



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το τέλος αυτής της εργασίας νιώθω ότι τίποτα τώρα πια δεν μου φαίνεται ακατόρθωτο. Μπορεί να στερείσαι κάποια πράγματα αλλά η προσπάθεια αξίζει τον κόπο και το αποτέλεσμα σίγουρα μας δικαιώνει.

Αν αρχίσω τις ευχαριστίες δεν θα τελειώσω. Όλους όσους χρειάστηκα ήταν δίπλα μου χωρίς να μου αρνηθεί κανείς το παραμικρό. Θα πω λοιπόν ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ σε όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας και ειδικά στον ΤΕΟ που πραγματικά αν δεν ήταν αυτός δεν θα ήμουν καν σ'αυτή τη θέση να γράφω και φυσικά να τελειώσω την πτυχιακή μου εργασία.

Τέλος ευχαριστώ τον αδερφό μου τον Μανώλη που αποτελεί παράδειγμα για 'μένα.



Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	2
ΣΥΜΒΟΛΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΤΜΗΜΕΝΟΙ ΟΡΟΙ	5
1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ	7
2. ΓΕΝΙΚΑ	9
2.1. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	9
2.2. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	10
2.2.1. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα	11
2.2.2. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	11
3. ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ	13
3.1. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	13
3.2. Θεωρία του δίσκου ενέργειας (Rankine – Froude)	14
3.2.1. Εφαρμογή των νόμων διατήρησης	16
3.2.1.1. Διατήρηση μάζας	16
3.2.1.2. Διατήρηση της ορμής	16
3.2.1.3. Ενεργειακός ισολογισμός	18
3.2.1.4. ΟΡΙΟ ΤΟΥ BETZ.....	20
3.3. Επίδραση της περιστροφής του όμορου	22
4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ.....	25
4.1. Θεωρητικός υπολογισμός πτερύγωσης.....	25
4.2. Υπολογισμός πτερύγωσης	32
4.3. Υπολογισμός φορτίων και φορτίων σχεδιασμού	36
4.3.1. Βασικοί υπολογισμοί	37
4.3.2. Υπολογισμός δυνάμεων	41
4.3.2.1. Περίπτωση Α: Κανονική λειτουργία	41
4.3.2.2. Περίπτωση Β: Προσανέμιση.....	43
4.3.2.3. Περίπτωση Γ: Απόκλιση μηχανισμού προσανέμισης	44
4.3.2.4. Περίπτωση Δ: Μέγιστη όση	44
4.3.2.5. Περίπτωση Ε: Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του ρότορα.....	45
4.3.2.6. Περίπτωση ΣΤ: Βραχυκύκλωμα γεννήτριας	45
4.3.2.7. Περίπτωση Ζ: Φρενάρισμα Α/Γ	45
5. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 5 Kw	46
6. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΤΕΡΟΥ	48
7. ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ.....	49
8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ & ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ	51
9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ	52
10. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	53
10.1. Σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας	53
10.2. Σκοπός του PLC.....	54
10.3. Κανονική λειτουργία	54
10.4. Παραπάνω παραγόμενη Ισχύς.....	55
10.5. Διακοπή δικτύου.....	56



10.6.	Δυσλειτουργία τροφοδοτικού του φορτιστή μπαταρίας.....	57
10.7.	Έλλειψη τροφοδοσίας PLC.	58
10.8.	Δυσλειτουργία του εμβόλου.....	59
10.9.	Προβλήματα στην συχνότητα του ρεύματος δικτύου.....	60
11.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	62
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	66

Εικόνες – Πίνακες – Σχήματα – Γραφήματα – Διαγράμματα

Εικόνα 2.1.	A/Γ Κάθετου άξονα.....	11
Εικόνα 2.2.	A/Γ Οριζοντίου Άξονα.....	12
Εικόνα 3.1.	Εκμετάλλευση άνωσης για παραγωγή έργου.....	13
Σχήμα 3.1.	Ροϊκός σωλήνας δρομέα ανεμοκινητήρα	14
Σχήμα 3.2.	Επιφάνεια ελέγχου.....	17
Σχήμα 3.4.	Καμπύλη Cr Απόδοσης Δρομέα και Συντελεστή Ώσης Ανεμοκινητήρα συναρτήσεως του συντελεστή αξονικής επαγωγής (a).....	22
Σχήμα 4.1.	Γεωμετρικό Τρίγωνο Ταχυτήτων.....	25
Σχήμα 4.2.	Πραγματικό τρίγωνο ταχυτήτων.....	26
Σχήμα 4.3.	Δυνάμεις που αναπτύσσονται στην αεροτομή του Ανεμοκινητήρα.....	26
Σχήμα 4.4.	Τυπική Μεταβολή C_l με τη γωνία πρόσπτωσης	27
Σχήμα 4.5.	Τυπική Μεταβολή C_d με την γωνία πρόσπτωσης.....	28
Σχήμα 4.6.	Τυπικό διάγραμμα Cr - λ.....	32
Πίνακας 4.1.	Γεωμετρία φτερού.	33
Πίνακας 4.2.	33
Πίνακας 4.4.	34
Πίνακας 4.5.	34
Πίνακας 4.6.	34
Διάγραμμα 4.1.	Χαρακτηριστική καμπύλη Ώσης-Στροφών.....	35
Διάγραμμα 4.2.	Χαρακτηριστική καμπύλη Ροπής - Στροφών	35
Διάγραμμα 4.3.	Χαρακτηριστική καμπύλη Ισχύος-Στροφών	36
Εικόνα 4.1.	Κανονισμός κατά IEC 61 400-2.....	37
Πίνακας 4.7.	Περιπτώσεις φορτίσεων για απλοποιημένο σύστημα εξισώσεων.....	38
Πίνακας 4.8.	Τύποι υπολογισμού φορτίων.....	39
Πίνακας 4.9.	Τύποι υπολογισμού τάσεων.....	40
Εικόνα 5.1.	α)νασέλα β)γεννήτρια γ)πλήμνη.....	46
Εικόνα 5.2.	Γεννήτρια.....	46
Εικόνα 5.3.	α)ουρά β)έμβολο	47
Εικόνα 5.4.	α)βάση β)πυλώνας.....	47
Εικόνα 6.1.	Πλήμνη A/Γ 5 kW	49
Πίνακας 6.1.	Γεωμετρία φτερού	49
Γράφημα 7.1.	Γραμμές φόρτισης για την προσομοίωση της καμπτικής ροπής.....	50
Γράφημα 7.2.	Δύναμη – Παραμόρφωση	50
Σχήμα 10.1.	Διάγραμμα ελέγχου ανεμογεννήτριας	53



Σχήμα 10.2. Κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας	55
Σχήμα 10.3. Παραπάνω παραγόμενη ισχύς.	56
Σχήμα 10.4. Διακοπή δικτύου.	57
Σχήμα 10.5. Δυσλειτουργία τροφοδοτικού φορτιστή μπαταρίας και PLC.....	58
Σχήμα 10.6. Έλλειψη τροφοδοσίας PLC.....	59
Σχήμα 10.7. Δυσλειτουργία του εμβόλου της ουράς.	60
Σχήμα 10.8. Προβλήματα στην συχνότητα του ρεύματος δικτύου.	61
Γράφημα 11.1. Power Curve A/Γ 5 KW.....	62
Διάγραμμα 11.1. Ροδόγραμμα	63
Διάγραμμα 11.2. Καμπύλη Weabull.....	63



ΣΥΜΒΟΛΑ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΤΜΗΜΕΝΟΙ ΟΡΟΙ

A	Επιφάνεια ρότορα	[m ²]
A _{proj}	Προβολική επιφάνεια ρότορα	[m ²]
A	Συντελεστής αξονικής επαγωγής	[m ²]
B	Αριθμός πτερυγίων	[-]
C _d	Συντελεστής αντίστασης	[m/s]
C _f	Συντελεστής δύναμης	[-]
C _l	Συντελεστής άνωσης	[-]
C _T	Συντελεστής ώσης	[-]
D	Διάμετρος ρότορα	[-]
e _r	Απόσταση από το κέντρο βάρους του στροφέα στον άξονα περιστροφής	[-]
F _{zB}	Αξονική δύναμη στο φτερό	[Nt]
F _{x-shaft}	Δύναμη ώσης	[Nt]
I _B	Ροπή αδράνειας	[Nt]
G	Γεννήτρια	[-]
g	Βαρυτική επιτάχυνση: 9,806	[m/sec ²]
L _{rt}	Απόσταση του Κ.Β. του ρότορα από τον άξονα προσανέμισης	[m]
L _{rb}	Απόσταση του Κ.Β. του ρότορα από το πρώτο ρουλεμάν	[m]
M _{xB} , M _{yB}	Ροπή κάμψης	[Ntm]
M _{x-shaft}	Ροπή στρέψης	[Ntm]
m _B	Μάζα φτερού	[kg]
m _r	Μάζα ρότορα συν τη μάζα της πλήμνης	[kg]
n	Ταχύτητα ρότορα	[r.p.m.]
P	Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς	[W]
Q	Ροπή ρότορα	[Ntm]
R	Ακτίνα ρότορα	[m]
T	Χρονική διάρκεια Ριπής ανέμου	[s]
t	Χρόνος	[s]
V	Ταχύτητα ανέμου	[m/s]
V _(z)	Ταχύτητα ανέμου σε ύψος z	[m/s]
V _{ave}	Ετήσια μέση ταχύτητα αέρα στο ύψος πλήμνης	[m/s]
V _{design}	Ταχύτητα ανέμου που χρησιμοποιείται κατά την σχεδίαση	[m/s]
V _{hub}	Μέση δεκάλεπτη ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πλήμνης	[m/s]
V _{in}	Ταχύτητα αέρα cut in	[m/s]
V _{OUT}	Ταχύτητα ανέμου cut out	[m/s]
V _{MAX}	Μέγιστη ταχύτητα ανέμου	[m/s]
V _{ref}	Μέση δεκάλεπτη αναφορική ταχύτητα ανέμου	[m/s]
V _{tip}	ταχύτητα ακροπτερυγίου	[m/s]
W	Ροπή αντίστασης	[m ³]
R _{coq}	Ακτινική απόσταση μεταξύ του Κ.Β. του φτερού και του κέντρου του ρότορα	[m]
η	Βαθμός απόδοσης μεταξύ ρότορα και παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος	[-]
λ	Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου	[-]
ρ	Πυκνότητα αέρα	[kgr/m ³]
σ ₁	Τυπική απόκλιση αξονικής ταχύτητας ανέμου	[m/s]
σ ₂	Τυπική απόκλιση κατακόρυφης ταχύτητας ανέμου	[m/s]
σ ₃	Τυπική απόκλιση εγκάρσιας ταχύτητας ανέμου	[m/s]



σ_d	Τάση σχεδιασμού	[MPa]
ω_n	Ταχύτητα περιστροφής του ρότορα	[rad/s]
ω_{yaw}	Ταχύτητα προσανέμισης	[rad/s]

Συντομογραφίες:

ave	Average	Μέσος όρος
B	Blade	φτερά
design		
max	maximum	Μέγιστο
r	rotor	Ρότορας
x	in the x-direction	Στον x-άξονα
y	in the y-direction	Στον y-άξονα
z	in the z-direction	Στον z-άξονα

Συντμήσεις:

a.c.	Εναλλασσόμενο ρεύμα
d.c.	Συνεχές ρεύμα



1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι ο μηχανολογικός σχεδιασμός, ο υπολογισμός της αντοχής και η δοκιμή σε πραγματικές συνθήκες των μηχανικών μερών μιας μικρής ανεμογεννήτριας ισχύος 5 KW. Η δοκιμή του βιομηχανικού αυτού προτύπου έγινε σύμφωνα με τους κανονισμούς του εργαστηρίου και ακολούθησε το πρότυπο κανονισμό I.E.C. 61400-2.

Στόχος είναι η βελτιστοποίηση ενός ανεμοκινητήρα μικρής ισχύος με διαφορετική τεχνοτροπία από τα υπόλοιπα ώστε η μελέτη της συμπεριφοράς του να οδηγήσει στον καθορισμό των μεθόδων που συνθέτουν ένα αρμονικό σύστημα παραγωγής ενέργειας από τον άνεμο.

Οι ανεμοκινητήρες 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 και οικονομικότερη. Οι ανεμοκινητήρες του τύπου αυτού είναι ανεξάρτητοι, μη συνδεδεμένοι με δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούν γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που φορτίζει συσσωρευτές.

Μικρά συστήματα ανεμογεννητριών μέχρι 10 Kw (Αυτόνομα Αιολικά Συστήματα) χρησιμοποιούνται κυρίως για αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε κατοικίες, και γενικότερα σε περιοχές που δεν υπάρχει διασύνδεση με το δίκτυο διανομής. Επίσης, χρησιμοποιούνται συνήθως και για να τροφοδοτούν απομονωμένες εγκαταστάσεις (τηλεπικοινωνιακά συστήματα, κατοικίες κλπ). Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται για αυτές τις εφαρμογές φτάνουν τα 30 kW. Για συστήματα ηλεκτροδότησης σε υπαίθριες περιοχές και χωριά μέχρι 300 kW, οι ανεμογεννήτριες συνδυάζονται με ντιζελογεννήτριες, ή συστήματα συσσωρευτών. Αυτόνομοι ανεμοκινητήρες χρησιμοποιούνται επίσης για παραγωγή μηχανικού έργου, όπως άντληση νερού κλπ. Δεν υπάρχουν λεπτομερή στοιχεία για την παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ αυτόνομων ή μικρής κλίμακας ανεμογεννητριών. Εκτιμάται πάντως ότι η ζήτηση για αυτόνομα συστήματα θα αυξηθεί στα επόμενα χρόνια. Γενικώς, τρέχουν διάφορα προγράμματα για



εφαρμογή τέτοιων υβριδικών συστημάτων με σκοπό να καλύψουν περιοχές αραιοκατοικημένες όπως είναι ο Καναδάς και η Αυστραλία, καθώς και νησιά. Ο σχεδιασμός των μικρών ανεμογεννητριών διαφέρει σημαντικά από το σχεδιασμό των μεγάλων που διασυνδέονται στο δίκτυο. Για παράδειγμα, οι μικρές απαιτούν διαφορετικό αεροδυναμικό προφίλ, εξαιτίας του διαφορετικού λόγου ταχυτήτων ακροπτερυγίου (tip speed ratio). Η βιομηχανία, δίνει λιγότερη έμφαση στην ανάπτυξη νέων αεροδυναμικών προφίλ σε σχέση με τις μεγάλες ανεμογεννήτριες. Συνεπώς, η αεροδυναμική απόδοση των μικρών ανεμογεννητριών είναι σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη των μεγάλων.



2. ΓΕΝΙΚΑ

2.1. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ο άνεμος έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας από τα πανάρχαια χρόνια. Αρκετές χώρες χρωστούσαν τον πλούτο και την ναυτιλιακή ικανότητα τους στον άνεμο που κινούσε τα ιστιοφόρα πλοία τους. Στην ξηρά εξ άλλου χρησιμοποιήθηκε στους ανεμόμυλους άντλησης νερού ή άλεσης σιτηρών.

Η κινητική ενέργεια του ανέμου οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία και περίπου το 2% της ενέργειας που προσπίπτει στον πλανήτη μας μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Η ισχύς των ανέμων σ' όλη τη γη υπολογίζεται σε 3.610^9 MW . Ενδεικτικά οι ενεργειακές ανάγκες των Η.Π.Α. είναι μόλις το 10% της ενέργειας των ανέμων που πνέουν εκεί, γεγονός που αποδεικνύει πόσο πλούσια πηγή ενέργειας είναι ο άνεμος. Η ισχύς ρεύματος γενικά είναι ανάλογη της πυκνότητας του και του κύβου της ταχύτητάς του.

Έτσι για την ίδια ταχύτητα και διατομή ένα ρεύμα αέρα θα έχει περίπου 800 φορές μικρότερη ενέργεια από αντίστοιχη δέσμη νερού. Η αιολική ενέργεια συνεπώς είναι μια «αραιή» ή «ήπια» μορφή ενέργειας, δηλαδή είναι μικρή η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου που μπορεί να δεσμευτεί σε κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας που προσβάλλεται από τον άνεμο. Για παράδειγμα άνεμος εντάσεως 5 μποφόρ, περίπου 9,5 m/sec έχει ισχύ 500 W ανά m^2 προσβαλλόμενης επιφάνειας, ενώ ένας ανεμοκινητήρας (A/K) μπορεί στην καλύτερη περίπτωση να δεσμεύει το 40% αυτής της ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη κατασκευής μονάδων, μεγάλων διαστάσεων. Σ' αυτό το μειονέκτημα ανταπεξέρχεται με επιτυχία η σημερινή τεχνολογία με την κατασκευή ανεμοκινητήρων μεγάλων διαστάσεων που ανταγωνίζονται οικονομικά τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Παράλληλα η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα ότι δίνει απ' ευθείας μηχανική ενέργεια μία «αναβαθμισμένη» κατά την τεχνική ορολογία, μορφή ενέργειας που με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης και με απλά μέσα μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας.



Η αιολική ενέργεια αποτελεί συνεπώς μια αστείρευτη πηγή ενέργειας με αξιοσημείωτο δυναμικό και με δωρεάν πρώτη ύλη στη διάθεση της ανθρωπότητας και προβάλλει σήμερα ως μια από τις πιο κατάλληλες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά και για άλλες χρήσεις.

2.2. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Αιολική μηχανή λέγεται κάθε σύστημα που μπορεί να εκμεταλλευτεί την αιολική ενέργεια για να παράγει έργο. Οι αιολικές μηχανές αποτελούν ανθρώπινες επινοήσεις που έχουν σαν σκοπό την αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Μέχρι σήμερα έχει προταθεί και δοκιμασθεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός ανεμογεννητριών, χωρίς όμως να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός εκμετάλλευσης της ενέργειας του ανέμου. Βασικές παράμετροι των ανεμοκινητήρων, εκτός τις αποδιδόμενη ισχύος, είναι οι παράμετρος περιστροφής, η στιβαρότητα της πτερωτής, η διάμετρος και η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής και το ύψος τοποθέτησης.

Οι μηχανές τύπου έλικας είναι ο πλέον καθιερωμένος τύπος των μηχανών οριζοντίου άξονα, και αποτελούνται κατά κύριο λόγο από την πτερωτή, τον άξονα της κίνησης, το κιβώτιο μετάδοσης, τα συστήματα πέδησης, το σύστημα προσανεμισμού, την ηλεκτρική γεννήτρια και τον πύργο στήριξης. Οι υπόλοιπες γνωστές κατασκευές μηχανών οριζοντίου άξονα είναι ο παραδοσιακός αμερικάνικος ανεμόμυλος τύπου *Andreau – Enfield*, οι ανεμογεννήτριες με χρήση διαφόρων τύπων επιταχυντών καθώς και οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι με πτερύγια από πανί ή nylon.

Οι μηχανές τύπου *Darrieus* και *Savonius* αποτελούν τους πλέον ανταγωνιστικούς ανεμοκινητήρες κατακόρυφου άξονα. Οι μηχανές της μορφής αυτής έχουν αυτόματο προσανατολισμό προς τη διεύθυνση του ανέμου, είναι φθηνότερες και έχουν το σύστημα μετάδοσης της κίνησης στο έδαφος, αλλά έχουν και μικρότερο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης και προβλήματα κατά την εκκίνησή τους. Οι μηχανές τύπου Tornado, τύπου Lebost, τύπου Musgrove, τύπου Gyromill και το σύστημα Cyclonico



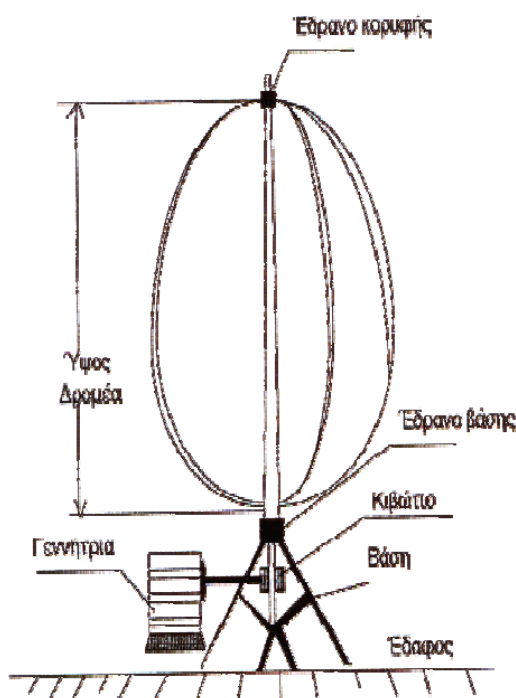
αποτελούν ενδιαφέρουσες προτάσεις για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας.

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Ως εκ τούτου οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμοκινητήρων είναι:

- i. κατακόρυφου άξονα περιστροφής
- ii. οριζόντιου άξονα περιστροφής

2.2.1. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα της αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου, δεδομένου ότι ο άξονάς των είναι κάθετος σε αυτή καθώς και στην επιφάνεια της Γής. Επίσης έχουν επινοηθεί και άλλοι τύποι ανεμοκινητήρων, όπως για παράδειγμα οι ανεμογεννήτριες τύπου μεταφοράς, αποτελούμενες από οχήματα που κινούνται σε μια καθορισμένη διαδρομή και είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρογεννήτριες.



Εικόνα 2.1. A/Γ Κάθετου άξονα.

2.2.2. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Συνήθως τον άξονά τους τον έχουν παράλληλο προς την κατεύθυνση του ανέμου (head on), ενώ σε μερικές περιπτώσεις έχουμε ανεμογεννήτριες των οποίων ο άξονας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης και κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου (cross wind).



Οι υφιστάμενες αιολικές μηχανές κατατάσσονται επίσης σε ταχύστροφες και σε αργόστροφες, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους ή ακριβέστερα, ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου περιστροφής «λ». Η ταχύτητα περιστροφής μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται εκτός από τις αεροδυναμικές παραμέτρους και από το μέγεθος των πτερυγίων της μηχανής, δεδομένου ότι πρέπει να ληφθούν υπόψη λόγοι στατικής αντοχής, φαινόμενα δυναμικών καταπονήσεων και ταλαντώσεων, φυγόκεντρες δυνάμεις. Επιπλέον, καθοριστικό ρόλο παίζει και διασύνδεση ή μη της εγκατάστασης με το ηλεκτρικό δίκτυο, δεδομένου ότι σε περιπτώσεις σύγχρονων ηλεκτρογεννητριών



Εικόνα 2.2. A/G Οριζοντίου Άξονα

διασυνδεδεμένων με το δίκτυο, το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα πρέπει να έχει τη συχνότητα του κεντρικού δικτύου, δηλαδή 50 Hz για τη χώρα μας και τις υπόλοιπες χώρες E.E. και 60 Hz για τις Η.Π.Α.

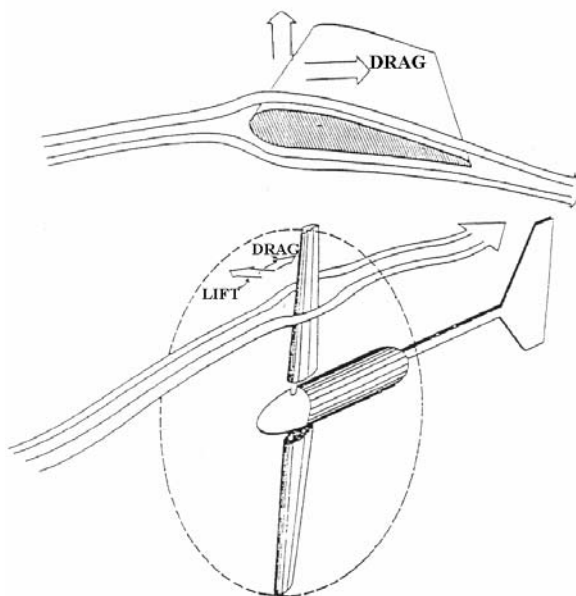


3. ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

3.1. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η κίνηση του ανεμοκινητήρα αρχίζει λόγω των δυνάμεων και ροπών που ενεργούν στο στρεφόμενο τμήμα του καθώς ο άνεμος διέρχεται δια μέσου του δρομέα. Οι δυνάμεις αυτές μπορεί να οφείλονται στην αντίσταση που ο δρομέας του ανεμοκινητήρα προβάλλει στη ροή του ανέμου ή σε δυνάμεις άνωσης. Οι δυνάμεις αντίστασης έχουν την ίδια φορά με την κατεύθυνση πνοής του ανέμου, ενώ οι δυνάμεις άνωσης έχουν φορά κάθετη προς την κατεύθυνση του ανέμου.

Επίσης είναι γνωστό από την Αεροδυναμική ότι η δύναμη άνωσης που αναπτύσσεται πάνω σε μια αεροτομή (πτέρυγα) που βρίσκεται σε γωνία πρόσπτωσης ως προς το ρεύμα του αέρα είναι πολλαπλάσια της δύναμης αντίστασης που εφαρμόζεται στην αεροτομή. Γι' αυτό και καταρχήν οι ανεμοκινητήρες των οποίων η λειτουργία βασίζεται στην εκμετάλλευση των δυνάμεων άνωσης είναι αποδοτικότεροι από τους ανεμοκινητήρες των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε δυνάμεις αντίστασης.

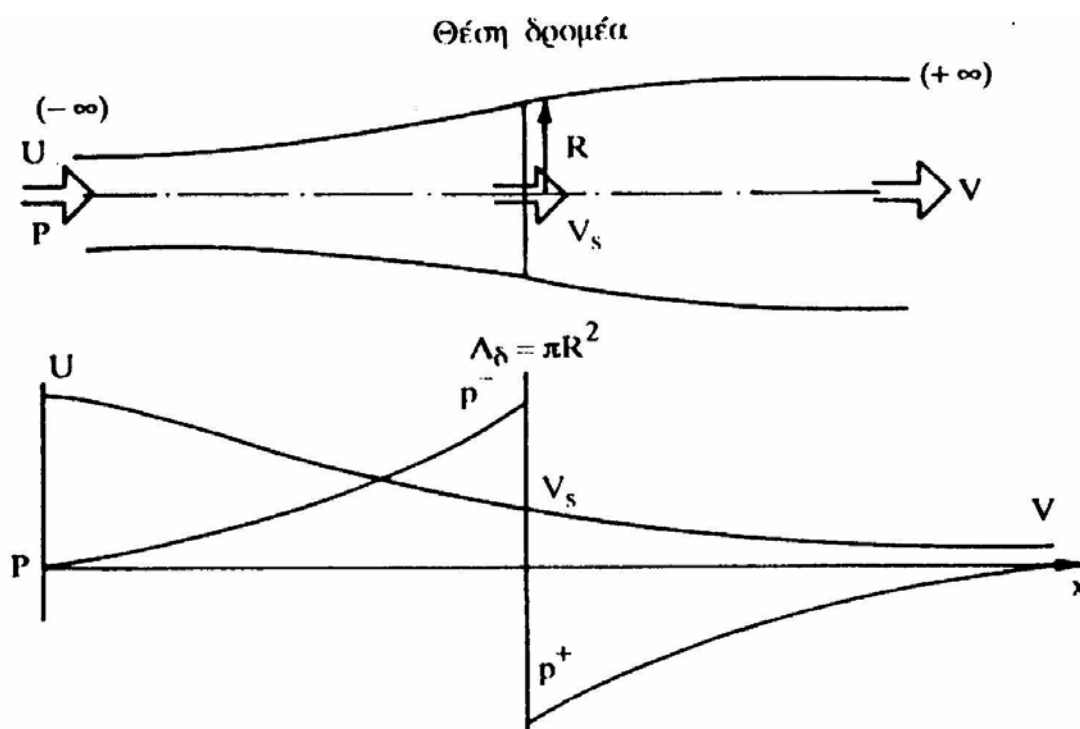


Εικόνα 3.1. Εκμετάλλευση άνωσης για παραγωγή έργου.



3.2. Θεωρία του δίσκου ενέργειας (Rankine – Froude)

Σύμφωνα με τη θεωρία του δίσκου ενέργειας ο μηχανισμός δέσμμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από το δρομέα του ανεμοκινητήρα θεωρείται ιδανικός, δηλαδή χωρίς απώλειες, (σύμφωνα με τις παραδοχές που θα αναφερθούν στη συνέχεια). Ο δρομέας εξετάζεται σαν ένα «μαύρο κουτί» δια μέσου του οποίου περνάει ο αέρας που υφίσταται μεταβολή της ενέργειας του, μεταβολή που ουσιαστικά εκφράζεται με την πτώση της στατικής του πίεσης. Επιπλέον ο δρομέας θεωρείται σαν ένας δίσκος που ενεργεί πάνω στο ρευστό, εξ ου και η ονομασία του «δίσκος ενέργειας».



Σχήμα 3.1. Ροϊκός σωλήνας δρομέα ανεμοκινητήρα

Το Σχήμα 3.1. δείχνει το ροϊκό σωλήνα ανεμοκινητήρα που ορίζεται από τη διάμετρο του δρομέα. Ο αέρας πολύ μακριά (στο άπειρο) πριν από το δίσκο (ανάντι) έχει στατική πίεση p και πλησιάζει με ταχύτητα U . Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα και συνεπώς πολύ μακριά μετά από το δίσκο



(κατάντι) όπου η πίεση του αέρα θα έχει αποκατασταθεί στην πίεση του περιβάλλοντος p , η ταχύτητα του ανέμου V θα είναι μικρότερη από την U . Για λόγους διατήρησης της μάζας μέσα στο ροϊκό σωλήνα, θα πρέπει η διατομή άρα και η διάμετρος του ροϊκού σωλήνα να μεγαλώνει πίσω από το δρομέα, δηλαδή να υπάρχει διαστολή του ρεύματος του αέρα (ομόρου) του ανεμοκινητήρα, όπως ακριβώς διαγραμματικά παριστάνεται στο Σχήμα 3.1.

Το ρευστό μετά το δίσκο έχει μικρότερη ενέργεια από αυτήν πριν από το δίσκο και επειδή η αξονική ταχύτητα του ρευστού πάνω στο δίσκο και οριακά λίγο πριν και λίγο μετά από το δίσκο παραμένει η ίδια για λόγους διατήρησης της μάζας (η διαφορά κινητικής ενέργειας του ανέμου πριν και μετά το δίσκο δεσμεύτηκε από τον ιδανικό δρομέα του ανεμοκινητήρα) τότε η στατική πίεση του ρευστού μετά από το δίσκο θα είναι μικρότερη από τη στατική πίεση του ρευστού πριν από το δίσκο. Συνεπώς ο δίσκος αποτελεί μια επιφάνεια ασυνέχειας πίεσης, αλλά συνέχειας όμως της αξονικής ταχύτητας και ασυνέχειας της περιφερειακής ταχύτητας όπως θα φανεί παρακάτω. Τυπική μεταβολή των μεγεθών της αξονικής ταχύτητας και πίεσης του ανέμου κατά μήκος του άξονα του ροϊκού σωλήνα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.

Για τη μελέτη του αεροδυναμικού πεδίου γύρω από το δίσκο θα εφαρμοστούν οι γνωστοί νόμοι της Μηχανικής των Ρευστών και πιο συγκεκριμένα:

- Η εξίσωση διατήρησης της μάζας
- Η εξίσωση διατήρησης της ορμής
- Ενεργειακός ισολογισμός
- Η εξίσωση της ροπής της ορμής

Σε πρώτη προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

1. Η εναλλαγή ενέργειας μεταξύ ρευστού και δίσκου γίνεται χωρίς απώλειες.
2. Ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας στο δίσκο
3. Η φόρτιση (διαφορά πίεσης πριν και μετά) πάνω σε ολόκληρο το δίσκο είναι σταθερή.



4. Ο δίσκος δεν περιστρέφει τη φλέβα της ροής. Η παραδοχή αυτή πρακτικά μπορεί να επιτευχθεί με την ύπαρξη δύο αντίθετα στρεφόμενων δρομέων ενώ οι παραδοχές 2 & 3 απαιτούν άπειρο αριθμό και πτερύγια κατάλληλης σχεδίασης.

Στην συνέχεια ορίζονται τα μεγέθη p και U ως η στατική πίεση και η ταχύτητα του ανέμου στο άπειρο ανάντι του δίσκου, p^- και p^+ , η στατική πίεση του ρευστού πριν και μετά το δίσκο, πάνω στο δίσκο, V_s η ταχύτητα του ρευστού δια μέσου του δίσκου και τέλος p και V η στατική πίεση (πλήρης ανάκτηση πίεσης) και η ταχύτητα του ρευστού στο άπειρο, κατάντι του δίσκου ενέργειας, όπως αυτά φαίνονται στο Σχήμα 3.1

3.2.1. Εφαρμογή των νόμων διατήρησης

3.2.1.1. Διατήρηση μάζας

Η μάζα του ρέει μέσα στο ροϊκό σωλήνα, διατηρείται σταθερή και ίση με:

$$\dot{m} = \rho * A_\delta * V_s = \rho * \pi * R^2 * V_s$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, A_δ η διατομή του ροϊκού σωλήνα πάνω στο δίσκο (επιφάνεια δίσκου) ακτίνας R και V_s η ταχύτητα του ρευστού διαμέσου του δίσκου.

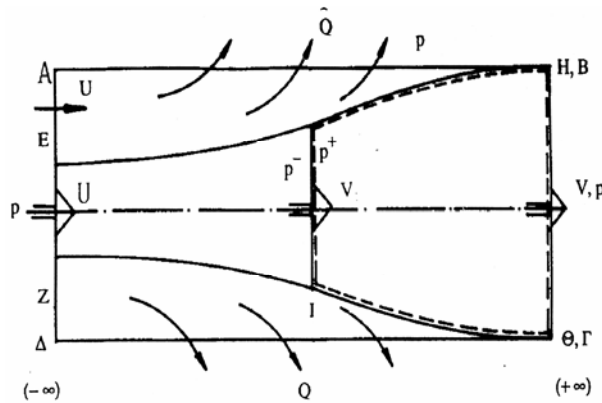
Για τη ροή μέσα στο ρεύμα ισχύει σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση:

$$U * A_{-\infty} = V_s * A_\delta = V * A_{+\infty}$$

Όπου $A_{-\infty}$, A_δ και $A_{+\infty}$ είναι οι επιφάνειες ανάντι του δίσκου, πάνω στο δίσκο και κατάντι αυτού, αντίστοιχα.

3.2.1.2. Διατήρηση της ορμής

Το θεώρημα διατήρησης της ορμής θα εφαρμοστεί στον κυλινδρικό όγκο ΑΒΓΔ. (Σχήμα 3.2), ο οποίος περιβάλλει το ροϊκό σωλήνα ΕΖΗΘ. Η παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου (ΑΒ-ΓΔ) τοποθετείται πολύ μακριά από το δίσκο ώστε εκεί η στατική πίεση του ρευστού να είναι ίση με την πίεση του περιβάλλοντος, δηλαδή την ατμοσφαιρική.



Σχήμα 3.2. Επιφάνεια ελέγχου

Η παροχή Q διαμέσου της παράπλευρης επιφάνειας του κυλινδρικού όγκου ισολογισμού είναι:

$$Q = \rho * A_{\infty} * U - \rho * A_{\delta} * V_s$$

Το ρευστό εισέρχεται στον όγκο ισολογισμού με αξονική ταχύτητα ίση με U .

Εφαρμόζοντας το θεώρημα διατήρησης της ορμής, δηλαδή ότι η ώση ισούται με την εν θέσει μεταβολή της ροής της ορμής, προκύπτει ότι:

$$T = \rho * U^2 * A_{\infty} - \rho * A_{\delta} * V_s * V - Q * U \quad (3.1)$$

ή αλλιώς

$$T = \rho * A_{\delta} * V_s * (U - V) \quad (3.2)$$

(η θετική τιμή της ωστικής δύναμης T , επειδή ισχύει $U > V$, δηλώνει ότι το ρευστό εξασκεί πάνω στο δρομέα δύναμη προς την κατεύθυνση του ανέμου που συμπίπτει με τη θετική φορά του άξονα των x). Ας σημειωθεί ότι η συμβολή των δυνάμεων πίεσης στην παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου είναι μηδενική (παντού επικρατεί πίεση p). Αν είχε εφαρμοστεί ο ισολογισμός της ορμής πάνω στο ροϊκό σωλήνα, τότε προκειμένου να προκύψει το ίδιο αποτέλεσμα, θα έπρεπε η συνεισφορά των δυνάμεων πίεσης κατά τον άξονα των x να είναι μηδέν, γεγονός που βέβαια ισχύει αλλά δεν είναι τόσο προφανές για να αποδειχθεί.



3.2.1.3. Ενεργειακός ισολογισμός

Το ρεύμα στερείται συστροφής ανάντι από το δρομέα, έγινε δε η υπόθεση ότι στερείται συστροφής και κατάντι. Κατά συνέπεια υπάρχει διατήρηση ενέργειας του ρευστού (εξίσωση Bernoulli) στους δύο ανεξάρτητους υποχώρους πριν και μετά το δίσκο μέσα στο ροϊκό σωλήνα όχι όμως και μεταξύ των δύο υποχώρων, γιατί ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από το ρευστό. Συνεπώς για τον υποχώρο ανάντι από τον δρομέα ισχύει:

$$p + \frac{\rho}{2} * U^2 = p^- + \frac{\rho}{2} * V_s^2$$

ενώ για τον υποχώρο κατάντι από τον δρομέα ισχύει:

$$p + \frac{\rho}{2} * V^2 = p^+ + \frac{\rho}{2} * V_s^2$$

Αφαιρώντας τις δύο αυτές σχέσεις κατά μέλη προκύπτει:

$$p^- - p^+ = \frac{\rho}{2} * (U^2 - V^2)$$

Ο δρομέας ασκεί μια δύναμη, την ώση, στον άνεμο, φρενάροντας τον καθώς η πίεση του πέφτει διαμέσου του δίσκου. Αν υποτεθεί ότι η πίεση δεν είναι συνάρτηση του χρόνου, τότε δεν πρέπει να υπάρχει και περιοδικότητα στην ταχύτητα της ροής στο επίπεδο του δρομέα (οι παραπάνω συνθήκες είναι αληθινές μόνο για άπειρο αριθμό πτερυγίων). Από την εξίσωση (3.2) η ώση είναι ίση με:

$$T = \rho * A_\delta * V_s * (U - V) \quad (3.3)$$

από όπου προκύπτει και η ειδική ώση:

$$\frac{T}{A_\delta} = \rho * V_s * (U - V) \quad (3.4)$$

η οποία δεν είναι τίποτε άλλο παρά η σταθερή φόρτιση του δίσκου

$$\frac{T}{A_\delta} = \Delta p = p^- - p^+ \quad (3.5)$$



οπότε προκύπτει

$$\rho * V_s * (U - V) = \frac{\rho}{2} * (U^2 - V^2)$$

δηλαδή

$$V_s = \frac{1}{2} * (U + V) \quad (3.6)$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι η ταχύτητα του ανέμου πάνω στο δίσκο είναι το ημίθροισμα των ταχυτήτων του ανέμου πολύ πριν και πολύ μετά από το δίσκο (ανάντι και κατάντι).

Έχει επικρατήσει η εισαγωγή του συντελεστή αξονικής επαγωγής ή αλληλεπίδρασης a (axial interference factor), της ταχύτητας του ανέμου, ως εξής:

$$a = \frac{(U - V_s)}{U} \quad (3.7)$$

Ο συντελεστής αξονικής επαγωγής (θετική ποσότητα) εκφράζει την ποσοστιαία επιβράδυνση του αέρα πάνω στο δίσκο. Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι:

$$V_s = U * (1 - a) \quad (3.8)$$

$$V = U * (1 - 2a) \quad (3.9)$$

Η τελευταία σχέση δηλώνει ότι η ποσοστιαία επιβράδυνση μακριά κατάντι του δίσκου είναι διπλάσια της ποσοστιαίας επιβράδυνσης του ρευστού στο επίπεδο του δίσκου.

Ο άνεμος του ροϊκού σωλήνα που πλησιάζει το δίσκο έχει ισχύ:



$$N_- = \left[\frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} \right] * \dot{m}$$

ενώ κατάντι του δίσκου έχει μικρότερη ισχύ:

$$N_+ = \left[\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} \right] * \dot{m}$$

Έτσι η απώλεια ισχύος από το ρεύμα του ροϊκού σωλήνα είναι:

$$P = \dot{m} * \left[\frac{U^2 - V^2}{2} \right]$$

και αυτή ισούται με την ισχύ που δέσμευσε ο δίσκος.

Εκτέλεση των πράξεων στην τελευταία σχέση δίνει ότι:

$$P = T * V_s \quad (3.10)$$

σχέση που δηλώνει ότι η ισχύς που δεσμεύεται από τον ανεμοκινητήρα ισούται με την ώθηση που το ρευστό ασκεί πάνω στο δίσκο, επί την ταχύτητα ολίσθησης του ανέμου πάνω στο δίσκο.

3.2.1.4. ΟΡΙΟ ΤΟΥ BETZ

Οι προηγούμενες σχέσεις για την ισχύ του δρομέα και την ώση μπορούν, μετά την εισαγωγή του συντελεστή αξονικής επαγωγής να γραφούν ως εξής:

$$P = 2 * \rho * A_s * U^3 * a * (1 - a)^2 \quad (3.11)$$

$$T = 2 * \rho * A_s * U^2 * a * (1 - a) \quad (3.12)$$

Ορίζονται συντελεστές ισχύος και ώσης του δρομέα:



$$C_p = \frac{P}{\left(\frac{1}{2} * \rho * U^3 * A_\delta\right)} \quad (3.13)$$

$$C_T = \frac{T}{\left(\frac{1}{2} * \rho * U^3 * A_\delta\right)} \quad (3.14)$$

Η πρώτη σχέση υποδηλώνει το ποσοστό της ενέργειας που έχει ο άνεμος που πλησιάζει το δίσκο (λίγο πριν από το δίσκο) και που μετατρέπεται σε ισχύ πάνω στο δρομέα ($1/2 * (\rho * A * V_0^3)$) είναι η ισχύς που έχει ο άνεμος ταχύτητας V_s που περνάει από επιφάνεια A_δ) ενώ η δεύτερη σχέση εκφράζει το συντελεστή αντίστασης που παρουσιάζει ο δρομέας στη ροή (μέγεθος χρήσιμο για τον υπολογισμό της δύναμης ανατροπής του πύργου στήριξης του ανεμοκινητήρα). Με εκτέλεση πράξεων προκύπτει:

$$C_p = 4a * (1 - a)^2 \quad (3.15)$$

$$C_T = 4a * (1 - a) \quad (3.16)$$

Η σχέση (2.15) για το συντελεστή ισχύος δηλώνει ότι αυτή έχει ακρότατο για τιμή συντελεστή αξονικής επαγωγής, (a):

$$\alpha = \frac{1}{3} \quad \left(\frac{dC_p}{d\alpha} = 0\right)$$

Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής παίρνει μέγιστη τιμή ίση με:

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} \cong 59\% \quad (3.17)$$

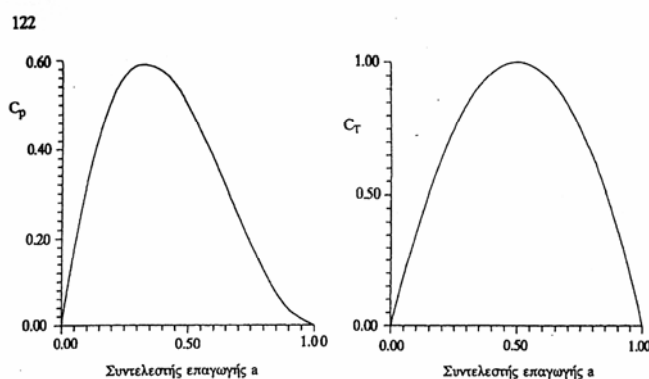
Η μέγιστη αυτή τιμή καλείται όριο του Betz. Προκύπτει λοιπόν ότι ο βέλτιστος δρομέας και κάτω από ιδανικές συνθήκες λειτουργίας μπορεί να



δεσμεύει μόνο το 59% της ισχύος του ανέμου. Το όριο αυτό είναι κατά κάποιο τρόπο ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του συστήματος για ιδανική έλικα, ανάλογος με το βαθμό απόδοσης Carnot των θερμοδυναμικών κύκλων. Στην περίπτωση αυτή της βέλτιστης λειτουργίας, η ταχύτητα U του ανέμου μειώνεται στα $2/3$ πάνω στο δίσκο και στο $1/3$ πολύ μακριά κατάντι του δίσκου. Είναι δηλαδή:

$$V_s = (2/3) * U \quad (3.18)$$

$$V = (1/3) * U \quad (3.19)$$



Σχήμα 3.4. Καμπύλη C_p Απόδοσης Δρομέα και Συντελεστή Ώσης Ανεμοκινητήρα συναρτήσει του συντελεστή αξονικής επαγωγής (a).

3.3. Επίδραση της περιστροφής του όμορου

Ο όρος «όμορους» που αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει το ρεύμα του αέρα που, περνώντας τον ανεμοκινητήρα, διαστέλλεται μέχρι το άπειρο. Η επιστημονική ονομασία του είναι απόρευμα (wake) ή και ουραίο ρεύμα, αλλά η ονομασία «ομόρους» έχει επικρατήσει ως τεχνικός όρος.

Η προηγούμενη ανάλυση βασίστηκε στην υπόθεση ότι ο ομόρους του πεδίου ροής (πεδίο ροής πίσω από το δίσκο) στερείται συστροφής, πράγμα που αληθεύει όταν ο ανεμοκινητήρας έχει δυο αντίθετα συστρεφόμενους δρομείς. Στην πράξη όμως ο ανεμοκινητήρας έχει ένα δρομέα και ο και ο ομόρους ακόμη και στην ιδανικότερη των περιπτώσεων λειτουργίας του



ανεμοκινητήρα, έχει συστροφή που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση του ρεύματος του αέρα και του δρομέα.

Για τις έλικες των αεροσκαφών, ο ομόρους στρέφεται κατά τη φορά περιστροφής της έλικας, ενώ για ανεμοκινητήρα, ο ομόρους έχει αντίθετη από το δρομέα φορά περιστροφής (φυσικά για ακίνητο παρατηρητή).

Στην περίπτωση του ανεμοκινητήρα (σε αντίθεση με την έλικα του αεροσκάφους), ο δρομέας έχει μικρή φόρτιση και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο ομόρους να έχει πολύ μικρή συστροφή. Η κινητική ενέργεια που έχει το ρευστό μετά το δρομέα, αποτελείται από την κινητική ενέργεια που οφείλεται στην αξονική (μεταφορική) ταχύτητα του ανέμου και από την περιφερειακή κινητική ενέργεια (που οφείλεται στην συστροφή του ρευστού). Η περιφερειακή κινητική ενέργεια γενικά δεν μπορεί να ανακτηθεί στο άπειρο μακριά από το δρομέα και να γίνει στατική (ωφέλιμη) πίεση και ως εκ τούτου αποτελεί ενεργειακή απώλεια του συστήματος. Η ενεργειακή αυτή απώλεια μειώνει το συνολικό βαθμό απόδοσης του ανεμοκινητήρα. Να σημειωθεί ότι το ρευστό ανάντι του δίσκου στερείται συστροφής (αστρόβιλο), οπότε η κινητική του ενέργεια οφείλεται στην αξονική μεταφορική κίνησή του.

Το θεώρημα διατήρησης της ροπής της ορμής, εφαρμοζόμενο σε όγκο ισολογισμού που δεν περιβάλλει το δίσκο ενέργειας (διακοπτόμενη γραμμή στο Σχήμα 1.2.1), οδηγεί στο συμπέρασμα διατήρησης της συστροφής.

$$V_g * r = \text{σταθερό} \quad (\text{για το πεδίο ροής κατάντι του δίσκου}) \quad (3.20)$$

Συνεπώς η περιφερειακή ταχύτητα του ρευστού στην ανάντι επιφάνεια του δίσκου είναι μηδέν, είναι δε V_g πάνω στην κατάντι επιφάνεια του και παραμένει η ίδια V_g μακριά κατάντι στο άπειρο και φυσικά στην ίδια ακτινική απόσταση από τον άξονα. Άρα η περιφερειακή ταχύτητα του ρευστού πάνω στο δίσκο ισούται με το μισό του αθροίσματος της περιφερειακής ταχύτητας του στις δυο πλευρές του δίσκου (στην ανάντι και στην κατάντι επιφάνεια του), δηλαδή το μισό της περιφερειακής ταχύτητας του ρευστού κατάντι στο άπειρο (στην ίδια ακτινική απόσταση).

$$V_{\theta_s} = \frac{1}{2} * V_{\theta_\infty}$$



Ορίζεται συντελεστής περιφερειακής επαγωγής ή αλληλεπίδρασης, η ποσότητα a' και ισχύει:

$$\alpha' = \frac{V_{\theta_s}}{\Omega * r} \quad (3.21)$$

όπου Ω η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό προκύπτουν οι σχέσεις:

$$V_{\theta_s} = a' * \Omega * r \quad (3.22)$$

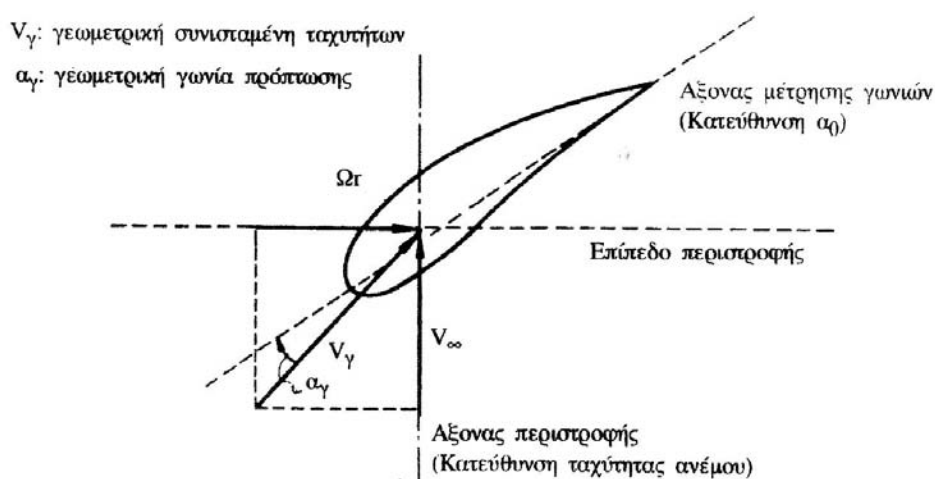
$$V_{\theta_\infty} = 2a' * \Omega * r \quad (3.23)$$



4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ

4.1. Θεωρητικός υπολογισμός πτερύγωσης

Η θεωρία των στοιχείων πτερύγωσης χωρίζει το πτερύγιο του δρομέα σε στοιχειώδεις λωρίδες πλάτους Δr και συνδέει τις δυνάμεις και ροπές που το ρευστό εξασκεί κατά τη διέλευσή διά μέσου του δακτυλιοειδούς τμήματος του δίσκου πάχους Δr πάνω στο δίσκο με τις αεροδυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω στις λωρίδες πτερυγίου του δρομέα. Κάθε δακτυλειοδής ροϊκός σωλήνας τέμνει τα πτερά του δρομέα που είναι B το πλήθος και τα οποία πάνω στην κυλινδρική επιφάνεια του ροϊκού σωλήνα αφήνουν ίχνος που έχει την μορφή της αεροτομής. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται σε κάτοψη το ανάπτυσμα της κυλινδρικής επιφάνειας του ροϊκού σωλήνα με το ίχνος της τομής της με ένα πτερύγιο του δρομέα.



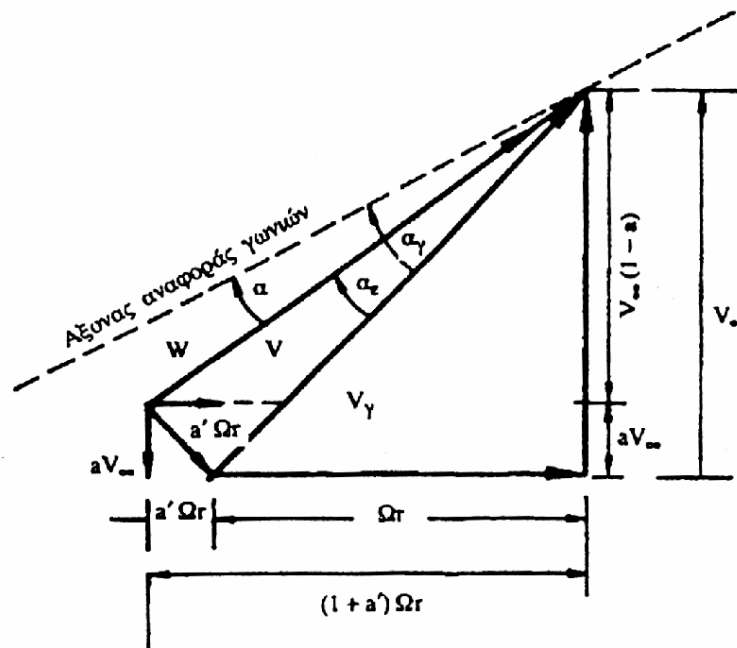
Σχήμα 4.1. Γεωμετρικό Τρίγωνο Ταχυτήτων

Για παρατηρητή που κινείται με το πτερύγιο η αεροτομή βρίσκεται σε ένα πεδίο ταχυτήτων που έχει αξονική συνιστώσα U και περιφερειακή συνιστώσα $\Omega r (1+a')$ (το θετικό πρόσημο δηλώνει ότι η συνιστώσα αυτή έχει φορά

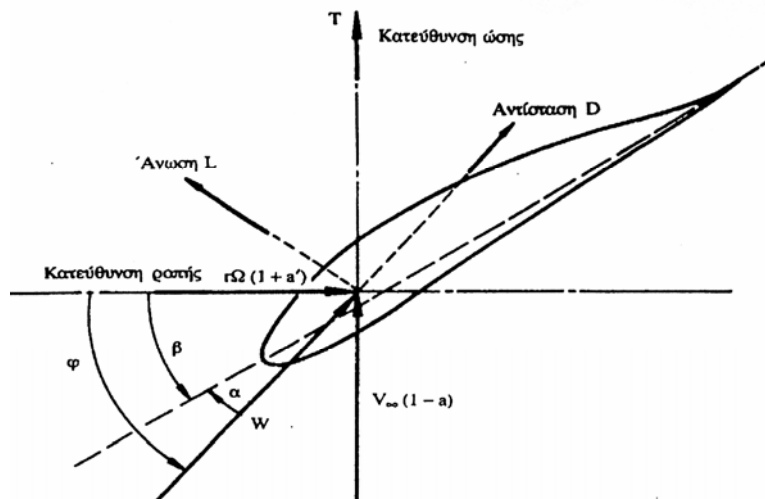


αντίθετη προς την κατεύθυνση περιστροφής του δρομέα). Η συνισταμένη ταχύτητα W είναι τότε :

$$w = \sqrt{U^2 * (1 - a^2) + \Omega^2 * r^2 * (1 + a')^2}$$



Σχήμα 4.2. Πραγματικό τρίγωνο ταχυτήτων



Σχήμα 4.3. Δυνάμεις που αναπτύσσονται στην αεροτομή του Ανεμοκινητήρα



Η δε αεροτομή βρίσκεται σε γωνία πρόσπτωσης α ως προς την ταχύτητα W όπως φαίνεται στο σχήμα. Η αλληλεπίδραση της ροής και της στοιχειώδους λωρίδας πτέρυγας (πτέρυγα με πλάτος Δr) οδηγεί στην εμφάνιση των δυνάμεων άνωσης και αντίστασης όπως φαίνονται στο σχήμα. Οι εκφράσεις των δυνάμεων αυτών, σύμφωνα με τα γνωστά από την αεροδυναμική είναι :

$$\Delta L = C_l * \frac{\rho}{2} * W^2 * C * \Delta r \quad (4.1)$$

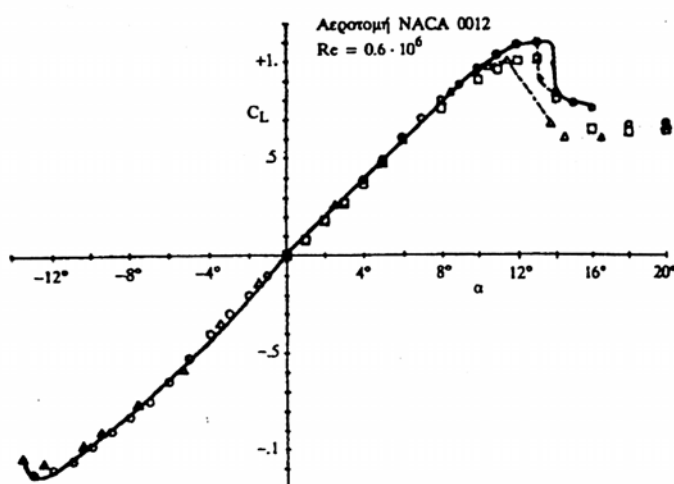
$$\Delta D = C_d * \frac{\rho}{2} * W^2 * C * \Delta r \quad (4.2)$$

Όπου C_l και C_d οι συντελεστές και C η χορδή της αεροτομής. Τυπικές μεταβολές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης αεροτομής φαίνονται στα παρακάτω σχήματα, για την αεροτομή NACA 4412 όπου διαπιστώνεται η γραμμικότητα της σχέσης συντελεστή άνωσης γωνίας πρόσπτωσης και οι χαμηλές τιμές συντελεστή αντίστασης γύρω από μια ευρεία περιοχή τιμών γωνιών πρόσπτωσης γύρω από τη γωνία πρόσπτωσης χωρίς κρούση.

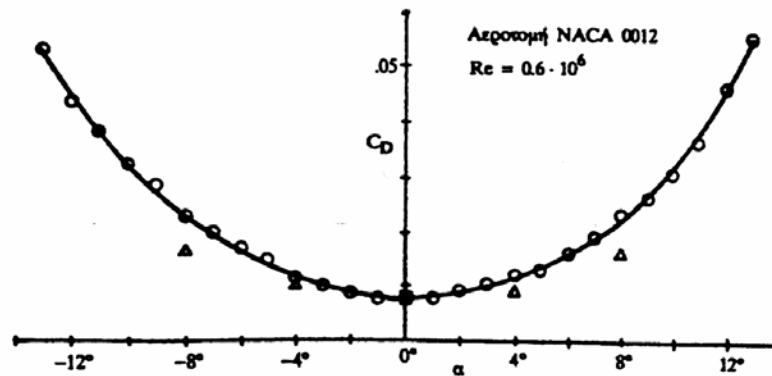
Οι δύο στοιχειώδεις δυνάμεις άνωσης και αντίστασης αναλύονται κατά την αξονική και περιφερειακή κατεύθυνση (x και t) και δίνουν τις εκφράσεις:

$$\Delta F_t = \Delta L * \sin \phi - \Delta D * \cos \phi \quad (4.3)$$

$$\Delta F_x = \Delta L * \cos \phi + \Delta D * \sin \phi \quad (4.4)$$



Σχήμα 4.4. Τυπική Μεταβολή C_l με τη γωνία πρόσπτωσης



Σχήμα 4.5. Τυπική Μεταβολή C_d με την γωνία πρόσπτωσης

όπου $\phi = \alpha + \beta$ και β η γωνία θέσης του πτερυγίου ως προς το επίπεδο περιστροφής του δρομέα.

Ορίζονται συντελεστές αξονικής και περιφερειακής δύναμης οι :

$$C_x = C_l * \cos \phi + C_d * \sin \phi \quad (4.5)$$

$$C_t = C_l * \sin \phi - C_d * \cos \phi \quad (4.6)$$

οπότε οι σχέσεις (4.3) (4.4) για την αξονική και περιφερειακή δύναμη γράφονται:

$$\Delta F_x = C_x * \frac{\rho}{2} * W^2 * C * \Delta r \quad (4.7)$$

$$\Delta F_t = C_t * \frac{\rho}{2} * W^2 * C * \Delta r \quad (4.8)$$

Από το τρίγωνο ταχυτήτων του σχήματος 4.2 προκύπτει ότι :

$$W = U * (1 - a) * \sin \phi$$

οπότε οι σχέσεις για τη στοιχειώδη αξονική και περιφερειακή δύναμη γράφονται :

$$\Delta F_x = C_x * \frac{\rho}{2} * U^2 * (1 - a)^2 * \sin^2 \phi * C * \Delta r \quad (4.9)$$



$$\Delta F_t = C_t * \frac{\rho}{2} * U^2 (1-a)^2 * \sin^2 \phi * C * \Delta r \quad (4.10)$$

Αν B είναι το πλήθος των πτερυγίων του δρομέα, τότε στον στοιχειώδη ροϊκό σωλήνα ακτίνας r και πάχους Δr λόγω αλληλεπίδρασης με το δρομέα αναπτύσσονται η αξονική δύναμη B ΔF_x και περιφερειακή δύναμη B ΔF_t.

Η περιφερειακή δύναμη B ΔF_t παράγει το έργο του ανεμοκινητήρα δημιουργώντας την στοιχειώδη ροπή :

$$dM = B * \Delta F_t * r \quad (4.11)$$

και την στοιχειώδη ισχύ :

$$N = B * \Delta F_t * \Omega * r \quad (4.12)$$

Η αξονική δύναμη καθώς και η ροπή συσχετίζονται μέσω των νόμων διατήρησης της ορμής και της ροπής της ορμής με τις αλλαγές των κινηματικών μεγεθών του ρευστού μέσα στον στοιχειώδη ροϊκό σωλήνα.

Η εξίσωση των εκφράσεων για την στοιχειώδη δύναμη και ροπή οδηγεί αντίστοιχα στις σχέσεις για τους συντελεστές αξονικής και περιφερειακής επαγωγής :

$$\frac{a}{1-a} = \frac{B * C * C_l}{8\pi r * \tan \phi * \sin \phi} (1 + \varepsilon * \tan \phi) \quad (4.13)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{B * C * C_l}{8\pi r * \cos \phi} (1 - \varepsilon * \operatorname{ctg} \phi) \quad (4.14)$$

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_l} \quad (4.15)$$

Στις σχέσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε και η σχέση :

$$\tan \phi = \frac{U * (1-a)}{\Omega r * (1+a')} \quad (4.16)$$

η οποία προκύπτει από το τρίγωνο ταχυτήτων.



Οι προηγούμενες 3 σχέσεις μπορούν να αδιαστατοποιηθούν με την εισαγωγή της στερεότητας σ , που ορίζεται $B\bar{C}/R$, (\bar{C} η μέση χορδή) της αδιάστατης ακτινικής θέσης χ , που ορίζεται $\chi = r/R$ και της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ , που ορίζεται: $\lambda = \frac{\Omega * R}{U}$ οπότε παίρνουν τη μορφή:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma * (C/\bar{C}) * C_l}{8\chi * \tan\phi * \sin\phi} * (1 + \varepsilon * \tan\phi) \quad (4.17)$$

$$\frac{a'}{1-a'} = \frac{\sigma * (C/\bar{C}) * C_l}{8\chi * \cos\phi} * (1 - \varepsilon * \text{ctg}\phi) \quad (4.18)$$

$$\tan\phi = \frac{1}{\lambda * \chi} * \frac{1-a}{1+a'} \quad (4.19)$$

Οι σχέσεις αυτές επαρκούν για να υπολογιστεί η αεροδυναμική απόδοση – συμπεριφορά δρομέα (γνωστών γεωμετρικών στοιχείων) σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας λ . Πράγματι οι 3 εξισώσεις έχουν σε κάθε ακτινική θέση χ αγνώστους τους συντελεστές αξονικής επαγωγής a , περιφερειακής επαγωγής a' και το συντελεστή άνωσης C_l (ή γωνία πρόσπτωσης α). Συνεπώς με μία επαναληπτική διαδικασία αριθμητικών δοκιμών είναι δυνατόν σε κάθε ακτινική θέση να επιλυθεί το σύστημα των εξισώσεων και να προκύψει η αεροδυναμική κατάσταση του δρομέα. Μια τέτοια επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού των λειτουργικών παραμέτρων του δρομέα σε κάθε αδιάστατη ακτινική θέση θα μπορούσε να ακολουθήσει τα εξής στάδια:

- Υποθέτουμε τιμές των a και a'
- Υπολογίζουμε το ϕ (εξίσωση 4.19)
- Υπολογίζουμε τη γωνία πρόσπτωσης α από την εξίσωση $\alpha = \phi - \beta$ και κατόπιν τους συντελεστές C_l και C_d
- Ενημερώνουμε τις τιμές των συντελεστών a και a' από τις εξισώσεις (4.17),(4.18) και επαναλαμβάνεται η επαναληπτική διαδικασία μέχρι σύγκλισης.



- Μετά τη σύγκλιση υπολογίζονται στη συγκεκριμένη ακτινική θέση οι στοιχειώδεις δυνάμεις και ο τοπικός συντελεστής ισχύος
- Τα προηγούμενα βήματα επαναλαμβάνονται για όλες τις ακτινικές θέσεις από $\chi=0$ ως $\chi=1$.

Η δύναμη, η ροπή, ο βαθμός απόδοσης (συντελεστής ισχύος) και άλλα μεγέθη προκύπτουν από την εφαρμογή των αντίστοιχων σχέσεων. Η συνολική δύναμη που ενεργεί στο δρομέα θα είναι:

$$T = \int_{r=0}^R \rho * 2\pi r * U^2 * (1-a) * 2adr \quad (4.20)$$

Η συνολική ροπή που ενεργεί στο δρομέα θα είναι:

$$M = \int_{r=0}^R \rho * 2\pi r * U * (1-a) * 2a' * \Omega r dr \quad (4.21)$$

Η συνολική ισχύς του δρομέα θα είναι:

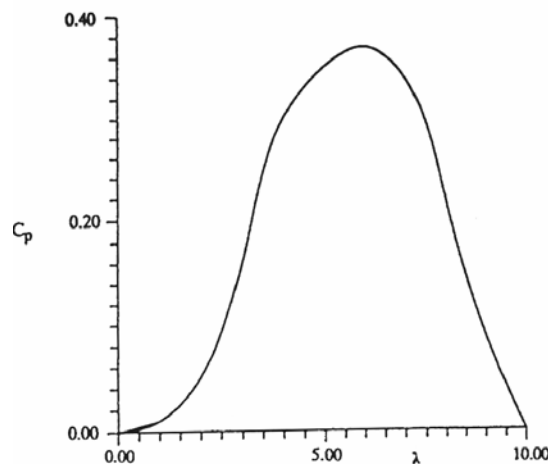
$$P = \int \rho * 2\pi r * \frac{U^3}{2} * C_p dr \quad (4.22)$$

ενώ ο συντελεστής ισχύος του δρομέα προκύπτει από τη σχέση:

$$\bar{C}_p = \frac{P}{\rho * \pi R^2 * \frac{U^3}{2}} \quad (4.23)$$

Τα προηγούμενα ολοκληρώματα υπολογίζονται αριθμητικά χωρίζοντας την ακτίνα του δρομέα σε ένα πλήθος λωρίδων πλάτους Δr (π.χ. $\Delta r = R/20$).

Είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα της ολοκλήρωσης εξαρτώνται μόνο από μία παράμετρο, την ταχύτητα ακροπτερυγίου λ , οπότε η επανάληψη της προηγούμενης διαδικασίας για άλλες τιμές ταχύτητας ακροπτερυγίου θα οδηγήσει στις καμπύλες λειτουργίας του δρομέα αυτοπρόσωπος των οποίων είναι η σχέση συντελεστή ισχύος και ταχύτητας λ , με τυπική μορφή αυτή του σχήματος.



Σχήμα 4.6 .Τυπικό διάγραμμα $C_p - \lambda$.

4.2. Υπολογισμός πτερύγωσης

Αρχικά γίνεται ένας θεωρητικός υπολογισμός της διαμέτρου D του ρότορα.

Η απαιτούμενη ισχύς που για τον υπολογισμό του μήκους του φτερού είναι:

$$P_m = P / \eta = 5000W / 0.60 \Rightarrow P_m = 8333W$$

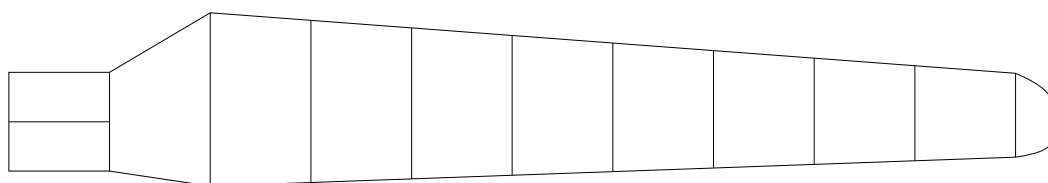
Η διάμετρος του ρότορα η οποία είναι ικανή να παράγει την απαιτούμενη ισχύ των 8333 W υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A V_{design}^3 \Rightarrow P_m = \frac{1}{2} C_p \rho \frac{\pi D^2}{4} V_{design}^3 \Rightarrow D = \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \cdot P_m}{C_p \rho \pi V_{design}^3}} \Rightarrow$$

$$D = \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \cdot 8333W}{0,45 \cdot 1,225 \text{ Kgr}/m^3 \cdot \pi \cdot (12 \text{ m/s})^3}} \Rightarrow D = 4.72m$$

Από το παραπάνω προκύπτει ότι η ακτίνα του ρότορα είναι $R = 2,36m$.

Εισάγοντας τις παραπάνω τιμές σε ένα μη πιστοποιημένο πρόγραμμα υπολογισμού πτερυγώσεων προκύπτει η γεωμετρία του φτερού ικανό να παράγει την απαιτούμενη ισχύς. Η γεωμετρία του συγκεκριμένου φτερού φαίνεται στον πίνακα 4.1.



Section No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NACA	-	44	44	44	44	44	44	44	44	44
Radius (mm)	217.2	434.5	651.7	868.9	1086.2	1303.4	1520.6	1737.8	1955.1	2172.3
Chord	-	331.7	284.2	266.4	248.6	230.9	213.1	195.4	177.6	159.9
Height (mm)	-	54.4	50.3	46.1	41.9	37.7	33.5	29.4	25.2	20.8
Height (%)	-	16	17	17	16	16	15	15	14	12
Pitch (deg)	-	17.9	11.2	7.3	5	3.5	2.7	2.2	2	1.9

Πίνακας 4.1. Γεωμετρία φτερού.

Η διαφορά ανάμεσα στο μήκος του φτερού και την ακτίνα του ρότορα οφείλεται στην σύνδεση του με την πλήμνη της Α/Γ και το μήκος του ακροπτερυγίου.

Με βάση το μη πιστοποιημένο πρόγραμμα στους πίνακες που ακολουθούν 4.4. και 4.5. περιγράφονται πλήρως οι δυνάμεις που ασκούνται στο φτερό καθώς και η γεωμετρία του:

Στον πίνακα 4.2 φαίνονται τα δεδομένα που εισάγουμε στο πρόγραμμα.

<i>Input variables</i>	
Number of blade sections	9
Tip length	0.1 <i>m</i>
Blade length (inc tip)	2.27 <i>m</i>
Hub diameter	0.594 <i>m</i>
Rotor diameter	4.7 <i>m</i>
Mechanical efficiency	0.6
Electrical efficiency	1
Rated wind speed	12 <i>m/sec</i>
Maximum wind speed	50 <i>m/sec</i>
Number of blades	3
Revolutions per minute	300 <i>RPM</i>
Gear ratio	1

Πίνακας 4.2.

Στον πίνακα 4.3. φαίνονται τα πρώτα αποτελέσματα σε ταχύτητα σχεδιασμού τα 12 m/sec.

<i>Output results at 12 m/sec</i>	
Tip speed ratio (λ)	6.16
Wind turbine output power	5.85 <i>Kw</i>
The Power coefficient (C_p)	0.373



Πίνακας 4.3.

Blade geometry					
	Radius (mm)	Pitch (deg)	Chord (mm)	Thickness (mm)	Thickness (%)
1	434.460	17.890	331.690	53.070	16.0
2	651.690	11.170	284.150	48.305	17.0
3	868.920	7.280	266.400	45.288	17.0
4	1086.150	4.950	248.640	39.782	16.0
5	1303.380	3.530	230.890	36.942	16.0
6	1520.610	2.680	213.130	31.969	15.0
7	1737.840	2.210	195.380	29.307	15.0
8	1955.070	1.990	177.620	24.867	14.0
9	2172.300	1.960	159.870	19.184	12.0

Πίνακας 4.4.

Blade Forces				
	Drag force for v_{rat} (Nt)	Lift force for v_{rat} (Nt)	Drag force for v_{max} (Nt)	Lift force for v_{max} (Nt)
1	18.987	8.405	329.639	145.916
2	26.698	8.625	463.508	149.737
3	35.967	8.629	624.433	149.807
4	45.277	8.455	786.060	146.788
5	54.897	8.141	953.068	141.344
6	63.394	8.025	1100.594	139.316
7	70.867	8.141	1230.333	141.345
8	77.376	8.210	1343.329	142.535
9	82.445	8.297	1431.339	144.047

Πίνακας 4.5.

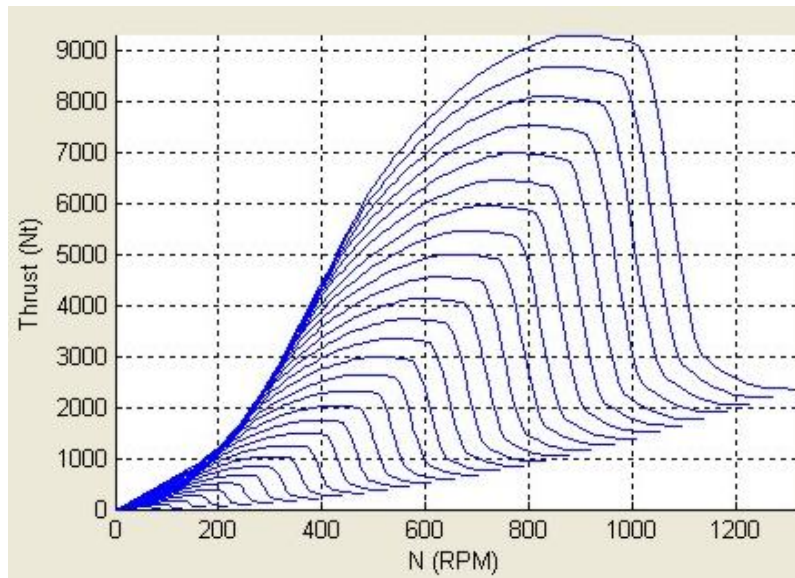
Στον πίνακα 4.6. καταγράφονται πλέον οι πραγματικές τιμές της ροπής στις 300 RPM και της οπισθέλκουσας δύναμης για $v_{rat} = 12$ m/sec και $v_{max} = 50$ m/sec αντίστοιχα.

Torque	310.362 <i>Nt*m</i>
Drag force	1697.940 <i>Nt</i>
max Drag force	24786.910 <i>Nt</i>

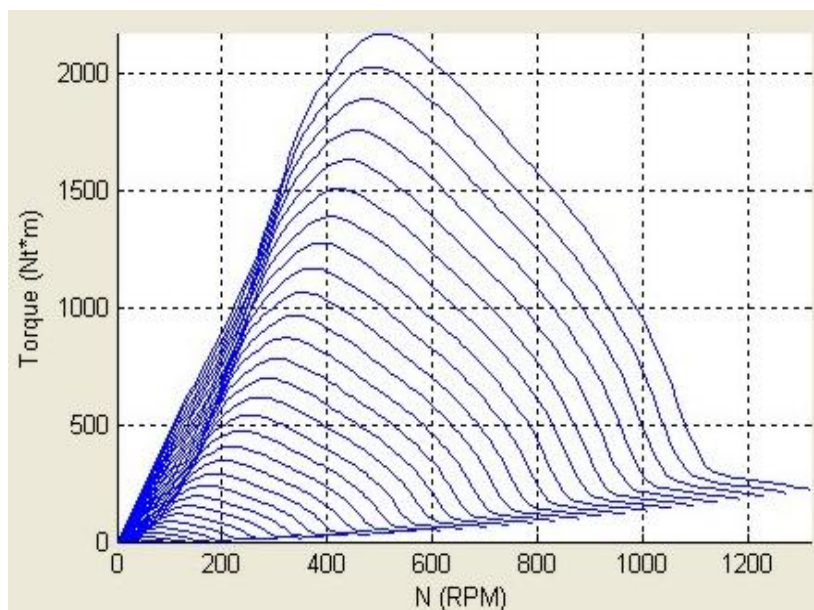
Πίνακας 4.6.



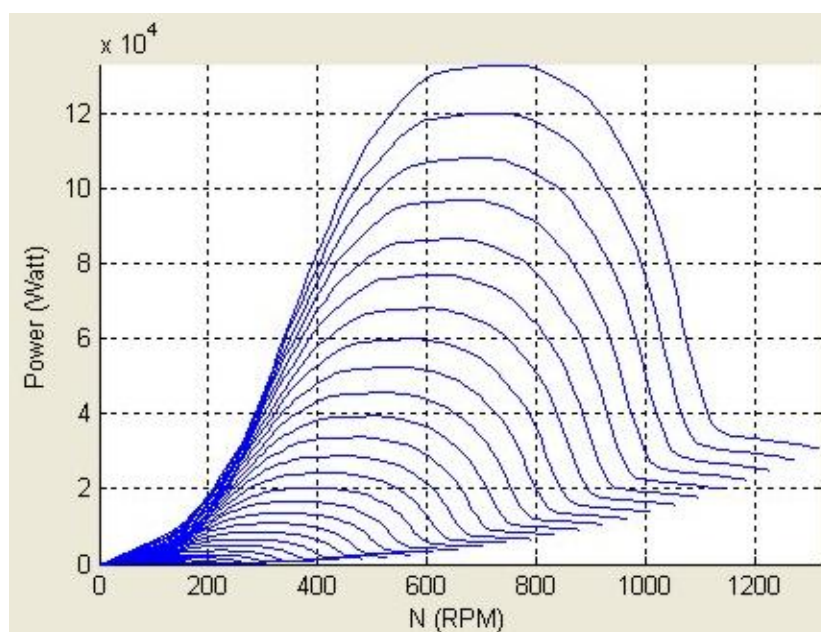
Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα ακολουθούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες της πτερύγωσης:



Διάγραμμα 4.1. Χαρακτηριστική καμπύλη Ωσης-Στροφών.



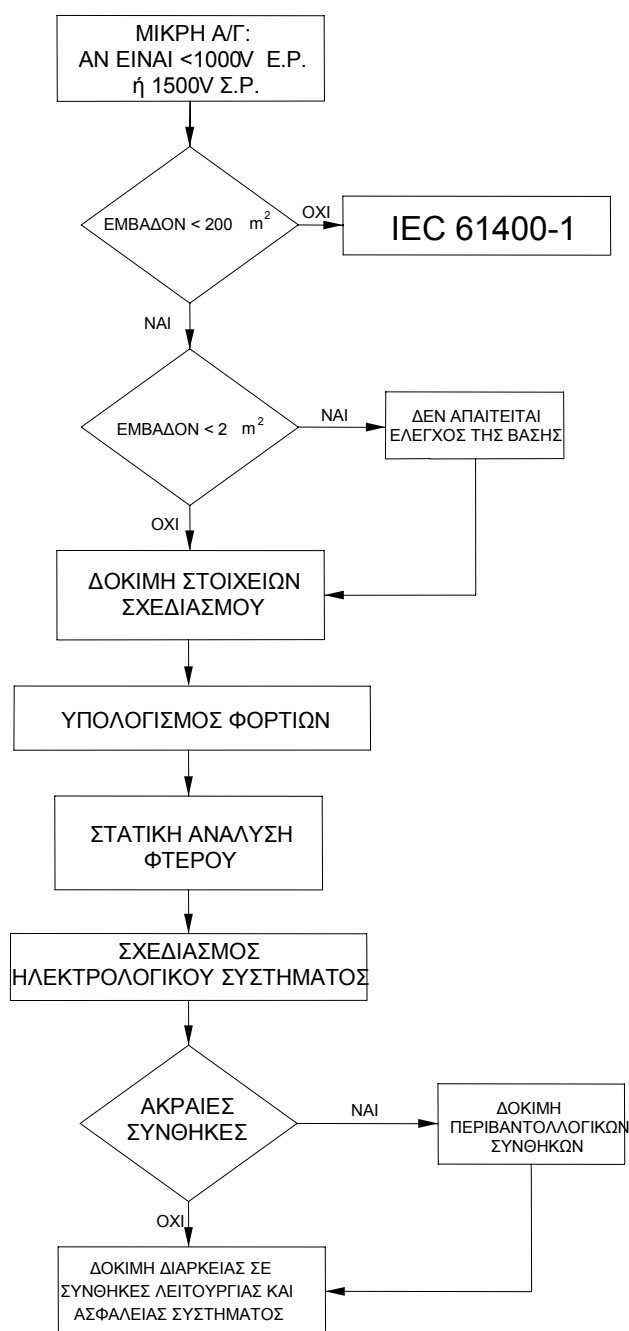
Διάγραμμα 4.2. Χαρακτηριστική καμπύλη Ροπής - Στροφών



Διάγραμμα 4.3. Χαρακτηριστική καμπύλη Ισχύος-Στροφών

4.3. Υπολογισμός φορτίων και φορτίων σχεδιασμού

Η παρούσα μελέτη αφορά την κατασκευή μιας “μικρής” ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα ονομαστικής ισχύος 5 kW της η οποία προορίζεται να συνδεθεί με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Λόγω της συγκεκριμένης χρήσης η A/Γ απαιτείται να έχει αυξημένη αξιοπιστία. Όλοι οι υπολογισμοί που αναφέρονται στην παρούσα βασίζονται στον διεθνή κανονισμό **IEC 61400-2, WIND TURBINES – Part 2: Design requirements for small wind turbines.**



Εικόνα 4.1. Κανονισμός κατά IEC 61 400-2

4.3.1. Βασικοί υπολογισμοί

Για συγκεκριμένο τύπο Α/Γ οι δυνάμεις που καταπονούν τα διάφορα εξαρτήματα μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας ένα σύστημα απλοποιημένων εξισώσεων, όπως αυτό περιγράφεται στο IEC 61400-2 για συγκεκριμένες περιπτώσεις φορτίσεων. Ο τύπος των Α/Γ για τις οποίες το

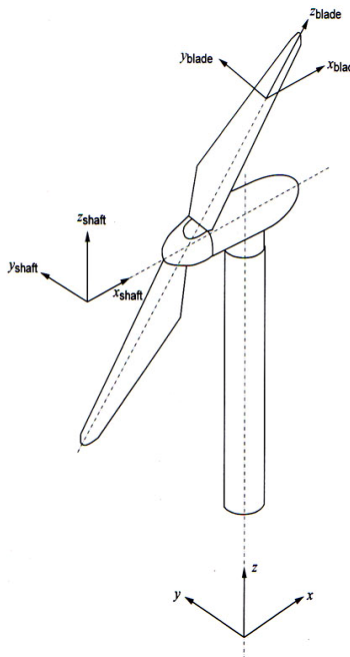


σύστημα των εξισώσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρέπει να υπακούουν στις παρακάτω σχεδιαστικές απαιτήσεις.

- Να είναι οριζόντιου άξονα
- Να έχει 2 ή περισσότερα φτερά τύπου προπέλας
- Άκαμπτη πλήμνη

Ο τύπος της σχεδιαζόμενης A/Γ καλύπτει τις παραπάνω προδιαγραφές επομένως επιλέγεται για τον υπολογισμό των κατασκευαστικών στοιχείων.

Οι περιπτώσεις φορτίσεων για κάθε περίπτωση εφαρμογής για το απλοποιημένο σύστημα συνοψίζεται στον πίνακα 1 και περιγράφουν για όλα εκείνα τα στοιχεία που καταπονούνται όπως αυτά αναφέρονται στον κανονισμό. Για κάθε μία από τις περιπτώσεις αναφέρεται και το είδος των φορτίων, “Κ” και “Σ”. “Κ” αναφέρεται για φορτία για κοπωτική ανάλυση και “Σ” για φορτία για στατική ανάλυση.



Περίπτωση εφαρμογής	Περιπτώσεις φορτίσεως		Ταχύτητα αέρα	Τύπος ανάλυσης
Παραγωγή ενέργειας	A	Κανονική λειτουργία		Κ
	B	Προσανέμιση	$V_{hub} = V_{design}$	Σ
	Γ	Απόκλιση μηχανισμού προσανέμισης	$V_{hub} = V_{design}$	Σ
	Δ	Μέγιστη όση	$V_{hub} = 2,5 V_{design}$	Σ
Παραγωγή ενέργειας με ύπαρξη σφάλματος	E	Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής		Σ
	ΣΤ	Βραχυκύκλωμα γεννήτριας	$V_{hub} = V_{design}$	Σ
Σταμάτημα A/Γ	Z	Φρενάρισμα	$V_{hub} = V_{design}$	Σ
Εκτός λειτουργίας	H	Δυνάμεις από αέρα	$V_{hub} = V_{e50}$	Σ
Εκτός λειτουργίας με ύπαρξη σφάλματος	Θ	Δυνάμεις από αέρα, δυσμενέστερη, περίπτωση	$V_{hub} = V_{ref}$	Σ
Μεταφορά, συναρμολόγηση, συντήρηση και επισκευή	I	Να αναφέρεται από τον κατασκευαστή		Σ

Πίνακας 4.7. Περιπτώσεις φορτίσεων για απλοποιημένο σύστημα εξισώσεων.



Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα φορτία που αναπτύσσονται στα πτερύγια και στον άξονα της A/G σε κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις φορτίσεως. Οι διευθύνσεις των δυνάμεων που αναπτύσσονται ορίζεται από το γενικό σύστημα αξόνων φαίνεται δίπλα στο σχήμα.

Περίπτωση φόρτισης	Φορτία στα πτερύγια	Φορτία στον άξονα
A	$\Delta F_{zB} = 2m_B R_{cog} \omega_{n,design}^2$ $\Delta M_{xB} = \frac{Q_{design}}{B} + 2m_B g R_{cog}$ $\Delta M_{yB} = \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{B}$	$\Delta F_{x-shaft} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{R}$ $\Delta M_{x-shaft} = Q_{design} + 2m_r g e_r$ $\Delta M_{shaft} = 2m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x-shaft}$
B	$M_{yB} = m_B \omega_{yaw}^2 L_{rt} R_{cog} + 2\omega_{yaw} I_B \omega_n + \frac{R}{9} \Delta F_{x-shaft}$	$M_{shaft} = B \omega_{yaw} \omega_n I_B + m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x-shaft}$
Γ	$M_{yB} = \frac{1}{8} \rho A_{proj,B} C_{l,max} R^3 \omega_{n,design}^2 \left[1 + \frac{4}{3\lambda_{design}} + \left(\frac{1}{\lambda_{design}} \right)^2 \right]$	-
Δ	-	$F_{x-shaft} = C_T 3,125 \rho V_{ave}^2 \pi R^2$
E	$F_{zB} = m_B \omega_{n,max}^2 R_{cog}$	$M_{shaft} = m_r g L_{rb} + m_r e_r \omega_{n,max}^2 L_{rb}$
ΣΤ	$M_{xB} = \frac{M_{x-shaft}}{B}$	$M_{x-shaft} = G Q_{design}$
Z	$M_{xB} = \frac{M_{x-shaft}}{B} + m_B g R_{cog}$	$M_{x-shaft} = M_{brake} + Q_{design}$
H	$M_{yB} = C_d \frac{1}{4} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B} R$ or $M_{yB} = C_{l,max} \frac{1}{6} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B} R$	$F_{x-shaft} = B C_d \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B}$ or $F_{x-shaft} = 0,17 B A_{proj,B} \lambda_{e50}^2 \rho V_{e50}^2$
Θ	$F = C_f \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{proj}$	
I	$M_{tower} = 2 \left(m_{towertop} + \frac{m_{overhang}}{2} \right) g L_{lt}$	

Πίνακας 4.8. Τύποι υπολογισμού φορτίων

Οι αναπτυσσόμενες τάσεις πρέπει επίσης να υπολογιστούν για τα κύρια εξαρτήματα της A/G στα οποία αναπτύσσονται φορτία. Οι τάσεις υπολογίζονται για κάθε μια από τις δυνάμεις και έπειτα συνδυάζονται για τον



υπολογισμό των ισοδύναμων τάσεων οι οποίες θα είναι αυτές που θα συγκριθούν με τις τιμές που έχει το χρησιμοποιηθέν υλικό.

Για τον υπολογισμό των τάσεων λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

- κατανομή τάσεων
- συγκέντρωση τάσεων
- μέγεθος και διεύθυνση επιβαλλόμενων φορτίων
- τύπος του φορτίου
- ύπαρξη συγκόλλησης

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τύποι οι οποίοι χρησιμοποιούνται

	Βάση πτερυγίου	Άξονας γεννήτριας
Αξονικό φορτίο	$\sigma_{zB} = \frac{F_{zB}}{A_B}$	$\sigma_{x-shaft} = \frac{F_{x-shaft}}{A_{shaft}}$
Κάμψη	$\sigma_{MB} = \frac{M_{xB}}{W_{xB}} + \frac{M_{yB}}{W_{yB}}$	$\sigma_{M-shaft} = \frac{M_{shaft}}{W_{shaft}}$
Διάτμηση	Αγνοείται	$\tau_{M-shaft} = \frac{M_{x-shaft}}{2W_{shaft}}$
Ισοδύναμο φορτίο (αξονικό και διατμητικό)	$\sigma_{eqB} = \sigma_{zB} + \sigma_{MB}$	$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_{x-shaft} + \sigma_{M-shaft})^2 + 3\tau_{M-shaft}^2}$

Πίνακας 4.9. Τύποι υπολογισμού τάσεων

Για τον σχεδιασμό των διαφόρων στοιχείων A/Γ ικανής να παράγει 5 kW γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- ✓ $B = 3$.
- ✓ $\eta = 0,6$.
- ✓ $V_{design} = 12$ m/sec.
- ✓ $V_{ref} = 50$ m/sec
- ✓ $C_P = 0,45$
- ✓ $\lambda = 6$
- ✓ $\rho = 1,225$ Kgr/m³



Οι παραπάνω παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον αρχικό προσδιορισμό κάποιων τιμών και ενδεχομένως να αλλάξουν παρακάτω στην παρούσα. Σε αυτή την περίπτωση θα διευκρινίζεται η συγκεκριμένη αλλαγή.

4.3.2. Υπολογισμός δυνάμεων

Ο υπολογισμός των δυνάμεων γίνεται για τις περιπτώσεις φορτίσεως που αναφέρεται παραπάνω. Ορισμένες τιμές που χρησιμοποιούνται εδώ υπολογίστηκαν από το μη πιστοποιημένο πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό της γεωμετρίας του φτερού και αφορά την συγκεκριμένη γεωμετρία.

4.3.2.1. Περίπτωση A: Κανονική λειτουργία

Τα φορτία σε “κανονική λειτουργία” είναι κοπωτικά. Τα φορτία αυτά θεωρείται ότι έχουν σταθερό εύρος και ενεργούν στα πτερύγια και στον άξονα της γεννήτριας. Παρακάτω υπολογίζονται οι ακραίες τιμές.

Περίπτωση 1. Φορτία που ενεργούν στα πτερύγια.

Τα φορτία που ενεργούν στα πτερύγια μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπτύσσονται στη βάση του πτερυγίου, μεταξύ βάσης και πρώτης αεροτομής ή στο σημείο επαφής του φτερού με την πλήμνη και είναι:

$$\begin{aligned}\Delta F_{zB} &= 2m_B R_{cog} \omega_{n,design}^2 = 2m_B R_{cog} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 \Rightarrow \\ &\Rightarrow 2 \cdot 14,12 \cdot 1,56 \left(\frac{2\pi \cdot 300}{60} \right)^2 = 43435,87 Nt \\ \Delta M_{xB} &= \frac{Q_{design}}{B} + 2m_B g R_{cog} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{310,362 Ntm}{3} + 2 \cdot 14,12 kgr \cdot 9,806 m/sec^2 \cdot 1,56 m = 535,45 Ntm \\ \Delta M_{yB} &= \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{B} \Rightarrow \Delta M_{yB} = \frac{6,16 \cdot 310,362}{3} = 637,276 Ntm\end{aligned}$$

Το εύρος των υπολογιζόμενων τάσεων είναι ένας συνδυασμός του φυγοκεντρικού φορτίου ΔF_{zB} και των καμπτικών ροπών ΔM_{xB} και ΔM_{yB} .

Έτσι έχουμε:



$$\sigma_{zB} = \frac{F_{zB}}{A_B} \Rightarrow \sigma_{zB} = \frac{43435,87Nt}{47000mm^2} = 9,24MPa$$

$$\sigma_{MB} = \frac{M_{xB}}{W_{xB}} + \frac{M_{yB}}{W_{yB}} \Rightarrow \sigma_{MB} = 4,5MPa + 32,59MPa = 37,09MPa$$

Και η ισοδύναμη τάση στα φτερά είναι:

$$\sigma_{eqB} = \sigma_{zB} + \sigma_{MB} \Rightarrow \sigma_{eqB} = 46,33MPa$$

Περίπτωση 2. Φορτία που ενεργούν στον άξονα της γεννήτριας

Τα κοπωτικά φορτία του άξονα της γεννήτριας αναφέρονται στο τμήμα του άξονα μέχρι το πλησιέστερο έδρανο κύλισης.

$$\Delta F_{x-shaft} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta F_{x-shaft} = \frac{3}{2} \frac{6,16 \cdot 310,362Ntm}{2,35m} = 1220,31Nt$$

$$\Delta M_{x-shaft} = Q_{design} + 2m_r g e_r \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 310,362Ntm + 2 \cdot 82,53kgr \cdot 9,806 \frac{m}{sec^2} \cdot 0,005 \cdot 2,35 = 329,38Ntm$$

$$\Delta M_{shaft} = 2m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x-shaft} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2 \cdot 82,53kgr \cdot 9,806 \frac{m}{sec^2} \cdot 0,20m + \frac{2,35m}{6} \cdot 1220,31Nt = 801,66Ntm$$

Το εύρος των υπολογιζόμενων τάσεων είναι ένας συνδυασμός της δύναμης όσης $\Delta F_{x-shaft}$, της στρεπτικής ροπής $M_{x-shaft}$ και της καμπτικής ροπής ΔM_{shaft} .

Έτσι έχουμε:

$$\sigma_{x-shaft} = \frac{F_{x-shaft}}{A_{shaft}} \Rightarrow \sigma_{x-shaft} = \frac{1220,31Nt}{5026,54mm^2} = 0,242MPa$$

$$\sigma_{M-shaft} = \frac{M_{shaft}}{W_{shaft}} \Rightarrow \sigma_{M-shaft} = \frac{801,66Ntm}{50265,48mm^3} = 0,015MPa$$

$$\tau_{M-shaft} = \frac{M_{x-shaft}}{2W_{shaft}} \Rightarrow \tau_{M-shaft} = \frac{801,66Ntm}{100531,08mm^3} = 7,97^{-3}MPa$$

Και η ισοδύναμη τάση στον άξονα είναι:



$$\sigma_{eq-shaft} = \sqrt{(\sigma_{x-shaft} + \sigma_{M-shaft})^2 + 3\tau_{M-shaft}^2} \Rightarrow \sigma_{eq-shaft} = 0,392MPa$$

4.3.2.2. Περίπτωση B: Προσανέμιση

Σε αυτή την περίπτωση, τα στατικά φορτία, δυνάμεις λόγω γυροσκοπικού φαινομένου και ροπές, θα υπολογιστούν για την μέγιστη ταχύτητα προσανέμισης $\omega_{yaw,max}$ για την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας της γεννήτριας n_{design} .

Για ένα παθητικό σύστημα προσανέμισης, ο μέγιστος ρυθμός περιστροφής δίνεται από την σχέση:

$$\omega_{yaw,max} = 3 - 0,01(\pi R^2 - 2) \Rightarrow$$
$$\omega_{yaw,max} = 3 - 0,01(\pi \cdot 2,35^2 - 2) rad/sec = 2,84 rad/sec$$

Ο μέγιστος αριθμός στροφών του συστήματος προσανέμισης είναι:

$$\omega_{yaw,max} = \frac{2\pi n_{yaw,max}}{60} \Rightarrow n_{yaw,max} = \frac{60\omega_{yaw,max}}{2\pi} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow n_{yaw,max} = \frac{60 \cdot 2,84}{2\pi} RPM \approx 27 RPM$$

Περίπτωση 1. Φορτίο που ενεργεί στα πτερύγια

Τα φορτία λόγω καμπτικής ροπής M_{yB} στην πτέρυγα είναι:

$$M_{yB} = m_B \omega_{yaw}^2 L_{rt} R_{cog} + 2\omega_{yaw} I_B \omega_n + \frac{R}{9} \Delta F_{x-shaft} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow m_B \omega_{yaw}^2 L_{rt} R_{cog} + 2\omega_{yaw} I_B \frac{2\pi N}{60} + \frac{R}{9} \Delta F_{x-shaft} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow 14,12 \cdot (2,84 rad/sec)^2 \cdot 0,6mm \cdot 1,56m + 2 \cdot 2,84 \cdot 4,67 \cdot 10^{-6} m^4 \frac{2\pi 300rpm}{60} + \frac{2,35}{9} 1220,31 \Rightarrow$$
$$M_{yB} = 584,54 Ntm$$

Περίπτωση 2. Φορτίο που ενεργεί στον άξονα της γεννήτριας

Το καμπτικό φορτίο που ενεργεί στον άξονα είναι:

$$M_{shaft} = B\omega_{yaw}\omega_n I_B + m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x-shaft} \Rightarrow$$



$$\Rightarrow 3 \cdot \omega_{yaw} \frac{2\pi N}{60} I_B + m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x-shaft} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow 3 \cdot 2,84 \text{ rad/sec} \frac{2\pi 300 \text{ rpm}}{60} 4,67^{-6} \text{ m}^4 + 82,53 \text{ kgr} \cdot 9,806 \text{ m/sec}^2 \cdot 0,6 \text{ m} + \frac{2,35 \text{ m}}{6} 1220,31 \text{ Nt} \Rightarrow$$

$$M_{shaft} = 963,52 \text{ Ntm}$$

4.3.2.3. Περίπτωση Γ: Απόκλιση μηχανισμού προσανέμισης

Όλες οι A/Γ λειτουργούν με κάποια απόκλιση στον μηχανισμό προσανέμισης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση λαμβάνεται μια απόκλιση της τάξης των 30°. Η καμπτική ροπή που αναπτύσσεται πάνω στα πτερύγια είναι:

$$M_{yB} = \frac{1}{8} \rho A_{proj,B} C_{l,max} R^3 \omega_{n,design}^2 \left[1 + \frac{4}{3\lambda_{design}} + \left(\frac{1}{\lambda_{design}} \right)^2 \right] \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \frac{1}{8} \rho A_{proj,B} C_{l,max} R^3 \left(\frac{2\pi N}{60} \right)^2 \left[1 + \frac{4}{3\lambda_{design}} + \left(\frac{1}{\lambda_{design}} \right)^2 \right] \Rightarrow$$
$$\frac{1}{8} 1,225 \text{ kgr/m}^3 21,63 \text{ m}^2 \cdot 2 \cdot (2,35 \text{ m})^3 \left(\frac{2\pi 300 \text{ rpm}}{60} \right)^2 \left[1 + \frac{4}{3 \cdot 5,81} + \left(\frac{1}{5,81} \right)^2 \right] =$$
$$M_{yB} = 1566188,12 \text{ Ntm}$$

Ο παράγοντας $C_{l,max}$ έχει τιμή 2.

4.3.2.4. Περίπτωση Δ: Μέγιστη όση

Οι μικρές A/Γ εκτίθενται σε μεγάλες δυνάμεις όσης στον ρότορα. Οι δυνάμεις αυτές δρουν παράλληλα με τον άξονα του ρότορα και έχουν μέγιστη τιμή:

$$F_{x-shaft} = C_T 3,125 \rho V_{ave}^2 \pi R^2 \Rightarrow$$
$$0,5 \cdot 3,125 \cdot 1,225 \text{ kgr/m}^3 \cdot (12 \text{ m/sec})^2 \cdot \pi \cdot (2,35 \text{ m})^2 = 4781,93 \text{ Nt}$$

Η τιμή του παράγοντα C_T παίρνει τιμή 0,5, έτσι:



4.3.2.5. Περίπτωση Ε: Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του ρότορα

Τα φυγοκεντρικά φορτία στην βάση του φτερού F_{zB} και η καμπτική ροπή στον άξονα λόγω των φυγοκεντρικών δυνάμεων και την εκκεντρότητας του ρότορα υπολογίζονται σε αυτή την περίπτωση φόρτισης. Η μέγιστη πιθανή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα $\omega_{n,max}$ προκύπτει από μετρήσεις.

$$F_{zB} = m_B \omega_{n,max}^2 R_{cog} \Rightarrow F_{zB} = 14,12 \text{kg} \cdot \left(\frac{2\pi \cdot 600 \text{rpm}}{60} \right)^2 \cdot 1,56 \text{m}$$

$$F_{zB} = 86959,9 \text{N}$$

Και:

$$M_{shaft} = m_r g L_{rb} + m_r e_r \omega_{n,max}^2 L_{rb} \Rightarrow$$

$$M_{shaft} = 82,53 \text{kg} \cdot 9,806 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2} \cdot 0,6 \text{m} + 82,53 \text{kg} \cdot 0,01175 \cdot 3947,84 \cdot 0,6 \Rightarrow$$

$$M_{shaft} = 2782,56 \text{Ntm}$$

4.3.2.6. Περίπτωση ΣΤ: Βραχυκύκλωμα γεννήτριας

Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στην έξοδο της γεννήτρια ή στα τυλίγματα της, δημιουργείται μια μεγάλη ροπή στον άξονα του ρότορα. Λόγω της απουσίας τιμών που μπορούν να αποδειχτούν πιο ακριβείς, 2 φορές η Q_{design} .

$$M_{x-shaft} = G Q_{design} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M_{x-shaft} = 2 \cdot 310,362 \text{Ntm} = 620,724 \text{Ntm}$$

Και στα πτερύγια:

$$M_{xB} = \frac{M_{x-shaft}}{B} \Rightarrow$$

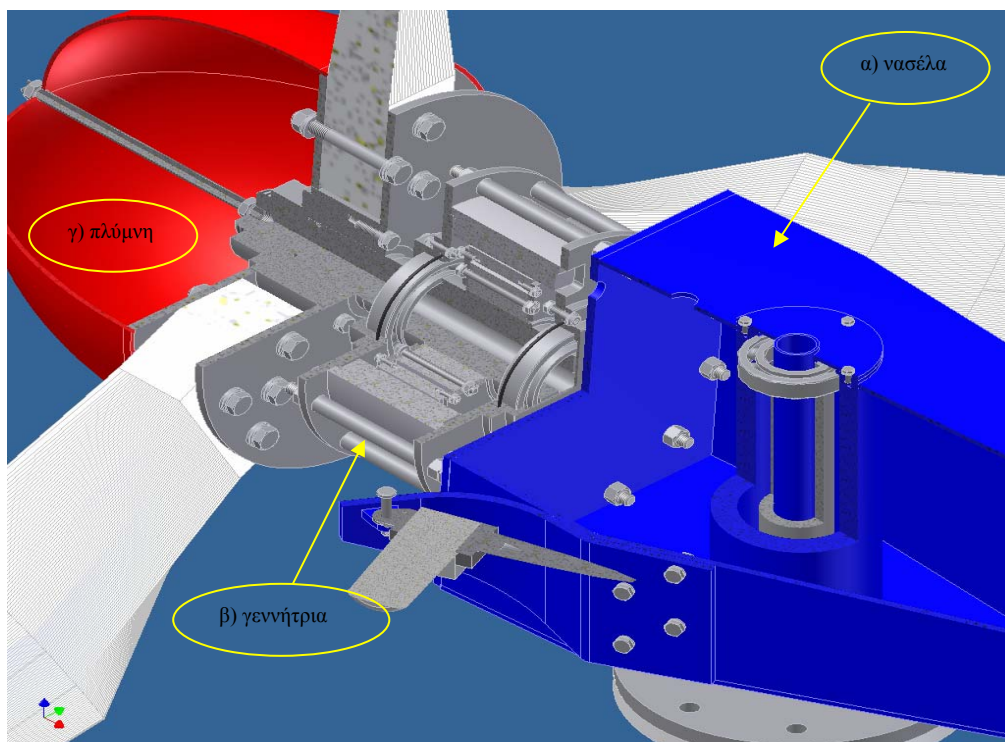
$$\Rightarrow M_{xB} = \frac{620,724 \text{Ntm}}{3} = 206,9 \text{Ntm}$$

4.3.2.7. Περίπτωση Ζ: Φρενάρισμα A/Γ

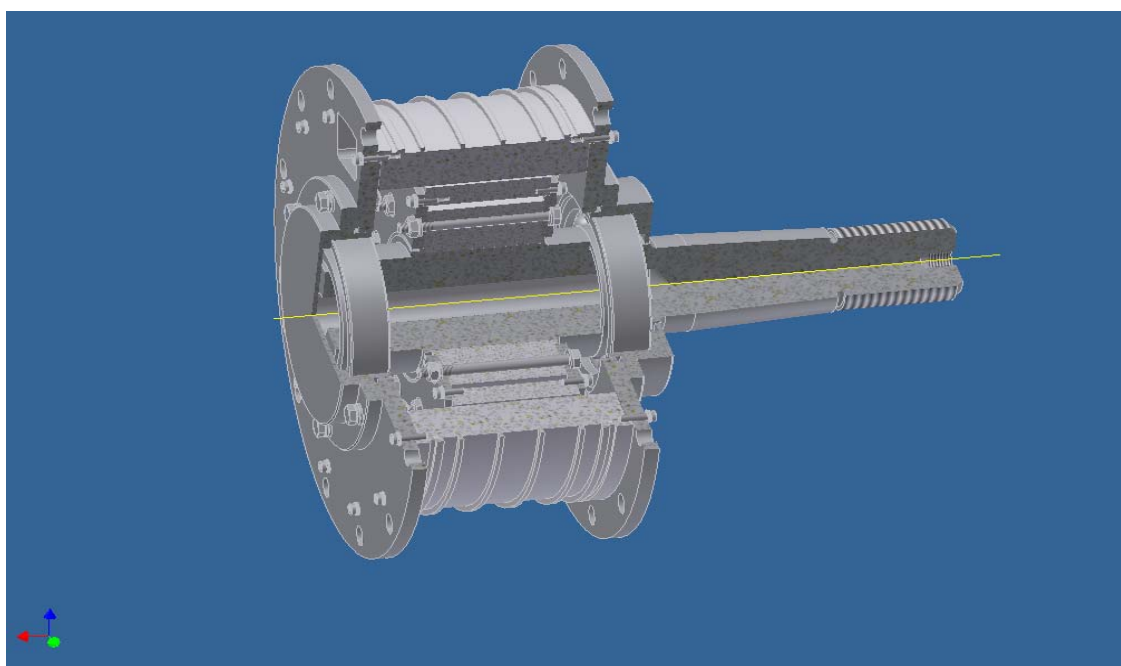
Η περίπτωση αυτή δεν εξετάζεται στην παρούσα μελέτη διότι δεν τοποθετείται μηχανισμός φρεναρίσματος στον άξονα της γεννήτριας.



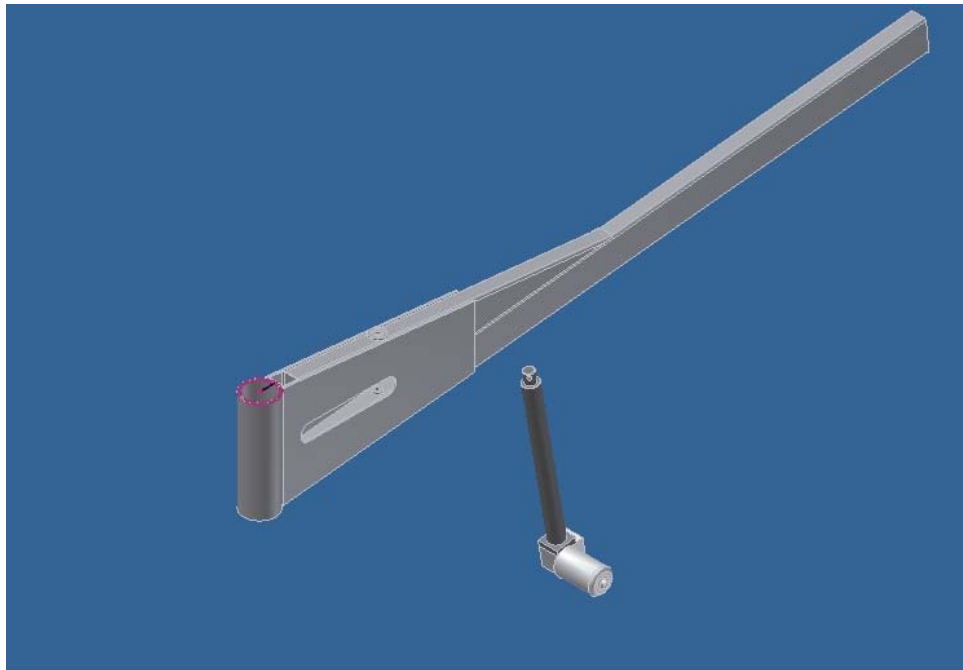
5. ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 5 Kw



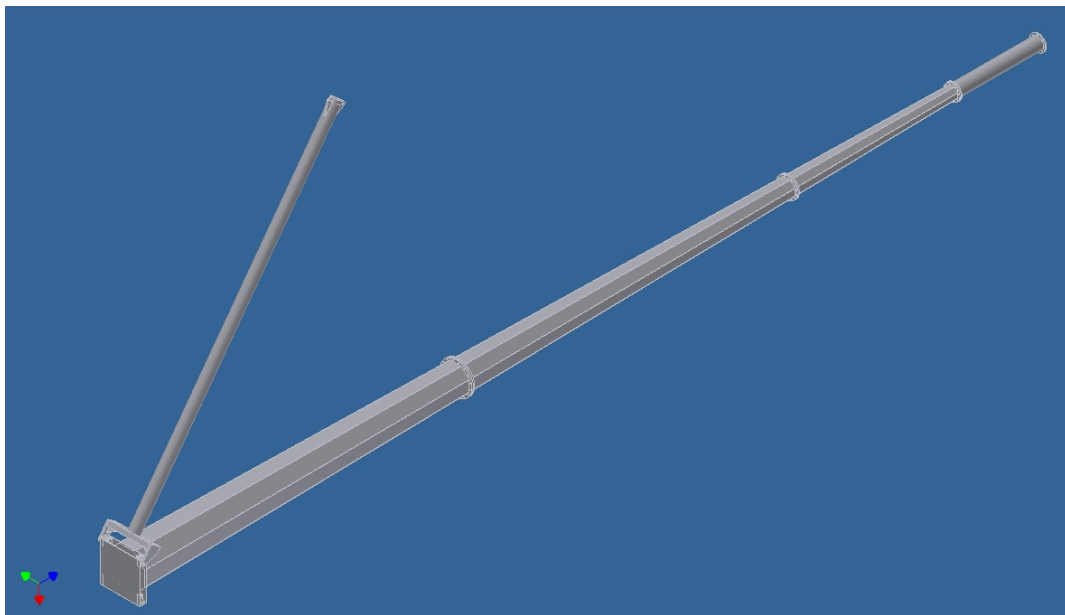
Εικόνα 5.1. α) νασέλα β) γεννήτρια γ) πλώμνη



Εικόνα 5.2. Γεννήτρια



Εικόνα 5.3. α)ουρά β)έμβολο



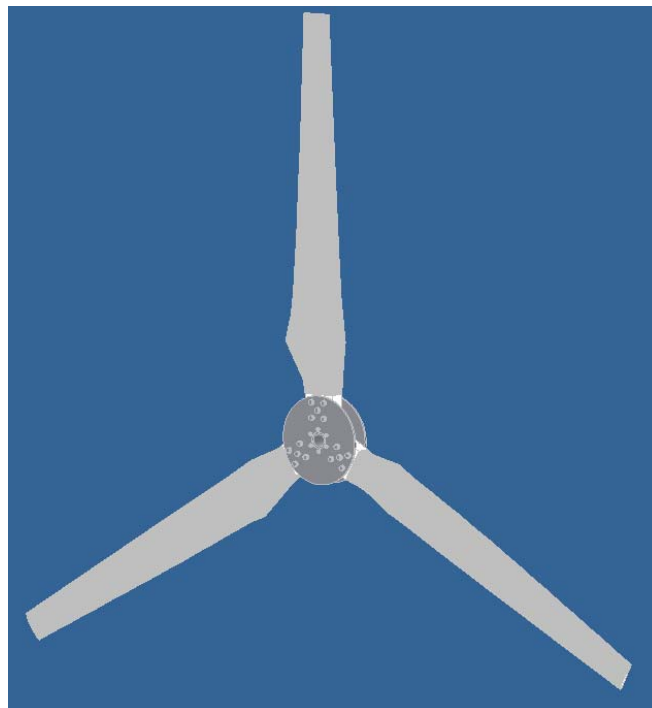
Εικόνα 5.4. α)βάση β)πυλώνας



6. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΤΕΡΟΥ

Ο στατικός έλεγχος του φτερού για την A/Γ των 5 kW πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το **“Technical Regulations for Type Certification of Small Wind Turbines”** που έχει συνταχθεί από το RISØ Nat. Lab. of DK, Wind Energy & Atmospheric Physics Department και το Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας του ΤΕΙ Κρήτης. Όλες οι μετρήσεις διεξήχθησαν από εξουσιοδοτημένο γι’ αυτές τις μετρήσεις προσωπικό ΤΕΙ και παρουσιάζονται στη παρούσα αναφορά.

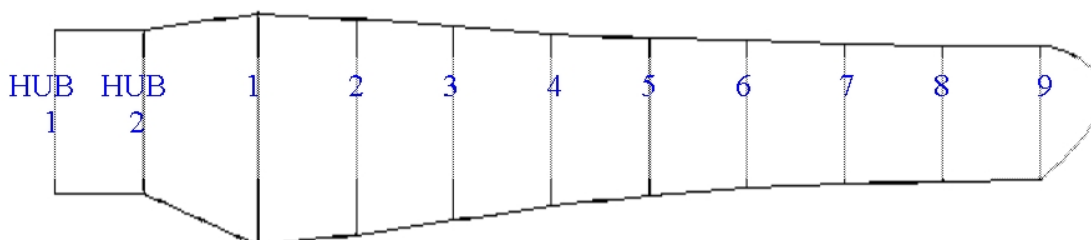
Το πτερύγιο το οποίο υποβλήθηκε σε δοκιμή χρησιμοποιείται στον ρότορα τρίπτερης Ανεμογεννήτριας (A/Γ) ονομαστικής ισχύος 5 kW. Το κάθε πτερύγιο συνδέεται με την πλήμνη της A/Γ με κατάλληλες κοχλιοσυνδέσεις όπως φαίνεται στην εικόνα 6.1. Ο σκοπός της δοκιμής είναι να ελεγχθεί η μηχανική συμπεριφορά στα επιβαλλόμενα φορτία που εμφανίζονται κατά την διάρκεια λειτουργίας της A/Γ και καταπονούν τα φτερά. Το υλικό κατασκευής είναι πολυεστέρας ενισχυμένο με ίνες γυαλιού και είναι κατασκευασμένο με την μορφή κελύφους.





Εικόνα 6.1. Πλήμνη A/Γ 5 kW

Το κάθε ένα από τα πτερύγια έχει βάρος 14 Kgr και η γεωμετρία μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μήκος. Η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά μήκη του πτερυγίου φαίνονται στον πίνακα 6.1.

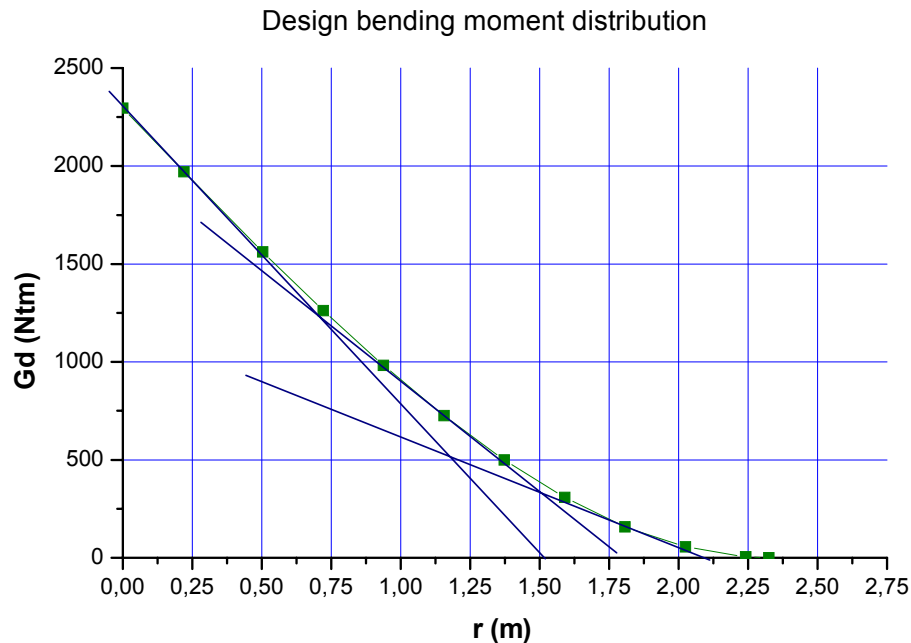


Νούμερο αεροτομής	Hub 1	Hub 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ακτίνα (mm)	0	434	651	868	1086	1303	1520	1737	1955	2172	0
Χορδή (mm)	160	160	284	266	248	230	213	195	177	159	160
Πάχος διατομής (mm)	80	80	49,2	46	41	37	33	29	25	20	80
Σχετικό πάχος διατομής (%)	-	-	17,5	17	16,5	16	15,5	15	14	12,6	-
Γωνία σφήνωσης (deg)	0	0	11,17	7,28	4,95	3,53	2,68	2,21	1,99	1,96	0

Πίνακας 6.1. Γεωμετρία φτερού

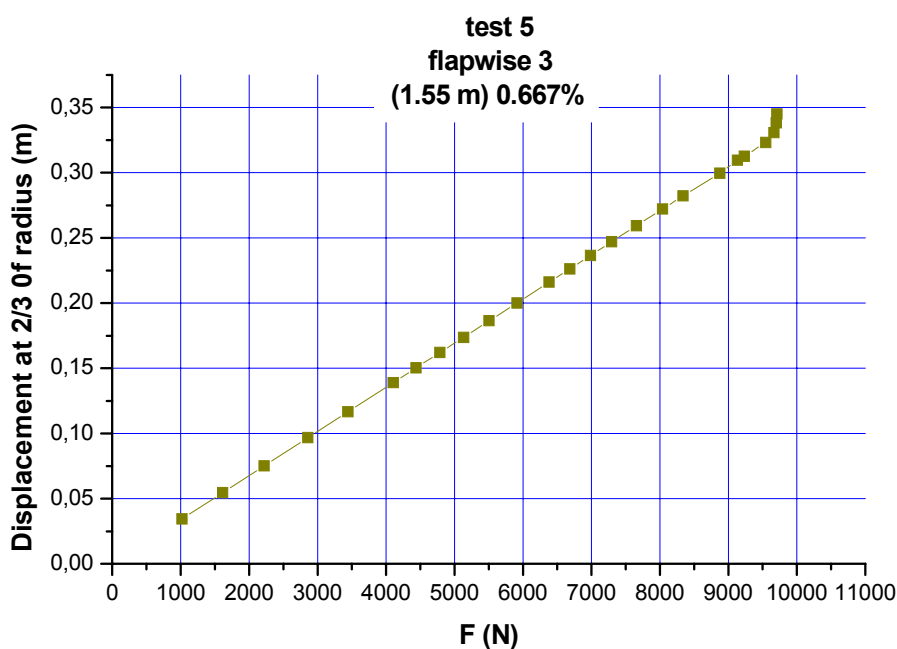
7. ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ

Κατά την δοκιμή του πτερυγίου, αρχικά εφαρμόστηκε φορτίο (G_d) στο μέσο της πτέρυγας (0,5R) στη διεύθυνση της χορδής. Η καμπύλη φόρτισης (γράφημα 7.1.) προσομοιώθηκε με απλές φορτίσεις στις θέσεις 0,66R , 0,77R και 0,91R (γράφημα 7.1).



Γράφημα 7.1. Γραμμές φόρτισης για την προσομοίωση της καμπτικής ροπής.

Μετά από την παραπάνω διεργασία επιβλήθηκε φορτίο σε απόσταση $0,66R$ στη διεύθυνση κάθετα στη χορδή μέχρι την τιμή στην οποία επήλθε η αστοχία του υλικού. Η τιμή του μέγιστου φορτίου για την οποία επήλθε η αστοχία είναι $9711,9 \text{ Nt}$. Η μετατόπιση του σημείου επιβολής της δύναμης μέχρι την μέγιστη τιμή της φαίνεται στα γράφημα 7.2.



Γράφημα 7.2. Δύναμη – Παραμόρφωση



8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ & ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την καμπτική ροπή (Mbx) στην διεύθυνση κάθετη στην χορδή. Η τιμή της καμπτικής ροπής χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κάθε περίπτωσης φόρτισης (βλέπε παράρτημα Α - “Technical Regulations for Type Certification of Small Wind Turbines”)

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ			
A	B₁	B₂	E₁
Mbx	Mbx	Mbx	Mbx
Ntm	Ntm	Ntm	Ntm
1495,28	493,80	1766,35	877,86
Συντελεστής ασφάλειας για τα φορτία			
γ_1	γ_1	γ_1	γ_1
1,0	1,3	1,3	1,3
Τιμές φορτίου			
G_d	G_d	G_d	G_d
Ntm	Ntm	Ntm	Ntm
1495,28	641,94	2296,25	1141,22
Αναπτυσσόμενη τάση στο υλικό			
R_d	R_d	R_d	R_d
MPa	MPa	MPa	MPa
85,29	49,32	49,32	49,32

Η μέγιστη τιμή φορτίου εμφανίζεται στην περίπτωση B2 για ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του συστήματος προσάνεμησης και μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της φτερωτής.



9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ

Τα κριτήρια αντοχής σύμφωνα με το “*Technical Regulations for Type Certification of Small Wind Turbines*” είναι:

$$L_{\text{test static}} < L_{\text{fail}}$$

και

$$L_{\text{fat}} < L_{\text{fail}} / n_{\text{cfat}}$$

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που πάρθηκαν στη δοκιμή αυτή, οι τιμές των μεγεθών των ανωτέρω κριτηρίων:

$$L_{\text{test static}} = 1481,45 \text{ Nt (προερχόμενη από την περίπτωση φόρτισης B2)}$$

$$L_{\text{fail}} = 9711,9 \text{ Nt}$$

$$L_{\text{fat}} = 964,7 \text{ Nt (προερχόμενη από την περίπτωση φόρτισης A)}$$

$$n_{\text{cfat}} = 10.$$

όπου

- $L_{\text{test,static}}$: το φορτίο συμπεριλαμβανομένου του συντελεστή ασφαλείας ,
- L_{fat} : Το εύρος των κοποτικών φορτίων
- L_{fail} : το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο .

Ο παράγοντας n_{cfat} είναι 10 για 10^8 κύκλους φόρτισης

Σύμφωνα με τις τιμές των ανωτέρω μεγεθών τα κριτήρια του κανονισμού που εφαρμόζεται εδώ ικανοποιούνται καθώς:

$$1481,45 \text{ Nt} < 9711,9 \text{ Nt}$$

και

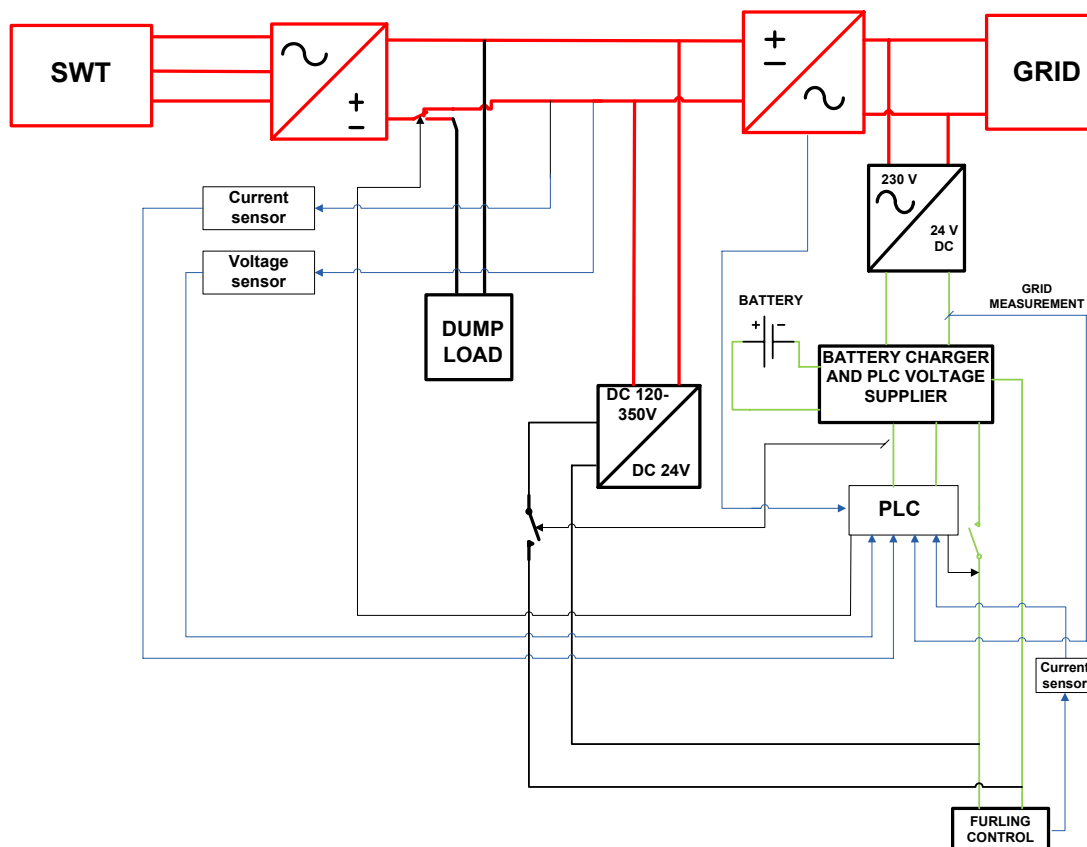
$$964,7 \text{ Nt} < 971,19 \text{ Nt.}$$



10. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

10.1. Σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας

Το σύστημα ελέγχου που φαίνεται στο σχήμα 10.1 διασφαλίζει την ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Σκοπός του έλεγχου είναι έλεγχος της παραγόμενης ισχύς της γεννήτριας ρυθμίζοντας την θέση ρότορα σε σχέση με την κατεύθυνση του αέρα, έτσι ώστε σε κάθε χρονική στιγμή το σύστημα να είναι αποδοτικό και ασφαλές.



Σχήμα 10.1. Διάγραμμα ελέγχου ανεμογεννήτριας.

Το σύστημα ελέγχου βασίζεται:

- Σε μετρητικές μονάδες (αισθητήρες, επιτηρητές τάσης κ.α.)
- Σε δύο ανεξάρτητα συστήματα ασφαλείας



Τα κύρια μέρη του συστήματος έλεγχου είναι:

1. Το σύστημα έλεγχου μέσω του PLC το οποίο είναι προγραμματισμένο και για τον έλεγχο και για της διάφορες διαδικασίες ασφαλείας
2. Ένα ανεξάρτητο κύκλωμα από το PLC το οποίο μπαίνει σε λειτουργία σε περίπτωση που το PLC βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

10.2. Σκοπός του PLC

Το PLC εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας ελέγχοντας το μηχανισμό κίνησης της ουράς. Το PLC έχει δύο καταστάσεις λειτουργίας:

1. Την κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας όπου η ουρά ανοιγοκλείνει σε συνάρτηση με την παραγόμενη ισχύ έτσι ώστε η ανεμογεννήτρια να βρίσκεται στην ασφαλή περιοχή λειτουργίας.
2. Την λειτουργία ασφαλείας όπου η ουρά κινείται κατά 90 μοίρες έτσι ώστε ο ρότορας της γεννήτριας να βρίσκεται παράλληλα στην διεύθυνση του αέρα.

Ο έλεγχος της ουράς της ανεμογεννήτριας γίνεται σε συνάρτηση με τις παρακάτω παραμέτρους:

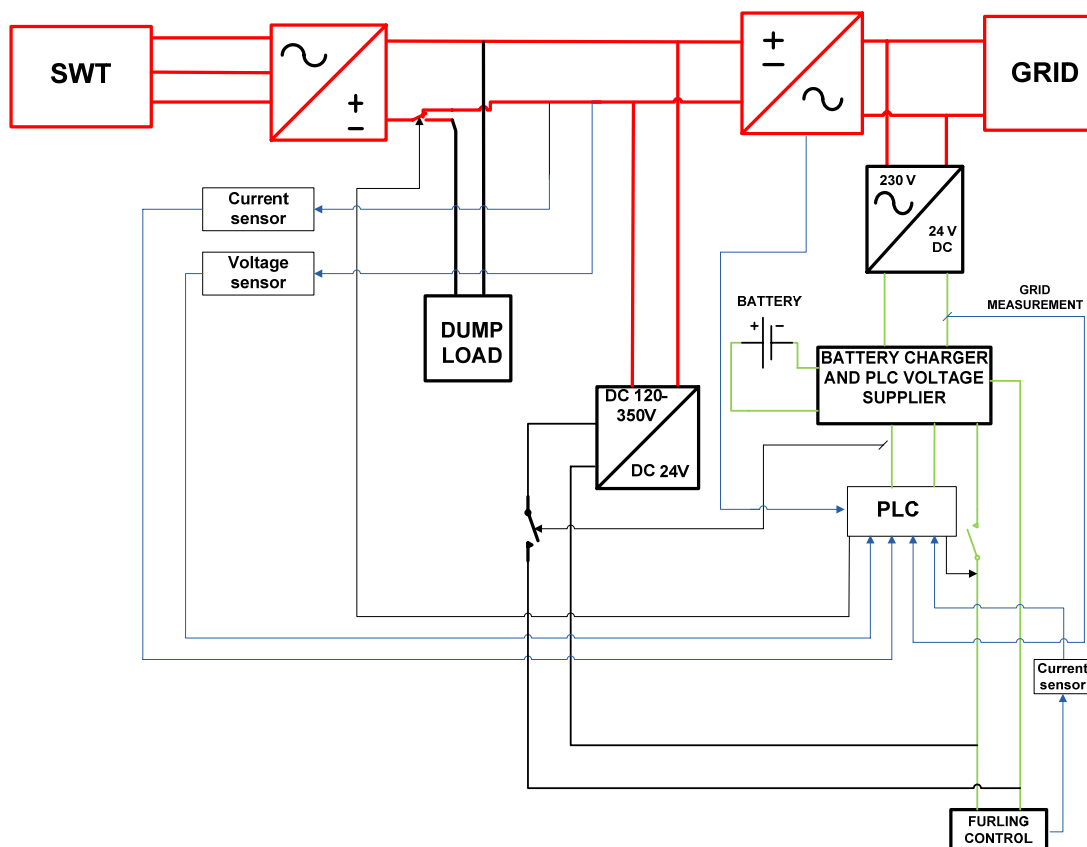
- Της τάσης και του ρεύματος που παράγει η γεννήτρια
- Του δικτύου ρεύματος
- Της ενεργοποίησης των φορτιών ασφαλείας
- Της μέτρησης του ρεύματος που κινητήρα που κινεί την ουρά

10.3. Κανονική λειτουργία

Στην κανονική λειτουργία όπως φαίνεται στο σχήμα 10.2 το PLC διαβάζει όλες τις παραμέτρους λειτουργίας και εφόσον δεν διαγνώσει κάποιο



σοβαρό πρόβλημα, ελέγχει την θέση της ουράς έτσι ώστε η παραγόμενη από την ανεμογεννήτρια ισχύς να είναι μικρότερη των 5.4 KW. Εάν η παραγόμενη ισχύς είναι παραπάνω από 5.4 KW τότε η ουρά αρχίζει να στρέφεται βγάζοντας τον ρότορα εκτός της διεύθυνσης του αέρα μέχρι η παραγόμενη ισχύ να περιοριστεί κάτω από τα 5.4 KW.



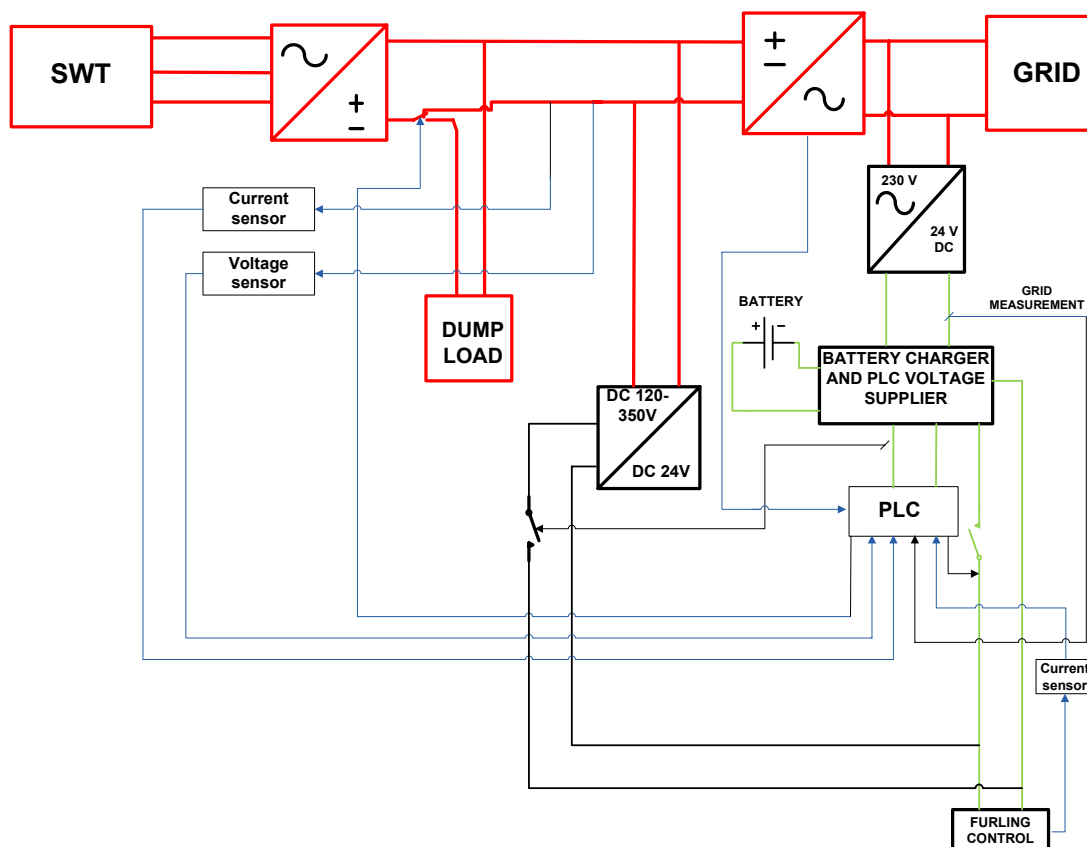
Σχήμα 10.2. Κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας

10.4. Παραπάνω παραγόμενη Ισχύς

Όπως αναφέρθηκε η ουρά της ανεμογεννήτριας μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε η γεννήτρια να λειτουργεί με αποδοτικότητα και ασφάλεια συνεχώς. Η ισχύς της γεννήτριας υπολογίζεται από τις τιμές της τάσης και του ρεύματος που μετρώνται συνεχώς από το PLC. Εάν η παραγόμενη ισχύς ξεπεράσει τα 5.4 KW, σχήμα 10.3, τότε η ουρά αρχίζει να κλείνει μέχρι να ισχύς να φτάσει τα 5.4 KW. Εάν μια ριπή ανέμου λάβει χώρα ή η ισχύς δεν πέφτει κάτω από τα 5.4 KW τότε τα φορτία ασφαλείας (3 KW) συνδέονται στην γεννήτρια. Εάν



η ισχύς πέσει κάτω από τα 5 KW τότε τα φορτία ασφαλείας αποσυνδέονται και η γεννήτρια συνεχίζει την κανονική της λειτουργία. Εάν όμως η ισχύς συνεχίζει να βρίσκεται πάνω από τα 5.4 KW τότε η ουρά κλείνει κατά 90 μοίρες βγάζοντας το ρότορα εκτός διεύθυνσης αέρα. Στην συνέχεια μετά από 3 λεπτά η ουρά αρχίζει να ανοίγει και η γεννήτρια να λειτουργεί.



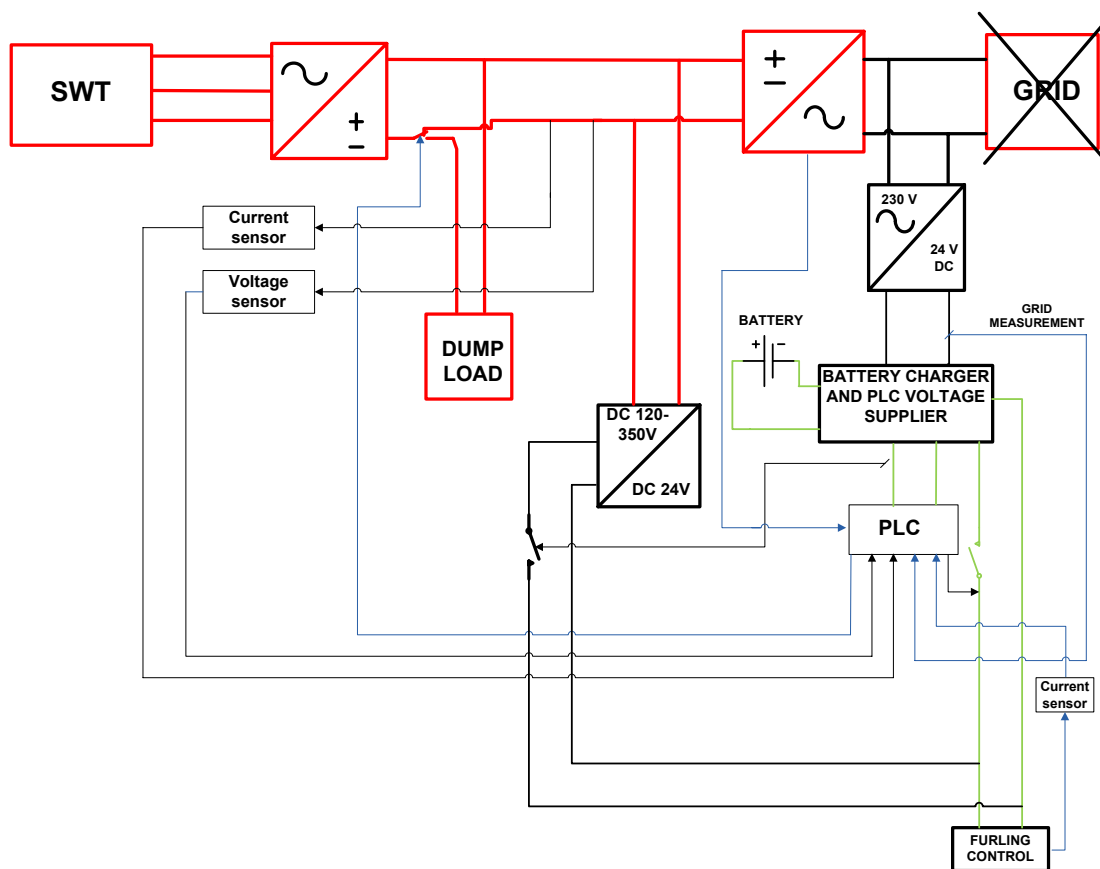
Σχήμα 10.3. Παραπάνω παραγόμενη ισχύς.

10.5. Διακοπή δικτύου

Στην περίπτωση διακοπής δικτύου σχήμα 10.4 ο μετατροπέας DC/AC απομονώνει την ανεμογεννήτρια από το δίκτυο, το PLC αντιλαμβάνεται την διακοπή του δικτύου μέσω ενός ρελέ, και συνδέει τα φορτία ασφαλείας στην ανεμογεννήτρια (12 KW) για να προστατευθεί το σύστημα από τυχόν ανεξέλεγκτη επιτάχυνση της ανεμογεννήτριας και δίνει εντολή στην ουρά να κλείσει στις 90 μοίρες. Ο κινητήρας του εμβόλου τροφοδοτείται επίσης από την μπαταρία.



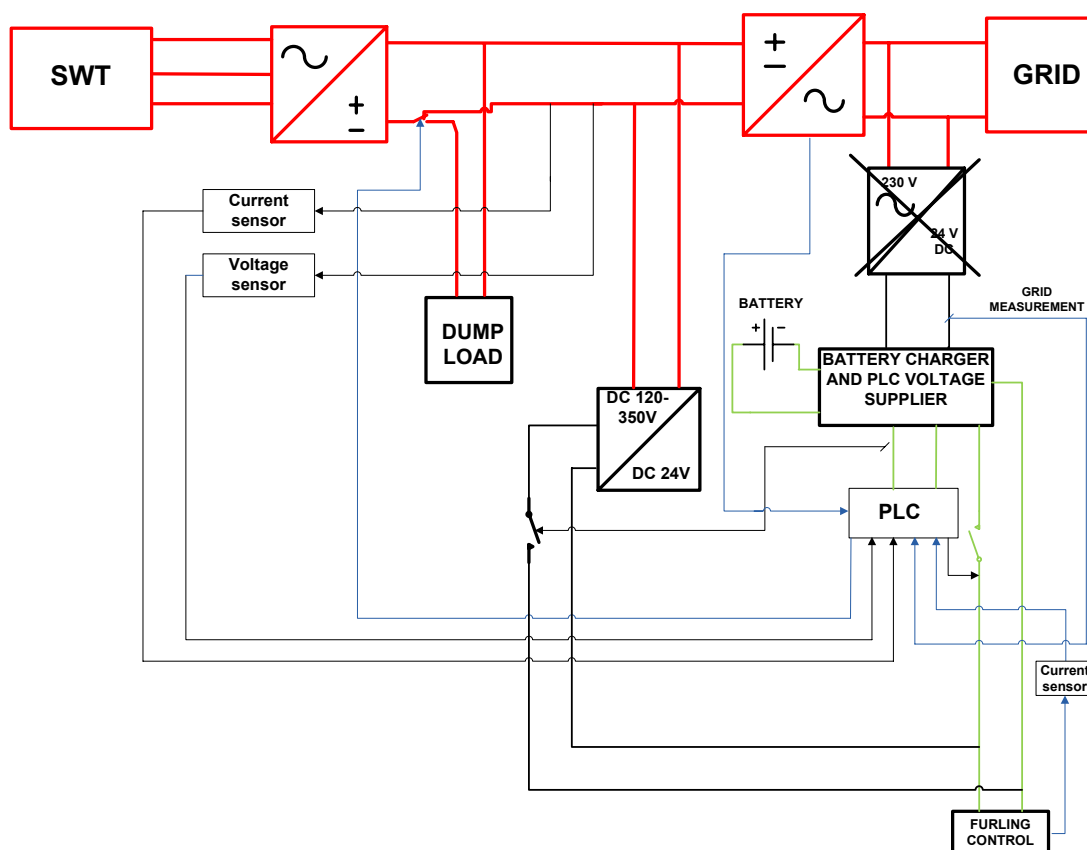
Εάν το δίκτυο επανέλθει τότε το φορτίο ασφαλείας αποσυνδέεται και η ουρά ανοίγει.



Σχήμα 10.4. Διακοπή δικτύου.

10.6. Δυσλειτουργία τροφοδοτικού του φορτιστή μπαταρίας

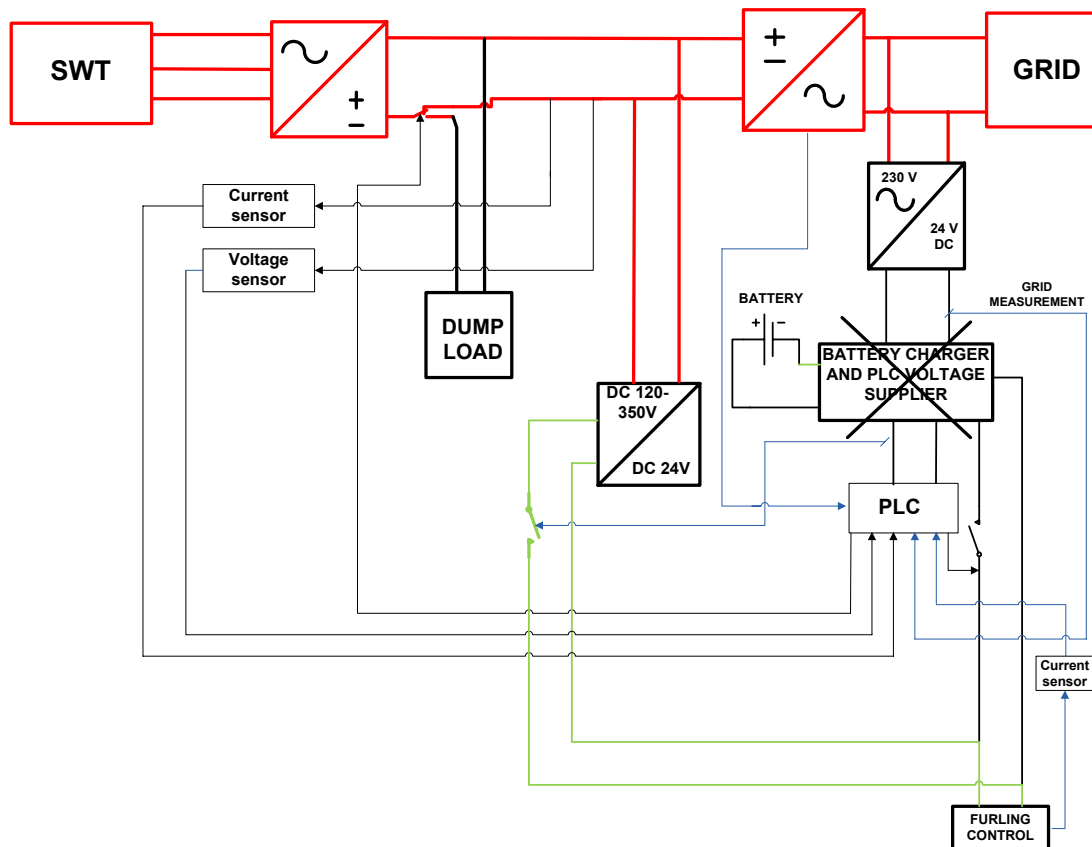
Στην περίπτωση που το τροφοδοτικό που τροφοδοτεί την συσκευή που φορτίζει την μπαταρία και κατά επέκταση το PLC και το έμβολο βγει εκτός λειτουργίας, σχήμα 10.5, τότε το PLC και ο κινητήρας του εμβόλου παίρνουν ρεύμα από την μπαταρία και το PLC δίνει εντολή στο έμβολο να κλείσει στις 90 μοίρες και να βγάλει τον ροτορα εκτός διεύθυνσης του αέρα και παράλληλα συνδέονται τα φορτία ασφαλείας. Για να ξεκινήσει η γεννήτρια χρειάζεται αντικατάσταση ή επισκευή του τροφοδοτικού.



Σχήμα 10.5. Δυσλειτουργία τροφοδοτικού φορτιστή μπαταρίας και PLC.

10.7. Έλλειψη τροφοδοσίας PLC.

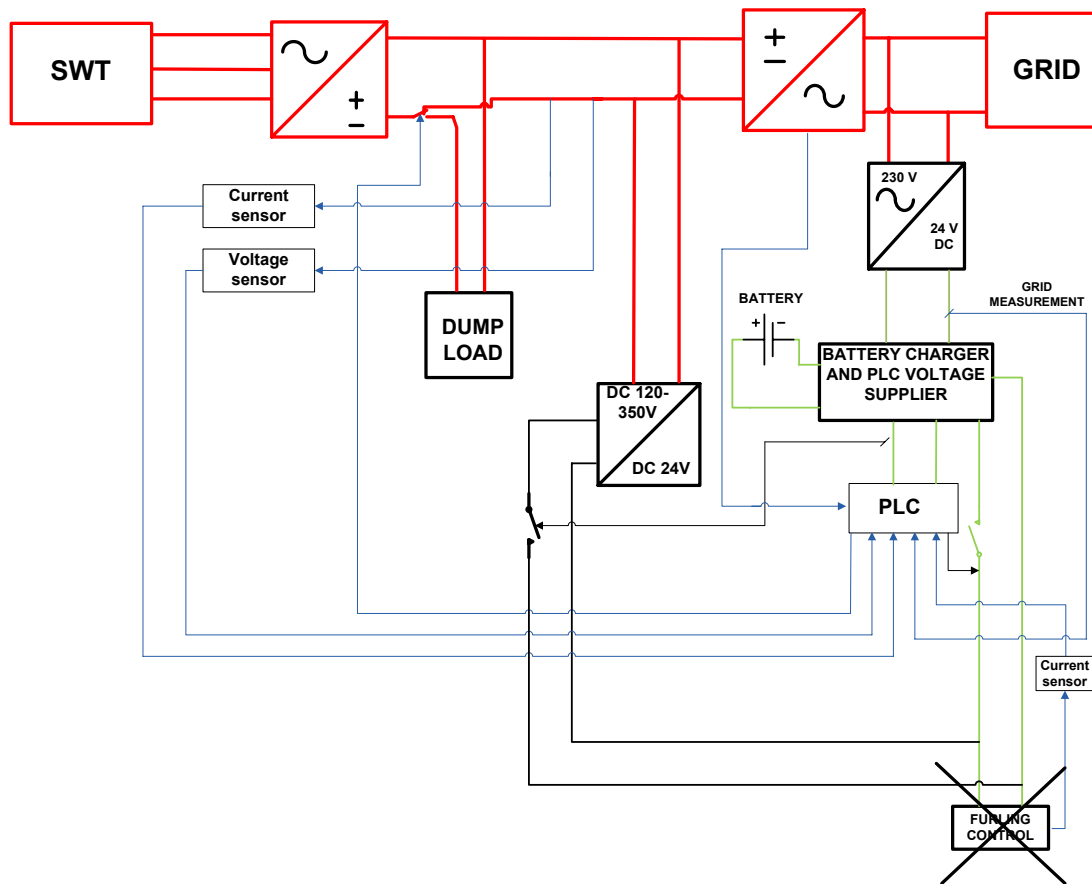
Στην περίπτωση που το PLC δεν έχει τροφοδοσία, συνεπάγεται ότι το κύκλωμα που φορτίζει την μπαταρία και τροφοδοτεί το PLC και το έμβολο είναι εκτός λειτουργίας τότε ενεργοποιείται το ανεξάρτητο κύκλωμα, σχήμα 9.6, μέσω ενός ρελέ και εφόσον η ανεμογεννήτρια γυρίζει τότε ο κινητήρας του εμβόλου τροφοδοτείται και η ουρά κλείνει στην θέση των 90 μοιρών. Για να ξεκινήσει η γεννήτρια χρειάζεται αντικατάσταση ή επισκευή του εξαρτήματος.



Σχήμα 10.6. Έλλειψη τροφοδοσίας PLC.

10.8. Δυσλειτουργία του εμβόλου

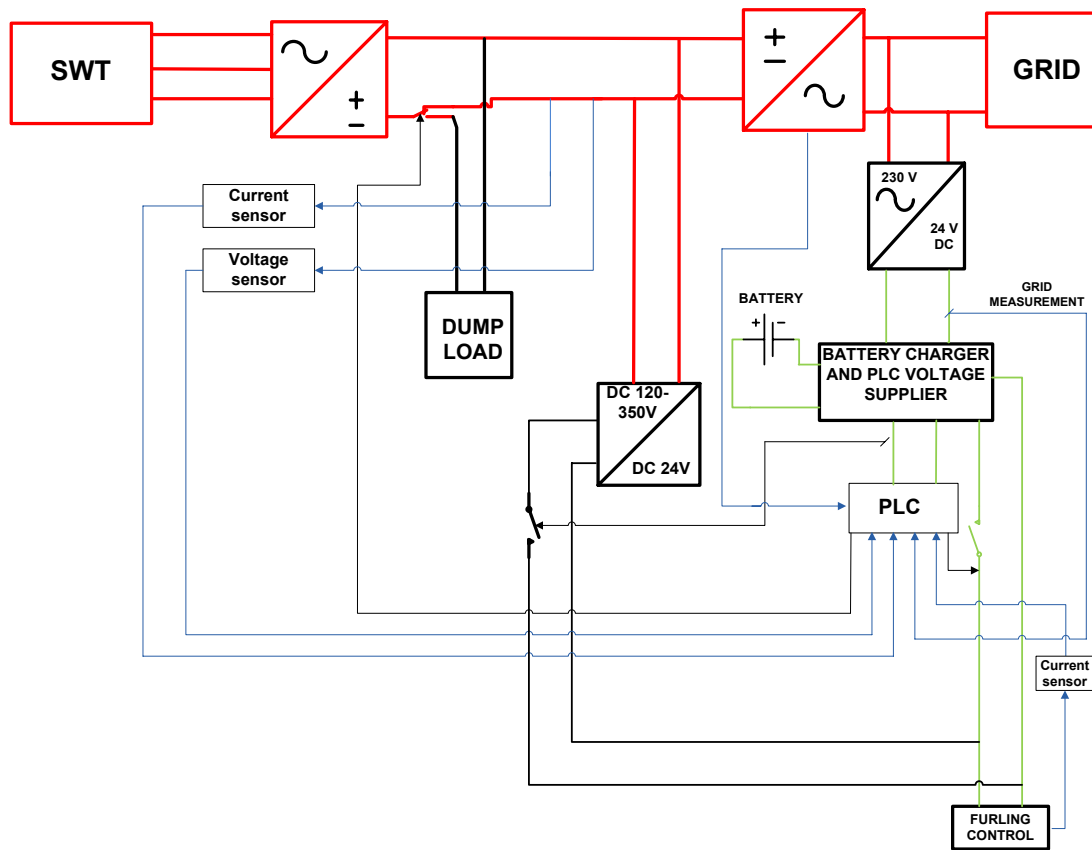
Στην περίπτωση που το έμβολο που κινεί την ουρά δεν ανταποκρίνεται στις εντολές του PLC τότε συνδέονται τα φορτία ασφαλείας (12 KW) με αποτέλεσμα να φρενάρουν την ανεμογεννήτρια όπως φαίνεται στο σχήμα 10.7.



Σχήμα 10.7. Δυσλειτουργία του εμβόλου της ουράς.

10.9. Προβλήματα στην συχνότητα του ρεύματος δικτύου.

Σε περίπτωση που η συχνότητα του δικτύου είναι προβληματική ο DC/AC μετατροπέας βγάζει εκτός δικτύου την ανεμογεννήτρια και ταυτόχρονα στέλνει σήμα στο PLC. Ταυτόχρονα το PLC βλέπει ότι το δίκτυο έχει τάση ενώ ταυτόχρονα ότι το ρεύμα της γεννήτριας είναι μηδέν οπότε δίνει εντολή στην ουρά να κλείσει και να έρθει στην θέση των 90 μοιρών. Μετά από λίγο η ουρά ανοίγει και η γεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί.



Σχήμα 10.8. Προβλήματα στην συχνότητα του ρεύματος δικτύου.

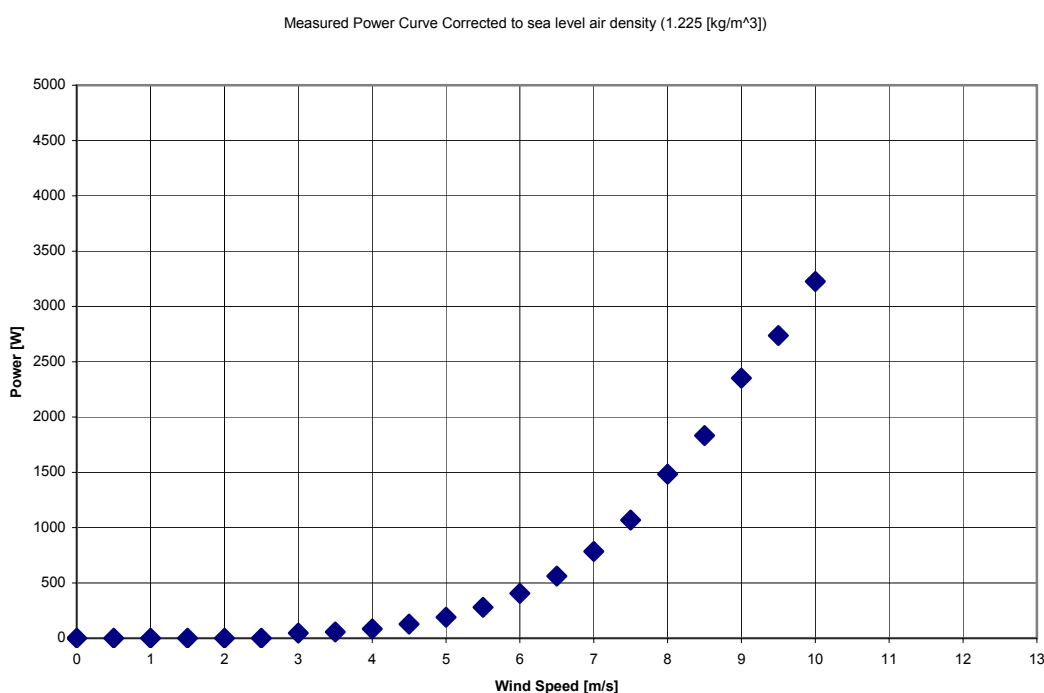


11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το βιομηχανικό μοντέλο της Μικρής Ανεμογεννήτριας (Α/Γ) που κατασκευάσαμε αποτελεί ένα πειραματικό μοντέλο όπου μπορεί να αποτελέσει τον πρόδρομο ενός νέου πιο βελτιωμένου μοντέλου Α/Γ διασυνδεδεμένης με το δίκτυο χαμηλής τάσης της Δ.Ε.Η.

Η Α/Γ των 5 KW είναι τοποθετημένη στον προαύλιο χώρο του Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας. Η «συμπεριφορά» της καταγράφεται από αισθητήρια για την συλλογή τιμών που αφορούν την ένταση του ανέμου και την ταχύτητα περιστροφής την Α/Γ. Με την βοήθεια ενός προγράμματος το οποίο έχει προγραμματιστεί στο Labview όλα αυτά τα δεδομένα που συλλέγονται τα επεξεργάζεται μια εξειδικευμένη ομάδα προσωπικού από το εργαστήριο.

Σαν αποτέλεσμα της επεξεργασίας αυτής είναι το ακόλουθο γράφημα, όπου φαίνεται η Καμπύλη Ισχύος της Α/Γ.



Γράφημα 11.1. Power Curve Α/Γ 5 KW

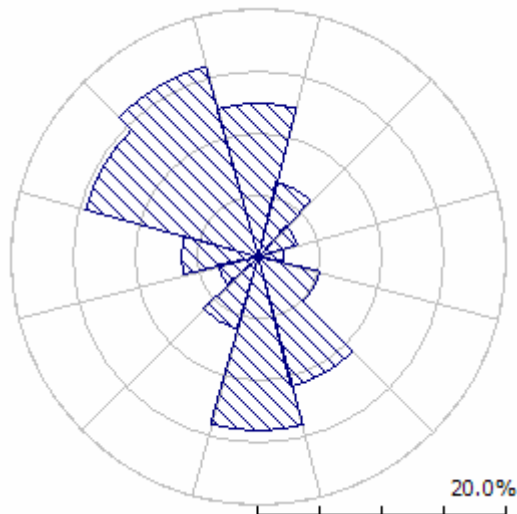


Σαν μία περαιτέρω διαδικασία είναι η ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων στο πρόγραμμα Wasp. Το πρόγραμμα αυτό μας δείχνει την κατεύθυνση που έχει ο άνεμος στην διάρκεια του έτους (διάγραμμα 11.1) καθώς και τη διανομή πυκνότητας πιθανότητας αυτής(διάγραμμα 11.2). Η διανομή Weibull περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για ύψος μέχρι 100 m από το έδαφος.

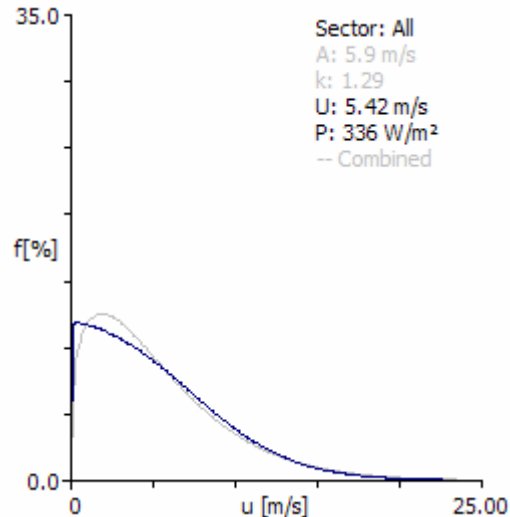
Για την δική μας A/Γ φαίνεται ότι η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου είναι στα 5,42 m/sec ενώ η ονομαστική ταχύτητα της A/Γ είναι στα 12,06 m/sec.

The predicted wind climate at the turbine site

-	Total	Wind with maximum power density
Mean wind speed	5.42 m/s	12.06 m/s
Mean power density	337 W/m ²	23 W/m ²



Διάγραμμα 11.1. Ροδόγραμμα



Διάγραμμα 11.2. Καμπύλη Weibull

Επίσης το Wasp μας δίνει και την ετήσια παραγωγή ενέργειας που είναι 7,399 MWh. Αν και η μέση ετήσια ταχύτητα όπως προαναφέραμε είναι κατά πολύ μικρότερη από την ονομαστική, δείχνει ότι A/Γ έχει πολύ καλό βαθμό απόδοσης και αν το αιολικό δυναμικό της περιοχής ήταν καλύτερο θα ήταν σαφώς πιά απόδοτική. Όπως φαίνεται και από την ακόλουθη εικόνα του



μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας του εργαστηρίου το οποίο «μετράει» από τις αρχές Ιουνίου μέχρι και σήμερα έχουν «παραχθεί» 109 kWh.



Εικόνα. 11.1 Μετρητής ΗΛ. Ενέργειας

Site	Location [m]	Turbine	Height [m]	Net AEP [MWh]	Wake loss [%]
ΑΙΟΛΙΚΟ ΕΡΓ.	(599970.7,3907909.0)	5kw wind turbine	12	7.399	0.0

Το πρότυπο αυτό μοντέλο κατασκευάστηκε και λειτουργεί σύμφωνα με τον κανονισμό που έχουμε προαναφέρει. Σίγουρα όμως μέχρι να πάρει την τελική του μορφή θα περάσουν ακόμα πολλές δοκιμές μέχρι το βιομηχανικό αυτό μοντέλο να μπει σε διαδικασία μαζικής παραγωγής.

Για τον λόγο αυτό αναφέρουμε μερικές προτάσεις για την βελτιστοποίηση του συστήματος που ίσως βοηθήσουν προς αυτή την κατεύθυνση :

✓ Σε περίπτωση όπου η ένταση του αέρα δεν επιτρέπει την λειτουργία την ανεμογεννήτριας θα μπορούσε να προσαρτηθεί πάνω σε αυτή ένα έμβολο διπλής ενέργειας όπου θα απορροφά την πλεονάζουσα ισχύ του ανέμου. Η κίνηση του έμβολου θα αυξομειώνει τη διάμετρο της πτερωτής από την αυξημένη πίεση του ανέμου, παροδική ή παραμένουσα.. Το αποτέλεσμα είναι ότι, όταν ο άνεμος δίνει μεγαλύτερη ισχύ από την ονομαστική της, η διάμετρος μειώνεται προοδευτικά ώστε να απορρίπτει τη πλεονάζουσα ισχύ του ανέμου, χωρίς να χρειάζεται ποτέ η ακινητοποίησή της.



-
- ✓ Ο προσανεμισμός της ανεμογεννήτριας έχει σχεδιαστεί να κατευθύνεται στον άνεμο μέσω της ουράς. Αυτή η μέθοδος είναι μεν οικονομική αλλά παρουσιάζει μεγάλες απώλειες ενέργειας καθώς με κάθε στιγμιαία πλάγια ριπή που δέχεται, εκτρέπεται από την κύρια διεύθυνση του ανέμου με αποτέλεσμα την μείωση των στροφών της γεννήτριας, πτώση της τάσης και της ισχύος. Σύμφωνα με αυτή την παράμετρο μέσω ενός ενεργού συστήματος οδήγησης που περιλαμβάνει μια μικρή πτερωτή που στρέφεται σε γωνία 90ο από τον άξονα του δρομέα και εμπλέκεται στον κατακόρυφο άξονα της μέσω πηνίου-κορώνας. Αυτή η μέθοδος ελεγχόμενης οδήγησης έχει ως αποτέλεσμα να “αγνοεί” τις στιγμιαίες πλάγιες ριπές και να παραμένει σταθερά πάνω στη κύρια διεύθυνση του ανέμου. Αυτό σημαίνει λιγότερη καταπόνηση, σταθερή τάση και ισχύ άρα περισσότερη ενέργεια.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



ANSYS Analysis

By T. Chortatsos & C. Condaxakis

June 1, 2007

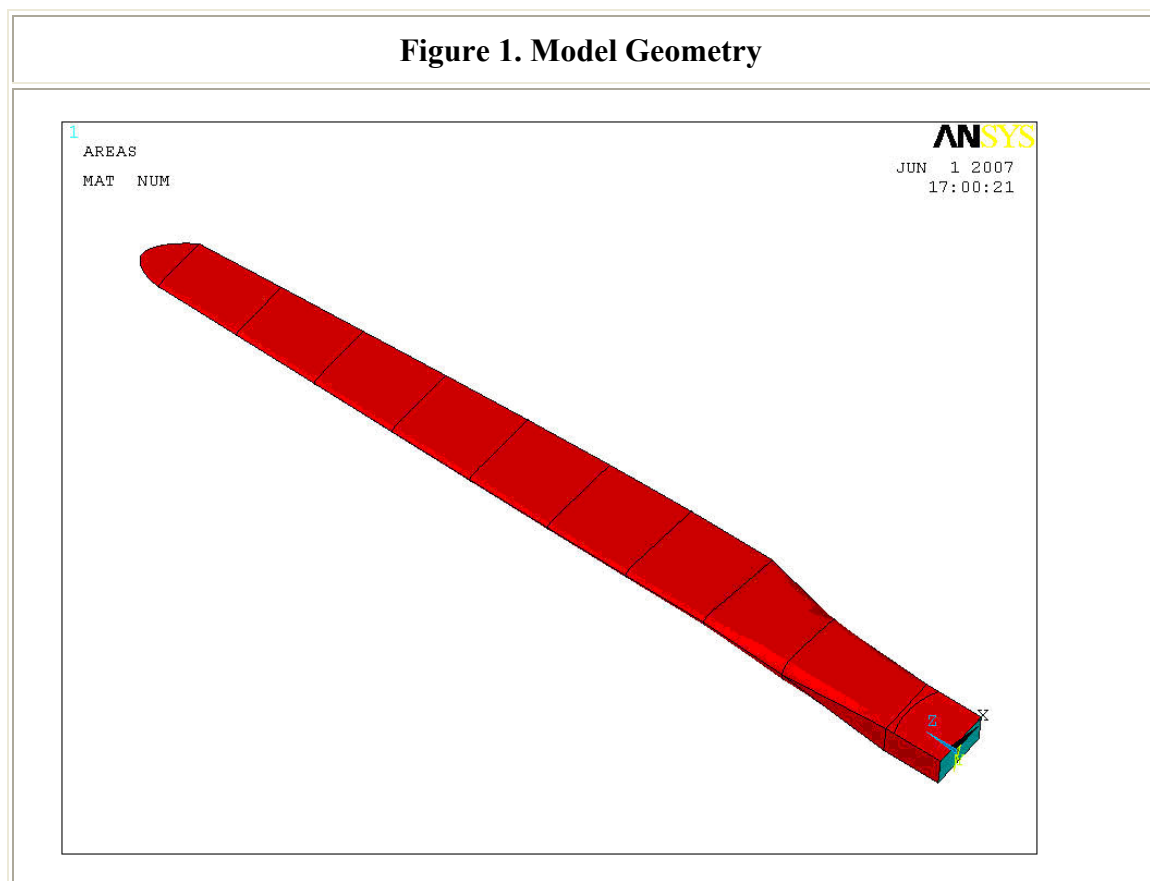
5KW Wind Turbine Blade Report

Static blade test simulation: blade loaded at 2/3 of the rotor radius.

Report Generated by ANSYS

[Summary](#) [Model Information](#) [Analysis Information](#) [Results Information](#)

Figure 1. Model Geometry





Summary

This report documents a linear static and modal analysis of the part *5kw_blade*. The analysis was performed using the ANSYS 11.0 CAE software.

To the part *5kw_blade* were assigned properties of the materials [polyester & polyurethane](#) and showed the following results:

Maximum total U_{SUM} displacement 0.831 m
Maximum equivalent stress 0.134E+09 Pa

The first five natural frequencies are 13.033 Hz, 39.068 Hz, 42.239 Hz, 93.595 Hz and 150.77 Hz.

For details about the analysis, see [Model Information](#), [Analysis Information](#), and [Results Information](#).

Model Information

The part *5kw_blade* weights 14 kg. [Figure 1](#) shows the model geometry and [Figure 6](#) shows the finite element mesh. [Table 2](#) lists the number of nodes and elements and [Table 3](#) lists the properties of the material (polyester & polyurethane) used in the model.

Figure 6. Finite Element Mesh

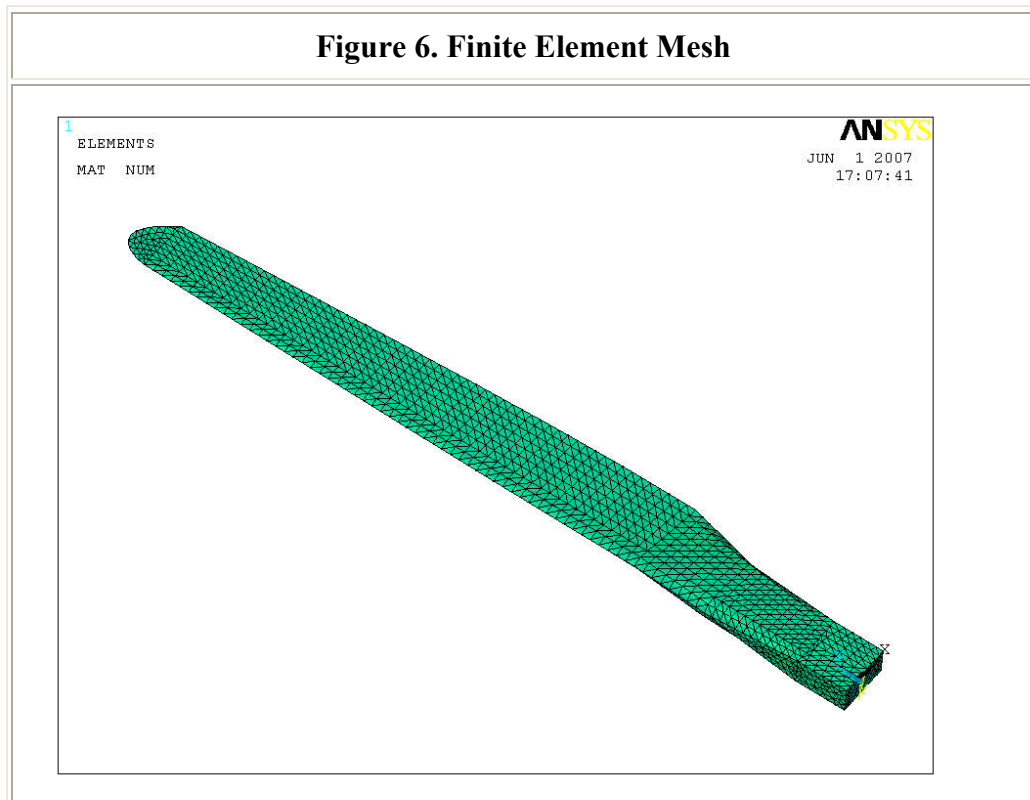




Table 2. Details of the Finite Element Model

Entity	Number Defined	Description
SOLID187	7997	3-D 10-Noded Structural Solid
Nodes	13149	8-Noded Structural Shell
SHELL93	8954	
Nodes	13149	

Table 3. Material Properties

Material Properties for Polyester	
Modulus of Elasticity [Pa]	10.6E+09
Density [kg/m³]	1410
Poisson's Ratio	0.17
Material Properties for Polyurethane	
Modulus of Elasticity [Pa]	0.31E+09
Density [kg/m³]	80
Poisson's Ratio	0.49



Analysis Information

The part *5kw_blade* was loaded at $2/3$ of the rotor radius with the ultimate load of 6768.9 N measured during a static blade test (see [Figure 3](#) and [Table 3](#)) and evaluated with a linear static analysis.

Figure 7. Loads and Boundary Conditions

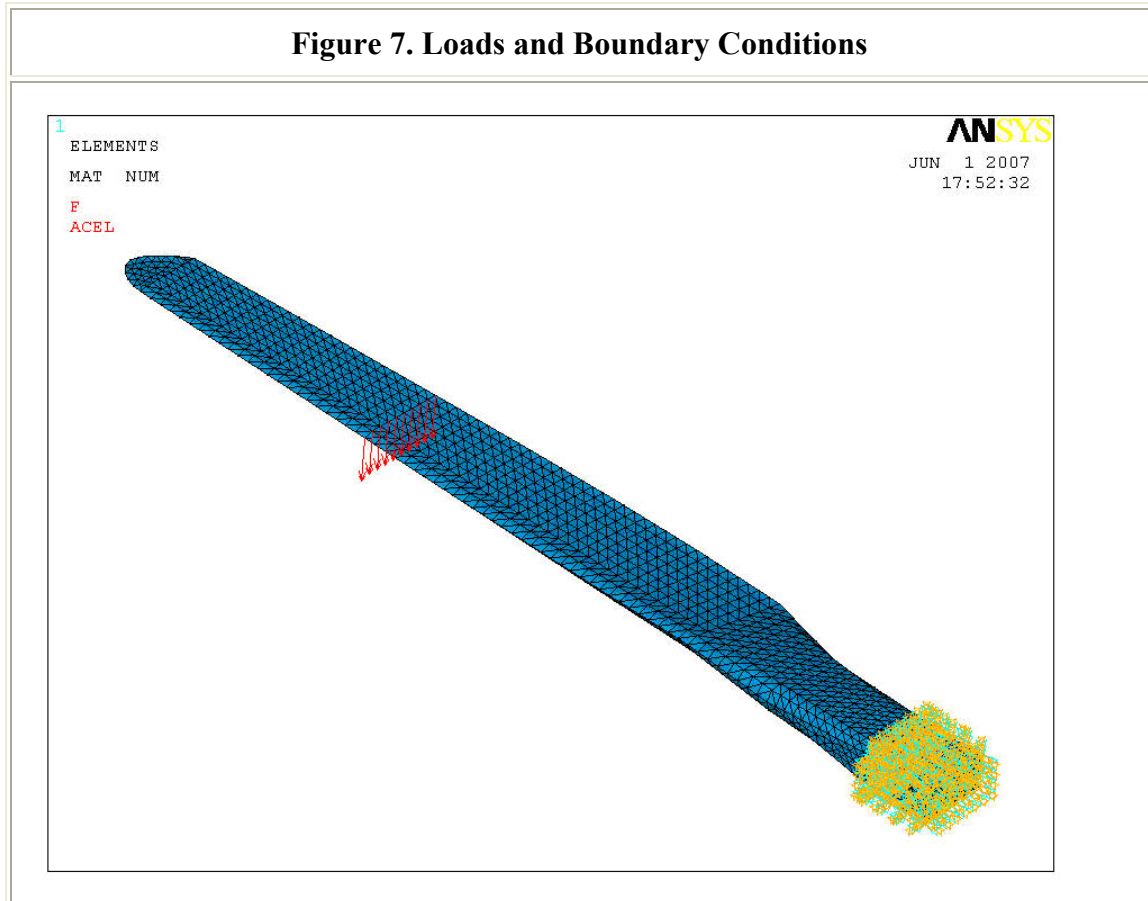




Table 4. Boundary Conditions

Constraints			
Type	Entity	Constraints	Value(s)
Constrained Translation	Area 34	ALL	0
Constrained Translation	Area 35	ALL	0
Constrained Translation	Area 39	ALL	0
Constrained Translation	Area 40	ALL	0
Loads			
Type	Entity	Direction	Value(s)
Force [N]	Node 1268	Y	892.72
Force [N]	Node 1283	Y	892.72
Force [N]	Node 1365	Y	892.72
Force [N]	Node 1387	Y	892.72
Force [N]	Node 1409	Y	892.72
Force [N]	Node 1431	Y	892.72
Force [N]	Node 1453	Y	892.72
Force [N]	Node 1475	Y	892.72
Force [N]	Node 1497	Y	892.72
Force [N]	Node 1519	Y	892.72
Gravity [m/s²]	Volume ALL	Y	-9.806



Results Information

The following figures and tables show the response of the part *5kw_blade* loaded at 2/3 of the rotor radius with the ultimate load of 8927.2 N measured during a static blade test. The maximum USUM displacement is 0.831 m and the maximum equivalent stress is 0.134+09 Pa. The stress and the strain distribution together with the blade mode shapes are presented in the following figures according to an ANSYS static and modal analysis.

Figure 8. Displaced Shape (USUM)

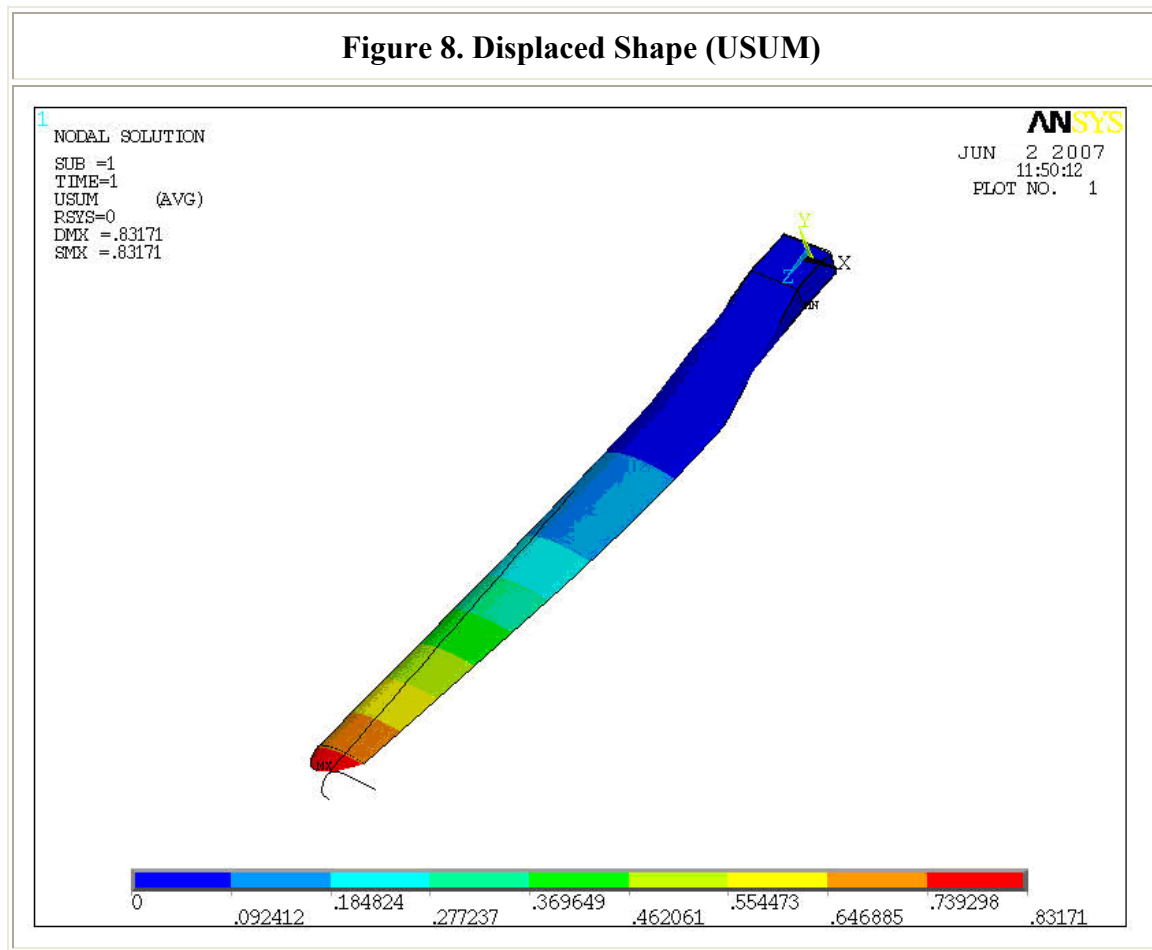




Figure 9. Equivalent Stress Contours

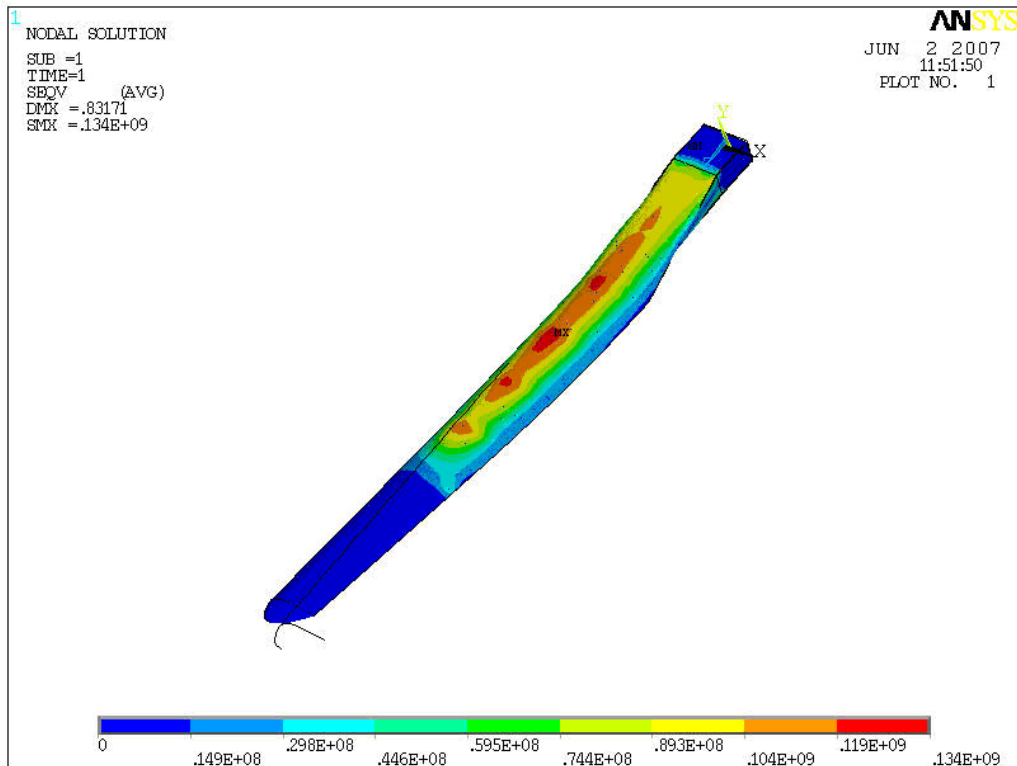


Figure 10. Equivalent Stress Contours

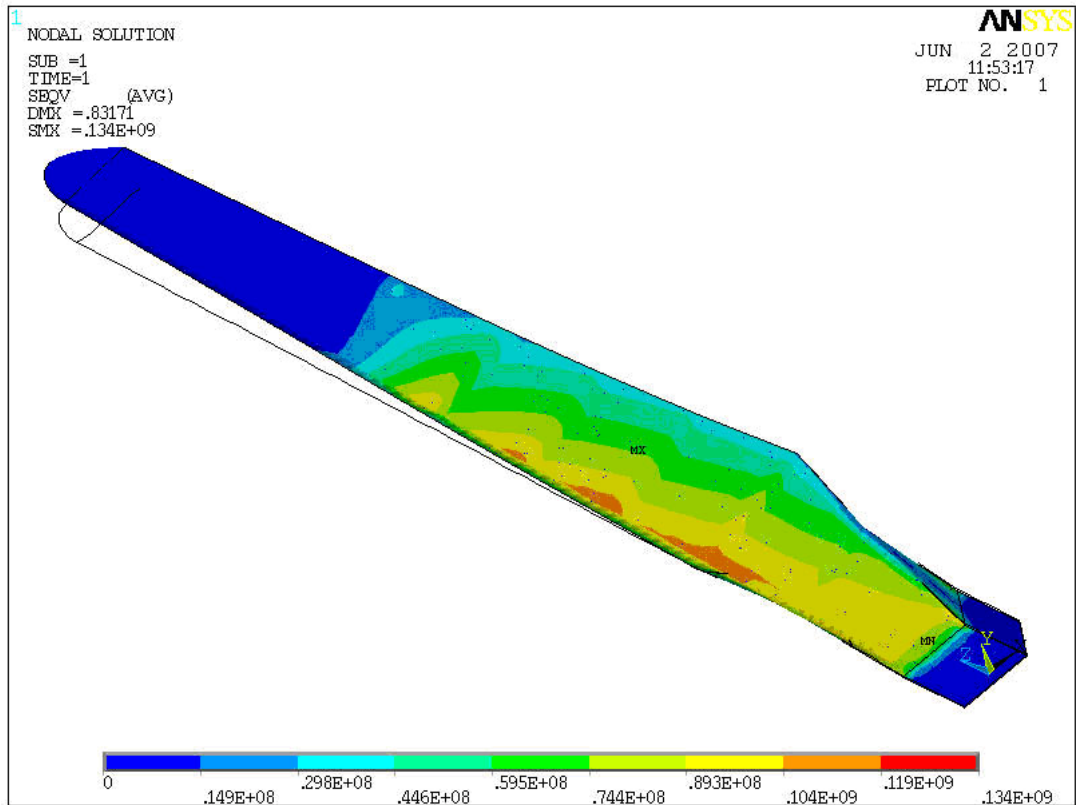




Figure 11. Direct Stresses (SZ)

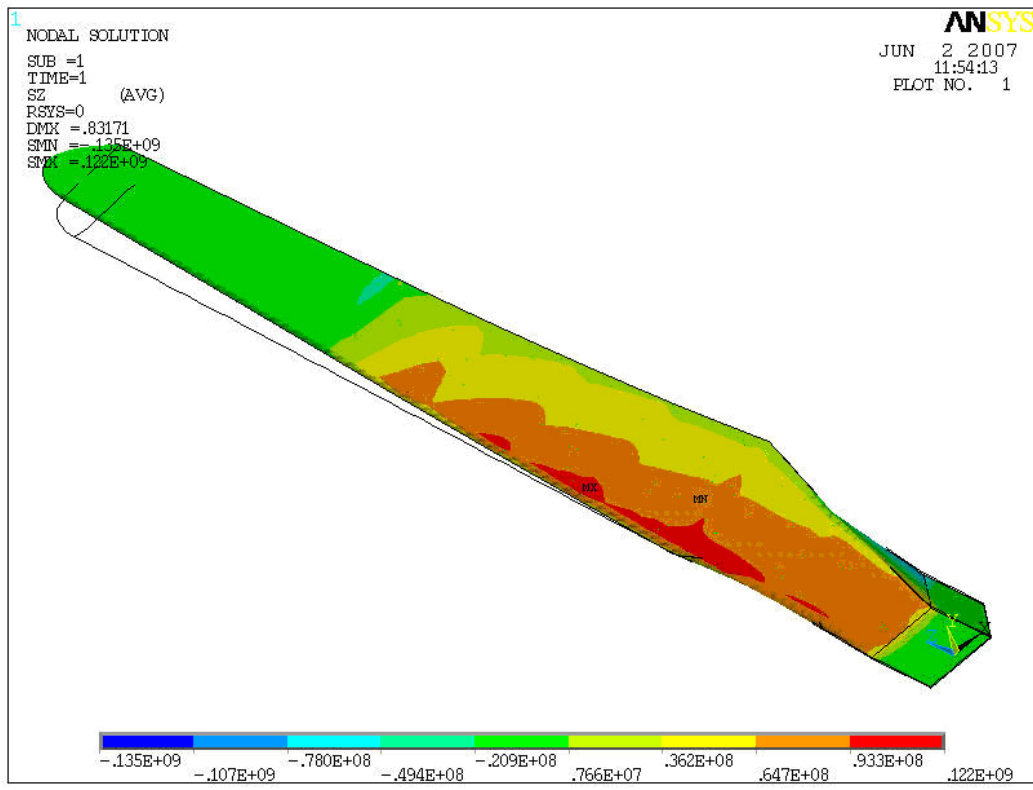
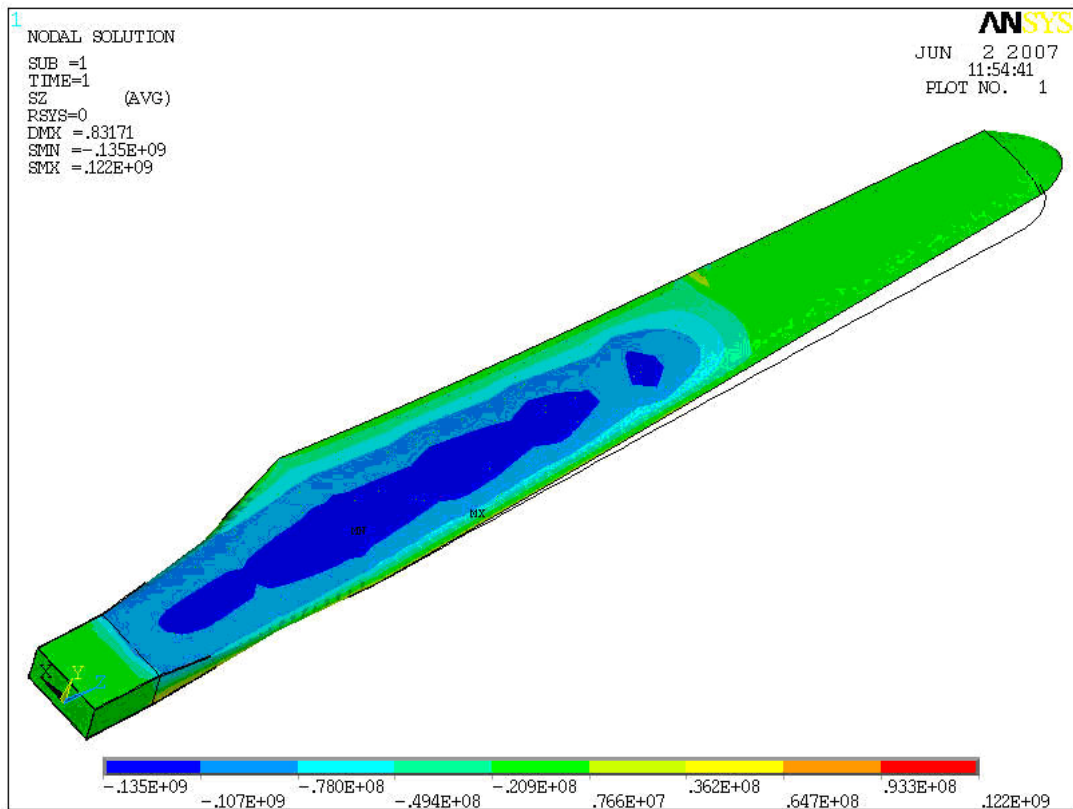


Figure 12. Direct Stresses (SZ)



**Table 5. Displacements**

Displacements [m]				
	X	Y	Z	Vector Sum
Maximum	.785E-1	.828	.0116	.831

Table 6. Direct Stresses

Direct Stresses [Pa]			
	X	Y	Z
Minimum	-0.540E+08	-0.544E+08	-0.135E+09
Maximum	0.550E+08	0.554E+08	0.122E+09

Table 7. Shear Stresses

Shear Stresses [Pa]			
	XY	YZ	XZ
Minimum	-0.800E+07	-0.220E+08	-0.399E+08
Maximum	0.922E+07	0.141E+08	0.396E+08

Table 8. Principal Stresses

Principal Stresses [Pa]			
	1st	2nd	3rd
Minimum	-0.538E+08	-0.544E+08	-0.135E+09
Maximum	0.122E+09	0.554E+08	0.548E+08



Table 9. Stress Intensity and Equivalent Stress

Stress Intensity and Equivalent Stress [Pa]		
	Stress Intensity	Equivalent Stress
Minimum	0	0
Maximum	0.135E+09	0.134E+09

The following figures and table show the vibration characteristics (natural frequencies and mode shapes) of the part *5kw_blade*. The first five natural frequencies are 13.033 Hz, 39.068 Hz, 42.239 Hz, 93.595 Hz and 150.77 Hz.

Figure 13. Mode Shape 1 (13.033 Hz)

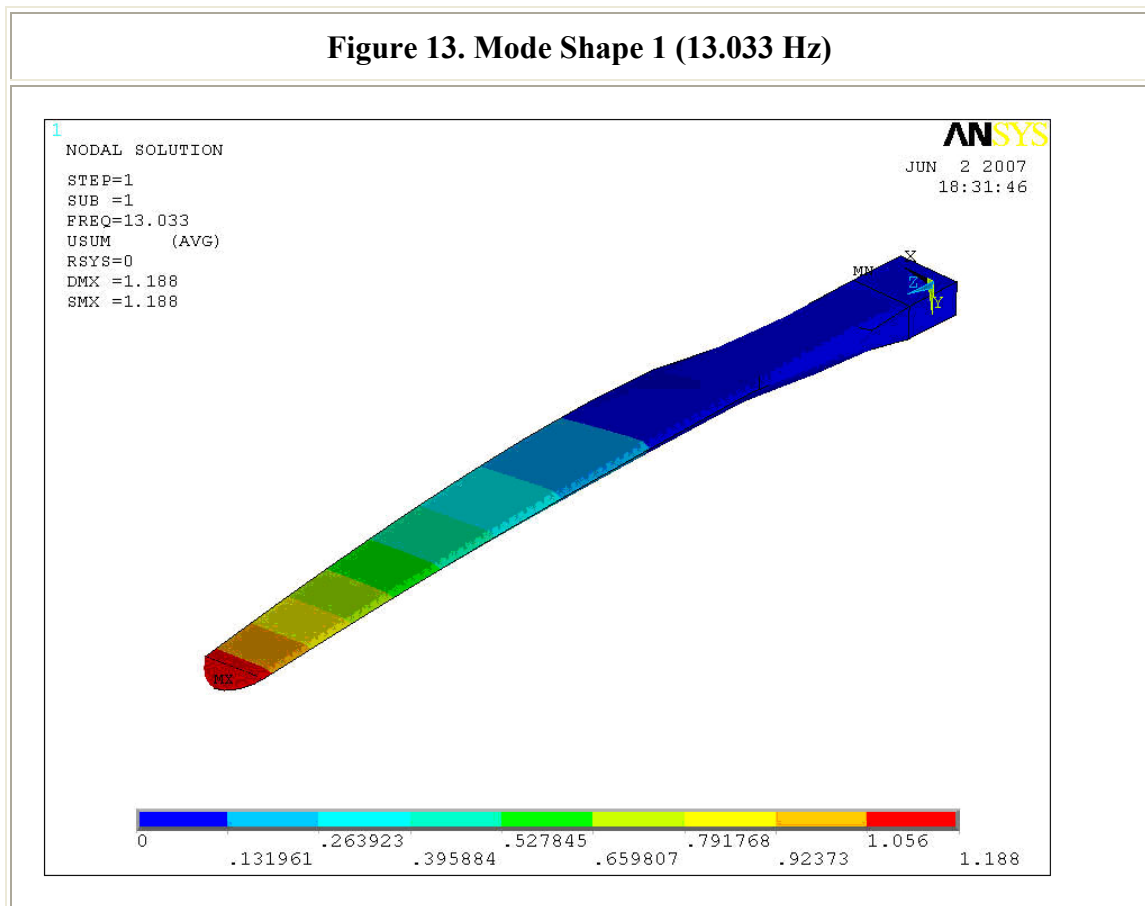




Figure 14. Mode Shape 2 (39.068 Hz)

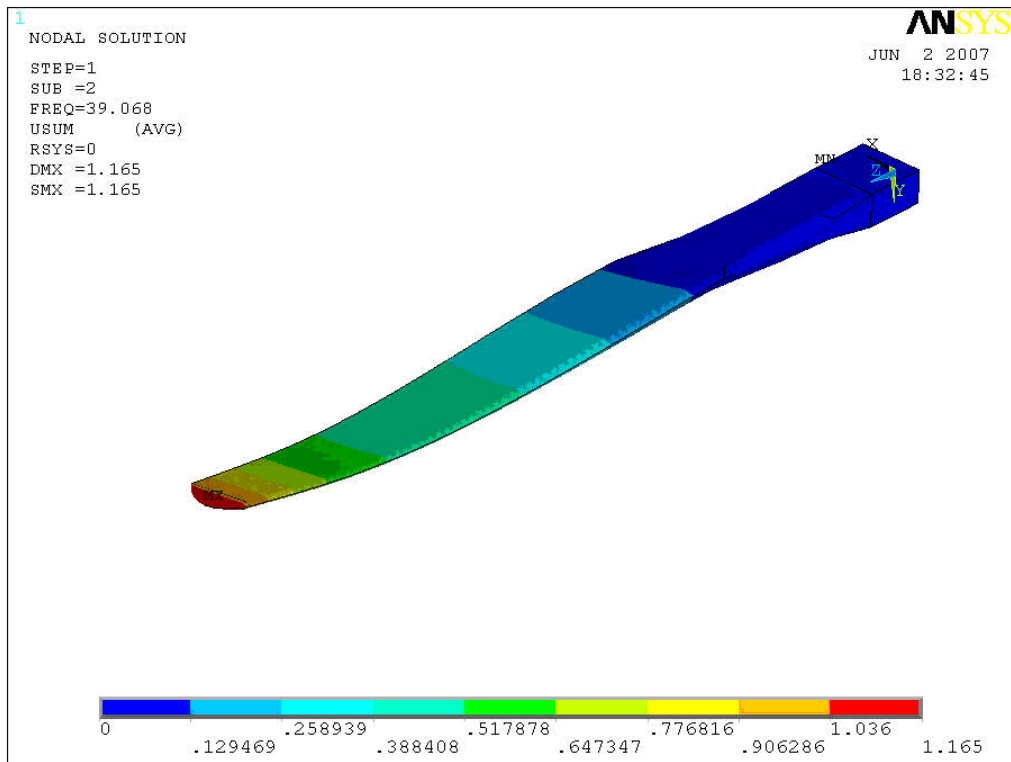


Figure 15. Mode Shape 3 (42.239 Hz)

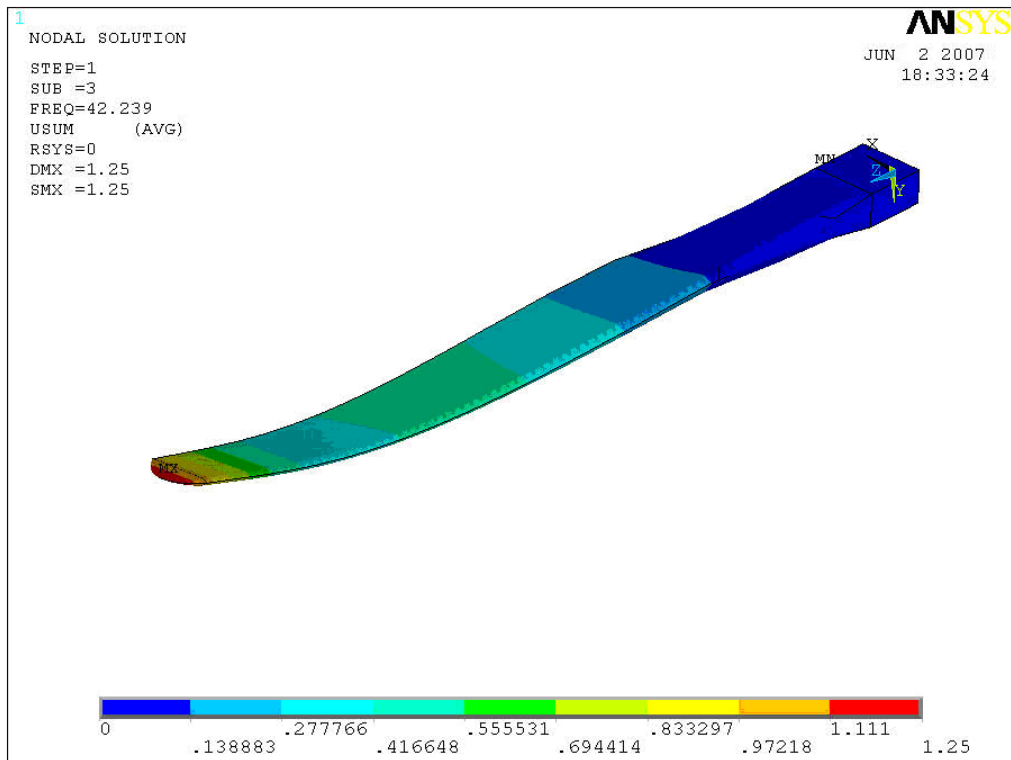




Figure 16. Mode Shape 4 (93.595 Hz)

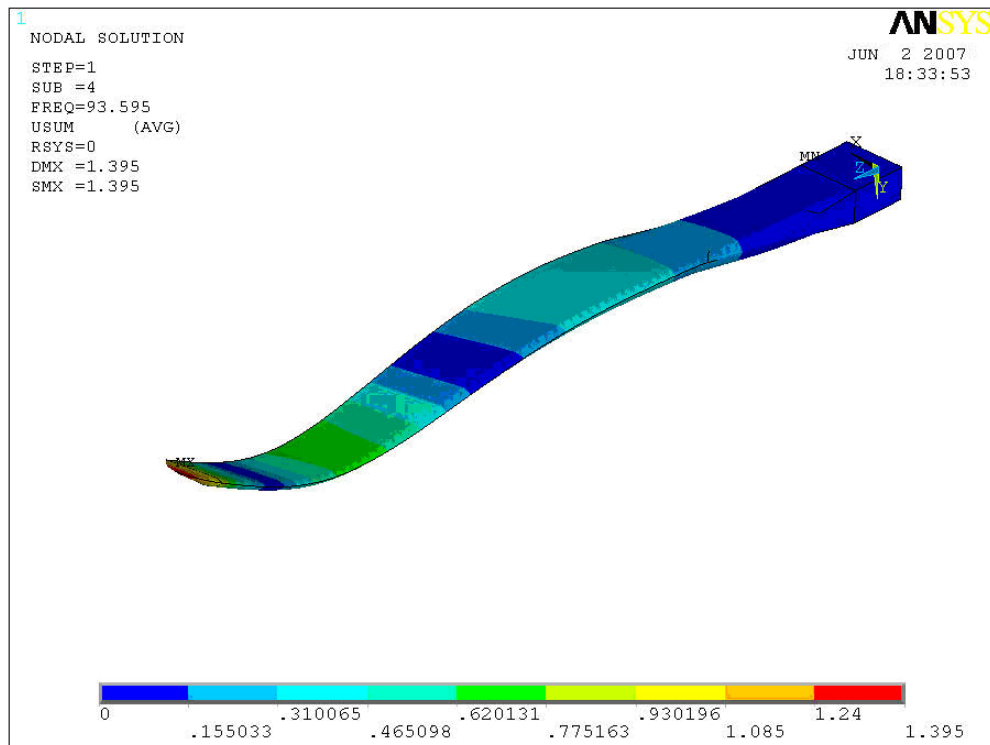
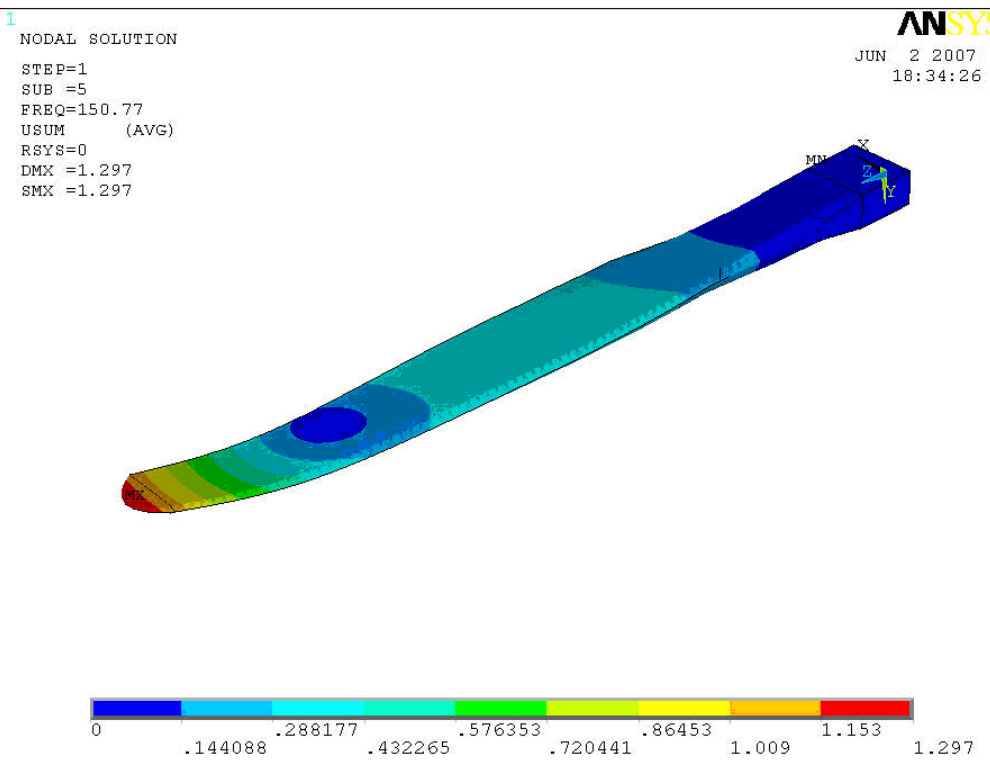


Figure 17. Mode Shape 5 (150.77 Hz)



**Table 10. Natural Frequencies**

Natural Frequencies	
Mode Number	Frequency (Hz)
1	13.033
2	39.068
3	42.239
4	93.595
5	150.77

Caution: Do not accept or reject a design based solely on the results shown here. ANSYS, Inc. recommends that you also take into account experimental test data and/or prior experience with similar analyses when evaluating a design.

* ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΠΛΗΡΗΣ ΦΑΚΕΛΟΣ ΜΕ ΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 5 KW.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Ιωάννης Κλεάνθη Καλδέλλης, *ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*, Εκδόσεις ΑΘ. ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, Αθήνα 2005
- [2]. Γ. Μπεργελές, *ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ*, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2005
- [3]. Δρ Π. Α. Βουθούνης, *ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ-ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ*, Αθήνα Ζ' Έκδοση 2002
- [4]. Ιστοσελίδα Εργαστηρίου Αιολικής Ενέργειας & Συνθεσης Ενεργειακών Συστημάτων, www.wel.teiher.gr
- [5]. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.), www.cres.gr
- [6]. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.), www.rae.gr