Όλκιμη μήτρα ενισχυμένη με ασυνεχή ίνα μήκους $2l$ , υπόκειται σε εφελκυσμό. (β) Κατανομή των αξονικών τάσεων στην ίνα και των διατμητικών τάσεων στην περιοχή της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας. (γ) Ισορροπία δυνάμεων σε στοιχειώδες τμήμα $dx$ ίνας $\mu$ (Παντελής, 2008).....	62
Σχήμα: 3.7 Μηχανισμοί αύξησης της δυσθραυστότητας σε σύνθετο με ενίσχυση ινών: (α) Τοξοειδής κύρτωση μετώπου ρωγμής. (β) Απόκλιση ρωγμής. (γ) Αποσύνδεση ινών από τη μήτρα. (δ) Εκρίζωση ινών. (ε) Γεφύρωση ίνας. (Παντελής, 2008) .....	69
Σχήμα: 3.8 Αντοχή σε κυκλική κόπωση διάφορων σύνθετων υλικών. (Παντελής, 2008) .....	69

Σχήμα: 3.9 Επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών ενίσχυσης στο ρυθμό φθοράς του σύνθετου υλικού. (Παντελής, 2008) .....	70
Σχήμα: 3.10 Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτων: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση με θάλαμο πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι. (Παντελής, 2008) ....	72
Σχήμα: 3.11 Κατασκευή σύνθετου υλικού με τη μέθοδο περιτύλιξης νήματος. (Παντελής, 2008) .....	73
Σχήμα: 3.12 Κατασκευή σύνθετου υλικού με τη μέθοδο της συνεχούς μορφοποίησης ελάσματος. (Παντελής, 2008).....	74
Σχήμα: 3.13 Κατασκευή σύνθετου υλικού με τη μέθοδο της μορφοποίησης με εμβάπτιση. (Παντελής, 2008).....	74
Σχήμα 5.1: Παράδειγμα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στο ANSYS (εξαεδρικά στοιχεία) ( <a href="http://www.ansys.com">http://www.ansys.com</a> ).....	85
Σχήμα 5.2: Παράδειγμα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στο ANSYS (ευέλικτος έλεγχος μεγέθους στοιχείου) ( <a href="http://www.ansys.com">http://www.ansys.com</a> ) .....	86
Σχήμα 5.3: Απεικόνιση προσομοίωσης μοντέλου σε θλιπτικά φορτία με χρήση του Ansys Static Structural. ( <a href="http://www.ansys.com">http://www.ansys.com</a> ).....	87
Σχήμα 5.4: Ο σχεδιασμός του πτερυγίου στο Solidworks 2016 .....	88
Σχήμα 5.5: Αεροτομές πτερυγίου της NREL .....	90
Σχήμα 5.6: Μοντέλο προς υπολογιστική προσομοίωση .....	95
Σχήμα 5.7: Μοντέλο προς μηχανική ανάλυση .....	96Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 5.8: Το πλέγμα των πεπερασμένων όγκων που δημιουργήθηκε.....	97
Σχήμα 5.9: Skewness of mesh .....	99
Σχήμα 5.10: Orthogonal Quality of Mesh .....	99
Σχήμα 5.12: Διαμόρφωση αρχικών επιλογών προσομοίωσης.....	100
Σχήμα 5.11: Στατιστικά στοιχείων πλέγματος .....	100
Σχήμα 5.13: Ρύθμιση παραμέτρων .....	101
Σχήμα 5.14: Αρχικοποίηση της επίλυσης.....	103
Σχήμα: 5.15 Σύγκλιση της υπολογιστικής προσομοίωσης για ταχύτητα 50 m/s ...	104
Σχήμα: 5.16 Ταχύτητα του πτερυγίου για την προσομοίωση στα 12 m/s (CFD-Post) .....	104
Σχήμα: 5.17 Επιτυχία ικανοποιητικής προσομοίωσης με έλεγχο της στατικής πίεσης πάνω στο πτερύγιο .....	105

Σχήμα: 5.18 Πεδία πιέσεων στην πίσω πλευρά του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 12 m/s (CFD-Post) .....	105
Σχήμα: 5.19 Volume Rendering του πεδίου πίεσης στην περιοχή fluid_domain_inner σε τομή κατά του επιπέδου YZ στο ενδιάμεσο της ακτίνας του πτερυγίου της Α/Γ για ταχύτητα 12 m/s (CFD-Post) .....	106
Σχήμα: 5.20 Πεδία πιέσεων στην μπροστινή πλευρά του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 12 m/s (CFD-Post).....	106
Σχήμα: 5.21 Ροϊκές γραμμές του ροϊκού πεδίου εντός του όγκου ελέγχου του ρευστού για ταχύτητα 12 m/s (CFD-Post).....	107
Σχήμα: 5.22 Σύγκριση του πεδίου πίεσης με το διάνυσμα της ταχύτητας στην περιοχή γύρω από το πτερύγιο, σε τομή κατά του επιπέδου YZ στο ενδιάμεσο της ακτίνας του πτερυγίου της Α/Γ για ταχύτητα 12 m/s (CFD-Post).....	107
Σχήμα: 5.23 Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικών της ανάλυσης .....	108
Σχήμα: 5.24: Επίλυση της μηχανικής ανάλυσης .....	111
Σχήμα: 6.1: Ολική Παραμόρφωση GFRP 30% SMC, 12m/s.....	112
Σχήμα: 6.2: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% SMC, 12m/s.....	112
Σχήμα: 6.3: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% Woven Roving, 12m/s .....	113
Σχήμα: 6.4: Ολική Παραμόρφωση GFRP 30% SMC, 20m/s.....	113
Σχήμα: 6.5: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% Woven Roving, 20m/s .....	114
Σχήμα: 6.6: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% SMC, 20m/s.....	114
Σχήμα: 6.7: Ολική Παραμόρφωση GFRP 30% SMC, 50m/s.....	115
Σχήμα: 6.8: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% SMC, 50m/s.....	115
Σχήμα: 6.9: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% Woven Roving, 50m/s .....	116
Σχήμα: 6.10: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 30% SMC, 12 m/s.....	116
Σχήμα: 6.11: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 50% SMC, 12 m/s.....	117
Σχήμα: 6.12: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 50% Woven Roving, 12 m/s.....	117
Σχήμα: 6.13: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 30% SMC, 20 m/s.....	118
Σχήμα: 6.14: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 50% SMC, 20 m/s.....	118
Σχήμα: 6.15: Ισοδύναμη Τάση GFRP 50% Woven Roving, 20m/s .....	119
Σχήμα: 6.16: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 30% SMC, 50 m/s.....	119
Σχήμα: 6.17: Ισοδύναμη Τάση GFRP 50% Woven Roving, 50m/s .....	120

Σχήμα: 6.18: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 50% SMC, 50 m/s.....	120
Σχήμα: 6.19 Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης παραμόρφωσης για όλες τις ταχύτητες προσομοίωσης και για τα τρία υλικά .....	121
Σχήμα: 6.20 Συγκριτικό διάγραμμα ισοδύναμης τάσης για όλες τις ταχύτητες προσομοίωσης και για τα τρία υλικά .....	122
Σχήμα: 6.21 Παραμορφωμένο πτερύγιο .....	124

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 1: Μεγαλύτερες ηλεκτροπαραγωγές χώρες με χρήση αιολικής ενέργειας .....	17
Πίνακας 3 1: Ιδιότητες διαφόρων τύπων ινών γυαλιού .....	48
Πίνακας 3 2: Ιδιότητες νανοσωλήνων άνθρακα .....	52
Πίνακας 3 3: Ιδιότητες ινών αραμιδίων .....	53
Πίνακας 3 4: Ιδιότητες αφρού πολυουρεθάνης (BCC Products MB). (www.matweb.com) .....	75
Πίνακας 5-1: Πάχος πτερυγίου .....	89
Πίνακας 5-: Πάχος νεύρου δυσκαμψίας .....	89
Πίνακας 5 3: Διατομές αεροτομών.....	90
Πίνακας 5 4: Ιδιότητες προτεινόμενων υλικών.....	91
Πίνακας 6 1: Μέγιστη Παραμόρφωση .....	121
Πίνακας 6 2: Ισοδύναμη Τάση.....	121

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από τη μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας

Οι μετακινήσεις του αέρα, οι άνεμοι, προέρχονται από τις μεταβολές και τις διαφορετικές από τόπο σε τόπο τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι διαφορετικές αυτές τιμές της πίεσης οφείλονται στη διαφορετική θέρμανση (απορρόφηση ενέργειας) της ατμόσφαιρας κάθε τόπου από τον Ήλιο.

Ο άνθρωπος από πολύ παλιά κατάλαβε πόσο σημαντική μπορεί να αποδειχθεί η ενέργεια που μας δίνει ο άνεμος όταν φυσάει και αξιοποίησε τη δύναμη των ανέμων σε διάφορες χρήσεις.

Αυτή η ενέργεια, η αιολική (υπενθυμίζεται ότι ο Αίολος ήταν ο “διαχειριστής” των ανέμων, κατά τους αρχαίους Έλληνες), αξιοποιείται στις μέρες μας ολοένα και περισσότερο, σε περιοχές όπου συχνά φυσούν ισχυροί άνεμοι.

Για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούμε σήμερα τις ανεμογεννήτριες, με τις οποίες μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με συστηματικό τρόπο άρχισε παγκοσμίως στις αρχές της δεκαετίας του '80, όταν προκλήθηκε η πρώτη πετρελαϊκή κρίση και αυξήθηκε πολύ τα τελευταία χρόνια.

Η αιολική ενέργεια και ανεξάντλητη ως ανανεώσιμη είναι (αφού ο καλός μας ήλιος θα φροντίζει πάντα να υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των διάφορων περιοχών της γης, ώστε να προκαλούνται οι άνεμοι), και καθαρή, “φιλική” προς το περιβάλλον (αφού η μετατροπή της σε ηλεκτρική δεν το επιβαρύνει).

Σήμερα, στη γενική τους μορφή οι ανεμοκινητήρες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε άλλες πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας, όπως θερμική, ηλεκτρική και φυσικά μηχανική .

Ο άνεμος, όμως, είναι μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη σε όλες της τις παραμέτρους πηγή ενέργειας. Η δέσμευση και χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής, είναι ως εκ τούτου μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Η σχεδίαση και η κατασκευή μιας αποδοτικής και παράλληλα οικονομικής ανεμομηχανής δεν είναι εύκολη δουλειά. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες ανεμομηχανές (που η επιστημονική ονομασία τους είναι “συστήματα μετατροπής” της αιολικής ενέργειας , ή πιο απλά “ανεμοκινητήρες”, ή όταν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια “ανεμογεννήτριες”, χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα επιτεύγματα στην τεχνολογία των υλικών, στη μηχανολογία, στην ηλεκτρονική και στην αεροδυναμική, έχουν

ανεβάσει σε υψηλά επίπεδα την απόδοση τους, μειώνοντας συνεχώς το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

Η μελέτη ενός συστήματος ανεμογεννήτριας (Α/Γ), περιλαμβάνει την αεροδυναμική σχεδίαση και τη μελέτη εφαρμογής, στην οποία περιλαμβάνονται η μηχανολογική μελέτη και σχεδίαση, η μελέτη του ηλεκτρολογικού συστήματος και τα ηλεκτρολογικά συστήματα ελέγχου και ασφαλείας. Η αεροδυναμική σχεδίαση αποτελεί προϋπόθεση για τον σχεδιασμό ενός συστήματος δέσμευσης και μετατροπής της ενέργειας του ανέμου, ενώ η ηλεκτρομηχανολογική μελέτη είναι το αμέσως επόμενο και αναγκαίο στάδιο για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, κατά τον αποδοτικότερο και πλέον συμφέροντα τεχνοοικονομικό τρόπο.

### **1.1.1 Προέλευση του ανέμου**

Η έμφαση του ανέμου πάνω στην επιφάνεια της γης οφείλεται σε δύο παράγοντες:

- Την ηλιακή ακτινοβολία και
- Την περιστροφική κίνηση της γης.

Η ανομοιόμορφη θέρμανση της γήινης ατμόσφαιρας, προκαλεί διαφορές στη θερμοκρασία και την ατμοσφαιρική πίεση. Σε περιοχές κοντά στον ισημερινό, όπου οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν σχεδόν κάθετα, η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι υψηλότερη από ότι στους πόλους, όπου οι ακτίνες του προσπίπτουν πλάγια. Το αντίθετο συμβαίνει με την ατμοσφαιρική πίεση, η οποία είναι μεγαλύτερη στους πόλους από ότι στον ισημερινό. Η διαφορά αυτή στην ατμοσφαιρική πίεση προκαλεί την κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα από ζώνες υψηλότερης πίεσης προς ζώνες χαμηλότερης πίεσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία των ανέμων. Τα κρύα επιφανειακά στρώματα αέρα κινούνται από τους πόλους προς τον ισημερινό, ενώ στην υψηλότερη ατμόσφαιρα, τα ανερχόμενα ζεστά επιφανειακά στρώματα αέρα του ισημερινού ψύχονται και κινούνται προς τους πόλους.

Από την άλλη πλευρά, λόγω της περιστροφικής κίνησης της γης, οι αδρανειακές δυνάμεις τείνουν να μετατοπίσουν τις επιφανειακές μάζες αέρα προς τα δυτικά και τις θερμότερες στην υψηλότερη ατμόσφαιρα προς τα ανατολικά.

Η συνδυασμένη κίνηση του αέρα, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας και της περιστροφικής κίνησης της γης, αποτελεί την γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας. Στο

βόρειο ημισφαίριο αυτή η κίνηση γίνεται με φορά αντίθετη των δεικτών του ωρολογίου, ενώ στο νότιο με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

Ο τρόπος δημιουργίας των ανέμων έχει σαν αποτέλεσμα την ετήσια, αλλά και ημερήσια διακύμανση της έντασης και της διεύθυνσης αυτών. Επιπλέον, η τοπική μορφολογία του εδάφους και οι τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό το μέτρο και τη διεύθυνση της ταχύτητας των ανέμων.

### **1.1.2 Ιστορική αναδρομή**

Η αιολική ενέργεια, μια από τις παλαιότερες μορφές φυσικής ενέργειας, αξιοποιήθηκε από πολύ νωρίς για την παραγωγή μηχανικού έργου και έπαιξε σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας. Η σημασία της ενέργειας του ανέμου φαίνεται από τα αρχαία χρόνια όπου χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την μετακίνηση των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων γεγονός που συνέβαλε αποφασιστικά στην ανάπτυξη της ναυτιλίας.

Η πρώτες μηχανές αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας ήταν οι ανεμόμυλοι. Παρόλο που φαίνεται ότι οι αρχαίοι λαοί της Ανατολής χρησιμοποιούσαν ανεμόμυλους, η πρώτη αναφορά για τέτοιες μηχανές εμφανίζεται σε έργα Αράβων συγγραφέων του 9ου μ.Χ. αιώνα. Ο ανεμόμυλος έφτασε στην Ευρώπη από τους Άραβες και χρησιμοποιήθηκε σε χώρες όπως η Γαλλία και η Αγγλία σε έργα με τη μορφή υδραυλικού τροχού.

Σήμερα πλέον έχει αυξηθεί πολύ η ηλεκτροπαραγωγή μέσω Α/Κ κυρίως λόγω της τεχνολογίας που επιτρέπει την ολοένα και αποτελεσματικότερη, τεχνική και οικονομική εκμετάλλευση των ανέμων.

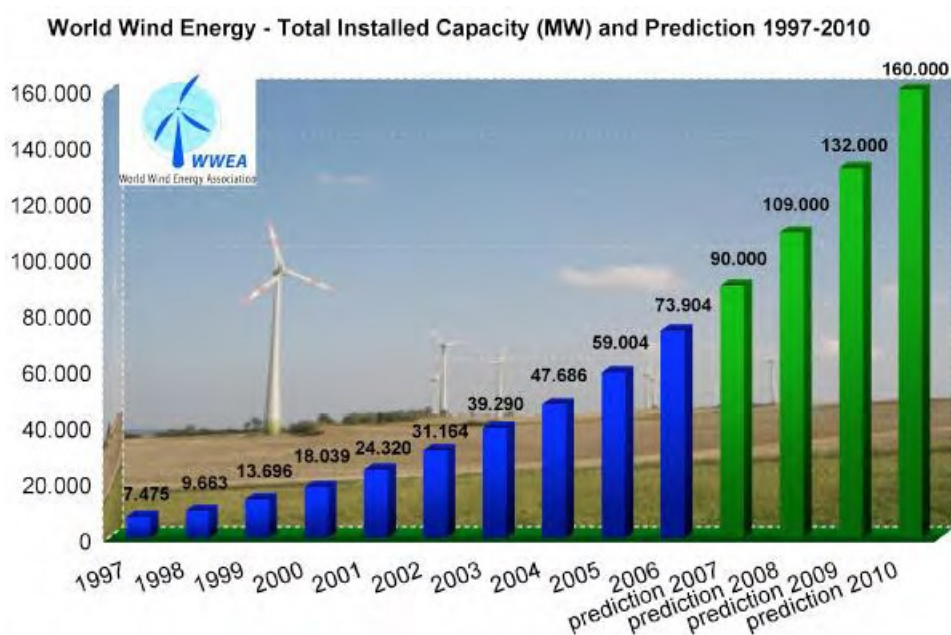
Συμπερασματικά, κατά την τελευταία 20ετία και συγκεκριμένα μετά τις διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις, και λαμβάνοντας υπόψη τις ραγδαίες περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συμβατικών ηλεκτροπαραγωγών μέσων, ο άνθρωπος έδειξε ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη βέλτιστη δυνατή αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Σήμερα, μετά από πολλές και επίμονες προσπάθειες, έχει επιτευχθεί αρκετά ανταγωνιστική τιμή της αιολικά παραγόμενης kWh σε τέτοιο σημείο μάλιστα που να ανταγωνίζεται το κόστος της συμβατικά παραγόμενης kWh. Αυτό αποτελεί και έναν από τους σημαντικότερους λόγους για το ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονη κινητικότητα όσον αφορά τον τομέα των επενδύσεων, από ιδιωτικούς αλλά και δημόσιους φορείς σε παγκόσμια αλλά και σε τοπική κλίμακα.

Ο Πίνακας (1.1) μας δείχνει αναλυτικά για τα Δεκέμβριο του 2003 τις μεγαλύτερες αιολικά ηλεκτροπαραγωγές, οι οποίες συνολικά αντιστοιχούν στο 95% σε παγκόσμια κλίμακα.



Χώρα	Εγκατεστημένη ισχύς (MW)	Χώρα	Εγκατεστημένη ισχύς (MW)
Γερμανία	14,609	Ιταλία	904
Η.Π.Α.	6,374	Ιαπωνία	686
Ιαπωνία	6,202	Αγγλία	649
Δανία	3,110	Κίνα	568
Ινδία	2,110	Ελλάδα	426
Ολλανδία	912		

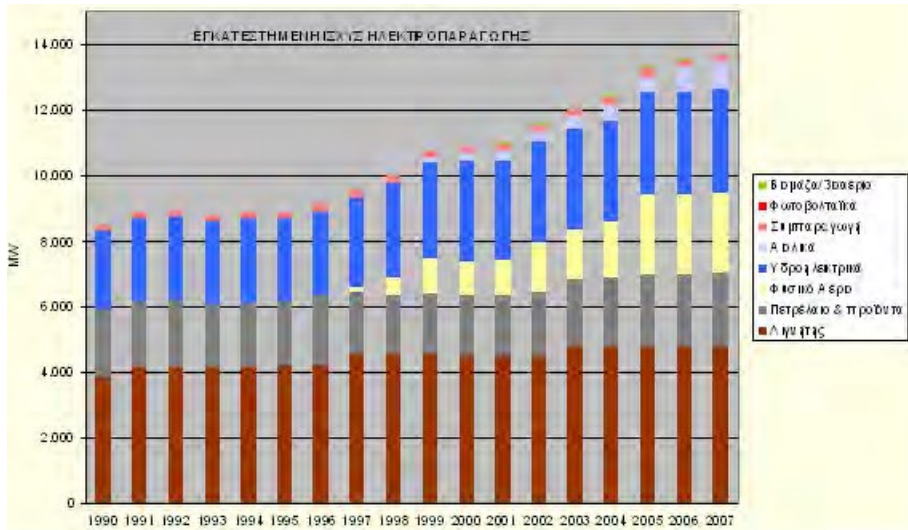
Πίνακας 1-1: Μεγαλύτερες ηλεκτροπαραγωγές χώρες με χρήση αιολικής ενέργειας



Σχήμα: 1.0.1: Διάγραμμα Συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ενέργειας σε MW

Παρατηρούμε ότι οι ρυθμοί αύξησης της αιολικής ισχύος είναι συνεχώς αυξητικοί σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στην Ελλάδα, χώρα με πλούσιο αιολικό δυναμικό, η παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικές εγκαταστάσεις αποτελεί ρεαλιστική ενεργειακή προοπτική. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα: 1.0.2: Διάγραμμα Συνολικής εγκαταστημένης ισχύος ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα

Από το τελευταίο αυτό διάγραμμα γίνεται φανερό ότι σιγάσιγά τα τελευταία χρόνια η αιολική ενέργεια αρχίζει να καταλαμβάνει χώρο στην συνολική ηλεκτροπαραγωγή στη χώρα μας.

## 1.2 Αιολική ενέργεια και εφαρμογές αυτής

Πλέον η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η συνεχώς αυξανόμενη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας μιας και η δυνατότητες χρήσιμης ενέργειας που μπορεί να παρέχει για όλη την ανθρωπότητα είναι ανυπολόγιστες.

Η αιολική ενέργεια είναι πρώτα απ' όλα μια θυγατρική μορφή της ηλιακής ενέργειας αφού το 2% περίπου της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στη γη μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των αερίων μαζών. Πρόκειται για μηχανική ενέργεια υψηλής ποιότητας που προσφέρεται για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια ή σε χρήσιμη μηχανική ενέργεια. Αυτό το 2% της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των αερίων μαζών είναι πρακτικά άφθονη ενέργεια, είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη από τις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας, αλλά βέβαια δεν είναι όλη χρησιμοποιήσιμη. Μικρό ποσοστό αυτής της ενέργειας αντιστοιχεί σε μεγάλης ταχύτητα ανέμους, όπου σε κατάλληλες θέσεις στην επιφάνεια της γης είναι άμεσα αξιοποιήσιμη. Αυτό όμως το ποσοστό σε απόλυτα νούμερα δεν είναι καθόλου αμελητέο.

Σαφώς η αιολική ενέργεια παρουσιάζει πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Όπως όμως θα αναφερθούν σε επόμενη ενότητα, τα πλεονεκτήματα υπερτερούν των μειονεκτημάτων και αυτό σε συνδυασμό με το ενεργειακό αδιέξοδο στο οποίο οδεύουμε, κάνουν πλέον επιτακτική την άμεση εκμετάλλευσή της .

Ειδικότερα, στη χώρα μας, η οποία είναι περιοχή έντονου αιολικού δυναμικού, η ευρύτερη ανάπτυξη και χρήση της αιολικής ενέργειας αποτελεί μονόδρομο στη σταδιακή ανεξαρτησία μας από τους εξωτερικούς προμηθευτές συμβατικών ενεργειακών πόρων. Βέβαια, με την παρούσα τεχνολογική υποδομή δεν είναι δυνατόν να απορροφηθεί όλο το αιολικό δυναμικό σε ποσοστό 100% από τους διαθέσιμους Α/Κ.

Ακόμα και η ΔΕΗ, η οποία είναι κατεξοχήν συντηρητική στις εκτιμήσεις της προβλέπει ότι το Ελληνικό αιολικό δυναμικό φθάνει τις 6,46 κιλοβατώρες το χρόνο, που σημαίνει 15% των ενεργειακών αναγκών της χώρας. Ένα μέρος αυτού του αιολικού δυναμικού που αντιστοιχεί περίπου σε 1200 μεγαβάτ εγκατεστημένα, μπορεί ήδη σήμερα να χρησιμοποιηθεί με όρους οικονομικά βιώσιμους, αν όχι συμφέροντες.

Βέβαια όμως η εγκατάσταση ενός πάρκου Α/Κ προκειμένου να αξιοποιηθεί το αιολικό δυναμικό της χώρας μας, έχει και πολλές δυσκολίες:

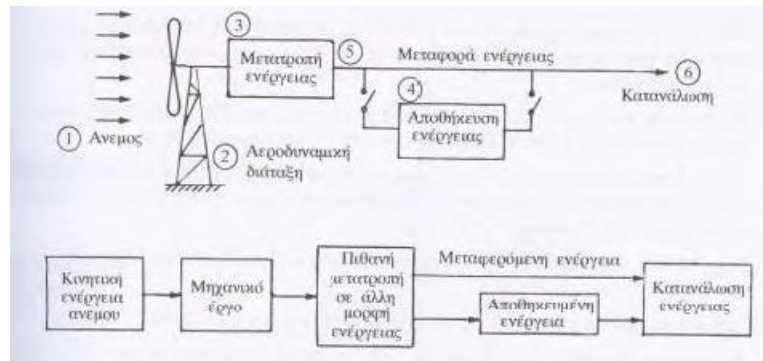
1. Πρέπει να γίνουν ακριβείς μετρήσεις και μελέτες για την σωστή επιλογή του μέρους του αιολικού πάρκου. Συνήθως επιλέγονται μέρη όπου ο άνεμοι πνέουν σε ταχύτητες 12-15m/s σχετικά σταθεροί, χωρίς να έχουν μεγάλες ριπές που είναι υπεύθυνες για τις φθορές και βλάβες των Α/Κ.

2. Το μεγάλο οικονομικό κόστος μιας τέτοιας επένδυσης είναι ένας παράγοντας που λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Μια διευκόλυνση θα ήταν οι επιδοτήσεις κατά ενός ποσοστού από το κράτος ή από ευρωπαϊκά προγράμματα ώστε να ρίξουν αρκετά το κόστος της επένδυσης.

3. Τα πάρκα αυτά προσφέρουν ηλεκτρική ενέργεια σε μια ευρύτερη γεωγραφικά περιοχή, έτσι πρέπει να είναι συνδεδεμένα με το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο.

Κατά τη σύνδεση υπάρχουν πάντα δυσκολίες ευστάθειας του δικτύου, για παράδειγμα λόγω απρόβλεπτων καιρικών φαινομένων, υπερφόρτισης του δικτύου κ.α. Η σύνδεση γίνεται μέσω υποσταθμού, στον οποίο τοποθετούνται οι μετασχηματιστές ανυψώσεως τάσης και τα υπόλοιπα απαραίτητα στοιχεία της προστασίας όλης της

εγκατάστασης. Παράλληλα όμως πρέπει να υπάρχουν συστοιχίες συσσωρευτών για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας και χρήσης αυτής σε περιπτώσεις άπνοιας ή βλαβής των Α/Κ όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα (1.4)



Σχήμα: 1.0.3: Τοπική διάταξη μετατροπής αιολικής ενέργειας

4. Τέλος πολλοί είναι αυτοί οι μη κερδοσκοπικοί οργανισμοί (Greenpeace, EWEA, CRES) οι οποίοι τονίζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών (ως προς τα επίπεδα θορύβου των κινούμενων μερών, τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που μπορεί να προκαλούν σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, τη μείωση στον πληθυσμό ορισμένων ειδών πουλιών και την προσβολή της αισθητικής του φυσικού τοπίου μιας περιοχής).

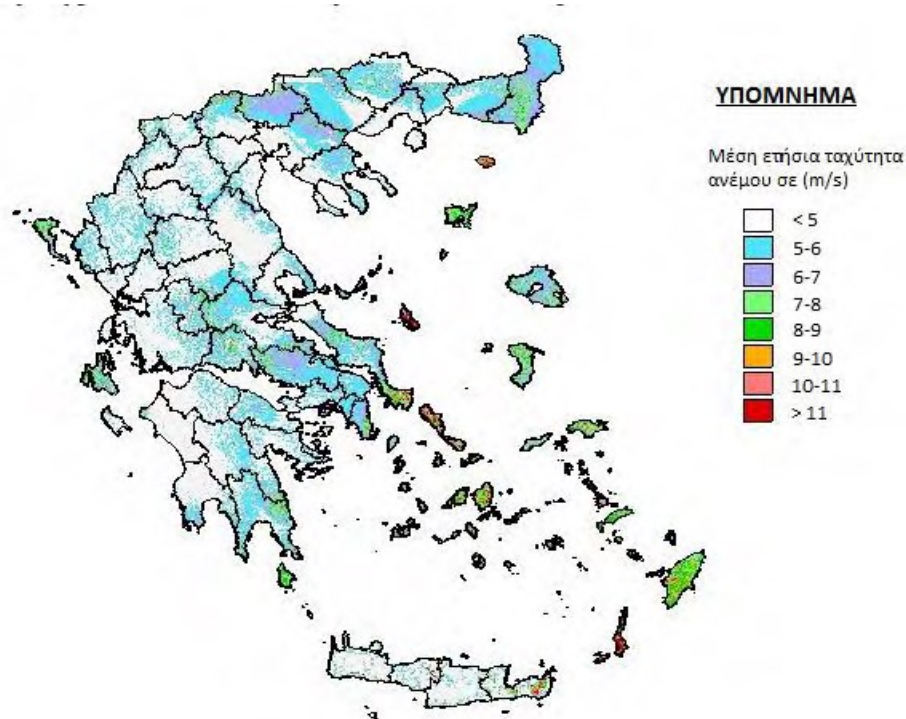
### 1.3. Εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας- εφαρμογές ανεμοκινητήρων

#### 1.3.1. Παρούσα κατάσταση και προοπτικές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα

Από γεωγραφικής άποψης, η χώρα μας βρίσκεται σε μια από τις καλύτερες θέσης παγκοσμίως για τη δυνατότητα εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού. Ειδικότερα οι παράκτιες περιοχές και τα νησιά μας μπορούν να προσφέρουν σε μεγάλο βαθμό ενέργεια και να τροφοδοτήσουν ακόμα και ολόκληρη την χερσόνησο.

Μερικά από τα νησιά μας που είναι κοντά στην ηπειρωτική πλευρά έχουν συνδεθεί και τροφοδοτούνται από κεντρικά δίκτυα ενώ οι ανάγκες των υπολοίπων σε ενέργεια καλύπτονται από τους αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας αριθμός νησιών έχουν συνδεθεί μεταξύ τους και τροφοδοτούνται από κεντρικούς αυτόνομους σταθμούς. Για πολλά χρόνια προβλέπεται ότι τα νησιά

που είναι απομακρυσμένα από την ηπειρωτική Ελλάδα, θα στηρίζουν την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών στην αυτόνομη παραγωγή και θα παραμένουν ανεξάρτητα από το εθνικό δίκτυο.

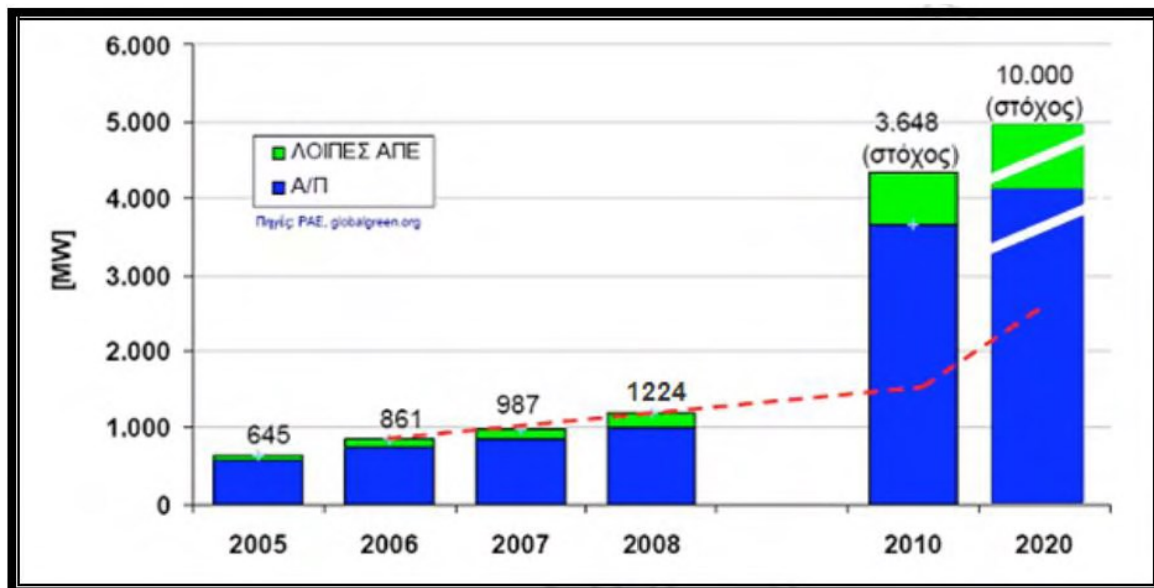


Σχήμα: 1.0.4:Χάρτης αιολικού δυναμικού Ελλάδας

Όπως παρατηρεί κανείς και από τον παραπάνω χάρτη, οι νησιωτικές περιοχές έχουν έντονο ενδιαφέρον. Οι ταχύτητες ανέμου σε αυτές είναι από 7-9 m/s, χωρίς έντονα καιρικά φαινόμενα όπως ανεμοθύελλες, καθιστώντας την εκμετάλλευσή τους ιδανική.

Οι πρώτες δραστηριότητες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα άρχισαν το 1975, με τη λήψη ανεμολογικών στοιχείων σε πολλές περιοχές της χώρας, για λογαριασμό της .Ε.Η. Η κίνηση αυτή ήταν ενδεδειγμένη, δεδομένου ότι

η ύπαρξη καλών ανεμολογικών στοιχείων σε μια σειρά πιθανών περιοχών εγκατάστασης, είναι βασικός παράγοντας για την ορθή επιλογή της θέσης των Α/Π.



Σχήμα: 1.0.5: Προοπτικές εκμετάλλευσης ΑΠΕ μέχρι το 2020

### 1.3.2. Σύγχρονες εφαρμογές των ανεμοκινητήρων

Μια πρώτη κατηγοριοποίηση των Α/Κ μπορεί να γίνει με βάση την ισχύ απόδοσής τους, οπότε έχουμε:

- Ανεμοκινητήρες μικρής ισχύος μέχρι 20 kW
- Ανεμοκινητήρες μέσης ισχύος 20-250 kW
- Ανεμοκινητήρες μεγάλης ισχύος >250 kW

Η πρώτη κατηγορία των ανεμοκινητήρων μικρής ισχύος χρησιμοποιούνται σε απομονωμένες περιοχές για κάλυψη αγροτικών ή κτηνοτροφικών αναγκών, ιδιαίτερα για άντληση και θέρμανση νερού, θέρμανση κατοικίας, φωτισμό και άλλες μικροεφαρμογές. Τις περισσότερες φορές η λύση αυτή είναι η οικονομικότερη. Οι ανεμοκινητήρες του τύπου αυτού είναι ανεξάρτητοι, μη συνδυσασμένοι με δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούν γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που φορτίζει συσσωρευτές.

Οι ανεμοκινητήρες των κατηγοριών της μέσης και μεγάλης ισχύος χρησιμοποιούνται για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας σε συνεργασία με δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 2.1. Ανεμολογικά στοιχεία

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπτύξουμε και θα αναλύσουμε τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του συστήματος ελέγχου βήματος ανεμογεννήτριας.

#### 2.1.1. Κατανομή ταχύτητας ανέμου

Η ταχύτητα ανέμου μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν μια συνεχής τυχαία μεταβλητή. Η πιθανότητα να εμφανιστεί για κάποια τιμή της ταχύτητας του ανέμου, μπορεί να περιγραφεί από μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Υπάρχουν πολλές τέτοιες σχέσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν πως κατανέμεται η ταχύτητα του ανέμου. Οι δύο πιο κοινές είναι οι κατανομές Weibull και Rayleigh. Η κατανομή Rayleigh είναι υποσύνολο της κατανομής Weibull και περιγράφεται ως εξής:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (2.1)$$

Όπου:

$f(v)$  είναι η πυκνότητα της πιθανότητας

$v$  είναι η ταχύτητα του αέρα  $>0$  [m/s]

$k$  είναι η παράμετρος

μορφοποίησης  $>0$   $c$  είναι η

παράμετρος κλίμακας  $>0$

Διάφορες μετρήσεις που έχουν γίνει σε όλο τον κόσμο με πραγματικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου, έχουν δείξει πως η κατανομή του Weibull μπορεί να την προσεγγίσει με πολύ μεγάλη ακρίβεια, με μοναδική προϋπόθεση ότι αναφέρεται σε μία χρονική περίοδο που δεν είναι πολύ μικρή. Περίοδοι αρκετών εβδομάδων αλλά

και μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα μπορούν να περιγραφούν πολύ ικανοποιητικά από την κατανομή Weibull, ενώ για μικρότερα χρονικά διαστήματα η περιγραφή αυτή δεν είναι τόσο αντιπροσωπευτική. Η μέση ταχύτητα του ανέμου μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της εξίσωσης που υπολογίζει την προσδοκώμενη τιμή μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής και η οποία είναι:

$$V_{mean} = \int_0^{\infty} v f(v) dv = \frac{c}{k} \Gamma\left(\frac{1}{k}\right) \quad (2.2)$$

Όπου  $\Gamma$  είναι η γάμμα εξίσωση του Euler:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (2.3)$$

Αν η παράμετρος  $k$  ισούται με 2, τότε η κατανομή Weibull ισούται με την κατανομή Rayleigh. Το πλεονέκτημα της κατανομής Rayleigh είναι ότι εξαρτάται μόνο από την παράμετρο  $c$ , η οποία με τη σειρά της εξαρτάται μόνο από τη μέση ταχύτητα του ανέμου.

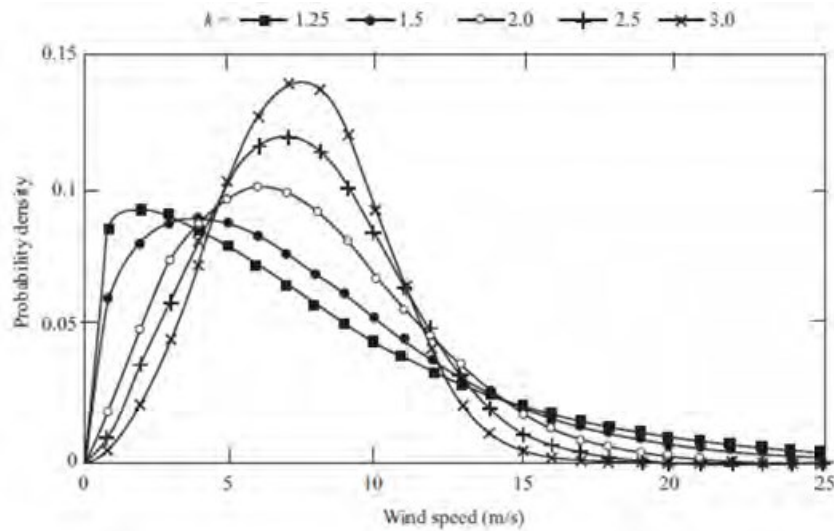
παράμετρος  $c$  μπορεί να υπολογιστεί με βάση μια δεδομένη μέση ταχύτητα ανέμου ως εξής:

$$c = \frac{2}{\pi} V_{mean} \quad \text{for } k = 2, \quad (2.4)$$

$$\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

Στο σχήμα 2.1 παρατίθεται το διάγραμμα της συνάρτησης κατανομής Rayleigh για διαφορετικές μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου.





Σχήμα: 2.0.1:Κατανομή Rayleigh

Η συνεχής μαύρη γραμμή αντιστοιχεί σε μέση ταχύτητα των 5m/s, η διακεκομμένη γραμμή με τις παύλες αντιστοιχεί σε μέση ταχύτητα 8m/s και η γκρι γραμμή αντιστοιχεί σε μέση ταχύτητα 10m/s.

### 2.1.2. Ισχύς του ανέμου

Για τον υπολογισμό της ισχύος του ανέμου, θεωρούμε μια αέρια μάζα  $m$ , στιγμιαίας ταχύτητας  $v(t)$ . Η κινητική ενέργεια του ανέμου είναι:

$$W(t) = \frac{1}{2} m \cdot v^2(t) \quad (2.5)$$

Αν  $A$  είναι το εμβαδόν της επιφάνειας που διαπερνά κάθετα ο άνεμος και  $\rho$  η πυκνότητα της αέριας μάζας τότε η ανά μονάδα χρόνου μάζα του αέρα είναι:

$$m(t) = \rho \cdot A \cdot v(t) \quad (2.6)$$

Επομένως από τις παραπάνω σχέσεις συνεπάγεται ότι η στιγμιαία ισχύς του ανέμου (ενέργεια στη μονάδα του χρόνου) θα προκύπτει από την σχέση:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3(t) \quad (2.7)$$

Από την τελευταία σχέση φαίνεται ποσοτικά η σπουδαιότητα της αξιοποίησης της ενέργειας του ανέμου σε σχέση προς την ταχύτητά του καθώς η ισχύς είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας. Όμως στην πραγματικότητα μόνο ένα κλάσμα της διαθέσιμης ισχύος μπορεί να δεσμευτεί από έναν Α/Κ, διότι αφενός ο άνεμος απομακρύνεται από τον Α/Κ με κάποια ταχύτητα, αφετέρου τα πτερύγια του Α/Κ προκαλούν εκτροπή μέρους του αέρα τον οποίο παρακάμπτει τον Α/Κ χωρίς να τον διαπεράσει. Έτσι ορίζουμε τον συντελεστή ισχύος  $C_p$  ενός Α/Κ ως εξής:

$$C_p = \frac{P_M}{P_{av}} \quad (2.8)$$

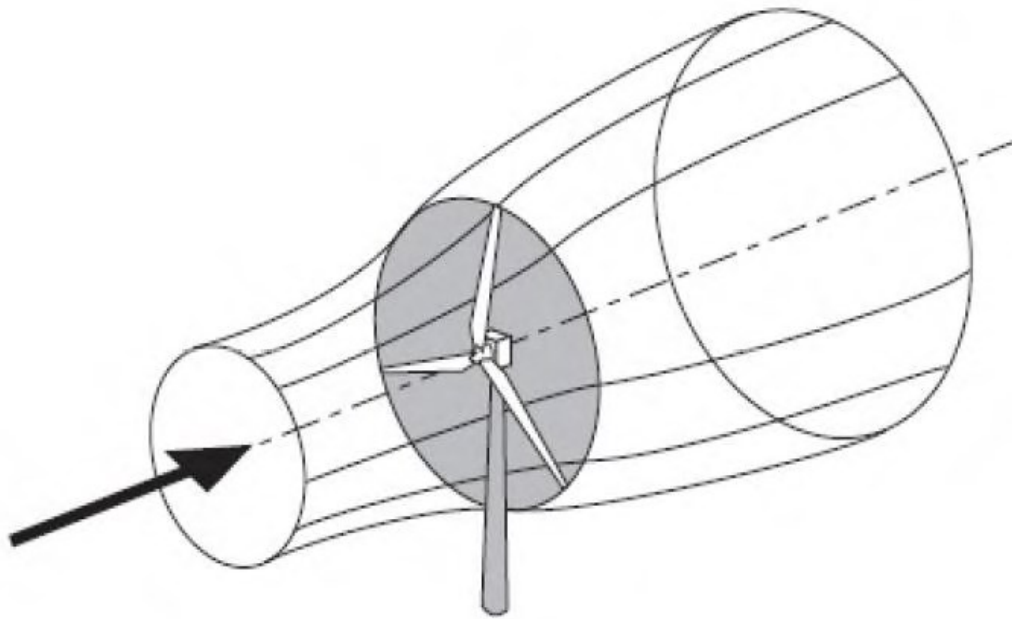
Όπου  $P_M$  είναι η μηχανική ισχύς που παράγεται.

### 2.1.3. Μέγιστη θεωρητική τιμή του συντελεστή ισχύος $C_p$

Σύμφωνα με τη θεωρία του δίσκου ενέργειας ο μηχανισμός δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από το δρομέα του Α/Κ θεωρείται ιδανικός. Ο ρότορας θεωρείται ως δίσκος που ενεργεί πάνω στον άνεμο μειώνοντας την στατική του πίεση. Το σχήμα (2.2) εικονίζει το σωλήνα ροής του Α/Κ που ορίζεται από τη διάμετρο του δρομέα.

αέρας πολύ μακριά πριν από τον δίσκο έχει κάποια στατική πίεση και πλησιάζει το δίσκο με ταχύτητα  $v_1$ . Ο δίσκος αφαιρεί ταχύτητα από τον αέρα και επομένως πολύ

μακριά μετά από το δίσκο όπου η πίεση του αέρα θα έχει αποκατασταθεί στην πίεση του περιβάλλοντος (στατική πίεση), η ταχύτητα του ανέμου  $v_3$  θα είναι μικρότερη από την  $v_1$  ( $v_3 < v_1$ ).



Σχήμα: 2.0.2:Σωλήνας ροής της ανεμογεννήτριας.

Για να υπάρχει διατήρηση της μάζας μέσα στον σωλήνα ροής θα πρέπει η διάμετρος του σωλήνα να μεγαλώνει μετά τον δρομέα. Η στοιχειώδης αέρια μάζα ανά μονάδα χρόνου που ρέει μέσα στο σωλήνα ροής διατηρείται σταθερή και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_M = \frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (v_1^2 - v_3^2) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_1 (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.11)$$

Όμως η ενέργεια  $W$  ισούται με το γινόμενο της ορμής της αέριας μάζας επί την ταχύτητα της, δηλαδή:

$$W = m(v_1 - v_3)v_2 \quad (2.12)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις για το  $W$  προκύπτει ότι:

$$v_2 = \frac{1}{2}(v_1 + v_3) \quad (2.13)$$

Οπότε με αντικατάσταση έχουμε

$$P_M = \frac{1}{4} \rho \pi R^2 (v_1 + v_3)(v_1^2 + v_3^2) = \frac{1}{4} \rho \pi R^2 v_1^3 \left[ 1 + \frac{v_3}{v_1} - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^2 - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^3 \right] \quad (2.14)$$

Επομένως καταλήγουμε τελικά ότι για το  $C_p$  ισχύει:

$$C_p = \frac{P_M}{P} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{v_3}{v_1} - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^2 - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^3 \right] \quad (2.15)$$

Για την εύρεση του μέγιστου συντελεστή  $C_p$  παίρνουμε την παράγωγο της τελευταίας σχέσης ως προς  $v_3$  ίση προς το μηδέν, οπότε προκύπτει:

$$\frac{dC_p}{dt} = 0 \Rightarrow 1-2|v|^{-3} \cdot (-3|v|^{-4}) \cdot \frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{dv}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{v}{v_1} = \frac{1}{3} \quad (2.16)$$

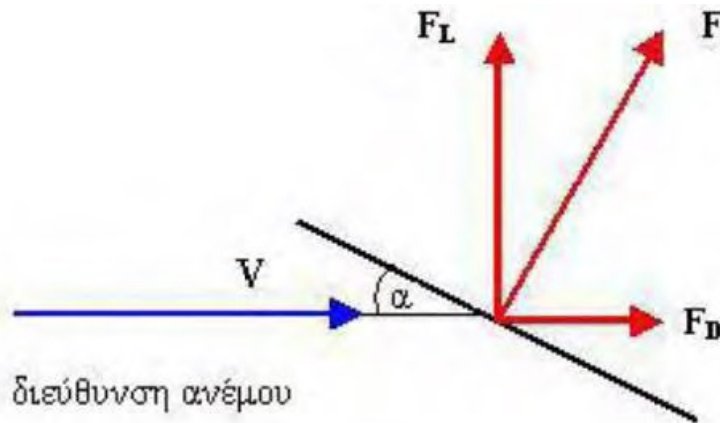
Οπότε με αντικατάσταση καταλήγουμε στο θεωρητικό μέγιστο του  $C_p$ :

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (2.17)$$

Η τιμή αυτή είναι η μέγιστη θεωρητική τιμή του συντελεστή ισχύος  $C_p$  και ονομάζεται όριο του Benz. Στην πράξη όμως λόγω μηχανικών τριβών, στροβίλων και αεροδυναμικών ατελειών, η τιμή του  $C_p$  δεν ξεπερνά το 0.5.

#### 2.1.4. Άντωση και Αντίσταση

Όταν άνεμος ταχύτητας  $v$  προσπίπτει σε μια επιφάνεια εμβαδού  $A$  που σχηματίζει γωνία  $\alpha$  (γωνία προσβολής) με τη ταχύτητα του ανέμου, ασκεί στην επιφάνεια μια δύναμη  $F$ . Η δύναμη αυτή αναλύεται σε δύο συνιστώσες: την  $F_L$  που είναι κάθετη στην ταχύτητα  $v$  και καλείται άντωση και την  $F_D$  που είναι παράλληλη προς την ταχύτητα  $v$  και καλείται αντίσταση, όπως φαίνεται και στο σχήμα (2.3)



$$F = \sqrt{(F_L^2 + F_D^2)}$$

Σχήμα: 2.3: Διάγραμμα των δυνάμεων που εμφανίζονται κατά την προσβολή μιας

Τα μέτρα των δυνάμεων αυτών δίνονται από τις σχέσεις:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_L(\alpha) \quad (2.18)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_D(\alpha) \quad (2.19)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα και  $C_L(\alpha)$ ,  $C_D(\alpha)$  συντελεστές που προσδιορίζονται πειραματικά και εξαρτώνται από τη γωνία  $\alpha$ .

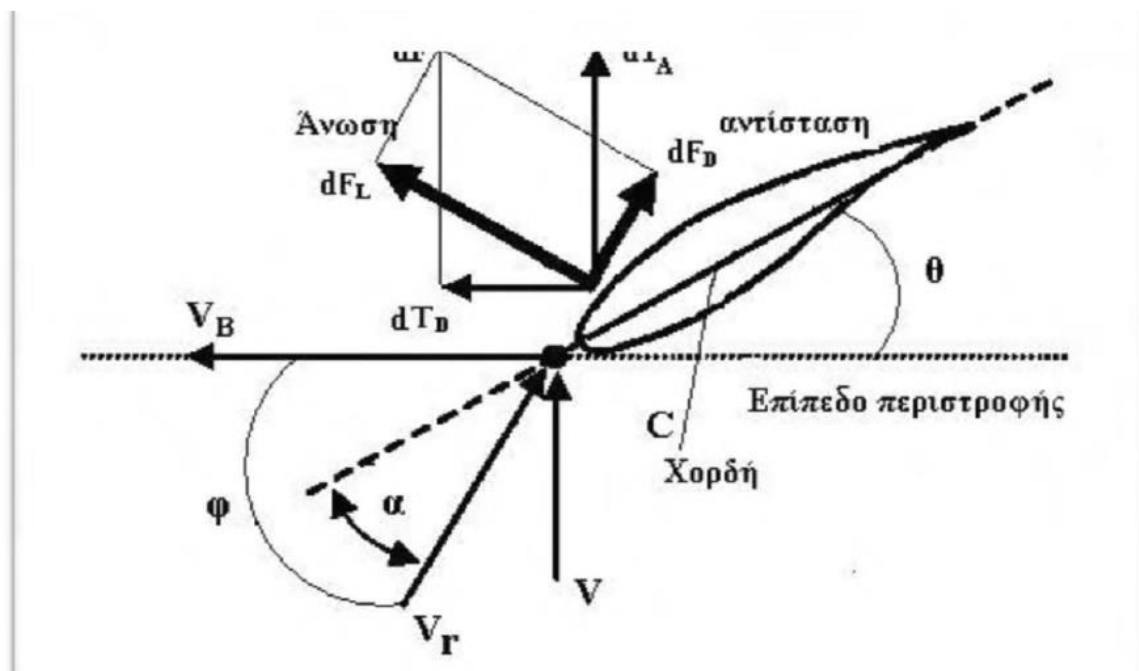
Η παραπάνω ανάλυση βρίσκει εφαρμογή και στα πτερύγια των Α/Κ. όπως φαίνεται και από το διάγραμμα υπάρχει συσχέτιση του  $F_L$  και  $F_D$  ως συνιστωσών της  $F$ . Οι Α/Κ που χρησιμοποιούν σαν κινητήρια δύναμη την αντίσταση λειτουργούν με χαμηλή ταχύτητα και μεγάλη ροπή και χρησιμοποιούνται συνήθως για άντληση νερού και άλεση δημητριακών. Αντίθετα, για την ηλεκτροπαραγωγή είναι καταλληλότεροι οι Α/Κ που εκμεταλλεύονται την άντωση γιατί λειτουργούν με υψηλή ταχύτητα και μικρή ροπή.

### 2.1.5. Θεωρία πτερύγωσης

Για διάφορους υπολογισμούς αεροδυναμικής σε πτερύγια, και ιδιαίτερα του συντελεστή ισχύος  $C_p$ , χρησιμοποιείται η θεωρία πτερύγωσης.

Η θεωρία αυτή βασίζεται στον διαχωρισμό του πτερυγίου σε πολλές στενές λωρίδες και τον υπολογισμό στοιχειωδών μεγεθών σε αυτές. Έπειτα μέσω ολοκλήρωσης σε όλο το μήκος του πτερυγίου προκύπτει μια αναλυτική σχέση για τον συντελεστή ισχύος.

Έστω ένας A/K που στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  και του οποίου τα πτερύγια σχηματίζουν γωνία  $\theta$  με το επίπεδο περιστροφής. Σε μια τυχαία στιγμιαία θέση θεωρούμε την αεροτομή ενός πτερυγίου με ένα επίπεδο παράλληλο στον άξονα περιστροφής του, όπως φαίνεται στο σχήμα (2.4)



Σχήμα: 2.4:Ανατομή ενός πτερυγίου

Σε ένα στοιχειώδες τμήμα του πτερυγίου με πάχος  $dr$  ασκούνται μια δύναμη  $dF_L$  (άντωση) και μια δύναμη  $dF_D$  (αντίσταση). Η συνισταμένη των δυνάμεων  $dF$  αναλύεται σε δύο νέες συνιστώσες τις  $dT_D$  και  $dT_A$ .

Τα μεγέθη που εικονίζονται στο παραπάνω σχήμα είναι:

$v$ : η ταχύτητα του ανέμου

$v_B = \omega_r R$ : η γραμμική ταχύτητα της πτέρυγας λόγω περιστροφής

$\omega_r$ : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής

$R$ : το μήκος του πτερυγίου

$v_r = v - v_B$ : η σχετική ταχύτητα του ανέμου την οποία βλέπει η πτέρυγα, είναι το διανυσματικό άθροισμα των  $v$  και  $v_B$

$\theta$ : η γωνία του πτερυγίου με το επίπεδο περιστροφής

$\alpha$ : η γωνία προσβολής

$C$ : η χορδή (πλάτος) του πτερυγίου

$$\varphi = \tan^{-1}(v / v_B)$$

Η προωστική δύναμη  $dT_D$  που είναι η αιτία περιστροφής των πτερυγίων ισούται με:

$$dT_D = dF_L \sin \varphi - dF_D \cos \varphi$$

Και με αντικατάσταση των δυνάμεων  $F_L$  και  $F_D$  από τις σχέσεις που αναφέρθηκαν πριν καταλήξουμε στην εξής σχέση:

$$dT_D = \frac{1}{2} \rho v_r^2 (C_L(\alpha) \sin \varphi - C_D(\alpha) \cos \varphi) C dr$$

Από το διανυσματικό τρίγωνο των ταχυτήτων έχουμε:

$$v_r^2 = v^2 + v_B^2 = v^2 + \omega_r^2 R^2$$

$$\text{Και } \omega_r R = v \cot \varphi$$

Η ισχύς που παράγεται είναι  $dP = dT_D \cdot v_B$ , οπότε προκύπτει η σχέση:

$$dP = \frac{1}{2} \rho v^3 \cot \varphi (1 + \cot \varphi) (C_L(\alpha) \sin \varphi - C_D(\alpha) \cos \varphi) C dr$$

Ολοκληρώνοντας την τελευταία σχέση και θεωρώντας Α/Κ με τρία πτερύγια  $P_M = 3P$  προκύπτει τελικά μια αναλυτική σχέση για τον συντελεστή ισχύος  $C_P$

$$C_P = \pi \frac{3}{2} R^2 \int_0^R \cot \varphi (1 + \cot \varphi) (C_L(\alpha) \sin \varphi - C_D(\alpha) \cos \varphi) C dr$$



Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής δεν εξαρτάται μόνο από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων ( $R, C$  και συντελεστές  $C_L, C_D$ ) αλλά και από την συνεφαπτομένη της γωνίας  $\varphi$ , όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Για συγκεκριμένο  $A/K$  τα μεγέθη  $R, C, C_L, C_D$ , είναι σταθερά επομένως ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  είναι συνάρτηση της συνεφαπτομένης της γωνίας  $\varphi$  για την οποία ισχύει:

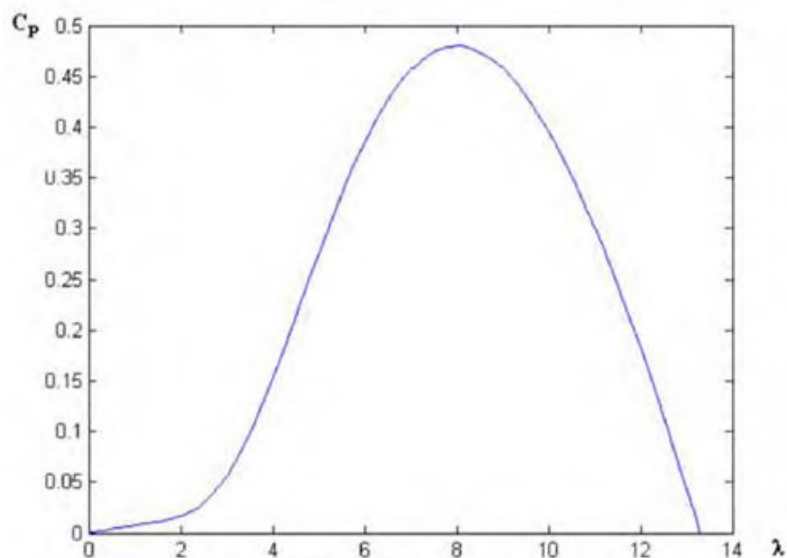
$$\cot\varphi = \frac{\omega_r R}{v} = \lambda \quad (2.20)$$

### 2.1.6. Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου

Ο λόγος που καλείται και λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου (tip-speed ratio- $v$  TSR) είναι ο λόγος της γραμμικής ταχύτητας λόγω περιστροφής των ακροπτερυγίων

26

προς την ταχύτητα του ανέμου, όπου  $\omega_r$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε rad/sec και  $R$  το μήκος του πτερυγίου σε μέτρα. Εφόσον ο συντελεστής  $\lambda$  αποτελεί λόγο ταχυτήτων είναι αδιάστατο μέγεθος. Στο σχήμα φαίνεται μια τυπική μορφή του συντελεστή  $C_p$  συναρτήσει του  $\lambda$ .



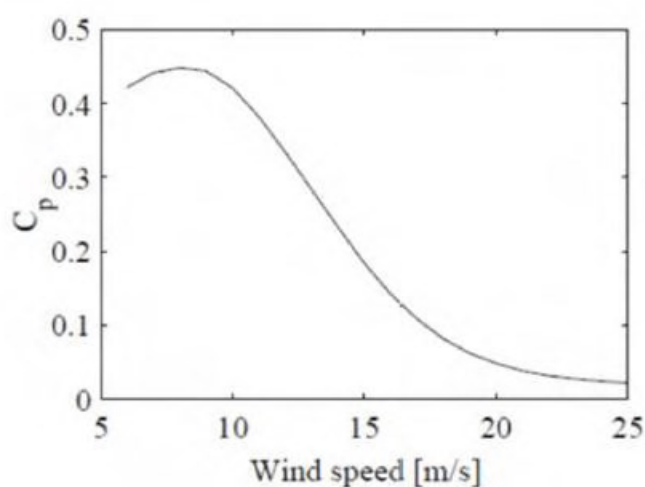
Σχήμα: 2.5: Διάγραμμα του συντελεστή ισχύος  $C_p$  συναρτήσει του λόγου ταχύτητας

Παρατηρούμε ότι ο  $C_p$  έχει μέγιστη τιμή για μια συγκεκριμένη τιμή του  $\lambda$ . Η τιμή αυτή του  $\lambda$  είναι η βέλτιστη τιμή. Όπως θα δούμε αργότερα ο συντελεστής  $C_p$  είναι συνάρτηση και της γωνίας βήματος των πτερυγίων που θα οριστεί παρακάτω.

### 2.1.7. Συντελεστής $C_p$ και ταχύτητα του ανέμου

Ο νόμος του Betz μας λέει ότι λιγότερο από τα 16/27 (59%) της κινητικής ενέργειας του ανέμου μπορούν να μετατραπούν σε μηχανική ενέργεια μέσω μιας ανεμογεννήτριας. Ο συντελεστής ισχύος δείχνει πόσο αποτελεσματικά μια ανεμογεννήτρια μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική. Το σχήμα 2.6 μας δείχνει μια τυπική μορφή ενός διαγράμματος του  $C_p$  με την ταχύτητα του ανέμου.

Η μέση μηχανική απόδοση είναι περίπου λίγο πάνω από το 20%, ωστόσο η απόδοση διαφέρει πολύ και σχετίζεται με την ταχύτητα του ανέμου και παίρνει μεγαλύτερη τιμή για την συγκεκριμένη περίπτωση, κοντά στο 44% , σε μια ταχύτητα ανέμου περίπου στα 9 m/s. Στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου η απόδοση δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική μιας και δεν υπάρχουν διαθέσιμα τόσο μεγάλα μεγέθη ενέργειας για να δεσμευτούν. Σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου, ο Α/Κ θα πρέπει να μην παραλάβει την παραπάνω ποσότητα ενέργειας πέρα από την προκαθορισμένη (ονομαστική) και αυτό προφανώς καθορίζει τα μηχανικά φορτία στην κατασκευή. Οπότε, η έννοια της απόδοσης έχει σημασία στις περιοχές όπου η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να δώσει τα μέγιστα ποσά ενέργειας.



Σχήμα: 2.6:Διάγραμμα του συντελεστή ισχύος  $C_p$  συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου

### 2.1.8. Μέγιστος συντελεστής $C_P$

Όπως είδαμε και νωρίτερα η μέγιστη θεωρητική τιμή του  $C_P$  είναι με βάση το όριο του Benz

$$C_{P\_max} = 0.593 \quad (2.21)$$

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_P$  δεν είναι σταθερός. Όπως αναφέρθηκε, ο συντελεστής  $C_P$  εξαρτάται από την ταχύτητα των ακροπτερυγίων  $\lambda$  αλλά και από έναν ακόμα παράγοντα που είναι η γωνία βήματος του πτερυγίου  $\beta$ , ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω.

Η σχέση για τη μηχανική ενέργεια που παράγεται από τον άνεμο δίνεται από τον τύπο:

$$P_M = \frac{1}{2} \pi \rho C_P R^2 v^3 \quad (2.22)$$

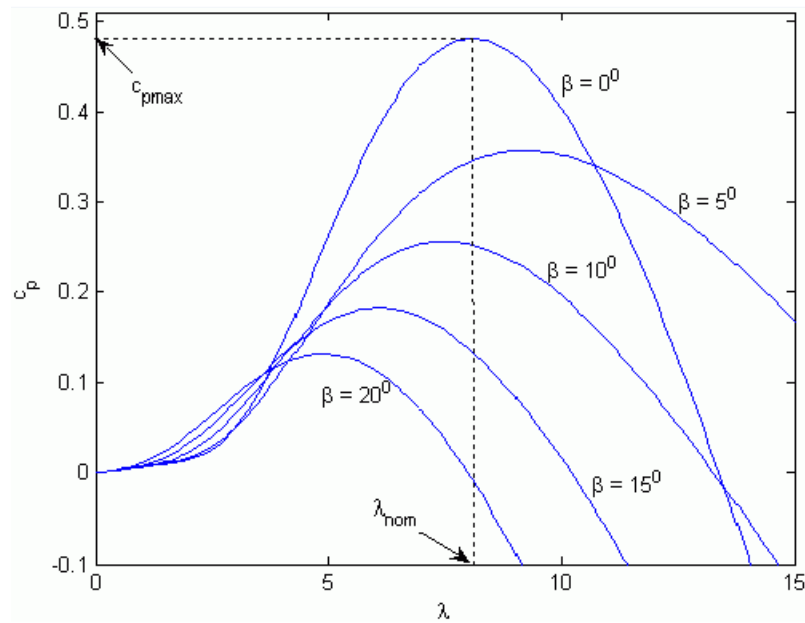
Ο συντελεστής ισχύος  $C_P(\lambda, \beta)$  όπως αναφέραμε παραπάνω, είναι συνάρτηση των  $\lambda$  και  $\beta$  και για κάθε ταχύτητα του ανέμου πρέπει η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα να παίρνει τιμές που να βελτιστοποιούν τα  $\lambda$  και  $\beta$ , έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη παραγωγή ισχύος από τον Α/Κ. Για δεδομένες τιμές των  $\lambda$  και  $\beta$  υπολογίζεται η τιμή του  $C_P(\lambda, \beta)$  χρησιμοποιώντας τον παρακάτω προσεγγιστικό τύπο:

$$C_{P_i}(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.23)$$

Όπου για το  $\lambda_i$  ισχύει η σχέση:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.24)$$

Με βάση αυτές τις σχέσεις είναι δυνατόν να σχεδιάσουμε ένα διάγραμμα που να εμπλέκει το  $C_P$ , το  $\lambda$  και το  $\beta$  (σε μοίρες). Με τη χρήση του λογισμικού MATLAB παίρνουμε το διάγραμμα του σχήματος



Σχήμα: 2.7:Διάγραμμα του λόγου ακροπτερυγίου  $\lambda$  με το συντελεστή ισχύος  $C_p$

Δεν είναι δύσκολο να διαπιστώσουμε πως η μέγιστη τιμή του  $C_p$  αντιστοιχεί στην τιμή  $\beta=0$ . Η τιμή αυτή του  $\beta$  μπορεί να μας δώσει τη βέλτιστη τιμή και για το  $C_p$  και για το  $\lambda_i$  και το  $\lambda$ . Οπότε:

$$\lambda_i = 8.12 \quad \text{και} \quad \lambda_{opt} = 6.325 \quad (2.25)$$

Τα οποία δίνουν

$$C_{p\_opt} = 0.4382 \quad (2.26)$$

### 2.1.9. Μέγιστη παραγόμενη ενέργεια

Από τη σχέση (2.23) είδαμε ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$  εξαρτάται από την ταχύτητα του ακροπτερυγίου  $\lambda$ . Επίσης είδαμε ότι το  $C_{p\_opt}$  αντιστοιχεί σε ένα  $\lambda_{opt}$ , το οποίο μπορεί να βρεθεί με βάση τη διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένα.

Όπως είναι προφανές από τη σχέση (2.25) το  $\lambda_{opt}$  που υπολογίσαμε νωρίτερα, μπορεί να ορίσει ένα  $\omega_{r\_opt}$  το οποίο πλέον θα εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα του ανέμου, δηλαδή:

$$\omega_{r\_opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad (2.27)$$

Επίσης από τη σχέση (2.22) έχουμε ότι η μηχανική ενέργεια που δίνεται από τον άνεμο είναι:

$$P = \frac{1}{2} \pi \rho C R^2 v^3$$

Όπως είναι γνωστό όμως για τη μηχανική ενέργεια που δεσμεύεται από στρεφόμενη μηχανή ισχύει:

$$P_M = T_M \omega_r \quad (2.28)$$

Οπότε με αντικατάσταση προκύπτει ότι η ροπή:

$$T_M = \frac{1}{2} \pi \rho C_T(\lambda) R^3 v^2 \quad \text{όπου } C_T = \frac{C_P}{\lambda} \quad (2.29)$$

Όπως γίνεται προφανές από την παραπάνω σχέση ένα  $C_{p\_opt}$  και ένα  $\lambda_{opt}$  ορίζουν επίσης ένα  $T_{M\_opt}$ , το οποίο και αυτό είναι εξαρτώμενο μόνο από την ταχύτητα του ανέμου όπως και το  $\omega_{r\_opt}$ :

$$T_{M\_opt} = \frac{1}{2} \pi \rho C_T(\lambda_{opt}) R^3 v^2 \quad (2.30)$$

Από την τελευταία σχέση και επιστρέφοντας στην (2.28) καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως για να επιτευχθεί  $P_{M\_max}$  θα πρέπει να έχουμε λειτουργία στο μέγιστο  $\omega_{r\_opt}$ .

Όπου

$$C_T(\lambda_{opt}) = \frac{C_{opt}}{\lambda_{opt}^3} R^2 \omega_{r\_opt}^2, \quad \text{δηλαδή ισχύει επίσης:}$$

$$T_{M\_opt} = \frac{1}{2} \pi \rho \frac{C_{p\_opt}}{\lambda_{opt}^3} R^5 \omega_{r\_opt}^2 \quad (2.31)$$

## 2.2 Συστήματα αιολικής ενέργειας

### 2.2.1 Ανεμογεννήτριες

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι ανεμογεννήτριες ή ανεμοκινητήρες αποτελούν τα συστήματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας που μετατρέπουν την αιολική ισχύ σε μηχανική ή ηλεκτρική ισχύ.

### 2.2.2 Δομή ανεμογεννήτριας

Η συνηθισμένη ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιείται σήμερα είναι οριζόντιου άξονα και αποτελείται από την άτρακτο στην οποία είναι τοποθετημένη μια γεννήτρια, ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης (κιβώτιο ταχυτήτων, άξονας υψηλών ταχυτήτων και άξονας υψηλών ταχυτήτων), τρία πτερύγια και έναν πύργο που βρίσκεται πίσω από τα πτερύγια έτσι ώστε ο άνεμος να έρχεται από το εμπρόσθιο μέρος.

Ο άνεμος δεσμεύεται στα πτερύγια και μέσω ενός άξονα μεταφέρεται η κίνηση στο κιβώτιο ταχυτήτων. Από εκεί ένας άλλος άξονας μεταφέρει την κίνηση στη γεννήτρια. Δουλειά του κιβωτίου ταχύτητας είναι να πολλαπλασιάζει την τιμή της ταχύτητας του ανέμου που φτάνει σε αυτό από τα πτερύγια. Στη συνέχεια, η γεννήτρια με τη σειρά της είναι συνδεδεμένη με έναν μετασχηματιστή προκειμένου να δίνεται σε τελικό στάδιο η επιθυμητή τάση στο σημείο σύνδεσης με το εκάστοτε τοπικό δίκτυο.

Στη συνέχεια αναλύονται τα δομικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας.

### Πύργος (Tower)

Είναι κυλινδρικής μορφής κατασκευασμένος από ασάλι, ή από ασάλι σε καφασωτή μορφή, σαν πλέγμα και σπανιότερα από σκυρόδεμα και συνήθως αποτελείται από δύο ή τρία συνδεδεμένα τμήματα. Αυτή η δομή του εξυπηρετεί στην αύξηση της αντοχής και την εξοικονόμηση υλικών. Είναι παρόμοιας κατασκευής με τους πύργους που στηρίζουν τα φώτα σε γήπεδα και εθνικούς δρόμους. Η διάμετρος του

πύργου αυξάνει όσο πλησιάζουμε τη βάση και η θεμελίωση γίνεται με οπλισμένο σκυρόδεμα πάνω στο οποίο τοποθετείται με βίδες ο πύργος. Επειδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει με το ύψος, οι ψηλότεροι πύργοι δίνουν τη δυνατότητα στις τουρμπίνες να «αιχμαλωτίσουν» περισσότερη ενέργεια και να παράγουν περισσότερο ηλεκτρισμό. Για παράδειγμα, μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια 1.000kW θα έχει ένα πύργο μεταξύ 50 και 80 μέτρων. Μεγάλης σημασίας είναι η γείωση που πρέπει να έχει η μεταλλική κατασκευή της ανεμογεννήτριας. Πρόσβαση στο εσωτερικό της ανεμογεννήτριας επιτρέπεται μέσω του πύργου.

### **Άτρακτος (Nacelle)**

Η άτρακτος βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, την ηλεκτρική γεννήτρια, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, τον ελεγκτή και το φρένο. Μερικές άτρακτοι είναι τόσο μεγάλοι, ώστε ακόμη και ένα ελικόπτερο να μπορεί να προσγειωθεί πάνω τους.

### **Πλήμνη (Hub)**

Η πλήμνη είναι το μηχανικό εξάρτημα στο οποίο προσαρμόζονται τα πτερύγια. Η πλήμνη συνδέεται με τον άξονα χαμηλών στροφών.

### **Πτερύγια (Blades)**

Τα πτερύγια έχουν αεροδυναμικό σχήμα το οποίο έχει προέλθει από αντίστοιχα πτερύγια αεροπορικών κινητήρων (π.χ. αεροτομές τύπου NACA) και είναι κατασκευασμένα συνήθως από ελαφρά κράματα μετάλλων, ενισχυμένο πολυεστέρα, αλλά και από ξύλο σε συνδυασμό με ειδικές ρητίνες, έτσι ώστε να είναι ανθεκτικά σε μεγάλες καταπονήσεις. Μπορεί να είναι ενιαία ή να διαθέτουν ακροπτερύγια και καλύπτουν ένα μικρό ποσοστό (2% έως 10%) του εμβαδού της περιφέρειας που διαγράφουν. Τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά (αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους, επιλογή αεροτομής, συστροφή) προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης. Η επιλογή του πλήθους των πτερυγίων σχετίζεται με την αεροδυναμική φόρτιση των πτερυγίων, με το βαθμό απόδοσής τους, με το κόστος κατασκευής της ανεμογεννήτριας καθώς και με θέματα αντοχής και συντονισμού λόγω ταλαντώσεων (προβλήματα ιδιοσυχνοτήτων). Επιπλέον, θέματα που συνεκτιμώνται είναι η κυκλική μεταβολή της ροπής της μηχανής λόγω της καθ' ύψος μεταβολής της

ταχύτητας του ανέμου, καθώς και τα θέματα ζυγοστάθμισης των πτερυγίων. Για τον περιορισμό της κυκλικής μεταβολής του φορτίου των πτερυγίων δίνεται μια μικρή κλίση (έως και  $10^\circ$ ) του άξονα περιστροφής ως προς το οριζόντιο. Τέλος, για λόγους περιορισμού των καμπτικών τάσεων πάνω στα πτερύγια, επιβάλλεται συνήθως μια μικρή κωνικότητα αυτών που δεν ξεπερνά τις  $10^\circ$ . Επιπλέον, για λόγους ασφάλειας της ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια είναι συνήθως εφοδιασμένα με συστήματα αεροδυναμικής πέδησης (αερόφρενα), τα οποία διακόπτουν τη λειτουργία της μηχανής σε έκτακτες περιπτώσεις. Σε ειδικές κατασκευές εκτός από την παρουσία των αερόφρενων (π.χ. επίπεδες πλάκες κάθετες στην επιφάνεια του πτερυγίου) χρησιμοποιούνται και μικρά αλεξίπτωτα, που απελευθερώνονται φυγοκεντρικά μετά από κάποιο όριο στροφών και επιβραδύνουν την ανεμογεννήτρια. Για παράδειγμα, σε μια μοντέρνα ανεμογεννήτρια 1.000kW κάθε πτερύγιο έχει μήκος 27m και είναι σχεδιασμένο περίπου όπως ένα φτερό αεροπλάνου. Τα πτερύγια είναι προσδεμένα στην πλήμνη, είτε σταθερά είτε με δυνατότητα περιστροφής γύρω από το διαμήκη άξονά τους, ώστε να μεταβάλλεται το βήμα πτερύγωσης. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες διαθέτουν δύο ή τρία πτερύγια. Είναι αυτά που με την περιστροφή τους, «συλλαμβάνουν» τον αέρα και μεταφέρουν την ισχύ του στην κεφαλή του ρότορα. Τα πτερύγια σε μεγάλες ανεμογεννήτριες περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους και δέχονται τον άνεμο κατά μήκος τους υπό διαφορετικές γωνίες. Η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται προς τη βάση του πτερυγίου. Οι πολύ μεγάλες γωνίες δεν έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Προκειμένου να υπάρχει ενιαία γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος του πτερυγίου, το πτερύγιο έχει μορφή περιστροφική.

### **Ανεμόμετρο & Ανεμοδείκτης (Anemometer & Wind Vane)**

Χρησιμοποιούνται για να μετρούν την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου και μεταφέρουν τα δεδομένα των μετρήσεών τους στον ελεγκτή. Τα ηλεκτρικά σήματα του ανεμομέτρου χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτρια για να αρχίσει τη λειτουργία της όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια ελάχιστη τιμή. Ο υπολογιστής σταματά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας αυτόματα αν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ένα ανώτατο όριο προκειμένου να προστατεύσει την ανεμογεννήτρια και το περιβάλλον αυτής. Τα σήματα του ανεμοδείκτη που αποτελεί ένα μετεωρολογικό όργανο, χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να προσανατολιστεί η ανεμογεννήτρια σωστά απέναντι στον άνεμο, μέσω του μηχανισμού για την αποφυγή εκτροπής.



## **Κιβώτιο ταχυτήτων (Gear box)**

Το κιβώτιο ταχυτήτων ενισχύει την ενεργειακή έξοδο του δρομέα. Είναι τοποθετημένο ακριβώς μεταξύ του δρομέα και της γεννήτριας και τα γρανάζια συνδέουν τον άξονα χαμηλών στροφών που βρίσκεται στα αριστερά, με τον άξονα υψηλών στροφών που βρίσκεται στα δεξιά αυξάνοντας τις ταχύτητες περιστροφής κατά 50 περίπου φορές, από 30 έως 60rpm (στροφές ανά λεπτό) σε 1.000 έως 1.800rpm, που είναι η ταχύτητα περιστροφής που οι περισσότερες ανεμογεννήτριες απαιτούν ώστε να παράγουν ηλεκτρισμό. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα ακριβό και βαρύ εξάρτημα της ανεμογεννήτριας, γι' αυτό και γίνονται προσπάθειες για την κατασκευή ανεμογεννητριών «άμεσης ώθησης» (direct – drive), οι οποίες λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δεν χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων.

## **Άξονας υψηλών ταχυτήτων (High – speed shaft)**

Περιστρέφεται με περίπου 1.000 έως 1.800rpm (στροφές ανά λεπτό) και θέτει σε κίνηση την γεννήτρια. Ο άξονας υψηλής ταχύτητας είναι εξοπλισμένος με το δισκόφρενο το οποίο σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ή περιπτώσεις που το αεροδυναμικό φρένο υποστεί βλάβη ή η ανεμογεννήτρια επισκευάζεται, τίθεται σε λειτουργία.

## **Άξονας χαμηλών ταχυτήτων (Low – speed shaft)**

Συνδέει την πλήμνη με το κιβώτιο ταχυτήτων και περιέχει σωλήνες για το υδραυλικό σύστημα ώστε να μπορεί να λειτουργήσει το αεροδυναμικό φρένο. Ο ρότορας στρέφει τον άξονα χαμηλών ταχυτήτων με ταχύτητες περίπου 30 έως 60 στροφές ανά λεπτό (rpm).

## **Οδηγός για την αποφυγή εκτροπής (Yaw drive)**

Χρησιμοποιείται για να στρέφει τις ανεμογεννήτριες προς τον άνεμο καθώς αυτός μεταβάλλεται. Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με πνοή ανέμου προς τα πάνω (upwind), είναι στραμμένες προς τον άνεμο. Ο οδηγός για την αποφυγή εκτροπής χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι ο δρομέας θα είναι στραμμένος προς τον άνεμο, καθώς ο άνεμος αλλάζει κατεύθυνση. Οι ανεμογεννήτριες που είναι σχεδιασμένες για να λειτουργούν με πνοή ανέμου προς τα κάτω (downwind), δε χρειάζονται αυτό τον οδηγό για την αποφυγή εκτροπής, διότι ο άνεμος φυσά και στρέφει το δρομέα προς τα κάτω.

## **Κινητήρας του οδηγού για την αποφυγή εκτροπής (Yaw motor)**

Είναι ο κινητήρας που δίνει ενέργεια στον οδηγό για την αποφυγή εκτροπών.

## **Δρομέας (Rotor)**

Ο δρομέας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τμήματα της ανεμογεννήτριας. Αποτελείται από τα κινούμενα τμήματα της ανεμογεννήτριας την πλήμνη, τα πτερύγια, τον άξονα χαμηλών ταχυτήτων, των άξονα υψηλών ταχυτήτων και το κιβώτιο ταχυτήτων. Ο δρομέας περιστρέφει τη γεννήτρια, και μέσω αυτού μεταφέρεται η μηχανική ισχύς ώστε να μετατραπεί σε ηλεκτρική μέσω της επαγωγής μέσα στη γεννήτρια. Είναι σχεδιασμένος αεροδυναμικά, για να συλλάβει τη μέγιστη περιοχή επιφάνειας του αέρα, προκειμένου να περιστρέφεται όσο το δυνατόν πιο εργονομικά. Η κατασκευή του δρομέα περιλαμβάνει το 20% περίπου του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένου των πτερυγίων, για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε χαμηλής ταχύτητας περιστροφική ενέργεια.

## **Γεννήτρια (Generator)**

Είναι μια σύγχρονη ή ασύγχρονη γεννήτρια που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την περιστροφή του δρομέα. Συνήθως προτιμώνται οι ασύγχρονες γεννήτριες λόγω της απλότητας της κατασκευής τους, αν και οι σύγχρονες έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε αδύνατα δίκτυα. Η κατασκευή της περιλαμβάνει το 34% περίπου του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας.

## **Φρένο (Brake)**

Είναι ένα δισκόφρενο, το οποίο μπορεί να λειτουργεί μηχανικά, ηλεκτρικά ή υδραυλικά και σταματά το δρομέα σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

## **Μηχανισμός Περιστροφής**

Ο μηχανισμός περιστροφής χρησιμοποιεί ηλεκτρικές μηχανές για να στρέφει την άτρακτο απέναντι στον άνεμο. Ελέγχεται από τον ελεγκτή ο οποίος αντιλαμβάνεται τη διεύθυνση του ανέμου χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του ανεμοδείκτη.

## **Ελεγκτής (Controller)**

Ξεκινά τη μηχανή σε ταχύτητες ανέμου περίπου 4m/s – 7m/s και κλείνει τη μηχανή περίπου στα 25m/s. Οι ανεμογεννήτριες δε μπορούν να δουλεύουν σε ταχύτητες ανέμου πάνω απ' τα 25m/s γιατί οι γεννήτριές τους μπορούν να υπερθερμανθούν ή/και τα πτερύγιά τους να σπάσουν. Ο ελεγκτής περιέχει ακόμα έναν υπολογιστή που παρακολουθεί διαρκώς την κατάσταση της ανεμογεννήτριας και ελέγχει το μηχανισμό περιστροφής. Σε κάθε περίπτωση επιπλοκής, π.χ. υπερθέρμανση του κιβωτίου ταχυτήτων ή της γεννήτριας, σταματά αυτόματα την ανεμογεννήτρια και καλεί τον υπολογιστή του ελεγκτή της ανεμογεννήτριας.

## **Στροφή πτερυγίων (Pitch)**

Τα πτερύγια έχουν τη δυνατότητα να στρίβουν γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, ανεξάρτητα από τον άνεμο, ώστε να μειώνουν τα αεροδυναμικά φορτία πάνω στην πτερύγωση στις μεγάλες ταχύτητες του ανέμου και να τα μειώνουν στις μικρές ταχύτητες. Ελέγχουν δηλαδή την ταχύτητα του δρομέα και τον εμποδίζουν από το να στρίβει σε ανέμους οι οποίοι είναι υπερβολικά ισχυροί ή υπερβολικά ασθενείς για να παράγουν ηλεκτρισμό.

Τέλος, σημαντικό δομικό στοιχείο της ανεμογεννήτριας, αποτελεί ο μετασχηματιστής ο οποίος προσαρμόζει κατάλληλα τη χαμηλή τάση της ανεμογεννήτριας, σε μέση τάση, προκειμένου να μπορεί να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια από το εκάστοτε δίκτυο.

### **2.2.3 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών**

Δύο είναι οι βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι ανεμογεννήτριες. Ο διαχωρισμός αυτός έχει να κάνει με την ταχύτητα περιστροφής. Οπότε έχουμε τη μια κατηγορία, ιστορικά παλαιότερη, η οποία περιλαμβάνει τις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας και μια δεύτερη, νεότερη, η οποία περιλαμβάνει τις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας. Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας αποτελεί πλέον την αποκλειστική τεχνολογία στα αιολικά συστήματα και ως εκ τούτου είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και στο πεδίο της εφαρμογής.

## **Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας (Fixed Speed Wind Turbines – FSWT)**

Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα στάδια ανάπτυξης των ανεμογεννητριών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ταχύτητα του δρομέα δεν προσαρμόζεται σύμφωνα με την ταχύτητα του ανέμου, αλλά καθορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, την αναλογία του κιβωτίου ταχυτήτων, και το σχεδιασμό της γεννήτριας (αριθμός πόλων, τύπο μηχανής κλπ.). Η ολίσθηση των γεννητριών αυτής της κατηγορίας ποικίλλει ανάλογα με την παραγόμενη ενεργό ισχύ, έτσι η ταχύτητα δεν είναι πραγματικά σταθερή, εντούτοις δεδομένου ότι οι μεταβολές της ταχύτητας είναι πολύ μικρές (1% - 2%), θεωρούνται αμελητέες.

Αντιπροσωπευτικότερη τοπολογία ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας είναι αυτή που χρησιμοποιεί μια ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG). Η γεννήτρια στην τοπολογία αυτή, συνδέεται απευθείας με το δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή. Επιπλέον, χρησιμοποιείται μια συστοιχία πυκνωτών για την αντιστάθμιση αέργου ισχύος, αφού η επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού καταναλώνει πάντα άεργο ισχύ. Για την επίτευξη ομαλής εκκίνησης και σύνδεσης με το δίκτυο, χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρονικά ελεγχόμενος προοδευτικός εκκινητής (soft starter).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

### 3.1 Γενικά

Με τον όρο «σύνθετο» ορίζεται ένα υλικό που αποτελείται από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων υλικών σε μακροσκοπική κλίμακα. Τα υλικά που το αποτελούν είναι μακροσκοπικά διακριτά και όχι συνδυασμένα σε μικροσκοπική κλίμακα, όπως τα κράματα. Πρόκειται ουσιαστικά για τη συνύπαρξη δύο ή περισσότερων υλικών στα οποία το ένα ονομάζεται συστατικό ενίσχυσης (reinforcing material) και προσδίδει στο νέο σύνθετο υλικό τις ζητούμενες μηχανικές - και όχι μόνο - ιδιότητες ενώ το δεύτερο ονομάζεται μήτρα (matrix), έχει συνήθως χαμηλή πυκνότητα και βοηθά στη βέλτιστη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του υλικού ενίσχυσης. Τα συμμετέχοντα υλικά συνδυάζουν ένα σύνολο βελτιωμένων ιδιοτήτων, τις οποίες κανένα από μόνο του δεν μπορεί πετύχει. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να είναι:

- Αντοχή
- Στιβαρότητα
- Αντοχή στη διάβρωση
- Αντοχή στη φθορά
- Βάρος
- Διάρκεια ζωής
- Θερμική συμπεριφορά
- Θερμική μόνωση και αγωγιμότητα
- Ακουστική μόνωση

Τα σύνθετα υλικά έχουν μεγάλο ιστορικό χρήσης από την αρχαία εποχή κατά την οποία οι όροι ήταν άγνωστοι, αλλά υπάρχουν αναφορές σε χρήσεις αυτών των υλικών. Οι πολιτισμοί την αρχαίας Μεσοποταμίας και της Αιγύπτου εδώ και 5000 χρόνια χρησιμοποιούσαν άχυρο σαν ενισχυτική ίνα σε τούβλα από λάσπη (Παντελής, 2008) (Jones, 1975).

### 3.2 ΕΙΔΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

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

- Σύνθετα υλικά με ίνες ενίσχυσης (fibrous composites)
- Στρωματικά σύνθετα υλικά (laminated composites)
- Σύνθετα υλικά με σωματίδια ενίσχυσης (particulate composites)

Οι δύο κατηγορίες υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μελέτη μας, όπως προκύπτει και από τη βιομηχανία είναι τα σύνθετα υλικά με ίνες ενίσχυσης και τα στρωματικά σύνθετα υλικά (Παντελής, 2008) (Jones, 1975).

### **3.3 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ (FIBROUS COMPOSITES)**

Η μηχανική αντοχή των σύνθετων υλικών δεν είναι ανάλογη του μέσου όρου των αντοχών των δύο ή περισσότερων υλικών που αποτελούν το σύνθετο, αλλά εξαρτάται από το ενισχυτικό υλικό και το υλικό της μήτρας, τη μηχανική συμπεριφορά των δύο καθώς η μεταξύ τους συμβατότητα. Επίσης εξαρτάται από την κατ'όγκο αναλογία των υλικών και τον προσανατολισμό των ινών ενίσχυσης σε σχέση με την επιβαλλόμενη τάση (Παντελής, 2008) (Jones, 1975).

#### **3.3.1 Ταξινόνηση συνθέτων υλικών με ενίσχυση ινών**

Ειδικά για τον προσανατολισμό των ινών, ο ρόλος του είναι τόσο σημαντικός, ώστε να προκύπτει κατηγοριοποίηση των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών βάσει αυτού ως εξής:

σε μονοδιευθυντικά σύνθετα, δηλαδή υλικά στα οποία οι ενισχυτικές ίνες προσανατολίζονται σε μία κατεύθυνση, και σε πολυδιευθυντικά σύνθετα, όπου οι ενισχυτικές ίνες προσανατολίζονται προς πολλές κατευθύνσεις και διακρίνονται με τη σειρά τους και αυτά σε σύνθετα στα οποία:

- οι ίνες έχουν τυχαίες διευθύνσεις (πίλημα)

- οι ίνες έχουν πλέξη ύφανσης
- οι ίνες έχουν τρισδιάστατη πλέξη (πεπλεγμένο ύφασμα)

Ανάλογα με το μέγεθος του λόγου του μήκους προς τη διάμετρο ( $l/d$ ) οι ίνες διακρίνονται σε συνεχείς (continuous fibers) για  $l/d > 100$  και σε ασυνεχείς (discontinuous fibers) για  $l/d < 100$ . Επιπλέον τριχίτες (whiskers) ονομάζονται οι κοντές ίνες μονοκρυστάλλων κεραμικού υλικού, οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως σε μορφή ενίσχυσης πλέγματος τυχαίας διεύθυνσης (Παντελής, 2008) (Jones, 1975).

### **ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ: ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ**

Οι ίνες ενίσχυσης πρέπει να ενισχύουν σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες της μήτρας και ως εκ τούτου το υλικό κατασκευής τους έχει υψηλό μέτρο ελαστικότητας, υψηλή αντοχή θραύσης και μικρή πυκνότητα. Προκειμένου να επιτευχθούν αυτές οι ιδιότητες στα σύνθετα υλικά, επιλέγονται για υλικά κατασκευής των ινών γυαλί, άνθρακας, πολυμερή, φυσικά ορυκτά, μέταλλα και κράματα ή κεραμικά υλικά (Παντελής, 2008) (Jones, 1975).

#### 1. Ίνες γυαλιού (glass fibers)

Πρόκειται για τις πρώτες ενισχυτικές ίνες που χρησιμοποιήθηκαν από τα σύνθετα υλικά πρώτης γενιάς την δεκαετία του '30 σε μελέτες για υλικά για αεροναυπηγικούς σκοπούς. Η μαζική κατασκευή ινών γυαλιού ανακαλύφθηκε τυχαία από ένα ερευνητή της εταιρείας Owens - Illinois, όταν αυτός έριξε μια δέσμη πεπιεσμένου αέρα σε ένα ρεύμα λιωμένου γυαλιού και παράχθηκαν ίνες. Η εταιρεία συνεργάστηκε με τη Corning ώστε να παράγουν μαζί το 1932 μαζικά ίνες γυαλιού με αυτή τη μέθοδο παραγωγής. Είναι αξιόπιστες και χρησιμοποιούνται εκτενώς ακόμα και σήμερα ως ένα φθηνό υλικό ενίσχυσης. Κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη χημική τους σύσταση σε τύπου E, R και S με τις παρακάτω μηχανικές και φυσικές ιδιότητες:

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	R	S	SiO <sub>2</sub> καθαρή
Χημική Σύσταση (%)				
SiO <sub>2</sub>	54	60	65	>99,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16	25	25	-
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	6	10	-
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (Mpa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

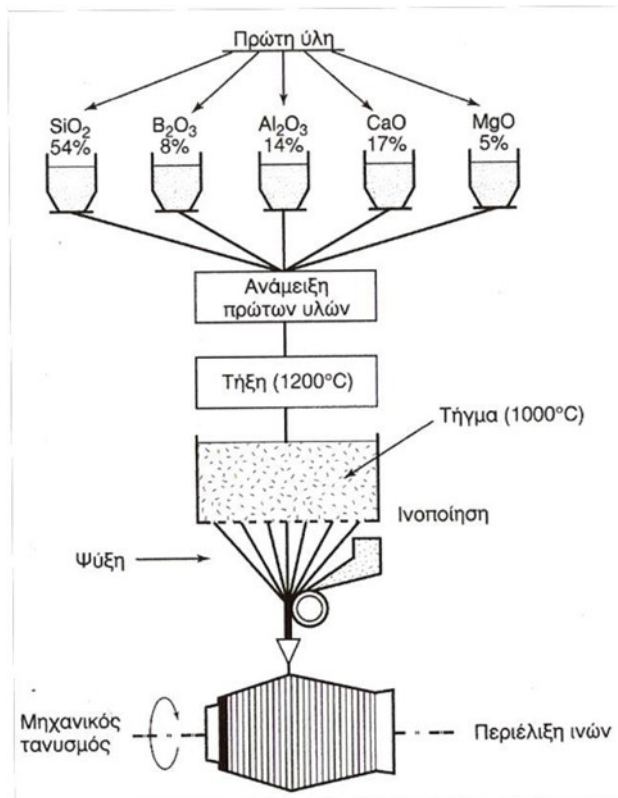
Πίνακας 3-1: Ιδιότητες διαφόρων τύπων ινών γυαλιού

Οι πλέον χρησιμοποιούμενες ίνες γυαλιού είναι η τύπου E με τις παραπάνω περιγραφόμενες μηχανικές ιδιότητες αλλά με μέτρια χημική ανθεκτικότητα. Αντίθετα οι ίνες τύπου R και S είναι χημικά αδρανείς αλλά ακριβότερες σε σχέση με τις τύπου E. Οι ίνες σχεδόν καθαρής πυριτίας χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές.

Μεγάλο πρόβλημα των ινών γυαλιού αποτελεί η μεγάλη ευαισθησία τους σε χαράξεις και γρατζουνιές, οι οποίες δημιουργούν επιφανειακές συγκεντρώσεις τάσης και υποβαθμίζουν τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Η παραγωγή των ινών γυαλιού πραγματοποιείται με την διέλαση τήγματος γυαλιού μέσω μήτρας με διάτρητο πυθμένα. Αναλυτικά, τα υλικά μπαίνουν σε μια δεξαμενή όπου τήκονται. Στη συνέχεια αυτή η δεξαμενή τροφοδοτεί μια σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητους πυθμένες. Με την επίδραση της βαρύτητας, το γυαλί κυλάει μέσα από τις οπές και υπόκειται σε εξόλκευση μηχανικά, ώστε οι παραγόμενες ίνες να φτάσουν σε διάμετρο τα 1-15 μm. Οι παραγόμενες ίνες περιτυλίγονται σε ένα κύλινδρο που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Η τελική τιμή της διαμέτρου των ινών καθορίζεται και ελέγχεται με ρύθμιση της στάθμης του τήγματος στη δεξαμενή (άρα και της ταχύτητας εκροής του τήγματος από τις οπές), της πυκνότητάς του, της διαμέτρου των οπών αλλά και της ταχύτητας περιστροφής του κυλινδρικού τυμπάνου (Παντελής, 2008).





Σχήμα 3-1: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού. (Παντελής, 2008)

Το κόστος της συνεχούς ίνας E-Glass ανέρχεται από 1,30 έως 2,20 EUR/kg υλικού (αναγωγή τιμών 2007) (Callister, 2007).

## 2. Ίνες άνθρακα (carbon fibers)

Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, οι οποίοι εάν προσανατολιστούν παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων εμφανίζουν υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση, αλλά και χαμηλή θερμική διαστολή κατά τον άξονα αυτό.

Για την παραγωγή ανθρακονημάτων χρησιμοποιούνται ίνες πολυακριλονιτριλίου (PAN) και λόγω διαφορών στα στάδια παραγωγής των ινών μπορούμε να παράγουμε δύο διαφορετικά είδη ινών άνθρακα: ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers) και ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus carbon fibers) με τις ιδιότητες που περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμού (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

Σχήμα: 3.2: Ιδιότητες ινών άνθρακα

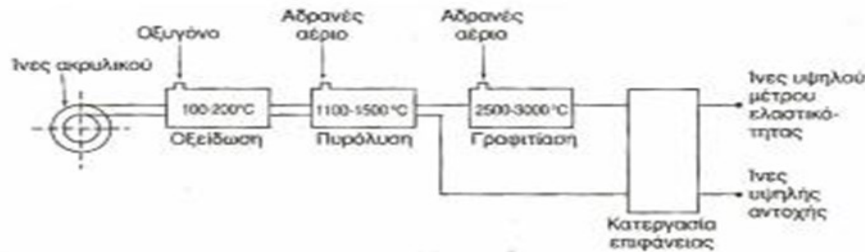
Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500 οC και για τους δύο τύπους ινών. Άρα διαπιστώνουμε ότι για το σχεδιασμό του συνθέτου θα πρέπει να ληφθεί υπ'όψιν και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης του.

Οι ιδιότητες των ανθρακονημάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την πλέξη των ινών του PAN (μονοδιευθυντικές, δισδιάστατο ή τρισδιάστατο πλέγμα). Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διεύθυνση των ινών καθορίζει το βαθμό ανισοτροπίας των ινών που προκύπτουν και ποικίλει από την πλήρη ιστροπία μέχρι την πλήρη ανισοτροπία. Ένα σύνολο διαφοροποιήσεων της θερμοκρασίας κατά την κατασκευή των ανθρακονημάτων οδηγεί στην παραγωγή ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφίτισης άρα και μηχανικών ιδιοτήτων. Όλες οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες εξαρτώνται από το βαθμό γραφίτισης και το βαθμό ανισοτροπίας (Παντελής, 2008).

Για την παραγωγή ανθρακονημάτων, πρώτη ύλη αποτελούν οι ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN). Η παραγωγή ινών γραφίτη από ίνες PAN ορίζεται από τρία στάδια:

- Οξείδωση των ινών PAN με την επιβολή τάσης, παρουσία οξυγόνου σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (100-200 οC). Η επιβολή τάσης είναι επιβεβλημένη, καθώς οδηγεί σε ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.
- Πυρόλυση, ξανά υπό την επιβολή τάσης, σε ουδέτερη ατμόσφαιρα (παρουσία αδρανούς αερίου) και σε θερμοκρασία 1100-1500 οC. Με το τέλος αυτής της διαδικασίας παράγονται οι λεγόμενες ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers), με αντοχή που φτάνει τα 3000 MPa.
- Η θέρμανση συνεχίζεται, σε ίδιο περιβάλλον, αλλά σε υψηλότερες θερμοκρασίες (2500-3000 οC). Στο στάδιο αυτό επιτελείται γραφίτιση, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται ανακρυστάλλωση των ινών, με αποτέλεσμα τον ισχυρό

προσανατολισμό των ινών. Με το τέλος αυτής της διαδικασίας παράγονται οι λεγόμενες ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus carbon fibers), με μέτρο ελαστικότητας περί τα 400 GPa και διάμετρο περίπου 10 μm (Παντελής, 2008).



Σχήμα: 3.3: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα. (Παντελής, 2008)

Το κόστος των ινών άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας κυμαίνεται από 185 έως 230 EUR/kg υλικού (αναγωγή τιμών 2007) (Callister, 2007).

### 3. Νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes)

Οι Νανοσωλήνες Άνθρακα (Carbon Nanotubes - CNTs) αποτελούν σήμερα ένα από τα πιο καινοτόμα και πλέον υποσχόμενα επιτεύγματα της νανοτεχνολογίας. Οι CNTs ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των νανοδομημένων υλικών ή νανοϋλικών, μαζί με τις νανοϊνες άνθρακα (graphite nanofibers - GNFs) και τα φουλερένια (fullerenes - ανθρακικές δομές με σφαιρικό σχήμα).

Οι CNTs είναι ομόκεντροι κύλινδροι γραφίτη, κλειστοί σε κάθε άκρο με πενταμελείς δακτυλίους και χαρακτηρίζονται από νανοκρυσταλλική δομή. Οι CNTs χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους πολυφλοιϊκούς (multi-wall nanotubes - MWNT) που αποτελούνται από ένα κεντρικό σωλήνα ο οποίος περιβάλλεται από ένα ή περισσότερα στρώματα γραφίτη και τους μονοφλοιϊκούς (single-wall nanotubes - SWNT) όπου υπάρχει μόνο ένας σωλήνας και καθόλου επιπλέον στρώματα γραφίτη. Όταν οι CNTs ομαδοποιούνται έχουμε τις λεγόμενες συστοιχίες νανοσωλήνων (nanotubes bundles).

Οι CNTs παρουσιάζουν πολύ υψηλή σκληρότητα. Για τα νανοκρυσταλλικά μέταλλα κόκκων μεγέθους περίπου 10 nm, για παράδειγμα, μπορεί να παρατηρηθεί από 2 έως και 7 φορές περισσότερη σκληρότητα από μέταλλα με μεγαλύτερους κόκκους μεγέθους (περισσότερο από 1μm). Έχουν επίσης αντοχή στον εφελκυσμό

κατά μήκος του άξονά τους 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή του ατσαλιού. Η ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει χωρίς να σπάσει είναι 570 Joule ανά γραμμάριο, τρεις φορές μεγαλύτερη από τον ιστό της αράχνης. Μάλιστα είναι πέντε φορές πιο ισχυρό από το ατσάλι και ξεπερνάει ακόμη και το Kevlar. Επιπλέον, στο εσωτερικό των CNTs η τριβή είναι μηδαμινή, κάνοντάς τους ιδανικούς για την κατασκευή φίλτρων και συστημάτων διήθησης. Χαρακτηρίζονται και από μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητα (αντίστοιχη με αυτή του γραφίτη) (R. Martel, 2001), (Zavalniuk & Marchenko, 2011).

Η παραγωγή νανοσωλήνων άνθρακα γίνεται μέσω των παρακάτω τεχνικών:

- Εξάχνωση ηλεκτροδίων άνθρακα με τη χρήση ηλεκτρικού τόξου εκκένωσης.
- Φωτοδιάσπαση γραφίτη με τη χρήση λέιζερ. Ένα κομμάτι άνθρακα εξατμίζεται με ακτινοβολία από λέιζερ σε υψηλή θερμοκρασία και αδρανή ατμόσφαιρα. Οι παραγόμενοι σωλήνες έχουν μικρή διασπορά ως προς τη διάμετρο.
- Καταλυτική χημική απόθεση από ατμό (Chemical vapor deposition - CVD). Αέριες ενώσεις του άνθρακα (συνήθως υδρογονανθράκων ή μονοξειδίου του άνθρακα) διασπώνται καταλυτικά με τη χρήση μεταλλικών καταλυτών (Fe, Co, Ni) υποστηριγμένων σε υποστρώματα οξειδίων μετάλλων ή αιωρούμενων στην αέρια φάση (Richard E. Smalley, 2006).

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΜΟΝΟΦΛΟΙΪΚΟΙ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ (SWNTs)	ΠΟΛΥΦΛΟΙΪΚΟΙ ΝΑΝΟΣΩΛΗΝΕΣ (MWNTs)
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	940	200-950
Αντοχή σε εφελκυσμού (GPa)	13-53	11-150
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-99	90-99
Επιμήκυνση θραύσης (%)	16	15,6-17,5
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	1,3-1,4	1,6-2,2
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	750	750

Πίνακας 3-2: Ιδιότητες νανοσωλήνων άνθρακα

Το κόστος των πολυφλοϊικών νανοσωλήνων άνθρακα κυμαίνεται από 1800 έως 2300 EUR/kg υλικού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατασκευή των μονοφλοϊικών νανοσωλήνων άνθρακα είναι πιο δύσκολη σε σχέση με των πολυφλοϊικών, ανεβάζοντας το σε δεκάδες χιλιάδες EUR, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια κατασκευής ενώ χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατασκευή υπολογιστικών συστημάτων (<http://www.mknano.com>).

4 Ίνες πολυμερούς (polymer fibers)

Οι συνηθέστερες ίνες πολυμερών είναι αυτές από Nylon, πολυαιρεθάνιο και αραμιδία (αρωματικά πολυαραμιδία - Kevlar). Η εισαγωγή των ινών αραμιδίων στη σχεδίαση σύνθετων υλικών είναι σχετικά πρόσφατη και είναι αρκετά ικανοποιητικά σε προβλήματα χαμηλής στιβαρότητας συνθέτων. Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται οι ιδιότητες δύο βασικών τύπων ινών αραμιδίων (Kevlar):

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4,5	2
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	1,45	1,45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200
Θερμοκρασία αστοχίας (°C)	400	425

Πίνακας 3-3: Ιδιότητες ινών αραμιδίων

Οι ίνες αραμιδίων χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά συνθέτων υλικών με υψηλές προδιαγραφές και απαιτήσεις χαμηλού βάρους, υψηλής αντοχής και στιβαρότητας και αντοχής σε κόπωση (Jones, 1975) (Παντελής, 2008).

Στο παρακάτω σχήμα (2.4) απεικονίζεται η διαδικασία παραγωγής των ενισχυτικών ινών πολυαμιδίου.

Ενδεικτικά, το κόστος των συνεχών ινών αραμιδίων εμπορικής ονομασίας Kevlar 49 ανέρχεται από 30 έως 90 EUR/kg υλικού ανάλογα με την ποιότητα κατασκευής (αναγωγή τιμών 2007) (Callister, 2007).

### 3.3.2 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ: ΜΗΤΡΕΣ

Μήτρα (matrix) χαρακτηρίζεται το βασικό υλικό του συνθέτου που εξασφαλίζει την υψηλή μηχανική αντοχή που προσφέρουν οι ίνες ενίσχυσης. Επίσης ανακόπτουν την διάδοση ρωγμών, οι οποίες ξεκινούν από την θραύση ινών, στο σύνθετο.

Για να ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις, το υλικό της μήτρας πρέπει να είναι αρκετά όλκιμο, ανθεκτικό, σχετικά εύκαμπτο, με θερμοκρασία τήξης υψηλότερη από αυτή της χρήσης του συνθέτου όπως και μια σχετική χημική αδράνεια. Οι ιδιότητες αυτές πρέπει να συνεργάζονται με αυτές των ενισχυτικών ινών όπως και πρέπει να υπάρχει καλή πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας για την καλή λειτουργία του σύνθετου υλικού.

Στα προηγμένα σύνθετα υλικά οι χρησιμοποιούμενες μήτρες είναι κυρίως οργανικές, άνθρακα, μεταλλικές ή κεραμικές (Παντελής, 2008).

### 1. Οργανικές Μήτρες (Organic Matrixes)

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε:

α. Θερμοπλαστικές. Είναι πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Έχουν χαμηλό κόστους και προτείνονται για εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Συνήθη παραδείγματα είναι οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Για την ενίσχυσή τους χρησιμοποιούνται αντίστοιχα φθηνά υλικά όπως αμίαντος και μαρμαρυγίες, ώστε να προκύπτει χαμηλής τιμής τελικό προϊόν.

β. Θερμοσκληρυνόμενες. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Τέτοια υλικά είναι:

Πολυεστερικές ρητίνες, που ενισχύονται με ίνες γυαλιού και θα αποτελέσουν βασικό υλικό μήτρας στη μελέτη.

Εποξειδικές ρητίνες, με καλύτερες ιδιότητες από τις πολυεστερικές και χρήση στην αεροναυπηγική με μέγιστη θερμοκρασία χρήσης τους 200 °C.

Φαινολικές ρητίνες. Έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες, όμως έχουν μέγιστη θερμοκρασία χρήσης τους 400 °C (Jones, 1975), (Παντελής, 2008).

Το κόστος του άμορφου πολυεστέρα ανέρχεται από 2,70 έως 3,80 EUR/kg υλικού (αναγωγή τιμών 2007) (Callister, 2007).

### 2. Μήτρες Άνθρακα (Carbon Matrixes)

Η κατασκευή τους στηρίζεται στην πυρόλυση οργανικών μητρών, όπως στην παραγωγή ανθρακονημάτων. Η δομή τους χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη κόκκων πυρολιπικού άνθρακα, οι οποίοι αποτίθενται στις ίνες εν θερμώ, ώστε να υπάρξει καλή πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρες και να πληρώνονται τα μεταξύ τους κενά. Κατά αυτόν τον τρόπο παράγεται σύνθετο υλικό που προσεγγίζει την πυκνότητα του συμπαγούς άνθρακα. Για την παραγωγή συνθέτων υλικών με ανθρακούχα μήτρα χρησιμοποιούνται οι τεχνικές της χειροποίητης στρώσης και της περιέλιξης νήματος (Παντελής, 2008).

### 3. Μεταλλικές Μήτρες (Metallic Matrixes)

Η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης οργανικών μητρών είναι περίπου 300 °C, ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 500 °C. Επομένως επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μητρών.

Οι μεταλλικές μήτρες σε σχέση με τις οργανικές παρουσιάζουν μεγαλύτερη ολκιμότητα και μηχανικές ιδιότητες, ειδικά σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διαφορετικές διευθύνσεις από αυτές του προσανατολισμού των ινών. Βελτιώνουν

επίσης την ακαμψία και αυξάνουν το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου. Μειώνουν την ευαισθησία του σε διαλύτες και βελτιώνουν την ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα του συνθέτου (για ειδικές εφαρμογές όπου απαιτείται αυτό), ενώ παράλληλα κάνουν και ευκολότερη την σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου μέσω συγκόλλησης ή απλής κόλλησης.

Παρά τα πολλά τους πλεονεκτήματα, τα σύνθετα μεταλλικών ινών τείνουν στη δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στην διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας, που συμβάλλει στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα και οδηγεί σε μικροσκοπικές ρωγμές και θραύση των ενισχυτικών ινών. Επίσης, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας των μετάλλων, αυξάνεται το συνολικό βάρος του συνθέτου άρα και της κατασκευής μας. Επιπλέον, παρουσιάζονται και φαινόμενα διάλυσης των ινών μέσα στη μήτρα σε υψηλές θερμοκρασίες και ασυνέχειες στις καμπύλες εφελκυσμού των σύνθετων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας. Συνολικά, η χρήση μεταλλικών μητρών καθιστά δύσκολη την παραγωγή σύνθετου υλικού και ιδιαίτερα δαπανηρή (Παντελής, 2008) (Jones, 1975).

#### 4. Κεραμικές Μήτρες (Ceramic Matrixes)

Τα κεραμικά υλικά είναι ιδιαίτερα σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και αντοχής στη διάβρωση και τη χημική προσβολή και έτσι αποτελούν υλικά ιδιαίτερου ενδιαφέροντος όσον αφορά την δημιουργία συνθέτων υλικών.

Η παρουσία ινών σε μια κεραμική μήτρα αποσκοπεί στην βελτίωση της αντοχής του κεραμικού σε θερμικά σοκ αλλά και στη βελτίωση της μηχανικής του αντοχής.

Η βελτίωση της αντοχής εξαρτάται άμεσα από το ποσοστό των ινών στο σύνθετο. Η χρήση μεταλλικών, όλκιμων, μικρού μήκους ινών (π.χ. Mo, Ni) βελτιώνουν την αντοχή της κεραμικής μήτρας (π.χ. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) ακόμα και σε μικρά ποσοστά περιεκτικότητας. Αν, αντίθετα, χρησιμοποιούνταν μεγάλου μήκους ψαθυρές ίνες, το αναγκαίο ποσοστό περιεκτικότητας του συνθέτου σε ίνες θα ήταν μεγαλύτερο ώστε να επιτευχθεί η ίδια ενίσχυση.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που συναντάται στη χρήση κεραμικών μητρών είναι η συνάφεια ινών-μήτρας που προέρχεται από τις μεγάλες διαφορές του συντελεστή γραμμικής διαστολής μεταξύ κεραμικής μήτρας και των συνήθων, μεταλλικών, ενισχυτικών ινών (Παντελής, 2008).

Αντικείμενο της μελέτης θα αποτελέσουν αποκλειστικά οι οργανικές ίνες, λόγω απαιτήσεων χαμηλού βάρους και κόστους, καθώς και την ανυπαρξία θερμικών καταπονήσεων στο μοντέλο.

### 3.3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗΤΡΑΣ

Για το σχεδιασμό του συνθέτου υλικού, πέρα από την επιλογή των υλικών ενίσχυσης και μήτρας, λαμβάνονται υπόψη και η γεωμετρία των ινών, ο προσανατολισμός τους, η κατ' όγκο αναλογία τους στο σύνθετο υλικό, αλλά και η ποιότητα της επιφάνειας μεταξύ ίνας και μήτρας.

#### 1. Γεωμετρία Ινών

Ο λόγος ( $s$ ) (aspect ratio) του μήκους ( $l$ ) προς την ακτίνα ( $r$ ) των ινών είναι ο συντελεστής σχήματος της ίνας και παράλληλα τις κατηγοριοποιεί ως συνεχείς, ασυνεχείς ή τριχίτες. Οι συνεχείς ίνες προσδίδουν στο σύνθετο γενικά μεγαλύτερη αντοχή από τις ασυνεχείς και τους τριχίτες.

Σε γενικές γραμμές, η αντοχή των ινών αυξάνεται παράλληλα με αύξηση του μήκους τους και μείωση της διαμέτρου τους. Στις ασυνεχείς ίνες, ορίζεται ένα κρίσιμο μήκος ίνας ( $l_c$ ), με δεδομένη τη διάμετρο της ίνας ( $d$ ), σύμφωνα με τη σχέση:

\_\_\_\_\_

όπου ( $\sigma_{TS}$ )<sub>f</sub> η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό και  $t_i$  η διαμητική τάση στην επιφάνεια μεταξύ ίνας και μήτρας.

Αν το μήκος ίνας είναι μικρότερο από το κρίσιμο μήκος, τότε η ενίσχυση που προσφέρει η ίνα στο σύνθετο είναι ανεπαρκής. Σε μήκη πολύ μεγαλύτερα του κρίσιμου μήκους (τάξεως άνω των  $15l_c$ ), η ίνα συμπεριφέρεται ως συνεχής.

#### 2. Ποσοστό Ινών

Η αύξηση της κατ' όγκο αναλογίας των ενισχυτικών ινών στο σύνθετο επιφέρει αύξηση της αντοχής και της στιβαρότητας στου συνθέτου. Ωστόσο, όταν αυτό το ποσοστό ξεπερνά το 80%, προκύπτει πρόβλημα κατασκευής του συνθέτου, καθώς το υλικό της μήτρας δεν επαρκεί για κάλυψη των ενισχυτικών ινών.

Σε πολλές κατασκευές, για επίτευξη καλύτερης ενίσχυσης, χρησιμοποιείται παραπάνω από ένας τύπος ινών ενίσχυσης. Αυτά τα υλικά ονομάζονται **υβριδικά σύνθετα (hybrid composites)**. Τέτοιο παράδειγμα είναι η εισαγωγή ινών kenlag αναμειγμένες με ανθρακονήματα, ώστε να βελτιωθεί η στιβαρότητα του συνθέτου ή η ανάμιξή του με ίνες γυαλιού ώστε να βελτιωθεί η δυσκαμπτότητα του παραγόμενου συνθέτου.



### 3. Προσανατολισμός Ινών

Χρησιμοποιούνται ίνες διαφόρων προσανατολισμών ώστε η ενίσχυση που προσφέρεται να είναι όσο πιο ισότροπη γίνεται.

Η ενίσχυση με συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες προσδίδει ισχυρή ανισοτροπία στο σύνθετο, ενώ η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την

διεύθυνση επιβολής τους φορτίου. Για παράδειγμα, σε μια εφελκυστική φόρτιση παράλληλα στις ίνες ενίσχυσης, η παραμόρφωση των ινών ( $\epsilon_f$ ) ισούται με αυτή της μήτρας ( $\epsilon_m$ ) και του συνθέτου ( $\epsilon_c$ ) συνολικά και πρόκειται για προσανατολισμό υψηλού μέτρου ελαστικότητας και ισχύει η ισότητα:

$$\epsilon_f = \epsilon_c = \epsilon_m \quad (\text{ίσες παραμορφώσεις})$$

Αντίθετα, σε μια εφελκυστική φόρτιση με διεύθυνση κάθετη ως προς τις ίνες, το φορτίο που παραλαμβάνεται από τις ίνες ( $\sigma_f$ ) και ισούται με αυτό που παίρνει η μήτρα ( $\sigma_m$ ) και το σύνθετο υλικό ( $\sigma_c$ ) ορίζει την περίπτωση του προσανατολισμού χαμηλού μέτρου ελαστικότητας, όπου ισχύει η ισότητα:

$$\sigma_f = \sigma_c = \sigma_m \quad (\text{ίσα φορτία})$$

Γενικά, σε ένα σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη στιβαρότητα και αντοχή επιτυγχάνεται αν η τάση που εφαρμόζεται είναι παράλληλη στον προσανατολισμό των ινών.

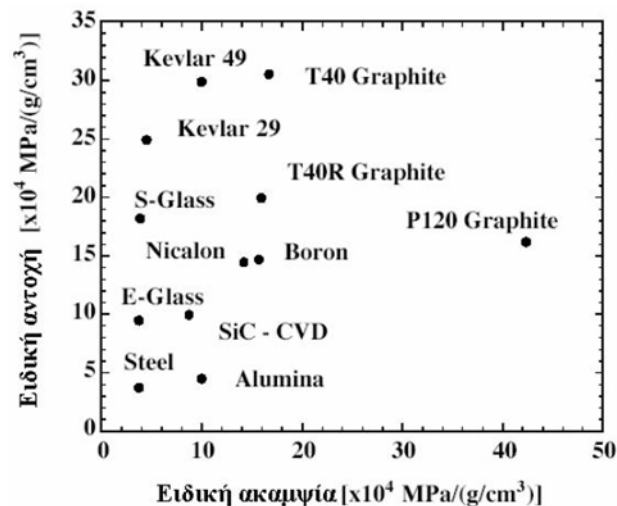
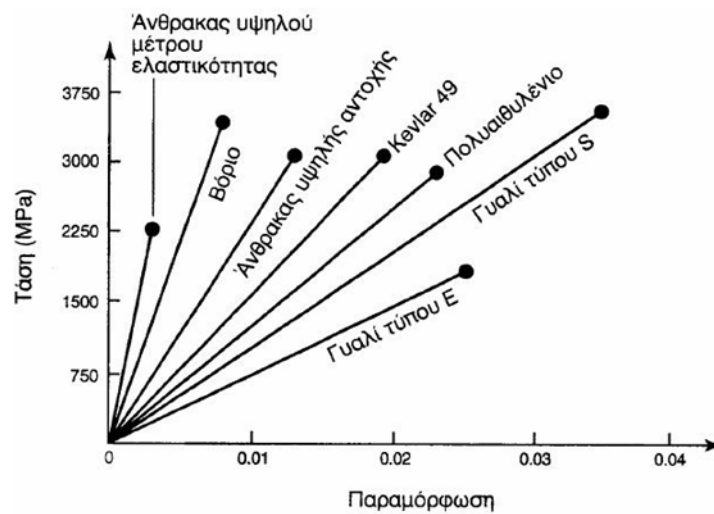
Τα σύνθετα υλικά σπάνια είναι μονοστρωματικά. Συνήθως υπάρχουν πάνω από ένα στρώματα ενίσχυσης ινών. Αν έχουν όλα τον ίδιο προσανατολισμό, το υλικό είναι ανισότροπο, ενώ αν υπάρχει ανά στρώμα διαφορετικός προσανατολισμός ινών, το σύνθετο που προκύπτει χαρακτηρίζεται ισότροπο. Ισότροπα χαρακτηρίζονται και τα σύνθετα με ίνες σε τυχαίες κατευθύνσεις.

Η ονομασία του πολυστρωματικού συνθέτου αναφέρει τη διαδοχή των προσανατολισμών, π.χ. ένα σύνθετο [45/90<sub>2</sub>/0/-45], αποτελείται από 5 στρώσεις όπου, διαδοχικά από την κάτω επιφάνεια, η πρώτη έχει γωνία 45° με τον διαμήκη άξονα του συνθέτου, οι δύο επόμενες είναι κάθετες στον άξονα, η τέταρτη έχει τη διεύθυνση του διαμήκη άξονα ενώ η πέμπτη σχηματίζει γωνία -45° (ή 315°) (Παντελής, 2008).

### 4. Ιδιότητες Ινών

Για τη σύγκριση διαφόρων ινών ως προς τις μηχανικές ιδιότητές τους, χρησιμοποιούνται τα ανηγμένα μεγέθη του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής ως προς την πυκνότητα των ινών και καλούνται ως ειδικό μέτρο ελαστικότητας (specific modulus) και ειδική αντοχή (specific strength). Τη μέγιστη ειδική αντοχή

( $\sigma/\rho$ ) παρουσιάζουν οι ίνες πολυαιθυλενίου και το Kevlar, ενώ το μέγιστο ειδικό μέτρο ελαστικότητας ( $E/\rho$ ) παρουσιάζουν οι ίνες B και C. Το πολυαιθυλένιο παρουσιάζει μεγαλύτερο λόγο  $\sigma/\rho$  καθώς έχει μικρότερη πυκνότητα, αλλά δεν συνιστάται για χρήση σε θερμοκρασίες άνω των 300 °C. Οι ίνες γυαλιού παρουσιάζουν καλή αντοχή ( $\sigma$ ) και υψηλό μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ), αλλά έχουν συγκριτικά μεγάλη πυκνότητα, με αποτέλεσμα οι ίνες γυαλιού να παρουσιάζουν χαμηλότερη ειδική αντοχή σε σχέση με τις υπόλοιπες ίνες (Παντελής, 2008).



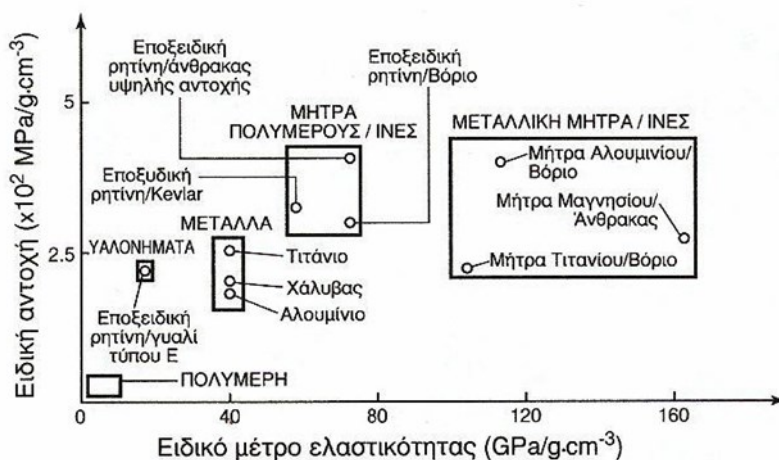
Σχήμα: 3.4:α) Καμπύλες εφελκυσμού χαρακτηριστικών τύπων ενισχυτικών ινών. (β) Σύγκριση διαφόρων ινών ως προς την ειδική αντοχή και την ειδική ακαμψία τους. (<http://courseware.mech.ntua.gr>)

## 5. Συνάφεια Ινών-Μήτρας

Η καλή συνάφεια ινών-μήτρας αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα καλής λειτουργίας του συνθέτου. Οι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά τάσεων μεταξύ των υλικών του συνθέτου. Σε αντίθετη περίπτωση, η κακή συνάφεια οδηγεί σε εκρίζωση των ινών από τη μήτρα, οδηγώντας το σύνθετο υλικό σε ταχύτερη αστοχία. Σημαντική σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η σύγκλιση των συντελεστών θερμικής διαστολής μήτρας-ίνας. Για καλύτερη συνάφεια συχνά οι ίνες επικαλύπτονται με ουσίες που εξασφαλίζουν καλύτερη συνάφεια με το υλικό της μήτρας, χωρίς βέβαια η ουσίες επικάλυψης να αποτελούν ενισχυτικό στοιχείο της αντοχής των ινών (Παντελής, 2008).

## 6. Επιλογή Υλικών Συνθέτου

Το βασικότερο στοιχείο στο σχεδιασμό ενός συνθέτου είναι η επιλογή του κατάλληλου τύπου ινών (ή ακόμα και περισσότερων από έναν τύπο ινών) για την ενίσχυση μιας μήτρας συγκεκριμένου υλικού. Οι παρακάτω πίνακες δείχνουν τις περιοχές σύγκλισης των υλικών ινών-μήτρας, ώστε να επιτύχουμε τη ορθότερη χρήση ινών για δεδομένη μήτρα. Για εφαρμογές που περιλαμβάνουν και υψηλές θερμοκρασίες χρήσης, διαφοροποίηση της συμπεριφοράς μήτρας-ινών στις τιμές του ειδικού μέτρου ελαστικότητας και ειδικής αντοχής, αποτελεί τον βασικότερο παράγοντα εκλογής ή απόρριψης των υλικών ενός συνθέτου, κάτι που δεν ισχύει για εφαρμογές σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος (Παντελής, 2008).



Σχήμα 3.5: Περιοχές ειδικής αντοχής και ειδικού μέτρου ελαστικότητας χαρακτηριστικών τύπων συνθέτων υλικών με ενίσχυση ινών. (Παντελής, 2008)

### 3.3.4 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ

#### 1. Συμπεριφορά σε εφελκυσμό

Τα εφελκυστικά φορτία αποτελούν τη συνηθέστερη μορφή φόρτισης των συνθέτων υλικών κατά τη χρήση τους, καθώς αποτελεί και την περίπτωση φόρτισης όπως εμφανίζουν και τη βέλτιστη συμπεριφορά. Υπάρχουν δύο υποπεριπτώσεις συμπεριφοράς απέναντι σε εφελκυσμό συνθετών είτε με συνεχείς είτε με ασυνεχείς ίνες.

#### ι) ΣΥΝΕΧΕΙΣ ΜΟΝΟΔΙΕΥΘΥΝΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Όταν αναμειγνύουμε δύο υλικά με γραμμική ελαστική συμπεριφορά και διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας, το υλικό που προκύπτει θα έχει και αυτό γραμμική ελαστική συμπεριφορά.

Όταν ένα δοκίμιο σύνθετου υλικού με ίνες ενίσχυσης εφελκύεται, η συνολική δύναμη που ασκείται ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων που αναλαμβάνουν οι ίνες και η μήτρα:

$$F_c = F_f + F_m \xrightarrow{F=\sigma A} \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \implies \sigma_c A_c = \sigma_f (A_f/A_c) + \sigma_m (A_m/A_c)$$

Θεωρώντας ότι όλες οι ίνες έχουν το ίδιο μήκος στο εξεταζόμενο δοκίμιο, οι λόγοι  $A_f/A_c$  και  $A_m/A_c$  ισούνται, αντίστοιχα, με τα κατ' όγκο ποσοστά των ινών ( $V_f$ ) και της μήτρας ( $V_m$ ). Επίσης, βάσει του νόμου του Hooke ( $\sigma = E\varepsilon$ ) και με δεδομένη την ισχύ για κάθε συστατικό του συνθέτου καταλήγουμε στο ότι:

(α) Το μέτρο ελαστικότητας ( $E_{c\parallel}$ ) σύνθετου υλικού με ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών, όταν εφελκύεται παράλληλα προς τη διεύθυνση των ενισχυτικών ινών, θα δίνεται από τον γραμμικό συνδυασμό των μέτρων ελαστικότητας των ινών ( $E_f$ ) και της μήτρας ( $E_m$ ) από τη σχέση:

$$E_{c\parallel} = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$

(β) Στην περίπτωση που ο εφελκυσμός του σύνθετου υλικού πραγματοποιείται κάθετα στη διεύθυνση των ινών (ισότητα τάσεων) το μέτρο ελαστικότητας ( $E_{c\perp}$ ) του σύνθετου προκύπτει από τη σχέση:

$$E_{c\perp} = \left[ \frac{V_f}{E_f} + \frac{(1 - V_f)}{E_m} \right]^{-1}$$

Έστω ότι έχουμε μια όγκιμη μήτρα που περιέχει κατ' όγκο ποσοστό  $V_f$  μονοδιευθυντικών συνεχών ινών. Αν υποβάλλουμε το σύνθετο αυτό σε εφελκυσμό κατά τη διεύθυνση των ινών, η επιμήκυνση του θα ισούται με την επιμήκυνση των ινών και της μήτρας ( $\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$ ). Η

αντοχή του συνθέτου σε εφελκυσμό  $(\sigma_{TS})_c$ , βάσει του κανόνα των μειγμάτων, θα δίνεται από τη σχέση:

$$(\sigma_{TS})_c = V_f(\sigma_{TS})_f + (1 - V_f)\sigma_m$$

όπου  $(\sigma_{TS})_f$  η αντοχή των ινών σε εφελκυσμό και  $\sigma_m$  η τάση στη μήτρα τη στιγμή της θραύσης των ινών.

Για όλκιμη, αντίστοιχα, μήτρα στην τιμή της τάσης  $\sigma_m$  αντιστοιχεί παραμόρφωση  $\epsilon_c = \epsilon_m$ , η οποία ισούται με την επιμήκυνση  $(A_f)$  των ινών κατά τη θραύση τους:

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{TS})_f}{E_f} E_m = A_f E_m$$

όπου  $E_m$  το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας και  $E_f$  το μέτρο ελαστικότητας των ινών.

Αντίστοιχα προκύπτει και η έκφραση για τη στιβαρότητα του σύνθετου υλικού:

$$E_c = V_f E_f + (1 - V_f) \frac{d\sigma_m}{d\epsilon_m}$$

όπου  $d\sigma_m/d\epsilon_m$  η κλίση της καμπύλης εφελκυσμού της μήτρας για το σημείο όπου η ασκούμενη τάση στη μήτρα έχει την τιμή  $\sigma_m$ .

Αν η τιμή  $\sigma_m$  βρίσκεται στην ελαστική περιοχή της καμπύλης εφελκυσμού, τότε η κλίση  $d\sigma_m/d\epsilon_m$  ισούται με το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας ( $E_m$ ) και η παραπάνω σχέση προκύπτει ως εξής:

$$E_c = V_f E_f + V_m E_m$$

Για να παρουσιάζει το σύνθετο υλικό καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τη μήτρα, θα πρέπει το κατ' όγκο ποσοστό των ινών ( $V_f$ ) να υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή.

Πρακτικά δηλαδή, ένα μικρό ποσοστό ινών δε βελτιώνει τη μηχανική αντοχή της μήτρας, αφού η εφαρμοζόμενη τάση αναλαμβάνεται από την όλκιμη μήτρα, η οποία συνεχίζει να παραμορφώνεται. Οι ίνες του σύνθετου υλικού θραύονται όταν η παραμόρφωσή του γίνει ίση με την τιμή της επιμήκυνσης θραύσης των ινών ( $A_f$ ). Επομένως, η αντοχή σε εφελκυσμό του συνθέτου  $(\sigma_{TS})_c$  είναι ίση με την αντοχή σε εφελκυσμό της μήτρας, η οποία συμμετέχει στο σύνθετο με κατ' όγκο ποσοστό  $(1 - V_f)$ . Η συνθήκη αυτή εκφράζεται από τη σχέση:

$$(\sigma_{TS})_c = (1 - V_f)(\sigma_{TS})_m$$

Από την παραπάνω σχέση και από αυτή της αντοχής του σύνθετου στον εφελκυσμό μπορεί να καθοριστεί μια τιμή ελάχιστου ποσοστού ινών  $(V_f)_{min}$ , ώστε:

$$(V_f)_{min} = \frac{(\sigma_{TS})_m - \sigma_m}{(\sigma_{TS})_f + (\sigma_{TS})_m - \sigma_m}$$

Αν θεωρήσουμε τον όρο  $(\sigma_{TS})_m$  -  $\sigma_m$  αμελητέο ως προς την τιμή του όρου  $(\sigma_{TS})_f$ , η παραπάνω σχέση απλουστεύεται:

$$(V_f)_{min} = \frac{(\sigma_{TS})_m - \sigma_m}{(\sigma_{TS})_f}$$

Για ποσοστό ινών  $(V_f)$  από 0 έως την ελάχιστη τιμή  $(V_f)_{min}$ , η αντοχή σε εφελκυσμό για το σύνθετο είναι μικρότερη από αυτή της μήτρας.

Για να μπορέσουν οι ίνες να θεωρηθούν ενισχυτικές θα πρέπει η αντοχή του συνθέτου να είναι τουλάχιστον ίση με αυτή της μήτρας:

$$(\sigma_{TS})_c \geq (\sigma_{TS})_m$$

Από την παραπάνω σχέση και από αυτή της αντοχής του συνθέτου στον εφελκυσμό μπορεί να καθοριστεί το κρίσιμο ποσοστό ινών  $(V_f)_{cr}$ , ώστε:

$$(V_f)_{cr} = \frac{(\sigma_{TS})_m - \sigma_m}{(\sigma_{TS})_f - \sigma_m}$$

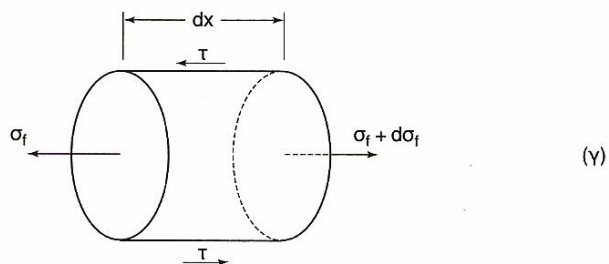
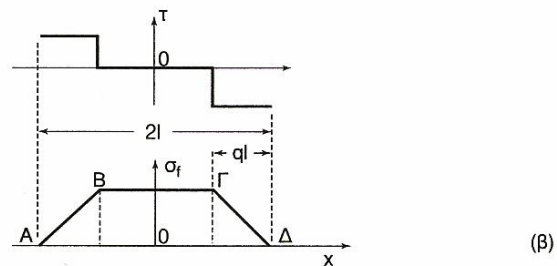
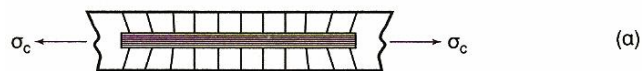
(Παντελής, 2008)

## ii) ΑΣΥΝΕΧΕΙΣ ΜΟΝΟΔΙΕΥΘΥΝΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Στην πραγματικότητα, η χρήση συνεχών ινών (πολύ μεγάλου μήκους) είναι σπάνια. Συνήθως χρησιμοποιούνται ίνες με συγκεκριμένο μήκος, το οποίο επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μηχανική συμπεριφορά του συνθέτου.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή τάσεων μεταξύ της μήτρας και μιας ασυνεχούς ίνας μήκους  $2l$ . Κατά την εφαρμογή τάσης  $\sigma_c$  στο σύνθετο, λόγω της μεταφοράς τάσεων, η ίνα υφίσταται τάση  $(\sigma_f)$ .

Η μεταφορά προκύπτει μέσω της διεπιφάνειας μήτρας-ίνας, η οποία δέχεται διατμητικές τάσεις. Όσο αυξάνεται η τιμή της τάσης  $\sigma_c$ , τόσο αυξάνεται και η τάση  $\sigma_m$  που αναλαμβάνει η μήτρα. Όταν η τάση αυτή φτάσει το όριο ελαστικότητας της μήτρας  $(\sigma_y)_m$ , αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση της μήτρας, ξεκινώντας από τα άκρα της ίνας, όπου η διατμητική τάση είναι μέγιστη. Η διαρκής πλαστική παραμόρφωση της μήτρας έχει σαν αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση του ποσοστού της επιβαλλόμενης τάσης που παραλαμβάνει η ίνα. Το σύνθετο αστοχεί όταν επέλθει θραύση της ίνας, όταν δηλαδή η τάση  $\sigma_f$  πάρει την τιμή  $(\sigma_{TS})_f$ .



Σχήμα: 3.6(α) Όλκιμη μήτρα ενισχυμένη με ασυνεχή ίνα μήκους  $2l$ , υπόκειται σε εφελκυσμό. (β) Κατανομή των αξονικών τάσεων στην ίνα και των διατμητικών τάσεων στην περιοχή της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας. (γ) Ισορροπία δυνάμεων σε στοιχειώδες τμήμα  $dx$  ίνας μ (Παντελής, 2008)

Στα ακραία τμήματα  $AB$  και  $\Gamma\Delta$  είναι οι περιοχές που πραγματοποιείται η σταδιακή μεταφορά τάσεων προς την ίνα. Στο στοιχειώδες τμήμα της ίνας, μήκους  $dx$ , η τιμή της αξονικής τάσης μεταβάλλεται από  $\sigma_f$  σε  $\sigma_f + d\sigma_f$ , ενώ στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας ασκείται διατμητική τάση ( $\tau$ ). Το στοιχειώδες αυτό τμήμα ισορροπεί, όταν το άθροισμα των ασκούμενων σε αυτό δυνάμεων είναι μηδέν:

$$(\pi r^2) \cdot d\sigma_f = -(2\pi r dx) \cdot \tau \Rightarrow \frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau}{r}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\sigma_f=0$ , όταν  $x=l$ , αν ολοκληρώσουμε την παραπάνω σχέση παίρνουμε:

$$\sigma_f = \frac{2\tau}{r}(1-x)$$

Σε ίνα με πολύ μεγάλο μήκος, η τάση  $\sigma_f$  παίρνει τη μέγιστη τιμή της στο κεντρικό τμήμα της ίνας ( $B\Gamma$ ), με μήκος που προσδιορίζεται:

$$-l(1-q) \leq x \leq l(1-q)$$

Με δεδομένο το συντελεστή σχήματος της ίνας ( $s=l/r$ ), η μέγιστη τάση στο κεντρικό τμήμα της ίνας δίνεται από τη σχέση:

$$(\sigma_f)_{max} = 2qs\tau$$

Στο σύνθετο υλικό υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ευθυγραμμισμένων ασυνεχών ινών. Ένα οποιοδήποτε επίπεδο κάθετο σε αυτές τις τέμνει σε διαφορετικές τιμές του άξονα  $x$ . Για ένα τέτοιο επίπεδο, η μέση τιμή της τάσης που παραλαμβάνουν οι ίνες, μπορεί να καθοριστεί από τη σχέση:

$$\bar{\sigma}_f = (\sigma_f)_{max} \left(1 - \frac{q}{2}\right)$$

Με εφαρμογή των κανόνα των μειγμάτων, η συνολική τάση που παραλαμβάνεται από το σύνθετο ( $\sigma_c$ ) είναι:

$$\sigma_c = V_f \bar{\sigma}_f + (1 - V_f) \bar{\sigma}_m$$

όπου η μέση τάση που ασκείται στη μήτρα.

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\sigma_c = V_f (\sigma_f)_{max} \left(1 - \frac{q}{2}\right) + (1 - V_f) \bar{\sigma}_m$$

Οι παραμορφώσεις της ίνας και της μήτρας στο μεσαίο τμήμα (ΒΓ) είναι ίσες. Αν η παραμόρφωση της μήτρας συμβαίνει στην ελαστική περιοχή (δηλαδή: ), η παραμόρφωση του συνθέτου προκύπτει από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{(\sigma_f)_{max}}{E_f} = \frac{\bar{\sigma}_m}{E_m}$$

Με βάση τα παραπάνω, η τάση που παραλαμβάνεται από το σύνθετο δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_c = [V_f E_f + (1 - V_f) E_m] \varepsilon - \frac{V_f E_f^2 \varepsilon^2}{4\tau s}$$

Η σχέση αυτή ισχύει όταν το μήκος της ίνας που υφίσταται τη μέγιστη διάτμηση σε κάθε άκρο της είναι μικρότερο ή ίσο του  $l$  ( $q \leq 1$ ).

Μπορούμε επίσης να υπολογίσουμε τη μέγιστη παραμόρφωση της ίνας, για την οποία ισχύει η παραπάνω σχέση, ως:

$$\varepsilon_{max} = \frac{2\tau s}{E_f}$$



Στην οριακή περίπτωση που η ίνα βρίσκεται σε διατμητική κατάσταση ( $q=1$ ), η σφ ισούται με  $(\sigma_f)_{\max}/2$  και από τα παραπάνω προκύπτει:

$$\sigma_c = V_f \cdot s \cdot \tau + (1 - V_f)E_m \cdot \varepsilon$$

Οι παραπάνω σχέσεις προκύπτουν από το θεωρητικό υπολογισμό της καμπύλης εφελκυσμού του σύνθετου υλικού σε συνάρτηση με τις μηχανικές ιδιότητες που διέπουν τις ίνες και τη μήτρας ( $E_f$  και  $E_m$ ), το συντελεστή σχήματος ( $s$ ) των ινών και το κατ' όγκο ποσοστό τους ( $V_f$ ).

Οι ίδιες σχέσεις θέτουν και τους περιορισμούς στη χρήση ενός συνθέτου. Για παράδειγμα η μέγιστη τάση  $(\sigma_f)_{\max}$  δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή σε θραύση των ινών  $(\sigma_{TS})_f$ . Επίσης, θα πρέπει να καθορίζεται αν η ελαστική παραμόρφωση της μήτρας γίνεται πριν την θραύση των ινών.

Επιπλέον σημαντικό ρόλο στην ορθή κατανομή του επιβαλλόμενου φορτίου παίζει η διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, η οποία υφίσταται διατμητική τάση  $\tau$ . Γενικά, για τα σύνθετα μεταλλικής μήτρας, η πρόσφυση ίνας-μήτρας είναι πολύ καλή και μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η τιμή του  $\tau$  ισούται με την αντοχή της μήτρας σε διάτμηση ( $\tau_m = (\sigma_Y)_m/2$ ). Για σύνθετα μήτρας πολυμερούς, η πρόσφυση ίνας-μήτρας δεν είναι ιδανική και η διατμητική τάση ( $\tau$ ) οφείλεται σε δυνάμεις τριβής, οι οποίες αναπτύσσονται λόγω του θλιπτικού φορτίου που φέρουν οι ίνες εξαιτίας της συστολής της μήτρας κατά τον πολυμερισμό της. Η διατμητική τάση προκύπτει από το γινόμενο  $\mu\sigma$ , όπου  $\mu$  είναι ο συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας (τιμή 0,2-0,3) και  $\sigma$  η τάση (τιμή της τάξης των 20-30 MPa). Επομένως η διατμητική τάση είναι της τάξης των μερικών MPa. Σε αυτή την περίπτωση φαίνεται ότι ο συντελεστής σχήματος αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Θεωρώντας ότι οι ίνες έχουν ψαθυρή συμπεριφορά και η μήτρα ιδανική ελαστοπλαστική, μια υπόθεση γενικά αποδεκτή στα σύνθετα υλικά, βάσει της τιμής του συντελεστή σχήματος προκύπτουν τρεις περιπτώσεις:

- Υψηλός Συντελεστής Σχήματος:

Αποτελεί την περίπτωση ινών μεγάλου μήκους και μικρής διαμέτρου. Η αυτή την περίπτωση η σχέση που αφορά την τάση που επιβάλλεται στο σύνθετο διαμορφώνεται ως εξής:

$$\sigma_c = [V_f E_f + (1 - V_f)E_m] \varepsilon$$

Το μέτρο ελαστικότητας δίδεται από την παρακάτω σχέση που προκύπτει με εφαρμογή του νόμου των μειγμάτων:

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon} = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$

Στην περίπτωση που ο συντελεστής σχήματος τείνει στο άπειρο, η αντοχή του σύνθετου σε εφελκυσμό ( $\sigma_{TS}$ ) εξαρτάται από την αντοχή των ινών ( $(\sigma_f)_{max} = (\sigma_{TS})_f$ ) και η παραμόρφωση του συνθέτου τη στιγμή της θραύσης ισούται με την επιμήκυνση θραύσης των ινών ( $\varepsilon = A_1$ ). Βάσει των παραπάνω, η αντοχή του σύνθετου σε εφελκυσμό δίδεται από τη σχέση:

$$(\sigma_{TS})_c = V_f (\sigma_{TS})_f + (1 - V_f) E_m A_1$$

- Μέτριος Συντελεστής Σχήματος

Στην περίπτωση όπου ο συντελεστής σχήματος δεν έχει πολύ υψηλή τιμή, στη σχέση:

$$\sigma_c = [V_f E_f + (1 - V_f) E_m] \varepsilon - \frac{V_f E_f^2 \varepsilon^2}{4\tau s}$$

ο παράγοντας ( $V_f E_f^2 \varepsilon^2 / 4\tau s$ ) δεν είναι αμελητέος άρα δεν μπορεί να αγνοηθεί, η τάση δεν μεταβάλλεται γραμμικά με την παραμόρφωση. Λόγω μείωσης της τιμής του  $s$ , καμπύλη  $\sigma = f(\varepsilon)$  έχει μεγαλύτερη κλίση.

- Χαμηλός Συντελεστής Σχήματος

Για την περίπτωση όπου ο συντελεστής σχήματος λάβει τιμή μικρότερη από μια κρίσιμη τιμή  $s^*$ , πλέον το μήκος των ινών γίνεται πολύ μικρό για μπορέσουν οι ίνες να αναλάβουν μέγιστη τάση η οποία να προσεγγίζει την αντοχή τους  $(\sigma_{TS})_f$ . Η κρίσιμη τιμή του συντελεστή σχήματος προκύπτει όταν αντικαταστήσουμε στη σχέση της μέγιστης τάσης στο κέντρο της ίνας τους όρους  $q=1$  και  $(\sigma_f)_{max} = (\sigma_{TS})_f$ :

$$s^* = \frac{(\sigma_{TS})_f}{2\tau}$$

Κατόπιν τούτο, η τάση που επιβάλλεται στο σύνθετο προκύπτει από τη σχέση:

$$\sigma = V_f s \tau + (1 - V_f) \sigma_m$$

## 2. Συμπεριφορά σε θλίψη

Αντίθετα με τα κεραμικά τα οποία παρουσιάζουν μια πολύ καλή συμπεριφορά στα θλιπτικά φορτία, τα σύνθετα υλικά με ίνες παράλληλες στην διεύθυνση της τάσης, ενώ

παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε εφελκυστικά φορτία, δεν αντοποκρίνονται τόσο καλά στα θλιπτικά.

Η κατώτερη συμπεριφορά των σύνθετων με ενίσχυση ινών σε θλίψη σε σχέση με αυτή που εμφανίζουν στα θλιπτικά φορτία οφείλονται στα φαινόμενα κύρτωσης, αναδίπλωσης και συστροφής των ινών ενίσχυσης (buckling effect), που προκαλούνται με την εφαρμογή των θλιπτικών αυτών φορτίων. (Παντελής, 2008)

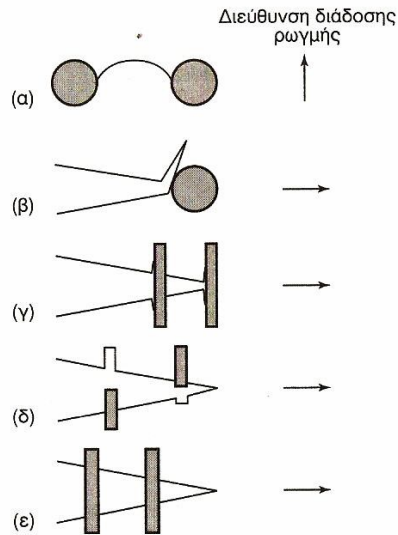
### 3. Δυσθραυστότητα συνθέτων υλικών με ενίσχυση ινών

Ως δυσθραυστότητα (toughness) ορίζεται η ικανότητα ενός υλικού να απορροφά ενέργεια και να παραμορφώνεται πλαστικά χωρίς να θραύεται (Larson, 2011).

Χαρακτηριστικό μέγεθος της δυσθραυστότητας είναι και το ποσό της ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας που ( $G_c$ ) που απορροφά το υλικό κατά τη θραύση του. Σε γενικές γραμμές, για τον υπολογισμό της δυσθραυστότητας σε σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί ο κανόνας των μιγμάτων.

Στο παραπάνω κεφάλαιο αναγνωρίσαμε το γεγονός ότι το μήκος των ινών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα του μηχανισμού αστοχίας του συνθέτου. Στην περίπτωση που ο συντελεστής σχήματος των ινών ( $s$ ) είναι μικρότερος της κρίσιμης τιμής ( $s^*$ ), οι ίνες δεν θραύονται. Παρόλα αυτά, κατά τη διάδοση της ρωγμής (crack propagation, γίνεται αποκόλληση των ινών από τη μήτρα, οι οποίες απορροφούν ένα μέρος της ενέργειας θραύσης. Με αυτό τον τρόπο προκαλείται αύξηση του  $G_c$ , με αποτέλεσμα την αύξηση της δυσθραυστότητας του σύνθετου. Επιπλέον, η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεισφέρει στην περαιτέρω αύξηση της δυσθραυστότητας. Στην περίπτωση που ο συντελεστής σχήματος των ινών είναι μεγαλύτερος από την κρίσιμη τιμή  $s^*$ , τότε η θραύση του συνθέτου συμπίπτει με τη θραύση των ινών ενίσχυσης.

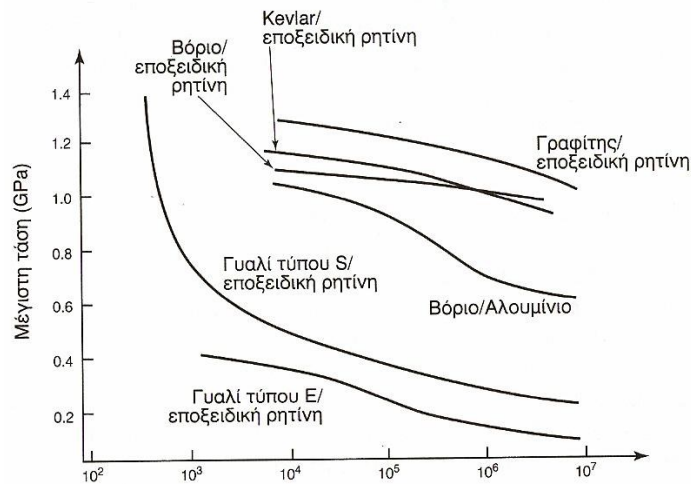
Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται οι πέντε μηχανισμοί διάδοσης των ρωγμών και οι αντίστοιχοι μηχανισμοί με τους οποίους η ενίσχυση ισχυροποιεί το σύνθετο (Παντελής, 2008).



Σχήμα: 3.7 Μηχανισμοί αύξησης της δυσθραυστότητας σε σύνθετο με ενίσχυση ινών: (α) Τοξοειδής κύρτωση μετώπου ρωγμής. (β) Απόκλιση ρωγμής. (γ) Αποσύνδεση ινών από τη μήτρα. (δ) Εκρίζωση ινών. (ε) Γεφύρωση ίνας. (Παντελής, 2008)

#### 4. Αντοχή σε κόπωση

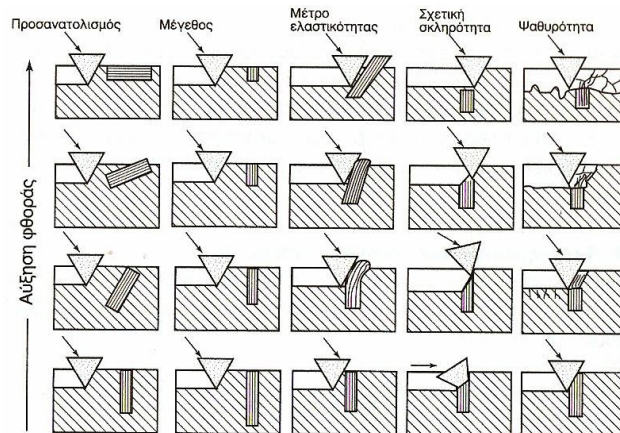
Στο παρακάτω διάγραμμα (2.10) παρουσιάζεται η σύγκριση διαφόρων συνθέτων υλικών. Σε γενικές γραμμές, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών σε κόπωση είναι δύσκολο να προβλεφθεί και να κατηγοριοποιηθεί καθώς δε μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτή ο κανόνας των μειγμάτων. Αντίθετα, απαιτούνται σειρές πειραματικών δοκιμών για κάθε σύνθετο υλικό ξεχωριστά (Παντελής, 2008).



Σχήμα: 3.8 Αντοχή σε κυκλική κόπωση διάφορων σύνθετων υλικών. (Παντελής, 2008)

#### 4. Συμπεριφορά σε τριβή

Κατά την επιβολή τριβής (abrasion) σε ένα σύνθετο με ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών προκύπτει μια φθορά, ο ρυθμός της οποίας εξαρτάται από το μήκος, τον προσανατολισμό και τις μηχανικές ιδιότητες των ινών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (2.8). Για παράδειγμα, τη μικρότερη φθορά παρουσιάζει ένα σύνθετο με μακριές ίνες κάθετες στην διεύθυνση της τριβής (Παντελής, 2008).



Σχήμα: 3.9 Επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών ενίσχυσης στο ρυθμό φθοράς του σύνθετου υλικού. (Παντελής, 2008)

#### 3.3.5 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ

Το μεγαλύτερο μέρος των διαδικασιών μορφοποίησης συνθέτων υλικών αποτελείται από τρία στάδια: την παραγωγή των ινών, την διάταξη-τοποθέτηση των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα και την εισαγωγή τους στη μήτρα.

Για το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας ενίσχυσης, οι ενισχυτικές ίνες που προκύπτουν από το πρώτο στάδιο ομαδοποιούνται σε ενισχυτικά **νήματα** ή **πλεξίδες** (yarn, tow, roving) των 100 έως 100.000 νημάτων, με ή χωρίς περιστροφή κατά την ομαδοποίηση.

Για το τρίτο στάδιο, προκύπτει διαχωρισμός μεταξύ συνεχών ινών μεγάλου μήκους και μικρών ινών. Για την πρώτη περίπτωση, οι ίνες προστίθενται στο υλικό της μήτρας είτε σε στρώσεις διαφόρων προσανατολισμών, είτε σε δισδιάστατες και τρισδιάστατες πλέξεις (fabrics). Για την δεύτερη περίπτωση, όπου οι ίνες έχουν μήκους κάτω από 1 cm, γίνεται ανάμιξη με το υλικό της μήτρας που βρίσκεται σε μορφή τήγματος ή έχει αυξημένη πλαστικότητα (μέσω θέρμανσης). Το νέο μίγμα ινών-μήτρας διαμορφώνεται με τεχνικές χύτευσης σε καλούπι ή ψεκαζόμενο. Για την περίπτωση αυτή προκύπτει τελικό σύνθετο με ενίσχυση ινών σε τυχαίο προσανατολισμό.

Το σύνολο των μεθόδων μορφοποίησης μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις κατηγορίες βάσει του υλικό της μήτρας: μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας, μεταλλικής μήτρας και κεραμικής μήτρας. Ακολουθεί περιγραφή των μεθόδων μορφοποίησης συνθέτων οργανικής μήτρας (Παντελής, 2008).

#### (α) Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτων

- Χειροποίητη στρώση

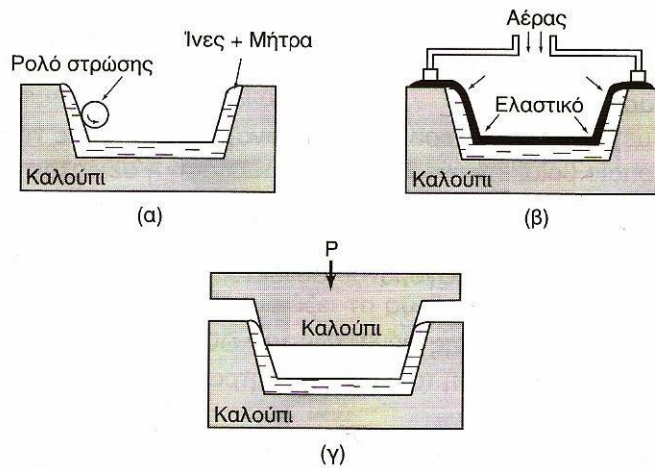
χειροποίητη στρώση (hand lay-up) αποτελεί την πλέον απλή τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενός συνθέτου. Οι ίνες τοποθετούνται σε καλούπι σε στρώσεις ως προκατασκευασμένα πλέγματα. Συνήθως η μήτρα είναι μια πολυμερική ρητίνη η οποία, αφού αναμιχθεί με τους κατάλληλους καταλυτικούς, επιταχυντικούς και σκληρυντικούς παράγοντες, προστίθεται στο καλούπι με κατάλληλες τεχνικές όπως έκχυση, επάλειψη ή ψεκασμό. Στη συνέχεια, το σύνθετο συμπιέζεται με ρολό ώστε να γίνει καλύτερη ένωση των υλικών και να αφαιρεθούν οι οποιοδήποτε πόροι μπορεί να δημιουργήθηκαν κατά την εισαγωγή του υλικού της μήτρας στο καλούπι. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί το τελικό πάχος και η τελική μορφή του συνθέτου. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της στρώσης το σύνθετο ξηραίνεται ώστε να αποκτήσει την τελική μηχανική αντοχή του.

- Χύτευση με θάλαμο πίεσης

Πρόκειται για παραλλαγή της προηγούμενης μεθόδου, όπου για καλύτερης ποιότητας τελικό προϊόν (καλύτερη στρώση της μήτρας και σύνδεση των υλικών μεταξύ τους) χρησιμοποιείται θάλαμος υπό πίεση.

- Χύτευση σε διαιρετό καλούπι

Η μορφοποίηση του συνθέτου γίνεται με τη χρήση ενός καλουπιού σε δύο ή περισσότερα μέρη, το οποίο κλείνει μέσα του το σύνθετο, δίνοντας του παράλληλα με τη συμπίεση των υλικών και την τελική του μορφή (Jones, 1975) (Παντελής, 2008).



Σχήμα: 3.10 Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτων: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση με θάλαμο πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι. (Παντελής, 2008)

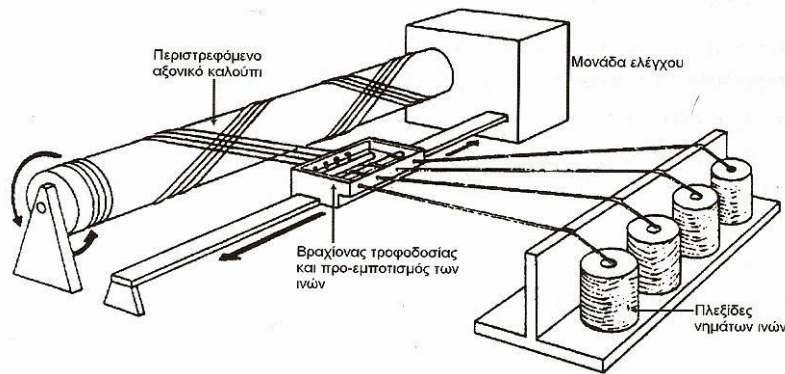
### (β) Συνεχής μορφοποίηση συνθέτων

Οι παρακάτω διαδικασίες μορφοποίησης σε συνεχή σύνθετα, χρησιμοποιείται για την κατασκευή σύνθετου υλικού απλής γεωμετρίας και μεγάλου μήκους σε διάφορες μορφές όπως νήματα, μπάρες, σωλήνες, πλάκες και φύλλα.

- Περιέλιξη νήματος

Πρόκειται για τη βασική τεχνική παραγωγής κυλίνδρων υψηλών προδιαγραφών. Οι ενισχυτικές ίνες περιτυλίγονται στο καλούπι του σχήματος που επιθυμείται. Οι ίνες είναι εμβαπτισμένες σε λουτρό ρητίνης πριν τη διαδικασία της περιέλιξης, ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις όπου το λουτρό ρητίνης γίνεται κατά την περιέλιξη ή μετά από αυτή. Μετά την περιτύλιξη στο καλούπι το σύνθετο ξηραίνεται είτε στο αέρα είτε σε κλίβανο. Στο παρακάτω σχήμα 2.13 φαίνεται η διαδικασία περιέλιξης νήματος.

Κατά τη διαδικασία αυτή παράγονται σύνθετα με υψηλό προσανατολισμό ινών και υψηλή μηχανική αντοχή, με αποτέλεσμα η τεχνική αυτή να χρησιμοποιείται για την παραγωγή προϊόντων όπως δεξαμενών καυσίμων, αγωγών υψηλής πίεσης (Jones, 1975) (Παντελής, 2008).



Σχήμα: 3.11 Κατασκευή σύνθετου υλικού με τη μέθοδο περιτύλιξης νήματος. (Παντελής, 2008)

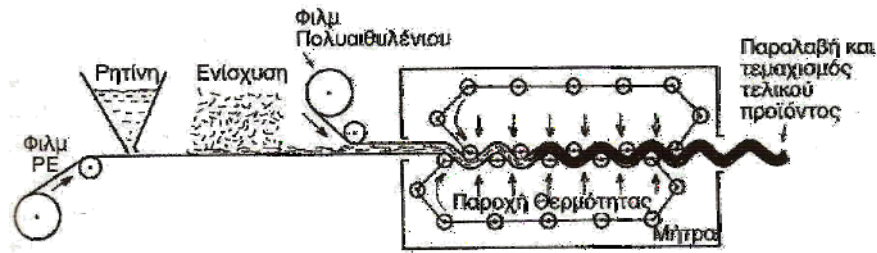
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος

Πρόκειται για σχετικά νέα τεχνική με κύρια εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Τα προϊόντα αυτής της τεχνικής (sheet molding process, SMC) έχουν μεγάλες διαστάσεις αλλά παράλληλα πετυχαίνουν υψηλό βαθμό ομοιογένειας στις μηχανικές τους ιδιότητες.

Ίνες γυαλιού μεγάλου μήκους κόβονται σε μικρά κομμάτια με σύνηθες μήκος τα 5 cm και τοποθετούνται σε ένα στρώμα ρητίνης που έχει εναποτεθεί σε ένα υμένα από πολυαιθυλένιο πάνω σε ταινιόδρομο. Στη συνέχεια στρώνεται ένα δεύτερο στρώμα ρητίνης πάνω από το πρώτο, ώστε να ενωθεί με το πρώτο δημιουργώντας ένα sandwich που στη μέση περιλαμβάνει τις ενισχυτικές ίνες, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Στη συνέχεια, το σύνθετο υλικό τυλίγεται σε ρολό και ομογενοποιείται για ένα χρονικό διάστημα από μία έως τέσσερις ημέρες προκειμένου να αποκτηθεί καλή συνάφεια μεταξύ των υλικών ίνας μήτρας. Προκειμένου να αποκτήσει το τελικό σχήμα του, το υλικό κόβεται στο κατάλληλο μέγεθος και σχήμα και μορφοποιείται παρουσία θερμοκρασία 150° C σε υδραυλική πρέσα (Jones, 1975) (Παντελής, 2008).



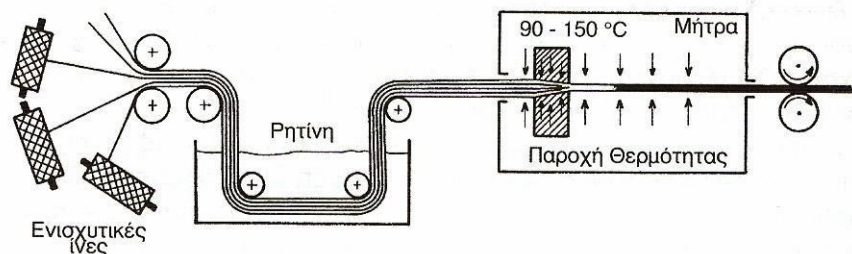


Σχήμα: 3.0.12 Κατασκευή σύνθετου υλικού με τη μέθοδο της συνεχούς μορφοποίησης ελάσματος. (Παντελής, 2008)

### Μορφοποίηση με εμβάπτιση

Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται σταθερή διατομή εφαρμόζεται η τεχνική της εμβάπτισης (pultrusion). Ίνες μεγάλου μήκους τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους και οδηγούνται σε λουτρό ρητίνης. Στη συνέχεια περνάνε μέσα από μεταλλική θερμαινόμενη μήτρα, όπου και καθορίζεται η διατομή του τελικού προϊόντος (σχήμα 2.15).

Το τελικό προϊόν έχει υψηλή μηχανική αντοχή στον επιμήκη άξονά του, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης ινών και του πολύ ισχυρού προσανατολισμού τους.



Σχήμα: 3.13 Κατασκευή σύνθετου υλικού με τη μέθοδο της μορφοποίησης με εμβάπτιση. (Παντελής, 2008)

## 3.4 ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ SANDWICH ΥΛΙΚΑ (MULTILAYERS AND SANDWICH MATERIALS)

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 τω πλείστον πολυουρεθάνη, είτε κάποιο ελαφρύ μέταλλο, συνήθως Al, διαμορφωμένο σε γεωμετρία κυψέλης (Παντελής, 2008).

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 πεπεισμένες φιάλες).

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Υψηλής Πυκνότητας	Χαμηλής Πυκνότητας
Αντοχή σε θλίψη (MPa)	1,93	15,2
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2,41	8,62
Αντοχή σε κάμψη (MPa)	2,62	16,5
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	0,16	0,497
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	91	91
Ελάχιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	-184	-184

Πίνακας 3-4: Ιδιότητες αφρού πολυουρεθάνης (BCC Products MB). ([www.matweb.com](http://www.matweb.com))

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική (**Computational Fluid Dynamics - CFD**) είναι κλάδος της Μηχανικής των Ρευστών ο οποίος με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και αλγορίθμων, λύνει και αναλύει προβλήματα που αφορούν ροές ρευστών. Με τη χρήση Η/Υ εκτελούνται οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των ρευστών με επιφάνειες που ορίζονται από οριακές συνθήκες. Η πειραματική επιβεβαίωση των υπολογισμών προκύπτει αρχικά με τη χρήση αεροδυναμικών σηράγγων και τελικά με δοκιμές πλήρους κλίμακας (Μπεργελές, Υπολογιστική Ρευστομηχανική, 2006).

## 4.2 Το μοντέλο τύρβης Shear-Stress Transport (SST) k- $\omega$

Τα υπολογιστικά μοντέλα τύρβης είναι τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των φαινομένων τύρβης. Ο μέσος όρος χρησιμοποιείται για την απλοποίηση της λύσης των εξισώσεων που διέπουν την τύρβη, αλλά απαιτούνται μοντέλα ώστε να αντιπροσωπεύσουν κλίμακες της ροής που δεν έχουν επιλυθεί. Μια από τις βασικές παραμέτρους που καλείται να επιλέξει ένας μηχανικός κατά τη δημιουργία και ανάλυση ενός μοντέλου είναι η ορθή επιλογή του υπολογιστικού μοντέλου τύρβης (Chen & Jaw, 1998) (Andersson, Ronnie, Hakansson, & Mortensen, 2011).

Τα σημαντικότερα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί για τον υπολογισμό των φαινομένων τύρβης είναι:

- Closure problem
- Eddy viscosity
- Prandtl's mixing-length concept
- Smagorinsky model for the sub-grid scale eddy viscosity
- Spalart–Allmaras
- k- $\epsilon$  model
- k- $\omega$  model
- SST
- Reynolds stress equation model

Το μοντέλο τύρβης SST k- $\omega$  είναι μια παραλλαγή του standard k- $\omega$ . Ονομάζεται έτσι επειδή ο ορισμός του ιξώδους της τύρβης έχει τροποποιηθεί για να ερμηνεύσει την μεταφορά κύριας τυρβώδους επιφανειακής τάσης. Αυτό είναι το χαρακτηριστικό το οποίο δίνει στο

μοντέλο SST k- $\omega$  πλεονέκτημα να έχει καλύτερη επίδοση απέναντι στα standard k- $\omega$  και standard k- $\epsilon$  μοντέλα τύρβης.

1) Οι εξισώσεις μεταφοράς για το μοντέλο SST k- $\omega$

Οι εξισώσεις μεταφοράς για το μοντέλο αυτό είναι παρόμοιες με του standard k- $\omega$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (4.1)$$

και

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4.2)$$

Σε αυτές τις εξισώσεις ο όρος  $\tilde{G}_k$  αναπαριστά τη γένεση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας εξαιτίας των διακυμάνσεων της μέσης ταχύτητας και ορίζεται ως:

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (4.3)$$

Ο όρος  $G_\omega$  αναπαριστά την γένεση του  $\omega$  και υπολογίζεται από την σχέση:

$$G_\omega = a \frac{\omega}{k} G_k \quad (4.4)$$

όπου το  $a$  υπολογίζεται από:

$$a = \frac{a_\infty}{a^*} \left( \frac{a_0 + \text{Re}_t / R_\omega}{1 + \text{Re}_t / R_\omega} \right) \quad (4.5)$$

όπου  $R_\omega = 2,95$  και τα  $a^*$  και  $\text{Re}_t$  δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Re}_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad \text{και} \quad a_0^* = \frac{\beta_t}{3} \quad (4.6a \ \& \ 4.6\beta)$$

Οι όροι  $\Gamma_k$  και  $\Gamma_\omega$  εκφράζουν την ενεργό διαχυτότητα των  $k$  και  $\omega$  αντίστοιχα και υπολογίζονται όπως περιγράφεται παρακάτω. Οι όροι  $Y_k$  και  $Y_\omega$  εκφράζουν τη σκέδαση εξαιτίας της τύρβης των  $k$  και  $\omega$  αντίστοιχα και υπολογίζονται ως εξής:

$$Y_k = \rho \beta^* f_{\beta^*} k \omega \quad (4.7)$$

όπου:

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & x_k \leq 0 \\ \frac{1 + 680 x_k^2}{1 + 400 x_k^2} & x_k > 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

όπου:

$$x_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4.9)$$

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \zeta^* F(M_i)] \quad (4.10)$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left( \frac{4/15 + (\text{Re}_i / R_\beta)^4}{1 + (\text{Re}_i / R_\beta)^4} \right) \quad (4.11)$$

$$\zeta^* = 1.5 \quad (4.12\alpha)$$

$$R_\beta = 8 \quad (4.12\beta)$$

$$\beta_\infty^* = 0.09 \quad (4.12\gamma)$$

και

$$Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (4.13)$$

όπου:

$$f_\beta = \frac{1+70x_\omega}{1+80x_\omega} \quad (4.14)$$

$$x_\omega = \left| \frac{\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}}{(\beta_\omega^*)^3} \right| \quad (4.15)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.16)$$

Ο όρος  $D_\omega$  εκφράζει την διάχυση και τα  $S_k$  και  $S_\omega$  είναι όροι, οι τιμές των οποίων ορίζονται από τον χρήστη.

2) Η μοντελοποίηση της ενεργούς διαχυτότητας

Οι ενεργές διαχυτότητες για το SST k- $\omega$  μοντέλο είναι:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (4.17\alpha)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (4.17\beta)$$

Όπου  $\sigma_k$  και  $\sigma_\omega$  είναι οι αριθμοί του Prandtl για την τύρβη για τα  $k$  και  $\omega$  αντίστοιχα. Το ιξώδες της τύρβης,  $\mu_t$ , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{a^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (4.18)$$

Όπου  $S$  είναι ο ρυθμός της διατμητικής παραμόρφωσης και:

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1-F_1)/\sigma_{k,2}} \quad (4.19\alpha)$$

$$\sigma_{\omega} = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1-F_1)/\sigma_{\omega,2}} \quad (4.19\beta)$$

Το  $\alpha^*$  έχει οριστεί προηγουμένως και οι συναρτήσεις  $F_1$  και  $F_2$  είναι:

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (4.20)$$

$$\Phi_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega}^+ y^2} \right] \quad (4.21)$$

$$D_{\omega}^+ = \max \left[ 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (4.22)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (4.23)$$

$$\Phi_2 = \max \left[ 2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (4.24)$$

Όπου  $y$  είναι η απόσταση από την επόμενη επιφάνεια και  $D_{\omega}^+$  είναι ένα θετικό ποσοστό του όρου διάχυσης.

### 3) Η μοντελοποίηση της γένεσης της τύρβης

Παραγωγή του  $k$ :

Ο όρος  $\tilde{G}_k$  εκφράζει την γένεση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και ορίζεται ως:

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^* k\omega) \quad (4.25)$$

Όπου το  $G_k$  ορίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως στο μοντέλο standard k- $\omega$ .

Παραγωγή του  $\omega$ :

Ο όρος  $G_{\omega}$  εκφράζει την παραγωγή του  $\omega$  και ορίζεται ως:

$$G_{\omega} = \frac{a}{\nu_t} G_k \quad (4.26)$$

Σημειώνεται ότι αυτή η μορφή διαφέρει από το μοντέλο standard k-ω. Διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων υπάρχει επίσης στο τρόπο με τον οποίο γίνεται εκτίμηση για τον όρο  $\alpha_\infty$ . Στο μοντέλο standard k-ω, το  $\alpha_\infty$  ορίζεται ως μια σταθερά ενώ για το μοντέλο SST k-ω είναι:

$$a_\infty = F_1 a_{\infty,1} + (1 - F_1) a_{\infty,2} \quad (4.27)$$

όπου

$$a_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (4.28\alpha)$$

$$a_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (4.28\beta)$$

όπου  $\kappa = 0.41$ .

#### 4) Η μοντελοποίηση της σκέδασης της τύρβης

Σκέδαση του  $k$ :

Ο όρος  $Y_k$  εκφράζει τη σκέδαση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και ορίζεται με παρόμοιο τρόπο όπως στο μοντέλο standard k-ω. Η διαφορά είναι ο τρόπος με τον οποίο εκτιμάται ο όρος  $f_{\beta^*}$ . Στο μοντέλο standard k-ω, το  $f_{\beta^*}$  ορίζεται ως μια συνάρτηση με ξεχωριστά βήματα. Στο SST k-ω μοντέλο το  $f_{\beta^*}$  είναι σταθερά ίσο με τη μονάδα. Έτσι,

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (4.29)$$

Σκέδαση του  $\omega$ :

Ο όρος  $Y_\omega$  εκφράζει τη σκέδαση του  $\omega$  και ορίζεται με παρόμοιο τρόπο όπως στο standard k-ω μοντέλο. Η διαφορά είναι ο τρόπος με τον οποίο εκτιμούνται οι όροι  $\beta_i$  και  $f_\beta$ . Στο μοντέλο standard k-ω, το  $\beta_i$  ορίζεται ως μια σταθερά ( $\beta_i=0.072$ ) και το  $f_\beta$  ορίζεται από μια εξίσωση. Στο SST k-ω μοντέλο το  $f_\beta$  είναι σταθερά ίση με τη μονάδα. Έτσι,

$$Y_k = \rho \beta \omega^2 \quad (4.30)$$

Αντί να έχουμε μια σταθερή τιμή, το  $\beta_i$  δίνεται από:

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2} \quad (4.31)$$



5) Τροποποίηση στην διάχυση

Το μοντέλο τύρβης SST k- $\omega$  είναι βασισμένο πάνω στα μοντέλα τύρβης standard k- $\omega$  και standard k- $\epsilon$ . Για να συνδυαστούν τα δύο αυτά μοντέλα, το standard k- $\epsilon$  μοντέλο έχει μετασχηματιστεί σε δύο εξισώσεις βασισμένες στο  $k$  και στο  $\omega$ , το οποίο οδηγεί στην εισαγωγή ενός όρου διάχυσης ( $D_\omega$ ). Το  $D_\omega$  ορίζεται:

$$D_\omega = 2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4.32)$$

6) Οι σταθερές του μοντέλου

$$\sigma_{k,1} = 1.176, \sigma_{\omega,1} = 2.0, \sigma_{k,2} = 1.0, \sigma_{\omega,2} = 1.168,$$

$$a_1 = 0.31, \beta_{i,1} = 0.075, \beta_{i,2} = 0.0828 \quad (4.33)$$

Όλες οι άλλες σταθερές του μοντέλου ( $\alpha^*$ ,  $a_\infty$ ,  $a_0$ ,  $\beta^*$ ,  $\beta_i$ ,  $R_\beta$ ,  $R_k$ ,  $R_\omega$ ,  $\zeta^*$ ,  $M_{t0}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\omega$ ) έχουν τις ίδιες τιμές όπως έχουν στο standard k- $\omega$  μοντέλο.

$$a_\infty^* = 1, a_\infty = 0.52, a_0 = \frac{1}{9}, \beta_\infty^* = 0.09, \beta_i = 0.072, R_\beta = 8,$$

$$R_k = 6, R_\omega = 2.95, \zeta^* = 1.5, M_{t0} = 0.25, \sigma_k = 2.0, \sigma_\omega = 2.0 \quad (4.34)$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΤΟΡΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΕΜΟΥ

## 5.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η υπολογιστική διερεύνηση της μονοφασικής ροής αέρα γύρω από τριππέρυγο ρότορα ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα (HAWT) με την εκτέλεση μιας ανάλυσης σταθερής κατάστασης FSI (Fluid-Structure Interaction) και την εξαγωγή των πεδίων πιέσεων. Έτσι με την αεροδυναμική φόρτιση του ανεμοκινητήρα, δημιουργούνται παραμορφώσεις στα πτερύγια. Με άλλα λόγια οι πιέσεις στις υγρές περιοχές του πτερυγίου περνούν ως πεδία πίεσης στο ANSYS Mechanical για τον προσδιορισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων. Η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ταχύτητας ανέμου και η μελέτη της αντοχής του μοντέλου για ένα σύνολο σύνθετων υλικών ινών γυαλιού σε πολυεστερική μήτρα (Glass Fiber Reinforced Polyester – GFRP).

Με τη χρήση του ANSYS Fluent θα προσομοιωθούν τρία διαφορετικά σενάρια ταχύτητας ανέμου: 50 m/s για την αντοχή του μοντέλου σε ακραίες καταστάσεις ανέμου με ταυτόχρονη περιστροφή του μοντέλου, 20 m/s για το μέγιστο όριο ταχύτητας λειτουργίας (cut-off speed) και 12 m/s ως μέση ταχύτητα ανέμου για την πλειονότητα των περιοχών εφαρμογής του μοντέλου.

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 της HAWT για τρία διαφορετικά μοντέλα εμπορικών υλικών GFRP κατάλληλων για κατασκευή ανεμογεννητριών, με ιδιότητες που προέκυψαν από ηλεκτρονική βιβλιοθήκη υλικών [www.matweb.com](http://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. Αν και τα τρία επιλεγμένα υλικά αστοχήσουν, η διαδικασία αποκλεισμού επαναλαμβάνεται με αυξημένο πάχος κελύφους.

Το πακέτο λογισμικού ANSYS Workbench επιλέχθηκε καθώς προσφέρει δυνατότητα άμεσης διασύνδεσης των δύο μοντέλων (CFD και Mechanical) είτε μονόδρομα (one-way Fluid - Structure Interaction, FSI) όπως στην παρούσα μελέτη, είτε αμφίδρομα (two-way FSI), καθώς και την εισαγωγή συνόλων ιδιοτήτων υλικών και τη δυνατότητα χρήσης εργαλείων βελτιστοποίησης με το εργαλείο Goal Driven Optimization.

Παρακάτω αναλύονται τα στοιχεία του λογισμικού πακέτου ANSYS, τα αναλυτικά στοιχεία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε και η αναλυτική παρουσίαση των προσομοιώσεων με τη χρήση των εργαλείων ANSYS Fluent και ANSYS Static Structural και Solidworks.

## 5.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΑΚΕΤΑ

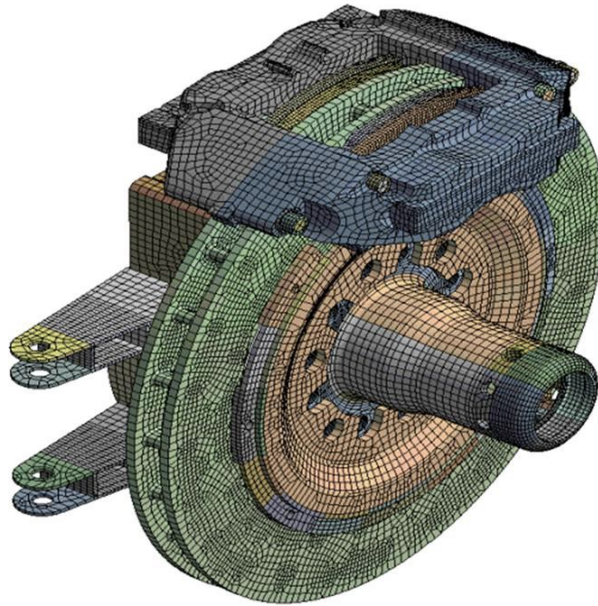
Για τις ανάγκες του σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο **Solidworks 2016** με ακαδημαϊκή άδεια χρήσης μέσω του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. ενώ για την προσομοίωση των ταχυτήτων ανέμου και της αντοχής του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το πακέτο λογισμικού **ANSYS 17 Workbench**. Το πρώτο αποτελεί πακέτο λογισμικού **CAD (Computer Aided Design)** που περιέχει προϊόντα σχεδιασμού, ενώ το δεύτερο είναι πακέτο λογισμικού **CAE (Computer Aided Engineering)** που περιέχουν προϊόντα σχεδιασμού, προσομοίωσης, ανάλυσης και επεξεργασίας αποτελεσμάτων. Οι διαδικασίες προσομοίωσης και ανάλυσης επιτυγχάνονται με τη χρήση της Μέθοδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (**FEM**) χρησιμοποιώντας ειδικούς αλγόριθμους για αυτό το σκοπό.

### 5.2.1 Πακέτο Λογισμικού ANSYS WORKBENCH 17

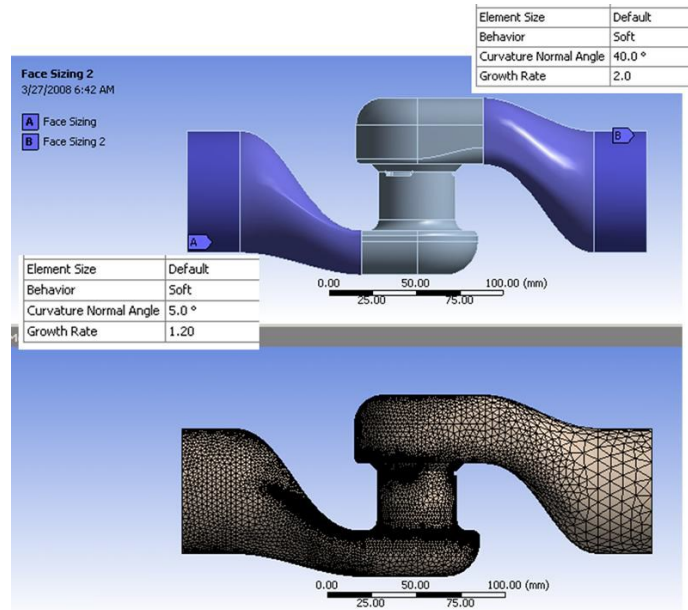
Το πακέτο λογισμικού **ANSYS WORKBENCH 17.0** αποτελεί ένα ισχυρό σύστημα προσομοίωσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιεί για ένα μεγάλο εύρος μοντέλων πολύπλοκης γεωμετρίας και για ένα μεγάλο σύνολο προσομοιώσεων που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων:

- Γραμμική στατική και δυναμική φόρτιση.
- Ρευστομηχανική ανάλυση
- Εύρεση Ιδιοσυχνοτήτων
- Αρμονική ή τυχαία ταλάντωση
- Θερμική ανάλυση (υπολογισμός θερμικών τάσεων)
- Λυγισμός
- Αποκοπή υλικού (μεταλλικές κατεργασίες) και σύντομα γεγονότα (crash,drop)

Η αυτόματη γεννήτρια Mesh (AMG) του ANSYS παράγει ένα βελτιστοποιημένο και αναλυτικότερο σύστημα πλέγματος στις περιοχές του μοντέλου όπου απαιτείται για την τρέχουσα διαδικασία ανάλυσης. Αυτό διευκολύνει την βελτιωμένη ανάλυση του τεμαχίου, χωρίς να αυξάνει σημαντικά το μέγεθος του προβλήματος και των υπολογιστικών απαιτήσεων.

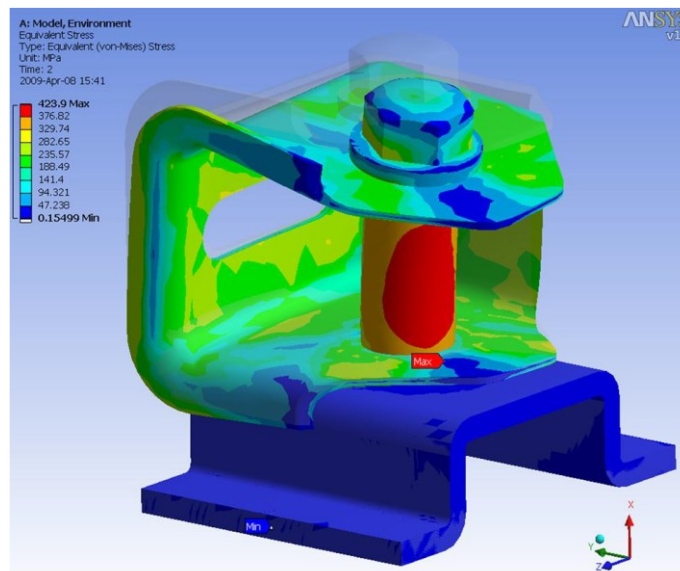


Σχήμα 5.1: Παράδειγμα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στο ANSYS (εξαεδρικά στοιχεία) (<http://www.ansys.com>)



Σχήμα 5.2: Παράδειγμα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στο ANSYS (ευέλικτος έλεγχος μεγέθους στοιχείου) (<http://www.ansys.com>)

Το ANSYS Workbench προσφέρει ευκολία στη διεπαφή του χρήστη με το σύστημα, χάρη στη χρήση διαγραμματικής ροής διαδικασιών. Αποτελεί ένα πλήρες εργαλείο σχεδιασμού και εκτέλεσης προσομοιώσεων.

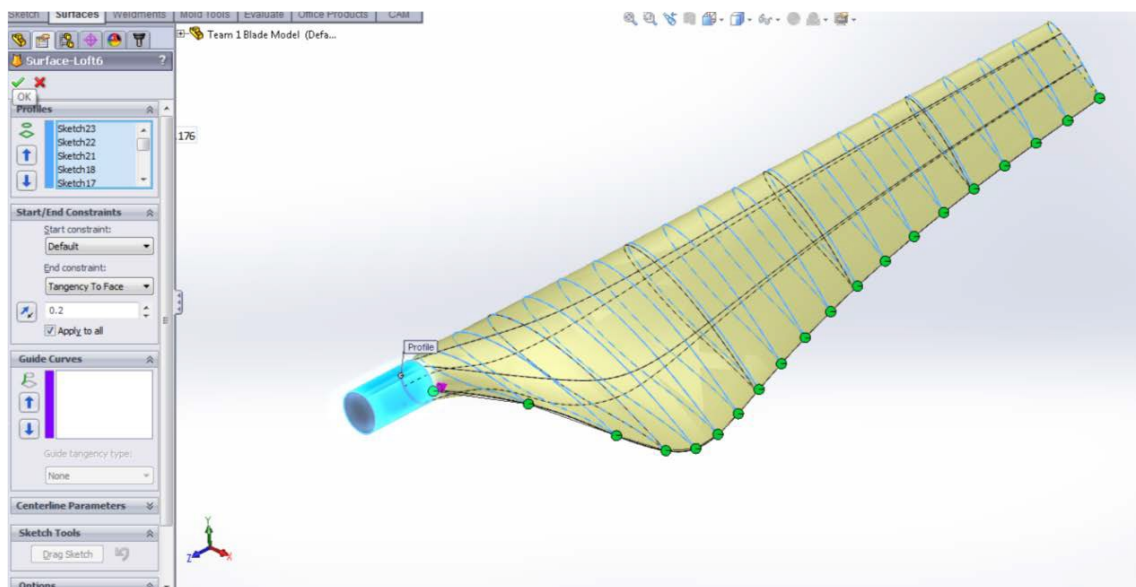


Σχήμα 5.3: Απεικόνιση προσομοίωσης μοντέλου σε θλιπτικά φορτία με χρήση του Ansys Static Structural. (<http://www.ansys.com>)

## 5.2.2 Σχεδιαστικό Πακέτο Solidworks 2016

Το **SolidWorks** είναι ένας σταθερός μοντελοποιητής και χρησιμοποιεί μια παραμετρική προσέγγιση βασισμένη σε χαρακτηριστικά που αναπτύχθηκε αρχικά από την PTC (Creo / Pro-Engineer) για τη δημιουργία μοντέλων και συγκροτημάτων. Το λογισμικό είναι γραμμένο σε Parasolid-kernel.

Ο σχεδιασμός ενός μοντέλου στο **SolidWorks** συνήθως ξεκινάει με ένα 2D σκίτσο (αν και τα 3D σκίτσα είναι διαθέσιμα για χρήστες ισχύος). Το σκίτσο αποτελείται από γεωμετρία όπως σημεία, γραμμές, τόξα, κωνικά (εκτός από την υπερβολή) και σφήνες. Οι διαστάσεις προστίθενται στο σκίτσο για τον καθορισμό του μεγέθους και της θέσης της γεωμετρίας. Οι σχέσεις χρησιμοποιούνται για τον ορισμό ιδιοτήτων όπως η επαφή, ο παραλληλισμός, η κάθετοτητα και η ομόκεντροτητα. Ο παραμετρικός χαρακτήρας της SolidWorks σημαίνει ότι οι διαστάσεις και οι σχέσεις οδηγούν τη γεωμετρία, όχι το αντίστροφο. Οι διαστάσεις στο σκίτσο μπορούν να ελέγχονται ανεξάρτητα, ή με σχέσεις με άλλες παραμέτρους μέσα ή έξω από το σκίτσο



Σχήμα 5.4: Ο σχεδιασμός του πτερυγίου στο Solidworks 2016

### 5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων της μελέτης χρησιμοποιήθηκε ο προσωπικός μου υπολογιστής και σύνδεση μέσω VPN με server του Ε.Μ.Π. Ο υπολογιστής αποτελείται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- **Λειτουργικό Σύστημα:** Windows 10 Home 64-bit
- **Κατασκευαστής Συστήματος:** ASUSTeK COMPUTER INC.
- **Επεξεργαστής:** Intel Core i7 7500 CPU 2.70GHz (4 CPUs), 2.9GHz
- **Μνήμη RAM:** 12288MB
- **Κάρτα Γραφικών:** NVIDIA GeForce 940MX, 8034MB MEMORY

### 5.4 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Το πτερύγιο έχει μήκος 43,2 μέτρα και ξεκινά με κυλινδρικό σχήμα στο root και στη συνέχεια μεταβαίνει στις αεροτομές S818, S825 και S826 για το root, το κυρίως σώμα και την άκρη, αντίστοιχα. Το πτερύγιο έχει επίσης κλίση για να μεταβάλλεται ως συνάρτηση της ακτίνας, δίνοντάς της μια συστροφή και η γωνία βήματος στο ακροπτερύγιο είναι 4 μοίρες. Επιπλέον θα πρέπει να γίνει γνωστό ότι το πτερύγιο που δημιουργήθηκε βασίζεται σε εμπορικό μοντέλο και είναι ίσο σε μέγεθος με το πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας GE 1.5XLE.

Το πτερύγιο κατασκευάζεται από ένα ορθοτροπικό σύνθετο υλικό, έχει ένα μεταβαλλόμενο πάχος και έχει επίσης ένα στέλεχος εσωτερικά του κυρίως σώματος για δομική ακαμψία.

Παρακάτω δίνονται τα κύρια μεγέθη της κατασκευής.

<b>ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ</b>	
<b>X (m)</b>	<b>Πάχος (m)</b>
-1	0,1
-44,2	0,005

Πίνακας 5-1: Πάχος πτερυγίου

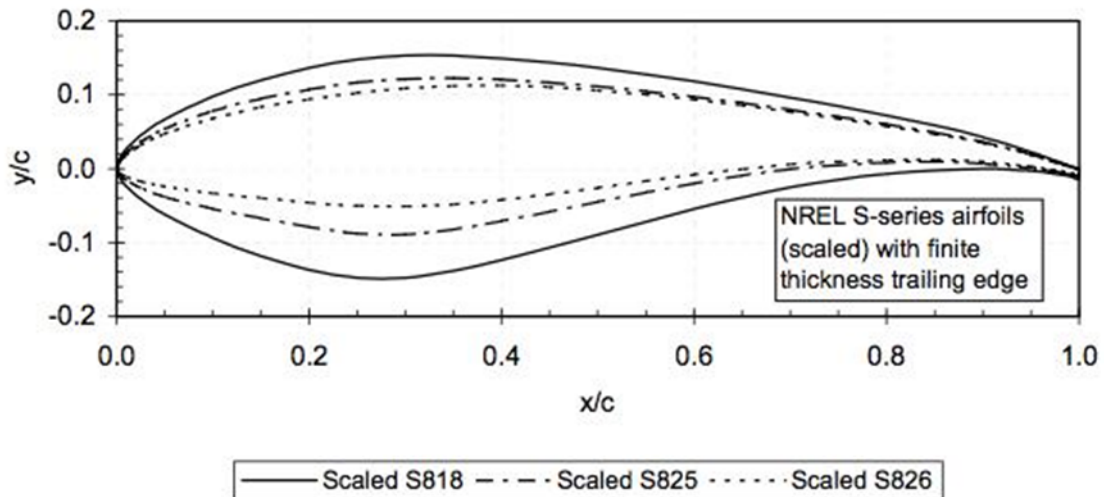
<b>ΝΕΥΡΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ</b>	
<b>X (m)</b>	<b>Πάχος (m)</b>
-3	0,1
-44,2	0,03

Πίνακας 5-2: Πάχος νεύρου δυσκαμψίας

<b>ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ SOLIDWORKS</b>				
<b>Element</b>	<b>r/R</b>	<b>Twist °</b>	<b>C/R</b>	<b>Airfoil</b>
1	0.075	42	0.0614	<b>S818</b>
2	0.125	32	0.06826	
3	0.175	23	0.07452	
4	0.225	15	0.07782	
5	0.275	11.5	0.07543	
6	0.325	8.2	0.07188	
7	0.375	7	0.06832	
8	0.425	6	0.06479	
9	0.475	5	0.06126	
10	0.525	4	0.05771	
11	0.575	4.15	0.05415	
12	0.625	3.85	0.05062	
13	0.675	3.25	0.04707	
14	0.725	2.75	0.0436	
15	0.775	1.25	0.04024	
16	0.825	0.75	0.03704	<b>S826</b>
17	0.875	0.55	0.03385	
18	0.925	0.85	0.03066	
19	0.975	0.05	0.02747	

Πίνακας 5-3: Διατομές αεροτομών





Σχήμα 5.5: Αεροτομές πτερυγίου της NREL

## 5.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα υλικά τα οποία πρόκειται να τεθούν υπό δοκιμή στην παρούσα μελέτη είναι έχουν κοινό υλικό μήτρας πολυεστέρα και ως υλικό ενίσχυσης ίνες γυαλιού είτε σε πεπλεγμένη μορφή είτε σε κοντές ίνες σε τυχαία διεύθυνση. 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:

<b>ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ</b>			
	<b>GFRP 30%</b>	<b>GFRP 50%</b>	<b>GFRP 50%</b>
	<b>SMC</b>	<b>SMC</b>	<b>Woven Roving</b>
<b>Πυκνότητα (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>1850</b>	<b>2000</b>	<b>1640</b>
<b>Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)</b>	<b>83</b>	<b>160</b>	<b>260</b>
<b>Αντοχή σε θλίψη (MPa)</b>	<b>170</b>	<b>220</b>	<b>190</b>
<b>Μέτρο ελαστικότητας (GPa)</b>	<b>12</b>	<b>15,7</b>	<b>15,5</b>
<b>Αντοχή σε κάμψη (MPa)</b>	<b>180</b>	<b>310</b>	<b>320</b>
<b>Μέτρο κάμψης (GPa)</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>15,5</b>

Πίνακας 5-4: Ιδιότητες προτεινόμενων υλικών

Στο Παράρτημα Α υπάρχουν αναλυτικές περιγραφές των υλικών από τη ηλεκτρονική βιβλιοθήκη [www.matweb.com](http://www.matweb.com).

## 5.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ANSYS FLUENT

### 5.6.1 Μαθηματικό μοντέλο

Οι ισχύουσες εξισώσεις είναι οι εξισώσεις συνέχειας και Navier-Stokes. Αυτές οι εξισώσεις είναι γραμμένες σε ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με το πτερύγιο. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι η προσομοίωση μας δεν απαιτεί μετακινούμενο πλέγμα για να υπολογίσουμε την περιστροφή του πτερυγίου.

Οι εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι παρακάτω:

- Αρχή διατήρησης της μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u}_r = 0 \quad (5.1)$$

- Διατήρηση της ορμής (Navier-Stokes):

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}_r \mathbf{u}_r) + \rho(2\omega \mathbf{x} \mathbf{u}_r + \vec{\omega} \mathbf{x} \vec{\omega} \mathbf{x} \vec{r}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_r \quad (5.2)$$

Όπου  $\mathbf{u}_r$  είναι η σχετική ταχύτητα (η ταχύτητα που φαίνεται από το κινούμενο πλαίσιο) και  $\vec{\omega}$  η γωνιακή ταχύτητα.

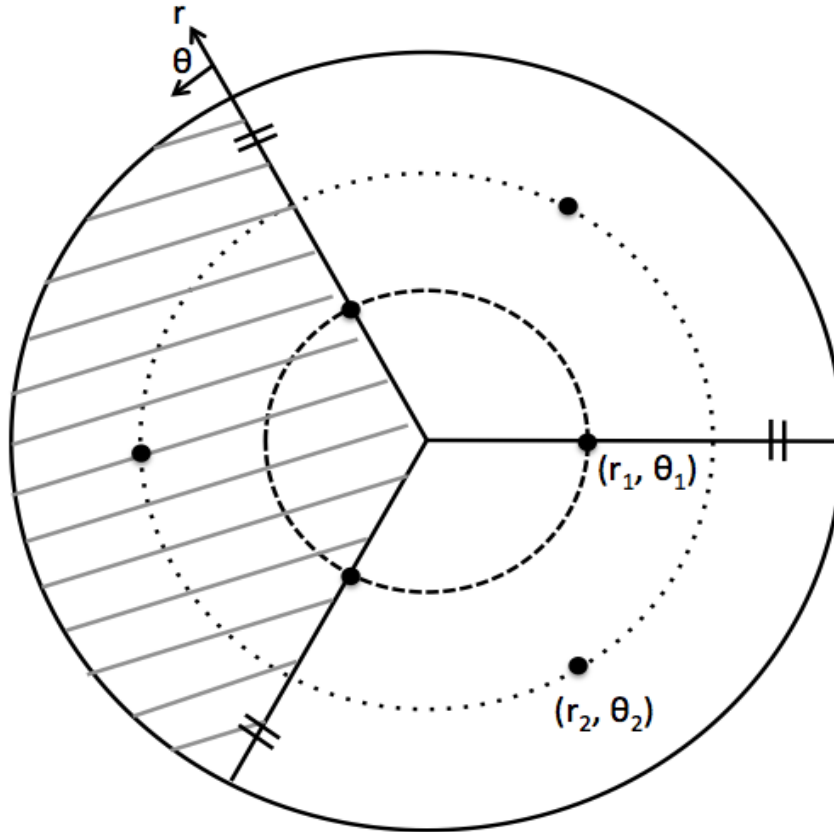
Σημειώστε τους πρόσθετους όρους για τη δύναμη Coriolis ( $2\omega \mathbf{x} \mathbf{u}_r$ ) και την κεντρομόλο επιτάχυνση ( $\vec{\omega} \mathbf{x} \vec{\omega} \mathbf{x} \vec{r}$ ) στις εξισώσεις Navier-Stokes. Στο Fluent, θα ενεργοποιήσουμε τους πρόσθετους όρους για ένα κινούμενο πλαίσιο αναφοράς και εισαγωγής  $\vec{\omega}$ .

Θα χρησιμοποιήσουμε τη μορφή Reynolds Averaged της συνέχειας και της ορμής και χρησιμοποιήστε το μοντέλο τύρβης SST k-omega για να κλείσουμε το σύνολο εξισώσεων.

### Αρχικές συνθήκες

Για την υπολογιστική διερεύνηση της μονοφασικής ροής αέρα θα μοντελοποιήσουμε μόνο το 1/3 του πλήρους τομέα χρησιμοποιώντας υποθέσεις περιοδικότητας:

$$\vec{u}(r_1, \theta) = \vec{u}(r_1, \theta_1 - 120n) \quad (5.3)$$



$$\begin{aligned}\vec{v}(r_1, \theta) &= \vec{v}(r_1, \theta_1 - 120^\circ n) \quad \text{For } n = 1, 2, 3... \\ &= \vec{v}(r_1, 240^\circ - 120^\circ(1)) = \vec{v}(r_1, 120^\circ) \\ &= \vec{v}(r_1, 240^\circ - 120^\circ(2)) = \vec{v}(r_1, 0^\circ)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{v}(r_2, \theta) &= \vec{v}(r_2, \theta_2 - 120^\circ n) \quad \text{For } n = 1, 2, 3... \\ &= \vec{v}(r_2, 180^\circ - 120^\circ(1)) = \vec{v}(r_2, 60^\circ)\end{aligned}$$

Αυτό, επομένως, αποδεικνύει ότι η κατανομή ταχύτητας στο θήτα 0 και 120 μοίρες είναι η ίδια. Αν υποδηλώσουμε το  $\theta_1$  ότι αντιπροσωπεύει ένα από τα περιοδικά όρια για τον τομέα 1/3 και  $\theta_2$  είναι το άλλο όριο, τότε  $\vec{u}(r_i, \theta_1) = \vec{u}(r_i, \theta_2)$ .

Οι οριακές συνθήκες στον όγκο ελέγχου του ρευστού είναι οι εξής:

Inlet: Ταχύτητα 12, 20 και 50m/s με στροβιλώδη ένταση 5% και αναλογία στροβιλώδους ιξώδους 10.

Outlet: Πίεση 1atm

Blade: No slip

Πλευρικά όρια: Περιοδικά

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιώντας την απλή μονοδιάστατη θεωρία ορμής, μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή ισχύος που είναι το κλάσμα της ισχύς που χρησιμοποιείται για τη συνολική ισχύ στον άνεμο για την δεδομένη περιοχή στροβιλισμού. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιεί τις ακόλουθες παραδοχές:

- Υπάρχει ένας άπειρος αριθμός λεπίδων.
- Η ροή είναι σταθερή, ομοιογενής και ασυμπύεστη.
- Δεν υπάρχει έλξη τριβής.
- Υπάρχει ομοιόμορφη ώθηση πάνω από την περιοχή του δίσκου ή του δρομέα.
- Το απόρρευμα δεν είναι περιστρεφόμενο.
- Η στατική πίεση πολύ προς τα ανάντη και προς τα κάτω του δρομέα είναι ίση με την μη περιστρεφόμενη πίεση περιβάλλοντος.

Ο δρομέας της ανεμογεννήτριας της εργασίας αυτής, βασίζεται όπως ειπώθηκε στο εμπορικό μοντέλο GE 1.5 XLE ανεμογεννήτριας. Το φύλλο προδιαγραφών αυτής της ανεμογεννήτριας αναφέρει ότι η ονομαστική ισχύς αυτού του μοντέλου είναι 1,5 MW, η ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι 12 m / s και η διάμετρος του στρόφα είναι 82,5 m.

Έτσι, από την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου προκύπτει ο συντελεστής ισχύος:

$$C_p = \frac{P_{rated}}{P_{wind}} = \frac{P_{rated}}{0.5\rho AV^3} = 0.30 \quad (5.4)$$

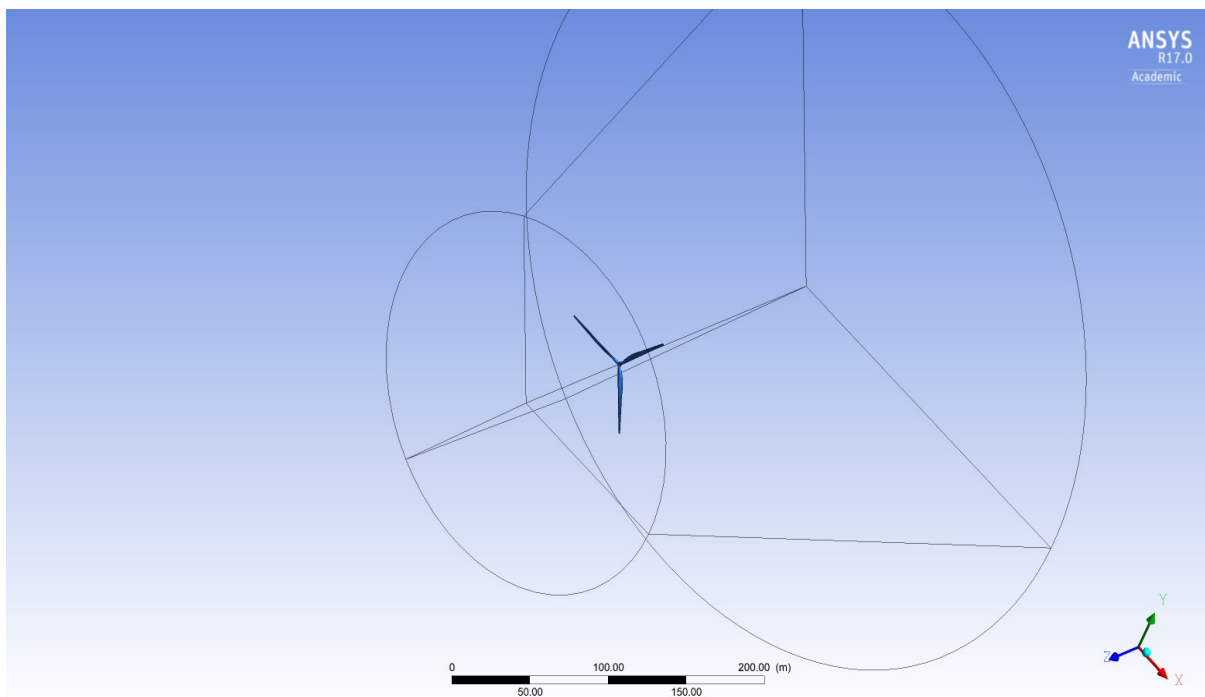
## 5.6.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ANSYS DESIGN MODELER

Προκειμένου η γεωμετρία του μοντέλου που σχεδιάστηκε στο Solidworks να γίνει λειτουργική στο περιβάλλον του ANSYS και συγκεκριμένα στα εργαλεία της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Fluent Module) και της Μηχανικής Ανάλυσης (Mechanical Module), δημιουργήθηκαν κάποιες αποτυπώσεις του αρχικού σχεδίου στο ANSYS Design Modeler. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε μια περιοχή ρευστού (Fluid Domain) όπου το μοντέλο της Α/Γ εμφανίζεται σαν τοίχωμα (wall) για τις ανάγκες της CFD ανάλυσης και μια αποτύπωση κελύφους (Shell) μηδενικού αρχικού πάχους για το Mechanical Module. Οι δύο διαφορετικές αποτυπώσεις για την ίδια γεωμετρία προέκυψαν με τους παρακάτω τρόπους:

1. Μοντέλο Α/Γ για CFD ανάλυση:

Το αρχικό μοντέλο περικλείεται από ένα κωνικό σχήμα κυκλικής διατομής που περιγράφεται ως περιοχή ρευστού (Fluid Domain) με δύο υποπεριοχές: εξωτερική περιοχή

(outer domain) και εσωτερική περιοχή (inner domain). Η εξωτερική περιοχή, με διαστάσεις 270 m μήκος και ακτίνα από 120m έως 240m αποτελεί το σύνολο του πεπερασμένου χώρου όπου διοχετεύεται το ρευστό, ενώ η εσωτερική περιοχή περικλείει το τοίχωμα που δημιουργεί το μοντέλο της Α/Γ και αποτελεί την περιοχή της γεωμετρίας του ρευστού η οποία περιστρέφεται κατά την προσομοίωση της ροής ( ανέμου) στον κώδικα FLUENT και χαρακτηρίζεται από αυξημένη πυκνότητα στοιχείων (elements) σε σχέση με την εξωτερική. Ο άξονας του μοντέλου της Α/Γ είναι τοποθετημένο 90 m από την επιφάνεια εισροής του ρευστού (inlet) και σε ίση απόσταση από τα τοιχώματα (wall). Η δημιουργία της περιοχής ρευστού προέκυψε με τη δημιουργία σχεδίου (sketch) στο XY Plane του μοντέλου με τις προαναφερθείσες διαστάσεις και με την εντολή Create → Extrude → Add Material για τη δημιουργία του τρισδιάστατου όγκου της εξωτερικής περιοχής ρευστού. Το μοντέλο της Α/Γ με την εσωτερική περιοχή ρευστού διαχωρίστηκε με την εντολή Create → Boolean → Subtract δημιουργώντας τοίχωμα στο εσωτερικό της περιοχής αντί για το μοντέλο της Α/Γ. Αντίστοιχα, οι δύο περιοχές ρευστού ενώθηκαν με τη εντολή Create → Boolean → Unite. Το μοντέλο προς προσομοίωση είναι το παρακάτω:

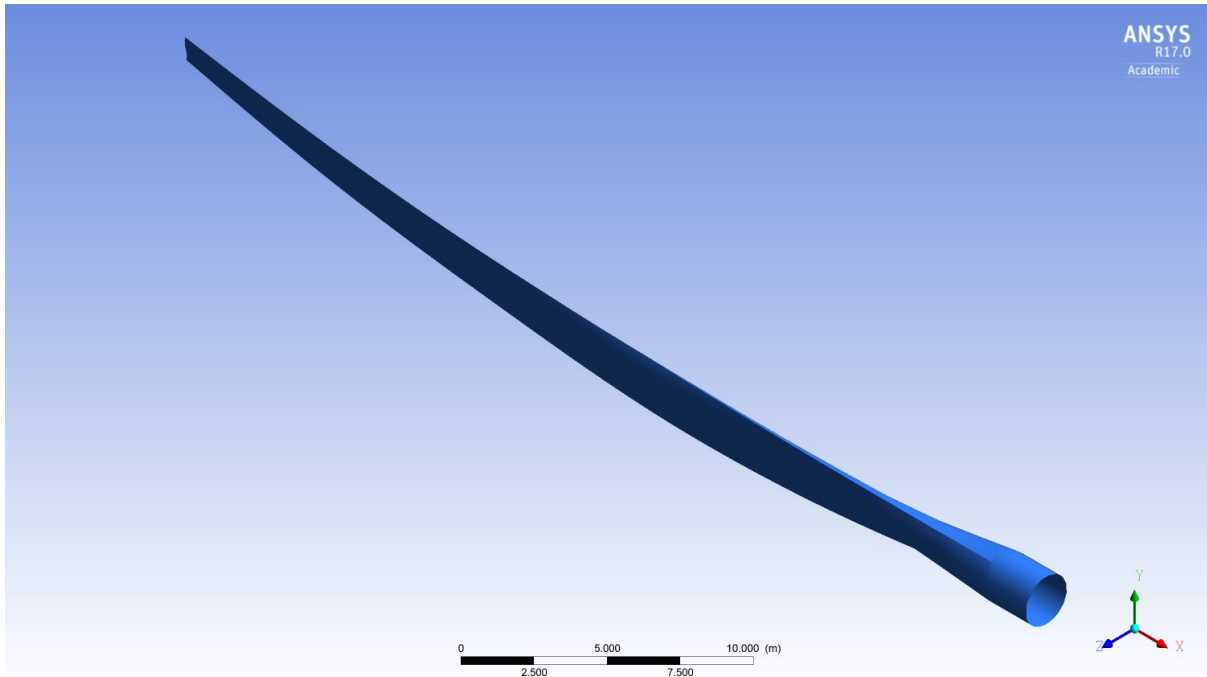


Σχήμα 5.6: Μοντέλο προς υπολογιστική προσομοίωση

## 2. Μοντέλο Α/Γ για Mechanical ανάλυση:

Με χρήση της εντολής Concept → Surfaces From Edges δημιουργούνται οι επιφάνειες των πτερυγίων και των υποστηριγμάτων. Στη συνέχεια, με την εντολή Create → Body Operation → Sew ενώνονται οι επιφάνειες ώστε να προκύψουν τα κλειστά κελύφη

των μερών της Α/Γ. Η κεντρική δοκός παραμένει στερεό στοιχείο (Solid Body) της κατασκευής ενώ τα υπόλοιπα μέρη έχουν μετασχηματιστεί σε επιφανειακά στοιχεία (Surface Bodies). Με αυτό τον τρόπο προκύπτει το παρακάτω μοντέλο:



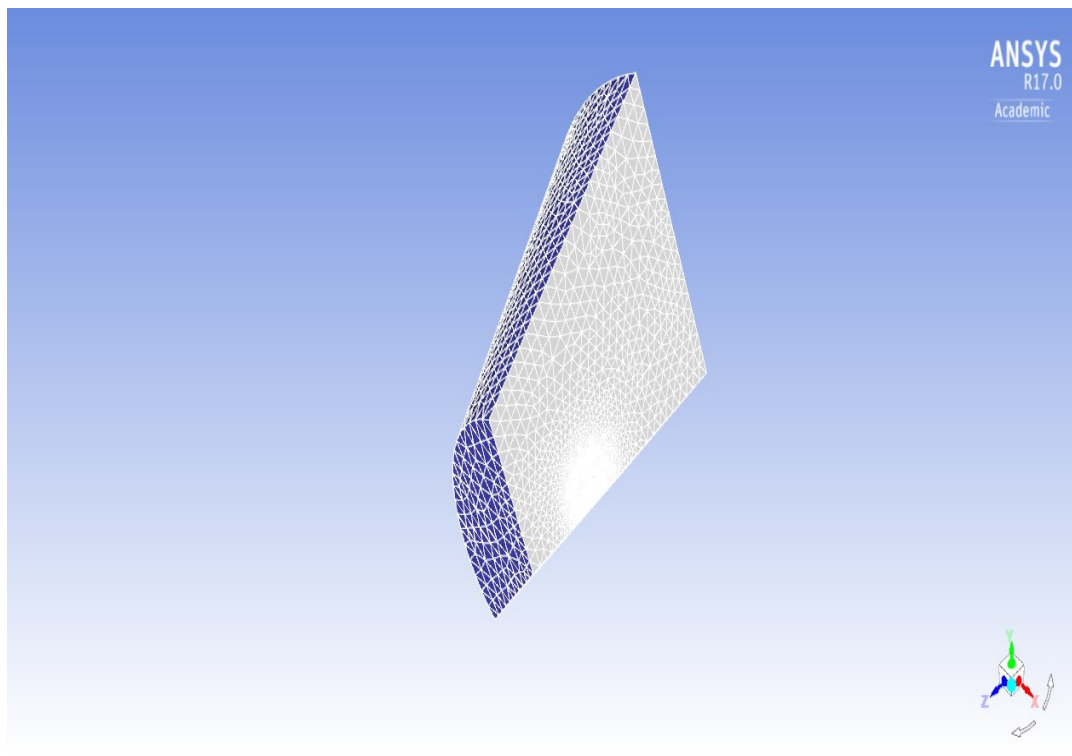
Σχήμα 5.7: Μοντέλο προς μηχανική ανάλυση

Παρατήρηση: Τα δύο διαφορετικά σετ μοντέλων βρίσκονται στο ίδιο αρχείο του Design Modeler και σε άμεση συσχέτιση, δηλαδή οποιαδήποτε αλλαγή στη γεωμετρία επηρεάζει και τα δύο. Ωστόσο, ο διαχωρισμός τους στη διαμόρφωση της εκάστοτε ανάλυσης προκύπτει με την εφαρμογή της εντολής Suppress για τα μη απαιτούμενα στοιχεία σε κάθε περίπτωση.

### 5.6.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΟΓΚΩΝ ΡΕΥΣΤΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (CFD)

Στο module Mesh με άνοιγμα της επιλογής Mesh, αποκτάται πρόσβαση στο εργαλείο δημιουργίας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.

Για τη δημιουργία των πεπερασμένων όγκων ρευστού στις δύο περιοχές ρευστού (εξωτερική και εσωτερική), με επιλογή των συστατικών μερών του μοντέλου της Α/Γ και με την εντολή Suppress, αφαιρούνται - αποκρύπτονται τα συστατικά αυτά μέρη από την τρέχουσα ανάλυση.



Σχήμα 5.8: Το πλέγμα των πεπερασμένων όγκων που δημιουργήθηκε

Αρχίζουμε με την ονομασία διαφόρων επιφανειών της γεωμετρίας μας για μεταγενέστερη χρήση στο FLUENT και για να κάνουμε την αναφορά στο σώμα πιο εύκολη όταν δημιουργούμε το πλέγμα.

Παρακάτω αναφέρονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν στο ANSYS για τη δημιουργία του πλέγματος:

1. Suppress Blade FEA
2. Show the fluid geometry, wireframe.
3. Create named selections
  - a) Inlet
  - b) Inlet-Top
  - c) Outlet
  - d) Blade
  - e) Period 1
  - f) Period 2
  - g) Fluid

Ακολούθως, εφαρμόζοντας τον ορισμό ορισμένων ρυθμίσεων **Global Mesh** πράγμα που σημαίνει ότι αυτές οι ρυθμίσεις θα εφαρμοστούν συνολικά σε ολόκληρο το πλέγμα.



1. Automatically optimized for CFD and FLUENT, tetrahedral cells.
2. Change use advanced size function to proximity and curvature. It makes it deal with curves better, lower skewness.
3. Change relevance center to medium

1. Insert Match Control
  - a) Select the two trapezoid faces for the high and low geometry selection
  - b) Choose axis of rotation to be global coordinate
  - c) Match control is for the nodes to match up for the periodic sides.
2. Insert face sizing
  - a) Use the name selection, blade surface.
  - b) Input sizing of 0.3m.
  - c) Behavior should be hard.
3. Insert local inflation around the blade
  - a) Geometry is the whole body
  - b) For boundary, select named selection and choose the blade (click enter)
  - c) Keep default settings for the rest
4. Add a sphere of influence
  - a) First, create a new coordinate system.
  - b) Define it by named selections and choose the blade surface.
  - c) Insert body sizing
  - d) Geometry, the whole body
  - e) Type: sphere of influence
  - f) Sphere center: Coordinate System
  - g) Radius: 30m
  - h) Element size: 2m
  - i) Click Generate

### **Ποιότητα πλέγματος**

Συνιστάται γενικά να διατηρείται η ελάχιστη ορθογωνικότητα μεγαλύτερη από 0,15 και η μέγιστη skewness μικρότερη από 0,95. Η ύπαρξη κακών στοιχείων ή στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα προσομοίωσης. Ωστόσο, αυτοί είναι γενικοί κανόνες καθοδήγησης και εξαρτώνται από τη φυσική που επιλύεται ή από την τοποθεσία των κελιών. Οι παρακάτω πίνακες μπορούν να σας βοηθήσουν να μετρήσετε την ποιότητα των ματιών σας.

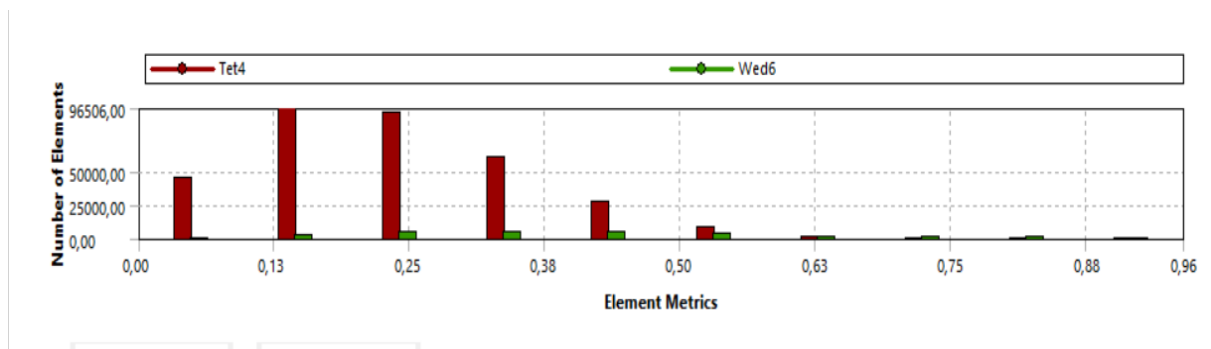
**Skewness:**

Εξαιρετική	Πολύ καλή	Καλή	Επαρκής	Κακή	Ακατάλληλη
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.98	0.98-1.00

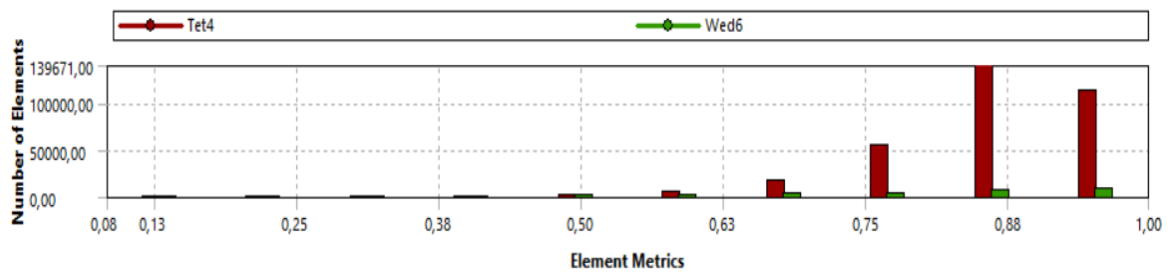
**Orthogonal Quality:**

Ακατάλληλη	Κακή	Επαρκής	Καλή	Πολύ καλή	Εξαιρετική
0-0.001	0.001-0.15	0.15-0.20	0.20-0.70	0.70-0.95	0.95-1.00

Στα παρακάτω διαγράμματα διαπιστώνεται η εξαιρετική ποιότητα του πλέγματος που δημιουργήθηκε:



Σχήμα 5.9: Skewness of mesh



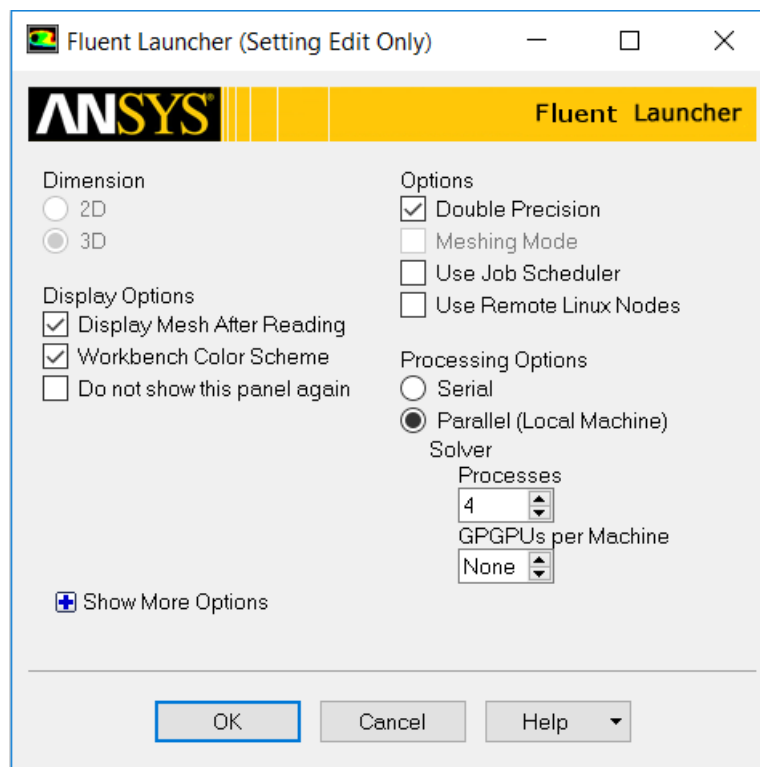
Σχήμα 5.10: Orthogonal Quality of Mesh

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	71643
<input type="checkbox"/> Elements	356628
<b>Mesh Metric</b>	<b>Orthogonal Quality</b>
<input type="checkbox"/> Min	8,2675e-002
<input type="checkbox"/> Max	0,99815
<input type="checkbox"/> Average	0,85382
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	9,753e-002

Σχήμα 5.11: Στατιστικά στοιχείων πλέγματος

#### 5.6.4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗ 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 παράλληλη επεξεργασία του μοντέλου σε 4 επεξεργαστές και διπλής ακρίβειας ανάλυση για τη δημιουργία αποτελεσμάτων μεγαλύτερης ακρίβειας, αλλά απαιτείται μεγαλύτερος υπολογιστικός χρόνο.



Σχήμα 5.12: Διαμόρφωση αρχικών επιλογών προσομοίωσης

## 1. Fluent Launcher

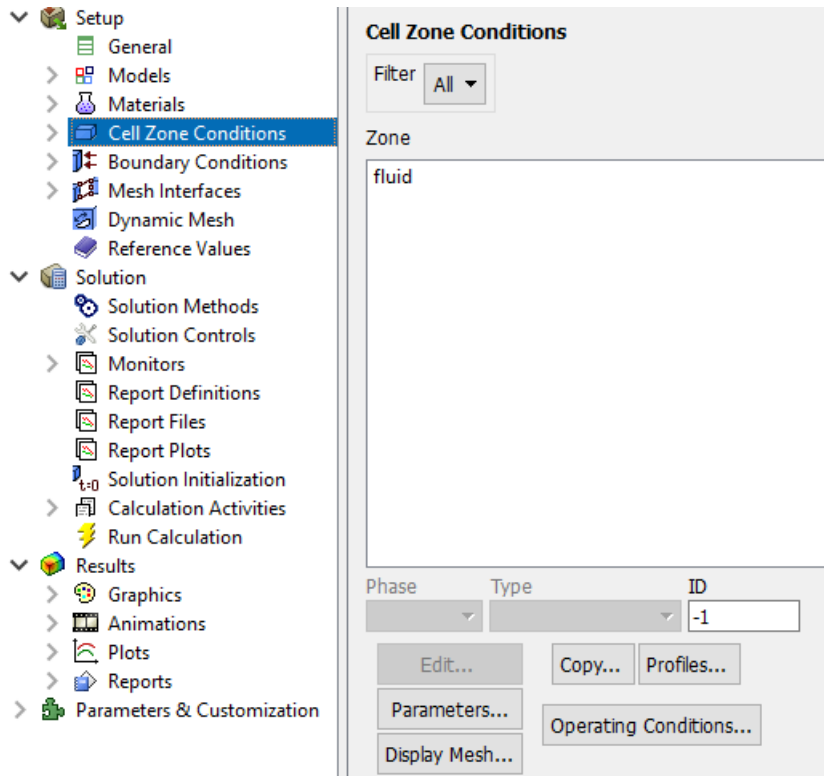
- a) Select double precision
- b) Select parallel and choose the number of cores, I recommend using as many as you have but note that you need a special HPC license if you choose to use more than 4 cores.

## 2. Models

- a) Edit viscous
  - i) K-omega
  - ii) SST

## 3. Cell zone conditions

- a) Edit Fluid
  - i) Enable Frame Motion
  - ii) Specify angular velocity to be -2.22 m/s



Σχήμα 5.13: Ρύθμιση παραμέτρων

## 1. Boundary Conditions

- a) Inlet
  - i) Velocity magnitude: 12m/s
- b) Inlet-Top
  - i) Component (X,Y,Z): (0,0,-12m/s)
- c) Blade
  - i) Default, wall
- d) Period 1 and Period 2
  - i) Change to Interface

## 2. Mesh Interface

- a) Click Create/edit
  - i) Name the mesh interface periodic
  - ii) Enable Periodic Boundary Condition
  - iii) Enable matching
  - iv) Type is Rotational
  - v) Offset angle is 120 degrees
  - vi) Choose the interface zones to be periodic 1 and periodic 2

Το τελευταίο που μας μένει για να ξεκινήσει το FLUENT την υπολογιστική επίλυση είναι να του ορίσουμε, ποια μέθοδος λύσης πρέπει να χρησιμοποιήσει, πόσες επαναλήψεις πρέπει να εκτελέσει, πώς να προετοιμαστεί για τη λύση και τι να απεικονίσει κατά τον υπολογισμό. Τέλος, τρέχουμε τον υπολογισμό. Τα τελευταία βήματα λοιπόν έχουν ως ακολούθως.

## 1. Solution Methods

- a) Change Scheme to Coupled
- b) Pressure to Standard
- c) Check Pseudo Transient and High Order term relaxation

## 2. Monitors

- a) Change the residuals of each field to 1e-6
- b) Create a surface monitor
  - i) Select plot
  - ii) Select write
  - iii) Select Blade surface

## 3. Solution Initialization

- a) Standard
  - i) From inlet

## 4. Run Calculation

- a) Set the number of iterations to 1500
- b) Initialize and Run calculation

**Run Calculation**

Check Case... Update Dynamic Mesh...

Pseudo Transient Options

Fluid Time Scale

Time Step Method Timescale Factor

User Specified 1

Automatic

Length Scale Method Verbosity

Conservative 0

Number of Iterations Reporting Interval

1500 1

Profile Update Interval

1

Data File Quantities... Acoustic Signals...

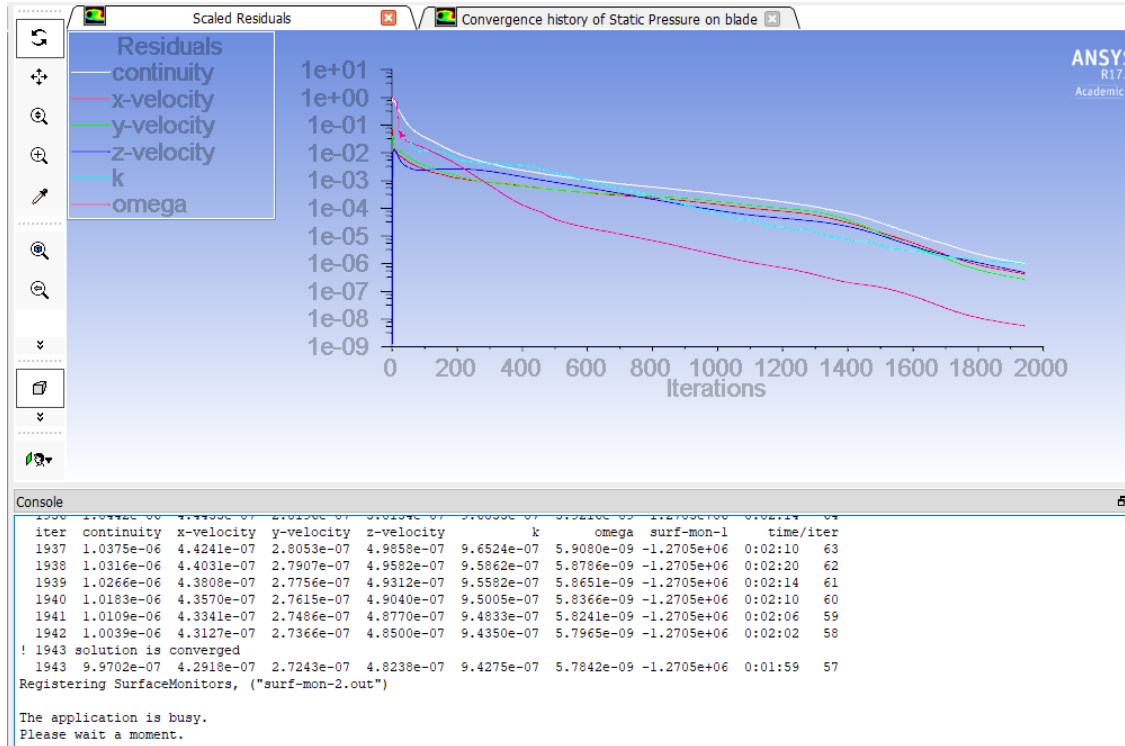
Acoustic Sources FFT...

Calculate

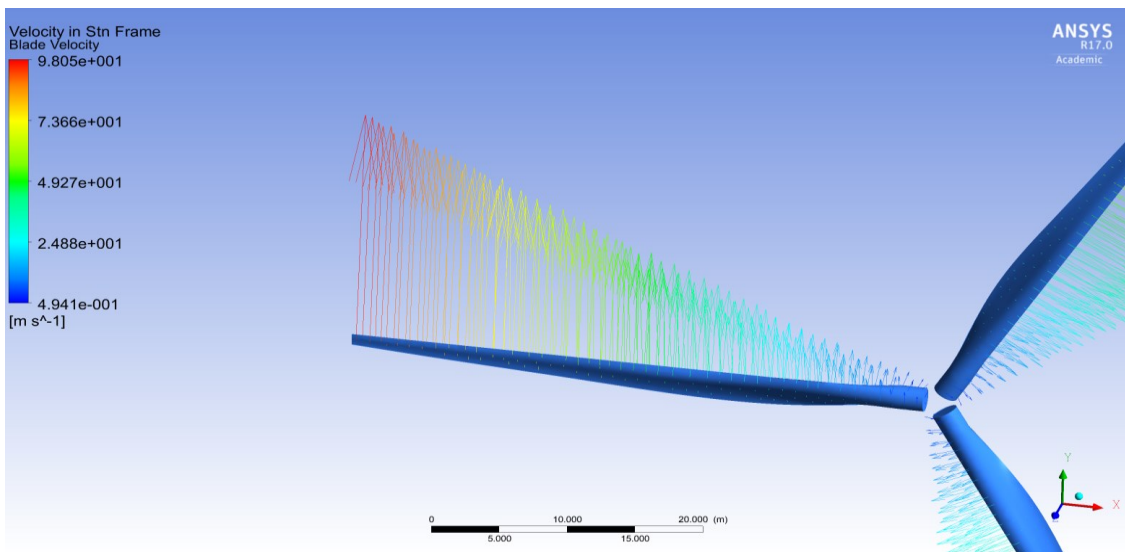
Σχήμα 5.14: Αρχικοποίηση της επίλυσης

## 5.6.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ANSYS FLUENT

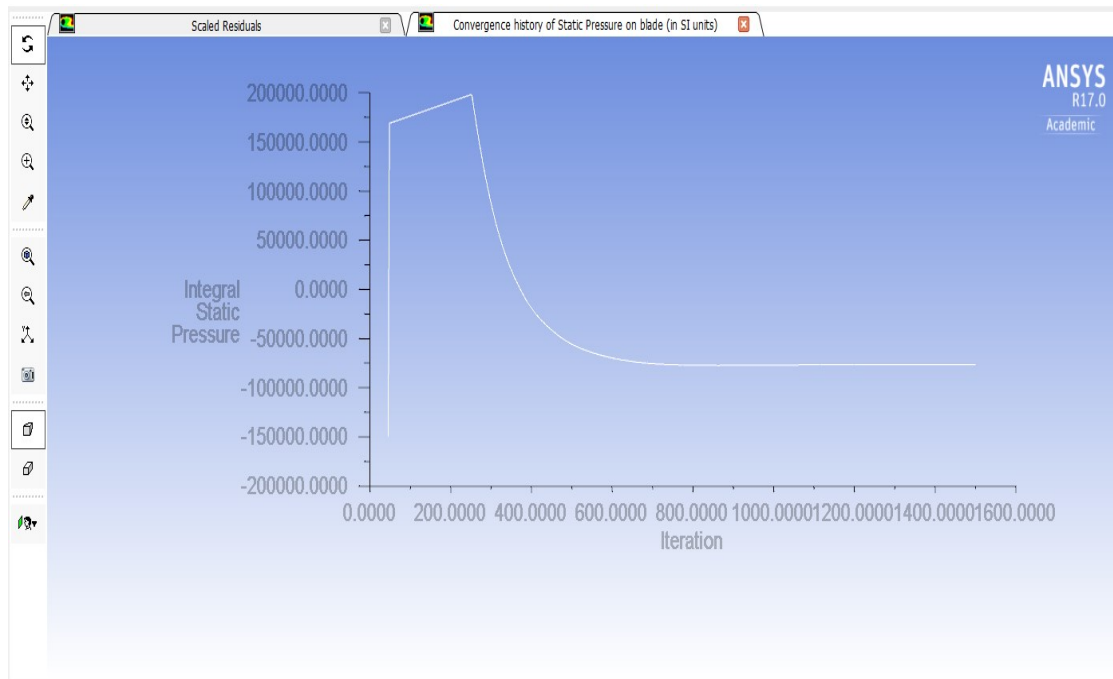
Αφού ολοκληρωθούν οι προσομοιώσεις, δίνεται η δυνατότητα οπτικοποίησης των πεδίων πίεσης για τις τρεις διαφορετικές αναλύσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται αποτελέσματα με τη χρήση του CFD-Post:



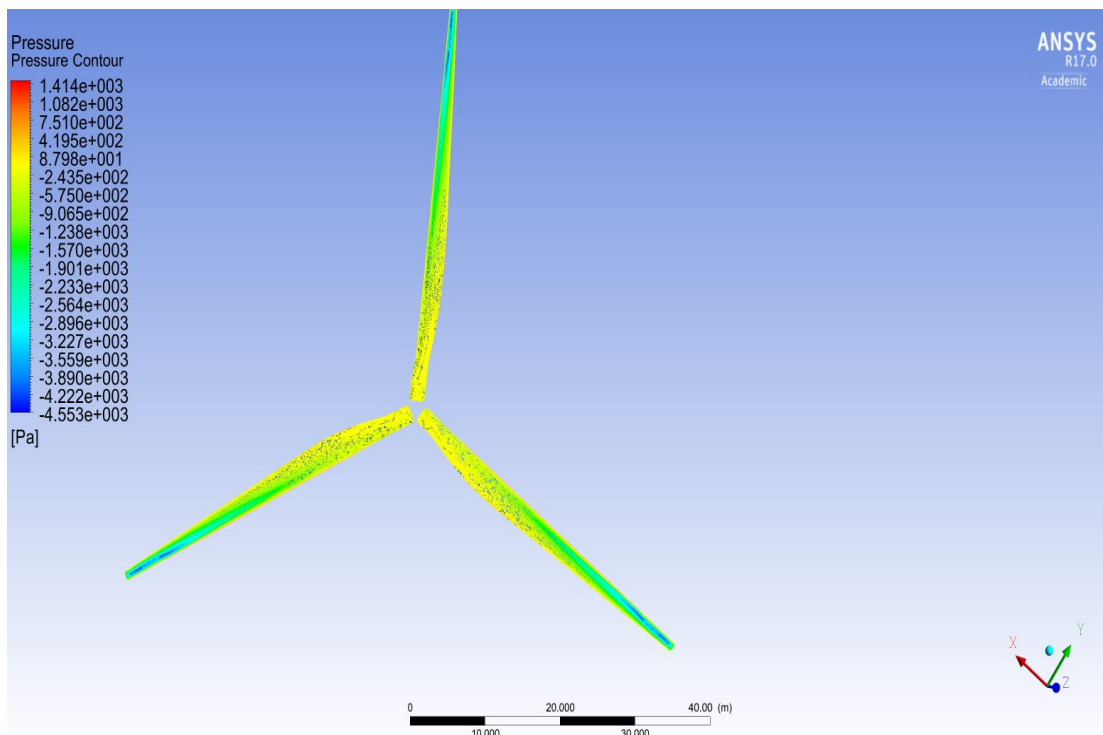
Σχήμα: 5.15 Σύγκλιση της υπολογιστικής προσομοίωσης για ταχύτητα 50 m/s



Σχήμα: 5.16 Ταχύτητα του περφυγίου για την προσομοίωση στα 12 m/s (CFD-Post)

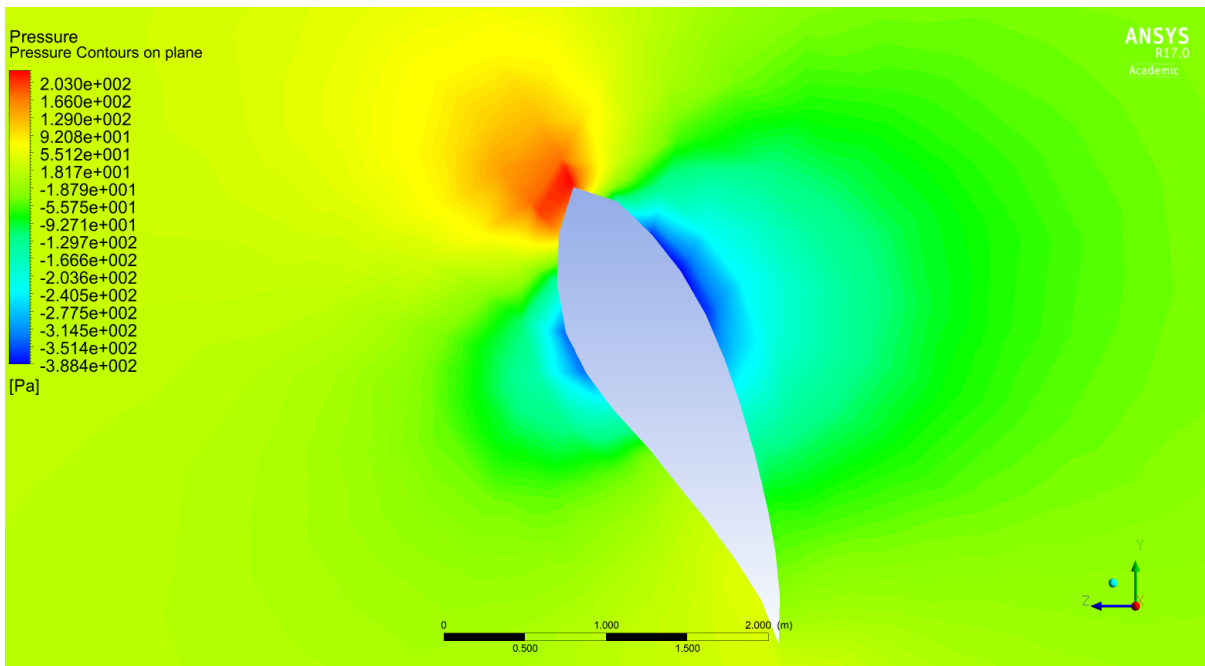


Σχήμα: 5.17 Επιτυχία ικανοποιητικής προσομοίωσης με έλεγχο της στατικής πίεσης πάνω στο πτερύγιο

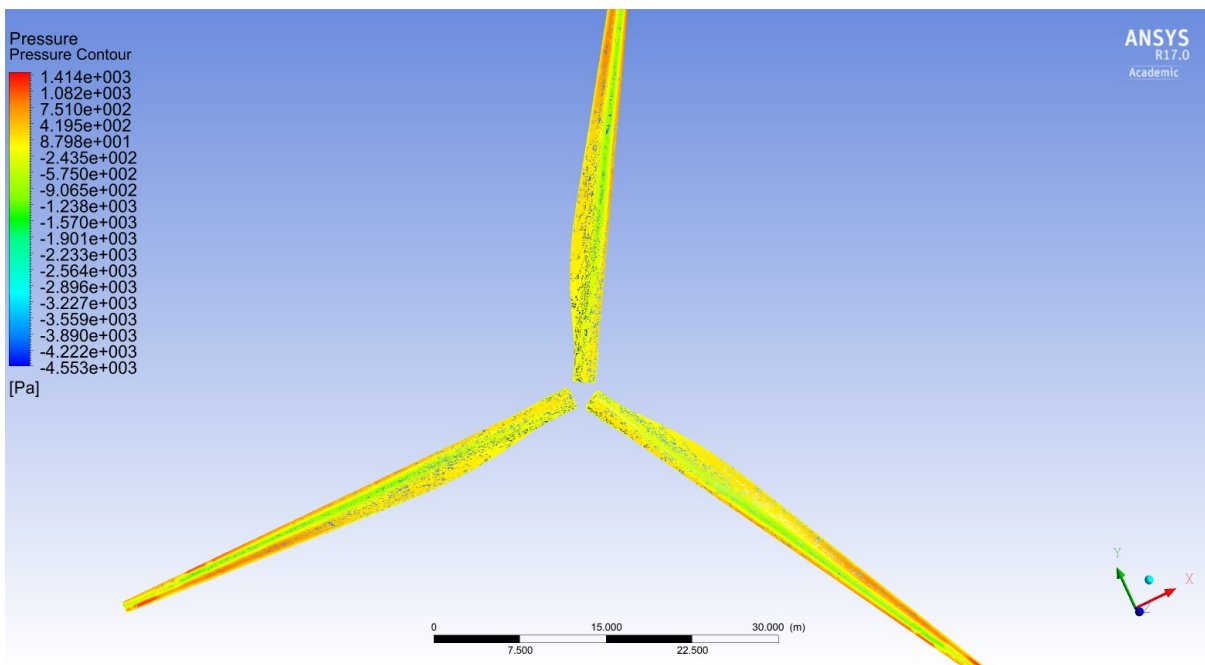


Σχήμα: 5.18 Πεδία πιέσεων στην πίσω πλευρά του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 12 m/s (CFD-Post)

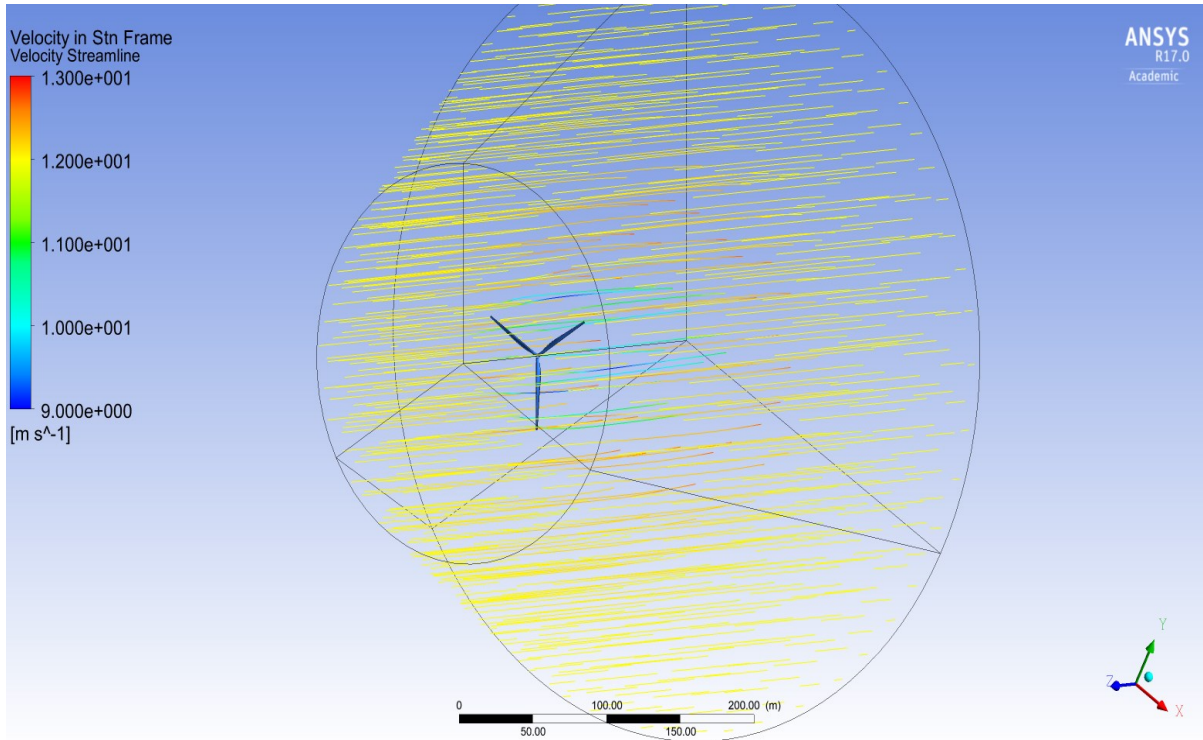




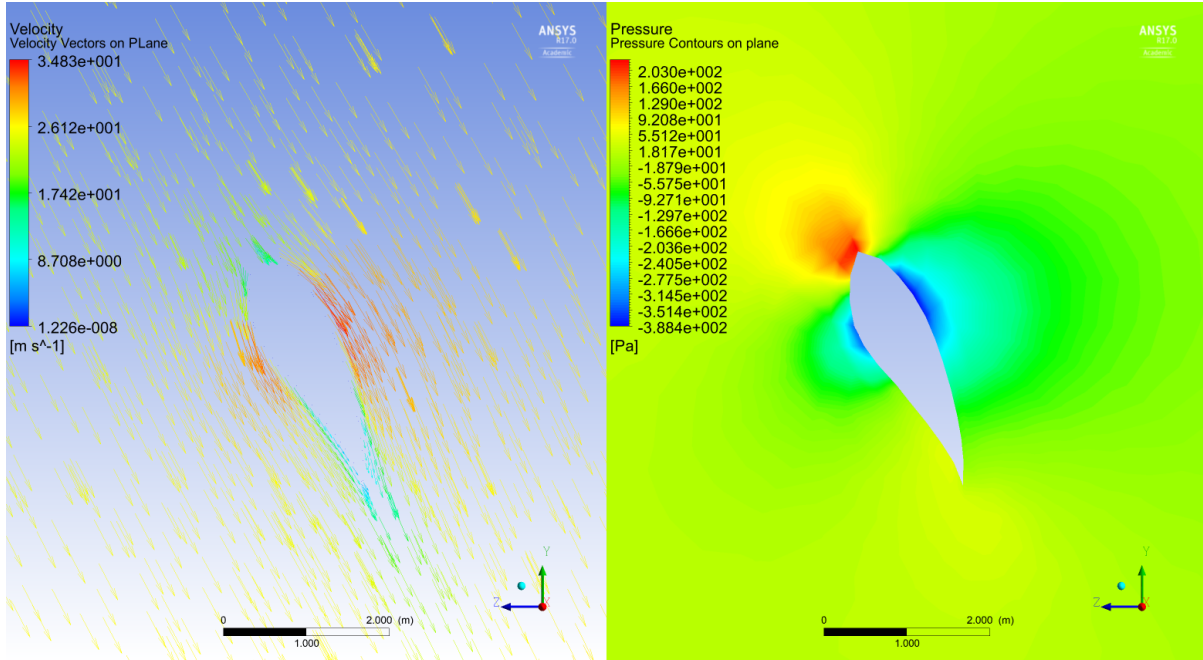
Σχήμα: 5.19 Volume Rendering του πεδίου πίεσης στην περιοχή fluid\_domain\_inner σε τομή κατά του επιπέδου YZ στο ενδιάμεσο της ακτίνας του πτερυγίου της Α/Γ για ταχύτητα 12 m/s (CFD-Post)



Σχήμα: 5.20 Πεδία πιέσεων στην μπροστινή πλευρά του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητα ανέμου 12 m/s (CFD-Post)



Σχήμα: 5.21 Ροϊκές γραμμές του ροϊκού πεδίου εντός του όγκου ελέγχου του ρευστού για ταχύτητα 12 m/s (CFD-Post)



Σχήμα: 5.22 Σύγκριση του πεδίου πίεσης με το διάνυσμα της ταχύτητας στην περιοχή γύρω από το πτερύγιο, σε τομή κατά του επιπέδου YZ στο ενδιαμέσο της ακτίνας του πτερυγίου της A/Γ για ταχύτητα 12 m/s (CFD-Post)

## 5.6.6 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΝΕΟΥ MODULE ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στο υπάρχον παράθυρο εργασίας με τη χρήση του drag and drop ανασύρεται το module Mechanical Mesh. Με την ίδια διαδικασία μεταξύ των υποστοιχείων Geometry, δημιουργείται σύνδεση των δύο και η επεξεργασμένη μορφή του μοντέλου ανανεώνεται στο νέο module.

## 5.6.7 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Με την επιλογή του στοιχείου Engineering Data, αποκτάται πρόσβαση στη βιβλιοθήκη ιδιοτήτων, όπου υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής και επεξεργασίας ιδιοτήτων υλικών. Σε αυτή την βιβλιοθήκη δημιουργούνται τα υλικά και οι αντίστοιχες ιδιότητες τους

The image shows two overlapping windows from a software application. The top window is titled "Outline of Schematic B2: Engineering Data" and contains a table with columns A (Contents of Engineering Data), B (Source), and D (Description). The bottom window is titled "Properties of Outline Row 3: Structural Steel" and contains a table with columns A (Property), B (Value), and C (Unit).

A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data	Source	Description
2	Material		
3	Structural Steel		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	Composite Fiberglass Reinforced Polyester (Pultruded), 55 wt.% glass		
5	Composite Fiberglass Reinforced Polyester (Spray-up/Lay-up), 30 wt.% glass		
6	Composite Fiberglass Reinforced Polyester 30% SMC (Compression)		
7	Composite Fiberglass Reinforced Polyester 50% SMC (Compression)		
8	Composite Fiberglass Reinforced Polyester 50% Woven Roving (Lay-Up)		
*	Click here to add a new material		

A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisso.		
8	Young's Modulus	2E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0.3		
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa	
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
16	Strain-Life Parameters			

Σχήμα: 5.23 Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικών της ανάλυσης

Στο module Mesh με άνοιγμα της επιλογής Mesh, αποκτάται πρόσβαση στο εργαλείο δημιουργίας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.

Για τη δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων για το σύνολο των συστατικών μερών του μοντέλου της Α/Γ και με την εντολή Suppress, αφαιρούνται - αποκρύπτονται οι περιοχές όγκου ρευστού από τη νέα ανάλυση.

Για τη δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, μέσω του μενού Mesh και με δεξί κλικ, επιλέγεται η εντολή Insert → Mapped Face Meshing, για την οποία επιλέγονται οι δεκαοκτώ επιφάνειες που αποτελούν τα κελύφη των πτερυγίων και των υποστηριγμάτων τους, ώστε να διαμορφωθεί η περιοχή σε αυτόματα τετραεδρικά στοιχεία με καλύτερη διάταξη και ποιότητα στοιχείων.

Ακολουθώντας, οι παρακάτω εντολές εκτελέστηκαν κατά σειρά για την εκτέλεση της μηχανικής ανάλυσης:

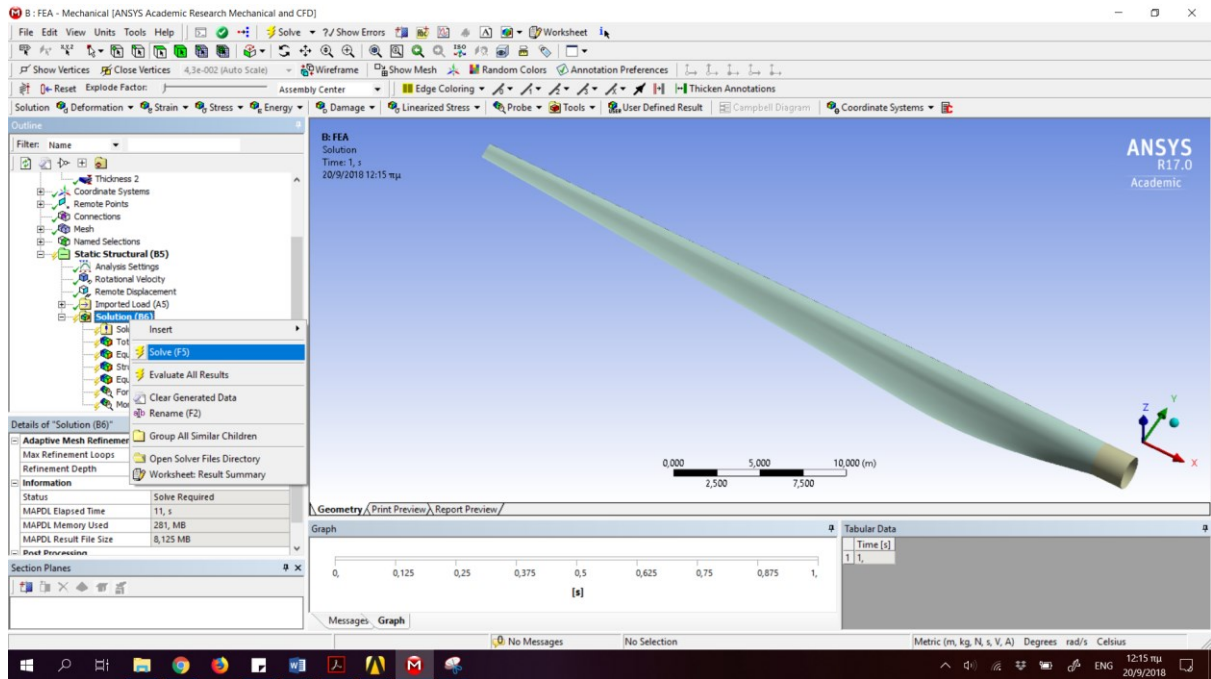
1. Material assignment
  - a. In Mechanical, under geometry -> assign the composite material.
2. Define coord. System for the blade elements
  - a. Create a new coordinate system, defined by global coordinates, don't change anything else.
  - b. Under where you specified the material, select the coordinate system just created.
3. Thickness
  - a. Select all surface bodies in the tree and change the thickness to 0.001m.
  - b. Blade variable thickness
    - i. Right click Geometry -> Insert thickness
    - ii. Change scoping method to named selections and choose the blade surface.
    - iii. Click the small arrow next to the yellow box and select tabular.
    - iv. Put -1m and -44.2 for x. Next to -1, input 0.1 for thickness and next to -44.2, put in 0.005m. Be careful as the order of the points might change on you.
  - c. Root variable thickness
    - i. Do the same thing but for the spar this time.
    - ii. The tabular data for the spar is -3, 0.1 and -44.2, 0.03

1. Remote Point
  - a. Right-click Model, insert remote point
  - b. Select the 4 root edges for the geometry
  - c. The point is located at the origin so input 0,0,0 for the coordinates
  - d. Change the behavior to rigid
2. Remote Displacement
  - a. Right-click Static Structural, insert remote displacement

- b. Change to scoping method to Remote Point
  - c. Select the remote point in the yellow box
  - d. Put in zeros for all remaining required entries
3. Connections
  - a. Delete the automatic contacts that was generated.
4. Rotational Velocity
  - a. Right-click Model, insert remote velocity
  - b. Define by components
  - c. Magnitude is -2.22 rad/s in the z-component
5. Large deflection
  - a. Turn on large deflection in analysis settings
6. Transfer the loads from CFD to FEA in Workbench
  - a. Close Mechanical
  - b. Drag the solution cell from the CFD project to the Setup cell of the FEA project
  - c. Double-click on physics setup to go back in mechanical and update the upstream data when prompted.
7. Import the pressure in Mechanical
  - a. The imported load solution folder will appear in the tree outline. Right-click it and select insert pressure.
    1. For the top field, select the blade surface from FEA the wetted surface.
    2. For the bottom field, select the blade surface from CFD.

Για να εκτελέσουμε την αριθμητική λύση, κάνουμε κλικ στην επίλυση. Το ANSYS σχηματίζει τον πίνακα δυσκαμψίας για κάθε στοιχείο, δημιουργεί τη μήτρα παγκόσμιας ακαμψίας και την αντιστρέφει για να πάρει τις μετατοπίσεις κόμβων. Αυτό είναι το μεγαλύτερο μέρος του υπολογισμού που εκτελεί το ANSYS. Όλα τα αποτελέσματα που θα δούμε στη συνέχεια, όπως το παραμορφωμένο σχήμα και οι τάσεις, προέρχονται από αυτές τις μετατοπίσεις κόμβων.

Σημειώστε ότι οι ροπές κάμψης που υπόκειται το πτερύγιο θα είναι στην αντίθετη κατεύθυνση από τις ροπές αντίδρασης.



Σχήμα: 5.24: Επίλυση της μηχανικής ανάλυσης

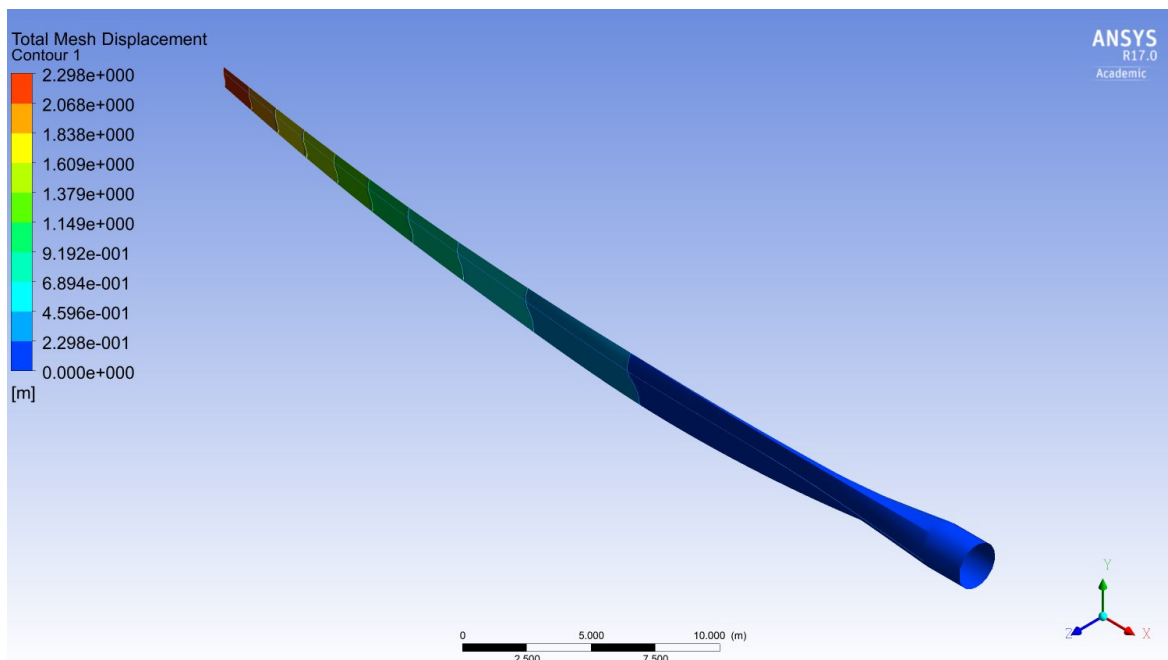
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

## 6.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετά το πέρας της επίλυσης του Μηχανικού Μοντέλου για τα υλικά που μελετούνται προέκυψαν οι παρακάτω απεικονίσεις για τις προσομοιώσεις στις τρεις περιπτώσεις ανέμου. Παρουσιάζονται η ολική παραμόρφωση (Total Deformation) και η Ισοδύναμη Τάση (Equivalent Stress) για κάθε υλικό και ταχύτητα ανέμου.

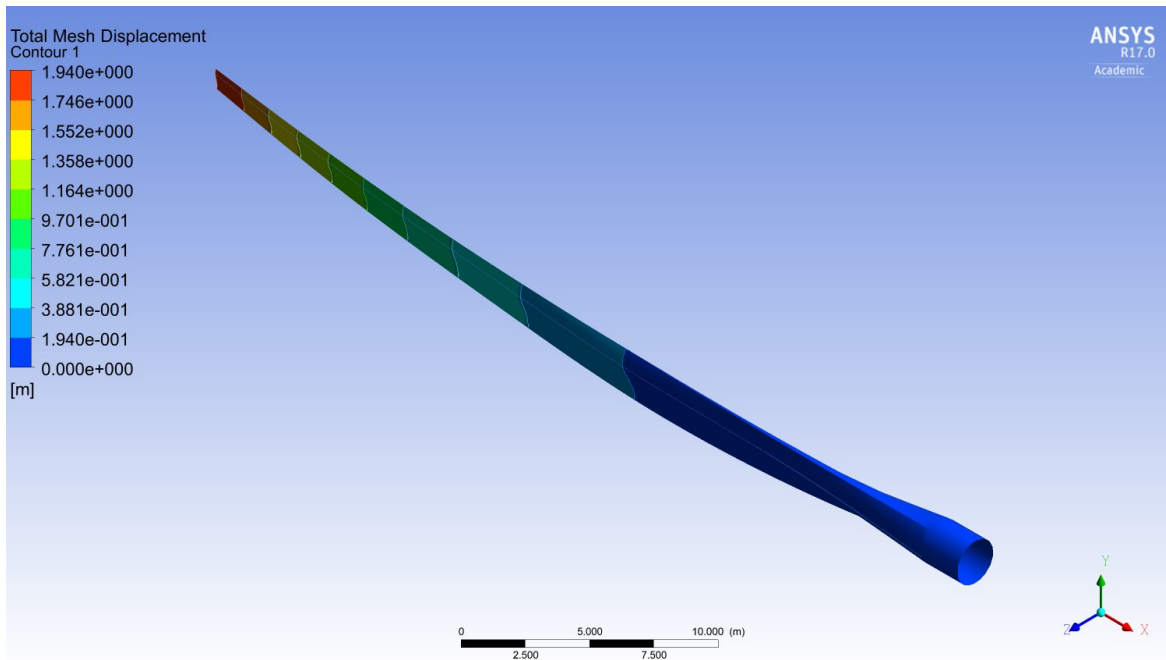
### ΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 30% Polyester SMC**:



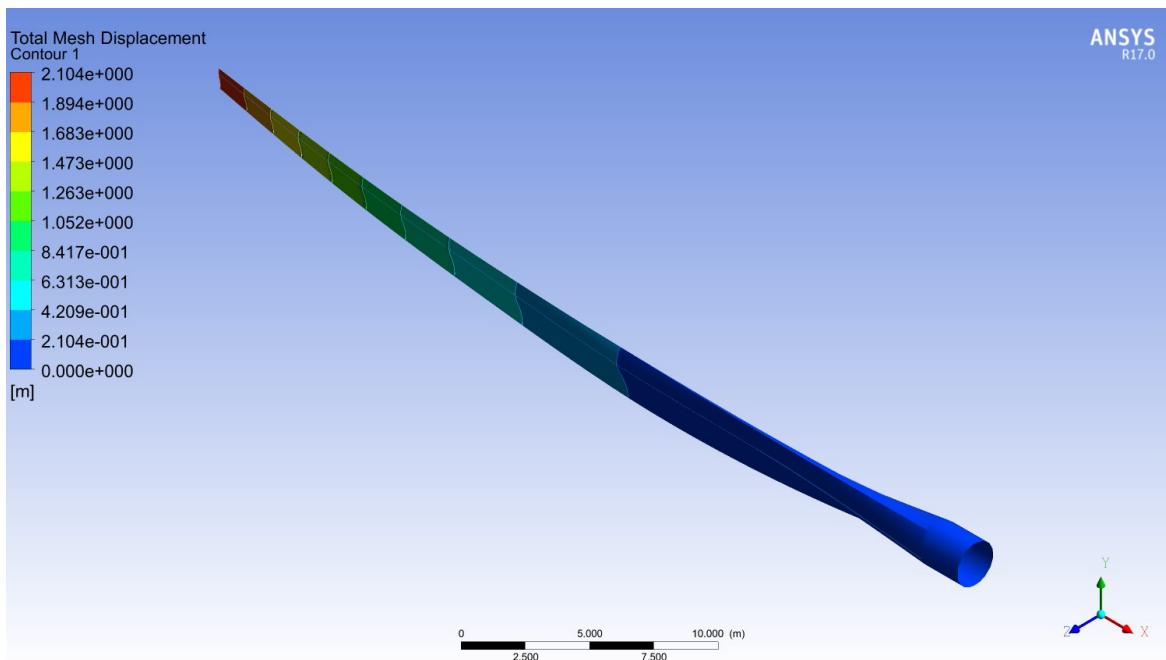
Σχήμα: 6.1: Ολική Παραμόρφωση GFRP 30% SMC, 12m/s

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester Woven Roving**:



Σχήμα: 6.2: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% SMC, 12m/s

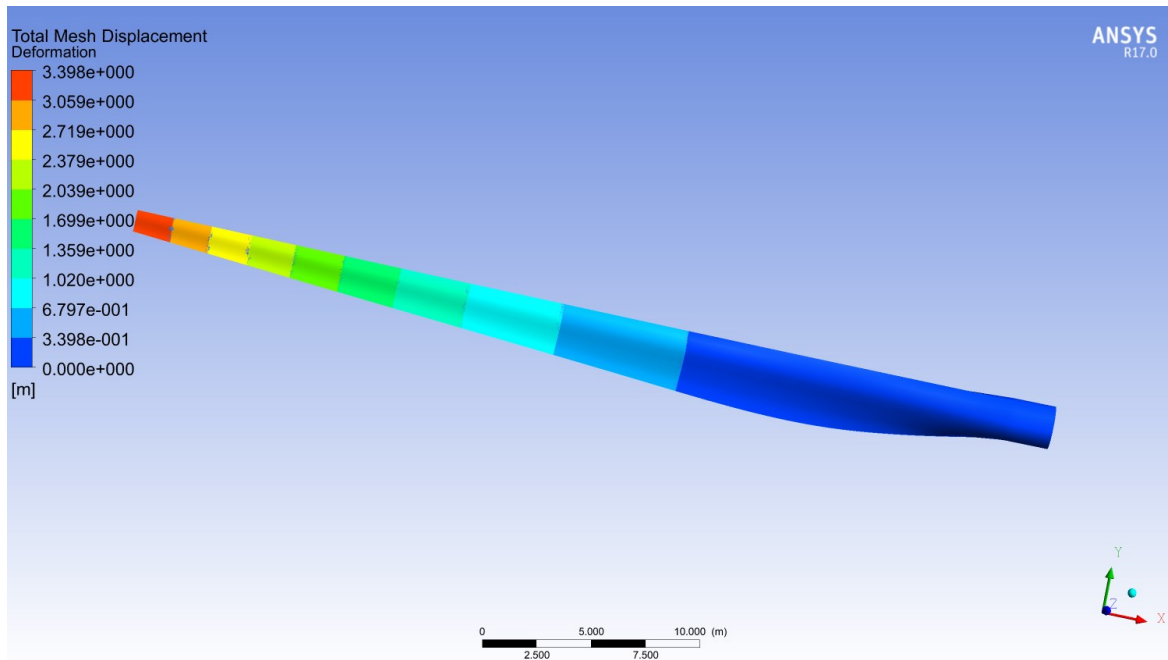
- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester Woven Roving**:



Σχήμα: 6.3: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% Woven Roving, 12m/s



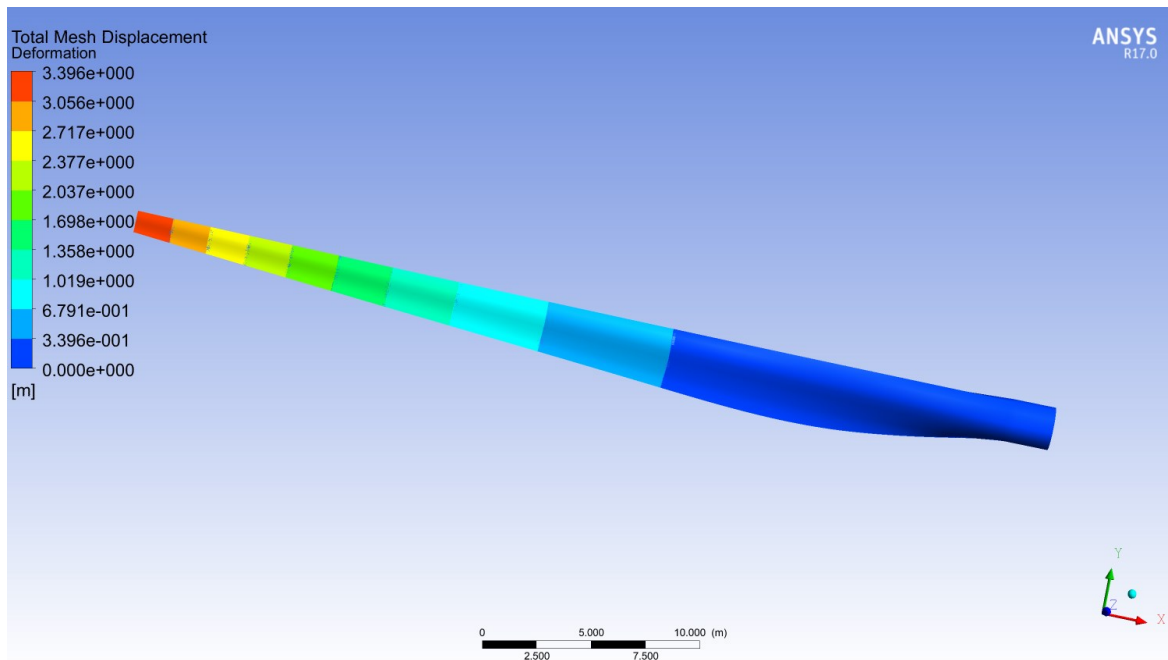
- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 30% Polyester SMC**:



Σχήμα: 6.4: Ολική Παραμόρφωση GFRP 30% SMC, 20m/s

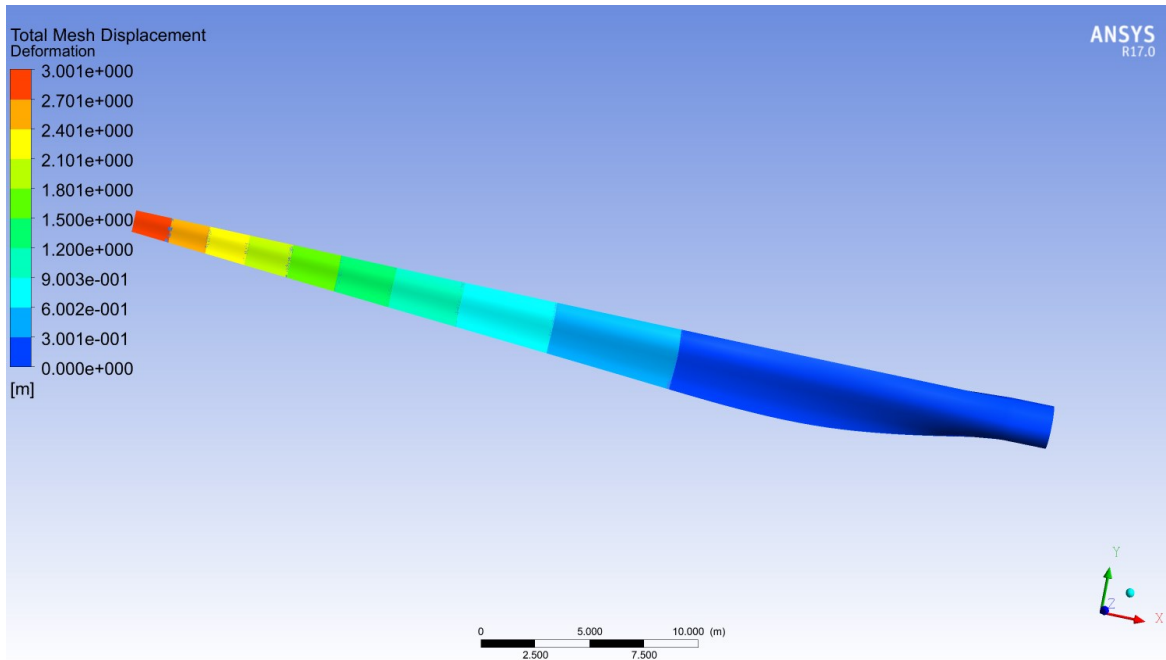
### ΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester Woven Roving**:



Σχήμα: 6.5: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% Woven Roving, 20m/s

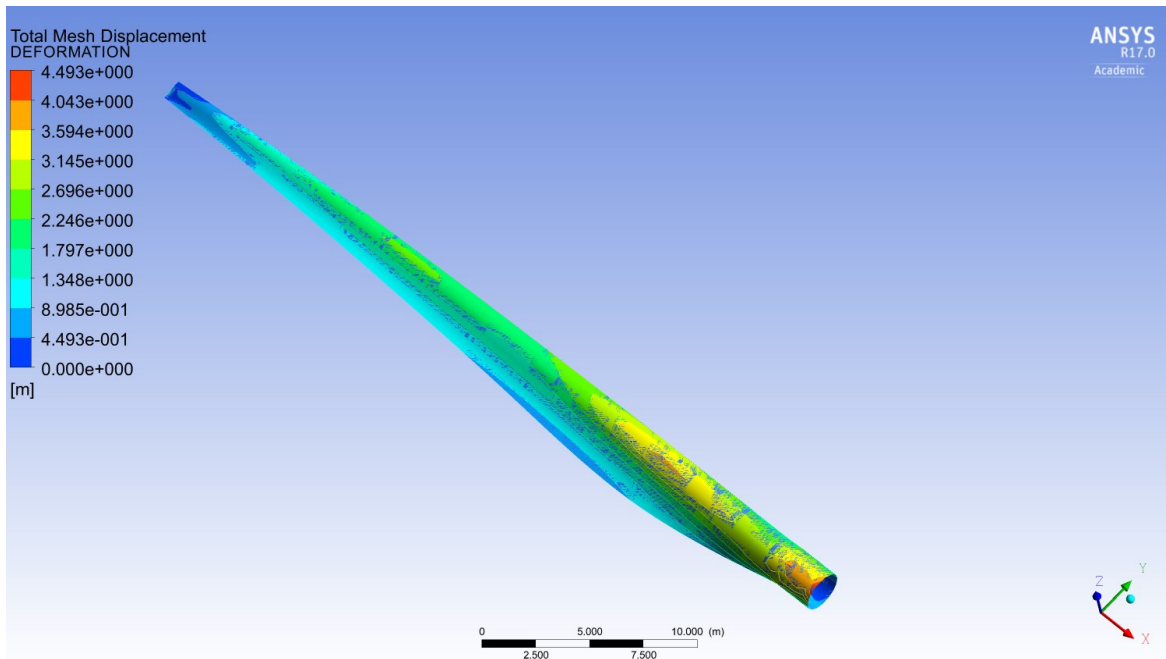
- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester SMC**:



Σχήμα: 6.6: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% SMC, 20m/s

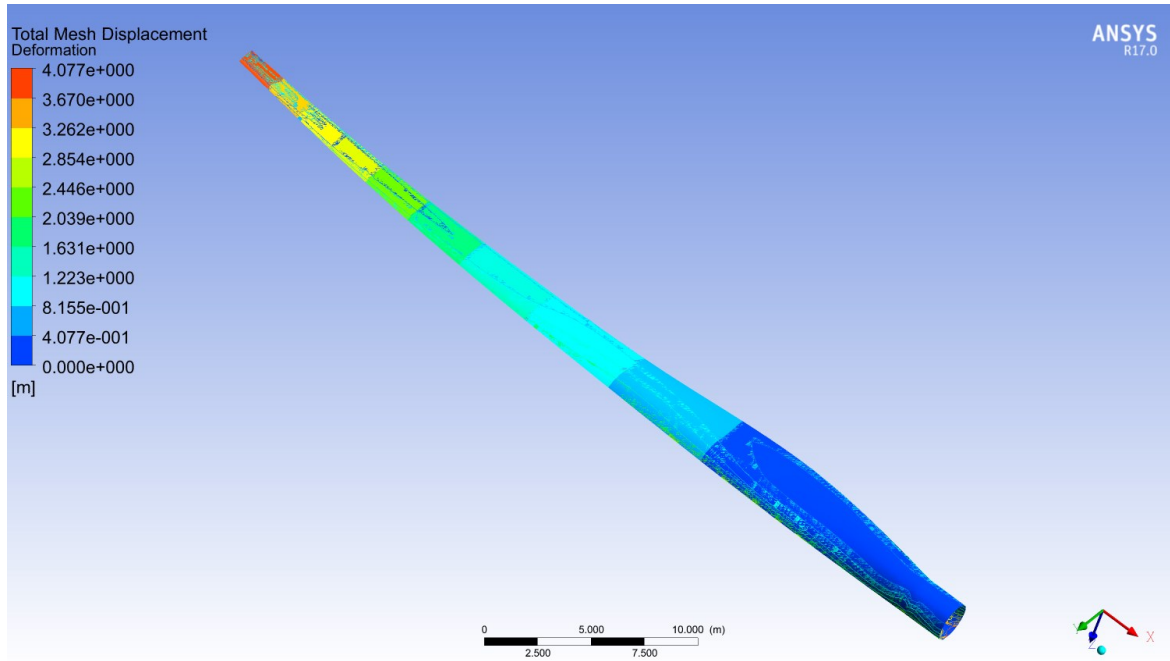
**ΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ**

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 30% Polyester SMC**:



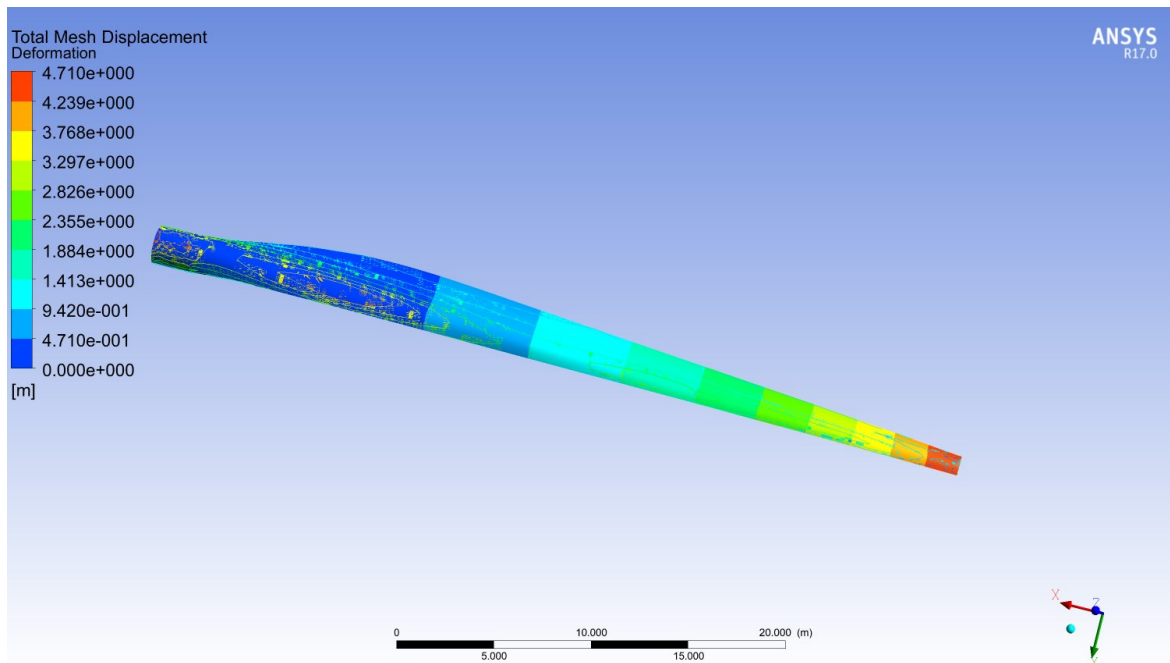
Σχήμα: 6.7: Ολική Παραμόρφωση GFRP 30% SMC, 50m/s

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester SMC**:



Σχήμα: 6.8: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% SMC, 50m/s

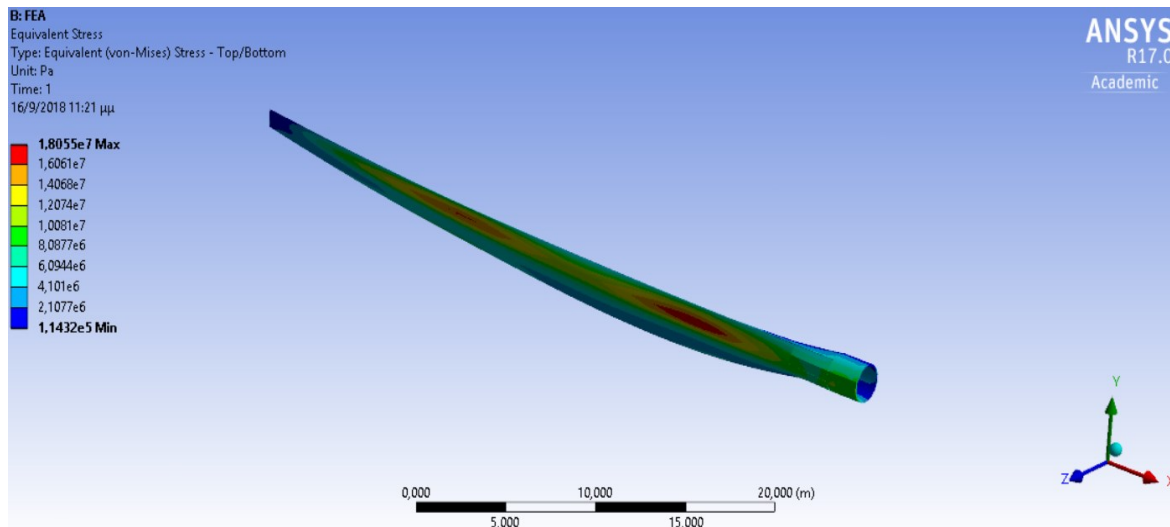
- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester Woven Roving**:



Σχήμα: 6.9: Ολική Παραμόρφωση GFRP 50% Woven Roving, 50m/s

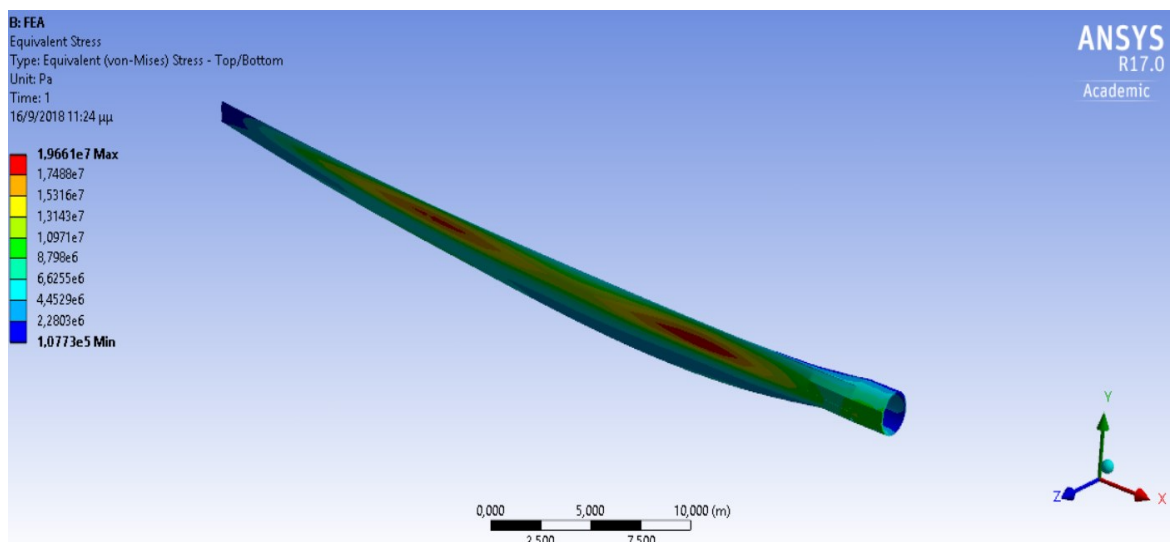
## ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ (VON MISES)

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 30% Polyester SMC**:



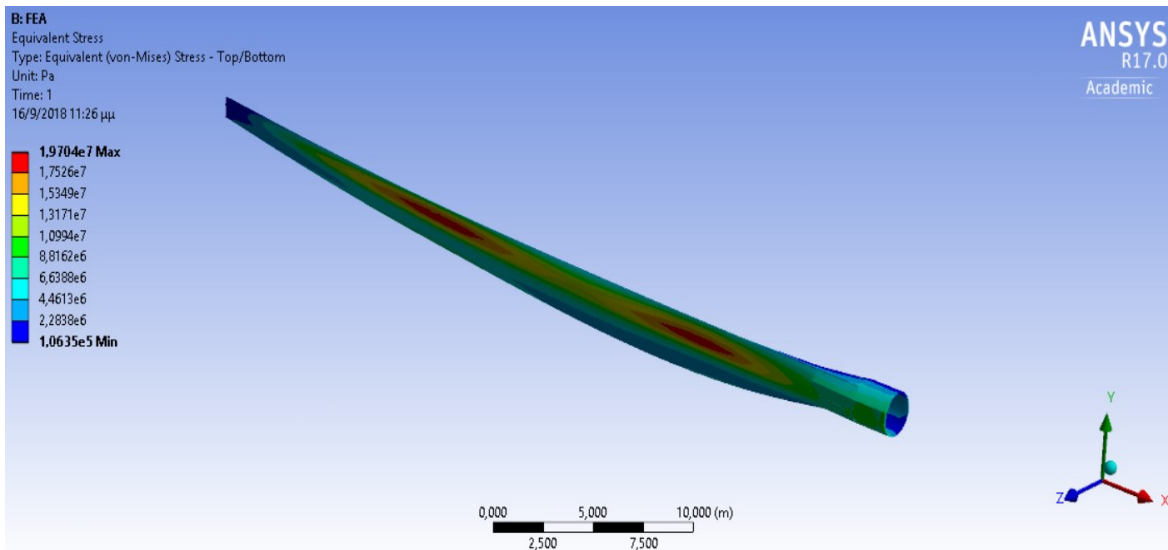
Σχήμα: 6.10: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 30% SMC, 12 m/s

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester SMC**:



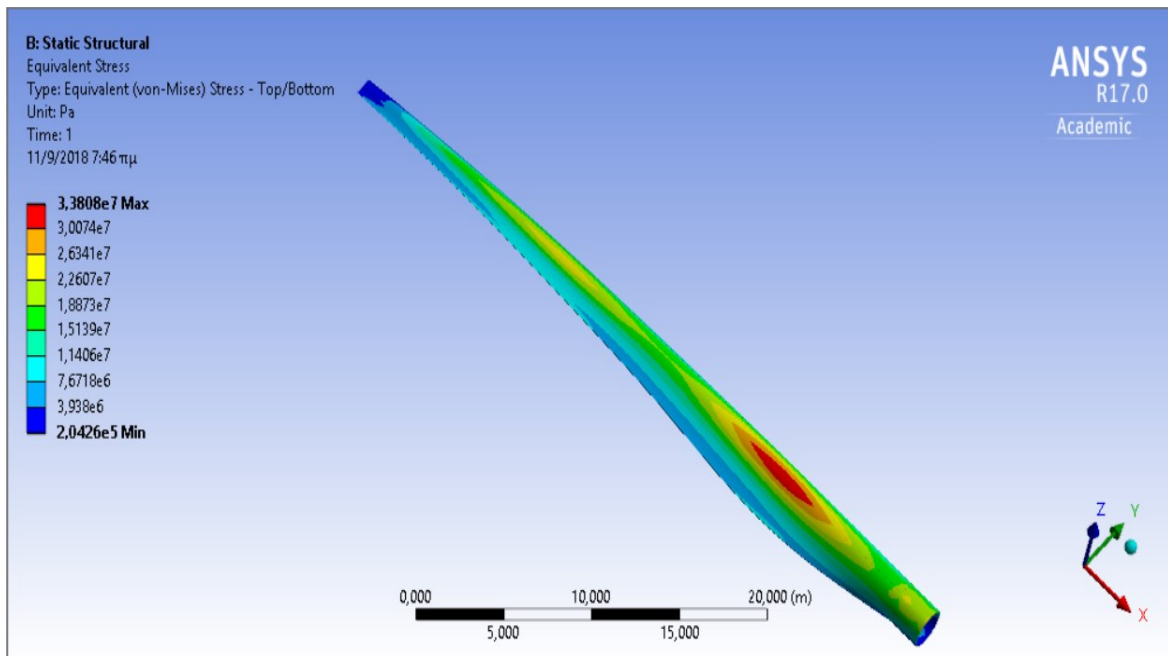
Σχήμα: 6.11: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 50% SMC, 12 m/s

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester Woven Roving**:



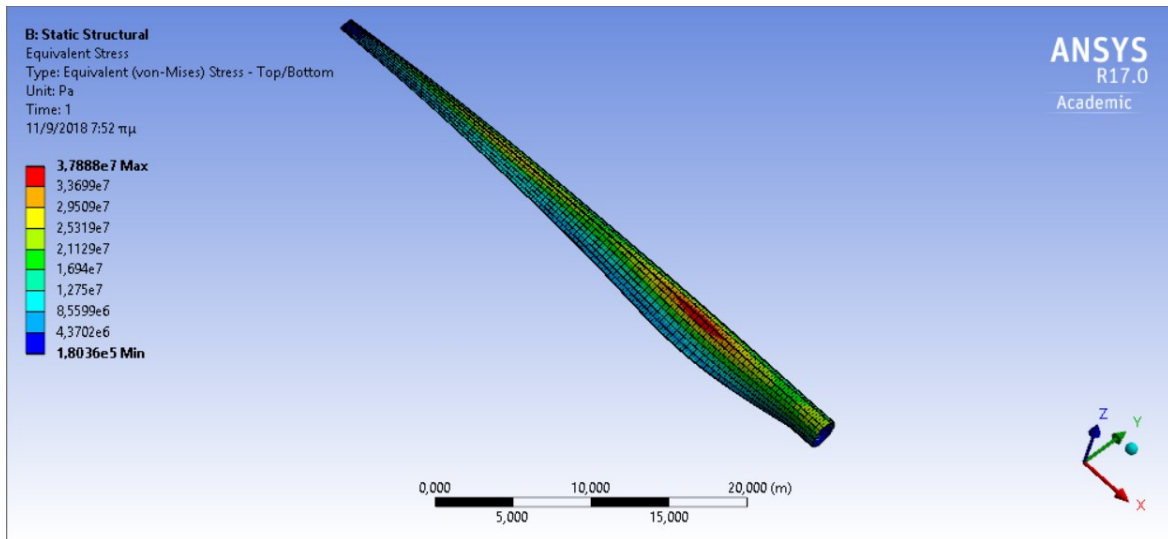
Σχήμα: 6.12: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 50% Woven Roving, 12 m/s

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 30% Polyester SMC**:



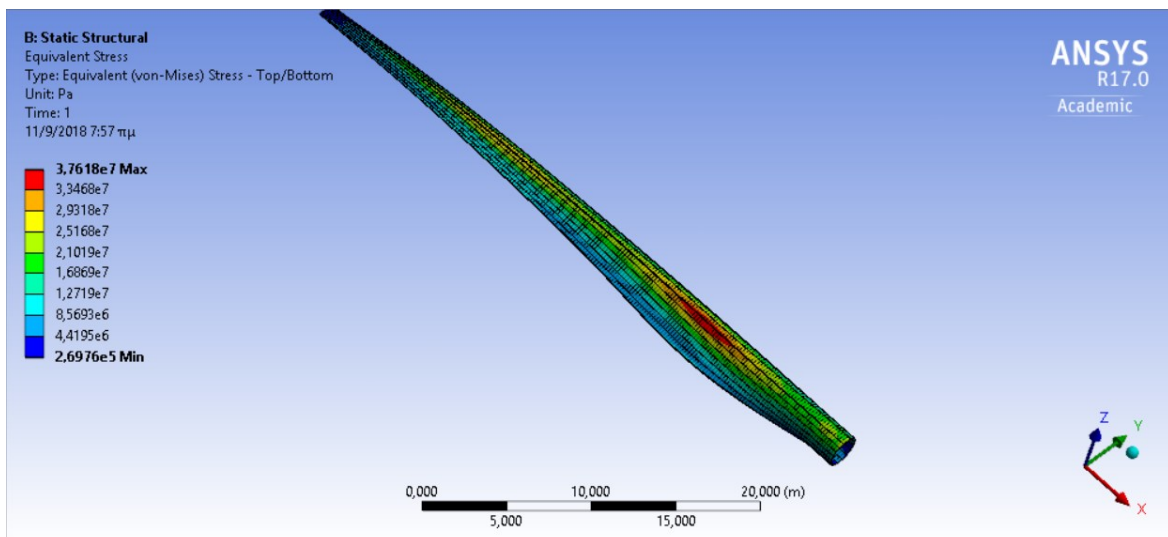
Σχήμα: 6.13: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 30% SMC, 20 m/s

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester SMC**:



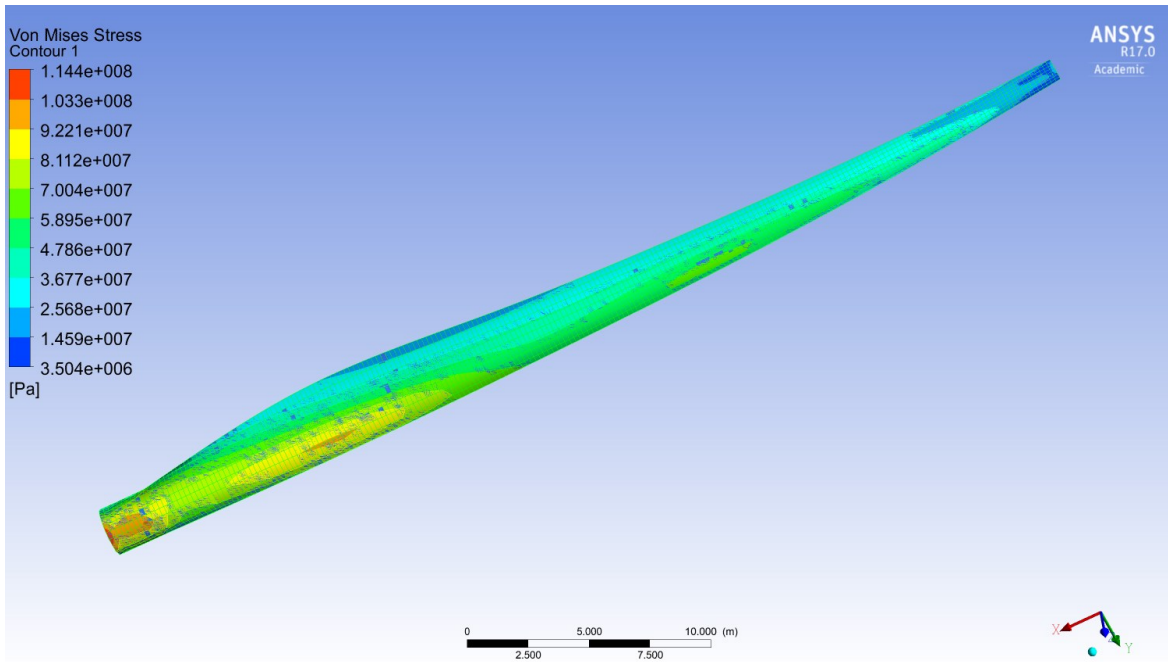
Σχήμα: 6.14: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 50% SMC, 20 m/s

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester Woven Roving**:



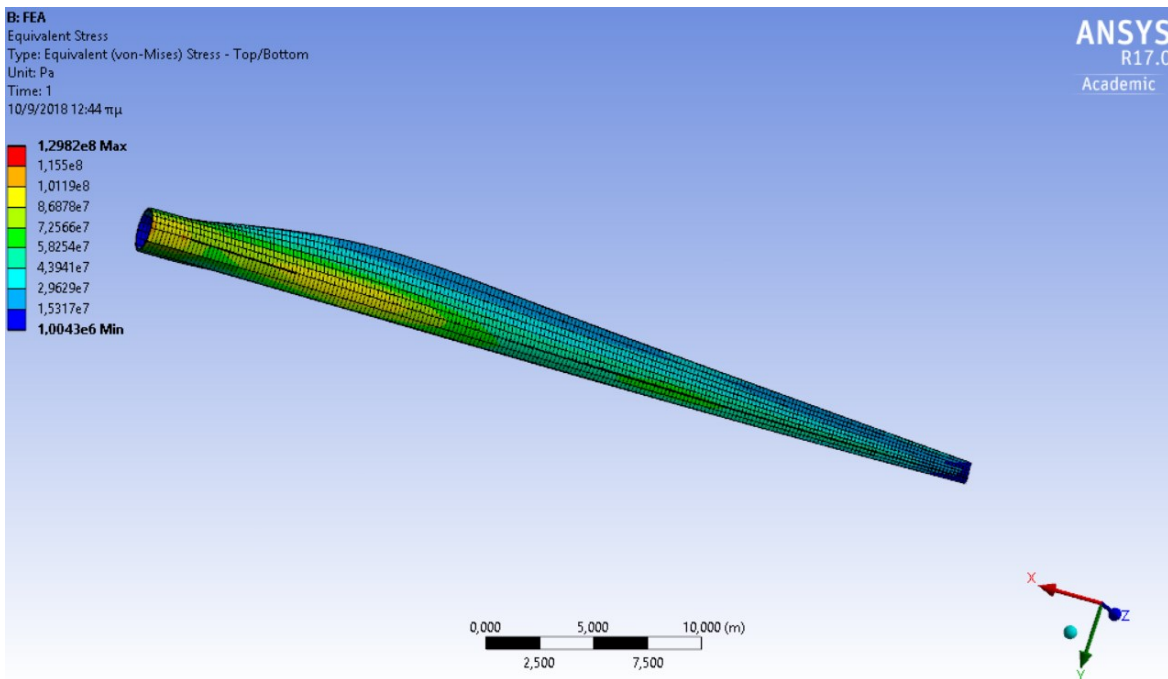
Σχήμα: 6.15: Ισοδύναμη Τάση GFRP 50% Woven Roving, 20m/s

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 30% Polyester SMC:**



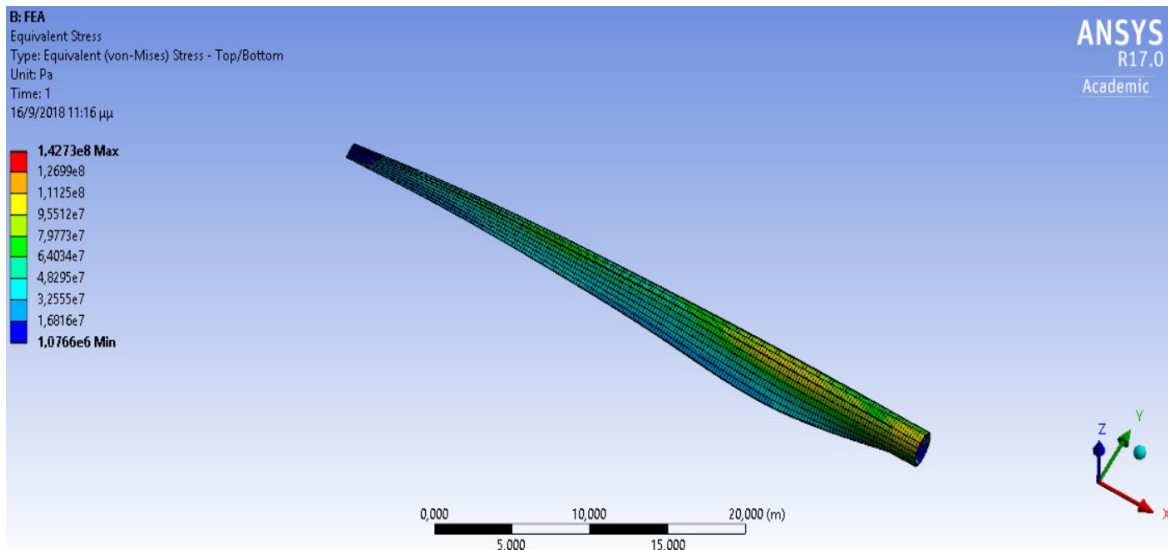
Σχήμα: 6.16: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 30% SMC, 50 m/s

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester Woven Roving:**



Σχήμα: 6.17: Ισοδύναμη Τάση GFRP 50% Woven Roving, 50m/s

- Για το υλικό **Fiberglass Reinforced 50% Polyester SMC**:

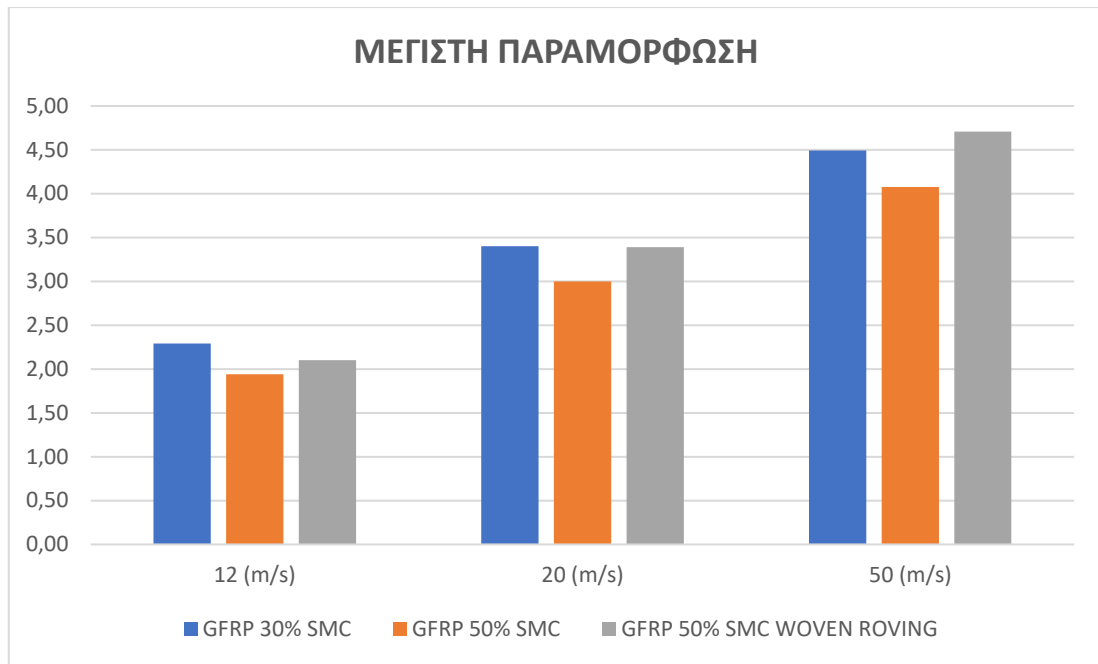


Σχήμα: 6.18: Ισοδύναμη Τάση Fiberglass Reinforced 50% SMC, 50 m/s

ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ			
MATERIAL	Vair (m/s)		
	12 (m/s)	20 (m/s)	50 (m/s)
<b>GFRP 30% SMC</b>	2,29	3,40	4,49
<b>GFRP 50% SMC</b>	1,94	3,00	4,08
<b>GFRP 50% SMC WOVEN ROVING</b>	2,10	3,39	4,71

Πίνακας 6-1: Μέγιστη Παραμόρφωση

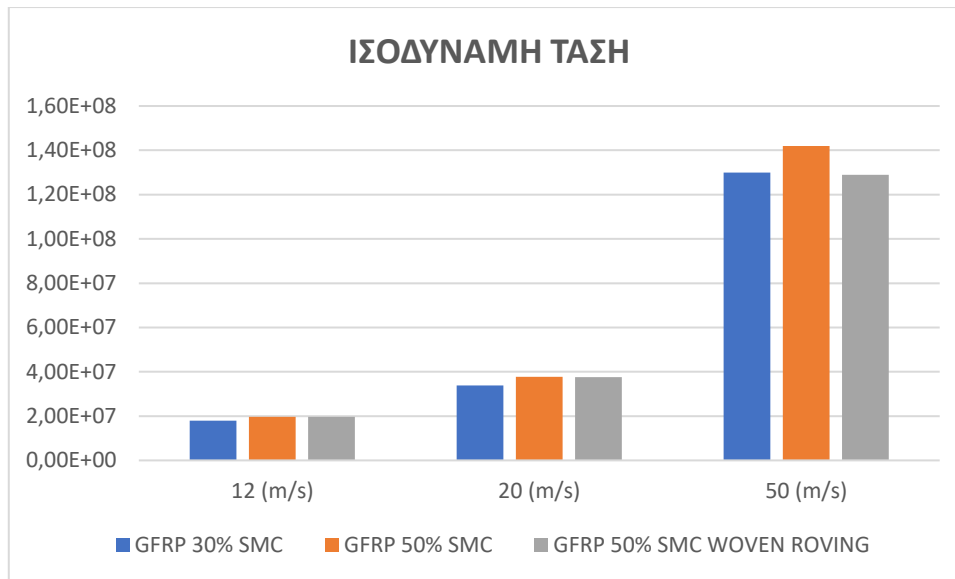




Σχήμα: 6.1 Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης παραμόρφωσης για όλες τις ταχύτητες προσομοίωσης και για τα τρία υλικά

<b>ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΤΑΣΗ(Pa)</b>			
<b>MATERIAL</b>	<b>Vair (m/s)</b>		
	<b>12 (m/s)</b>	<b>20 (m/s)</b>	<b>50 (m/s)</b>
<b>GFRP 30% SMC</b>	1,80E+07	3,38E+07	1,30E+08
<b>GFRP 50% SMC</b>	1,96E+07	3,78E+07	1,42E+08
<b>GFRP 50% SMC WOVEN ROVING</b>	1,97E+07	3,76E+07	1,29E+08

Πίνακας 6-2: Ισοδύναμη τάση



Σχήμα: 6.2 Συγκριτικό διάγραμμα ισοδύναμης τάσης για όλες τις ταχύτητες προσομοίωσης και για τα τρία υλικά

## 6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τους συγκεντρωτικούς πίνακες προκύπτει ότι τα υλικά GFRP 30% SMC και GFRP 50% Woven Roving παρουσιάζουν τις μέγιστες παραμορφώσεις (εντός αποδεκτών ορίων), με αποτέλεσμα την αλλαγή του προφίλ της Α/Γ στον άνεμο, με πιο πιθανό αποτέλεσμα την αύξηση των πιέσεων τοπικά αλλά και την δημιουργία φαινομένων ταλάντωσης των πτερυγίων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κανένα από τα υλικά δεν αστοχεί στην ακραία περίπτωση ανέμου. Περαιτέρω μείωση του πάχους του κελύφους ωστόσο έδειξε κατά τη διάρκεια δοκιμών ότι αυξάνει σε πολλαπλάσιο βαθμό την παραμόρφωση των πτερυγίων της Α/Γ. Επιπλέον, σημαντική υποσημείωση αποτελεί το γεγονός ότι το μοντέλο Α/Γ παρουσιάζει σε όλα τα υλικά αρκετά μεγάλη παραμόρφωση για την προσομοίωση ταχύτητας 20 m/s και 50 m/s. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την επίδραση της φυγοκέντρου δύναμης στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας.

Ως πλέον ικανά υλικά για την εφαρμογή μπορούν να θεωρηθούν τα GFRP 50% Woven Roving και GFRP 50% SMC, καθώς παρουσιάζουν τις μικρότερες παραμορφώσεις, αποτέλεσμα σχετικά αναμενόμενο λόγω του υψηλότερου ποσοστού ινών γυαλιού στη δομή τους. Το υλικό GFRP 50% SMC υστερεί σε σχέση με το GFRP 50% Woven Roving, καθώς το δεύτερο λόγω δομής αξιοποιεί καλύτερα το ποσοστό ινών που περιέχει. Αν προσμετρηθεί και η παράμετρος του βάρους της κατασκευής, προκύπτει ως βέλτιστη επιλογή για τα πτερύγια η κατασκευή από υλικό GFRP 50% Woven Roving καθώς το

συνολικό βάρος των πτερυγίων και των στηρίξεων μεταξύ κεντρικής δοκού και πτερυγίων είναι συνολικά 23 tons έναντι 26,8 tons του GFRP 50% SMC (14% μικρότερο βάρος).

### 6.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Το μοντέλο A/Γ που προσομοιώθηκε αποτελεί μια ικανοποιητική μελέτη, στα πλαίσια της οποίας αναδείχθηκε η αντοχή του σε ακραίες συνθήκες ανέμου και συνθήκες λειτουργίας, που ανταποκρίνονται σε ένα μεγάλο εύρος των καταστάσεων ανέμου.

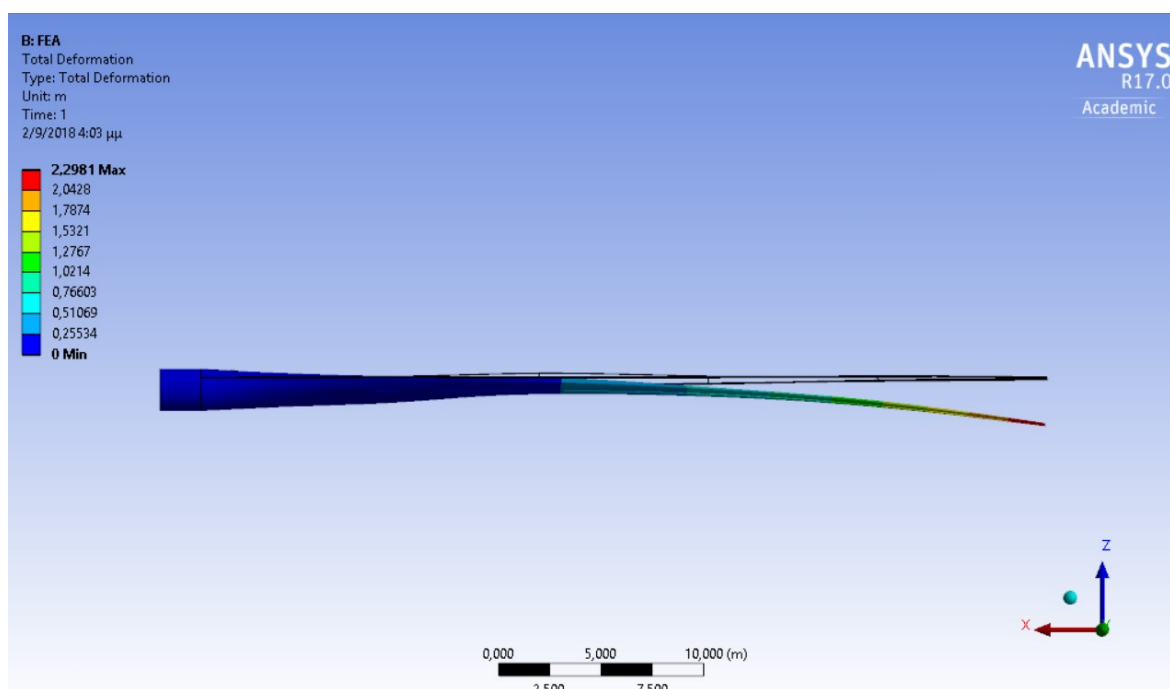
Εξαιτίας των υπολογιστικών περιορισμών, η προσομοίωση για τη δημιουργία των πεδίων πιέσεων για τις ταχύτητες του μοντέλου είναι προσεγγιστική. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, σε μελλοντική μελέτη μπορεί να επιλεγθεί ένα υλικό από τα παραπάνω και να προσομοιωθεί παράλληλα σε συνθήκες ανέμου και σε μηχανική καταπόνηση λόγω αυτών μέσω συστήματος αμφίδρομης αλληλεπίδρασης ρευστού - κατασκευής (Two-Way Fluid - Structure Interaction). Μέσω αυτής της προσομοίωσης είναι δυνατόν να προκύψει ακριβέστερος υπολογισμός της ισχύος του μοντέλου με χρήση User Defined Functions (UDF's) για τον υπολογισμό της εφαπτομενικής δύναμης (Tangential Force) από τους συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας.

Σε συνδυασμό με πειραματικές μελέτες υπάρχει επίσης η δυνατότητα εξακρίβωσης των θεωρητικών μοντέλων και προσαρμογή τους μέσω εισαγωγής πειραματικών συντελεστών για την σύγκλιση μεταξύ θεωρητικού και πειραματικού μοντέλου, όπως επίσης και η δυνατότητα υπολογισμού των μεταβλητών αυτών για την περίπτωση αύξησης ή μείωσης του μεγέθους του μοντέλου. Πειραματικές μελέτες κόπωσης δοκιμίων των χρησιμοποιούμενων στην τρέχουσα ανάλυση υλικών ή και περαιτέρω συνθέτων, μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία προσομοιώσεων κόπωσης ώστε να υπολογιστεί επαρκώς η διάρκεια ζωής του μοντέλου.

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

Επίσης, υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής ανισότροπων υλικών (στρωματικών, τύπου sandwich) για την επέκταση της μελέτης σε άλλες κατηγορίες σύνθετων υλικών, με ακριβέστερη μοντελοποίηση της δομής τους μέσω μεταγενέστερων εκδόσεων του λογισμικού Ansys (έκδοση 17.0).

Επιπλέον, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μελέτη για φαινόμενα διφασικής ροής αέρα νερού καθώς και για πολυφασικά φαινόμενα έτσι ώστε να μελετηθεί η καταπόνηση και διάβρωση της κατασκευής λόγω βροχής. Τέλος, είναι δυνατή η τεχνοοικονομική μελέτη κατασκευής της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα: 6.21 Παραμορφωμένο πτερύγιο

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

## A.1. Fiberglass Reinforced Polyester 30% SMC

### Owens Corning Glass Fiber Reinforced Polyester SMC (Compression), 30 wt.% glass

Categories: [Polymer](#); [Thermoset](#); [Composite SMC](#); [Filled/Reinforced Thermoset](#); [Polyester, TS](#); [Thermoset Polyester Glass SMC](#)

**Material Notes:** Polyester thermosets are available in many formulations. They can be formulated for good to excellent resistance to acids, weak alkalis, and organic solvents. However, they are not recommended for use with strong alkalis. Data provided by the manufacturer, Owens Corning.

**Key Words:** thermoset, sheet molding compound, fiber glass, fiberglass, fibreglass, fibre glass, FRP composites

**Vendors:** No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.85 g/cc	0.0668 lb/in <sup>3</sup>	ASTM D792
Water Absorption	0.25 %	0.25 %	24 hrs.; ASTM D570
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Barcol	68	68	
Tensile Strength, Ultimate	83.0 MPa	12000 psi	ASTM D638
Elongation at Break	1.0 %	1.0 %	ASTM D638
Modulus of Elasticity	12.0 GPa	1740 ksi	ASTM D638
Flexural Strength	180 MPa	26100 psi	ASTM D790
Flexural Modulus	11.0 GPa	1600 ksi	ASTM D790
Compressive Strength	170 MPa	24700 psi	ASTM D695
Izod Impact, Notched	8.50 J/cm	15.9 ft-lb/in	
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Volume Resistivity	5.70e+14 ohm-cm	5.70e+14 ohm-cm	ASTM D257
Dielectric Constant	4.4	4.4	ASTM D150
	@Frequency 60 Hz	@Frequency 60 Hz	
Dielectric Strength	19.7 kV/mm	500 kV/in	ASTM D149
Arc Resistance	188 sec	188 sec	ASTM D495
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Specific Heat Capacity	1.26 J/g-°C	0.300 BTU/lb-°F	
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	>= 204 °C	>= 400 °F	ASTM D648
Flammability, UL94	V-0	V-0	5V

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

## A.2. Fiberglass Reinforced Polyester 50% SMC

### Owens Corning Glass Fiber Reinforced Polyester SMC (Compression), 50 wt.% glass

Categories: [Polymer](#); [Thermoset](#); [Composite SMC](#); [Filled/Reinforced Thermoset](#); [Polyester TS](#); [Thermoset Polyester Glass SMC](#)

**Material Notes:** Polyester thermosets are available in many formulations. They can be formulated for good to excellent resistance to acids, weak alkalis, and organic solvents. However, they are not recommended for use with strong alkalis. Data provided by the manufacturer, Owens Corning.

**Key Words:** thermoset, sheet molding compound, fiber glass, fiberglass, fibreglass, fibre glass, FRP composites

**Vendors:** No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.00 g/cc	0.0723 lb/in <sup>3</sup>	ASTM D792
Water Absorption	0.50 %	0.50 %	24 hrs.; ASTM D570

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Barcol	68	68	
Tensile Strength, Ultimate	160 MPa	23200 psi	ASTM D638
Elongation at Break	1.7 %	1.7 %	ASTM D638
Modulus of Elasticity	15.7 GPa	2280 ksi	ASTM D638
Flexural Strength	310 MPa	45000 psi	ASTM D790
Flexural Modulus	10.0 GPa	1450 ksi	ASTM D790
Compressive Strength	220 MPa	31900 psi	ASTM D695
Izod Impact, Notched	10.4 J/cm	19.5 ft-lb/in	

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Dielectric Constant	4.4 @Frequency 60 Hz	4.4 @Frequency 60 Hz	ASTM D150
Arc Resistance	188 sec	188 sec	ASTM D495

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	16.9 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 $^\circ\text{C}$	9.40 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$ @Temperature 68.0 $^\circ\text{F}$	ASTM D696
Specific Heat Capacity	1.26 J/g $\cdot^\circ\text{C}$	0.300 BTU/lb $\cdot^\circ\text{F}$	
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	$\geq 204$ $^\circ\text{C}$	$\geq 400$ $^\circ\text{F}$	ASTM D648
Flammability, UL94	V-0	V-0	5V

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

### A.3. Fiberglass Reinforced Polyester 50% Woven Roving

#### Owens Corning Glass Fiber Reinforced Polyester, Woven Roving (Lay-up), 50 wt.% glass

Categories: [Polymer](#); [Thermoset](#); [Filled/Reinforced Thermoset](#); [Polyester, TS](#)

**Material Notes:** Data provided by the manufacturer, Owens Corning.

**Key Words:** thermoset, fiber glass, fiberglass, fibreglass, fibre glass, FRP composites

**Vendors:** No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.64 g/cc	0.0592 lb/in <sup>3</sup>	ASTM D792
Water Absorption	0.50 %	0.50 %	24 hrs.; ASTM D570
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Barcol	50	50	
Tensile Strength, Ultimate	260 MPa	37700 psi	ASTM D638
Elongation at Break	1.6 %	1.6 %	ASTM D638
Modulus of Elasticity	15.5 GPa	2250 ksi	ASTM D638
Flexural Strength	320 MPa	46400 psi	ASTM D790
Flexural Modulus	15.5 GPa	2250 ksi	ASTM D790
Compressive Strength	190 MPa	27600 psi	ASTM D695
Izod Impact, Notched	18.0 J/cm	33.7 ft-lb/in	
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Volume Resistivity	1.00e+14 ohm-cm	1.00e+14 ohm-cm	ASTM D257
Dielectric Constant	4.2	4.2	ASTM D150
	@Frequency 60 Hz	@Frequency 60 Hz	
Dielectric Strength	13.8 kV/mm	350 kV/in	ASTM D149
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	7.20 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	4.00 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$	ASTM D696
	@Temperature 20.0 $^\circ\text{C}$	@Temperature 68.0 $^\circ\text{F}$	
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	$\geq 204$ $^\circ\text{C}$	$\geq 400$ $^\circ\text{F}$	ASTM D648
Flammability, UL94	V-0	V-0	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

# Βιβλιογραφία

- [1] ANSYS. (n.d.). (ANSYS) Ανάκτηση από [www.ansys.com](http://www.ansys.com).
- [2] GEA14954C15-MW-Broch
- [3] GUIDE TO MODELING AND MANUFACTURING COMPOSITE WIND TURBINE BLADES, MAE 4021 Project Guide, Cornell University
- [4] Materials Selection in Mechanical Design, 4e, Ashby
- [5] Wind Turbine Blade Design, Calvin Phelps, John Singleton, Cornell University, Sibley School of Engineering
- [6] Wikipedia. (n.d.). Ανάκτηση από <http://en.wikipedia.org>
- [7] Wikipedia. (n.d.). Ανάκτηση από <http://en.wikipedia.org>
- [8] Μπεργελές, Γ. (2005). Ανεμογεννήτριες. Στο Γ. Μπεργελές. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
- [9] Παντελής, Δ. Ι. (2008). Μη μεταλλικά Τεχνικά Υλικά. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [10] Προβατίδης, Χ., & Αντωνιάδης, Ι. (2004). Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [11] Προβατίδης, Χ., & Καναράχος, Α. (2000). Πεπερασμένα Στοιχεία στη Μηχανολογία. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [12] «Συστήματα Αιολικής Ενέργειας» Διονύσιος Ε. Μάργαρης , Αναπληρωτής καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [13] «Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αιολικών πάρκων» Ε. Μπινόπουλος, Π. Χαβιαρόπουλος (ΚΑΠΕ)
- [14] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Λονδίνο: Longman Scientific & Technical.
- [15] Callister, W. D. (2007). Materials Science and Engineering. John Wiley & Sons Ltd.
- [16] Jones, R. M. (1975). Mechanics of Composite Materials. Scripta Book Company.



## **ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ**

- <https://www.nrel.gov/>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/>