



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μεθοδολογία Υπολογισμού Μικρών Ανεμογεννητριών»

Φοιτητής: Βαλσαμάκης Αριστείδης

Επιβλέπων Καθηγητής: Κονταξάκης Κωνσταντίνος



Ηράκλειο 2018

Ευχαριστίες

Τελειώνοντας την παρούσα πτυχιακή μου εργασία θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου Κονταξάκη Κωνσταντίνο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΤΕΙ Κρήτης για τις χρήσιμες και καθοριστικές επισημάνσεις του κατά τη διάρκεια της συγγραφής της.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει παρουσιάσει ραγδαία αύξηση για πολλούς λόγους. Ο κύριος λόγος είναι το γεγονός, ότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς χρησιμοποιούνται στη μορφή που τις συναντάμε στη φύση και δεν χρειάζονται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως για παράδειγμα εξόρυξη ή καύση. Ανεμογεννήτριες είναι οι μονάδες που δεσμεύουν την ενέργεια του ανέμου και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία μετέχουν, υπάρχουν διάφορα μεγέθη και είδη ανεμογεννητριών.

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος οι οποίες είναι κατάλληλες για ηλεκτροδότηση σπιτιών και αγροκτημάτων και μπορεί να αποτελέσουν την ιδανική λύση, όταν στην περιοχή της εγκατάστασης δεν υπάρχει διαθέσιμο δίκτυο. Διακρίνονται ανάλογα με την επιφάνεια σάρωσης (A_{swept}) τη διάμετρο του στροφείου (D) καθώς και την ονομαστική τους ισχύ (P). Έτσι οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται στις κατηγορίες *micro*, πολύ μικρές και μικρές.

Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκε ο υπολογισμός της αντοχής μιας πολύ μικρής Α/Γ σύμφωνα με το πρότυπο του κανονισμού **IEC 61400-2/2013**. Ειδικότερα, παρατίθενται τα γενικά δεδομένα της πολύ μικρής ανεμογεννήτριας, όπου ορισμένα από αυτά θεωρούνται γνωστά (τεχνικά χαρακτηριστικά) και κάποια θα πρέπει να υπολογιστούν, βάση των τριγωνομετρικών ή άλλων γνωστών εξισώσεων, και τα οποία θα εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και την ολοκλήρωση της μελέτης των περιπτώσεων των φορτίων.

Λέξεις Κλειδιά

Ανεμογεννήτρια, φορτία, πτέρυγα, δρομέας, στροφείο, πλήμνη.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	ii
Λέξεις Κλειδιά.....	ii
Περιεχόμενα.....	iii
Κατάλογος Πινάκων – Εικόνων.....	vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο – ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ (Α/Γ).....	1
1.1. Εισαγωγή.....	1
1.2. Κατηγορίες Ανεμογεννητριών.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο – ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	7
2.1 Επιμέρους συστήματα.....	7
2.1.1 Δρομέας.....	7
2.1.2 Σύστημα Μετατροπής στροφών.....	10
2.1.3 Γεννήτρια.....	11
2.1.4 Συστήματα ελέγχου.....	12
2.1.5 Πύργος Στήριξης.....	13
2.1.6 Σύνδεση με το Δίκτυο ή με φορτίο.....	13
2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη.....	14
2.2.1 Λόγος Ταχύτητας Ακροπτερυγίου – TSR.....	14
2.2.2 Δεσμευόμενη Αιολική Ισχύς.....	15
2.2.3 Αεροδυναμικός Συντελεστής Ισχύος (Cp).....	16
2.2.4 Η Γωνία βήματος πτερύγιου (pitch angle).....	17
2.2.5 Στιβαρότητα.....	18
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	19
3.1. Θεωρητικά Στοιχεία (IEC-61400-2/2013).....	19
3.2. Σύστημα συντεταγμένων (IEC-61400-2/2013).....	19
3.3. Μεθοδολογία σχεδιασμού (IEC-61400-2/2013).....	23
3.4. Εξωτερικές συνθήκες (IEC-61400-2/2013).....	25
3.4.1. Γενικά.....	25
3.4.2. Κλάσεις μικρών ανεμογεννητριών (SWT).....	26
3.4.3. Συνθήκες ανέμου.....	28
3.4.4. Κανονικές Συνθήκες ανέμου.....	28
3.4.4.1. Κατανομή ταχύτητας ανέμου.....	28
3.4.4.2. Πρότυπο κανονικών συνθηκών ανέμου (NWP).....	29
3.4.4.3. Κανονικό μοντέλο τύρβης (NTM).....	29

Περιεχόμενα

3.4.5.	Ακραίες Συνθήκες ανέμου.....	31
3.4.5.1.	Πρότυπο ακραίως συνθηκών ανέμου (EWM).....	31
3.4.5.2.	Ακραία ριπή λειτουργίας (EOG).....	32
3.4.5.3.	Ακραία αλλαγή κατεύθυνσης (EDC).....	34
3.4.5.4.	Ακραία ριπή συνοχής (ECG).....	35
3.4.5.5.	Ακραία ριπή συνοχής με αλλαγή κατεύθυνσης (ECD)	36
3.5.	Άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες.....	37
3.5.1.	Γενικά.....	37
3.5.2.	Άλλες κανονικές περιβαλλοντικές συνθήκες	39
3.6.	Κατασκευαστικός σχεδιασμός.....	39
3.6.1.	Γενικά.....	39
3.6.2.	Μεθοδολογία σχεδιασμού	40
3.6.3.	Φορτία και περιπτώσεις φόρτισης.....	40
3.6.3.1.	Γενικά.....	40
3.6.3.2.	Ταλαντώσεις, αδρανειακά και βαρυτικά φορτία	40
3.6.3.3.	Αεροδυναμικά φορτία	41
3.6.3.4.	Φορτία κατά τη λειτουργία.....	41
3.6.3.5.	Άλλα φορτία.....	41
3.6.3.6.	Περιπτώσεις φόρτισης.....	41
3.7.	Απλοποιημένο μοντέλο φορτίσεων	43
3.7.1.	Γενικά.....	43
3.7.2.	Περίπτωση φόρτισης «Α»: Κανονική λειτουργία (Normal Operation).....	46
3.1.1.	Περίπτωση φόρτισης «Β»: Προσανεμισμός (Yawing).....	48
3.1.2.	Περίπτωση φόρτισης «C»: Σφάλμα προσανεμισμού (Yaw error).....	49
3.1.3.	Περίπτωση φόρτισης «D»: Μέγιστη ώση (Maximum Thrust).....	50
3.1.4.	Περίπτωση φόρτισης «E»: Μέγιστης ταχύτητα περιστροφής (Maximum Rotational Speed).....	51
3.1.5.	Περίπτωση φόρτισης «F»: Βραχυκύκλωμα στο σημείο σύνδεσης του φορτίου (Short at load Connection).....	51
3.1.6.	Περίπτωση φόρτισης «G»: Τερματισμός λειτουργίας (Shutdown/Braking).....	52
3.1.7.	Περίπτωση φόρτισης «H»: Φόρτιση σταθμευμένης Α\Γ (Extreme Wind Loading)	53
3.1.8.	Περίπτωση φόρτισης «I»: Φόρτιση σταθμευμένης Α\Γ – Μέγιστη έκθεση (Maximum Exposure)	55
3.2.	Αεροελαστική μοντελοποίηση.....	56
3.2.1.	Γενικά.....	56
3.2.2.	Παραγωγή ενέργειας (περιπτώσεις φόρτισης 1.1-1.5)	58
3.2.3.	Παραγωγή ενέργειας σε συνδυασμό με υπεισέρχουσα βλάβη για περιπτώσεις φόρτισης 2.1-2.3 ..	58
3.2.4.	Κανονικός τερματισμός λειτουργίας για περιπτώσεις φόρτισης 3.1-3.2.....	59
3.2.5.	Τερματισμός λειτουργίας έκτακτης ανάγκης ή χειροκίνητος τερματισμός λειτουργίας (περίπτωση φόρτισης 4.1)	59

Περιεχόμενα

3.2.6.	Κατάσταση στάθμευσης με σταματημένη Α/Γ ή γυρίζοντας στο ρελαντί σε περιπτώσεις φόρτισης 5.1-5.2 (Parked, stand-still or idling)	60
3.2.7.	Κατάσταση στάθμευσης με συνδυασμό βλαβών για περίπτωση φόρτισης 6.1 (parked plus fault conditions)	60
3.2.8.	Υπολογισμοί φορτίων	61
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΟΛΥ ΜΙΚΡΗΣ Α/Γ (IEC-61400-2/2013) ..	63
4.1.	Γενικά	63
4.2.	Μεθοδολογία σχεδιασμού πολύ μικρής Α/Γ (IEC-61400-2/2013)	63
4.3.	Γενικά δεδομένα πολύ μικρής Α/Γ (IEC-61400-2/2013).....	63
4.3.1.	Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «Α»: Κανονική λειτουργία (Normal Operation)	70
4.3.2.	Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «Β»: Προσανεμισμός (Yawing)	71
4.3.3.	Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «C»: Σφάλμα περιστροφής (Yaw error).....	72
4.3.4.	Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «D»: Μέγιστης ώσης (Maximum Thrust)	73
4.3.5.	Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «E»: Μέγιστης ταχύτητα περιστροφής (Maximum Rotational Speed)	74
4.3.6.	Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «F»: Βραχυκύκλωμα στο σημείο σύνδεσης του φορτίου (Short at load Connection)	75
4.3.7.	Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «G»: Τερματισμός λειτουργίας (Shutdown/Braking)	75
4.3.8.	Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «H»: Ταχύτητα επιβίωσης (Extreme Wind Loading).....	76
4.3.9.	Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «I»: Μέγιστη έκθεση (Maximum Exposure).....	78
4.3.10.	Συγκριτικά αποτελέσματα: Εμφάνιση χειρότερης περίπτωσης φόρτισης και χειρότερου συνδυασμού περιπτώσεων φόρτισης (Worst Combination)	80
5.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	82
5.1.	Συζήτηση	82
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86

Κατάλογος Πινάκων – Εικόνων

Εικόνα 1.1 – Διάγραμμα ροής ενέργειας ενός ανεμοκινητήρα.....	3
Πίνακας 1.1 – Κατηγορίες των μικρών Α/Γ βάση της επιφάνειας σάρωσης	4
Εικόνα 1.2 – Παράδειγμα μικρής Α/Γ στη στέγες σπιτιών για οικιακή χρήση.....	5
Εικόνα 2.1 – Α/Γ κάθετου άξονα	8
Εικόνα 2.2 – Σχηματική απεικόνιση μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα	10
Εικόνα 2.3 – Γωνία Βήματος Πτερυγίου (pitch angle)	17
Εικόνα 3.3 – Σύστημα αξόνων Α/Γ οριζόντιου άξονα (HAWT)	20
Εικόνα 3.4 – Σύστημα αξόνων Α/Γ κάθετου άξονα (VAWT).....	22
Εικόνα 3.5 – Διάγραμμα ροής απόφασης (IEC 61400-2/2013)	24
Πίνακας 3.1 – Βασικές παράμετροι κατηγοριών μικρών Α/Γ (SWT)	27
Εικόνα 3.6 – Χαρακτηριστικά τύρβης ανέμου	30
Εικόνα 3.7 – Παράδειγμα ακραίας ριπής λειτουργίας (N=1 και $V_{hub}=25m/s$)	33
Εικόνα 3.8 – Παράδειγμα ακραίου μεγέθους αλλαγής διεύθυνσης (N=50, D=5m και $z_{hub}=20m$).....	35
Εικόνα 3.9 – Παράδειγμα ακραίας αλλαγής διεύθυνσης (N=50, $V_{hub}=25m/s$)	35
Εικόνα 3.10 – Ακραία ριπή συνοχής ($V_{hub}=25m/s$) (ECG)	36
Εικόνα 3.11 – Αλλαγής διεύθυνσης για ECD	37
Εικόνα 3.12 – Αλλαγής διεύθυνσης συναρτήσει του χρόνου για $V_{hub}=25m/s$	37
Πίνακας 3.2 – Περιπτώσεις φόρτισης σχεδιασμού για την μέθοδο απλοποιημένων υπολογισμών φορτίων	45
Πίνακας 3.3 – Συντελεστές δυνάμεων (C_f)	55
Πίνακας 3.4 - Ελάχιστος αριθμός περιπτώσεων φόρτισης για αεροελαστικά μοντέλα σχεδιασμού	57
Πίνακας 4.1 – Διαστάσεις πτέρυγας της Α/Γ	64
Πίνακας 4.2 – Διαστάσεις άξονα της Α/Γ	64
Πίνακας 4.3 – Δεδομένα της Α/Γ	65
Πίνακας 4.4 – Δεδομένα της Α/Γ	65
Πίνακας 4.5 – Δεδομένα της Α/Γ	66
Πίνακας 4.6 – Δεδομένα της Α/Γ	66
Πίνακας 4.7 – Δεδομένα της Α/Γ	67
Πίνακας 4.8 – Δεδομένα της Α/Γ	68
Πίνακας 4.9 – Αποτελέσματα περίπτωσης «Α» - Κανονική λειτουργία	70
Πίνακας 4.10 – Αποτελέσματα περίπτωσης «Β» - Προσανεμισμός Α/Γ	71

Πίνακας 4.11 – Αποτελέσματα περίπτωσης «C» - Σφάλμα Προσανεμισμού Α/Γ.....	73
Πίνακας 4.12 – Αποτελέσματα περίπτωσης «D» - Μέγιστη ώση.....	74
Πίνακας 4.13 – Αποτελέσματα περίπτωσης «E» - Μέγιστη ταχύτητας περιστροφής.....	74
Πίνακας 4.14 – Αποτελέσματα περίπτωσης «F» - Βραχυκύκλωμα στο σημείο σύνδεσης του φορτίου... 75	
Πίνακας 4.15 – Αποτελέσματα περίπτωσης «G» - Τερματισμός λειτουργίας.....	76
Πίνακας 4.16 – Αποτελέσματα περίπτωσης «H» - Ταχύτητα επιβίωσης για σταθμευμένους δρομείς	77
Πίνακας 4.17 – Αποτελέσματα περίπτωσης «H» - Ταχύτητα επιβίωσης για περιστρεφόμενους δρομείς 77	
Πίνακας 4.18 – Αποτελέσματα περίπτωσης «I» - Μέγιστη έκθεση για μικρές (<0,1m) επιφάνειες.....	78
Πίνακας 4.19 – Αποτελέσματα περίπτωσης «I» - Μέγιστη έκθεση για μεγάλες (>0,1m) επιφάνειες.....	79
Πίνακας 4.20 – Συγκριτικά αποτελέσματα – Συνολική ορμή περιπτώσεων φόρτισης (A, B, C, E, G και H).....	80
Πίνακας 4.21 – Συγκριτικά αποτελέσματα – Συνολική ώθηση περίπτωση φόρτισης (D) και συνολικής αντίστασης περίπτωση φόρτισης (I) Χειρότερος συνδυασμός περιπτώσεων φόρτισης	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ (Α/Γ)

1.1. Εισαγωγή

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας είναι εκμεταλλεύσιμες μορφές ενέργειας που προέρχονται από φυσικές πηγές όπως είναι ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία, η βιομάζα, η ροή του νερού και άλλες. Χρησιμοποιούνται είτε άμεσα, κυρίως για θέρμανση, είτε έμμεσα, μετατρέπόμενες σε άλλες μορφές ενέργειας όπως είναι η μηχανική και η ηλεκτρική ενέργεια.

Τα τελευταία χρόνια η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει παρουσιάσει ραγδαία αύξηση για πολλούς λόγους. Ο κύριος λόγος είναι το γεγονός ότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς χρησιμοποιούνται στη μορφή που τις συναντάμε στη φύση και δεν χρειάζονται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως για παράδειγμα εξόρυξη ή καύση. Αυτό συνεπάγεται ότι κατά την χρήση τους δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα, τοξικά ή ραδιενεργά απόβλητα και ρύπους όπως συμβαίνει με άλλες ευρέως χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας. Ένας ακόμη λόγος είναι ότι τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων, που αποτελούσαν για πολλά χρόνια την μεγαλύτερη πηγή ενέργειας, προβλέπεται ότι σε λίγα χρόνια δεν θα επαρκούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη, επομένως πρέπει να βρεθούν άλλοι τρόποι παραγωγής ενέργειας. Το συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οφείλεται στο γεγονός ότι παρουσιάζουν αρκετά **πλεονεκτήματα** σε σχέση με τις άλλες πηγές. Τα κυριότερα από αυτά είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, καθώς ανανεώνονται μέσω του κύκλου της φύσης, και κατά συνέπεια μειώνουν την εξάρτηση από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι είναι περιορισμένοι.
- Σε εθνικό επίπεδο συνεισφέρουν στην ενεργειακή ανεξαρτησία μιας χώρας και της προσφέρουν αποθεματική ασφάλεια καθώς όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι ανεξάντλητες.

- Έχουν χαμηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Το κόστος αυτό δεν επηρεάζεται σημαντικά από αλλαγές στην διεθνή οικονομία, όπως συμβαίνει με τα συμβατικά καύσιμα. Επίσης τα τελευταία χρόνια το κόστος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώνεται συνεχώς καθώς διευρύνεται η χρήση τους.

- Ο εξοπλισμός τους είναι σχετικά απλός, τόσο στην κατασκευή όσο και στην συντήρηση, η εγκατάστασή τους είναι εύκολη και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής.

- Λόγω των καινοτομιών και της συνεχόμενης ανάπτυξής τους, αποτελούν πόλο έλξης επενδύσεων. Αυτό έχει σαν συνέπεια την δημιουργία θέσεων εργασίας καθώς και την οικονομική και κοινωνική αναβάθμιση των περιοχών στις οποίες εγκαθίστανται.

- Δεν επιβαρύνουν το τοπικό οικοσύστημα με τοξικά ή ραδιενεργά απόβλητα και δεν παράγουν αέριους ρύπους (όπως CO, SO₂ και υδρογονάνθρακες) όπως οι συμβατικές πηγές ενέργειας.

- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον, αποδεκτές από το ευρύ κοινό και συμβάλουν στην αλλαγή των αντιλήψεων σχετικά με περιβαλλοντικά θέματα.

Ωστόσο αν και έχουν πολλά πλεονεκτήματα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν και κάποια **μειονεκτήματα**. Τα σημαντικότερα από αυτά αναφέρονται παρακάτω:

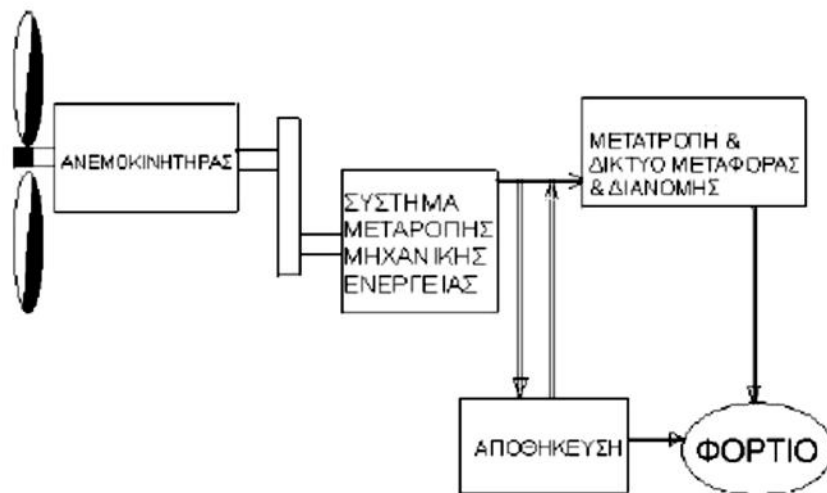
- Το βασικότερο μειονέκτημα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η εξάρτησή τους από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η ηλιοφάνεια, η ένταση του ανέμου, ο κύκλος του νερού, η γεωθερμία, και γενικότερα οι παράμετροι που επηρεάζουν την λειτουργία των ανανεώσιμων πηγών, δεν είναι σταθερά μεγέθη και δεν μπορούμε να ελέγξουμε το χρόνο και την ποσότητα στην οποία μας παρέχονται από τη φύση. Αυτό έχει σαν συνέπεια ότι οι ανανεώσιμες πηγές δεν εξασφαλίζουν σταθερή παραγωγή ενέργειας, επομένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν κύρια πηγή ενέργειας αλλά μόνο σε συνδυασμό με κάποια άλλη μορφή παραγωγής.

- Έχουν χαμηλό συντελεστή απόδοσης της τάξης του 30%. Αυτό σημαίνει ότι η εγκατάστασή τους σε μεγάλη επιφάνεια γης έχει μεγάλο αρχικό κόστος. Για το λόγο αυτό προς το παρόν χρησιμοποιούνται κυρίως ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας και όχι για την αποκλειστική κάλυψη μεγάλων φορτίων.

- Κάποιες από τις μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως για παράδειγμα η αιολική, η υδροηλεκτρική και η ηλιακή, εξαρτώνται άμεσα από τη γεωγραφική θέση, τις κλιματολογικές συνθήκες και τις εποχικές αλλαγές της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις ανεμογεννήτριες υπήρχε η άποψη ότι αποτελούν άκομψη αισθητική παρέμβαση στο περιβάλλον το οποίο εγκαθίστανται, ότι προκαλούν θόρυβο και ευθύνονται για θανάτους πουλιών.

1.2. Κατηγορίες Ανεμογεννητριών

Ο ανεμοκινητήρας από την εποχή της εμφάνισής του μέχρι και σήμερα έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζοντίου ή κάθετου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματα του (περυγία, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί, γεννήτρια



Εικόνα 1.1 – Διάγραμμα ροής ενέργειας ενός ανεμοκινητήρα.

κ.α.). Εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί στον τρόπο δέσμευσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς της ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται από την ανεμογεννήτρια σε άλλη μορφή ενέργειας. Μια εικόνα των βασικών μερών που αποτελούν μια διάταξη εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας καθώς και της ροής ενέργειας παρουσιάζεται στην παραπάνω εικόνα 1.1. Η διάταξη αυτή είναι μια γενική περίπτωση όπου

η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με τη βοήθεια αεροδυναμικής διάταξης (π.χ. μιας έλικας). Αυτό το μηχανικό έργο μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο επί τόπου ή να χρειαστεί να μετατραπεί σε μια άλλη μορφή ενέργειας και να μεταφερθεί στον τόπο της ζήτησης.

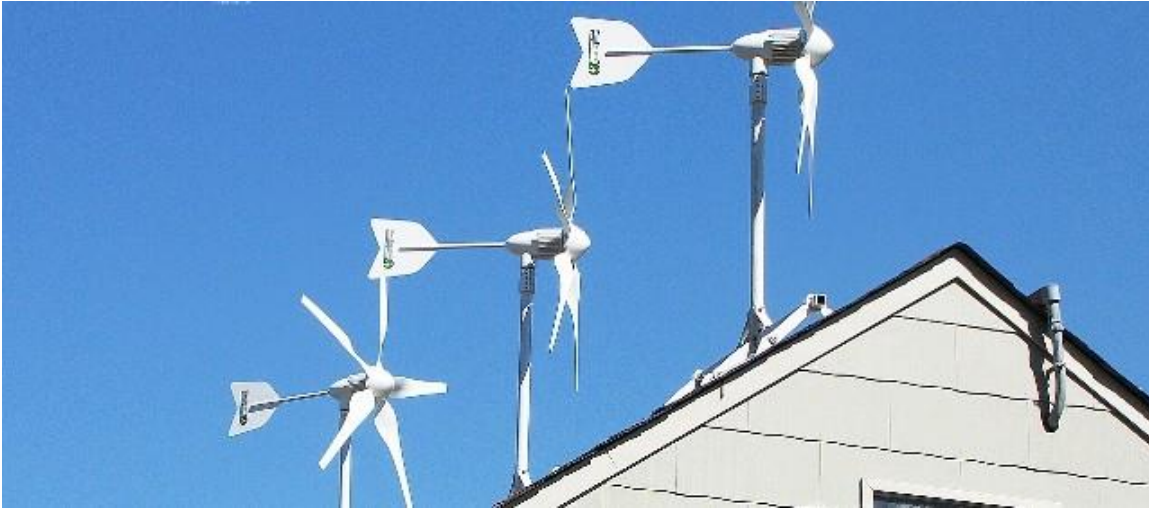
Οι ανεμογεννήτριες είναι οι μονάδες που δεσμεύουν την ενέργεια του ανέμου και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, υπάρχουν διάφορα μεγέθη και είδη ανεμογεννητριών, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.

Οι ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται ανάλογα με την ισχύ που παρέχουν στις παρακάτω κατηγορίες:

Πίνακας 1.1 – Κατηγορίες των μικρών Α/Γ βάση της επιφάνειας σάρωσης

Χαρακτηριστικά	Μicro	Πολύ Μικρές	Μικρές
Επιφάνεια Σάρωσης	$A_{\text{swept}} \leq 3.5\text{m}^2$	$3.5\text{m}^2 < A_{\text{swept}} \leq 40\text{m}^2$	$40\text{m}^2 < A_{\text{swept}} \leq 200\text{m}^2$
Διάμετρος Στροφείου	$D \leq 2.1\text{m}$	$2.1\text{m} < D \leq 7\text{m}$	$7\text{m} \leq D \leq 16\text{m}$
Ονομαστική Ισχύς	$P \leq 1\text{KW}$	$1\text{KW} < P \leq 10\text{KW}$	$10\text{KW} \leq P \leq 100\text{KW}$

Πηγή: International Standard (IEC 61400-2:)



Εικόνα 1.2 – Παράδειγμα μικρής Α/Γ στη στέγες σπιτιών για οικιακή χρήση.

Τα κύρια **επιμέρους συστήματα**, τα οποία διαθέτουν όλες οι ανεμογεννήτριες ονομαστικά, είναι:

- Ο δρομέας (ή πτερωτή)
- Το σύστημα μετατροπής των στροφών
- Η γεννήτρια
- Τα συστήματα ελέγχου
- Το σύστημα προσανατολισμού
- Ο πύργος στήριξης
- Η σύνδεση με το φορτίο ή το δίκτυο

Ο άνεμος δεσμεύεται από τα πτερύγια και η πλήμνη περιστρέφεται. Η κίνηση αυτή μεταφέρεται μέσω ενός άξονα στο σύστημα μετατροπής των στροφών. Το κιβώτιο ταχυτήτων πολλαπλασιάζει την ταχύτητα περιστροφής της πλήμνης και μέσω ενός άλλου άξονα μεταφέρει την περιστροφική κίνηση στη γεννήτρια. Τέλος η γεννήτρια συνδέεται με ένα μετασχηματιστή, ώστε η τάση να προσαρμόζεται στην κατάλληλη τιμή για να συνδεθεί η ανεμογεννήτρια στο εκάστοτε φορτίο ή σε δίκτυο.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα ασχοληθούμε με ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος, συγκεκριμένα θα μελετηθούν διεξοδικά τα επιμέρους συστήματα, τα χαρακτηριστικά, η απόδοση και η τελική μελέτη μιας μικρής ανεμογεννήτριας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι Α/Γ μικρής ισχύος είναι κατάλληλες για ηλεκτροδότηση σπιτιών και αγροκτημάτων. Μπορεί να αποτελέσουν την ιδανική λύση, όταν στην περιοχή της εγκατάστασης δεν υπάρχει διαθέσιμο δίκτυο. Ο χώρος που απαιτείται για την τοποθέτηση ενός τέτοιου συστήματος δεν αφορά μεγάλη έκταση, αλλά προσοχή θα πρέπει να δοθεί ώστε να μην επηρεάζεται η ομαλότητα του αέρα από παρακείμενα εμπόδια. Επιπλέον, η αγορά μιας Α/Γ μικρής ισχύος γίνεται μετά τον υπολογισμό της ενεργειακής της απόδοσης σε ετήσια βάση. Είναι σημαντικό η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου να έχει την κατάλληλη τιμή, από πλευράς απόδοσης και μακροβιότητας του αιολικού συστήματος.

2.1 Επιμέρους συστήματα

Ανεμογεννήτριες είναι οι μονάδες που δεσμεύουν την ενέργεια του ανέμου και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία μετέχουν, υπάρχουν διάφορα μεγέθη και είδη ανεμογεννητριών. Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκαν ονομαστικά τα επιμέρους συστήματα μιας ανεμογεννήτριας. Τα συστήματα αυτά αφορούν κάθε τύπο ανεμογεννήτριας, δηλαδή και τις μικρές τις οποίες μελετάμε. Πιο αναλυτικά, θα εξεταστούν στα παρακάτω υποκεφάλαια τα συστήματα από τα οποία αποτελείται μία τυπική ανεμογεννήτρια.

2.1.1 Δρομέας

Ο δρομέας αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα. Υπάρχουν ανεμογεννήτριες οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα, με ένα, δύο, τρία ή περισσότερα πτερύγια. Το γεωμετρικό σχήμα των πτερυγίων, το υλικό, καθώς και η κλίση τους, διαφοροποιούνται ανάλογα με την εφαρμογή ώστε να έχουν βέλτιση αεροδυναμική και να μειώνεται η καταπόνησή τους. Ενδεικτικά οι δύο αυτοί τύποι ανεμογεννητριών περιγράφονται ως εξής:

Κάθετου Άξονα:

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν τον άξονα περιστροφής τους κάθετο προς το έδαφος και κατακόρυφο ως προς την ροή του ανέμου. Η διάταξη αυτή τους επιτρέπει να περιστρέφονται ανεξάρτητα από την διεύθυνση του ανέμου και έτσι δεν απαιτείται μηχανισμός προσανατολισμού. Η ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να τοποθετηθεί κοντά στο έδαφος, αυτό καθιστά την εγκατάστασή τους πολύ απλή και οικονομική ενώ πολλές φορές δεν χρειάζονται ούτε πυλώνα στήριξης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η



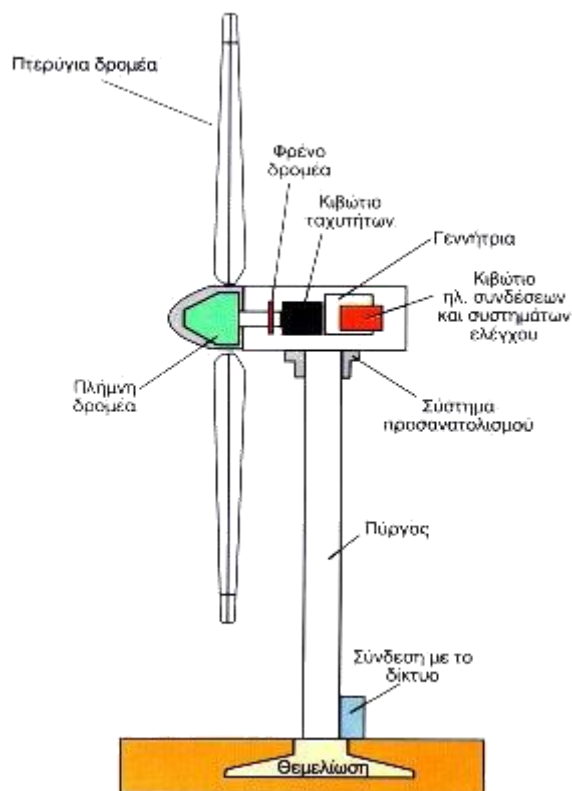
Εικόνα 2.1 – Α/Γ κάθετου άξονα

Το κυριότερο πρόβλημα με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα είναι ότι έχουν μεγάλη ροπή εκκίνησης, Αυτό σημαίνει ότι για να αρχίσουν να περιστρέφονται χρειάζονται εξωτερική παρέμβαση, πρέπει για παράδειγμα στην αρχή να λειτουργήσουν ως κινητήρες καταναλώνοντας ενέργεια από το δίκτυο. Ένα ακόμη πρόβλημα είναι ότι καθώς περιστρέφονται υπάρχουν σημεία στα οποία η συνεισφορά του ανέμου γίνεται μηδενική. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι συνήθως έχουν χαμηλό ύψος, και κατά συνέπεια οι

ταχύτητες του ανέμου δεν είναι πολύ μεγάλες, καθιστά την απόδοσή τους σχετικά μικρή. Έτσι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής ισχύος και αποτελούν μία οικονομική λύση.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες σε αιολικά πάρκα αλλά και σε μικρότερες εγκαταστάσεις ισχύος, ακόμα και για οικιακή χρήση. Μπορεί να έχουν ένα, δύο, τρία ή περισσότερα πτερύγια, με πιο διαδεδομένες αυτές με τα τρία πτερύγια καθώς η γεωμετρία τους βοηθάει στο να έχουν μικρότερες καταπονήσεις.

Οριζόντιου Άξονα: Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονα περιστροφής τους οριζόντιο ως προς το έδαφος και σχεδόν παράλληλο στην ροή του ανέμου. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι δεν χρειάζονται πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου για να αρχίσουν να περιστρέφονται, οπότε έχουν απόδοση και με ασθενή άνεμο, επίσης εμφανίζουν υψηλότερο αεροδυναμικό συντελεστή από τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα. Τα πλεονεκτήματα αυτά τις καθιστούν κατάλληλες για τις περισσότερες εφαρμογές και επομένως έχουν την πρώτη θέση στις προτιμήσεις της αγοράς. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να τοποθετηθούν πάνω στον πύργο πράγμα που κάνει την κατασκευή τους δύσκολη και ακριβή και επίσης χρειάζονται σύστημα προσανατολισμού στη διεύθυνση του ανέμου κάθε στιγμή και ενεργό μηχανισμό περιστροφής της ατράκτου.



Εικόνα 2.2 – Σχηματική απεικόνιση μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

2.1.2 Σύστημα Μετατροπής στροφών

Στα αιολικά συστήματα είναι απαραίτητη μία μέθοδος μεταφοράς της μηχανικής ενέργειας που να προσαρμόζει τον αριθμό στροφών του δρομέα με τις απαιτήσεις της γεννήτριας. Επειδή ο δρομέας στρέφεται με ταχύτητα της τάξης των 30-60 rpm ενώ η γεννήτρια για να παράγει ισχύ χρειάζεται 1200-1500 rpm είναι απαραίτητο ένα σύστημα μετατροπής στροφών. Στην παραπάνω εικόνα 4 φαίνεται το σημείο όπου τοποθετείται το κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης και μετατροπής των στροφών. Η πολυπλοκότητα και το κόστος των συστημάτων μετατροπής στροφών διαφοροποιείται ανάλογα με την εφαρμογή και συνήθως τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν προβλήματα ευθυγράμμισης, τριβών, καταπόνησης και συντονισμού. Τα προηγούμενα χρόνια σε όλα τα συστήματα, εκτός από

τα πολύ μικρά χρησιμοποιούνταν διάφορες μέθοδοι μετατροπής στροφών, κυρίως κιβώτια ταχυτήτων. Πλέον υπάρχουν και αιολικά συστήματα που δεν χρησιμοποιούν κιβώτια ταχυτήτων αλλά ο δρομέας τους συνδέεται απευθείας στη γεννήτρια.

2.1.3 Γεννήτρια

Στην περίπτωση που τα αιολικά συστήματα χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η συσκευή που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική είναι μια γεννήτρια. Υπάρχουν δύο κατηγορίες συστημάτων. Η πρώτη είναι τα συστήματα σταθερής ταχύτητας - σταθερής συχνότητας (CSCF) και η δεύτερη τα συστήματα μεταβλητής ταχύτητας - σταθερής συχνότητας (VSCF). Τα είδη των γεννητριών που χρησιμοποιούνται είναι:

- **Σύγχρονες γεννήτριες:** Χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας και μπαίνουν σε σειρά με ανορθωτή και αντίστροφα. Επίσης μπορεί να είναι μηχανές με μόνιμους μαγνήτες και στην περίπτωση αυτή δεν είναι απαραίτητη η χρήση κιβωτίου ταχυτήτων. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι γενικά πιο αποδεκτές από τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού αλλά μπορεί να παρουσιάσουν προβλήματα ευστάθειας στις γρήγορες μεταβολές των ροπών.
- **Ασύγχρονες γεννήτριες:** Δεν έχουν πρόβλημα ευστάθειας και είναι απλής κατασκευής, αλλά χρειάζονται διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας (όπου προτιμώνται οι ασύγχρονες μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού) αλλά και σε ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας (όπου μπορεί να είναι είτε δακτυλιοφόρου δρομέα είτε διπλής τροφοδότησης).
- **DC γεννήτριες με αντιστροφείς (inverter):** Διατηρούν σταθερό το λόγο (λ) στις διάφορες ταχύτητες του ανέμου ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη παραγωγή ενέργειας.

2.1.4 Συστήματα ελέγχου

Ο έλεγχος μπορεί να παρεμβαίνει σε διαφορετικά σημεία του συστήματος. Στα αιολικά συστήματα υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες ελέγχου:

- **Σύστημα περιστροφής της ατράκτου:** Επειδή η διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται είναι απαραίτητο ένα σύστημα που θα προσανατολίζει την άτρακτο προς την κατάλληλη διεύθυνση. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας για αισθητήριο ένα ανεμοδείκτη και αλλάζοντας τη διεύθυνση της ατράκτου με ένα ουραίο πτερύγιο ή μια δυναμική αντίσταση των πτερυγίων ή ένα μικρό βοηθητικό ανεμόμυλο ή ακόμη και κάποιο άλλο αυτοτροφοδοτούμενο μηχανικό (ή υδραυλικό) σύστημα.
- **Σύστημα ελέγχου ταχύτητας:** Σκοπός του είναι να διατηρεί την απαιτούμενη ταχύτητα περιστροφής και να προστατεύει το σύστημα από υπερβολικές ταχύτητες. Συνήθως οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν σε μία περιοχή ταχυτήτων ανέμου που κυμαίνεται από (4m/s) έως (25m/s). Υπάρχει κάποιο όριο στο οποίο φτάνουν την ονομαστικής τους τιμή και για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου περιορίζουν την έξοδό τους στην τιμή αυτή ενώ όταν η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται πάνω από την ταχύτητα αποσύζευξης η ανεμογεννήτρια σταματάει να λειτουργεί. Ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής συνήθως γίνεται αλλάζοντας την κλίση των πτερυγίων (pitch) μέσω ενός υδραυλικού συστήματος υποβοήθησης της περιστροφής των πτερυγίων. Περιστρέφοντας τα πτερύγια αλλάζει η τιμή των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά και κατά συνέπεια αλλάζει και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου η κλίση των πτερυγίων μεταβάλλεται από 0 έως 90 βαθμούς.
- **Σύστημα ελέγχου εξόδου/φορτίου:** Το σύστημα αυτό μπορεί να είναι αυτόνομο ή να λειτουργεί σε συνδυασμό με τον έλεγχο ταχύτητας. Όταν το φορτίο είναι μικρότερο από την παρεχόμενη ισχύ, με τη βοήθεια του ελέγχου η επιπλέον ισχύς παρέχεται σε ένα ψευδοφορτίο. Αντίθετα όταν το φορτίο είναι μεγαλύτερο από την παρεχόμενη ισχύ το επιπλέον φορτίο πρέπει να απορριφθεί, διαφορετικά σταματάει η λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

Τέλος τα βοηθητικά συστήματα ελέγχου είναι αυτά που εγκαθίστανται σε διάφορα μέρη των ανεμογεννητριών και μέσω αισθητήριων οργάνων ελέγχουν κάθε χρονική στιγμή την τιμή κάποιων παραμέτρων, όπως είναι η υδραυλική πίεση (στα συστήματα περιστροφής των πτερυγίων), κάποιες θερμοκρασίες (του περιβάλλοντος, των λαδιών στη γεννήτρια και στα συστήματα ψύξης – θέρμανσης) και την ορθή λειτουργία κάποιων οργάνων όπως ανεμιστήρες διακόπτες κλπ.

2.1.5 Πύργος Στήριξης

Για τη στήριξη των ανεμογεννητριών σε ορισμένο ύψος χρησιμοποιείται ένας πύργος κατασκευασμένος από μέταλλο για μικρές ανεμογεννήτριες (ή από μπετόν για τις μεγαλύτερες). Το βέλτιστο ύψος του πύργου εξαρτάται από το μέγεθος της κατασκευής και από τη θέση στην οποία εγκαθίσταται.

Ωστόσο υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί και η επιλογή του είναι αποτέλεσμα τεχνοοικονομικής μελέτης. Οι περιορισμοί αυτοί συνήθως αναφέρονται σε ανωμαλίες του εδάφους που δημιουργούν στροβίλους, στην απόσταση ασφάλειας, μεταξύ ακροπτερυγίου και εδάφους, που είναι περίπου 10m και στη μέγιστη δυνατή ταχύτητα του ανέμου που θέλουμε να πετύχουμε, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ύψος.

Επομένως ο πύργος πρέπει να είναι ανθεκτικός καθώς δέχεται σημαντικά φορτία λόγω της βαρύτητας (η άτρακτος μπορεί να ζυγίζει αρκετούς τόνους), λόγω της περιστροφής των πτερυγίων και λόγω της ώσης του ανέμου. Τέλος ο πύργος προσφέρει πρόσβαση στην άτρακτο ώστε να διευκολύνεται η συντήρηση και να αντιμετωπίζονται τα οποιαδήποτε προβλήματα προκύπτουν κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

2.1.6 Σύνδεση με το Δίκτυο ή με φορτίο

Ένα από τα πιο βασικά μειονεκτήματα των αιολικών συστημάτων είναι η μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου. Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού γίνεται με διάφορους τρόπους. Ως μια πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιούνται φορτία που δεν απαιτούν συνεχή παροχή ενέργειας ή φορτία που έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλονται.

Μια δεύτερη λύση είναι η αποθήκευση της ενέργειας ή η χρησιμοποίηση εφεδρικών συστημάτων που θα καλύπτουν τις επιπλέον ανάγκες του φορτίου.

Τέλος, η σύνδεση του αιολικού συστήματος στο δίκτυο ώστε να αλληλοκαλύπτονται οι απαιτήσεις του φορτίου, φαίνεται μια εξίσου καλή προσέγγιση. Ο τελευταίος τρόπος χρειάζεται αρκετή μελέτη καθώς, αφενός μεν το δίκτυο τροφοδοτεί ανελλιπώς διαφόρων ειδών φορτία (βάσης, αιχμής, ενδιάμεσα φορτία και εφεδρείες) και αφετέρου η ενέργεια που παρέχει το αιολικό σύστημα δεν είναι σταθερή και προβλέψιμη αλλά εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα του ανέμου.

Για να μελετήσει ένα μηχανικός την εξάρτηση που υπάρχει ανάμεσα στην ταχύτητα του ανέμου και την ενέργεια που παρέχεται τελικά από ένα αιολικό σύστημα, πρέπει να λάβει υπόψη του κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη και κάποιες καμπύλες που έχουν σχέση με το μέγεθος, τη γεωμετρία και το είδος της εκάστοτε ανεμογεννήτριας. Στο επόμενο υποκεφάλαιο, μελετώνται εκτενέστερα τα μεγέθη αυτά.

2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη

2.2.1 Λόγος Ταχύτητας Ακροπτερυγίου – TSR

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που συναντάμε στην μελέτη ανεμογεννητριών είναι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου (λ) (Tip Speed Ratio – TSR). Ως TSR ορίζεται ο λόγος της γραμμικής ταχύτητας εξαιτίας της περιστροφής προς την ταχύτητα του ανέμου και αποτελεί αδιάστατο μέγεθος, και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (1):

$$\lambda = \frac{\omega_n \cdot R}{V_{hub}} \quad (2.1)$$

Όπου

(ω_n) η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (rad/sec)

(R) η ακτίνα του δρομέα (rad) και

(V_{hub}) η ταχύτητα αναφοράς με μέσο όρο πάνω από (10) λεπτά στο ύψος της πλήμνης (m/sec).

2.2.2 Δεσμευόμενη Αιολική Ισχύς

Ο άνεμος είναι μεγάλες αέριες μάζες σε κίνηση. Ο αέρας αν και έχει αρκετά χαμηλή πυκνότητα, έχει μία μάζα. Επίσης λόγω της ταχύτητάς του έχει και κάποια κινητική ενέργεια. Η μάζα (m) του αέρα που περνάει από μία επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου δίνεται από την εξίσωση (2):

$$m = \rho \cdot A \cdot v \quad (2.2)$$

Όπου

(ρ) η πυκνότητα του αέρα που μεταβάλλεται με το ύψος και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και έχει τυπική τιμή $1,225 \text{ kg/m}^3$

(A) η επιφάνεια που διαπερνά κάθετα ο άνεμος (m^2) και

(v) η ταχύτητα του ανέμου (m/sec).

Θα πρέπει να διευκρινισθεί στην παραπάνω εξίσωση ότι για τις ανεμογεννήτριες η επιφάνεια (A) αντιστοιχεί σε ένα νοητό κυκλικό δίσκο με εμβαδόν ίσο με εκείνο που διαγράφουν τα πτερύγια της έλικας)

Η καμπύλη του ανέμου απεικονίζει την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του χρόνου. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του ανέμου υπολογίζουμε την ισχύ του ανέμου που διαπερνά την επιφάνεια (A) σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.3)$$

Όπου

(ρ) η πυκνότητα του αέρα που μεταβάλλεται με το ύψος και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (kg/m^3)

(A) η επιφάνεια που διαπερνά κάθετα ο άνεμος (m^2) και

(v) η ταχύτητα του ανέμου (m/sec).

Από αυτή την ολική ισχύ που βρίσκεται στον άνεμο μόνο ένα μέρος (P_{blade}) (ισχύς πτερυγίου) μπορεί να δεσμευθεί από το δρομέα και να μετατραπεί σε μηχανική ισχύ. Η ισχύς αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \quad (2.4)$$

Όπου

(ρ) η πυκνότητα του αέρα που μεταβάλλεται με το ύψος και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (kg/m^3)

(A) η επιφάνεια που διαπερνά κάθετα ο άνεμος (m^2)

(v) η ταχύτητα του ανέμου (m/sec) και

(C_p) ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

Αυτό συμβαίνει γιατί αφενός μεν ο αέρας απομακρύνεται από την ανεμογεννήτρια με κάποια ταχύτητα και αφετέρου η πτερωτή της ανεμογεννήτριας προκαλεί εκτροπή μέρους του αέρα το οποίο την παρακάμπτει χωρίς να τη διαπεράσει. Το ποσό της δεσμευόμενης ισχύος εξαρτάται από τη γεωμετρία των πτερυγίων και τις δυνάμεις αντίστασης και άωσης που ασκούνται σε αυτά κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

2.2.3 Αεροδυναμικός Συντελεστής Ισχύος (C_p)

Είναι ο λόγος της μηχανικής ισχύος που δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια προς την ισχύ του ανέμου που διαπερνάει την επιφάνεια (A) που καλύπτουν τα πτερύγια και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (5):

$$C_p = \frac{P_{blade}}{P_{wind}} \quad (2.5)$$

Όπου

(P_{blade}) η ισχύς της ανεμογεννήτριας και

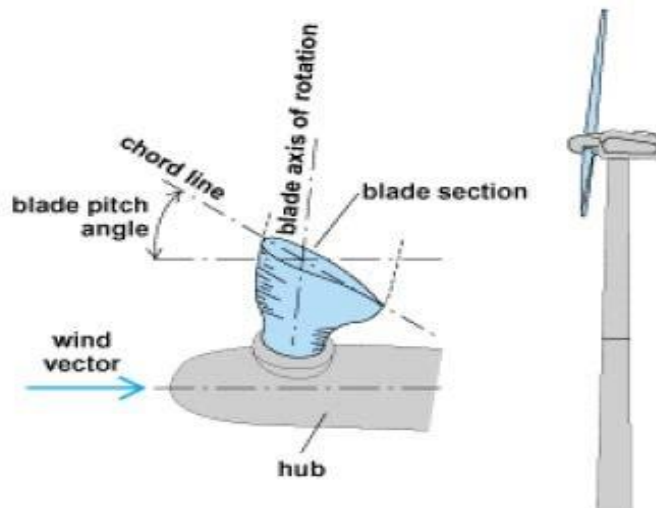
(P_{wind}) η ισχύς του ανέμου

Για την ιδανική ανεμογεννήτρια ο A. Betz απέδειξε ότι η μέγιστη τιμή του (C_p) είναι 0.593. Στην πράξη ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (C_p) κυμαίνεται σε χαμηλότερες τιμές από το όριο του Betz (συνήθως περίπου 0,3-0,4) λόγω μηχανικών τριβών, στροβίλων και αεροδυναμικών ατελειών. Να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι ο (C_p) δεν είναι ο βαθμός απόδοσης του δρομέα αλλά κάτι πιο σύνθετο, εξαρτάται από τη γωνία βήματος του

περυγίου (β) και το λόγο (λ). Η εξάρτηση του (C_p) από το (λ) είναι διαφορετική για κάθε ανεμογεννήτρια (λ).

2.2.4 Η Γωνία βήματος πτερύγιου (pitch angle)

Στις ανεμογεννήτριες που διαθέτουν έλεγχο γωνίας βήματος (pitch control), τα πτερύγια μπορούν να περιστρέφονται γύρω από τον άξονα τους προς την κατεύθυνση που μειώνεται η γωνία πρόσπτωσης και άρα ο συντελεστής άνωσης. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή σαν βήμα πτέρωσης (pitch feathering). Ο μηχανισμός στρίβει τα πτερύγια και προσαρμόζει ανάλογα με τις αεροδυναμικές συνθήκες την γωνία βήματος πτερυγίου (β) κάνοντας χρήση υδραυλικών και ηλεκτρικών ενεργοποιητών. Στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 4) φαίνεται η γωνία βήματος πτερυγίου (blade pitch angle)



Εικόνα 2.3 – Γωνία Βήματος Πτερυγίου (pitch angle)

2.2.5 Στιβαρότητα

Άλλο ένα χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η στιβαρότητα (Solidity) (S) που δίνει τον λόγο του εμβαδού όλων των πτερυγίων προς το εμβαδό της επιφάνειας που διαγράφουν τα πτερύγια. Η στιβαρότητα (S) των ανεμογεννητριών οριζόντιου και κάθετου άξονα, υπολογίζεται αντίστοιχα από τις παρακάτω εξισώσεις (6) και (7):

Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα:

$$S = \frac{n \cdot C}{\pi \cdot R} \quad (2.6)$$

Όπου

(n) ο αριθμός των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας

(C) η χορδή (πλάτος) της πτέρυγας

(R) το μήκος της πτέρυγας και

(π) η σταθερά ($\pi=3,14$)

Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα:

$$S = \frac{n \cdot C}{R} \quad (2.7)$$

Όπου,

(n) ο αριθμός των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας

(C) η χορδή (πλάτος) της πτέρυγας και

(R) το μήκος της πτέρυγας

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

3.1. Θεωρητικά Στοιχεία (IEC-61400-2/2013)

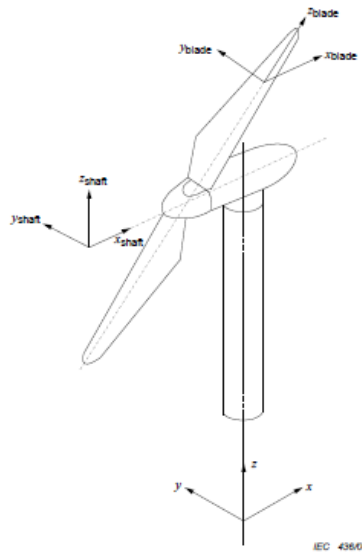
Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα αναλύσουμε τα θεωρητικά σημεία καθώς και τις περιπτώσεις των φορτίων που ασκούνται πάνω στις επιφάνειες και τα εξαρτήματα μιας μικρής ανεμογεννήτριας (SWT). Με βάση τη θεωρία που βασίζεται στο διεθνή κανονισμό των προτύπων **IEC-61400-2/2013 WIND TURBINES – Part 2 Small Wind Turbines**, θα μελετήσουμε ποια είναι τα κρίσιμα μεγέθη που χρειάζονται για τον υπολογισμό των αντοχών μιας μικρής ανεμογεννήτριας, ποιες είναι οι σχέσεις που απαιτούνται για τον υπολογισμό τους και τα αποτελέσματά τους.

Παρακάτω σε πρώτο στάδιο παρουσιάζεται το πρότυπο **IEC-61400-2/2013** και στη συνέχεια θα εφαρμόσουμε πραγματικές τιμές μεγεθών στις σχέσεις αυτές, για μια μελέτη περίπτωσης πολύ μικρής ανεμογεννήτριας, για κάθε περίπτωση φόρτισης που θα έχουμε αναλύσει στο θεωρητικό μέρος και θα εξάγουμε τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις αυτές.

3.2. Σύστημα συντεταγμένων (IEC-61400-2/2013)

Στην ενότητα αυτή θα ορίσουμε τις διευθύνσεις των φορτίων που εφαρμόζονται σε μια Α/Γ. Πιο συγκεκριμένα θα εξετάσουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στην Α/Γ οριζόντιου άξονα (Horizontal Axis Wind Turbine – HAWT) και σε Α/Γ κάθετου άξονα (Vertical Axis Wind Turbine – VAWT).

Στις Α/Γ οριζόντιου άξονα το σύστημα των αξόνων φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 6 όπου περιλαμβάνεται το σύστημα των αξόνων του πύργου (tower), το σύστημα των αξόνων του άξονα (shaft) και το σύστημα των αξόνων της πτέρυγας (blade) με τις αντίστοιχες συντεταγμένες (οι συντεταγμένες ακολουθούν το σύστημα συντεταγμένων της φοράς του δεξιού χεριού):



Εικόνα 3.3 – Σύστημα αξόνων A/Γ οριζόντιου άξονα (HAWT)

Πηγή: IEC 61400-2/2013

Όπου, τα παραπάνω συστήματα συντεταγμένων που απεικονίζονται στην εικόνα 6 αναλύονται σύμφωνα με τη φορά του σύστημα συντεταγμένων της φοράς του δεξιού χεριού [για στροφέιο A/Γ (rotor) με δεξιόστροφη φορά], ως εξής:

Για τον **πύργο (tower)** της A/Γ έχουμε:

- (x) η συντεταγμένη του άξονα πύργου της A/Γ με φορά θετική προς την κατεύθυνση του ανέμου (κατάντη)
- (z) η συντεταγμένη παράλληλη του άξονα του πύργου της A/Γ με φορά θετική προς πάνω
- (y) η συντεταγμένη που συμπληρώνει το δεξιόστροφο σύστημα των συντεταγμένων.

Για τον **άξονα (shaft)** της A/Γ έχουμε:

- (x_{shaft}) η συντεταγμένη του άξονα της A/Γ με φορά θετική προς την κατεύθυνση του ανέμου και δρα θετικά προς την περιστροφική κατεύθυνση

(z_{shaft}) και (y_{shaft}) οι συντεταγμένες αυτές για τον άξονα της Α/Γ εδώ δεν χρησιμοποιούνται.

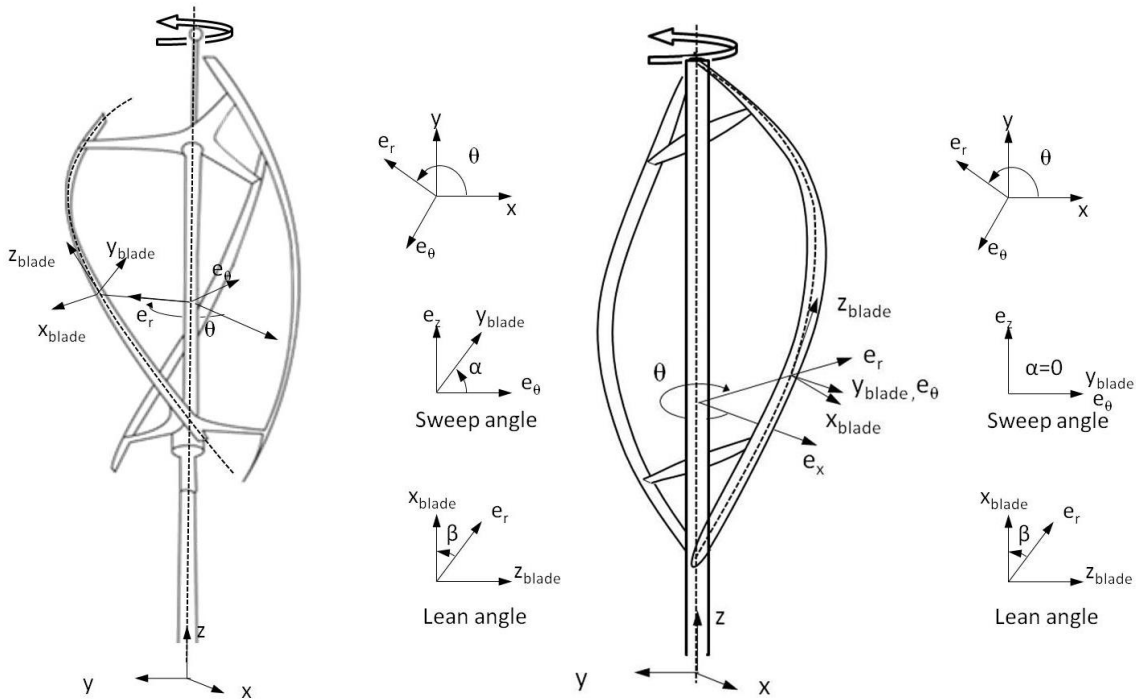
Για την **πτέρυγα (blade)** της Α/Γ έχουμε:

(x_{blade}) η συντεταγμένη της πτέρυγας της Α/Γ με φορά θετική προς την κατεύθυνση του ανέμου και δρα θετικά προς την περιστροφική κατεύθυνση

(z_{blade}) η συντεταγμένη της πτέρυγας της Α/Γ με φορά τέτοια ώστε να ενεργεί και να δρα θετικά έτσι ώστε να λυγίζει η πτέρυγα προς τα κάτω και

(y_{blade}) η συντεταγμένη της πτέρυγας της Α/Γ με θετική φορά προς την άκρη της πτέρυγας

Αντίστοιχα, στις Α/Γ κάθετου άξονα το σύστημα των αξόνων όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 7 περιλαμβάνεται το σύστημα των αξόνων του πύργου (tower), το σύστημα των αξόνων του ρότορα (rotor) και το σύστημα των αξόνων της πτέρυγας (blade) με τις αντίστοιχες συντεταγμένες:



(α) Α/Γ κάθετου άξονα τριών πετερύγων και αριστερόστροφης περιστροφής

(β) Α/Γ κάθετου άξονα δύο πετερύγων και δεξιόστροφης περιστροφής

Εικόνα 3.4 – Σύστημα αξόνων Α/Γ κάθετου άξονα (VAWT)

Πηγή: IEC 61400-2/2013

Όπου, αναλύοντας το σύστημα των συντεταγμένων της παραπάνω Α/Γ έχουμε:

Για τον **πύργο (tower)** της κάθετης Α/Γ έχουμε:

- (x) η συντεταγμένη του άξονα του πύργου της Α/Γ με φορά θετική προς τα κάτω (προς την κατεύθυνση του ανέμου)
- (z) η συντεταγμένη παράλληλη του άξονα του πύργου της Α/Γ με φορά θετική προς πάνω
- (y) η συντεταγμένη που συμπληρώνει το σύστημα συντεταγμένων του δεξιού χεριού.

Για το **ρότορα (rotor)** της κάθετης Α/Γ έχουμε:

Το σύστημα συντεταγμένων του **ρότορα (rotor)** της κάθετης Α/Γ είναι κυλινδρικό ως προς τον άξονα (z) του πύργου όπου η γωνία ($\theta=e_x, e_r$) που σχηματίζεται κατά την περιστροφή του ρότορα (είτε δεξιόστροφα είτε αριστερόστροφα) όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα 7 είναι θετική ως προς τον άξονα (x) του πύργου και οι (e_r, e_θ, e_z) συμπληρώνουν το σύστημα συντεταγμένων του δεξιού χεριού.

Για την **πτέρυγα (blade)** της κάθετης Α/Γ έχουμε:

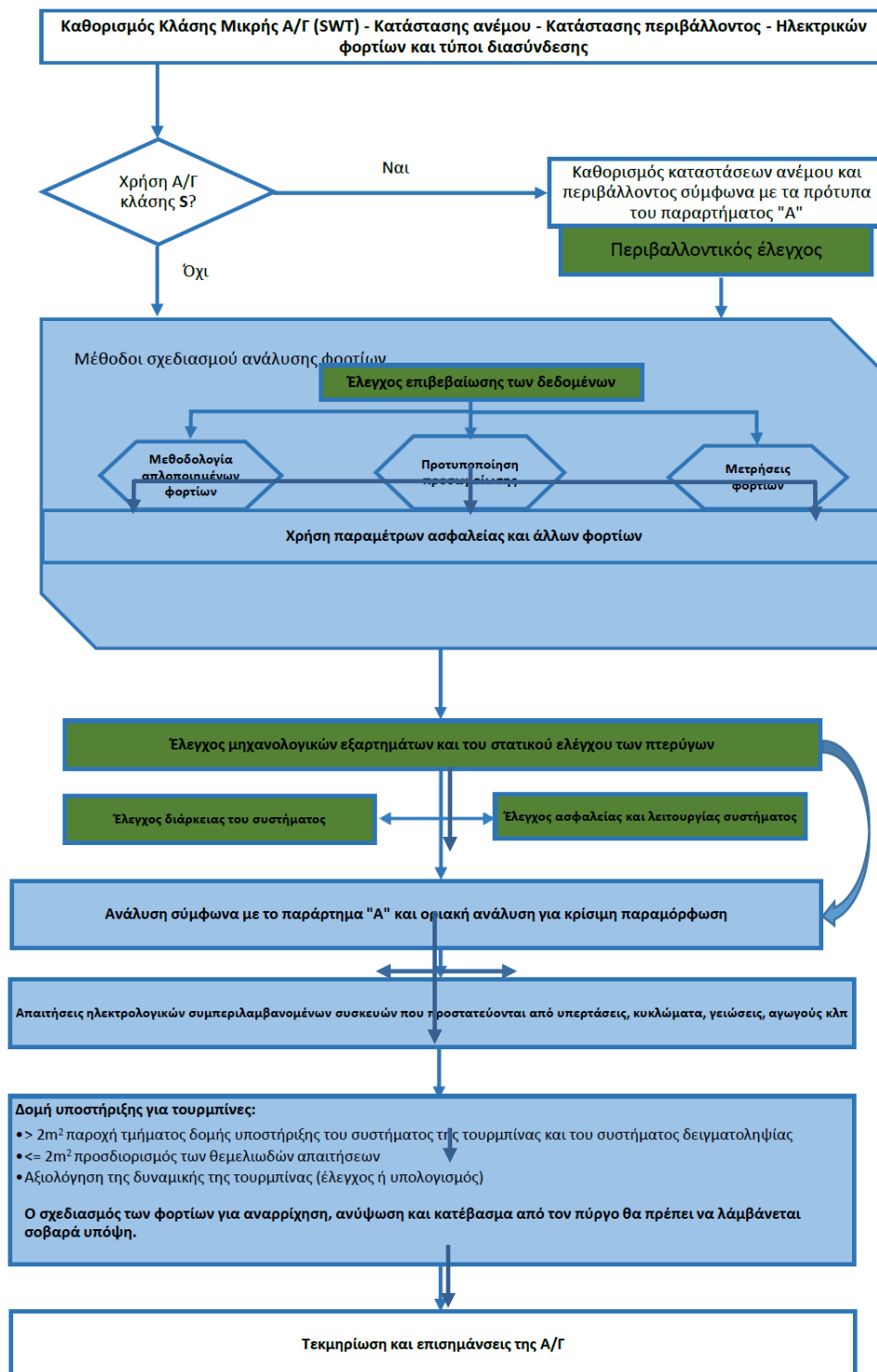
(z_{blade}) είναι η εφαπτομένη στη γραμμή αναφοράς της πτέρυγας της Α/Γ με φορά προς τα κάτω,

(y_{blade}) είναι κάθετη στη συντεταγμένη (z_{blade}) της πτέρυγας της Α/Γ και στο διάνυσμα ακτίνας (e_r) και η φορά του είναι αντίθετη προς τη φορά περιστροφής του ρότορα,

(x_{blade}) η συντεταγμένη της πτέρυγας της Α/Γ που συμπληρώνει το σύστημα συντεταγμένων του δεξιού χεριού.

3.3. Μεθοδολογία σχεδιασμού (IEC-61400-2/2013)

Η μέθοδος σχεδιασμού για ανεμογεννήτριες που καλύπτονται σε αυτό το πρότυπο φαίνονται στην παρακάτω εικόνα 3.3. Μια απλοποιημένη προσέγγιση επιτρέπεται για μια ποικιλία από τύπους ανεμογεννητριών. Για ανεμογεννήτριες με επιφάνεια σάρωσης μικρότερη από $2m^2$ ο πύργος (στήριξης) δε θεωρείται μέρος του σχεδιασμού.



Εικόνα 3.5 – Διάγραμμα ροής απόφασης (IEC 61400-2/2013)

Πηγή: Ιδία επεξεργασία από IEC 61400-2/2013

Τα αρχικά δεδομένα της ανεμογεννήτριας προσμετρούνται σε μια «δοκιμασία δεδομένων σχεδιασμού», και μετά θα πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές των προβλεπόμενων φορτίων του σχεδιασμού με ένα ή συνδυασμό των τριών (3) παρακάτω τρόπων:

- Για συγκεκριμένες διαμορφώσεις Α/Γ δίνεται μια απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμού. Ένας περιορισμένος αριθμός περιπτώσεων φορτίσεων δίνεται στην ενότητα 7.4 με απλούς τύπους (εξισώσεων) και απλοποιημένες εξωτερικές συνθήκες.

- Χρήση δυναμικού δομικού μοντέλου σε συνδυασμό με δοκιμές σχεδιαστικών δεδομένων και περιορισμένες μετρήσεις φορτίων πραγματικής κλίμακας για την επαλήθευση του μοντέλου. Αυτό το μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί για το προσδιορισμό των φορτίων για ένα εύρος ταχυτήτων ανέμου, χρησιμοποιώντας συνθήκες τύρβης (ή αναταραχών του αέρα) και άλλες ακραίες συνθήκες ανέμου που καθορίζονται στην ενότητα 3.4.4 του παρόντος και σχεδιαστικές καταστάσεις που καθορίζονται στην ενότητα 3.7 του παρόντος. Όλοι οι συνδυασμοί εξωτερικών συνθηκών και σχεδιαστικών καταστάσεων θα πρέπει να αναλύονται. Ένα μικρό ποσοστό τέτοιων συνδυασμών έχει οριστεί σε αυτό το πρότυπο ως περιπτώσεις φορτίσεων (load cases).

- Πραγματικής κλίμακας μετρήσεις φορτίων με ανάλυση φορτίων.

3.4. Εξωτερικές συνθήκες (IEC-61400-2/2013)

3.4.1. Γενικά

Οι μικρές ανεμογεννήτριες (SWT) είναι εκτεθειμένες σε περιβαλλοντικές και ηλεκτρικές συνθήκες που μπορούν να επηρεάσουν την αντοχή τους σε φορτία καθώς και τη λειτουργία τους. Για να εξασφαλιστεί το κατάλληλο επίπεδο ασφάλειας και αξιοπιστίας, οι περιβαλλοντικοί, ηλεκτρικοί και εδαφολογικοί παράμετροι θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στον σχεδιασμό και θα πρέπει να αναγράφονται με σαφήνεια στα σχεδιαστικά έγγραφα.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες διακρίνονται σε συνθήκες ανέμου και άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι ηλεκτρικές συνθήκες διακρίνονται σε συνθήκες δικτύου και τοπικές ηλεκτρικές συνθήκες, όπως μπαταρίες, υβριδικά συστήματα ή τοπικό δίκτυο. Οι εδαφολογικές ιδιότητες έχουν να κάνουν με το σχεδιασμό των θεμελίων των SWT.

Οι συνθήκες ανέμου είναι οι κύριες εξωτερικές συνθήκες που θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν για την δομική ακεραιότητα. Οι άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν επίσης τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού όπως τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου, την διάρκεια ζωής, τη διάβρωση, κλπ.

Κάθε τύπος εξωτερικών συνθηκών μπορεί να υποδιαιρεθεί σε κανονικές και ακραίες εξωτερικές συνθήκες. Οι κανονικές εξωτερικές συνθήκες κυρίως αφορούν τις μακράς διάρκειας συνθήκες λειτουργίας και κατασκευαστικής φόρτισης, ενώ οι ακραίες εξωτερικές συνθήκες αντιπροσωπεύουν τις σπάνιες αλλά εξαιρετικά κρίσιμες εξωτερικές σχεδιαστικές συνθήκες. Οι σχεδιαστικές περιπτώσεις φόρτισης αποτελούνται από ένα συνδυασμό αυτών των εξωτερικών συνθηκών με διάφορες λειτουργικές καταστάσεις της ανεμογεννήτριας.

3.4.2. Κλάσεις μικρών ανεμογεννητριών (SWT)

Οι εξωτερικές συνθήκες που λαμβάνουν μέρος στον σχεδιασμό είναι ανεξάρτητες από την επιθυμητή θέση ή το είδος θέσης για την εγκατάσταση μιας μικρής ανεμογεννήτριας. Οι κλάσεις των SWT καθορίζονται με βάση τις παραμέτρους ταχύτητας ανέμου και τύρβης. Ο σκοπός των κλάσεων αυτών είναι να καλύψουν τις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογών. Οι τιμές των παραμέτρων της ταχύτητας ανέμου και τύρβης έχουν σα σκοπό να αντιπροσωπεύουν τις χαρακτηριστικές τιμές των διαφορετικών περιοχών (εγκατάστασης) και δεν είναι ακριβής αναπαράσταση καμίας συγκεκριμένης θέσης εγκατάστασης. Ο σκοπός είναι να επιτευχθεί μια ξεκάθαρη κατηγοριοποίηση των SWT σε συνάρτηση με μια καλά ορισμένη στιβαρότητα που εξαρτάται απ' τον άνεμο. Ο παρακάτω πίνακας 3.1 δείχνει τις βασικές παραμέτρους που ορίζουν τις κλάσεις των SWT.

Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ειδικός σχεδιασμός, ορίζεται μια περαιτέρω κλάση SWT, η κλάση S (π.χ. ειδικές συνθήκες ανέμου ή άλλες εξωτερικές συνθήκες ή μια ειδική κλάση ασφάλειας). Οι σχεδιαστικές τιμές για κλάση S για μικρές ανεμογεννήτριες, θα πρέπει να επιλέγονται από τον σχεδιαστή και να καθορίζονται στα σχεδιαστικά έγγραφα. Για τέτοιους ειδικούς σχεδιασμούς, οι τιμές που επιλέγονται για τις σχεδιαστικές συνθήκες θα πρέπει να αντανακλούν σε ένα πιο βεβαρημένο περιβάλλον που προβλέπεται για τη χρήση της SWT.

Οι συγκεκριμένες εξωτερικές συνθήκες που καθορίζονται για τις κλάσεις I, II, III και IV δεν καλύπτουν ούτε εκτός εδάφους συνθήκες (offshore), ούτε συνθήκες ανέμου που συναντώνται σε τροπικές θύελλες όπως καταγίδες, κυκλώνες και τυφώνες. Τέτοιες συνθήκες απαιτούν σχεδιασμό ανεμογεννητριών κλάσης «S».

Πίνακας 3.2 – Βασικές παράμετροι κατηγοριών μικρών Α/Γ (SWT)

Κατηγορία Α/Γ (SWT)	(I)	(II)	(III)	(IV)	(S)
V_{ref} (m/s)	50	42,5	37,5	30	Οι τιμές στην κατηγορία αυτή των Α/Γ δίνονται από τους κατασκευαστές
V_{ave} (m/s)	10	8,5	7,5	6	
I_{15} (-)	0,18	0,18	0,18	0,18	
α (-)	2	2	2	2	
<p>Σημειώσεις:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Οι τιμές αυτές ισχύουν στο ύψος της πλήμνης (hub) 2) (I_{15}) είναι η αδιάστατη χαρακτηριστική τιμή της έντασης έντασης της τύρβης στα 15 m/s όπου η τιμή (0,18) είναι η ελάχιστη τιμή που πρέπει να χρησιμοποιηθεί 3) (α) είναι η αδιάστατη παράμετρος που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις υπολογισμού των μεγεθών. 					

Πηγή: IEC 61400-2/2013

Επιπροσθέτως σε αυτές τις βασικές παραμέτρους, πολλές σημαντικές περαιτέρω παράμετροι απαιτούνται για να οριστούν εξ' ολοκλήρου οι εξωτερικές συνθήκες που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό των SWT. Στις περιπτώσεις των κλάσεων I έως IV, που είναι οι κύριες SWT κλάσεις, οι τιμές αυτών των επιπρόσθετων παραμέτρων έχουν προσδιοριστεί στις παρακάτω παραγράφους .

Για την κλάση «S» των SWT ο κατασκευαστής θα πρέπει να αναγράφει στα έγγραφα του σχεδιασμού, τα μοντέλα που χρησιμοποιεί καθώς και τις τιμές των βασικών σχεδιαστικών παραμέτρων. Για τα μοντέλα που έχουν εγκριθεί σε αυτή την υποπαράγραφο,

η αναφορά στις τιμές των παραμέτρων τους είναι αρκετή. Τα σχεδιαστικά έγγραφα για ανεμογεννήτριες κλάσης «S» θα πρέπει να εμπεριέχουν πληροφορίες που αναφέρονται στο παράρτημα Β του IEC – 61400/2013.

Η σχεδιαστική διάρκεια ζωής θα πρέπει να καταδεικνύεται καθαρά στα σχεδιαστικά έγγραφα.

3.4.3. Συνθήκες ανέμου

Ένα σύστημα SWT θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε να αντέχει με ασφάλεια τις ανεμολογικές συνθήκες που έχουν οριστεί από την επιλεγμένη κλάση. Οι τιμές του σχεδιασμού για τις συνθήκες ανέμου θα πρέπει να έχουν οριστεί με σαφήνεια στα έγγραφα του σχεδιασμού. Οι συνθήκες ανέμου για τις περιπτώσεις φόρτισης και ασφάλειας χωρίζονται σε κανονικές συνθήκες ανέμου, που συμβαίνουν συχνά κατά τη διάρκεια λειτουργίας μιας SWT, και σε ακραίες συνθήκες ανέμου που μπορεί να έχουν περίοδο επανάληψης 1 έτους ή 50 ετών. Σε όλες τις κλάσεις θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η απόκλιση από τη κύρια ροή (του αέρα) αν είναι πάνω από 80 σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η γωνία απόκλισης της ροής μπορεί να υποτεθεί ότι δεν μεταβάλλεται με το ύψος. Σημείωση: Η εξαναγκασμένη ροή ανέμου μπορεί να επηρεάσει το furling, αν υπάρχει απόκλιση ανάμεσα στη διεύθυνση του συστήματος προσανεμισμού και στη διεύθυνση περιστροφής της ανεμογεννήτριας.

3.4.4. Κανονικές Συνθήκες ανέμου

3.4.4.1. Κατανομή ταχύτητας ανέμου

Η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι πολύ σημαντική για τον σχεδιασμό μιας SWT γιατί καθορίζει τη συχνότητα της επίδρασης των ιδιαίτερων κάθε φορά συνθηκών φόρτισης. Στην περίπτωση των τυπικών κλάσεων SWT, θα υποτίθεται η μέση ετήσια δεκάλεπτη τιμή της ταχύτητας του ανέμου, για κατανομή Rayleigh για τον σκοπό υπολογισμού των σχεδιαστικών φορτίων. Στην περίπτωση αυτή, η αθροιστική πιθανοτική κατανομή στο ύψος της πλήμνης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_R(V_{hub}) = 1 - \exp\left[-\pi\left(\frac{V_{hub}}{2V_{ave}}\right)^2\right] \quad (3.1)$$

3.4.4.2. Πρότυπο κανονικών συνθηκών ανέμου (NWP)

Το προφίλ ανέμου, (V_z) δηλώνει τη μέση ταχύτητα του ανέμου ως συνάρτηση του ύψους, (z) πάνω από το έδαφος. Στην περίπτωση τυποποιημένων κατηγοριών ανεμογεννητριών, το κανονικό προφίλ ταχύτητας ανέμου θεωρείται ότι δίδεται από το νόμο περί διατηρήσεως της ισχύος κι εκφράζεται από τη παρακάτω εξίσωση

Το προφίλ ανέμου (V_z) δείχνει τη μέση ταχύτητα ανέμου συναρτήσει του ύψους z πάνω απ' το έδαφος. Για τις τυπικές κλάσεις ανεμογεννητριών το κανονικό προφίλ ταχύτητας ανέμου θα δίνεται από τον εκθετικό νόμο:

$$V_z = V_{hub}\left(\frac{z}{z_{hub}}\right)^\alpha \quad (3.2)$$

Όπου (V_{hub}) είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψους της πλήμνης (hub)

(z) είναι το συγκεκριμένο ύψος πάνω από το έδαφος

(z_{hub}) είναι το ύψος της πλήμνης και

(α) μία σταθερά που ισούται με 0,2

Το υποτιθέμενο προφίλ ανέμου χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κάθετης διάτμησης του ανέμου κατά μήκος της επιφάνειας σάρωσης του δρομέα.

3.4.4.3. Κανονικό μοντέλο τύρβης (NTM)

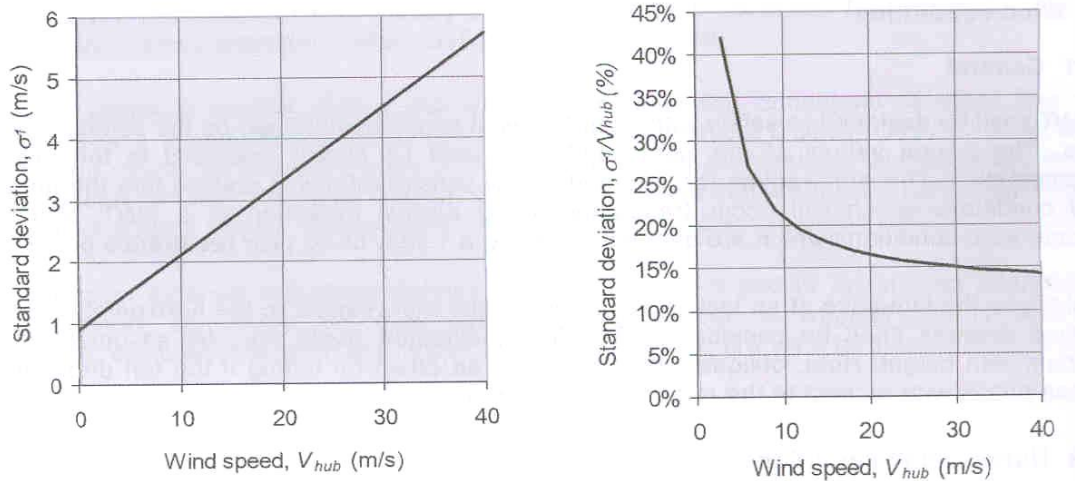
Το κανονικό μοντέλο τύρβης θα πρέπει να περιλαμβάνει διάτμηση ανέμου όπως περιγράφηκε στην παραπάνω υποενότητα (3.4.4.2). Η έκφραση «τύρβη του ανέμου» δείχνει τις στοχαστικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου για μέσο όρο δέκα λεπτών. Το μοντέλο τύρβης θα πρέπει να εμπεριέχει τα φαινόμενα μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, της

μεταβολής της κατεύθυνσης και της συστροφής (του αέρα). Για τις τυπικές κλάσεις SWT, οι φασματικές πυκνότητες ισχύος του τυχαίου πεδίου διανυσμάτων ταχυτήτων ανέμου, είτε χρησιμοποιούνται επακριβώς στο μοντέλο είτε όχι θα πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω απαιτήσεις:

α). Η χαρακτηριστική τιμή της τυπικής απόκλισης (σ_1) της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας του ανέμου θα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_1 = \frac{I_{15}(15 + \alpha V_{hub})}{(\alpha + 1)} \quad (3.3)$$

Οι τιμές για το (I_{15}) και (α) δίνονται στον παραπάνω πίνακα 3.1. Οι χαρακτηριστικές τιμές της τυπικής απόκλισης (σ_1) και της πυκνότητας τύρβης, (σ_1/V_{hub}) δείχνονται παρακάτω στην εικόνα 3.1:



Εικόνα 3.6 – Χαρακτηριστικά τύρβης ανέμου

Πηγή: IEC 61400-2/2013

β) Λόγω της υψηλής συχνότητας της υποκλίμακας της αδράνειας η φασματική πυκνότητα ισχύος της οριζόντιας συνιστώσας της τύρβης, $S_1(f)$, θα πρέπει να πλησιάζει ασυμπτωτικά τον τύπο:

$$S_1(f) = 0,05(\sigma_1)^2 \left(\frac{\Lambda_1}{V_{hub}}\right)^{-2} f^{-5} \quad (3.4)$$

γ) Ο παράγοντας κλίμακας (scale factor) τύρβης Λ_1 δίνεται από σχέση:

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0,7 z_{hub} & \text{για } z_{hub} < 30m \\ 21m & \text{για } z_{hub} \geq 30m \end{cases} \quad (3.5)$$

Στο Παράρτημα Δ του προτύπου IEC – 61400/2013 βρίσκεται ένα απλοποιημένο αιτιοκρατικό μοντέλο, το οποίο βασίζεται σε στοχαστική περιγραφή της τύρβης. Αυτό το μοντέλο θα πρέπει να χρησιμοποιείται όταν μπορεί να αποδειχθεί ότι η πτέρυγα της ανεμογεννήτριας έχει αντιδράει σε κυκλικά επαναλαμβανόμενα δείγματα ταχύτητας ανέμου με ικανοποιητική απόσβεση.

3.4.5. Ακραίες Συνθήκες ανέμου

Οι ακραίες συνθήκες ανέμου χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ακραίων φορτίων ανέμου στις μικρές Α/Γ (SWT). Αυτές οι συνθήκες περιλαμβάνουν αιχμές ταχύτητας ανέμου λόγω καταιγίδων και γρήγορες αλλαγές στην ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτές οι ακραίες συνθήκες εμπεριέχουν πιθανά φαινόμενα τύρβης έτσι ώστε μόνο τα αιτιοκρατικά φαινόμενα θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στους υπολογισμούς του σχεδιασμού.

3.4.5.1. Πρότυπο ακραίως συνθηκών ανέμου (EWM)

Οι ακραίες ταχύτητες ανέμου που καταγράφονται στην 50ετή καταγραφή των συνθηκών ανέμου (V_{e50}) και η ακραία ταχύτητα του ανέμου (V_{e1}) ενός έτους, θα πρέπει να βασίζονται στην ταχύτητα αναφοράς (V_{ref}) του ανέμου. Για το σχεδιασμό των μικρών Α/Γ οι παραπάνω ταχύτητες υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$V_{e50}(z) = 1,4 \cdot V_{ref} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{0,11} \quad (3.3)$$

και

$$V_{e1} = 0,75 \cdot V_{e50} \quad (3.4)$$

Όπου (V_{ref}) είναι η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου με μέσο όρο πάνω από 10 λεπτά στο ύψος της πλήμνης

(z) είναι το συγκεκριμένο ύψος πάνω από το έδαφος

(z_{hub}) είναι το ύψος της πλήμνης και

(1,4) ο συντελεστής των ρίπων στο ύψος της πλήμνης

3.4.5.2. Ακραία ριπή λειτουργίας (EOG)

Το μέγεθος της ριπής στο ύψος της πλήμνης, με περίοδο επανάληψης N ετών για τις τυπικές κλάσεις SWT, θα πρέπει να δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{gustN} = \beta \left(\frac{\sigma_1}{1+0,1\left(\frac{D}{\Lambda_1}\right)} \right) \quad (3.5)$$

Όπου

(σ_1) η τυπική απόκλιση

(Λ_1) η παράμετρος κλίμακας τύρβης

(D) η διάμετρος του δρομέα

$(\beta) = 4,8$ για $N=1$ και

$(\beta) = 6,4$ για $N=50$

Η ταχύτητα του ανέμου για περίοδο επανάληψης N ετών θα πρέπει να υπολογίζεται από την εξίσωση:

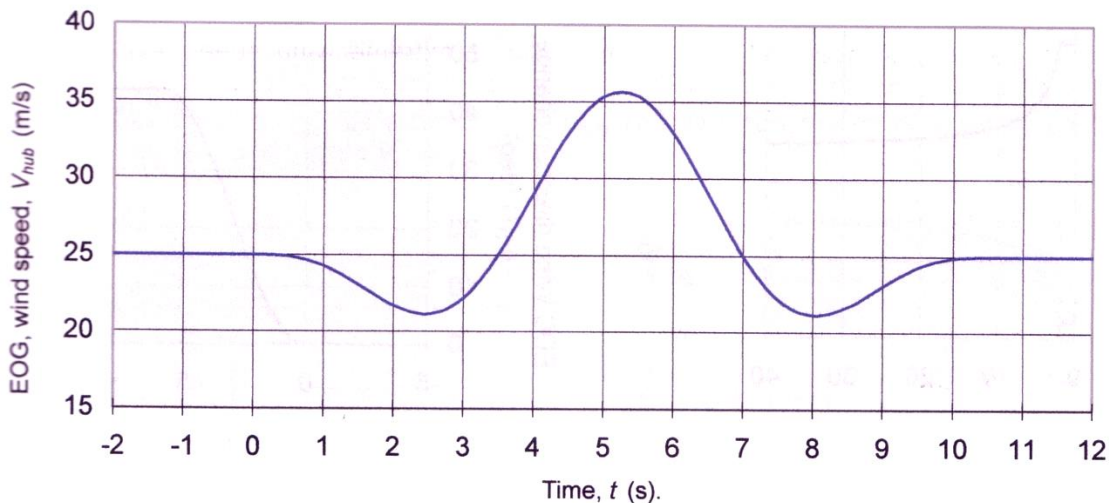
$$V_t = \begin{cases} V(z) - 0,37V_{gustN}\sin\left(\frac{3\pi t}{T}\right)\{1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\} & \text{για } 0 \leq t \leq T \\ V(z) & \text{για } t < 0 \text{ και } t > T \end{cases} \quad (3.6)$$

Όπου $V(z)$ ορίστηκε στην εξίσωση (3.2)

$T = 10,5s$ για $N=1$ και

$T = 14,0s$ για $N=50$

Για παράδειγμα, η ακραία ριπή λειτουργίας με περίοδο επανάληψης ενός έτους και $V_{hub} = 25m/s$ φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 3.7:



Εικόνα 3.7 – Παράδειγμα ακραίας ριπής λειτουργίας ($N=1$ και $V_{hub}=25m/s$)
 Πηγή: IEC 61400-2/2013

Οι τιμές των παραμέτρων και για τις δύο περιόδους επανάληψης επιλέχθηκαν έτσι ώστε να δίνουν το μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης.

3.4.5.3. Ακραία αλλαγή κατεύθυνσης (EDC)

Το μέγεθος της ακραίας αλλαγής κατεύθυνσης ($\theta \in N$) για περίοδο επανάληψης N ετών, θα πρέπει να υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$\theta_{\in N}(t) = \pm \beta \arctan \left(\frac{\sigma_1}{v_{hub}(1+0,1(\frac{D}{A_1}))} \right) \quad (3.7)$$

Όπου ($\theta_{\in N}$) περιορίζεται στο διάστημα $\pm 180^\circ$

(A_1) ο παράγοντας κλίμακας τύρβης

(D) η διάμετρος του δρομέα (ρότορα)

(β) = 4,8 για $N=1$ και

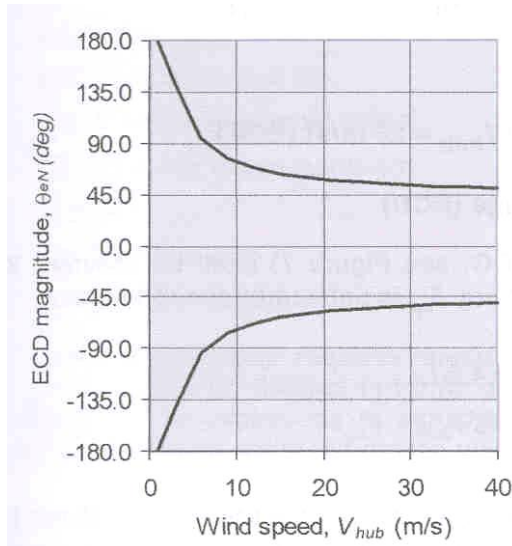
(β) = 6,4 για $N=50$

Η ακραία παροδική αλλαγή κατεύθυνσης για περίοδο επανάληψης (N) ετών, $\theta_N(t)$ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\theta_N(t) = \begin{cases} 0 & \text{για } t < 0 \\ 0,5\theta_{\in N}(1 - \cos(\frac{\pi t}{T})) & \text{για } 0 \leq t \leq T \\ \theta_{\in N} & \text{για } t > T \end{cases} \quad (3.8)$$

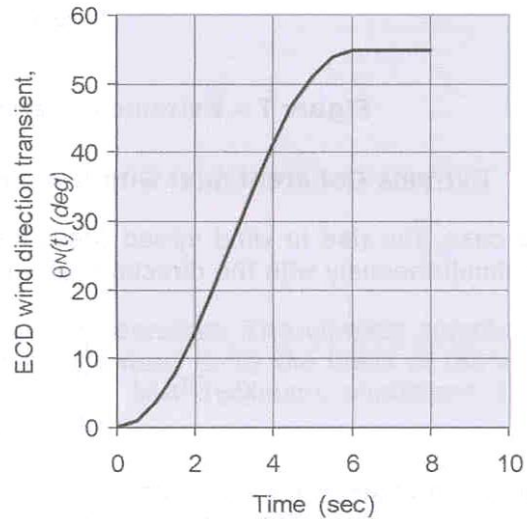
όπου ($T=6s$) είναι η διάρκεια της παροδικής αλλαγής κατεύθυνσης. Το πρόσημο που θα επιλεγθεί, πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να υπεισέρχεται η χειρότερη μεταβατική φόρτιση. Στο τέλος της μεταβατικής αλλαγής κατεύθυνσης η κατεύθυνση υποτίθεται ότι παραμένει απaráλλαχτη.

Ως παράδειγμα, η ακραία αλλαγή κατεύθυνσης με περίοδο επανάληψης 50 ετών και $V_{hub}=25\text{m/s}$ απεικονίζεται στις παρακάτω εικόνες 3.8 και 3.9.



Εικόνα 3.8 – Παράδειγμα ακραίου μεγέθους αλλαγής διεύθυνσης ($N=50$, $D=5\text{m}$ και $Z_{hub}=20\text{m}$)

Πηγή: IEC 61400-2/2013

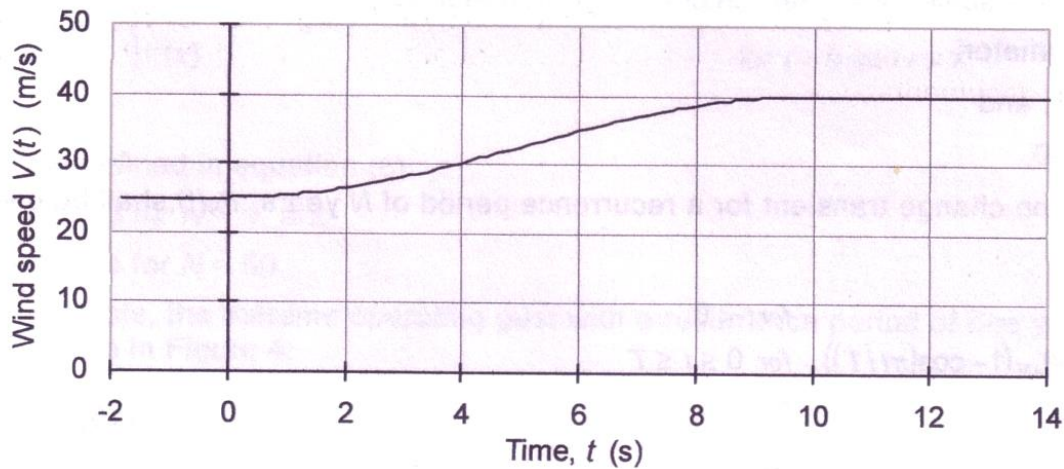


Εικόνα 3.9 – Παράδειγμα ακραίας αλλαγής διεύθυνσης ($N=50$, $V_{hub}=25\text{m/s}$)

Πηγή: IEC 61400-2/2013

3.4.5.4. Ακραία ριπή συνοχής (ECG)

Για σχεδιασμό ανεμογεννητριών για τις τυπικές SWT κλάσεις, θα υποτίθεται ακραία ριπή συνοχής με μέγεθος ταχύτητας ($V_{cg}=15\text{m/s}$). Η ακραία ριπή συνοχής για ($V_{hub}=25\text{m/s}$) φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 3.10:



Εικόνα 3.10 –Ακραία ριπή συνοχής ($V_{hub}=25m/s$) (ECG)

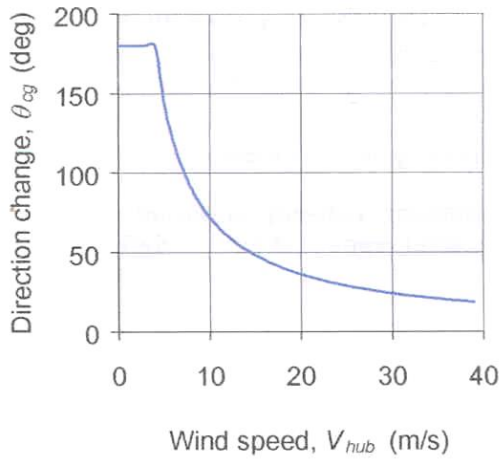
Πηγή: IEC 61400-2/2013

3.4.5.5. Ακραία ριπή συνοχής με αλλαγή κατεύθυνσης (ECD)

Σε αυτή την περίπτωση η αύξηση στην ταχύτητα του ανέμου (που περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα ECG εικόνα 3.10) θα υποτίθεται ότι συμβαίνει ταυτόχρονα με αλλαγή κατεύθυνσης θ_{cg} όπου θ_{cg} ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

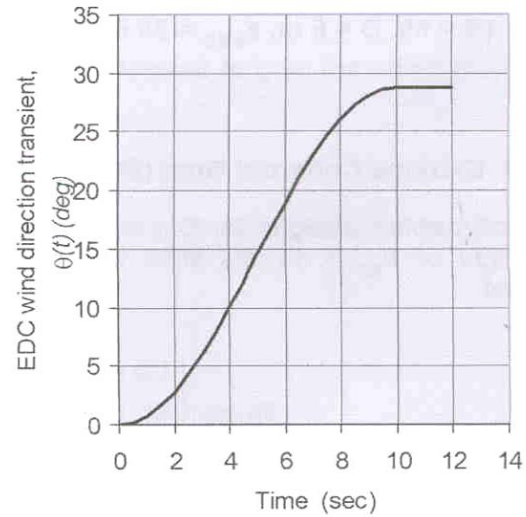
$$\theta_{cg}(V_{hub}) = \begin{cases} 180^\circ & \text{για } V_{hub} < 4m/s \\ \frac{720^\circ}{V_{hub}} & \text{για } 4m/s \leq V_{hub} \leq V_{ref} \end{cases} \quad (3.9)$$

Η αλλαγή κατεύθυνσης θ_{cg} , ως συνάρτηση του V_{hub} και ως συνάρτηση του χρόνου για $V_{hub}=25m/s$, φαίνεται στις παρακάτω εικόνες 3.11 και 3.12 αντίστοιχα.



Εικόνα 3.11 –Αλλαγής διεύθυνσης για ECD

Πηγή: IEC 61400-2/2013



Εικόνα 3.12 – Αλλαγής διεύθυνσης συναρτήσει του χρόνου για $V_{hub}=25\text{m/s}$

Πηγή: IEC 61400-2/2013

Η ταυτόχρονη αλλαγή κατεύθυνσης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0^\circ & \text{για } t < 0 \\ \pm 0,5\theta_{cg}(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)) & \text{για } 0 \leq t \leq T \\ \pm\theta_{cg} & \text{για } t > T \end{cases} \quad (3.10)$$

3.5. Άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες

3.5.1. Γενικά

Άλλες περιβαλλοντικές (κλιματολογικές) συνθήκες, εκτός από τον άνεμο, που μπορούν να επηρεάσουν την ακεραιότητα και την ασφάλεια των Α/Γ είναι η θερμική, η φωτοχημική, η διαβρωτική, η μηχανική, η ηλεκτρική κι άλλες φυσικές επιδράσεις. Επιπλέον, οι αρνητικές

αυτές επιδράσεις επιδεινώνουν ακόμη περισσότερο το πρόβλημα ή μπορούν να αυξήσουν την επίδρασή τους, όταν υπάρχει συνδυασμός των κλιματικών παραμέτρων.

Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη τουλάχιστον ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και η δράση τους που αναφέρεται στα πρότυπα του σχεδιασμού. Τέτοιες περιβαλλοντικές συνθήκες που λαμβάνουν μέρος στον τόπο εγκατάστασης των μικρών Α/Γ (SWT) είναι:

- Η θερμοκρασία,
- η υγρασία,
- η πυκνότητα του αέρα
- η ηλιακή ακτινοβολία,
- η βροχή, το χαλάζι, το χιόνι και ο πάγος,
- οι χημικές δραστικές ουσίες
- μηχανικά ενεργά σωματίδια
- οι αστραπές
- ο σεισμός και
- το θαλάσσιο περιβάλλον – διάβρωση.

Το θαλάσσιο περιβάλλον προϋποθέτει επιπρόσθετο σχεδιασμό. Οι κλιματικές συνθήκες του σχεδιασμού θα ορίζονται με όρους αντιπροσωπευτικών τιμών ή με τα όρια των μεταβαλλόμενων συνθηκών. Η πιθανότητα ταυτόχρονης συνύπαρξης κλιματικών συνθηκών θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά την επιλογή των τιμών σχεδιασμού.

Μεταβολές στις κλιματολογικές συνθήκες μέσα σε κανονικά όρια, τα οποία ανταποκρίνονται σε περίοδο (επανάληψης) ενός έτους, δεν θα πρέπει να εμπλέκονται με την κανονική λειτουργία μιας SWT που έχει σχεδιαστεί.

3.5.2. Άλλες κανονικές περιβαλλοντικές συνθήκες

Άλλες κανονικές τιμές περιβαλλοντικών συνθηκών, οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι:

- 1) Η κανονική λειτουργία του συστήματος σε θερμοκρασίας περιβάλλοντος (-10°C έως $+40^{\circ}\text{C}$),
- 2) η σχετική υγρασία έως 95%
- 3) η ατμοσφαιρική περιεκτικότητα ισοδύναμη με εκείνη μιας μη μολυσμένης εσωτερικής ατμόσφαιρας (IEC 60721-2-1),
- 4) η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας 1.000 W/m^2 και
- 5) η πυκνότητα αέρα $1,225 \text{ kg/m}^3$.

Όταν ο σχεδιαστής καθορίζει πρόσθετες παραμέτρους εξωτερικής κατάστασης, οι παράμετροι αυτοί και οι τιμές τους θα πρέπει να αναφέρονται στην τεκμηρίωση του σχεδιασμού και να ακολουθούν τις απαιτήσεις του προτύπου (IEC 60721-2-1).

3.6. Κατασκευαστικός σχεδιασμός

3.6.1. Γενικά

Ο κατασκευαστικός σχεδιασμός για ανεμογεννήτριες θα πρέπει να βασίζεται στην εξακρίβωση της δομικής ακεραιότητας όλων των επιμέρους στοιχείων που τις αποτελούν, για κρίσιμες περιπτώσεις φορτίσεων, από τις πτέρυγες μέχρι τα θεμέλια. Η αντοχή σε μέγιστα φορτία και η κοπωτική αντοχή των δομικών μερών θα πρέπει να εξακριβωθεί με υπολογισμούς ή/και με δοκιμές για τον καθορισμό της δομικής ακεραιότητας μιας SWT με το κατάλληλο επίπεδο ασφαλείας.

Η κατασκευαστική ανάλυση θα πρέπει να βασίζεται στο ISO 2394 ή σε ισοδύναμο πρότυπο, εκεί όπου μπορεί να εφαρμοστεί.

3.6.2. Μεθοδολογία σχεδιασμού

Για το σχεδιασμό ανεμογεννητριών θα πρέπει να διαπιστωθεί ότι δεν υπερβαίνονται οι οριακές καταστάσεις.

Υπάρχουν τρεις τρόποι για τον καθορισμό των σχεδιαστικών φορτίων μιας ανεμογεννήτριας:

- 1) Απλοποιημένες εξισώσεις φορτίων
- 2) Κατασκευή αεροελαστικού μοντέλου
- 3) Δοκιμές με μηχανικά φορτία

3.6.3. Φορτία και περιπτώσεις φόρτισης

3.6.3.1. Γενικά

Οι ακόλουθοι τύποι φορτίων θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν.

3.6.3.2. Ταλαντώσεις, αδρανειακά και βαρυτικά φορτία

Τα αδρανειακά και βαρυτικά φορτία είναι στατικά και δυναμικά φορτία που ενεργούν σε μια SWT λόγω αδρανειακής, γυροσκοπικής, ταλαντωτικής, περιστροφικής, βαρυτικής και σεισμικής δραστηριότητας (ή κίνηση της κατασκευής στήριξης όπως π.χ. σε πλοία κλπ.).

Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων του αιολικού συστήματος.

3.6.3.3. Αεροδυναμικά φορτία

Τα αεροδυναμικά φορτία είναι στατικά και δυναμικά φορτία που προκαλούνται από την ροή του αέρα και την αλληλεπίδρασή του με τα στατικά και τα κινούμενα μέρη της SWT. Η ροή του αέρα θα θεωρείται ότι εξαρτάται από την περιστροφική ταχύτητα του δρομέα, την ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο του δρομέα, την τύρβη, την πυκνότητα του αέρα, και τα αεροδυναμικά σχήματα των επιμέρους μερών της ανεμογεννήτριας μαζί με τα φαινόμενα αλληλεπίδρασής τους, συμπεριλαμβανομένων των αεροελαστικών φαινομένων.

3.6.3.4. Φορτία κατά τη λειτουργία

Τα φορτία αυτά οφείλονται από την λειτουργία και τον έλεγχο του αιολικού συστήματος. Τα λειτουργικά φορτία μπορεί να προκληθούν από προσανεμισμό, φρενάρισμα, furling, μεταβολή της γωνίας σφήνωσης της πτέρυγας, σύνδεση στο δίκτυο, κλπ.

3.6.3.5. Άλλα φορτία

Επίσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν και όλα τα φορτία που μπορεί να υπεισέρχονται λόγω ειδικών περιβαλλοντικών συνθηκών λειτουργίας, που έχουν καθοριστεί από τον κατασκευαστή (π.χ. κυματικά φορτία, φορτία ομόρρου, φορτία πάγου, μεταφοράς, συναρμολόγησης, επισκευής και συντήρησης, κλπ.).

3.6.3.6. Περιπτώσεις φόρτισης

Για σχεδιαστικούς σκοπούς, η διάρκεια ζωής μιας SWT μπορεί να αναπαρασταθεί από μια σειρά σχεδιαστικών καταστάσεων οι οποίες καλύπτουν τις πιο σημαντικές συνθήκες που μπορεί να συναντηθούν από μια ανεμογεννήτρια.

Οι περιπτώσεις φόρτισης θα καθορίζονται από τον συνδυασμό συγκεκριμένων λειτουργικών καταστάσεων, συναρμολόγησης, έγερσης και συντήρησης ή σχεδιαστικές καταστάσεις με τις εξωτερικές συνθήκες. Όλες οι σχετικές περιπτώσεις φόρτισης, που έχουν λογική πιθανότητα να συμβούν, θα πρέπει να συνυπολογίζονται με την συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου και προστασίας.

Γενικά οι περιπτώσεις φόρτισης σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την κατασκευαστική ακεραιότητα μιας SWT θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν με τους ακόλουθους συνδυασμούς:

- Λειτουργία ανεμογεννήτριας χωρίς βλάβη και με κανονικές εξωτερικές συνθήκες
- Λειτουργία ανεμογεννήτριας χωρίς βλάβη και με ακραίες εξωτερικές συνθήκες
- Λειτουργία ανεμογεννήτριας με βλάβη και με κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες
- Καταστάσεις μεταφοράς, εγκατάστασης και συντήρησης με κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες

Αν υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ ακραίας εξωτερικής συνθήκης και κατάστασης βλάβης, ένας ρεαλιστικός συνδυασμός αυτών των δύο θα πρέπει να θεωρείται ως σχεδιαστική περίπτωση φόρτισης.

Μέσα σε κάθε κατάσταση σχεδιασμού θα πρέπει να θεωρούνται πολλές περιπτώσεις φόρτισης για την επιβεβαίωση της κατασκευαστικής ακεραιότητας των μερών μιας SWT. Οι ελάχιστες περιπτώσεις φόρτισης που πρέπει να θεωρηθούν βρίσκονται στους παρακάτω πίνακες 3.2 και 3.4. Σε αυτούς τους πίνακες οι περιπτώσεις φόρτισης για τον σχεδιασμό καταδεικνύονται για κάθε σχεδιαστική κατάσταση από την περιγραφή του ανέμου, τις ηλεκτρικές και άλλες εξωτερικές συνθήκες.

Όπου το σύστημα ελέγχου και προστασίας δεν παρακολουθεί και δεν περιορίζει κάποιες βασικές παραμέτρους της ανεμογεννήτριας, αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν στις περιπτώσεις φόρτισης.

Παραδείγματα τέτοιων παραμέτρων είναι:

- Το τύλιγμα των καλωδίων
- Οι ταλαντώσεις
- Ταχύτητα δρομέα και
- Ταλαντώσεις πτερύγων

3.7. Απλοποιημένο μοντέλο φορτίσεων

3.7.1. Γενικά

Για συγκεκριμένες διαμορφώσεις ανεμογεννήτριας τα φορτία μπορούν να υπολογίζονται χρησιμοποιώντας απλές, συντηρητικές εξισώσεις, για περιορισμένο αριθμό περιπτώσεων φόρτισης. Το παράρτημα «Η» του προτύπου IEC – 61400/2013 παρέχει περαιτέρω πληροφόρηση για αυτές τις εξισώσεις. Αν η διαμόρφωση της ανεμογεννήτριας δεν καλύπτει τις προϋποθέσεις που τίθενται από το πρότυπο για την χρησιμοποίηση αυτών των εξισώσεων, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι απλές εξισώσεις, και αντί αυτών θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι εναλλακτικές λύσεις του αεροελαστικού σχεδιασμού ή των μετρήσεων φορτίων.

Για διαμορφώσεις ανεμογεννήτριας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλές εξισώσεις, θα πρέπει να καλύπτουν τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Να είναι οριζοντίου άξονα
- Τύπος δρομέα με δύο ή περισσότερες πτέρυγες
- Πτέρυγες σε πρόβολο
- Ακαμπτη πλήμνη(όχι δεμένη ή γαντζωμένη πλήμνη)

Η διαμόρφωση της ανεμογεννήτριας μπορεί να είναι με προσήνεμη ή υπήνεμη διεύθυνση δρομέα. μπορεί να είναι σταθερής ή μεταβλητής ταχύτητας. μπορεί να έχει μηχανισμό ενεργητικού ή παθητικού ελέγχου του βήματος (γωνίας σφήνωσης) της περύγωσης ή να είναι σταθερού βήματος. Μπορεί να έχει σύστημα furling που να την κινεί σε κάθετους, οριζόντιους ή ενδιάμεσους άξονες, όπως επίσης και να μην έχει καθόλου αυτή τη λειτουργία.

Το απλοποιημένο μοντέλο φόρτισης που περιγράφηκε σε αυτή την παράγραφο, χρησιμοποιεί παραμέτρους δεδομένων (με εξαίρεση τον μέγιστο ρυθμό προσανεμισμού) οι οποίες είναι:

- Η σχεδιαστική ταχύτητα περιστροφής, n_{design}
- Η σχεδιαστική ταχύτητα ανέμου, V_{design}
- Η σχεδιαστική αξονική ροπή, Q_{design}
- Μέγιστος ρυθμός προσανεμισμού, $\omega_{yaw,max}$
- Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής

Ο λόγος (λ) ταχυτήτων ακροπτερυγίου (Tip Speed Ratio – TSP) κατά τον σχεδιασμό ορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda = \frac{V_{tip}}{V_{hub}} = \frac{\omega \cdot R}{V_{hub}} \Rightarrow \lambda_{design} = \frac{R}{V_{design}} \cdot \frac{\pi n_{design}}{30} \quad (3.11)$$

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30} \quad (3.12)$$

Όπου (V_{hub}) είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψους της πλήμνης (hub)

(ω) η γωνιακή ταχύτητα δρομέα

(R) η ακτίνα του δρομέα

(n_{design}) η ταχύτητα περιστροφής δρομέα για (V_{design}) και

(π) ο συντελεστής 3,14.

Οι περιπτώσεις φόρτισης για τους απλοποιημένους υπολογισμούς φορτίων αναγράφονται περιληπτικά στον πίνακα 3.2. Οι συνιστώσες φόρτισης για τους απλοποιημένους υπολογισμούς φορτίων βρίσκονται σε κάθε ενότητα που αφορά τις περιπτώσεις φόρτισης.

Για κάθε σχεδιαστική κατάσταση αναφέρεται και ο κατάλληλος τύπος ανάλυσης, με «F» και «U», στον πίνακα 3.2. Το «F» αναφέρεται σε ανάλυση κοπωτικών φορτίων, για να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό των κοπωτικών δυνάμεων. Το «U» αναφέρεται σε ανάλυση μέγιστων φορτίων.

Πίνακας 3.3 – Περιπτώσεις φόρτισης σχεδιασμού για την μέθοδο απλοποιημένων υπολογισμών φορτίων

Κατάσταση σχεδιασμού	Περιπτώσεις φορτίων		Ταχύτητα ανέμου	Τύπος ανάλυσης	Παρατηρήσεις
Παραγωγή ισχύος	A	Κανονική λειτουργία		F	
	B	Προσανεμισμός (Yaw)	$V_{hub} = V_{desing}$	U	
	C	Σφάλμα προσανεμισμού (περιστροφής) (Yaw error)	$V_{hub} = V_{desing}$	U	
	D	Μέγιστη ώση	$V_{hub} = 2,5 V_{ave}$	U	Ο δρομέας περιστρέφεται αλλά θα μπορούσε να είναι σε περυγισμό ή furling
Παραγωγή ισχύος υπεισέρχουσα βλάβη	E	Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής		U	
	F	Βραχυκύκλωμα στο σημείο σύνδεσης του φορτίου	$V_{hub} = V_{desing}$	U	Μέγιστη ροπή βραχυκυκλώματος της γεννήτριας
Τερματισμός λειτουργίας	G	Τερματισμός λειτουργίας (φρενάρισμα)	$V_{hub} = V_{desing}$	U	
Σταθμευμένη (ρελαντί ή ακίνητη)	H	Φορτία ανέμου όντας σταθμευμένη	$V_{hub} = V_{e50}$	U	Η τουρμπίνα μπορεί να περιστρέφεται με την ελάχιστη ταχύτητα (ρελαντί) ή να έχει σταματήσει. Δεν έγινε καμία χειροκίνητη παρέμβαση.

Κατάσταση σχεδιασμού	Περιπτώσεις φορτίων		Ταχύτητα ανέμου	Τύπος ανάλυσης	Παρατηρήσεις
Σταθμευμένη υπό συνθήκες βλαβών	I	Φορτία ανέμου κατά τη στάθμευσης, μέγιστη έκθεση	$V_{hub} = V_{ref}$	U	Η ανεμογεννήτρια φορτίζει με τις πιο δυσμενείς συνθήκες έκθεσής της.
Συνθήκες μεταφοράς, συναρμολόγησης, συντήρησης και επισκευής	J	Θα αναφέρεται από τον κατασκευαστή		U	
Σημείωση: «F» ανάλυση των φορτίων κόπωσης «U» ανάλυση των τελικών φορτίων					

Πηγή: IEC 61400-2/2013

Άλλες σχεδιαστικές περιπτώσεις φόρτισης, σχετικές με την ασφάλεια θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν αν είναι απαραίτητος ειδικός σχεδιασμός SWT.

3.7.2. Περίπτωση φόρτισης «A»: Κανονική λειτουργία (Normal Operation)

Το φορτίο σχεδιασμού για την κανονική λειτουργία είναι ένα κοπωτικό φορτίο. Η περίπτωση φόρτισης υποθέτει ένα μεταβλητό εύρος φορτίσεων για τη πτέρυγα και τον άξονα. Οι τιμές τους δίνονται παρακάτω. Το εύρος των τιμών που θα θεωρούνται στον υπολογισμό κόπωσης θα είναι τιμές (peak-to-peak) από μέγιστο σε μέγιστο. Το εύρος τιμών ταχυτήτων είναι από $(0,5n_{desing})$ έως $(1,5n_{desing})$. Οι μέσες τιμές του εύρους φορτίσεων μπορούν να αγνοηθούν.

Φορτία πτέρυγας:

$$\Delta F_{zB} = 2m_B R_{cog} \omega^2 n_{desing} \quad (3.13)$$

$$\Delta M_{xB} = \frac{Q_{desing}}{B} + 2m_B g R_{cog} \quad (3.14)$$

$$\Delta M_{yB} = \frac{\lambda_{desing} Q_{desing}}{B} \quad (3.15)$$

Όπου (ΔF_{zB}) τα φορτία λόγω φυγοκεντρικών δυνάμεων

(ΔM_{xB}) καμπτική ροπή κατά το μήκος του χείλους της πτέρυγας

(ΔM_{yB}) καμπτική ροπή κάθετα στις ροπές

(m_B) η μάζα της πτέρυγας

(R_{cog}) η απόσταση του κέντρου βάρους (κ.β.) της πτέρυγας έως το κέντρο του δρομέα

(ω) η γωνιακή ταχύτητα

(n_{desing}) η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

(Q_{desing}) η ροπή σχεδίασης στο δρομέα

(λ_{desing}) ο λόγος ταχύτητας σχεδιασμού

(B) ο αριθμός των πτερύγων και

(g) η επιτάχυνση της βαρύτητας

Η κοπωτική φόρτιση στη πτέρυγα θα θεωρείται ότι συμβαίνει πάνω στην σύνδεση της βάσης της πτέρυγας ή στη βάση της σύνδεσης της πλήμνης, που σε μία απ' τις δύο περιπτώσεις θα καθορίζεται να έχει τη μικρότερη μέγιστη αντοχή. Οι υπολογισμένες τάσεις είναι συνδυασμός φυγοκεντρικών φορτίων (F_{zB}) και ροπών κάμψης (M_{xB} και M_{yB}).

Φορτία άξονα:

$$\Delta F_{x-shaft} = \frac{3 \lambda_{desing} Q_{desing}}{2R} \quad (3.16)$$

$$\Delta M_{x-shaft} = Q_{desing} + 2m_r g e_r \quad (3.17)$$

$$\Delta M_{shaft} = 2m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x-shaft} \quad (3.18)$$

Όπου ($\Delta F_{x-shaft}$) τα φορτία λόγω ώσης στον άξονα

$(\Delta M_{x-shaft})$ η ροπή στρέψης στον άξονα

(ΔM_{shaft}) η ροπή κάμψης στον άξονα

(R) η ακτίνα δρομέα

(m_r) η μάζα του δρομέα (πτέρυγες, πλήμνη)

(L_{rb}) η απόσταση μεταξύ του κέντρου του δρομέα έως το πρώτο έδρανο

(e_r) η απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους του δρομέα έως τον άξονα περιστροφής.

Διευκρινίζεται ότι $e_r = 0,005R$, εκτός αν αποδειχθεί στα σχεδιαστικά έγγραφα ότι μια χαμηλότερη τιμή είναι λογική.

Τα κοπωτικά φορτία στον άξονα του δρομέα θα θεωρούνται στο πρώτο έδρανο του άξονα (το κοντινότερο στον δρομέα). Το εύρος των τάσεων θα πρέπει να υπολογίζεται από τον συνδυασμό των φορτίων ώσης ($F_{x-shaft}$), της ροπής στρέψης ($M_{x-shaft}$) και της ροπής κάμψης (M_{shaft}).

3.1.1. Περίπτωση φόρτισης «B»: Προσανεμισμός (Yawing)

Για αυτή τη περίπτωση φόρτισης, τα μέγιστα φορτία (γυροσκοπικές δυνάμεις και ροπές) θα υπολογίζονται υποθέτοντας ότι η μέγιστη ταχύτητα προσανεμισμού $\omega_{yaw,max}$ συμβαίνει με n_{design} .

Για ένα παθητικό σύστημα προσανεμισμού, ο μέγιστος ρυθμός προσανεμισμού δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\omega_{yaw,max} = 3 - 0,01(\pi R^2 - 2) \quad (3.19)$$

Για όλες τις ανεμογεννήτριες με επιφάνεια σάρωσης μικρότερη των $2m^2$ ο μέγιστος ρυθμός προσανεμισμού είναι $3rad/s$.

Για ένα ενεργητικό σύστημα προσανεμισμού, ο μέγιστος ρυθμός προσανεμισμού θα καθορίζεται από μετρήσεις σε νηνεμία. Αν ο μέγιστος ρυθμός προσανεμισμού αναμένεται να συμβεί υπό ειδικές συνθήκες, όπως μεγαλύτερος ρυθμός προσανεμισμού έκτακτης ανάγκης, ο ενεργητικός ρυθμός προσανεμισμού θα πρέπει να μετρηθεί υπό αυτές τις συνθήκες.

Τα φορτία λόγω καμπτικής ροπής M_{yB} στο φτερό και καμπτικής ροπής στον άξονα M_{shaft} θα πρέπει να υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$M_{yB} = m_B \omega_{yaw,max}^2 L_{rt} R_{cog} + 2\omega_{yaw,max} I_B \omega_{n,desing} + \frac{R}{9} \Delta F_{x-shaft} \quad (3.20)$$

Το $\Delta F_{x-shaft}$ δίνεται από την εξίσωση (3.16).

Για τον άξονα, τα φορτία εξαρτώνται από τον αριθμό των περυγών.

Για περωτή με δύο πτέρυγες:

$$M_{shaft(2blades)} = 4\omega_{yaw,max} \omega_{n,desing} I_B + (m_r g L_{rb}) + \frac{R}{6} \Delta F_{x-shaft} \quad (3.21)$$

Για περωτή με τρεις πτέρυγες:

$$M_{shaft(3blades)} = B\omega_{yaw,max} \omega_{n,desing} I_B + (m_r g L_{rb}) + \frac{R}{6} \Delta F_{x-shaft} \quad (3.22)$$

3.1.2. Περίπτωση φόρτισης «C»: Σφάλμα προσανεμισμού (Yaw error)

Όλες οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν με κάποιο σφάλμα στον προσανεμισμό. Σε αυτή την περίπτωση φόρτισης θεωρείται σφάλμα 30°. Η καμπτική ροπή κάθετα στις χορδές που οφείλεται στο σφάλμα προσανεμισμού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$M_{yB} = \frac{1}{8} \rho A_{projB} C_{I,max} R^3 \omega_{n,desing}^2 \left[1 + \frac{4}{3\lambda_{desing}} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{2\lambda_{desing}} \right)^2 \right] \quad (3.23)$$

Όπου (ρ) η πυκνότητα του αέρα και ισούται με 1,225

(A_{projB}) η σχηματιζόμενη από την πτέρυγα επιφάνεια

($C_{I,max}$) ο μέγιστος συντελεστής άνωσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τον μέγιστο συντελεστή άνωσης, ($C_{I,max}$) θα πρέπει να χρησιμοποιείται η τιμή ίση με (2,0).

3.1.3. Περίπτωση φόρτισης «D»: Μέγιστη ώση (Maximum Thrust)

Μια SWT μπορεί να εκτίθεται σε υψηλά φορτία ώσης, πάνω στον δρομέα. Το φορτίο της ώσης ενεργεί παράλληλα στον άξονα του δρομέα, και έχει μια μέγιστη τιμή η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$F_{x-shaft} = C_T 0,5 \rho (2,5 \cdot V_{ave})^2 \pi R^2 \quad (3.24)$$

Όπου ($F_{x-shaft}$) η μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται με πλήρη ώση

(C_T) ο συντελεστής ώσης

(V_{ave}) η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πλήμνης

Ο συντελεστής ώσης (C_T) ισούται με 0,5. Ωστόσο, θα πρέπει να δίδεται προσοχή σε ανεμογεννήτριες που λειτουργούν σε υψηλές περιστροφικές ταχύτητες σε 2,5 (V_{ave}), όπου μπορεί να είναι πιο κατάλληλη μια τιμή για το συντελεστή ώσης (C_T) ίση με 8/9.

3.1.4. Περίπτωση φόρτισης «E»: Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής (Maximum Rotational Speed)

Η φυγοκεντρική φόρτιση στη βάση της πτέρυγας F_{zB} και η καμπτική ροπή στον άξονα M_{shaft} , που οφείλεται σε φυγοκεντρικά φορτία και αζυγοσταθμία του δρομέα, θα πρέπει να υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$F_{zB} = m_B \omega_{n,max}^2 R_{cog} \quad (3.25)$$

$$M_{shaft} = m_r g L_{rb} + m_r e_r \omega_{n,max}^2 L_{rb} \quad (3.26)$$

Όπου (m_B) η μάζα της πτέρυγας

(m_r) η μάζα του δρομέα

(e_r) η απόσταση από το κέντρο βάρους του δρομέα ως τον άξονα περιστροφής

(L_{rb}) η απόσταση μεταξύ του κέντρου του δρομέα ως προς το πρώτο έδρανο.

3.1.5. Περίπτωση φόρτισης «F»: Βραχυκύκλωμα στο σημείο σύνδεσης του φορτίου (Short at load Connection)

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος στην έξοδο της SWT ή εσωτερικού βραχυκυκλώματος στην γεννήτρια, δημιουργείται μια μεγάλη ροπή στον άξονα του δρομέα λόγω ροπής βραχυκυκλώματος της γεννήτριας (εναλλακτήρα). Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αποδεδειγμένα πιο ακριβείς μετρήσεις, ως ροπή βραχυκυκλώματος που εφαρμόζεται στον άξονα της γεννήτριας λαμβάνεται δύο φορές το Q_{design} .

Έτσι η μέγιστη ροπή ($M_{x-shaft}$) που αναπτύσσεται στον άξονα λόγω βραχυκυκλώματος και η μέγιστη ροπή (M_{xB}) που αναπτύσσεται στην πτέρυγα λόγω βραχυκυκλώματος, υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$M_{x-shaft} = G Q_{desing} \quad (3.27)$$

$$M_{xB} = \frac{M_{x-shaft}}{B} + m_B g R_{cog} \quad (3.28)$$

Όπου (G) σταθερός συντελεστής (πολλαπλασιαστής) και

(B) αριθμός των πτερύγων

Ελλείψει αποδεδειγμένων ακριβέστερων τιμών, ο συντελεστής (G) ισούται με 2,0.

3.1.6. Περίπτωση φόρτισης «G»: Τερματισμός λειτουργίας (Shutdown/Braking)

Στην περίπτωση ανεμογεννητριών με μηχανικό ή ηλεκτρικό σύστημα πέδησης η ροπή πέδησης στο σύστημα γραναζιών, μπορεί να είναι μεγαλύτερη απ' αυτήν της κίνησης. Σε αυτή την περίπτωση η ροπή πέδησης M_{brake} που θα χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς σχεδιασμού μια SWT, θα εξάγεται από δοκιμές ή υπολογισμούς. Η μέγιστη ροπή στον άξονα θεωρείται ίση με τη ροπή πέδησης συν τη ροπή σχεδιασμού. (Έτσι υποτίθεται ότι εφαρμόζεται πέδηση ενώ η ανεμογεννήτρια ακόμη λειτουργεί με την ροπή σχεδιασμού της).

$$M_{x-shaft} = M_{brake} + Q_{desing} \quad (3.29)$$

Αν το φρένο βρίσκεται στο άξονα υψηλής ταχύτητας η M_{brake} θα πολλαπλασιάζεται με τον λόγο μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων.

Η φόρτιση στην πτέρυγα κατά τη διάρκεια τερματισμού λειτουργίας θα καθορίζεται από την ροπή του άξονα και τη μάζα της πτέρυγας. Έτσι έχουμε:

$$M_{xB} = \frac{M_{x-shaft}}{B} + m_B g R_{cog} \quad (3.30)$$

όπου $M_{x-shaft}$ η ροπή όπως υπολογίζεται στην εξίσωση 3.29.

Στην περίπτωση που η ανεμογεννήτρια έχει κιβώτιο ταχυτήτων και φρένο στον άξονα υψηλών ταχυτήτων, η ροπή στον άξονα που υπολογίζεται στην εξίσωση (3.29) θα πρέπει να προσ αυξάνεται για να αντιμετωπισθεί η δυναμική του συστήματος γραναζιών.

Αν δεν υπάρχουν αποδεδειγμένα πιο ακριβείς τιμές, η ροπή στον άξονα θα πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή 2.

3.1.7. Περίπτωση φόρτισης «Η»: Φόρτιση σταθμευμένης Α\Γ (Extreme Wind Loading)

Σε αυτή την περίπτωση η ανεμογεννήτρια είναι σταθμευμένη με κανονικό τρόπο. Τα φορτία στα εκτιθέμενα μέρη της SWT θα πρέπει να υπολογίζονται υποθέτοντας ταχύτητα ανέμου V_{e50} που βρίσκεται στην παράγραφο της κατανομής της ταχύτητας του ανέμου.

Για ανεμογεννήτριες οι οποίες πρόκειται να σταθμεύσουν, η καμπτική ροπή με φορά προς τα έξω απ' το επίπεδο της πτέρυγας στη βάση της, κυριαρχείται από οπισθέλκουσα δύναμη και έτσι ορίζεται ως:

$$M_{yB} = C_d \frac{1}{4} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B} R \quad (3.31)$$

Όπου (C_d) είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας και ισούται με (1,5).

Για ανεμογεννήτριες που ο δρομέας τους περιστρέφεται με ταχύτητα V_{e50} , αναμένεται ότι, σε κάποιο σημείο σε μια από τις πτέρυγες θα έχουμε $C_{l,max}$, λόγω μεταβολών στην κατεύθυνση του ανέμου.

Έτσι η ροπή κάμψης στην βάση της πτέρυγας είναι:

$$M_{yB} = C_{l,max} \frac{1}{6} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B} R \quad (3.32)$$

Αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για το $C_{l,max}$ θα χρησιμοποιείται η τιμή 2.

Για τα φορτία ώσης:

Για σταθμευμένη ανεμογεννήτρια το φορτίο ώσης στον άξονα υπολογίζεται όπως δίδεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$F_{x-shaft} = BC_d \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B} \quad (3.33)$$

Για περιστρεφόμενο δρομέα η δύναμη ώσης δίνεται από τον τύπο:

$$F_{x-shaft} = 0,17BA_{proj,B}\lambda_{e50}^2\rho V_{e50}^2 \quad (3.34)$$

όπου (λ_{e50}) είναι ο λόγος ταχυτήτων ακροπτερυγίου για ταχύτητα (V_{e50}) η οποία, εάν δεν είναι γνωστή, μπορεί να υπολογισθεί βάση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\lambda_{e50} = \frac{n_{max}\pi R}{30V_{e50}} \quad (3.35)$$

Η μέγιστη ροπή κάμψης για τον πύργο στήριξης θα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την δύναμη ώσης που βρίσκεται από την εξίσωση (3.33) είτε από την εξίσωση (3.34) (εξαρτάται από τον σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας). Επίσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν οι δυνάμεις άνωσης ή οπισθέλκουσας στον πύργο στήριξης και στην άτρακτο. Για τον υπολογισμό αυτών των δυνάμεων θα πρέπει να χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση (3.36). Για ελεύθερους πύργους στήριξης (χωρίς αντηρίδες) η μέγιστη ροπή κάμψης θα βρίσκεται στην βάση του πύργου. Για πύργους με αντηρίδες η μέγιστη ροπή κάμψης θα βρίσκεται στο ανώτερο σημείο σύνδεσης των καλωδίων.

Το φορτίο για κάθε συνιστώσα δίνεται από τον τύπο:

$$F = C_f \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{proj} \quad (3.36)$$

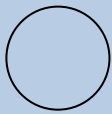
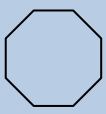
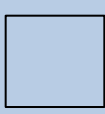
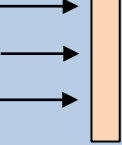


Όπου (C_f) είναι ο συντελεστής δύναμης και

(A_{proj}) είναι η περιοχή συνιστώσας που προβάλλεται σε ένα επίπεδο κάθετο προς την κατεύθυνση του ανέμου.

Από τα φορτία που εφαρμόζονται σε ξεχωριστά τμήματα θα πρέπει να υπολογιστούν αυτά της πτέρυγας, του άξονα και του πύργου στήριξης.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τιμές του συντελεστή δύναμης (C_f) αναλόγως των χαρακτηριστικών μήκους και σχήματος των επιφανειών:

Πίνακας 3.4 – Συντελεστές δυνάμεων (C_f)

Για όλες τις διατομές η κατεύθυνση του ανέμου είναι από αριστερά προς τα δεξιά						
Χαρακτηριστικό μήκος <0,1m	1,3	1,3	1,5	1,5	1,5	2,0
Χαρακτηριστικό μήκος >0,1m	0,7	1,2	1,5	1,5	1,5	2,0
Χαρακτηριστικό μήκος είναι η διάσταση από πάνω προς τα κάτω (κάθετα στη ροή) όπως απεικονίζεται εδώ, εκτός από την περίπτωση της πλάγιας επιφάνειας.						

Πηγή: IEC-61400-2/2013

3.1.8. Περίπτωση φόρτισης «I»: Φόρτιση σταθμευμένης Α/Γ – Μέγιστη έκθεση (Maximum Exposure)

Σε περίπτωση βλάβης του μηχανισμού προσανεμισμού, η ανεμογεννήτρια μπορεί να εκτεθεί στον άνεμο από όλες τις διευθύνσεις. Έτσι, για σχεδιαστικούς λόγους, οι δυνάμεις στις πτέρυγες της SWT, στην άτρακτο, τον πύργο στήριξης και στην ουρά (αν εφαρμόζεται) θα πρέπει να υπολογίζονται για όλες τις πιθανές καταστάσεις έκθεσης που συμπεριλαμβάνουν ανέμους από την μπροστινή ή την πίσω πλευρά του δρομέα.

Το φορτίο σε κάθε στοιχείο δίνεται από τον τύπο:

$$F = C_f \frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 A_{proj} \quad (3.37)$$

Όπου (F) είναι η οπισθέλκουσα δύναμη που ασκείται σε κάθε εξεταζόμενη επιφάνεια.

όπου

(C_f) ο συντελεστής δύναμης ο οποίος μπορεί να οφείλεται σε άνωση ή οπισθέλκουσα και (A_{proj}) η επιφάνεια του κάθε τμήματος (στην πιο δυσμενή της θέση) η οποία είναι κατάλληλη για τον συντελεστή δύναμης.

Για σώματα απότομης αλλαγής γεωμετρίας (π.χ. τα καπάκια της ατράκτου και τα τμήματα του πύργου) η επιφάνεια θα είναι η επιφάνεια που προβάλλεται σε ένα επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση του ανέμου. Για σχήματα αεροτομών θα είναι η προβαλλόμενη επιφάνεια (ή το επίπεδο που σχηματίζει η αεροτομή).

3.2. Αεροελαστική μοντελοποίηση

3.2.1. Γενικά

Στην περίπτωση που οι φορτίσεις κατά τον σχεδιασμό καθορίζονται από αεροελαστική μοντελοποίηση, θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι περιπτώσεις φόρτισης που αναφέρονται σε αυτή την ενότητα. Ένας μικρός αριθμός σχεδιαστικών φορτίσεων δίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.4. Σε αυτό τον πίνακα οι σχεδιαστικές περιπτώσεις φόρτισης καθορίζονται για κάθε κατάσταση σχεδιασμού περιγράφοντας τις συνθήκες ανέμου, τις ηλεκτρικές συνθήκες και άλλες εξωτερικές συνθήκες. Στις περιπτώσεις φόρτισης που εξετάζονται, όπου δίνεται ένα εύρος τιμών ταχυτήτων ανέμου, η περίπτωση φόρτισης θα πρέπει να εξετάζεται για ένα μεγάλο εύρος τιμών ταχυτήτων ανέμου για να σιγουρευτεί η διαπίστωση της χειρότερης περίπτωσης φόρτισης.

Αν απαιτείται από τον ειδικό σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν άλλες σχεδιαστικές περιπτώσεις φόρτισης σχετικές με την ασφάλεια.

Στον πίνακα 3.4 για κάθε σχεδιαστική κατάσταση αναφέρεται και ο κατάλληλος τύπος ανάλυσης με F ή U . Το F αναφέρεται σε ανάλυση κοπωτικών φορτίων, για να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό των κοπωτικών δυνάμεων. Το U αναφέρεται σε ανάλυση μέγιστων φορτίων όπως η ανάλυση της υπέρβασης της μέγιστης αντοχής του υλικού, ανάλυση της απόκλισης του ακροπτερυγίου και η ανάλυση ευστάθειας.

Πίνακας 3.4 - Ελάχιστος αριθμός περιπτώσεων φόρτισης για αεροελαστικά μοντέλα σχεδιασμού

Σχεδιαστική Κατάσταση	Περιπτώσεις φόρτισης	Συνθήκες Ανέμου	Άλλες συνθήκες	Τύπος ανάλυσης
1) Παραγωγή ενέργειας (power production)	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ ή $3xV_{ave}$		F,U
	1.2	ECD $V_{hub} < V_{design}$		U
	1.3	EOG ₅₀ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ ή $3xV_{ave}$		U
	1.4	EDC ₅₀ $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$ ή $3xV_{ave}$		U
	1.5	ECG $V_{hub} = V_{design}$		U
2) Παραγωγή ενέργειας με υπεισερχουσα βλάβη (Power production plus occurrence of fault)	2.1	NWP $V_{hub} = V_{design}$ ή V_{out} ή $2,5xV_{ave}$	Βλάβη στο σύστημα ελέγχου	U
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Βλάβη στο σύστημα ελέγχου ή προστασίας	F,U
	2.3	EOG ₁ $V_{in} < V_{out}$ ή $2,5xV_{ave}$	Απώλεια ηλεκτρικής σύνδεσης	U
3) Κανονικός τερματισμός Λειτουργίας (normal shut down)	3.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F
	3.2	EOG ₁ $V_{hub} = V_{out}$ ή $V_{max,shutdown}$		U
4) Τερματισμός λειτουργίας έκτακτης ανάγκης (emergency or manual shut down)	4.1	Θα αναφέρεται από τον κατασκευαστή		U
5) Σταθμευμένη (ακίνητη ή ρελαντί) (parked standing still or idling)	5.1	EWM $V_{hub} = V_{e50}$	Πιθανή απώλεια ηλεκτρικού δικτύου	U
	5.2	NTM $V_{hub} < 0,7V_{ref}$		F
6) Στάθμευση και Κατάσταση Βλάβης (parked and fault condition)	6.1	EWM $V_{hub} = V_{e1}$		U
7) Μεταφορά, συναρμολόγηση, συντήρηση και επισκευή	7.1	Θα αναφέρεται από τον κατασκευαστή		U

Πηγή: IEC-61400-2/2013

3.2.2. Παραγωγή ενέργειας (περιπτώσεις φόρτισης 1.1-1.5)

Σε αυτές τις περιπτώσεις φόρτισης, η ανεμογεννήτρια λειτουργεί και είναι συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό φορτίο. Στη διαμόρφωση της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να συμπεριληφθεί και η αστάθεια του δρομέα. Οι μέγιστες αεροδυναμικές αστάθειες και οι αστάθειες λόγω μάζας, που καθορίζονται για την κατασκευή του δρομέα θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς του σχεδιασμού. Ακόμη, οι αποκλίσεις από τις θεωρητικά βέλτιστες καταστάσεις λειτουργίας, όπως η απόκλιση του συστήματος από την διεύθυνση του ανέμου και τα σφάλματα στο σύστημα παρακολούθησης, θα πρέπει να συνυπολογίζονται στις αναλύσεις των λειτουργικών φορτίων.

Στους υπολογισμούς θα λαμβάνεται ο χειρότερος συνδυασμός συνθηκών, π.χ. αλλαγή διεύθυνσης (ανέμου) με ταυτόχρονο αποπροσανατολισμό του συστήματος προσανεμισμού για την περίπτωση φόρτισης (DLC) 1.4. Η σχεδιαστική περίπτωση φόρτισης 1.1 ενσωματώνει τις απαιτήσεις για τα φορτία που οφείλονται στην ατμοσφαιρική τύρβη. Οι περιπτώσεις φορτίσεων 1.2-1.5 καταδεικνύουν παροδικές καταστάσεις οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως πιθανά κρίσιμα γεγονότα κατά τη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας.

3.2.3. Παραγωγή ενέργειας σε συνδυασμό με υπεισέρχουσα βλάβη για περιπτώσεις φόρτισης 2.1-2.3

Οποιαδήποτε βλάβη στα συστήματα ελέγχου ή προστασίας, ή εσωτερική βλάβη στο ηλεκτρικό σύστημα, που είναι σημαντική για την ανάπτυξη φορτίων στην ανεμογεννήτρια (όπως βραχυκύκλωμα στη γεννήτρια) θα υποτίθεται ότι συμβαίνει κατά την παραγωγή ενέργειας. Για τη σχεδιαστική περίπτωση φόρτισης 2.1 η ύπαρξη μιας βλάβης στο σύστημα ελέγχου, το οποίο θεωρείται φυσιολογικό, θα πρέπει να αναλυθεί. Η ύπαρξη βλαβών στα εσωτερικά ηλεκτρικά συστήματα ή στο σύστημα προστασίας, τα οποία δεν προκαλούν τον άμεσο τερματισμό λειτουργίας και γι' αυτό μπορούν να προκαλέσουν σημαντική ζημιά λόγω κόπωσης, θα αξιολογηθούν στην DLC 2.2. Στην περίπτωση φόρτισης 2.3 η ετήσια ακραία ριπή λειτουργίας χρειάζεται να συνδυαστεί με απώλεια ηλεκτρικής σύνδεσης.

Για παθητικά ελεγχόμενες ανεμογεννήτριες παραδείγματα βλαβών συστημάτων ελέγχου είναι:

- Χαλασμένο σύστημα Furl (π.χ. κλειδωμένο ουραίο πτερύγιο) (αν το σύστημα αυτό δεν είναι ασφαλές εφ' όρου ζωής).
- Χαλασμένο σύστημα μεταβολής βήματος της πτέρυγας (αν το σύστημα μεταβολής βήματος δεν έχει επιδειχθεί να είναι ασφαλές εφ' όρου ζωής).
- Θα πρέπει να αξιολογείται η περίπτωση κόπωσης για κάθε βλάβη του αιολικού συστήματος για τουλάχιστον 24 ώρες/έτος.

3.2.4. Κανονικός τερματισμός λειτουργίας για περιπτώσεις φόρτισης 3.1-3.2

Αυτή η περίπτωση φόρτισης περιέχει όλα τα συμβάντα τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη φορτίων σε μία ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια παροδικών καταστάσεων, από την κατάσταση παραγωγής ενέργειας μέχρι την κατάσταση στάθμευσης ή λειτουργίας στο ρελαντί. Ο αριθμός των επιδράσεων θα πρέπει να υπολογίζεται εκτιμώντας τη συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου.

Για παθητικά ελεγχόμενες ανεμογεννήτριες μπορεί να μην υπάρχει αυτόματος τερματισμός λειτουργίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι κοπωτικές περιπτώσεις φορτίσεων μπορεί να αγνοηθούν. Για την περίπτωση φόρτισης 3.2 η μέγιστη ταχύτητα ανέμου είναι ίση με V_{out} ή $V_{max,shutdown}$.

3.2.5. Τερματισμός λειτουργίας έκτακτης ανάγκης ή χειροκίνητος τερματισμός λειτουργίας (περίπτωση φόρτισης 4.1)

Θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν τα φορτία που αναπτύσσονται κατά τον τερματισμό λειτουργίας έκτακτης ανάγκης ή χειροκίνητο τερματισμό λειτουργίας. Οι περιορισμοί της ταχύτητας του ανέμου για αυτές τις διαδικασίες θα πρέπει να περιγράφονται στο εγχειρίδιο λειτουργιών του κατασκευαστή. Αντί της χρησιμοποίησης της V_{out} , θα πρέπει να χρησιμοποιείται η τιμή της ταχύτητας ανέμου που αναφέρεται από τον κατασκευαστή.

3.2.6. Κατάσταση στάθμευσης με σταματημένη Α/Γ ή γυρίζοντας στο ρελαντί σε περιπτώσεις φόρτισης 5.1-5.2 (Parked, stand-still or idling)

Ο δρομέας μιας σταθμευμένης ανεμογεννήτριας, η οποία μπορεί να είναι ακίνητη ή να γυρίζει στο ρελαντί, θα πρέπει να υπολογίζεται για ακραίες συνθήκες ταχύτητας ανέμου. Αυτές οι συνθήκες μπορεί να είναι τυρβώδεις ή σχεδόν σταθερές με διόρθωση για ριπές και δυναμική απόκριση.

Αν συμβεί σημαντική ζημιά λόγω κόπωσης σε μερικά από τα μέρη της ανεμογεννήτριας (π.χ. απ' το βάρος των φτερών γυρνώντας στο ρελαντί), θα πρέπει επίσης να υπολογίζεται ο αναμενόμενος αριθμός ωρών μη παραγωγής ενέργειας σε κάθε κατάλληλη ταχύτητα ανέμου.

Επίσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν οι επιδράσεις απώλειας ηλεκτρικού δικτύου για σταθμευμένη ανεμογεννήτρια.

Αν η ανεμογεννήτρια δεν είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο η περίπτωση απώλειας δικτύου δεν χρειάζεται να συνυπολογιστεί. Αν υπάρχει πιθανότητα να υπάρξει βλάβη στην ανεμογεννήτρια για υψηλές ταχύτητες ανέμου τότε σε αυτή την περίπτωση φόρτισης θα πρέπει να μελετάται και αυτό το ενδεχόμενο.

3.2.7. Κατάσταση στάθμευσης με συνδυασμό βλαβών για περίπτωση φόρτισης 6.1 (parked plus fault conditions)

Οι αποκλίσεις από την κανονική λειτουργία μιας σταθμευμένης ανεμογεννήτριας, που οφείλονται σε βλάβες του ηλεκτρικού δικτύου ή στην ίδια την ανεμογεννήτρια, απαιτούν ανάλυση. Αντικείμενο αυτής της ανάλυσης θα πρέπει να αποτελούν οι πιθανές συνέπειες από βλάβες, εκτός αυτή της απώλειας του ηλεκτρικού δικτύου, που προκαλούν αποκλίσεις από τη κανονική λειτουργική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας όσο αυτή είναι σταθμευμένη. Για την περίπτωση φόρτισης 6.1 η κατάσταση βλάβης θα πρέπει να συνδυάζεται με το μοντέλο ακραίας ταχύτητας ανέμου (EWM) για περίοδο επανεμφάνισης ενός έτους. Αυτές οι συνθήκες μπορεί να είναι τυρβώδεις ή σχεδόν σταθερές με διόρθωση για ριπές και δυναμική απόκριση.

Μεταφορά, συναρμολόγηση, συντήρηση και επισκευή για περίπτωση φόρτισης 7.1

Ο κατασκευαστής θα πρέπει να λάβει υπ' όψιν του τα φορτία που αναπτύσσονται στην ανεμογεννήτρια που προκαλούνται από τη μεταφορά, την συναρμολόγηση, εγκατάσταση, τη συντήρηση και την επισκευή του συστήματος. Παραδείγματα τέτοιων φορτίων είναι:

Βαρυτικά φορτία στην ανεμογεννήτρια όταν αυτή βρίσκεται σε μη ορθή θέση κατά τη διάρκεια της μεταφοράς.

Φορτία που προκαλούνται από ειδικά εργαλεία εγκατάστασης

Φορτία ανέμου κατά την εγκατάσταση

Φορτία που αναπτύσσονται στην ανεμογεννήτρια κατά την τοποθέτησή της πάνω στα θεμέλια

Φορτία λόγω κλίσης του πύργου στήριξης κατά την ανέγερση

Φορτία σε κατασκευές υποστήριξης που χρησιμεύουν στην ανάβαση στην ανεμογεννήτρια.

3.2.8. Υπολογισμοί φορτίων

Τα φορτία όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 7.3 θα πρέπει να υπολογίζονται για κάθε σχεδιαστική περίπτωση φόρτισης. Θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν τα παρακάτω, όπου αυτά είναι σχετικά:

- Διαταραχές του πεδίου ανέμου λόγω της ίδιας της ανεμογεννήτριας (ταχύτητες που προκαλούνται από φαινόμενα σκίασης κτλ.)
- Η επίδραση της τρισδιάστατης ροής στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της πτέρυγας (π.χ. αποκόλληση ροής σαν τρισδιάστατο φαινόμενο και αεροδυναμικές απώλειες ακροπτερυγίου)
- Ασταθή αεροδυναμικά φαινόμενα
- Δυναμική συμπεριφορά του συστήματος και συνδυασμός των ιδιομορφών

- Αεροελαστικά φαινόμενα και
- Η συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου και προστασίας της ανεμογεννήτριας.

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΟΛΥ ΜΙΚΡΗΣ Α/Γ (IEC-61400-2/2013)

4.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η μελέτη περίπτωσης μιας πολύ μικρής ανεμογεννήτριας, σύμφωνα με τα πρότυπα του (IEC-61400-2/2013) όπου θα υπολογίσουμε τις αντοχές της για κάθε περίπτωση των φορτίων με τις αντίστοιχες συνθήκες περιβάλλοντος και θα εξάγουμε τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις αυτές.

Πιο συγκεκριμένα, θα εφαρμόσουμε τα δεδομένα μας στις σχέσεις που έχουμε περιγράψει και αναλύσει στο προηγούμενο κεφάλαιο, για κάθε μελέτη περίπτωσης φορτίων, με σκοπό τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων για τις αντοχές που απαιτούνται στο σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας και την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

4.2. Μεθοδολογία σχεδιασμού πολύ μικρής Α/Γ (IEC-61400-2/2013)

Έχουμε επιλέξει την πολύ μικρή ανεμογεννήτρια κάνοντας εφαρμογή των βασικών δεδομένων. Για λόγους καθαρά πρακτικούς για τη διεξαγωγή των μετρήσεων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, θα κάνουμε χρήση της εφαρμογής του MS Excel 2013 έκδοση για Windows όπου θα εισάγουμε τα αποτελέσματα αυτά με τη μορφή πινάκων.

4.3. Γενικά δεδομένα πολύ μικρής Α/Γ (IEC-61400-2/2013)

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα γενικά δεδομένα της πολύ μικρής ανεμογεννήτριας που θεωρήσαμε αρχικά στη παρούσα μελέτη, όπου ορισμένα από αυτά θεωρούνται γνωστά (τεχνικά χαρακτηριστικά) και κάποια θα πρέπει να υπολογιστούν, βάση των τριγωνομετρικών ή άλλων γνωστών εξισώσεων, και τα οποία θα εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και την ολοκλήρωση της μελέτης των περιπτώσεων των φορτίων.

Κεφάλαιο 4° – Μελέτη Περίπτωσης Σχεδίασης Μικρής Ανεμογεννήτριας

Πιο αναλυτικά, στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα γενικά δεδομένα στους οποίους περιγράφονται τα γνωστά χαρακτηριστικά και αναλύονται τα εν λόγω αποτελέσματα.

Οι διαστάσεις της πτέρυγας δίνονται στον παρακάτω πίνακα (4.1):

Πίνακας 4.1 – Διαστάσεις πτέρυγας της Α/Γ

Διαστάσεις πτέρυγας					
Μήκος πτέρυγας $b(m)$	Πλάτος πτέρυγας $h(m)$	Απόσταση κεντροβαρικού άξονα κατά τον άξονα x $X_G(m)=b/2$	Απόσταση κεντροβαρικού άξονα κατά τον άξονα y $Y_G(m)=h/2$	Επιφάνεια πτέρυγας= $b*h$ (m^2)	Ακτίνα βάσης της πτέρυγας για κυκλική διατομή (m)
1,500	0,200	0,750	0,100	0,300	0,125

Η απόσταση του κεντροβαρικού άξονα (X_G) κατά τον άξονα (x) υπολογίζεται διαιρώντας το μήκος (b) της πτέρυγα με το (2).

Η απόσταση του κεντροβαρικού άξονα (Y_G) κατά τον άξονα (y) υπολογίζεται διαιρώντας το πλάτος (h) της πτέρυγα με το (2).

Η επιφάνεια της πτέρυγας υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τις διαστάσεις της πτέρυγας ($b*h$).

Οι διαστάσεις του άξονα δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.2 – Διαστάσεις άξονα της Α/Γ

Διαστάσεις άξονα	
Ακτίνα άξονα $r (m)$	Επιφάνεια άξονα $E_{shaft}=2\pi r^2 (m^2)$
0,025	0,002

Δοθέντος της ακτίνας (r) του άξονα μπορούμε να υπολογίσουμε την επιφάνειά του από την γνωστή εξίσωση $E_{shaft}=2\pi r^2$.

Κεφάλαιο 4° – Μελέτη Περίπτωσης Σχεδίασης Μικρής Ανεμογεννήτριας

Στη συνέχεια στους παρακάτω πίνακες (4.3 έως 4.) παρατίθενται τα δεδομένα της ανεμογεννήτριας με τα μεγέθη όπως ταχύτητα περιστροφής δρομέα (n), μέγιστη ταχύτητα περιστροφής δρομέα (n_{\max}), η ακτίνα (R) του δρομέα, η πυκνότητα (ρ) του αέρα κι άλλα χαρακτηριστικά όπως απεικονίζονται παρακάτω:

Πίνακας 4.3 – Δεδομένα της Α/Γ

Δεδομένα						
Ταχύτητα περιστροφής δρομέα n (r.p.m.)	Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής δρομέα n_{\max} (r.p.m.)	Ακτίνα δρομέα R (m)	Πυκνότητα αέρα ρ (kg/m ³)	Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πλήμνης V_{ave} (m/s)	Ύψος πλήμνης Z_{hub} (m)	Συγκεκριμένο ύψος Z (m)
500	1.000	1,750	1,225	20	10	15

Πίνακας 4.4 – Δεδομένα της Α/Γ

Δεδομένα				
Ταχύτητα αναφοράς με μέσο όρο πάνω από δέκα λεπτά V_{ref} (m/s)	Ταχύτητα αναφοράς με μέσο όρο πάνω από δέκα λεπτά στο ύψος της πλήμνης V_{hub} (m/s)	Ισχύς εξόδου για ταχύτητα (V_{design}) P_{design} (W)	Μάζα πτέρυγας m_B (kg)	Απόσταση του κ.β. της πτέρυγας έως το κέντρο του δρομέα R_{cog} (m)
10	15	1000	1,500	0,400
Σημείωση: Όπου κ.β. το κέντρο βάρους				

Πίνακας 4.5 – Δεδομένα της Α/Γ

Δεδομένα					
Ταχύτητα περιστροφής δρομέα για ταχύτητα (V_{design}) n_{design} (r.p.m.)	Αριθμός πτερύγων της Α/Γ B	Επιτάχυνση της βαρύτητας g (m/s²)	Απόσταση μεταξύ του κέντρου του δρομέα έως το πρώτο έδρανο L_{rb} (m)	Μάζα του δρομέα (πτέρυγες πλήμνη κ.τ.λ.) m_r (kg)	Απόσταση μεταξύ του κέντρου της βάσης της πτέρυγας και άξονα περιστροφής L_{rt} (m)
700	3	9,810	0,100	80	0,200

Πίνακας 4.6 – Δεδομένα της Α/Γ

Δεδομένα				
Σχηματιζόμενη από τη πτέρυγα επιφάνεια A_{projB} (m²)	Μέση χορδή πτέρυγας C_{ave} (m)	Σφάλμα προσανεμισμού γ (degrees)	Ροπή στον άξονα χαμηλών ταχυτήτων (Nm)	Σχέση μετάδοσης
0,150	2,250	40	130	2

Πίνακας 4.7 – Δεδομένα της Α/Γ

Δεδομένα						
Γωνιακή ταχύτητα δρομέα ω_n (rad/sec)	Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα δρομέα $\omega_{n,max}$ (rad/sec)	Επιφάνεια σάρωσης δρομέα A_{swept} (m ²)	Αναμενόμενη ακραία ταχύτητα ανέμου (μέσου όρου πάνω από 3s) για 50 έτη V_{e50} (m/s)	Αναμενόμενη ακραία ταχύτητα ανέμου (μέσου όρου πάνω από 3s) για ένα έτος V_{e1} (m/s)	Λόγος ταχυτήτων (Tip Speed Ratio) λ	Λόγος ταχύτητας σχεδίασης (Tip Speed Ratio) λ _{design}
36,633	62,800	18,086	14,000	10,500	8,792	5,127

Η γωνιακή ταχύτητα (ω_n) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση κι έτσι έχουμε ως αποτέλεσμα:

$$\omega_n = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,14 \cdot 500}{30} = 52,333 \quad (4.1)$$

Αντίστοιχα η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα ($\omega_{n,max}$) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\omega_{n,max} = \frac{\pi n_{max}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,667 \quad (4.2)$$

Η επιφάνεια σάρωσης του δρομέα (A_{swept}) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$A_{swept} = \pi R^2 = 3,14 \cdot 1,750^2 = 9,618 \quad (4.3)$$

Η αναμενόμενη ακραία ταχύτητα του ανέμου (V_{e50}) υπολογίζεται βάση της εξίσωσης (3.3) όπως αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι έχουμε το αποτέλεσμα:

$$V_{e50} = 1,4 \cdot 10 \cdot \left(\frac{15}{10}\right)^{0,11} = 14,639 \quad (4.4)$$

Κεφάλαιο 4^ο – Μελέτη Περίπτωσης Σχεδίασης Μικρής Ανεμογεννήτριας

Αντίστοιχα, η αναμενόμενη ακραία ταχύτητα του ανέμου (V_{e1}) για ένα έτος, υπολογίζεται βάση της εξίσωσης (3.4). Έτσι έχουμε ως αποτέλεσμα:

$$V_{e1} = 1,4 \cdot 14,639 = 10,979 \quad (4.5)$$

Οι λόγοι των ταχυτήτων (TSP) (λ) και (λ_{design}) υπολογίζονται βάση της εξίσωσης (3.11) όπως αναλύσαμε παραπάνω κι έχουμε τα αποτελέσματα:

$$\lambda = \frac{1,750}{15} 52,333 = 6,106 \text{ και} \quad (4.6)$$

$$\lambda_{design} = \frac{1,750}{1,4 \cdot 20} 73,267 = 4,579 \quad (4.7)$$

Όπου 73,267 είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ($\omega_{n,design}$) που υπολογίζεται στον παρακάτω πίνακα (4.8).

Πίνακας 4.8 – Δεδομένα της Α/Γ

Δεδομένα							
Συντελεστής απόδοσης συστήματος μετάδοσης κίνησης για $P_{design} \leq 20Kw$ η	Συντελεστής απόδοσης συστήματος μετάδοσης κίνησης για $P_{design} > 20Kw$ η'	Ροπή σχεδιασμού στο δρομέα Q_{design} (Nm)	Γωνιακή ταχύτητα δρομέα $\omega_{n,design}$ (rad/sec)	Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα δρομέα $\omega_{yaw,max}$ (rad/sec) για $A_{swept} > 2m^2$	Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα δρομέα $\omega_{yaw,max}$ (rad/sec) για $A_{swept} < 2m^2$	Μέγιστη γωνιακή ταχύτητα προσανεμισμού $\omega_{yaw,max}$ (rad/sec)	Απόσταση από το κ.β. του δρομέα έως τον άξονα περιστροφής e_r (m)
0,605	0,7 αλλιώς $\eta' = \eta = 0,605$	22,560	41,867	2,839	3	2,839	0,012

Από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα 4.8 συμπεραίνουμε ότι ο συντελεστής (η) απόδοσης συστήματος μετάδοσης κίνησης για ($P_{design} \leq 20Kw$) υπολογίστηκε στην τιμή 0,605 από την εξίσωση:

$$\eta_{P_{design} \leq 20Kw} = 0,6 + 0,005 \frac{P_{design}}{1.000} = 0,605 \quad (4.8)$$

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι εφ' όσον η παρούσα έρευνα μελετά το σχεδιασμό πολύ μικρής Α/Γ και η ισχύς της είναι μικρότερη των 20Kw δηλαδή ($P_{design} \leq 20Kw$) τότε δεν απαιτείται να υπολογίσουμε το συντελεστή απόδοσης μετάδοσης κίνησης (η') για ($P_{design} \geq 20Kw$). Στην περίπτωση αυτή ($P_{design} \geq 20Kw$) ο συντελεστής (η') απόδοσης συστήματος μετάδοσης κίνησης θα ισούται με τη σταθερά ($\eta'=0,7$).

Σε συνέχεια των αποτελεσμάτων του πίνακα υπολογίσαμε τη ροπή σχεδιασμού στο δρομέα (Q_{design}) βάση της παρακάτω εξίσωσης:

$$Q_{design} = \frac{30P_{design}}{\eta \cdot \pi \cdot n_{design}} = \frac{30 \cdot 1000}{0,605 \cdot 3,14 \cdot 700} = 22,560 \quad (4.9)$$

Επίσης η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα ($\omega_{n,design}$) υπολογίστηκε με την εξίσωση:

$$\omega_{n,design} = \frac{\pi \cdot n_{design}}{30} = \frac{3,14 \cdot 700}{30} = 73,267 \quad (4.10)$$

Η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα προσανεμισμού [$\omega_{yaw,max}(A_{swept}>2m^2)$] υπολογίστηκε με την εξίσωση (3.13) και η τιμή της είναι:

$$\omega_{yaw,max}(A_{swept}>2m^2) = 3 - 0,01(\pi R^2 - 2) = 2,924 \quad (4.11)$$

ενώ η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα προσανεμισμού [$\omega_{yaw,max}(A_{swept}<2m^2)$] ισούται με (3).

Τέλος, η απόσταση από το κέντρο βάρους του δρομέα έως τον άξονα περιστροφής (e_r) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$e_r = 0,005R = 0,00875 \quad (4.12)$$

4.3.1. Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «Α»: Κανονική λειτουργία (Normal Operation)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίου «Α» για κανονική λειτουργία, και εύρος τιμών ταχυτήτων ($0,5n_{design} - 1,5n_{design}$) απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (4.9) βάση των εξισώσεων (3.12) έως (3.18) που αναλύθηκαν παραπάνω:

Πίνακας 4.9 – Αποτελέσματα περίπτωσης «Α» - Κανονική λειτουργία

Κανονική λειτουργία					
Για εύρος τιμών ταχυτήτων $0,5n_{design} - 1,5n_{design}$					
Φορτία στην πτέρυγα λόγω φυγοκεντρικών δυνάμεων ΔF_{zB} (N)	Καμπτική ροπή κατά μήκος του χείλους της πτέρυγας ΔM_{xB} (Nm)	Καμπτική ροπή κάθετα στις χορδές ΔM_{yB} (Nm)	Φορτίο λόγω ώσης στον άξονα $\Delta F_{x-shaft}$ (N)	Στρεπτική ροπή στον άξονα $\Delta M_{x-shaft}$ (Nm)	Καμπτική ροπή στον άξονα ΔM_{shaft} (Nm)
6.441,605	19,292	34,435	118,064	36,294	191,395

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι:

Τα φορτία (ΔF_{zB}) στην πτέρυγα λόγω φυγοκεντρικών δυνάμεων υπολογίστηκαν βάση της εξίσωσης (3.13) και η τιμή τους υπολογίστηκε ότι είναι ($\Delta F_{zB}=6.441,605$).

Τα φορτία (ΔM_{xB}) καμπτικής ροπής κατά μήκος του χείλους της πτέρυγας, υπολογίστηκαν βάση της εξίσωσης (3.14) και η τιμή τους υπολογίστηκε ότι είναι ($\Delta M_{xB}=19,292$).

Τα φορτία (ΔM_{yB}) καμπτικής ροπής κάθετα στις χορδές της πτέρυγας, υπολογίστηκαν βάση της εξίσωσης (3.15) και η τιμή τους υπολογίστηκε ότι είναι ($\Delta M_{yB}=34,435$).

Τα φορτία ($\Delta F_{x-shaft}$) λόγω ώσης στον άξονα, υπολογίστηκαν βάση της εξίσωσης (3.16) και η τιμή τους υπολογίστηκε ότι είναι ($\Delta F_{x-shaft}=118,064$).

Επίσης, η στρεπτική ροπή στον άξονα ($\Delta M_{x-shaft}$) υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.17) και η τιμή της υπολογίστηκε ότι είναι ($\Delta M_{x-shaft}=36,294$).

Τέλος η καμπτική ροπή (ΔM_{shaft}) στον άξονα υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.18) και η τιμή της υπολογίστηκε ότι είναι ($\Delta M_{shaft}=191,395$).

4.3.2. Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «B»: Προσανεμισμός (Yawing)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «B» για τον προσανεμισμό της Α/Γ απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (4.10):

Πίνακας 4.10 – Αποτελέσματα περίπτωσης «B» - Προσανεμισμός Α/Γ

Προσανεμισμός							
για $\omega_{yaw,max}$ και $\omega_{n,design}$							
Ροπή στην πτέρυγα λόγω φυγόκεντρης δύναμης $M_{yB,centrifugal}$ (Nm)	Ροπή αδράνειας πτέρυγας I_B (Nm)	Ροπή στην πτέρυγα λόγω γυροσκοπικής δύναμης $M_{yB,gyroscopic}$ (Nm)	Καμπτική ροπή κάθετα στις χορδές M_{yB} (Nm)	Ροπή στον άξονα λόγω γυροσκοπικής δύναμης $M_{shaft(2blades)}$ (Nm)	Ροπή στον άξονα λόγω γυροσκοπικής δύναμης $M_{shaft(3blades)}$ (Nm)	Φορτία μάζας και αξονικά φορτία εκκεντρότητας $M_{shaft(2 blades)}$ (Nm)	Φορτία μάζας και αξονικά φορτία εκκεντρότητας $M_{shaft(3 blades)}$ (Nm)
1,026	1,531	656,048	680,031	1.312,096	984,072	1.425,012	815,824

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι:

Η ροπή στην πτέρυγα ($M_{yB,centrifugal}$) λόγω φυγόκεντρικής δύναμης υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.16) και η τιμή της υπολογίστηκε ότι είναι ($M_{yB,centrifugal} = 1,026$).

Η ροπή αδράνειας της πτέρυγας (I_B) υπολογίζεται βάση της παρακάτω εξίσωσης

$$I_B = \frac{m_B R^2}{3} \quad (4.13)$$

και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι ($I_B = 1,531$).

Η ροπή στην πτέρυγα ($M_{yB,gyroscopic}$) λόγω γυροσκοπικής δύναμης υπολογίζεται βάση της εξίσωσης:

$$M_{yB,gyroscopic} = 2\omega_{yaw,max} I_B \omega_{n,design} \quad (4.14)$$

και η τιμή της υπολογίστηκε ότι είναι ($M_{yB,gyroscopic} = 656,048$).

Επίσης, η καμπτική ροπή (M_{yB}) κάθετα στις χορδές υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.20) και η τιμή της υπολογίστηκε ότι είναι ($M_{yB} = 680,031$).

Αντίστοιχα, η ροπή ($M_{shaft(2blades)}$) στον άξονα με δύο πτέρυγες λόγω γυροσκοπικής δύναμης υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.21) και η τιμή της υπολογίστηκε ότι είναι ($M_{shaft(2blades)} = 1.312,096$),

και η ροπή ($M_{shaft(3blades)}$) στον άξονα με τρεις πτέρυγες λόγω γυροσκοπικής δύναμης υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.22) και η τιμή της υπολογίστηκε ότι είναι ($M_{shaft(3blades)} = 984,072$).

Τέλος, υπολογίστηκαν και τα φορτία μάζας και αξονικά φορτία εκκεντρότητας (M_{shaft}), για τις περιπτώσεις δύο και τριών πτερύγων αντίστοιχα, βάση των εξισώσεων (3.19) και (3.20). Τα αποτελέσματα είναι:

$$M_{shaft(2blades)} = 1.425,012 \text{ και}$$

$$M_{shaft(3blades)} = 815,824$$

4.3.3. Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «C»: Σφάλμα περιστροφής (Yaw error)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «C» για το σφάλμα περιστροφής απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (4.11):

Πίνακας 4.11 – Αποτελέσματα περίπτωσης «C» - Σφάλμα Προσανεμισμού A/Γ

Σφάλμα προσανεμισμού (Yaw Error)			
Για σφάλμα περιστροφής 30°			
C _{lmax} (εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα)	Ροπή στη βάση της πτέρυγας με φορά κάθετα στις χορδές (flapwise) M_{yB} (Nm)	Ημίτονο γ	Ροπή στη βάση της πτέρυγας με φορά κάθετα στις χορδές (flapwise), για σφάλμα προσανεμισμού (30°) M_{yB} (Nm)
2	1.024,944	0,643	1.769,419

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι:

Η ροπή στη βάση της πτέρυγας (**M_{yB}**) με φορά κάθετα στις χορδές (flapwise) για σφάλμα προσανεμισμού (30°) υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.23) και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι (**M_{yB} = 1.769,419**) ενώ η ροπή στη βάση της πτέρυγας (**M_{yB}**) με φορά κάθετα στις χορδές (flapwise) βρέθηκε ότι είναι (**M_{yB} = 1.024,944**).

4.3.4. Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «D»: Μέγιστης ώσης (Maximum Thrust)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «D» για τη μέγιστη ώση απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (4.12):

Πίνακας 4.12 – Αποτελέσματα περίπτωσης «D» - Μέγιστη ώση

Μέγιστη Ώση	
Η συγκεκριμένη περίπτωση φόρτισης έχει υπολογιστεί για φορτία ώσης που έχουν υπολογιστεί μέσα από αεροελαστικό σχεδιασμό	
Συντελεστής ώσης C_T	Μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται με πλήρη ώση $F_{x-shaft}$ (N)
0,5	7.362,441

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι:

Η μέγιστη δύναμη ($M_{x-shaft}$) που αναπτύσσεται με πλήρη ώση, υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.24) και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι ($M_{x-shaft} = 7.362,441$).

4.3.5. Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «E»: Μέγιστης ταχύτητα περιστροφής (Maximum Rotational Speed)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «E» για τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής, απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (4.13):

Πίνακας 4.13 – Αποτελέσματα περίπτωσης «E» - Μέγιστη ταχύτητας περιστροφής

Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής	
(Maximum r.p.m.)	
Μέγιστη δύναμη στην πτέρυγα F_{zB} (N)	Καμπτική ροπή στον άξονα M_{shaft} (Nm)
6.573,067	845,338

Από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα συμπεραίνουμε ότι:

Η μέγιστη δύναμη (M_{zB}) που αναπτύσσεται στην πτέρυγα και η καμπτική ροπή (M_{shaft}) στον άξονα, υπολογίστηκαν βάση των εξισώσεων (3.25) και (3.26) αντίστοιχα και η τιμή τους βρέθηκε ότι είναι ($M_{zB}=6.573,067$) και ($M_{shaft}=845,338$).

4.3.6. Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «F»: Βραχυκύκλωμα στο σημείο σύνδεσης του φορτίου (Short at load Connection)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «F» για βραχυκύκλωμα στο σημείο σύνδεσης του φορτίου, απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (4.14):

Πίνακας 4.14 – Αποτελέσματα περίπτωσης «F» - Βραχυκύκλωμα στο σημείο σύνδεσης του φορτίου

Βραχυκύκλωμα στο σημείο σύνδεσης του φορτίου	
Μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται στον άξονα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος $M_{x-shaft}$ (Nm)	Μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται στην πτέρυγα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος $M_{x,B}$ (Nm)
45,120	20,926

Από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα συμπεραίνουμε ότι:

Η μέγιστη ροπή ($M_{x-shaft}$) που αναπτύσσεται στον άξονα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος και η μέγιστη ροπή ($M_{x,B}$) που αναπτύσσεται στην πτέρυγα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, υπολογίστηκαν βάση των εξισώσεων (3.27) και (3.28) αντίστοιχα και η τιμή τους βρέθηκε ότι είναι ($M_{x-shaft}=45,120$) και ($M_{x,B}=20,926$)

4.3.7. Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «G»: Τερματισμός λειτουργίας (Shutdown/Braking)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «G» για τερματισμό λειτουργίας της Α/Γ απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα (4.15):

Πίνακας 4.15 – Αποτελέσματα περίπτωσης «G» - Τερματισμός λειτουργίας

Τερματισμός λειτουργίας		
Ροπή που αναπτύσσεται στον άξονα χαμηλών ταχυτήτων κατά την πέδηση για τον τερματισμό λειτουργίας της Α/Γ M_{brake} (Nm)	Ροπή που αναπτύσσεται στον άξονα του δρομέα κατά την πέδηση για τον τερματισμό λειτουργίας της Α/Γ $M_{x-shaft}$ (Nm)	Ροπή που αναπτύσσεται στην πτέρυγα κατά την πέδηση για τον τερματισμό λειτουργίας $M_{x,B}$ (Nm)
130	152,560	56,739

Από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα συμπεραίνουμε ότι:

Η ροπή ($M_{x-shaft}$) που αναπτύσσεται στον άξονα του δρομέα κατά την πέδηση για τον τερματισμό της λειτουργίας της Α/Γ υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.29) και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι ($M_{x-shaft}=152,560$).

Αντίστοιχα, η ροπή ($M_{x,B}$) που αναπτύσσεται στην πτέρυγα κατά την πέδηση για τον τερματισμό της λειτουργίας της Α/Γ υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.30) και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι ($M_{x,B}=56,739$).

4.3.8. Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «H»: Ταχύτητα επιβίωσης (Extreme Wind Loading)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «H» για την ταχύτητα επιβίωσης της Α/Γ απεικονίζονται στους παρακάτω πίνακες (4.16) και (4.17). Στην περίπτωση αυτή διακρίνουμε δύο περιπτώσεις για το φορτίο ώσης: για σταθμευμένους δρομείς και για περιστρεφόμενους δρομείς. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για κάθε μία περίπτωση απεικονίζονται παρακάτω:

▪ **Φορτίο ώσης για σταθμευμένους δρομείς**

Πίνακας 4.16 – Αποτελέσματα περίπτωσης «Η» - Ταχύτητα επιβίωσης για σταθμευμένους δρομείς

Σταθμευμένοι δρομείς		
Συντελεστής οπισθέλκουσας C_d	Ροπή που αναπτύσσεται στην πτέρυγα κατά τη ταχύτητα αποκοπής M_{yB} (Nm)	Φορτίο στον άξονα λόγω ώσης $F_{x-shaft}$ (N)
1,5	25,840	88,594

Από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα (4.16) συμπεραίνουμε ότι:

Το φορτίο ($F_{x-shaft}$) που αναπτύσσεται στον άξονα του σταθμευμένου δρομέα λόγω ώσης, υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.33) και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι ($F_{x-shaft} = 88,594$) ενώ η ροπή (M_{yB}) που αναπτύσσεται στην πτέρυγα κατά την ταχύτητα αποκοπής, υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.31) και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι ($M_{yB} = 25,840$).

▪ **Φορτίο ώσης για περιστρεφόμενους δρομείς**

Πίνακας 4.17 – Αποτελέσματα περίπτωσης «Η» - Ταχύτητα επιβίωσης για περιστρεφόμενους δρομείς

Περιστρεφόμενοι δρομείς				
Συντελεστής άνωσης $C_{l,max}$	Καμπτική ροπή στη βάση της πτέρυγας M_{yB} (Nm)	Στιβαρότητα δρομέα) σ	Λόγος ταχυτήτων ακροπτερυγίου για V_{e50} λ_{e50}	Φορτίο στον άξονα λόγω ώσης $F_{x-shaft}$ (N)
2	22,969	0,047	12,513	3.144,057

Από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα (4.17) συμπεραίνουμε ότι:

Το φορτίο ($F_{x-shaft}$) που αναπτύσσεται στον άξονα του περιστρεφόμενου δρομέα λόγω ώσης, υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.34) και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι ($F_{x-shaft}$

=**3.144,057**) ενώ η καμπτική ροπή (M_{yB}) που αναπτύσσεται στη βάση της πτέρυγας κατά, υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.31) και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι (M_{yB} =**22,969**).

Η στιβαρότητα (σ) του δρομέα υπολογίζεται βάση της εξίσωσης:

$$\sigma = B \cdot \left(\frac{A_{projB}}{A_{swept}} \right) = 3 \cdot \left(\frac{0,150}{9,616} \right) = 0,047 \quad (4.15)$$



4.3.9. Αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «I»: Μέγιστη έκθεση (Maximum Exposure)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «I» για τη μέγιστη έκθεση σε κάθε εξεταζόμενη επιφάνεια της Α/Γ απεικονίζονται στους παρακάτω πίνακες (4.18) και (4.19).

Και σ' αυτήν την περίπτωση διακρίνουμε δύο περιπτώσεις για τις εξεταζόμενες επιφάνειες: για επιφάνειες μικρότερες του 0,1m και για επιφάνειες μεγαλύτερες του 0,1m. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για κάθε μία περίπτωση απεικονίζονται παρακάτω:

- Εξεταζόμενες επιφάνειες μικρότερες του 0,1m

Πίνακας 4.18 – Αποτελέσματα περίπτωσης «I» - Μέγιστη έκθεση για μικρές (<0,1m) επιφάνειες

Μέγιστη έκθεση				
Χαρακτηριστικό μήκος <0,1m	Επιφάνεια	Η υπό μελέτη επιφάνεια που προβάλλεται σε ένα επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση του ανέμου) $A_{proj} (m^2)$	Συντελεστής δύναμης C_f	Οπισθέλκουσα δύναμη ανά εξεταζόμενη επιφάνεια $F (N)$
		0,1	1,5	9,188
		0,1	2	12,250



Μέγιστη έκθεση				
Χαρακτηριστικό μήκος <0,1m	Επιφάνεια	Η υπό μελέτη επιφάνεια που προβάλλεται σε ένα επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση του ανέμου) $A_{proj} (m^2)$	Συντελεστής δύναμης C_f	Οπισθέλκουσα δύναμη ανά εξεταζόμενη επιφάνεια $F (N)$
Συνολική οπισθέλκουσα δύναμη				21,438

Από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα (4.18) συμπεραίνουμε ότι:

Η συνολική οπισθέλκουσα δύναμη (F) που αναπτύσσεται σε κάθε εξεταζόμενη επιφάνεια (κάθετη ή πλάγια) της Α/Γ υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.36) καθώς και των συντελεστών δύναμης (C_f) και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι ($F=21,438$)

▪ Εξεταζόμενες επιφάνειες μεγαλύτερες του 0,1m

Πίνακας 4.19 – Αποτελέσματα περίπτωσης «I» - Μέγιστη έκθεση για μεγάλες (>0,1m) επιφάνειες

Μέγιστη έκθεση				
Χαρακτηριστικό μήκος>0,1m	Επιφάνεια	Η υπό μελέτη επιφάνεια που προβάλλεται σε ένα επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση του ανέμου) $A_{proj} (m^2)$	Συντελεστής δύναμης C_f	Οπισθέλκουσα δύναμη ανά εξεταζόμενη επιφάνεια $F (N)$
		0,5	1,5	45,938
		0,5	2	61,250
Σύνολο				107,188

Αντίστοιχα από τα παραπάνω αποτελέσματα του πίνακα (4.19) συμπεραίνουμε ότι:

Η συνολική οπισθέλκουσα δύναμη (**F**) που αναπτύσσεται σε κάθε εξεταζόμενη επιφάνεια (κάθετη ή πλάγια) της Α/Γ υπολογίστηκε βάση της εξίσωσης (3.36) καθώς και των συντελεστών δύναμης (C_f) και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι (**F=107,188**).

4.3.10. Συγκριτικά αποτελέσματα: Εμφάνιση χειρότερης περίπτωσης φόρτισης και χειρότερου συνδυασμού περιπτώσεων φόρτισης (Worst Combination)

Τα συγκριτικά αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων των φορτίων απεικονίζονται στους παρακάτω πίνακες (4.20) και (4.21) όπου εμφανίζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών ώστε να μπορεί να διαπιστωθεί άμεσα, ποια είναι η χειρότερη περίπτωση φόρτισης καθώς και ο χειρότερος συνδυασμός των φορτίσεων:

Πίνακας 4.20 – Συγκριτικά αποτελέσματα – Συνολική ορμή περιπτώσεων φόρτισης (A, B, C, E, G και H)

Συνολική ροπή περίπτωσης Φορτίο A	Συνολική ροπή περίπτωσης Φορτίο B	Συνολική ροπή περίπτωσης Φορτίο C	Συνολική ροπή περίπτωσης Φορτίο E	Συνολική ροπή περίπτωσης Φορτίο F	Συνολική ροπή περίπτωσης Φορτίο G	Συνολική ροπή περίπτωσης Φορτίο H	Σύγκριση μέγιστης συνολικής ροπής περιπτώσεων (A – F)
281,416	2.105,043	1.769,419	845,338	66,046	339,299	48,809	2.105,043

Πίνακας 4.21 – Συγκριτικά αποτελέσματα – Συνολική ώθηση περίπτωση φόρτισης (D) και συνολικής αντίστασης περίπτωση φόρτισης (I) Χειρότερος συνδυασμός περιπτώσεων φόρτισης

Συνολική ώθηση περίπτωσης φορτίου D	Συνολική αντίσταση περίπτωσης φορτίου I	Σύγκριση μέγιστης τιμής περιπτώσεων (D και I)
7.362,441	21,438	7.362,441

Από τα συγκριτικά αποτελέσματα των παραπάνω δύο πινάκων (4.20) και (4.21) συμπεραίνουμε ότι:

- Η μέγιστη συνολική ροπή των περιπτώσεων (A, B, C, E, F, G και H) ασκείται στην περίπτωση του φορτίου «B» με μέγιστη τιμή **2.105,043** και
- η μέγιστη τιμή των περιπτώσεων φορτίων (D και I) είναι η συνολική ώθηση της περίπτωσης του φορτίου (D) με μέγιστη τιμή **7.362,411**.

Βάση των παραπάνω συγκριτικών αποτελεσμάτων συμπεραίνουμε ότι χειρότερη περίπτωση φόρτισης είναι η περίπτωση του φορτίου (**B**) και ο χειρότερος συνδυασμός των φορτίων της μικρής ανεμογεννήτριας, είναι η περίπτωση του φορτίου (**B**) και του φορτίου (**D**).

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^Ο – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1. Συζήτηση

Μέσω των υπολογισμών του Excel κι όσον αφορά την αντοχή μιας πολύ μικρής Α/Γ σύμφωνα με το πρότυπο του κανονισμού **IEC 61400-2/2013** διαπιστώθηκαν τα παρακάτω:

Εν κατακλείδι, υπολογίστηκαν οι αντοχές μιας πολύ μικρής ανεμογεννήτριας, σύμφωνα με τα πρότυπα του (**IEC-61400-2/2013**) όπως αναφέρθηκε για κάθε περίπτωση των φορτίων με τις αντίστοιχες συνθήκες περιβάλλοντος και προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα από τις μετρήσεις αυτές.

- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίου «Α» για κανονική λειτουργία, και εύρος τιμών ταχυτήτων ($0,5n_{design} - 1,5n_{design}$) είναι:

Τα φορτία (ΔF_{zB}) στην πτέρυγα λόγω φυγοκεντρικών δυνάμεων είναι ($\Delta F_{zB}=6.441,605$).

Τα φορτία (ΔM_{xB}) καμπτικής ροπής κατά μήκος του χείλους της πτέρυγας, είναι ($\Delta M_{xB}=19,292$).

Τα φορτία (ΔM_{yB}) καμπτικής ροπής κάθετα στις χορδές της πτέρυγας, είναι ($\Delta M_{yB}=34,435$).

Τα φορτία ($\Delta F_{x-shaft}$) λόγω ώσης στον άξονα είναι ($\Delta F_{x-shaft} =118,064$).

Επίσης, η στρεπτική ροπή στον άξονα ($\Delta M_{x-shaft}$) είναι ($\Delta M_{x-shaft} =36,294$).

Τέλος η καμπτική ροπή (ΔM_{shaft}) στον άξονα είναι ($\Delta M_{shaft} =191,395$).

- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «Β» για τον προσανεμισμό της Α/Γ είναι:

Η ροπή στην πτέρυγα ($M_{yB,centrifugal}$) λόγω φυγοκεντρικής δύναμης είναι ($M_{yB,centrifugal} =1,026$).

Η ροπή αδράνειας της πτέρυγας (I_B) υπολογίζεται βάση της παρακάτω εξίσωσης

$$I_B = \frac{m_B R^2}{3}$$

και η τιμή της βρέθηκε ότι είναι ($I_B = 1,531$).

Η ροπή στην πτέρυγα ($M_{yB,gyroscopic}$) λόγω γυροσκοπικής δύναμης υπολογίζεται βάση της εξίσωσης:

$$M_{yB,gyroscopic} = 2\omega_{yaw,max} I_B \omega_{n,desing}$$

και η τιμή της υπολογίστηκε ότι είναι ($M_{yB,gyroscopic} = 656,048$).

Επίσης, η καμπτική ροπή (M_{yB}) κάθετα στις χορδές είναι ($M_{yB} = 680,031$).

Αντίστοιχα, η ροπή ($M_{shaft(2blades)}$) στον άξονα με δύο πτέρυγες λόγω γυροσκοπικής δύναμης είναι ($M_{shaft(2blades)} = 1.312,096$),

και η ροπή ($M_{shaft(3blades)}$) στον άξονα με τρεις πτέρυγες λόγω γυροσκοπικής δύναμης είναι ($M_{shaft(3blades)} = 984,072$).

Τέλος, υπολογίστηκαν και τα φορτία μάζας και αξονικά φορτία εκκεντρότητας (M_{shaft}), για τις περιπτώσεις δύο και τριών περυγών αντίστοιχα και τα αποτελέσματα είναι:

$$M_{shaft(2blades)} = 1.425,012 \text{ και}$$

$$M_{shaft(3blades)} = 815,824$$

- Τα αποτελέσματα περίπτωσης φορτίου «C»: Σφάλμα περιστροφής (Yaw error) είναι:

Η ροπή στη βάση της πτέρυγας (M_{yB}) με φορά κάθετα στις χορδές (flapwise) για σφάλμα προσανεμισμού (30°) είναι ($M_{yB} = 1.769,419$) ενώ η ροπή στη βάση της πτέρυγας (M_{yB}) με φορά κάθετα στις χορδές (flapwise) βρέθηκε ότι είναι ($M_{yB} = 1.024,944$).

- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «D» για τη μέγιστη ώση είναι:

Η μέγιστη δύναμη ($M_{x-shaft}$) που αναπτύσσεται με πλήρη ώση, είναι ($M_{x-shaft}=7.362,441$).

- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «E» για τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής είναι:

Η μέγιστη δύναμη (M_{zB}) που αναπτύσσεται στην πτέρυγα και η καμπτική ροπή (M_{shaft}) στον άξονα είναι ($M_{zB}=6.573,067$) και ($M_{shaft}=845,338$).

- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «F» για βραχυκύκλωμα στο σημείο σύνδεσης του φορτίου είναι:

Η μέγιστη ροπή ($M_{x-shaft}$) που αναπτύσσεται στον άξονα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος και η μέγιστη ροπή ($M_{x,B}$) που αναπτύσσεται στην πτέρυγα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, είναι ($M_{x-shaft}=45,120$) και ($M_{x,B}=20,926$)

- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «G» για τερματισμό λειτουργίας της Α/Γ είναι:

Η ροπή ($M_{x-shaft}$) που αναπτύσσεται στον άξονα του δρομέα κατά την πέδηση για τον τερματισμό της λειτουργίας της Α/Γ είναι ($M_{x-shaft}=152,560$).

Αντίστοιχα, η ροπή ($M_{x,B}$) που αναπτύσσεται στην πτέρυγα κατά την πέδηση για τον τερματισμό της λειτουργίας της Α/Γ είναι ($M_{x,B}=56,739$).

- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «H» για την ταχύτητα επιβίωσης της Α/Γ είναι:

Το φορτίο ($F_{x-shaft}$) που αναπτύσσεται στον άξονα του σταθμευμένου δρομέα λόγω ώσης, είναι ($F_{x-shaft}=88,594$) ενώ η ροπή (M_{yB}) που αναπτύσσεται στην πτέρυγα κατά την ταχύτητα αποκοπής είναι ($M_{yB}=25,840$).

Το φορτίο ($F_{x\text{-shaft}}$) που αναπτύσσεται στον άξονα του περιστρεφόμενου δρομέα λόγω ώσης είναι ($F_{x\text{-shaft}}=3.144,057$) ενώ η καμπτική ροπή (M_{yB}) που αναπτύσσεται στη βάση της πτέρυγας είναι ($M_{yB}=22,969$).

Η στιβαρότητα (σ) του δρομέα υπολογίζεται βάση της εξίσωσης:

$$\sigma = B \cdot \left(\frac{A_{projB}}{A_{swept}} \right) = 3 \cdot \left(\frac{0,150}{9,616} \right) = 0,047$$

- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της περίπτωσης φορτίων «I» για τη μέγιστη έκθεση σε κάθε εξεταζόμενη επιφάνεια της A/Γ είναι:

Η συνολική οπισθέλκουσα δύναμη (F) που αναπτύσσεται σε κάθε εξεταζόμενη επιφάνεια (κάθετη ή πλάγια) της A/Γ, καθώς και των συντελεστών δύναμης (C_f) είναι ($F=21,438$)

Η συνολική οπισθέλκουσα δύναμη (F) που αναπτύσσεται σε κάθε εξεταζόμενη επιφάνεια (κάθετη ή πλάγια) της A/Γ καθώς και των συντελεστών δύναμης (C_f) είναι ($F=107,188$).

Όσον αφορά τα συγκριτικά αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων των φορτίων είναι:

Η μέγιστη συνολική ροπή των περιπτώσεων (A, B, C, E, F, G και H) ασκείται στην περίπτωση του φορτίου «B» με μέγιστη τιμή **2.105,043** και

η μέγιστη τιμή των περιπτώσεων φορτίων (D και I) είναι η συνολική ώθηση της περίπτωσης του φορτίου (D) με μέγιστη τιμή **7.362,411**.

Βάση των παραπάνω συγκριτικών αποτελεσμάτων συμπεραίνουμε ότι **χειρότερη** περίπτωση φόρτισης είναι η περίπτωση του φορτίου (**B**) και ο **χειρότερος συνδυασμός** των φορτίων της μικρής ανεμογεννήτριας, είναι η περίπτωση του φορτίου (**B**) σε συνδυασμό με το φορτίο (**D**).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ✚ Arora, Jasbir S. 2004. Introduction to Optimum Design. 2nd ed. Boston: Elsevier.
- ✚ Brown, Robert Wade. 2001. Practical Foundation Engineering Handbook. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
- ✚ Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. 2001. Wind Energy Handbook. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- ✚ Das, Braja M. 2007. Principles of Foundation Engineering. 6th ed. New Delhi, Cengage Learning.
- ✚ <http://www.miniwind.gr/>
- ✚ https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine
- ✚ International Electrotechnical Commission (IEC). 2005. Wind Turbines – Part 2: Design Requirements(61400-2). Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission (IEC).
- ✚ Kocer, Fatma Y. and Arora, Jasbir S. 2002. Optimal Design of Latticed Towers Subjected to Earthquake Loading. Journal of Structural Engineering 128, no. 2 (February): 197-204.
- ✚ Lu, X. McElroy and M. B., J. Kiviluoma, Global potential for wind-generated electricity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States 106, 2009.
- ✚ Murtagh P.J., Basu B., and Broderick, B.M. 2005. Response of Wind Turbines Including Soil-Structure Interaction. Proceedings of the Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, paper 270: 1-17.

Βιβλιογραφία

✚ Negm, Hani M. and Maalawi, Karam Y. 1999. Structural Design Optimization of Wind Turbine Towers. Computers and Structures, 649-666, 2000.

✚ Paul Gipe, Testing the Power Curves of Small Wind Turbines, Chelsea Green Publishing Company, Summer 2000.

✚ Παντζίρης Κ., “Κατασκευή μικρής α/γ και προσομοίωση της διασύνδεσής της σε μικροδίκτυο αγροτικής εφαρμογής”, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., 2010.