



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

«Συντήρηση και επισκευή ανεμογεννητριών»
“Maintenance and repairment of wind turbines”



Υπό τους φοιτητές :

Παπαγεωργίου Κωνσταντίνος A.M.:2920056

Τσιρογιάννης Σπύρος A.M.:2920042

Πτυχιακή Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Πτυχίου του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας

Λάρισα, 2024

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Βαγρόπουλος Στυλιανός
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων
Ενέργειας, Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Χουλιάρης Ιωάννης
Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή Τεχνολο-
γίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Λεκίδης Αλέξιος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας,
Σχολή Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Με το παρόν κείμενο βεβαιώνω ότι ο κάτωθι υπογράφων είμαι συγγραφέας της παρούσης πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η οποία παραδόθηκε, μετά από έγκριση του επιβλέποντας καθηγητή μου, σε έντυπη και ψηφιακή μορφή στη Γραμματεία του Τμήματος. Επίσης δηλώνω πως κάθε πηγή που χρησιμοποίησα (βιβλιογραφία, αρθρογραφία, δικτυογραφία), για την υποστήριξη των υποθέσεων της μελέτης και της ερευνάς μου, είναι πλήρως συμβατή με τα ακολουθούμενα επιστημονικά πρότυπα και, επιπλέον, αναφέρεται ρητά, υπό μορφή αναφοράς-παραπομπής, σε όλο το φάσμα κειμένων της παρούσης εργασίας. Αυτό ισχύει για τη χρήση δευτερογενών δεδομένων (πινάκων, διαγραμμάτων και εικόνων), ιδεών και λέξεων, τα οποία και αναφέρονται είτε ακριβώς όπως υπάρχουν στις πηγές είτε μεθερμηνεύονται από εμένα.

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ
ΟΝΟΜΑ	ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2920056
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΤΣΙΡΟΓΙΑΝΝΗΣ
ΟΝΟΜΑ	ΣΠΥΡΟΣ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2920042
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2024. ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ – ΤΣΙΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΣΠΥΡΟΣ

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας της Σχολής Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα της διπλωματικής μας εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Βαγρόπουλο Στυλιανό, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μας.

Εγώ, ο Κωνσταντίνος Παπαγεωργίου θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον θείο μου και την μητέρα μου για όλες τις ανέσεις, παροχές και κουράγιο που μου έδωσαν τα τελευταία χρόνια.

Εγώ, ο Σπύρος Τσιρογιάννης θέλω να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην σύζυγο μου Νόρα και στον γιο μας Αντώνη για την αμέριστη αγάπη και υποστήριξη τους, καθώς και για την πίστη τους σε μένα. Η ενθάρρυνση και η κατανόησή τους ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον συμφοιτητή και φίλο μου, Κωνσταντίνο Παπαγεωργίου, για την υποστήριξή του, τη συνεργασία του και την ενθάρρυνσή του καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας. Η φιλία μας έκανε αυτή την πορεία πιο ευχάριστη και δημιουργική.

Τέλος, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Θωμά και Μαλαματή καθώς και στα αδέρφια μου Νικόλαο, Μαρίνα και Θεόδωρο για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί πρωταρχική προτεραιότητα στην εποχή μας, καθώς οι παραδοσιακοί πόροι εξαντλούνται και η ανάγκη για μείωση των εκπομπών αερίων γίνεται επιτακτική. Η αιολική ενέργεια αναδεικνύεται ως σημαντική λύση, προσφέροντας ανεξάντλητη πηγή ενέργειας ενώ η τεχνολογία της εξελίσσεται διαρκώς.

Η εργασία αυτή εστιάζει στη συντήρηση και επισκευή ανεμογεννητριών, αναλύοντας τα διάφορα συστήματα ελέγχου και παρουσιάζοντας προηγμένες τεχνολογίες συντήρησης αλλά και επισκευής που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εγκαταστάσεις.

Αρχικά, παρουσιάζεται μια ιστορική επισκόπηση του τομέα της αιολικής ενέργειας και των διαφορετικών τύπων ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια, αναλύεται η παγκόσμια και ευρωπαϊκή εικόνα της αιολικής ενέργειας, καθώς και η εισαγωγή αυτής της τεχνολογίας στην Ελλάδα. Έπειτα με βάση τα εγχειρίδια και την τεχνική τεκμηρίωση γίνεται περιγραφή της ανεμογεννήτριας N117/3000 της εταιρίας NORDEX, ώστε να αναλυθούν τα διάφορα μέρη των ανεμογεννητριών, όπως ο ρότορας, το κιβώτιο ταχυτήτων, τα ηλεκτρικά συστήματα, καθώς και άλλα γενικά και τεχνικά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια δίνεται έμφαση στην ανάλυση των διαφόρων συστημάτων ελέγχου και των προηγμένων τεχνολογιών που εφαρμόζονται για τον έλεγχο της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

Στο τέλος, παρουσιάζονται οι διάφορες διαδικασίες συντήρησης και επισκευής, εστιάζοντας στα διάφορα μέρη των ανεμογεννητριών και στις αναγκαίες γνώσεις και δεξιότητες που απαιτείται να έχει ένας τεχνικός στον τομέα αυτόν. Μέσω αυτής της προσέγγισης, επιδιώκεται η βελτίωση της απόδοσης και η διασφάλιση της μακροζωίας των ανεμογεννητριών, προς όφελος της βιωσιμότητας του ενεργειακού συστήματος και του περιβάλλοντος.

Λέξεις-κλειδιά

αισθητήρες, ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, εναλλασσόμενο ρεύμα, επισκευή, συντήρηση, συνεχές ρεύμα, τεχνικός ανεμογεννητριών.

Abstract

The development of renewable energy sources is a top priority in our time, as traditional resources are being depleted and the need to reduce gas emissions becomes imperative. Wind energy is emerging as a critical solution, as it offers an inexhaustible source of energy and as technology is constantly evolving. The thesis focuses on the maintenance and repair of wind turbines, analyzing the various control systems and maintenance and repair technologies used in these installations.

First, a historical overview of the wind energy sector and the different types of wind turbines is presented. Next, the global and European picture of wind energy is analyzed, as well as the introduction of this technology in Greece. Then, based on manuals and brochures, a description of the NORDEX N117/3000 wind turbine to analyze the various parts of the wind turbines such as the rotor, gearbox, the electrical system included and other general and technical characteristics. Subsequently, the thesis focuses on the analysis of various control systems and various advanced control systems applied to control the condition of the wind turbine.

At the end, the various maintenance and repair procedures are presented, focusing on the different parts of the wind turbines and the necessary knowledge and skills required for a technician in this field. Through this approach, the aim is to improve the efficiency and ensure the longevity of wind turbines, for the benefit of the sustainability of the energy system and the environment.

Key-words

alternative current, direct current, hawt, maintenance, nordex, repairment, sensors, vawt, wind turbine technician.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	iv
Abstract	v
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Ιστορική αναδρομή	1
1.2 Είδη ανεμογεννητριών	4
1.2.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.....	5
1.2.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα	9
1.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τύπων ανεμογεννητριών 12	
1.3 Παγκόσμια χερσαία και υπεράκτια αιολική ενέργεια	14
1.4 Χερσαία και υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Ευρώπη	16
1.5 Χερσαία και Υπεράκτια Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα	18
Κεφάλαιο 2: Περιγραφή της ανεμογεννήτριας N117/3000, τεχνολογίας NORDEX	20
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά	20
2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά	22
2.2.1 Κλιματικοί όροι.....	22
2.2.2 Μετατροπέας (Converter)	23
2.2.3 Γεννήτρια (Generator)	24
2.2.4 Έλεγχος κατεύθυνσης (Yaw)	25
2.2.5 Ρότορας (Rotor).....	26
2.2.6 Κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox)	29
2.2.7 Φρένο (Brake)	30
2.2.8 Συστήματα ασφαλείας (Safety Systems)	31
2.2.9 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος (Power curve).....	32
Κεφάλαιο 3: Συστήματα ελέγχου	34
3.1 Σύστημα ελέγχου ταχύτητας (Pitch control system):.....	35

3.1.1	Πτερύγια (Rotor blades) και Σύστημα ελέγχου κλίσης πτερυγίων (Pitch control system):	36
3.1.2	Υδραυλικοί κύλινδροι (Hydraulic cylinders):	38
3.1.3	Υδραυλικά συστήματα ελέγχου βήματος	39
3.1.4	Ηλεκτρικά συστήματα ελέγχου βήματος	40
3.1.5	Αισθητήρες γωνίας (Angle sensors):	40
3.2	Σύστημα κατεύθυνσης ελέγχου (Yaw control system):	42
3.2.1	Κινητήρες κατεύθυνσης (Yaw motors):	43
3.2.2	Αισθητήρες κατεύθυνσης (Yaw sensors):	46
3.3	Σύστημα αυτόματου φρεναρίσματος (Automatic braking system):	47
3.4	Σύστημα ελέγχου ανέμου και θερμοκρασίας (Wind and temperature monitoring system):	49
3.4.1	Αισθητήρες ανεμόμετρου (Anemometers):	49
3.4.2	Αισθητήρες θερμοκρασίας (Temperature sensors):	51
3.5	Σύστημα ελέγχου κατάστασης (condition monitoring system):	56
3.5.1	Αισθητήρες κατάστασης (Condition sensors):	58
3.5.2	Μονάδες επεξεργασίας δεδομένων (Data processing units): ..	58
3.5.3	Συστήματα διάγνωσης (Diagnostic systems):	61
3.5.4	Συστήματα παρακολούθησης προγραμματιζόμενης συντήρησης (Programmable maintenance monitoring systems):	62
3.6	Συστήματα ελέγχου καινοτομιών (Innovation control systems):	64
3.6.1	Αισθητήρες νέας γενιάς (Next-generation sensors):	64
3.6.2	Τεχνητή νοημοσύνη και Μηχανική μάθηση (Artificial intelligence and Machine learning):	65
3.6.3	Ευέλικτη αρχιτεκτονική συστήματος (Flexible system architecture):	68
3.6.4	Σύνδεση και δικτύωση (Connectivity and networking):	69
	Κεφάλαιο 4: Συντήρηση	70
4.1	Οφέλη της συντήρησης	71
4.2	Είδη συντήρησης	73
4.2.1	Προληπτική συντήρηση	73
4.2.2	Προγνωστική συντήρηση	75
4.2.3	Περιοδική συντήρηση	76

4.3	Παραδείγματα διαδικασιών συντήρησης:.....	76
4.3.1	Μηχανικά εξαρτήματα	77
4.3.2	Ηλεκτρικά Εξαρτήματα.....	79
4.3.3	Επιφανειακή συντήρηση στα πτερύγια	81
4.4	Κόστος συντήρησης.....	83
4.4.1	Θεωρητική προσέγγιση κόστους συντήρησης	83
4.4.2	Πρακτικές για μείωση κόστους	86
	Κεφάλαιο 5: Επισκευή	90
5.1	Σύγκριση επισκευής και συντήρησης.....	90
5.2	Τεχνικές αντικατάστασης και επισκευής εξαρτημάτων:.....	93
5.2.1	Μηχανικά	93
5.2.2	Ηλεκτρικά	95
5.2.3	Πτερύγια	99
	Κεφάλαιο 6: Τεχνικός ανεμογεννητριών	103
6.1	Προϋποθέσεις και προσόντα:	104
6.2	Εργασιακό περιβάλλον και συνθήκες:	107
6.3	Πρωτόκολλα ασφαλείας.....	109
6.3.1	Οδηγίες για εργασία σε ύψος	109
6.3.2	Πρώτες βοήθειες	111
6.3.3	Πυροσβεστική επίγνωση	112
6.3.4	Επιβίωση στη θάλασσα.....	113
6.4	Σταδιοδρομία και μισθοί.....	114
	Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα	118
	Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία	120

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1: ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ, ΠΗΓΕΣ: [18],[19]	12
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-2: ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ, ΠΗΓΕΣ: [20]	12
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-3: ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ DARRIEUS, ΠΗΓΗ: [21]	13
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-4: ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ SAVONIUS, ΠΗΓΗ: [23]	13
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΙΜΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ N117/3000, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ NORDEX, ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΠΟ: [30]	24
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-2: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΙΜΕΣ ΡΟΤΟΡΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ N117/3000, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ NORDEX, ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΠΟ: [30]	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-3: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΙΜΕΣ ΚΙΒΩΤΙΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ N117/3000, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ NORDEX, ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΠΟ: [34]	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-4: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΤΙΜΕΣ ΦΡΕΝΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ N117/3000, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ NORDEX, ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΠΟ: [34]	31
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΑ ΑΚΡΙΒΗ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΑΝΕΜΟΥ, ΠΗΓΗ: [56].	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ, ΠΗΓΗ: [65].	54
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3: ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΒΑΣΗ ΤΩΝ ΒΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΚΤΕΛΟΥΝΤΑΙ, ΠΗΓΗ: [78].	67

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1-1: ΠΕΡΣΙΚΟΣ ΑΝΕΜΟΜΥΛΟΣ PANEMONE, ΣΙΣΤΑΝ, ΙΡΑΝ, ΠΗΓΗ: [1]	1
ΕΙΚΟΝΑ 1-2: ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ 50 ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ, ΠΗΓΗ: [3]	2
ΕΙΚΟΝΑ 1-3: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ Α/Γ, ΠΗΓΗ: [6]	4
ΕΙΚΟΝΑ 1-4: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΕΝΑ ΠΤΕΡΥΓΙΟ, ΠΗΓΗ: [10]	6
ΕΙΚΟΝΑ 1-5: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΔΥΟ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΠΗΓΗ: [11]	6
ΕΙΚΟΝΑ 1-6: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΤΡΙΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ, ΠΗΓΗ: [12]	7
ΕΙΚΟΝΑ 1-7: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΛΕΠΙΔΩΝ, ΠΗΓΗ: [14]	8
ΕΙΚΟΝΑ 1-8: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΥΠΟΥ SAVONIUS ΠΗΓΗ: [16]	10
ΕΙΚΟΝΑ 1-9: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ DARRIEUS, ΠΗΓΗ: [17]	11
ΕΙΚΟΝΑ 1-10: ΝΕΑ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ 2023, ΠΗΓΗ: [23]	14
ΕΙΚΟΝΑ 1-11: Η ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΥΞΑΝΕΤΑΙ ΜΕΧΡΙ ΤΟ 2030,. ΠΗΓΗ: [23].	15
ΕΙΚΟΝΑ 1-12: ΕΤΗΣΙΑ ΧΕΡΣΑΙΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ, ΠΗΓΗ: [22]	16
ΕΙΚΟΝΑ 1-13: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΓΙΑ ΕΤΗΣΙΑ ΧΕΡΣΑΙΑ ΚΑΙ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΕ ΚΑΤΑ ΤΟ 2024-2030 ΠΗΓΗ: [26]	17
ΕΙΚΟΝΑ 1-14: ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ, 2023, ΠΗΓΗ: [27]	18
ΕΙΚΟΝΑ 1-15: ΧΑΡΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΗΓΗ: [25]	19
ΕΙΚΟΝΑ 2-1: ΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΗΣ ΝΑΣΕΛΑΣ (NACELLE) ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ N117/3000, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ NORDEX ΠΗΓΗ: [28]	21
ΕΙΚΟΝΑ 2-2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ N117/3000, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ NORDEX, ΠΗΓΗ: [32]	33
ΕΙΚΟΝΑ 3-1: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ, ΠΗΓΗ: [34]	34
ΕΙΚΟΝΑ 3-2: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ RITCH CONTROL, ΠΗΓΗ: [36],	37
ΕΙΚΟΝΑ 3-3: ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ, ΠΗΓΗ: [37]	37
ΕΙΚΟΝΑ 3-4: ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΤΕΣ, ΠΗΓΗ: [49].	41
ΕΙΚΟΝΑ 3-5: ΜΑΓΝΗΤΟΣΥΣΤΑΛΤΙΚΟΙ ΓΡΑΜΜΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΘΕΣΗΣ, ΠΗΓΗ: [50].	42
ΕΙΚΟΝΑ 3-6: ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ, ΠΗΓΗ: [52].	44
ΕΙΚΟΝΑ 3-8: ΕΝΕΡΓΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ, ΠΗΓΗ: [53].	45
ΕΙΚΟΝΑ 3-9: ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ, ΠΗΓΗ: [55].	46
ΕΙΚΟΝΑ 3-10: ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΣΚΟΦΡΕΝΟ, ΠΗΓΗ: [58].	47
ΕΙΚΟΝΑ 3-11: ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ, ΠΗΓΗ: [61].	50
ΕΙΚΟΝΑ 3-12: ΚΥΠΕΛΛΟΦΟΡΑ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΑ (VECTOR-THIES-NRG), ΠΗΓΗ: [62].	50
ΕΙΚΟΝΑ 3-13: ΑΝΕΜΟΔΕΙΚΤΗΣ, ΠΗΓΗ: [63].	51
ΕΙΚΟΝΑ 3-14: ΨΥΞΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ, ΠΗΓΗ: [63].	53

ΕΙΚΟΝΑ 3-15: ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ, ΠΗΓΗ: [64].	53
ΕΙΚΟΝΑ 3-16: ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ, ΠΗΓΗ: [66].	55
ΕΙΚΟΝΑ 3-17: ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΠΗΓΗ: [67].	55
ΕΙΚΟΝΑ 3-18: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ, ΠΗΓΗ: [68].	56
ΕΙΚΟΝΑ 3-19: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΤΕΣΣΕΡΑ ΣΤΑΔΙΑ, ΠΗΓΗ: [68].	56
ΕΙΚΟΝΑ 3-20: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΠΕΝΤΕ ΣΤΑΔΙΑ, ΠΗΓΗ: [68].	57
ΕΙΚΟΝΑ 3-21: ΣΤΑΔΙΑ CMS, ΠΗΓΗ: [72].	60
ΕΙΚΟΝΑ 3-22: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΓΡΗΓΟΡΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ FOURIER, ΠΗΓΗ: [75].	61
ΕΙΚΟΝΑ 3-23: ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΙ ΣΤΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ, ΠΗΓΗ: [76].	65
ΕΙΚΟΝΑ 4-1: ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΑΣ ΓΙΑ ΨΥΞΗ ΣΤΟΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ, ΠΗΓΗ: [87].	78
ΕΙΚΟΝΑ 4-2: ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΩΝ DC ΑΡΙΣΤΕΡΑ, ΑΣΦΑΛΕΙΩΝ AC ΔΕΞΙΑ, ΠΗΓΗ: [89].	79
ΕΙΚΟΝΑ 4-3: ΑΣΦΑΛΕΙΕΣ ΦΙΛΤΡΟΥ ΣΥΣΦΙΞΗΣ, ΠΗΓΗ: [89].	80
ΕΙΚΟΝΑ: 4-4 ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΛΕΠΙΔΩΝ Α/Γ, ΠΗΓΗ: [91].	82
ΕΙΚΟΝΑ 4-5: ΚΟΣΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ,ΠΗΓΗ:[94].	84
ΕΙΚΟΝΑ 5-1: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΚΑΤΑ ΠΟΣΟΝ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΤΕΙ Η ΝΑ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΘΕΙ ΕΝΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ, ΠΗΓΗ: [97].	91
ΕΙΚΟΝΑ 5-2: ΜΙΚΡΟΣΚΑΣΙΜΑΤΑ (MICROPITTING), ΠΗΓΗ: [97].	94
ΕΙΚΟΝΑ 6-1: ΔΕΙΓΜΑ ΑΠΟ ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ Α/Γ, ΠΗΓΗ: [87].	103
ΕΙΚΟΝΑ 6-2: ΜΕΣΑ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΕΧΝΙΚΟΥ Α/Γ, ΠΗΓΗ: [103].	105
ΕΙΚΟΝΑ 6-3: ΣΥΣΚΕΥΗ MILAN, ΠΗΓΗ: [108].	110
ΕΙΚΟΝΑ 6-4: ΑΠΙΝΙΔΩΤΗΣ, ΠΗΓΗ: [109].	111
ΕΙΚΟΝΑ 6-5: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΙΒΙΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΘΑΛΑΣΣΑ, ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΑΠΟ: [110].	114
ΕΙΚΟΝΑ 6-6:ΜΙΣΘΟΙ ΤΕΧΝΙΚΩΝ Α/Γ, ΠΗΓΗ: [116].	116
ΕΙΚΟΝΑ 6-7:ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΜΙΣΘΩΝ ΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥΣ Α/Γ, ΠΗΓΗ: [114].	116

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η ιστορία των ανεμογεννητριών είναι μια απόδειξη των μακροχρόνιων προσπαθειών της ανθρωπότητας να αξιοποιήσει τη δύναμη του ανέμου για διάφορους σκοπούς, που χρονολογούνται από χιλιετίες πριν. Ήδη από το 5000 π.Χ., οι αρχαίοι πολιτισμοί αναγνώρισαν τη χρησιμότητα του ανέμου για την προώθηση πλοίων κατά μήκος του Νείλου.

Το παλαιότερο είδος ανεμόμυλου που έχει βρεθεί, ήταν περσικής προέλευσης και εφευρέθηκε κάποια στιγμή γύρω στο 700-900 μ.Χ. Αυτό το σχέδιο ονομάζεται *Panemone* (εικόνα 1-1). Είναι στην ουσία μία κατασκευή με κάθετα ελαφριά ξύλινα πανιά που συνδέονταν με οριζόντιες αντηρίδες (δοκοί που προεξέχουν από έναν τοίχο) σε έναν κεντρικό κατακόρυφο άξονα. Κατασκευάστηκε με αρχικό σκοπό να αντλεί νερό και στη συνέχεια τροποποιήθηκε για να αλέθει σιτηρά [1].

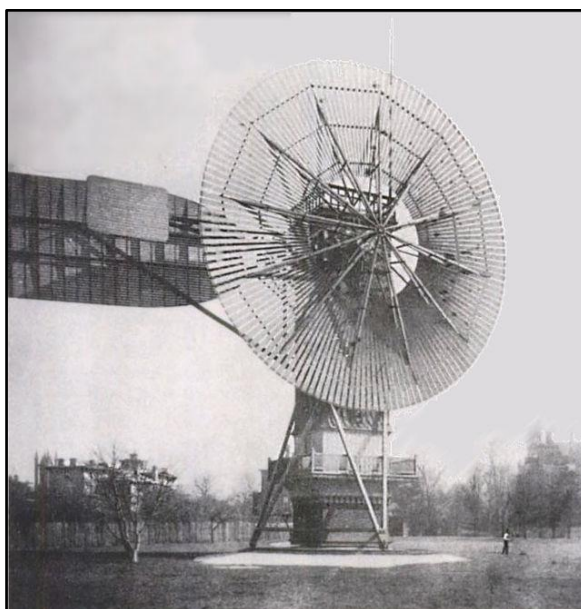


Εικόνα 1-1: Περσικός ανεμόμυλος *Panemone*, Σιστάν, Ιράν, Πηγή: [1]

Ωστόσο, η πρακτική και αποδοτική χρήση των ανεμόμυλων ξεκίνησε τον 12ο αιώνα, καθώς οι Ευρωπαίοι κατασκεύασαν μύλους για την επεξεργασία σιτηρών και τη μεταφορά νερού, σηματοδοτώντας ένα σημαντικό βήμα προς την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας.

Έπειτα, τον 19ο αιώνα, οι επιστήμονες και οι εφευρέτες άρχισαν να εξερευνούν την αιολική ενέργεια ως βιώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο καθηγητής James Blyth, ένας Σκωτσέζος μηχανικός, έκανε άλματα σε αυτόν τον τομέα χρησιμοποιώντας συσσωρευτές που αναπτύχθηκαν από τον Camille Faure για να τροφοδοτήσει τον φωτισμό της αυλής του. Παρά την αρχική επιτυχία, η πρόταση του Blyth να προμηθεύσει τα γύρω σπίτια με ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τον άνεμο αντιμετώπισε αντιδράσεις λόγω δεισιδαιμονιών. Παρ' όλα αυτά, ο Blyth συνέχισε να παρέχει ενέργεια σε ένα τοπικό άσυλο, ανοίγοντας το δρόμο για ευρύτερη αποδοχή εφαρμογών αιολικής ενέργειας [2].

Εν τω μεταξύ, οι εξελίξεις στις Ηνωμένες Πολιτείες οδήγησαν σε πιο αποτελεσματικές τεχνολογίες στροβίλων, όπως ο στρόβιλος 50 πτερυγίων (εικόνα 1-2). Ωστόσο, αυτές οι καινοτομίες τελικά έδωσαν τη θέση τους σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, επισκιάζοντας μεμονωμένες πρωτοβουλίες αιολικής ενέργειας [3].



Εικόνα 1-2: Στρόβιλος 50 πτερυγίων, Πηγή: [3]

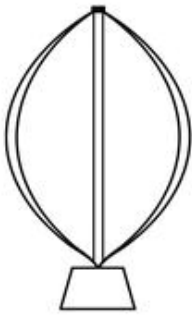
Αξιοσημείωτο ρόλο διαδραμάτισε επίσης η Δανία στην προώθηση της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, με επιστήμονες όπως ο Poul la Cour να υποστηρίζουν ένα όραμα που ξεπέρασε τους Αμερικανούς και Άγγλους ομολόγους τους. Ο La Cour μετέτρεψε την εφεύρεσή του σε πρωτότυπο σταθμό αιολικής ενέργειας, θέτοντας τις βάσεις για τη Δανία να φιλοξενήσει πάνω από 2.000 ανεμόμυλους, συνολικής ισχύος 30 MW, μέχρι τις αρχές του αιώνα. Η δυναμική αυτή συνεχίστηκε και τον 20ό αιώνα, καθώς και άλλες χώρες αναγνώρισαν τις δυνατότητες της αιολικής ενέργειας εν μέσω αυξανόμενης εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα για ενεργειακές ανάγκες.

Συγκεκριμένα, απομακρυσμένες περιοχές όπως αγροκτήματα στις Ηνωμένες Πολιτείες άρχισαν να αξιοποιούν την αιολική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις αρχές του 1900, αν και αυτή η πρακτική δεν θεωρήθηκε αρχικά βιώσιμη για τα αστικά κέντρα παγκοσμίως. Η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κέρδισε έδαφος στις αρχές της δεκαετίας του 1970 εν μέσω κρίσεων καυσίμων, ωθώντας τις κυβερνήσεις να διερευνήσουν εναλλακτικές, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συγκεκριμένα, οι Ηνωμένες Πολιτείες πρωτοστάτησαν στην έρευνα μέσω της NASA για τον εντοπισμό ενεργειακών πόρων. Μέχρι τη δεκαετία του 1980, οι κυβερνήσεις έδωσαν κίνητρα για καθαρότερες πηγές ενέργειας, με την Καλιφόρνια να προσφέρει φορολογικά κίνητρα για την αιολική ενέργεια [2].

Με το πέρασμα του χρόνου, οι ανεμογεννήτριες εξαπλώθηκαν σε όλο τον κόσμο. Πιο συγκεκριμένα, στην Ελλάδα, περιοχές όπως η Κρήτη, η Πελοπόννησος, η Εύβοια και τα νησιά του Αιγαίου διαθέτουν σημαντικό δυναμικό αιολικής ενέργειας, φιλοξενώντας πολυάριθμα αιολικά πάρκα σε ιδανικές θέσεις για αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Η αξιοποίηση αυτού του δυναμικού παράλληλα με τις εξελισσόμενες σύγχρονες τεχνολογίες ανεμογεννητριών έχει τεράστια σημασία για τη βιώσιμη ανάπτυξη, τη μείωση του ενεργειακού κόστους, την προστασία του περιβάλλοντος και τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής [4].

1.2 Είδη ανεμογεννητριών

Όπως αναφέρθηκε και στην ιστορική αναδρομή, υπήρξαν αρκετές αλλαγές στις ανεμογεννήτριες. Τα τελευταία χρόνια, υπήρξε σημαντική οικονομική ανάπτυξη στη βιομηχανία κατασκευής ανεμογεννητριών και κατά συνέπεια, έχουν κατασκευαστεί πολλές ανεμογεννήτριες για να αξιοποιήσουν την αιολική ενέργεια. Αυτές οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον αριθμό των πτερυγίων και με βάση τον προσανατολισμό του άξονα περιστροφής τους σε σχέση με τη Γη. Ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα, υπάρχουν ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα [Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)] και ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα [Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)]. Αυτές μπορούν να λάβουν και υποκατηγορίες (εικόνα 1-3) του τύπου ανέλκυσης (lift-type) και τύπου οπισθέλκουσας (drag-type) [5].

	HAWT	VAWT
Lift Type		
Drag Type		

Εικόνα 1-3: Κατηγορίες και υποκατηγορίες ΑΓ, Πηγή: [6]

1.2.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο με την επιφάνεια της γης και συνήθως παράλληλο με την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτές οι ανεμογεννήτριες έχουν διαφορετικό αριθμό πτερυγίων, συνήθως από ένα έως τρία, με την πτερωτή να τοποθετείται είτε μπροστά από τον πύργο στήριξης (προσήμεμη διάταξη/upwind) είτε πίσω από αυτόν (υπήνεμη διάταξη/downwind). Στην κατηγορία αυτών των ανεμογεννητριών περιλαμβάνονται οι κλασικοί ανεμόμυλοι και οι αργές μηχανές πολλών πτερυγίων "αμερικανικού τύπου", οι οποίες παρότι είναι παλαιού τύπου έχουν καλή απόδοση. Αυτοί οι τύποι μηχανών χρησιμοποιούνταν παλιότερα για την άντληση νερού και σε γεωργικές χρήσεις. Από την άλλη πλευρά, οι ανεμογεννήτριες τύπου "έλικα" αποτελούν το σημαντικότερο μέρος των σύγχρονων αιολικών μηχανών (περίπου 90% του συνόλου των εγκατεστημένων παγκοσμίως). Αυτές οι μηχανές έχουν υψηλή αεροδυναμική απόδοση και λειτουργούν αποτελεσματικά σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Μπορεί να ρυθμίσουν την ταχύτητα περιστροφής τους για προστασία από ισχυρούς ανέμους, χρησιμοποιώντας ειδικά αεροδυναμικά βοηθήματα στα πτερύγια. Η παραγόμενη ενέργεια μεταφέρεται είτε μέσω μηχανισμού μετάδοσης κίνησης στον πύργο στήριξης είτε από την πτερωτή στην ηλεκτρική γεννήτρια στον πύργο [7].

Αν και οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα συνεχίζουν να αναπτύσσονται, διάφοροι τύποι μηχανών "cross-wind" που έχουν προταθεί δεν είναι τόσο αποδοτικοί. Αυτές οι μηχανές παρουσιάζουν προβλήματα σχετικά με τη συλλογή και τη ρύθμιση της ενέργειας που παράγονται, καθώς και με τη ρύθμιση της κατεύθυνσης της πτερωτής σε περιπτώσεις ισχυρών μεταβολών του ανέμου [8].

Έπειτα χωρίζονται με βάση τα πτερύγια, όπου υπάρχουν:

- Ανεμογεννήτριες με ένα ή δύο πτερύγια
- Ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια
- Πολυπτέρυγες

1.2.1.1 Ανεμογεννήτριες με ένα ή δύο πτερύγια

Οι ανεμογεννήτριες με ένα ή δύο πτερύγια (εικόνες 1-3,1-4) έχουν το πλεονέκτημα της μείωσης του κόστους και του βάρους κατασκευής. Ωστόσο, απαιτούν μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής για να παράγουν την ίδια ποσότητα ενέργειας με της ανεμογεννήτριες τριών πτερυγίων. Αυτή η αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας επιδεινώνει τα προβλήματα θορύβου και παρεμπόδισης του οπτικού πεδίου [9].



Εικόνα 1-4: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα με ένα πτερύγιο, Πηγή: [10]



Εικόνα 1-5: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα με δύο πτερύγια Πηγή: [11]

1.2.1.2 Ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια

Οι ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια (εικόνα 1-6) αποτελούν τις πιο διαδεδομένες καθώς είναι πιο ισορροπημένες. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: αυτές που ο ρότορας τοποθετείται στην προσήνεμη πλευρά (είναι η πλευρά που είναι στραμμένη προς τον άνεμο) και αυτές που τοποθετείται στην υπήνεμη πλευρά (είναι η πλευρά που είναι αντίθετη προς τον άνεμο). Ο ρότορας πρέπει πάντα να προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση του ανέμου, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συστήματος ενεργητικής περιστροφής. Οποιαδήποτε αλλαγή στην κατεύθυνση του ανέμου χωρίς να αλλάξει η κατεύθυνση του ρότορα οδηγεί σε μείωση της παραγωγής ενέργειας. Οι βέλτιστες τοποθεσίες για αυτούς τους τύπους ανεμογεννητριών είναι ανοικτές περιοχές με λίγα εμπόδια και ομαλή ροή αέρα. Είναι πιο αποδοτικές σε σύγκριση με αυτές που έχουν λιγότερα πτερύγια και παρουσιάζουν σε μικρότερο βαθμό τα ίδια προβλήματα, όπως θόρυβος και παρεμπόδιση του οπτικού πεδίου.



Εικόνα 1-6: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια, Πηγή: [12]

1.2.1.3 Πολυπτέρυγη

Η ανεμογεννήτρια πολλαπλών πτερύγων (εικόνα 1-7), είναι ένας μοναδικός σχεδιασμός, όπου τα πτερύγια της είναι διατεταγμένα με τρόπο που επιτρέπει την αποτελεσματική εκμετάλλευση του αέρα ακόμη και σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Αξιοποιώντας την κινητική ενέργεια του ανέμου, παράγει μηχανική ισχύ, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γεννήτριας.

Η κύρια διαφορά μεταξύ της ανεμογεννήτριας αυτού του τύπου και άλλων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα βρίσκεται στο σχεδιασμό και την αποτελεσματικότητά τους. Ενώ οι παραδοσιακές HAWT έχουν λιγότερα πτερύγια και σχεδιασμό που διασκορπίζει την ροή του ανέμου, η χρήση πολλαπλών λεπίδων στις ανεμογεννήτριες επιτρέπει καλύτερη απόδοση σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου. Επιπλέον, η ελαφριά και απλή κατασκευή της την καθιστά μια οικονομικά αποδοτική και εύκολη στη συναρμολόγηση επιλογή για την παραγωγή αιολικής ενέργειας [13].



Εικόνα 1-7: Ανεμογεννήτρια πολλαπλών λεπίδων, Πηγή: [14]

1.2.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Οι πρώτες γενιές ανεμογεννητριών κάθετου άξονα (VAWT) σχεδιάστηκαν με τον άξονά τους να περιστρέφεται κάθετα στη ροή του ανέμου, για την παραγωγή ενέργειας. Τα αρχικά μοντέλα, μπορούσαν να προσαρμοστούν αυτόματα στην κατεύθυνση του ανέμου, καθώς ήταν σχετικά εύκολο να κατασκευαστούν και δεν απαιτούσαν πολύπλοκα συστήματα ελέγχου. Αργότερα όμως, σύγχρονες ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, όπως οι Savonius και Darrieus, αναπτύχθηκαν για να ενισχύσουν την απόδοση. Τα νεότερα σχέδια ανεμογεννητριών περιστρέφονται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα, αξιοποιώντας τον άνεμο ανεξάρτητα από την κατεύθυνσή του, με την παραγωγή ενέργειας να μεταδίδεται μέσω του κάθετου άξονα στο έδαφος [14].

Μετάπειτα με την πάροδο του χρόνου, αυτές οι ανεμογεννήτριες εξελίχθηκαν τόσο που πλέον υπάρχουν ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα που ενσωματώνουν στοιχεία τόσο από τους τύπους Savonius όσο και από τους τύπους Darrieus, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης και της ευκολίας χρήσης. Ενώ υπάρχουν διάφοροι τύποι VAWT, οι περισσότεροι βασίζονται στις αρχές του Savonius και του Darrieus, με προηγμένα μοντέλα που συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά και των δύο τύπων. Τα σύγχρονα σχέδια VAWT στοχεύουν στη βελτιστοποίηση αυτών των χαρακτηριστικών ενσωματώνοντας χαρακτηριστικά τόσο από τα σχέδια Savonius όσο και από τα σχέδια Darrieus, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση και προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές συνθήκες ανέμου.

Σε αντίθεση με την προηγούμενη ταξινόμηση των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα που κατηγοριοποιείτε με βάση τα πτερύγια, οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα θεωρούνται πιο εξειδικευμένες και χωρίζονται βάση σχεδιασμού. Έτσι βάση σχεδιασμού χωρίζονται σε δύο τύπους κάθετου άξονα ανεμογεννητριών:

- τύπου Savonius
- τύπου Darrieus

1.2.2.1 Ανεμογεννήτριες τύπου Savonius

Η ανεμογεννήτρια Savonius αναπτύχθηκε από τον Φινλανδό επιστήμονα Savonius το 1922. Πριν από αυτόν, στην Ευρώπη είχαν προσπαθήσει να δημιουργήσουν ανεμογεννήτριες με κάθετους άξονες και στροβιλιζόμενες πτέρυγες. Η πρώτη αναφορά γι' αυτόν τον τύπο ξεκίνησε από τον Czapad, ο οποίος πρότεινε έναν τύπο ανεμογεννητριών με πολλαπλούς κάθετους άξονες είτε σε σχήμα V είτε με στροβιλιζόμενες πτέρυγες. Ωστόσο, αυτά τα μοντέλα δεν είχαν καταφέρει να προχωρήσουν πολύ. Σκεπτόμενος να δημιουργήσει μια ανεμογεννήτρια παρόμοια με αυτή του Flettner, αλλά με αυτόματη μέθοδο περιστροφής, ο Savonius και άλλοι επιστήμονες ξεκίνησαν να αναπτύσσουν τη συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια. Η ανεμογεννήτρια Savonius μετατρέπει τη δύναμη του ανέμου σε ροπή μέσω περιστροφικής μετατόπισης. Ο στρόβιλος της ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει πολλαπλές αεροτομές, οι οποίες εκτός από το να τοποθετούνται στον περιστρεφόμενο άξονα μπορούν να τοποθετούνται και στο έδαφος ή ακόμη και να λειτουργούν ως αερομεταφερόμενα συστήματα [15].



Εικόνα 1-8: Ανεμογεννήτρια τύπου Savonius Πηγή: [16]

1.2.2.2 Ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus

Η ανεμογεννήτρια Darrieus, γνωστή και ως τουρμπίνα Eggbeater, εφευρέθηκε το 1931 από τον George Darrieus. Αποτελεί μια συσκευή χαμηλής ροπής και υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος [Alternative Current (AC)]. Χρειάζεται εξωτερική πηγή ενέργειας για εκκίνηση λόγω της χαμηλής ροπής εκκίνησης. Ο στρόβιλος αποτελείται από δύο κατακόρυφα περιστρεφόμενες πτέρυγες. Είναι τύπος VAWT, ο οποίος διαφέρει από τον τύπο Savonius, καθώς οι πτέρυγες κινούνται παράλληλα προς το έδαφος κατά τη λειτουργία τους. Προσφέρει υψηλή απόδοση, αλλά απαιτεί εξωτερική πηγή εκκίνησης [17].



Εικόνα 1-9: Ανεμογεννήτρια Darrieus, Πηγή: [17]

1.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τύπων ανεμογεννητριών

Κάθε τύπος ανεμογεννήτριας έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (πίνακες 1-1, 1-2) που πρέπει να αξιολογηθούν με βάση τις συγκεκριμένες συνθήκες και της απαιτήσεις της εφαρμογής. Η σύγκριση μεταξύ των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα (VAWTs) και οριζόντιου άξονα (HAWTs) είναι ζωτικής σημασίας στην τεχνολογία αιολικής ενέργειας. Οι HAWT είναι η κύρια επιλογή για παραγωγή αιολικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας λόγω της υψηλής απόδοσης τους. Πάραυτα, οι VAWT βρίσκουν εξειδικευμένες εφαρμογές σε σενάρια όπου οι περιορισμοί χώρου ή ύψους εμποδίζουν την ανάπτυξη του HAWT.

Πίνακας 1-1: Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα οριζόντιου άξονα, Πηγές: [18],[19]

Οριζόντιου άξονα	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Σταθερότητα	Θόρυβος
Υψηλή απόδοση	Κατασκευή και η μεταφορά της είναι δαπανηρές.
Ευκολία συντήρησης	Χρειάζεται έναν μηχανισμό περιστροφής που να προσανατολίζει τα πτερύγιά της προς την κατεύθυνση του ανέμου.
Τεχνική ωριμότητα	-
Καταλληλότητα για διάφορες συνθήκες	-
Χρησιμοποιείται και σε υπεράκτιες	-

Πίνακας 1-2: Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα κατακόρυφου άξονα, Πηγές: [20]

Κατακόρυφου Άξονα	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αυτορυθμιζόμενη κατεύθυνση	Η απόδοση δεν είναι υψηλή
Η συντήρησή τους είναι πιο εύκολη καθώς η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων βρίσκονται στη βάση	Απαιτείται ροπή εκκίνησης με αποτέλεσμα την χαμηλή ταχύτητα περιστροφής
Η κατασκευή έχει χαμηλό κόστος	Υπάρχουν δυσκολίες στη συντήρηση
Δεν είναι απαραίτητος ο πύργος	Περιορισμένη απόδοση σε υψηλές ταχύτητες ανέμου
Έχουν μικρό μέγεθος και μπορούν να εφαρμοστούν σε περιορισμένους χώρους	-
Χαμηλότερη παραγωγή θορύβου	-

Έπειτα, οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, διαφέρουν σημαντικά ως προς τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και την αποτελεσματικότητά τους. Οι ανεμογεννήτριες Savonius χαρακτηρίζονται από τον απλό σχεδιασμό τους και την ικανότητά τους να αξιοποιούν καλύτερα τον αέρα από οποιαδήποτε κατεύθυνση, καθιστώντας τις κατάλληλες για αστικά περιβάλλοντα ή περιοχές με ταραχώδεις ανέμους. Από την άλλη, οι ανεμογεννήτριες Darrieus, με τον κατακόρυφο προσανατολισμό και τα αεροδυναμικά πτερύγιά τους, είναι πιο αποδοτικές σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, αλλά απαιτούν πιο περίπλοκα συστήματα ελέγχου για βέλτιστη απόδοση (πίνακες 1-3, 1-4).

Πίνακας 1-3: Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα Darrieus, Πηγή: [21]

Darrieus	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Διαθέτει κατακόρυφο άξονα, επιτρέποντας την τοποθέτηση φορτίων σε επίπεδο εδάφους χωρίς την ανάγκη για περίπλοκες δομές.	Χαμηλή Απόδοση
Ευκολία Εγκατάστασης	Δυσκολία Έναρξης
Ασφάλεια και Ευελιξία	Περιορισμένη Διαθεσιμότητα Ταχύτητας Ανέμου
Λειτουργία σε Δύσκολες Συνθήκες	Φθορά Εξαρτημάτων

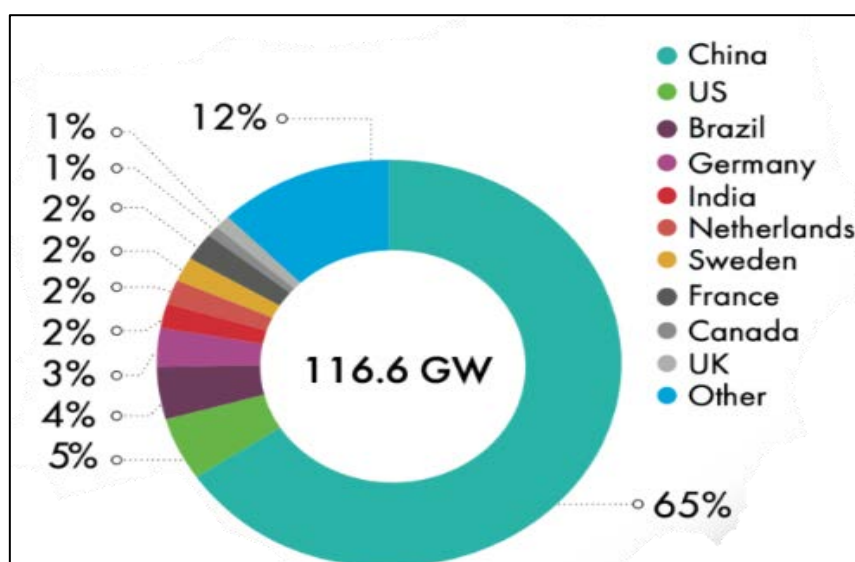
Πίνακας 1-4: Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα Savonius, Πηγή: [23]

Savonius	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ανεξαρτησία λειτουργίας από την κατεύθυνση του ανέμου.	Η εγκατάστασή της απαιτεί εξοπλισμό που μπορεί να μην είναι επιθυμητός.
Σταθερή λειτουργία χωρίς ανάγκη για διαδικασία εκτροπής.	Δεν είναι κατάλληλη για τοποθεσίες με μεγάλη τύρβη.
Οικονομική απόδοση με βελτιωμένη λειτουργία.	-
Κατάλληλη για μικρές εφαρμογές με λίγα ηλεκτρικά φορτία.	-
Δεν απαιτεί μηχανισμό για την αλλαγή γωνίας των πτερυγίων.	-
Χαμηλός θόρυβος κατά τη λειτουργία της.	-

1.3 Παγκόσμια χερσαία και υπεράκτια αιολική ενέργεια

Το έτος 2023 σηματοδότησε ένα ορόσημο για την παγκόσμια αιολική βιομηχανία, επιτυγχάνοντας ρεκόρ νέας εγκατεστημένης ισχύος 117 GW, σύμφωνα με την έκθεση του Παγκόσμιου Συμβουλίου Αιολικής Ενέργειας [GWEC (Global Wind Energy Council)]. Αυτή η χωρητικότητα των 117 GW αντιπροσωπεύει αξιοσημείωτη αύξηση 50% σε σύγκριση με τις εγκαταστάσεις του 2022 [23].

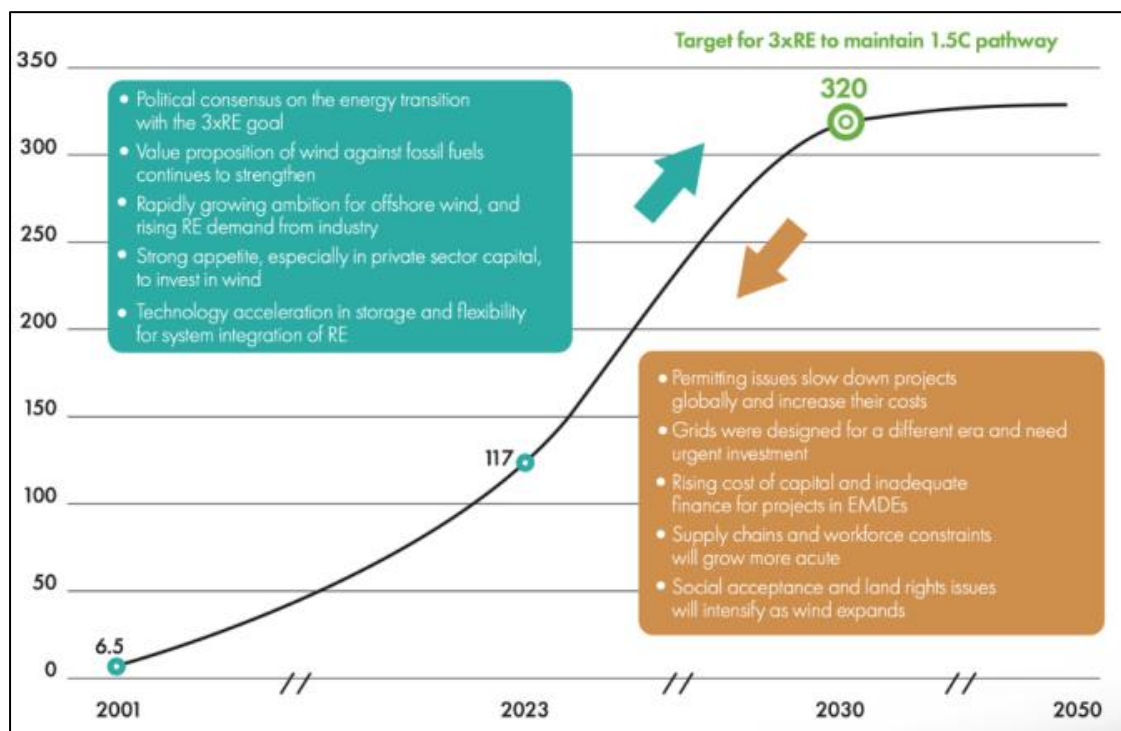
Η αξιοσημείωτη ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας το 2023, υπογραμμίζει την αυξανόμενη παγκόσμια σημασία και την επιτάχυνση της υιοθέτησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η τάση αυτή καθοδηγείται από τις προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, την προώθηση της ενεργειακής ασφάλειας, την τόνωση της οικονομικής ανάπτυξης και την ενίσχυση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, ανοίγοντας το δρόμο για ένα ανθεκτικό ενεργειακό μέλλον χωρίς άνθρακα. Οι πέντε μεγαλύτερες αγορές για νέες αιολικές εγκαταστάσεις είναι η Κίνα, οι ΗΠΑ, η Βραζιλία, η Γερμανία και η Ινδία (εικόνα 1-10). Η Κίνα σημείωσε ρεκόρ με 75 GW νέων εγκαταστάσεων, αντιπροσωπεύοντας σχεδόν το 65% των συνολικών παγκόσμιων εγκαταστάσεων.



Εικόνα 1-10: Νέα Χωρητικότητα 2023, Πηγή: [23]

Επιπλέον, το GWEC αναθεώρησε την πρόβλεψή του για την αιολική ανάπτυξη από το 2024 έως το 2030 (εικόνα 1-11) προς τα πάνω κατά 10%, προβλέποντας τώρα 1210 GW [23]. Αυτή η ανοδική προσαρμογή αποδίδεται στην εφαρμογή των εθνικών πολιτικών στήριξης της αιολικής ενέργειας στις μεγάλες οικονομίες, στην ισχυρή ανάπτυξη των υπεράκτιων έργων αιολικής ενέργειας και στις θετικές εξελίξεις στις αναδυόμενες και αναπτυσσόμενες οικονομίες. Η αύξηση της προβλεπόμενης δυναμικότητας υπογραμμίζει την αυξανόμενη δυναμική και δέσμευση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παγκοσμίως, ευθυγραμμιζόμενη με τις προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας, την προώθηση της οικονομικής ανάπτυξης και την προώθηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

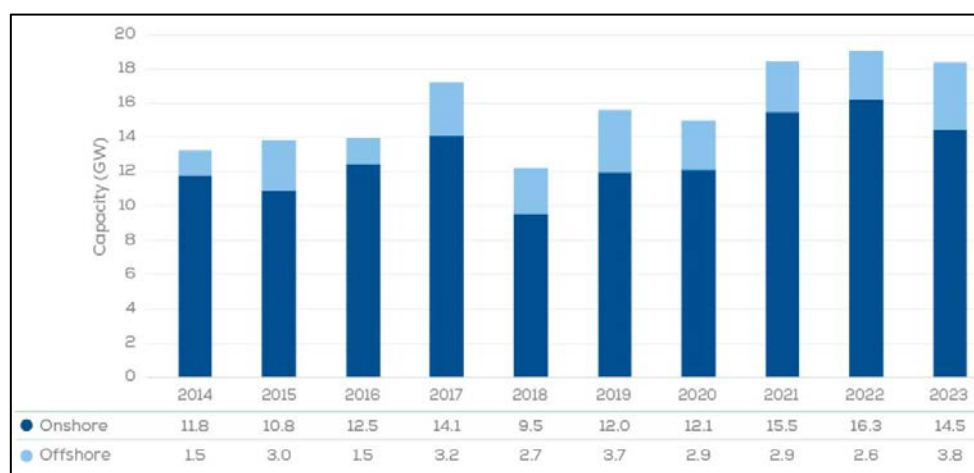
Η έκθεση του GWEC υπογραμμίζει ότι η αιολική βιομηχανία εισέρχεται σε μια νέα εποχή που χαρακτηρίζεται από ταχεία επέκταση, που τροφοδοτείται από αυξημένη πολιτική φιλοδοξία και ευνοϊκές συνθήκες αγοράς.



Εικόνα 1-11: Η εγκατάσταση αιολικής ενέργειας αυξάνεται μέχρι το 2030,. Πηγή: [23].

1.4 Χερσαία και υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Ευρώπη

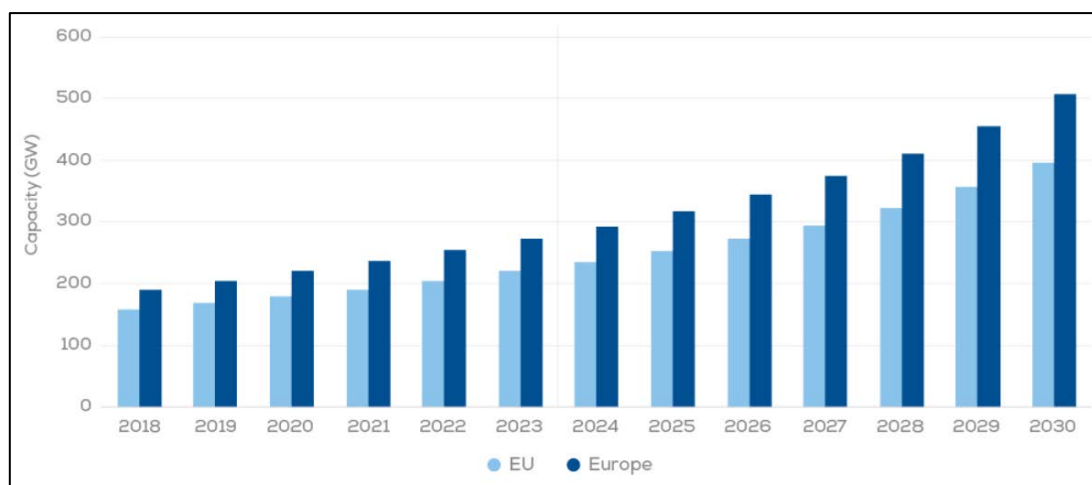
Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία της Wind Europe, η Ευρώπη εγκατέστησε 18,3 GW νέας ισχύος αιολικής ενέργειας το 2023. Από το σύνολο αυτό, 16,2 GW εγκαταστάθηκαν σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σημειώνοντας ρεκόρ, αλλά μόνο το ήμισυ αυτού που απαιτείται για την επίτευξη των στόχων της ΕΕ για το 2030. Η πλειονότητα των νέων αιολικών εγκαταστάσεων στην Ευρώπη το 2023 ήταν χερσαίες (εικόνα 1-12), με την υπεράκτια αιολική ενέργεια να αυξάνεται επίσης στο ρεκόρ των 3,8 GW. Ωστόσο, τα περισσότερα αιολικά έργα έως το 2030 αναμένεται να συνεχίσουν να είναι χερσαία [24]. Αυτές οι τάσεις εγκατάστασης υπογραμμίζουν τις συνεχιζόμενες προσπάθειες για επέκταση της δυναμικότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ολόκληρη την Ευρώπη, με γνώμονα τις φιλόδοξες πολιτικές για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και τη μετάβαση σε καθαρότερα ενεργειακά συστήματα. Ενώ έχει σημειωθεί πρόοδος όσον αφορά την κλιμάκωση της αιολικής ενέργειας, ιδίως των χερσαίων εγκαταστάσεων, εξακολουθεί να υπάρχει σημαντικό κενό που πρέπει να γεφυρωθεί για την επίτευξη των φιλόδοξων στόχων που έχουν τεθεί για το 2030. Οι συνεχείς επενδύσεις τόσο σε χερσαία όσο και σε υπεράκτια αιολικά έργα, παράλληλα με υποστηρικτικά ρυθμιστικά πλαίσια και τεχνολογικές εξελίξεις, θα είναι ζωτικής σημασίας για την επιτάχυνση της ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας και την προώθηση του θεματολογίου ενεργειακής μετάβασης της Ευρώπης προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον.



Εικόνα 1-12 Ετήσια χερσαία και υπεράκτια αιολική ισχύς στην Ευρώπη, Πηγή: [22]

Οι υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις προβλέπεται να αυξηθούν σημαντικά τα επόμενα χρόνια, ενώ η ΕΕ αναμένεται να φθάσει τα 393 GW εγκατεστημένης υπεράκτιας αιολικής ισχύος έως το 2030, αν και ο αριθμός αυτός θα υπολείπεται του στόχου των 425 GW. Επιπλέον, η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς της Ευρώπης αναμένεται να ξεπεράσει τα 500 GW (εικόνα 1-13), κατά την ίδια περίοδο. Αυτή η τροχιά ανάπτυξης υπογραμμίζει τον κεντρικό ρόλο της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στη μετάβαση της Ευρώπης προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθοδηγούμενη από φιλόδοξους κλιματικούς στόχους και προσπάθειες για απαλλαγή του ενεργειακού τομέα από τις ανθρακούχες εκπομπές.

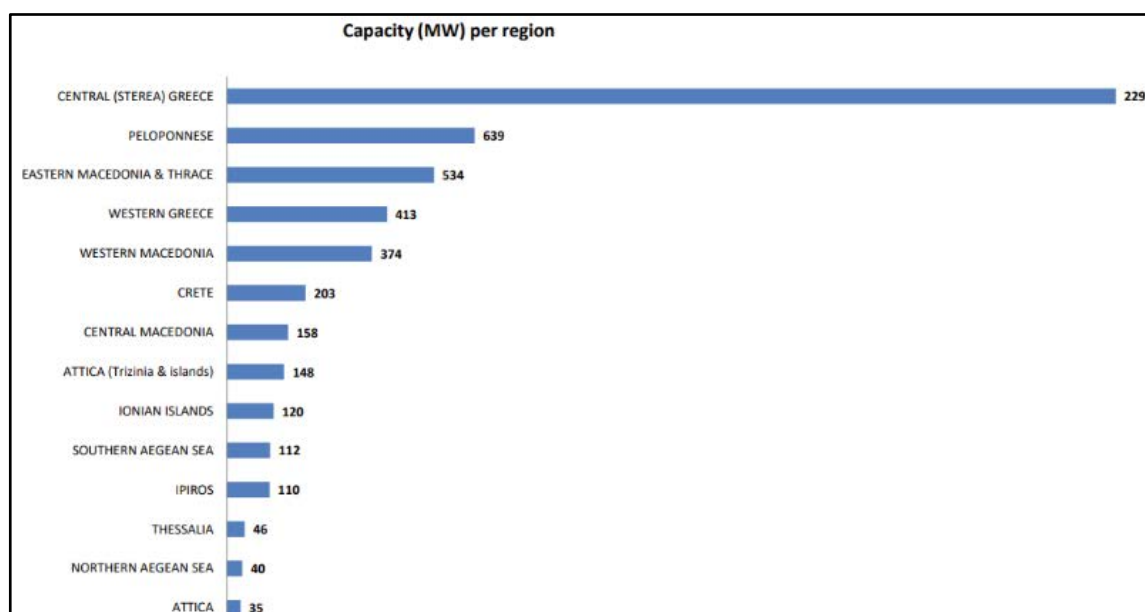
Παρά την αναμενόμενη επέκταση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, η επίτευξη των στόχων της ΕΕ θα απαιτήσει συνεχείς επενδύσεις σε υπεράκτιες υποδομές, τεχνολογική καινοτομία και υποστηρικτικά πλαίσια πολιτικής. Προκλήσεις όπως οι διαδικασίες αδειοδότησης, η ολοκλήρωση του δικτύου και η επεκτασιμότητα της αλυσίδας εφοδιασμού θα πρέπει να αντιμετωπιστούν για να απελευθερωθεί το πλήρες δυναμικό της ανάπτυξης υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Επιπλέον, η αξιοποίηση της εμπειρίας που αποκτήθηκε από τα υφιστάμενα έργα και η προώθηση της διεθνούς συνεργασίας μπορούν να επιταχύνουν περαιτέρω την ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής δυναμικότητας, συμβάλλοντας στους στόχους ενεργειακής ασφάλειας, οικονομικής ανάπτυξης και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας της Ευρώπης που περιγράφονται για την επόμενη δεκαετία.



Εικόνα 1-13: Πρόβλεψη για ετήσια χερσαία και υπεράκτια αιολική ισχύς στην Ευρώπη και την ΕΕ κατά το 2024-2030 Πηγή: [26]

1.5 Χερσαία και Υπεράκτια Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα

Σύμφωνα με την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα έφτασε για πρώτη φορά το όριο των 5.000 MW στο τέλος του 2023. Συγκεκριμένα, η συνολική αιολική ισχύς στην Ελλάδα ήταν 5.226 MW (εικόνα 1-14). Κατά τη διάρκεια του 2023, συνδέθηκαν στο δίκτυο 153 νέες ανεμογεννήτριες με συνολική ισχύ 542,8 MW, που αντιπροσωπεύουν επενδύσεις άνω των 600 εκατ. ευρώ. Αυτό αποτελεί αύξηση 11,6% σε σχέση με το τέλος του 2022. Το 2023 ήταν το δεύτερο καλύτερο έτος, μετά το 2019, για εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας. Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται στην ολοκλήρωση μεγάλων αιολικών επενδύσεων χάρη στις προσπάθειες των επιχειρήσεων, του επιστημονικού κόσμου και των επαγγελματιών της αιολικής ενέργειας. Στο τέλος του 2023, πάνω από 850 MW νέων αιολικών πάρκων βρίσκονταν υπό κατασκευή ή είχαν συμβολαιοποιηθεί. Περίπου 300 MW από αυτά αναμένεται να συνδεθούν στο δίκτυο τους επόμενους 12 μήνες. Επιπλέον, 400 MW έχουν επιλεγεί σε διαγωνισμούς και έχουν καταθέσει τις εγγυητικές καλής εκτέλεσης, αλλά δεν ανήκουν σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες. Η συνολική αιολική ισχύς προβλέπεται να φτάσει τα 6,5 GW τα επόμενα τρία χρόνια. Εάν ξεπεραστούν τα γραφειοκρατικά και άλλα εμπόδια, η ισχύς αυτή θα μπορούσε να αυξηθεί ακόμα περισσότερο [26].



Εικόνα 1-14: Χωρητικότητα Αιολικής Ενέργειας στην Ελλάδα, 2023, Πηγή: [27]

Η Στερεά Ελλάδα είναι η περιοχή με τις περισσότερες αιολικές εγκαταστάσεις, έχοντας 2.293 MW (44%). Ακολουθεί η Πελοπόννησος με 639 MW (12%) και η Ανατολική Μακεδονία – Θράκη με 534 MW (10%). Το 2023, νέες ανεμογεννήτριες εγκαταστάθηκαν μόνο σε τρεις περιφέρειες: Στερεά Ελλάδα, Δυτική Μακεδονία και Θεσσαλία. Η ευρύτερη κατανομή των αιολικών εγκαταστάσεων ενισχύει την καλύτερη συμμετοχή της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που ωφελεί το ενεργειακό σύστημα και τον καταναλωτή (εικόνα 1-15).



Εικόνα 1-15: Χάρτης Αιολικής Ενέργειας Πηγή: [25]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ N117/3000, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ NORDEX

2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η ανεμογεννήτρια Nordex N117/3000 είναι μεταβλητής ταχύτητας με διάμετρο ρότορα 116,8 m και ονομαστική ισχύ 3000 kW. Έχει σχεδιαστεί για την κατηγορία IIA σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 61400-1. Αποτελείται από διάφορα βασικά εξαρτήματα όπως:

- **Ρότορας (Rotor):**

Ο ρότορας περιλαμβάνει μία άτρακτο, με τρία πτερύγια και ένα σύστημα κλίσης πτερυγίων. Τα πτερύγια της Nordex N117/3000 είναι κατασκευασμένα από υψηλής ποιότητας πλαστικό, ενισχυμένο με γυαλί και ανθρακονήματα. Το σύστημα κλίσης πτερυγίων ρυθμίζει τη γωνία των πτερυγίων του ρότορα για την καλύτερη αξιοποίηση του ανέμου όταν παίρνει εντολή από το σύστημα ελέγχου. Το κάθε πτερύγιο του ρότορα περιλαμβάνει ηλεκτρομηχανική κίνηση 3 αξόνων, γρανάζια για την κίνηση, μονάδα ελέγχου με μετατροπέα συχνότητας και τροφοδοσία έκτακτης ανάγκης. Τα γρανάζια κίνησης ελέγχονται από τον μετατροπέα συχνότητας και υποστηρίζονται από τροφοδοσία έκτακτης ανάγκης. Το σύστημα κλίσης πτερυγίων ευθυγραμμίζει την άτρακτο στην κατεύθυνση του ανέμου και η αιολική ενέργεια που συλλαμβάνεται από τα πτερύγια του ρότορα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας μια επαγωγική μηχανή διπλής τροφοδότησης στάτη και δρομέα.

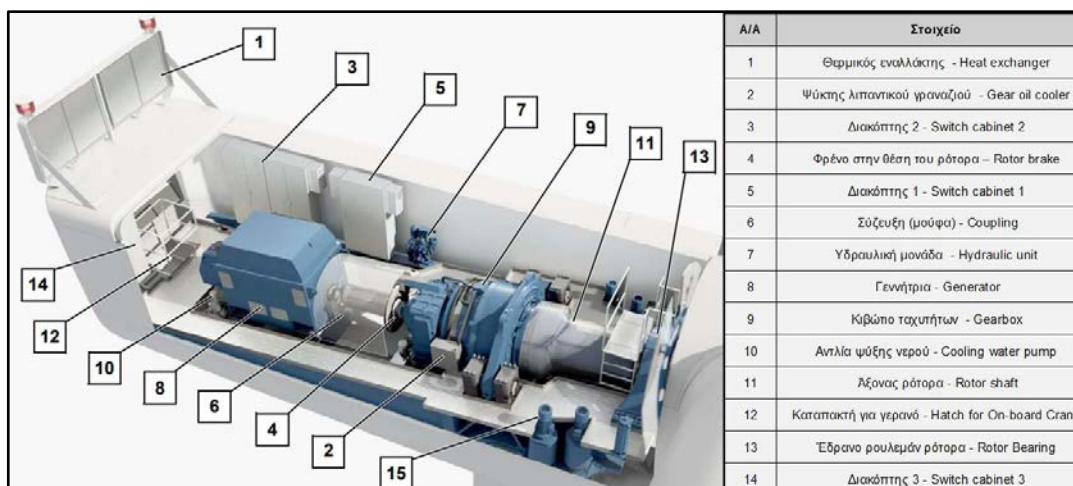
- **Πύργος (Tower):**

Η στήριξη της ανεμογεννήτριας γίνεται από σωληνωτούς χαλύβδινους πύργους ή υβριδικούς πύργους (δομή που συνδυάζει χαλύβδινα και σκυροδεμένα τμήματα για βέλτιστη απόδοση και ανθεκτικότητα) για διαφορετικά ύψη πλήμνης και ζώνες ανέμου. Η ασφάλεια επιτυγχάνεται με ολοκληρωμένα συστήματα που συμμορφώνονται με τις οδηγίες μηχανημάτων 2006/42/EC και τα πρότυπα IEC

61400. Η αντικεραυνική προστασία ακολουθεί οδηγίες συμβατές με EMC, με βοηθητικά συστήματα που εξασφαλίζουν συμβατότητα με το δίκτυο και σε κατάσταση αναμονής. Το ενισχυμένο κέλυφος από υαλοβάμβακα της ατράκτου προστατεύει τα εσωτερικά εξαρτήματα από τα στοιχεία του περιβάλλοντος και είναι προσβάσιμα μέσω ενός κεντρικού ανοίγματος στον πύργο. Στο εσωτερικό, ένας γερανός με ανυψωτική ικανότητα 250 κιλών διευκολύνει τις εργασίες συντήρησης και επισκευής.

- **Νασέλα (Nacelle):**

Η άτρακτος στεγάζει βασικά μηχανικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας και είναι τοποθετημένη στον πύργο σε περιστρεφόμενα ρουλεμάν. Το εσωτερικό της νασέλας περιλαμβάνει τα ακόλουθα (εικόνα 2-1):



Εικόνα 2-1: Το εσωτερικό της νασέλας (nacelle) της ανεμογεννήτριας N117/3000, τεχνολογίας NORDEX Πηγή: [28]

Τέλος, η παρακολούθηση και ο έλεγχος γίνονται από μονάδες που βασίζονται σε μικροεπεξεργαστές εντός της ατράκτου, επιβλέποντας τις ρυθμίσεις του βήματος των πτερύγων και τις λειτουργίες προσανατολισμού.

2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Πιστοποίηση

Η ανεμογεννήτρια N117/3000 με ύψος πλήμνης 91, 120 και 141 μέτρα είναι πιστοποιημένη για μεσαίες ταχύτητες ανέμου (IEC II, περιοχές με ταχύτητες ανέμου, μέχρι 8,5 m/s). Ταυτόχρονα, έχουν ληφθεί πιστοποιητικά τύπου για ύψος πλήμνης 75, 85 και 100 μέτρων για την ανεμογεννήτρια N100/3300 (IEC I, περιοχές με ταχύτητες ανέμου, μέχρι 10 m/s) [29]. Επιπρόσθετα, η κατηγορία ανέμου: IEC IIA/IIIA (DIBt III), αναφέρεται σε συγκεκριμένες κατηγορίες ανέμου σύμφωνα με το πρότυπο της Γερμανικής Υπηρεσίας Δομικών Κατασκευών (DIBt) [30],

2.2.1 Κλιματικοί όροι

Σε περιπτώσεις όπου οι θερμοκρασίες πέφτουν κάτω από τις καθορισμένες θερμοκρασίες διακοπής (π.χ. -20 °C για τη βασική έκδοση), ο ρότορας διακόπτει αυτόματα τη λειτουργία του, αλλά μπορεί να κάνει επανεκκίνηση σε ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες για να αποφευχθεί ζημιά. Σε υψηλότερα υψόμετρα εγκατάστασης, έως και 2000 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, η ονομαστική ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας παραμένει σταθερή εντός καθορισμένων θερμοκρασιακών ορίων.

Ωστόσο, σημειώνεται ότι σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος μεταξύ 40 °C και 45 °C, η απόδοση των πτερύγων μπορεί να μειωθεί σε έως και 70%, υπογραμμίζοντας τον αντίκτυπο των ακραίων θερμοκρασιών στη λειτουργική απόδοση. Η μείωση αυτή συμβαίνει λόγω της μεταβολής της πυκνότητας του αέρα, των αλλαγών στη γεωμετρία των πτερυγίων λόγω θερμικής διαστολής υλικών και της μειωμένης αντοχής των υλικών στις υψηλές θερμοκρασίες, οι οποίες επηρεάζουν τη δομική ακεραιότητα και την απόδοση των πτερυγίων.

Η ανεμογεννήτρια Nordex N117/3000 είναι πιστοποιημένη σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 61400-1 και έχει σχεδιαστεί για να αντέχει σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένου του ανέμου, των θερμοκρασιών περιβάλλοντος, του πάγου και της διάβρωσης. Τα δεδομένα κλιματικού σχεδιασμού αποτελούν κρίσιμη κατευθυντήρια γραμμή για τη διασφάλιση της ανθεκτικότητας

και της λειτουργικής αποτελεσματικότητας της ανεμογεννήτριας σε διαφορετικά γεωγραφικά και κλιματικά περιβάλλοντα.

2.2.2 Μετατροπέας (Converter)

Στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, το σύστημα μετατροπής διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, αποτελεσματικά και αξιόπιστα. Εντός της ανεμογεννήτριας Nordex N117/3000, ένας πίνακας διανομής ενσωματωμένος στη βάση του πύργου στεγάζει βασικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα όπως:

- Υπολογιστής ρότορα
- Μετατροπέας συχνότητας
- Κύριος διακόπτης
- Ασφάλειες
- Συνδέσεις με το μετασχηματιστή και τη γεννήτρια

Ο μετατροπέας συχνότητας είναι ζωτικής σημασίας για τον έλεγχο της λειτουργίας του ρότορα. Διαθέτει ένα σύστημα ψύξης νερού σχεδιασμένο για τη διατήρηση βέλτιστων θερμοκρασιών λειτουργίας. Το νερό που θερμαίνεται εντός του μετατροπέα ψύχεται από έναν εναλλάκτη θερμότητας νερού/αέρα που βρίσκεται έξω από την πόρτα του πύργου, ο οποίος εξασφαλίζει την αποτελεσματική απαγωγή θερμότητας και συνεπώς την απόδοση του συστήματος. Ο εναλλάκτης θερμότητας διαθέτει σύστημα ανεμιστήρα δύο σταδίων, προσαρμόζοντας αυτόματα την ταχύτητα του ανεμιστήρα με βάση τη θερμοκρασία του νερού για βελτιστοποίηση της ψύξης. Αυτός ο ενσωματωμένος μηχανισμός ψύξης διασφαλίζει ότι ο μετατροπέας λειτουργεί εντός καθορισμένων ορίων θερμοκρασίας, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος και τη μακροζωία.

2.2.3 Γεννήτρια (Generator)

Η γεννήτρια είναι το εξάρτημα που έχει κεντρικό ρόλο την μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η γεννήτρια στις ανεμογεννήτριες Nordex είναι μια ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδοσίας σχεδιασμένη για ψύξη υγρού/αέρα. Τα συστήματα ψύξης της γεννήτριας είναι ενσωματωμένα στο σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας, με μηχανισμούς ψύξης λαδιού/νερού που εξασφαλίζουν βέλτιστες θερμοκρασίες λειτουργίας.

Τα αυτόματα συστήματα λίπανσης στη γεννήτρια μειώνουν τη φθορά και εξασφαλίζουν σταθερή απόδοση για μεγάλες περιόδους. Αυτή η προσέγγιση προληπτικής συντήρησης συμβάλλει στην ενίσχυση της αξιοπιστίας του ρότορα και της λειτουργικής απόδοσης. Έτσι ο τεχνικός σχεδιασμός τους, επιτρέπει ένα ετήσιο διάστημα συντήρησης, εξορθολογίζοντας τις εργασίες συντήρησης και μειώνοντας τα συνολικά έξοδα λειτουργίας και συντήρησης. Μερικές από τις βασικές ιδιότητες της γεννήτριας καθώς και οι τιμές τους, φαίνονται στον πίνακα 2-1.

Πίνακας 2-1: Ιδιότητες και τιμές γεννήτριας ανεμογεννήτριας N117/3000, τεχνολογίας NORDEX, τροποποιημένο από: [30]

Ιδιότητες	Τιμές
Γεννήτρια	Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας
Σύστημα ψύξης	Υγρή/αέρια ψύξης
Τάση	660 V
Συχνότητα δικτύου	50/60 Hz
Ιδιότητες προστασίας	IP 54 (slip ring box 23)
Εύρος ταχυτήτων	50 Hz: 730-1315 rpm
	60Hz: 876-1578 rpm
Πόλοι	6
Βάρος	10.6 τόνοι
Ψύξη γεννήτριας	
Ιδιότητες	Τιμές
Τύπος	Κύκλωμα νερού με εναλλάκτη θερμότητας νερού/αέρα
Ροή	160 Λίτρα/λεπτό
Ρευστό	Ψυκτικό υγρό με βάση το νερό/γλυκόλη

2.2.4 Έλεγχος κατεύθυνσης (Yaw)

Ο έλεγχος της κατεύθυνσης της ανεμογεννήτριας (yaw) υπάρχει για να αυξήσει την απόδοση της ανεμογεννήτριας. Ο σκοπός του είναι να περιστραφεί ο πύργος στη βέλτιστη κατεύθυνση του ανέμου, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη δέσμευση ενέργειας του αέρα υπό μεταβλητές συνθήκες ανέμου. Μόλις ο πύργος τοποθετηθεί σωστά σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου, ασφαρίζεται χρησιμοποιώντας ένα υδραυλικό και ηλεκτρικό σύστημα φρένων. Αυτό το σύστημα περιλαμβάνει δαγκάνες φρένων τοποθετημένες στο πλαίσιο της ατράκτου, οι οποίες εμπλέκονται με ένα δίσκο φρένων για τη σταθεροποίηση της ατράκτου κατά τη λειτουργία. Επιπλέον, ηλεκτρικά ενεργοποιημένα φρένα συγκράτησης είναι ενσωματωμένα στους κινητήρες εκτροπής, παρέχοντας πρόσθετα μέτρα ασφαλείας για την αποφυγή ακούσιας κίνησης. Ακόμη, μια εξειδικευμένη υδραυλική μονάδα παρέχει πίεση λαδιού για το φρένο του ρότορα και του συστήματος εκτροπής, για τον έλεγχο και τη διατήρηση του προσανατολισμού της ατράκτου ως απόκριση στις μεταβαλλόμενες συνθήκες ανέμου. Οι μονάδες δίσκου (brake discs) αποτελούν ένα κρίσιμο μέρος του συστήματος φρένων της ανεμογεννήτριας και είναι κατασκευασμένες από ανθεκτικά υλικά, όπως χάλυβας υψηλής αντοχής, σχεδιασμένες να αντέχουν τις έντονες δυνάμεις κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Οι δίσκοι φρένων είναι τοποθετημένοι στον πύργο και συνεργάζονται με τις δαγκάνες φρένων για να σταθεροποιήσουν την άτρακτο. Οι δαγκάνες φρένων πιέζουν τους δίσκους φρένων όταν το σύστημα ελέγχου δίνει εντολή για φρενάρισμα, οι οποίες ελέγχονται ηλεκτρονικά και υδραυλικά από το κεντρικό σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, το οποίο λαμβάνει δεδομένα από τους αισθητήρες ανέμου και άλλους αισθητήρες για να διασφαλίσει την ακριβή και ασφαλή λειτουργία. Η Nordex χρησιμοποιεί ένα αξιόπιστο σύστημα αντιμετώπισης προβλημάτων, που λειτουργεί με τέσσερις μονάδες δίσκου υπό κανονικές συνθήκες. Σε περίπτωση βλάβης μιας μονάδας δίσκου, η ανεμογεννήτρια μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί προσωρινά και με τρεις μονάδες δίσκου, επιτρέποντας την προγραμματισμένη συντήρηση και ελαχιστοποιώντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας. Αυτή η καινοτόμος ιδέα ενισχύει τη διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας και μειώνει το συνολικό κόστος συντήρησης, συμβάλλοντας στη βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης.

2.2.5 Πτερύγια ρότορα (Rotor blades)

Τα πτερύγια του ρότορα είναι κατασκευασμένα από υψηλής ποιότητας υλικά, όπως ειδικά πλαστικά ενισχυμένα με γυαλί και ανθρακονήματα. Υποβάλλονται σε στατικές και δυναμικές δοκιμές σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 61400-23 και GL IV-1 (2010). Το σύστημα κλίσης ρυθμίζει τη γωνία των πτερυγίων του ρότορα σύμφωνα με τις εντολές του συστήματος ελέγχου. Για κάθε μεμονωμένο πτερύγιο, το σύστημα περιλαμβάνει, μια ηλεκτρομηχανική μονάδα με τριφασικό κινητήρα, πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων και γρανάτζα μετάδοσης κίνησης, καθώς και μια μονάδα ελέγχου με μετατροπέα συχνότητας και εφεδρική πηγή ισχύος. Η παροχή ενέργειας και η μεταφορά σημάτων γίνονται μέσω δακτυλιοφόρου αγωγού στην κάψουλα. Η τελευταία γενιά ανεμογεννητριών της Nordex, που χαρακτηρίζεται από διαμέτρους ρότορα 100 και 117 μέτρων, ενσωματώνει αποδεδειγμένα αεροδυναμικά σχέδια που αναπτύχθηκαν εσωτερικά για τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης της ανεμογεννήτριας. Η καινοτόμος προσέγγιση της Nordex στο σχεδιασμό του ρότορα δίνει έμφαση στην επεκτασιμότητα και το αυξημένο μέγεθος του ρότορα για την ενίσχυση της παραγωγής ενέργειας. Με την ανάπτυξη μεγαλύτερων στροφείων προσαρμοσμένων για διαφορετικές κατηγορίες ανέμου, επιτυγχάνονται σημαντικά κέρδη στην ενεργειακή απόδοση.

Για παράδειγμα, οι ανεμογεννήτριες που έχουν σχεδιαστεί για θέσεις ισχυρών ανέμων διαθέτουν αύξηση της διαμέτρου του ρότορα έως και δέκα μέτρα σε σύγκριση με τα προηγούμενα μοντέλα, με αποτέλεσμα αύξηση 23% στην περιοχή σάρωσης (κυκλική περιοχή που διαγράφουν τα άκρα των πτερυγίων του ρότορα). Ομοίως, οι ανεμογεννήτριες που έχουν σχεδιαστεί για μέτριες ταχύτητες ανέμου παρουσιάζουν επεκτάσεις μεγέθους ρότορα 17 μέτρων, που μεταφράζεται σε αύξηση 37% στην περιοχή σάρωσης και περαιτέρω βελτιστοποίηση της δέσμευσης ενέργειας.

Σε περιοχές με ισχυρή πιθανότητα παγετού και πάγου στα πτερύγια του ρότορα κατά τους χειμερινούς μήνες, το σύστημα αντιπαγοποίησης της Nordex είναι σημαντικό για τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας των ανεμογεννητριών και της μέγιστης διαθεσιμότητας τους. Αυτό το σύστημα θερμαίνει συγκεκριμένες

περιοχές των πτερυγίων, μειώνοντας αποτελεσματικά τα επίπεδα πάγου και ελαχιστοποιώντας την μείωση της απόδοσης λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών. Οι λύσεις της Nordex για συνθήκες ισχυρών ανέμων δίνουν έμφαση στην τεχνολογία, παρέχοντας υψηλότερες αποδόσεις και λειτουργική απόδοση ακόμη και σε απαιτητικά κλίματα. Κάποιες επιπρόσθετες ιδιότητες φαίνονται στον πίνακα της επόμενης σελίδας.

Πίνακας 2-2: Ιδιότητες και τιμές ρότορα ανεμογεννήτριας N117/3000, τεχνολογίας NORDEX, τροποποιημένο από: [30]

Ιδιότητες ρότορα	Τιμές
Διάμετρος	116.8 m
Επιφάνεια	10,715 m ²
Εύρος ταχυτήτων	7.9-14.1 rpm
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	12.6 rpm
Ταχύτητα στην άκρη των πτερυγίων	77 m/s
Γωνία κλίσης άξονα ρότορα	5°
Γωνία κλίσης άξονα ρότορα	3.5°
Ονομαστική ισχύς/εμβαδόν	280 W/m ²
Έλεγχος ταχύτητας	Μεταβλητή μέσω μικροεπεξεργαστή
Έλεγχος υπερβολικής ταχύτητας	Γωνία βήματος
Τύπος	3πτέρυγη
Έλεγχος ισχύς	Ενεργή ρύθμιση μονής λεπίδας
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (με πυκνότητα αέρα 1.225 kg/m ³)	12,5 m/s
Εύρος ταχύτητας λειτουργίας ρότορα	7.9-14.1 rpm
Ελάχιστη ταχύτητα έναρξης λειτουργίας	2.5 m/s
Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας	25 m/s
Ταχύτητα πλήρους διακοπής παραγωγής	22 m/s
Διάρκεια ζωής	20 έτη
Πτερύγια	
Ιδιότητες	Τιμές
Υλικό	Πλαστικό ενισχυμένο με γυαλί και φίλτρο άνθρακα
Μήκος	57.3 m
Βάρος ανά λεπίδα	10.6 t

2.2.6 Κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox)

Το κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox) της ανεμογεννήτριας NORDEX έχει ως κύρια λειτουργία τη μετατροπή της αργής περιστροφής του ρότορα, που κινείται από τον άνεμο, σε υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής κατάλληλη για τη γεννήτρια, εξασφαλίζοντας έτσι την αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, το κιβώτιο ταχυτήτων μεταφέρει την ισχύ από τον ρότορα στη γεννήτρια με ασφάλεια, χρησιμοποιώντας υλικά υψηλής αντοχής και συστήματα λίπανσης και ψύξης για ανθεκτικότητα και μακροχρόνια λειτουργία. Η ψύξη του κιβωτίου ταχυτήτων επιτυγχάνεται μέσω ψυκτικού υγρού που είναι ενσωματωμένο στο κιβώτιο ταχυτήτων. Χρησιμοποιείται για τη διάχυση της θερμότητας από το κιβώτιο ταχυτήτων και ψύχεται μαζί με υγρό ψύξης της γεννήτριας σε έναν παθητικό ψύκτη που βρίσκεται στην οροφή της ατράκτου. Μόλις το κιβώτιο ταχυτήτων φτάσει σε θερμοκρασία λειτουργίας, το λάδι του κιβωτίου ταχυτήτων κατευθύνεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας τύπου πλάκας για πρόσθετη ψύξη. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση ψύξης ενισχύει τη λειτουργική σταθερότητα, ελαχιστοποιεί τις απαιτήσεις συντήρησης και συμβάλλει στη συνολική απόδοση του ρότορα. Όταν επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες για να διατηρηθούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, τα θερμαντικά στοιχεία εγκαθίστανται για να διασφαλίζουν τη θερμοκρασία εντός καθορισμένων ορίων, ιδιαίτερα κατά την εκκίνηση όταν επικρατούν συνθήκες ψύξης. Επιπλέον το σύστημα κυκλοφορίας λαδιού/νερού βελτιώνει επιπλέον την απόδοση, ανακατευθύνοντας το ελαφρώς θερμαινόμενο λάδι κιβωτίου ταχυτήτων πίσω στο κιβώτιο ταχυτήτων μέσω θερμικής παράκαμψης κατά την εκκίνηση. Κάποιες από τις ιδιότητές του είναι:

Πίνακας 2-3: Ιδιότητες και τιμές κιβώτιου ταχυτήτων ανεμογεννήτριας N117/3000, τεχνολογίας NORDEX, τροποποιημένο από: [34]

Ιδιότητες	Τιμές
Τύπος	Πολυπεπίτεδο
Αναλογία ταχυτήτων	50Hz = 92± 1%
	60Hz = 111± 1%
Λίπανση	Εξαναγκασμένη τροφοδοσία λίπανσης
Είδος λαδιού	VG 320
Μέγιστη θερμοκρασία λαδιού	75°C
Αλλαγή λαδιού	Αλλαγή, όταν χρειαστεί
Ψύξη και φιλτράρισμα	
Ιδιότητες	Τιμές
Τύπος	Το κύκλωμα ψύξης: Κύκλωμα λαδιού με θερμότητα λαδιού/νερού εναλλάκτη και θερμική παράκαμψη
	2η ψύξη: 2ο κύκλωμα ψύξης: Νερό / αέρας μαζί με ψύξη γεννήτριας
Φίλτρο	Χοντρό φίλτρο 50 μm. Λεπτό φίλτρο 10μm
Ρυθμός Ταχύτητας	Στάδιο 1: Περίπου 75 l/min
	Στάδιο 2: Περίπου 150 l/min

2.2.7 Φρένο (Brake)

Το υδραυλικό φρένο ασφαλίζει την άτρακτο, χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό υδραυλικών και ηλεκτρικών συστημάτων. Αποτελείται από πολλές δαγκάνες φρένων τοποθετημένες στο πλαίσιο του μηχανήματος και λειτουργεί όπως ένα δισκόφρενο. Οι κινητήρες κίνησης για έλεγχο εκτροπής ατράκτου είναι εξοπλισμένοι με ηλεκτρικά ενεργοποιημένο φρένο συγκράτησης. Η υδραυλική μονάδα παρέχει την απαιτούμενη πίεση λαδιού για τη λειτουργία του φρένου ρότορα και των φρένων εκτροπής.

Τα δισκόφρενα με υδραυλικές δαγκάνες φρένων παρέχουν δυνατότητα ισχυρής δύναμης πέδησης, εξασφαλίζοντας ασφαλή λειτουργία. Το σύστημα ελέγχου κλήσης ανεμογεννήτριας είναι σημαντικό καθώς επιτρέπει τη ρύθμιση των γωνιών των πτερυγίων του ρότορα με βάση τις ρυθμίσεις του συστήματος ελέγχου, βελτιστοποιώντας τη δέσμευση ενέργειας και την απόδοση της ανεμογεννήτριας

υπό ποικίλες συνθήκες ανέμου. Κάποιες από τις ιδιότητες του μηχανικού και του υδραυλικού φρένου, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2-4: Ιδιότητες και τιμές φρένου ανεμογεννήτριας N117/3000, τεχνολογίας NORDEX, τροποποιημένο από: [34]

Μηχανικό φρένο	
Ιδιότητες	Τιμές
Τύπος	Ενεργό δισκόφρενο brake
Τοποθεσία	Άξονας υψηλής ταχύτητας
Διάμετρος δίσκου	920 mm
Αριθμός φρένων	1
Υλικό για το τακάκι φρένων	Πυροσυσσωματωμένο μέταλλο
Υδραυλικά φρένα	
Ιδιότητες	Τιμές
Υδραυλικό λάδι	VG 32
Ποσότητα λαδιού	25 L
Θερμική προστασία	Ενσωματωμένος αισθητήρας PT100

2.2.8 Συστήματα ασφαλείας (Safety Systems)

Οι ανεμογεννήτριες της Nordex δίνουν προτεραιότητα στην ασφάλεια μέσω ολοκληρωμένου εξοπλισμού και πρωτοκόλλων που έχουν σχεδιαστεί για να διασφαλίζουν τόσο την ασφάλεια του εργαζόμενου προσωπικό όσο και στην ευστάθεια των ανεμογεννητριών κατά τη λειτουργία. Τηρώντας την οδηγία για τα μηχανήματα 2006/42 / EC που είναι πιστοποιημένες σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 61400, ενσωματώνουν εκτεταμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας που περιγράφονται λεπτομερώς στα εγχειρίδια ασφαλείας. Εάν παραβιαστούν οι παράμετροι ασφαλείας, ο ρότορας θα εισέλθει αυτόματα σε ασφαλή κατάσταση, χρησιμοποιώντας διάφορα προγράμματα φρένου ανάλογα με την αιτία της διακοπής. Για παράδειγμα, σε περίπτωση εξωτερικών παραγόντων, όπως υψηλές ταχύτητες ανέμου ή χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, ο ρότορας φρενάρεται απαλά χρησιμοποιώντας ρύθμιση πτερυγίων για την αποφυγή των κινδύνων.

Το σύστημα προστασίας από κεραυνούς και υπέρτασης που είναι ενσωματωμένο στις ανεμογεννήτριες Nordex, ευθυγραμμίζεται με τις έννοιες ζώνης προστασίας από κεραυνούς που συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές EMC και πληροί τα πρότυπα IEC 61400-24, εξασφαλίζοντας υψηλή προστασία από ηλεκτρικές διαταραχές. Το σύστημα αυτό κατατάσσεται στην κατηγορία αντικεραυνικής προστασίας I, τονίζοντας την αποτελεσματικότητά του στη διασφάλιση της λειτουργίας του ρότορα. Η στρατηγική της Nordex για προστασία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMC) και κεραυνούς περιλαμβάνει μέτρα προστασίας τόσο έξω όσο και μέσα στις ανεμογεννήτριες, διασφαλίζοντας ότι όλα τα μέρη του συστήματος συνεργάζονται χωρίς προβλήματα.

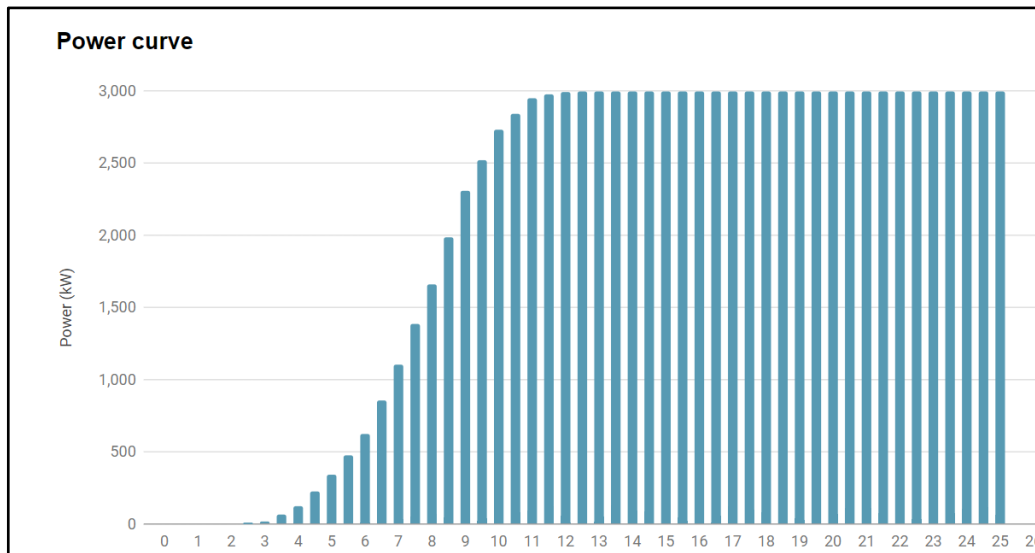
Το ηλεκτρικό σύστημα της ανεμογεννήτριας λειτουργεί με τάση 660V και παρακολουθείται για μόνωση, με τον ουδέτερο του μετασχηματιστή να παραμένει μη γειωμένος για μεγαλύτερη ασφάλεια. Η βοηθητική ισχύς προέρχεται από έναν μετασχηματιστή 660V/400V, δημιουργώντας ένα δίκτυο που τροφοδοτεί βασικά εξαρτήματα όπως τα συστήματα ελέγχου, τα συστήματα περιστροφής και κλίσης, τις υδραυλικές μονάδες, τις αντλίες ψύξης, τους θερμαντήρες και άλλα βοηθητικά συστήματα.

2.2.9 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος (Power curve)

Για να προκύψει η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος (εικόνα 2-3), έχουν ληφθεί υπόψιν τα δεδομένα για την ανεμογεννήτρια N117/3000, τεχνολογίας Nordex, που εξετάσαμε πιο πριν [28], [32]:

- Ονομαστική ισχύς: 3.000 kW
- Διάμετρος ρότορα: 116.8 m
- Σαρωμένη επιφάνεια: 10,715 m²
- Ειδική επιφάνεια: 3.58 m²/kW
- Ελάχιστη ταχύτητα ρότορα: 7,9 rpm/min
- Μέγιστη ταχύτητα ρότορα: 14,1 rpm/min
- Ταχύτητα ανέμου: 2,5 m/s
- Ονομαστική ταχύτητα ανέμου: 12,5 m/s

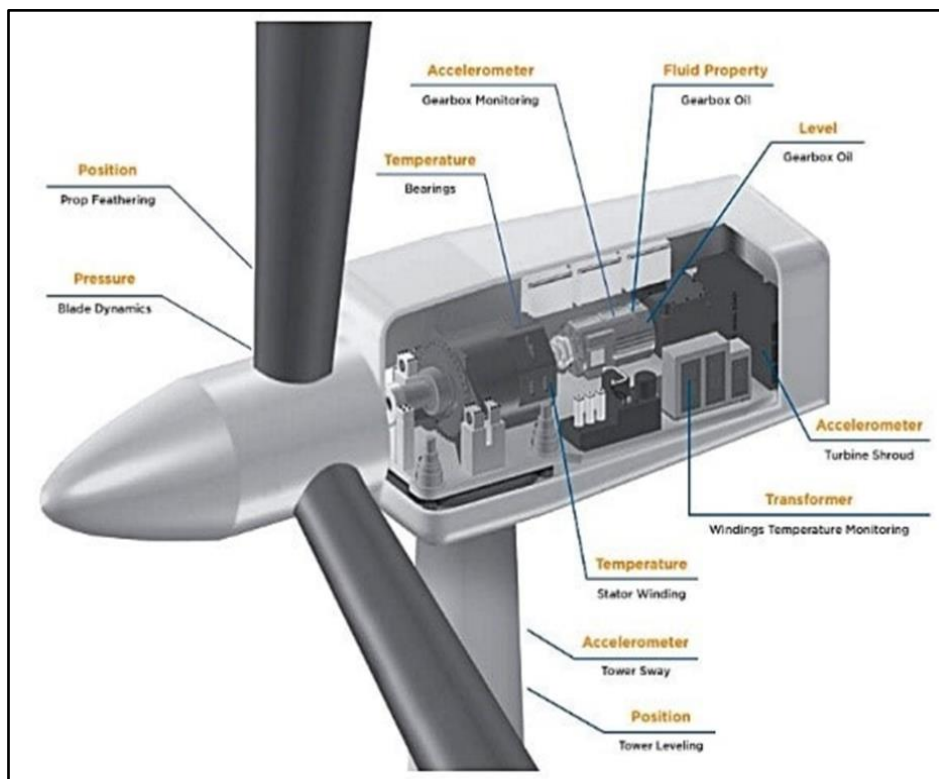
- Ταχύτητα ανέμου διακοπής: 25 m/s
- Ελάχιστο ύψος πλήμνης: 91 m
- Μέγιστο ύψος πλήμνης: 141 m



Εικόνα 2-2: Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος την ανεμογεννήτρια N117/3000, τεχνολογίας Nordex, Πηγή: [32]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Τα συστήματα ελέγχου που ενσωματώνονται στις ανεμογεννήτριες λειτουργούν ως σημαντικοί αισθητήρες που συλλέγουν και αναλύουν συνεχώς δεδομένα που σχετίζονται με την ταχύτητα του ανέμου, την κατεύθυνση, τη θερμοκρασία και άλλες παραμέτρους για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των ανεμογεννητριών. Αυτά τα συστήματα κάνουν προσαρμογές σε πραγματικό χρόνο στη γωνία βήματος των πτερυγίων του ρότορα και στη θέση εκτροπής (σύστημα προσανατολισμού) της ατράκτου, μεγιστοποιώντας τη δέσμευση ενέργειας και διασφαλίζοντας την ασφαλή λειτουργία τους. Επιπλέον, τα συστήματα ελέγχου υποστηρίζουν στρατηγικές προληπτικής συντήρησης παρακολουθώντας βασικά εξαρτήματα και ανιχνεύοντας πρώιμα σημάδια φθοράς ή βλάβης, ελαχιστοποιώντας έτσι το χρόνο διακοπής λειτουργίας, μειώνοντας το κόστος και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας. Κάποια από τα σημεία τοποθέτησης αισθητήρων φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3-1: Απεικόνιση σημείων τοποθέτησης βασικών αισθητήριων, Πηγή: [34]

3.1 Σύστημα ελέγχου ταχύτητας (Pitch control system):

Τα συστήματα ελέγχου ταχύτητας είναι βασικό στοιχείο της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, καθώς διευκολύνουν την αποδοτική παραγωγή ενέργειας, διασφαλίζουν την τήρηση των προτύπων απόδοσης και παρατείνουν τη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας.

Αυτά τα συστήματα έχουν σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση και τη ρύθμιση της ταχύτητας του ρότορα με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις απαιτήσεις ισχύος, μεγιστοποιώντας έτσι τη δέσμευση ενέργειας και τη λειτουργική σταθερότητα. Ρυθμίζουν συνεχώς την ταχύτητα του ρότορα και άλλες λειτουργικές παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν για την:

1. **βελτιστοποίηση της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας.** Όταν το σύστημα βρίσκεται κάτω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, η ρύθμιση βήματος πρέπει να είναι ρυθμισμένη στην βέλτιστη τιμή ταχύτητας για να παρέχει μέγιστη ισχύ.
2. **αποτροπή της υπέρβασης των ορίων** που έχουν δοθεί στον σχεδιασμό της μηχανικής ισχύος. Πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, ο έλεγχος γωνίας βήματος παρέχει ένα πολύ αποτελεσματικό μέσο ρύθμισης της αεροδυναμικής ισχύος και των φορτίων που παράγονται από το ρότορα.
3. **ελαχιστοποίηση των φορτίων κόπωσης** των μηχανικών εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας. Ο τρόπος που λειτουργεί ο ελεγκτής έχει μεγάλη σημασία για τα φορτία που αντιμετωπίζει ο στρόβιλος. Ο ελεγκτής πρέπει να εξασφαλίζει ότι δεν προκαλεί υπερβολικά φορτία, καθώς υπάρχει κίνδυνος να προκληθούν ζημιές στην ανεμογεννήτρια. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικές απώλειες και θέματα ασφαλείας για το προσωπικό και τους γύρω από την περιοχή κινδύνου [35].

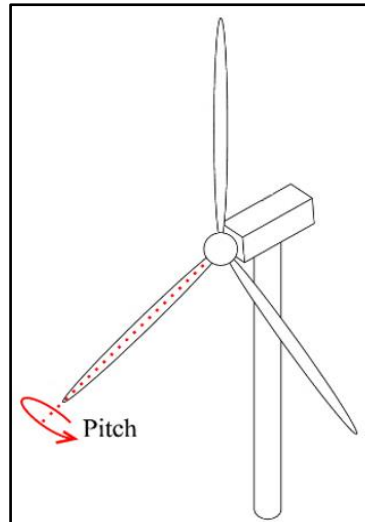
3.1.1 Πτερύγια (Rotor blades) και Σύστημα ελέγχου κλίσης πτερυγίων (Pitch control system):

Τα πτερύγια ρυθμίζονται από το σύστημα ελέγχου ταχύτητας, το οποίο διαχειρίζεται τη γωνία κλίσης τους (pitch control). Αυτό επιτρέπει να διατηρείται σταθερή η παραγωγή ενέργειας, ελέγχοντας την ταχύτητα και επιβραδύνοντας τον ρότορα, προκειμένου να μειωθούν οι μηχανικές τάσεις στα πτερύγια, τον πύργο και άλλα μέρη.

Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι ελέγχου της κλίσης των πτερυγίων.

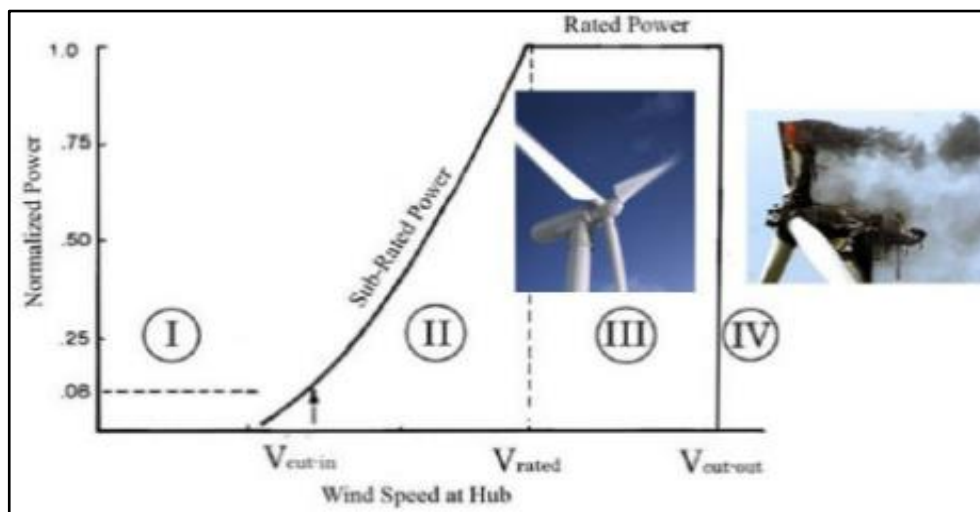
- 1) το παθητικό (passive)
- 2) και το ενεργητικό (active).

Στον έλεγχο με παθητικό σταμάτημα, τα πτερύγια είναι τοποθετημένα στον ρότορα με σταθερή γωνία κλίσης, ρυθμισμένα έτσι ώστε στην ονομαστική ταχύτητα του ανέμου να παράγεται η μέγιστη ισχύς της ανεμογεννήτριας. Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί αυτή την κρίσιμη τιμή, η ανυψωτική δύναμη στα πτερύγια παύει να αυξάνεται, αποτρέποντας την υπερφόρτωση της ανεμογεννήτριας. Αυτή η μέθοδος είναι απλή και οικονομική, όμως δεν αξιοποιεί πλήρως το αιολικό δυναμικό στις χαμηλές ταχύτητες και παρουσιάζει δυσκολίες κατά την εκκίνηση. Αντίθετα, στο ενεργητικό pitch control, Στις υψηλές ταχύτητες μεταβάλλεται η γωνία κλίσης προς την αντίθετη κατεύθυνση και τα πτερύγια του ρότορα τοποθετούνται σε θέση ακινησίας (stand still position), με το ελεύθερο άκρο τους να βρίσκεται μέσα στον άνεμο ώστε να αποφευχθεί η υπερφόρτιση της ανεμογεννήτριας. Με αυτήν την μέθοδο ελέγχου επιτυγχάνονται αεροδυναμικό φρενάρισμα και εύκολες εκκινήσεις.



Εικόνα 3-2: Απεικόνιση pitch control, Πηγή: [36].

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί πως το ενεργητικό σύστημα ελέγχου λειτουργεί σε συγκεκριμένο εύρος των ταχυτήτων του ανέμου. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν τέσσερις περιοχές λειτουργίας όπως φαίνεται στο εικόνα 3-3.



Εικόνα 3-3: Τέσσερις περιοχές λειτουργίας, Πηγή: [37]

- **Στην πρώτη περιοχή**, η ταχύτητα του ανέμου είναι κάτω από το χαμηλότερο όριο που απαιτείται για την έναρξη της περιστροφής του ρότορα και σε εκείνο το σημείο δεν παράγεται καθόλου ενέργεια. Αυτό το χαμηλότερο όριο ταχύτητας ονομάζεται "cut-in wind speed". Εάν η ταχύτητα του ανέμου δεν υπερβαίνει αυτή την τιμή, η ανεμογεννήτρια παραμένει αδρανής.

- Όταν ξεπεραστεί αυτή η ταχύτητα, ο ρότορας αρχίζει να περιστρέφεται και εισέρχεται στη **δεύτερη περιοχή** όπου, η ταχύτητα του ρότορα αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου μέχρι να φτάσει στην ονομαστική ταχύτητα. Στην ονομαστική ταχύτητα, η γεννήτρια λειτουργεί με τη μέγιστη αποδοτικότητα της, παράγοντας τη βέλτιστη ηλεκτρική ενέργεια.
- **Στην τρίτη περιοχή**, η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται από την ονομαστική ταχύτητα έως την ταχύτητα ακινητοποίησης ("cut-out wind speed"), όπου είναι η μέγιστη ταχύτητα ανέμου για την οποία έχει σχεδιαστεί η ανεμογεννήτρια. Σε αυτή την περιοχή, η παραγωγή ενέργειας παραμένει σταθερή, καθώς η γεννήτρια λειτουργεί στη μέγιστη δυνατή ισχύ της. Για να διατηρηθεί αυτή η σταθερότητα, το σύστημα ελέγχου μπορεί να προσαρμόζει τη γωνία των πτερυγίων (pitch control) για να περιορίσει την ποσότητα ενέργειας που συλλέγεται, αποφεύγοντας την υπερφόρτωση.
- Τέλος, **στην τέταρτη περιοχή**, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει την ταχύτητα ακινητοποίησης, για λόγους ασφαλείας, ενεργοποιείται το μηχανικό φρένο ή κάποιο άλλο σύστημα ασφαλείας, όπως το σύστημα πέδησης της ανεμογεννήτριας (braking system). Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει αεροδυναμικά φρένα ή ηλεκτρομαγνητικά φρένα. Το σύστημα αυτό σταματάει σταδιακά την περιστροφή του ρότορα για να προστατεύσει την ανεμογεννήτρια από βλάβες λόγω υπερβολικής ταχύτητας ανέμου.

Οι κατασκευαστές για να αυξήσουν την ασφάλεια έχουν υπολογίσει το σημείο στο οποίο θα καταστραφεί εντελώς η ανεμογεννήτρια και για αυτό έχουν θέσει κατάλληλα όρια τα οποία απέχουν πολύ από αυτό το σημείο [39].

3.1.2 Υδραυλικοί κύλινδροι (Hydraulic cylinders):

Επειδή η διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται, είναι σημαντικό να υπάρχει ένα σύστημα που θα κατευθύνει τις πτέρυγες της ανεμογεννήτριας προς την κατάλληλη κατεύθυνση. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ενός ανεμοδείκτη. Οι αλ-

λαγές στην κλίση και τη διεύθυνση των πτερύγων επιτυγχάνεται μέσω υδραυλικών κυλίνδρων ή άλλων μηχανικών ή υδραυλικών συστημάτων που είναι αυτοκατευθυνόμενα [39]. Αυτά τα συστήματα είναι προτιμητέα λόγω της αξιοπιστίας και της απόδοσής τους. Οι υδραυλικοί κύλινδροι εξαλείφουν την ανάγκη για γρανάζια και ενισχύουν την σταθερότητα απέναντι σε εξωτερικές διαταραχές. Με τη χρήση υδραυλικών συστημάτων που ελέγχονται από αντλίες, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ανταποκριθούν γρήγορα και να επιτύχουν υψηλή ενεργειακή απόδοση [40].

Σε μια υδραυλική κίνηση βήματος, οι γωνίες των πτερυγίων του ρότορα ρυθμίζονται από υδραυλικούς κυλίνδρους οι οποίοι βρίσκονται στον περιστρεφόμενο κόμβο της ανεμογεννήτριας [41]. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν ενεργό έλεγχο βήματος, με ηλεκτρικούς ή υδραυλικούς ενεργοποιητές βήματος [42].

3.1.3 Υδραυλικά συστήματα ελέγχου βήματος

Σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά συστήματα, τα υδραυλικά συστήματα κίνησης αντικαθιστούν τα γρανάζια και προσδίδουν μεγαλύτερη στιβαρότητα στο σύστημα. Παρόλα αυτά, τα υδραυλικά συστήματα έχουν μειονεκτήματα όπως χαμηλότερη απόδοση και προβλήματα γραμμικότητας που αφορούν την απόκριση του συστήματος στα σήματα ελέγχου. Στα υδραυλικά συστήματα, η σχέση μεταξύ της δύναμης που ασκείται και της κίνησης του κυλίνδρου μπορεί να μην είναι πάντα ευθύγραμμη (γραμμική). Για παράδειγμα, σε ένα υδραυλικό σύστημα μπορεί να παρατηρηθεί ότι για μικρές μετακινήσεις του κυλίνδρου, η αντίδραση είναι πολύ ευαίσθητη, ενώ για μεγαλύτερες μετακινήσεις, η απόκριση γίνεται πιο αργή. Αυτό το μη γραμμικό φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει σε δυσκολίες κατά τον ακριβή έλεγχο της θέσης των πτερυγίων, επηρεάζοντας την απόδοση και την ασφάλεια του συστήματος. Ένας υδραυλικός κύλινδρος ελέγχει την κίνηση των πτερυγίων του ρότορα, ρυθμίζοντας το βήμα τους ώστε να προσαρμόζεται στις ταχύτητες του ανέμου. Όταν οι ταχύτητες του ανέμου είναι χαμηλές, η γωνία των πτερυγίων αυξάνεται για να μεγιστοποιηθεί η συλλογή αιολικής ενέργειας. Αντίθετα, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, τα πτερύγια ρυθμίζονται ώστε να μειώνεται η επιφάνεια

που έρχεται σε επαφή με τον άνεμο, προστατεύοντας το σύστημα από υπερβολικές περιστροφές και μειώνοντας την οπισθέλκουσα. Το υδραυλικό υγρό μετακινείται από την άτρακτο στην πλήμνη και ελέγχει τη γωνία των πτερυγίων μέσω του δακτυλίου ολίσθησης, προσαρμόζοντας συνεχώς τη γωνία επαφής με τον άνεμο [43].

3.1.4 Ηλεκτρικά συστήματα ελέγχου βήματος

Στις ανεμογεννήτριες, ένας ηλεκτρικός κινητήρας βήματος ανά άξονα ρυθμίζει τη γωνία των πτερυγίων. Σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, τα πτερύγια μπορούν να ακινητοποιηθούν. Η επιλογή μεταξύ ηλεκτρικών και υδραυλικών συστημάτων είναι κρίσιμη, ιδίως για ανεμογεννήτριες άνω των 3 MW. Τα υδραυλικά συστήματα προτιμώνται για την αξιοπιστία τους, ειδικά σε μεγαλύτερα και βαρύτερα πτερύγια, αν και η πιθανότητα διαρροών αποτελεί κίνδυνο. Από την άλλη πλευρά, τα ηλεκτρικά συστήματα προσφέρουν προηγμένα χαρακτηριστικά όπως βελτιωμένα ρουλεμάν και ανθεκτικούς άξονες, παρέχοντας εξαιρετική απόδοση. Ωστόσο, η φθορά των κινούμενων μερών περιορίζει τη διάρκεια ζωής των ηλεκτρικών κινητήρων βήματος. Παρόλα αυτά, η αντικατάστασή τους είναι γρήγορη και λιγότερο δαπανηρή. Η επιλογή μεταξύ των δύο συστημάτων εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του κάθε περιβάλλοντος, με στόχο τη βελτίωση της παραγωγικότητας και της ασφάλειας των ανεμογεννητριών [44].

3.1.5 Αισθητήρες γωνίας (Angle sensors):

Οι αισθητήρες γωνίας μετρούν τη θέση των πτερυγίων και παρέχουν πληροφορίες στο σύστημα ελέγχου για τη ρύθμιση της γωνίας τους. Επίσης το σύστημα βήματος έχει το υψηλότερο ποσοστό αστοχίας από όλα τα εξαρτήματα ανεμογεννητριών [45]. Τα προβλήματα που μπορεί να περιλαμβάνουν είναι σφάλματα:

- των ενεργοποιητών βήματος
- των αισθητήρων γωνίας βήματος
- από ατελή εγκατάσταση των πτερυγίων

Ανεξαρτήτως του είδους του σφάλματος, η ανισορροπία στη ρύθμιση της γωνίας των πτερυγίων θα έχει ως αποτέλεσμα όχι μόνο πιθανή μείωση της συλλεγόμενης ενέργειας αλλά και αυξημένους κραδασμούς και διακυμάνσεις στην ταχύτητα περιστροφής του ρότορα [46]. Όταν τα πτερύγια δεν είναι σωστά ρυθμισμένα και δεν είναι σε σωστή γωνία, οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω τους από τον αέρα δεν είναι ισορροπημένες. Αυτό οδηγεί σε δονήσεις και φορτίσεις που επηρεάζουν τα εξαρτήματα, με κίνδυνο να προκαλέσουν ζημιές ή να μειώσουν τη διάρκεια ζωής τους, εάν δεν διορθωθούν αμέσως [47].

Προκειμένου να αλλάξει η γωνία των πτερυγίων με ελεγχόμενο τρόπο, το σύστημα ελέγχου των ανεμογεννητριών πρέπει να μετρήσει ακριβώς τη γωνία αυτής της ρύθμισης. Συνήθως, η γωνία αυτή μετρείται μέσω ενός κωδικοποιητή που συνδέεται με το ρουλεμάν της πτέρυγας. Σε μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες, η γωνία βήματος μπορεί να μετράται με πολλούς αισθητήρες που βρίσκονται σε διάφορες θέσεις στο σύστημα κίνησης του βήματος. Αυτή η μέτρηση είναι σημαντική για την ασφάλεια και τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, καθώς η γωνία των πτερυγίων επηρεάζει άμεσα την απόδοση και τη σταθερότητά της [48]. Οι κύριοι τύποι των αισθητήρων γωνίας που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες είναι δύο:

1. Μαγνητικοί περιστροφικοί κωδικοποιητές:

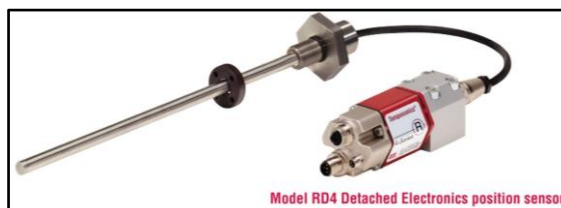
Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της αξιοπιστίας, της ανθεκτικότητας και της ακρίβειάς τους. Λειτουργούν με το να μετρούν την περιστροφή του άξονα που είναι συνδεδεμένοι με τις πτέρυγες και μετατρέπουν αυτήν την κίνηση σε ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο αντιπροσωπεύει τη γωνία της κάθε πτέρυγας.



Εικόνα 3-4: Μαγνητικοί περιστροφικοί κωδικοποιητές, Πηγή: [49].

2. Μαγνητοσυσταλτικοί γραμμικοί αισθητήρες θέσης

Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν το μαγνητοσυσταλτικό φαινόμενο (την αλλαγή στη διάσταση ενός υλικού κάτω από ένα μαγνητικό πεδίο) για να μετρήσουν τη μετατόπιση ενός μαγνήτη που συνδέεται με το μηχανισμό βήματος της πτέρυγας. Προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και ανάλυση, αλλά μπορεί να είναι πιο περίπλοκοι και ακριβοί από τους περιστροφικούς κωδικοποιητές.



Εικόνα 3-5: Μαγνητοσυσταλτικοί γραμμικοί αισθητήρες θέσης, Πηγή: [50].

3.2 Σύστημα κατεύθυνσης ελέγχου (Yaw control system):

Η μείωση του κόστους ενέργειας των ανεμογεννητριών και η αντιμετώπισή τους σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να θεωρηθεί ως ο κύριος στόχος της βελτιστοποίησης τους. Το σύστημα εκτροπής (κατεύθυνσης ελέγχου) που είναι υπεύθυνο για την περιστροφή της ατράκτου γύρω από τον άξονα του πύργου, μπορεί να συμβάλει σε αυτό μέσω των ακόλουθων σημείων [51]:

- **Αύξηση της δέσμευσης ενέργειας:**

Με το να κατευθύνουμε την περιοχή στην οποία περιστρέφονται οι πτέρυγες του ρότορα προς την κατεύθυνση του ανέμου που φυσάει, μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι η ανεμογεννήτρια παράγει την μέγιστη δυνατή ισχύ από τον αέρα. Επιπλέον, η βελτιωμένη αξιοπιστία του συστήματος προσανατολισμού μπορεί να αυξήσει την συνολική λειτουργικότητα της ανεμογεννήτριας, καθιστώντας την πιο αποδοτική στην παραγωγή ενέργειας.

- **Μείωση του φορτίου της δομής:**

Αφήνοντας την άτρακτο να περιστρέφεται φυσικά για να αντισταθμίσει τις δυνάμεις που προκύπτουν από την κατεύθυνση του ανέμου και τις δυνάμεις της αεροδυναμικής. Αυτό οδηγεί σε πιθανή μείωση των φορτίων που δέχεται η δομή και άλλα μέρη της ανεμογεννήτριας κατά το σχεδιασμό τους.

- **Μείωση κόστους:**

Μείωση του κόστους του ίδιου του συστήματος εκτροπής σημαίνει να μειώνονται τα έξοδα που σχετίζονται με την κατασκευή και την εγκατάσταση του. Επίσης, μειώνονται τα έξοδα για τη λειτουργία, τη συντήρηση και την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος εκτροπής.

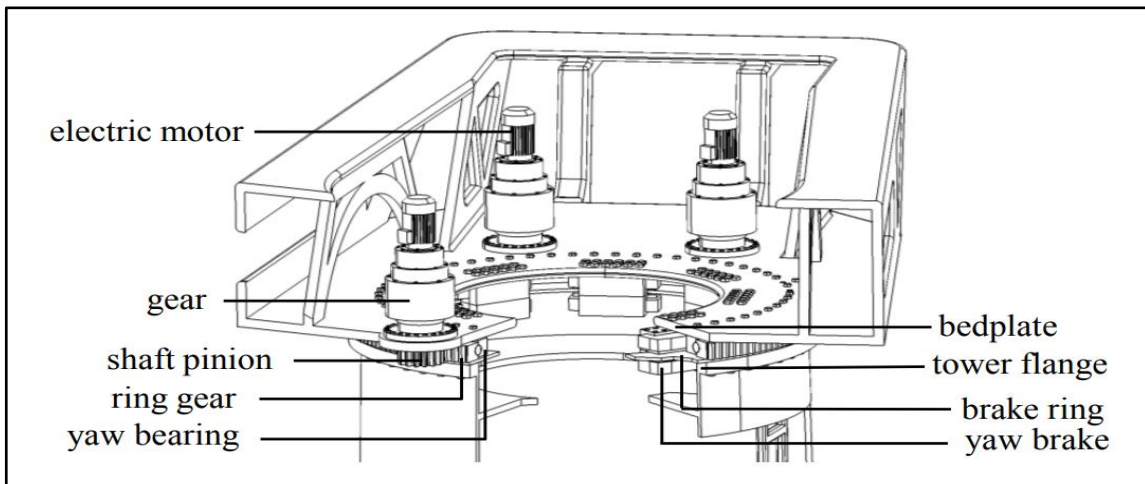
3.2.1 Κινητήρες κατεύθυνσης (Yaw motors):

Οι κινητήρες κατεύθυνσης (Yaw motors) είναι υπεύθυνοι για την αλλαγή της κατεύθυνσης της ανεμογεννήτριας ώστε να ευθυγραμμιστεί με την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτό επιτυγχάνεται με την περιστροφή της ατράκτου και του ρότορα γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, επιτρέποντας στη γεννήτρια να απορροφά τη μέγιστη δυνατή ενέργεια από τον άνεμο.

Το σύστημα εκτροπής (Yaw system) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση της ισχύος όταν οι ταχύτητες του ανέμου υπερβαίνουν τις ονομαστικές τιμές. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας τα πτερύγια του ρότορα να έχουν λιγότερη επαφή με τον άνεμο. Ένα σύστημα εκτροπής για γρήγορη ρύθμιση ισχύος απαιτεί υψηλές ταχύτητες περιστροφής, επειδή η μείωση της παραγωγής ισχύος σε σχέση με το σφάλμα εκτροπής είναι μικρή. Επιπλέον, η ροπή περιστροφής πρέπει να ξεπεράσει τις υψηλές αντιστάσεις λόγω της μεγάλης αδράνειας της ατράκτου και του ρότορα. [51].

Στην εικόνα 3-6 φαίνεται ένα παράδειγμα πώς είναι οργανωμένο το σύστημα εκτροπής, που περιλαμβάνει πολλαπλούς μηχανισμούς εκτροπής, φρένα εκτρο-

πής και ρουλεμάν εκτροπής. Η κίνηση εκτροπής παράγεται από έναν ηλεκτροκινητήρα, ένα φρένο και ένα γρανάζι άξονα, τα οποία συνδέονται με ένα γρανάζι δακτυλίου στο ρουλεμάν εκτροπής. Τα φρένα εκτροπής ασκούν ροπή φρένου στον δίσκο φρένων, ο οποίος βρίσκεται μεταξύ της φλάντζας του πύργου και του ρουλεμάν εκτροπής.



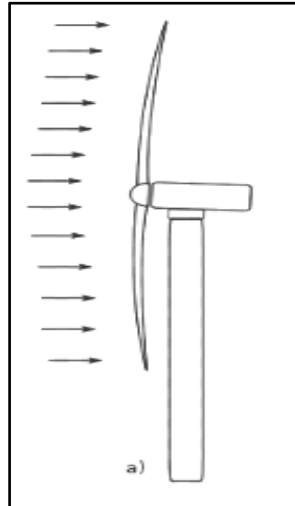
Εικόνα 3-6: Σύστημα κίνησης για αλλαγή κατεύθυνσης, Πηγή: [52].

3.2.1.1 Ενεργά συστήματα εκτροπής (Active yaw systems)

Τα ενεργά συστήματα εκτροπής έχουν μια συσκευή που παράγει ροπή και μπορεί να περιστρέψει την άτρακτο της ανεμογεννήτριας γύρω από το σταθερό πύργο, ανάλογα με τα σήματα που λαμβάνει από αισθητήρες κατεύθυνσης του ανέμου ή από ενεργοποίηση με χειροκίνητο τρόπο (παράκαμψη του συστήματος ελέγχου). Θεωρούνται η τελευταία λέξη της τεχνολογίας για όλες τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες μεσαίου και μεγάλου μεγέθους. Τα διάφορα εξαρτήματα των σύγχρονων ενεργών συστημάτων εκτροπής διαφέρουν ανάλογα με τον σχεδιασμό τους, αλλά όλα περιλαμβάνουν:

- ένα μέσο περιστρεφόμενης σύνδεσης μεταξύ ατράκτου και πύργου (ρουλεμάν εκτροπής)
- ένα μέσο ενεργού μεταβολής του προσανατολισμού του ρότορα (κίνηση εκτροπής)
- ένα μέσο περιορισμού της περιστροφής της ατράκτου (πέδη εκτροπής)

- ένα σύστημα ελέγχου που επεξεργάζεται τα σήματα από αισθητήρες κατεύθυνσης ανέμου που δίνει τις κατάλληλες εντολές στους μηχανισμούς ενεργοποίησης (ανεμοδείκτες).

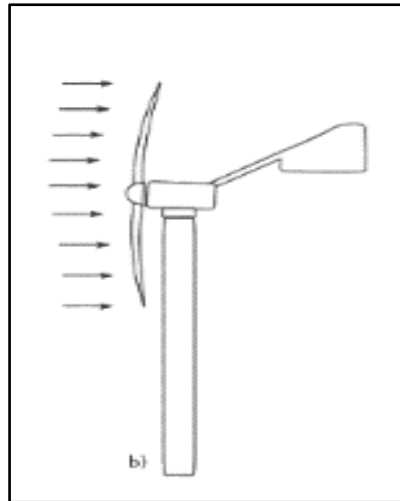


Εικόνα 3-7: Ενεργά συστήματα εκτροπής, Πηγή: [53].

3.2.1.2 Παθητικά συστήματα εκτροπής

Τα παθητικά συστήματα εκτροπής χρησιμοποιούν τη δύναμη του ανέμου για να προσαρμόσουν την κατεύθυνση του ρότορα της ανεμογεννήτριας. Στην πιο απλή τους μορφή, αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν ένα απλό ρουλεμάν που ενώνει τον πύργο με την άτρακτο, καθώς και ένα πτερύγιο που τοποθετείται στην άτρακτο. Το πτερύγιο είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε, απλά με την πίεση του αέρα, να επιβάλλει μια διορθωτική ροπή στην άτρακτο, προσανατολίζοντας έτσι τον ρότορα της ανεμογεννήτριας στην κατεύθυνση του ανέμου.

Επομένως, η ισχύς του ανέμου είναι υπεύθυνη για την περιστροφή του ρότορα και τον προσανατολισμό της ατράκτου. Εναλλακτικά, στην περίπτωση των ανεμογεννητριών, το ουραίο πτερύγιο δεν είναι απαραίτητο, δεδομένου ότι ο ίδιος ο ρότορας είναι σε θέση να στρέψει την άτρακτο στον άνεμο [54].



Εικόνα 3-8: Παθητικά συστήματα εκτροπής, Πηγή: [55].

3.2.2 Αισθητήρες κατεύθυνσης (Yaw sensors):

Οι αισθητήρες κατεύθυνσης εντοπίζουν την κατεύθυνση του αέρα από όπου αυτός και αν έρχεται. Αυτή η πληροφορία περνάει στο σύστημα ελέγχου, το οποίο μετακινεί το περίβλημα του ρότορα (το κάλυμμα γύρω από τον άξονα) για να ευθυγραμμίσει τις πτέρυγες έτσι ώστε να εκμεταλλευτούν τον αέρα όσο το δυνατόν καλύτερα. Τα ακριβή δεδομένα κατεύθυνσης του ανέμου προσφέρουν πολλά οφέλη, αλλά τα πιο σημαντικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

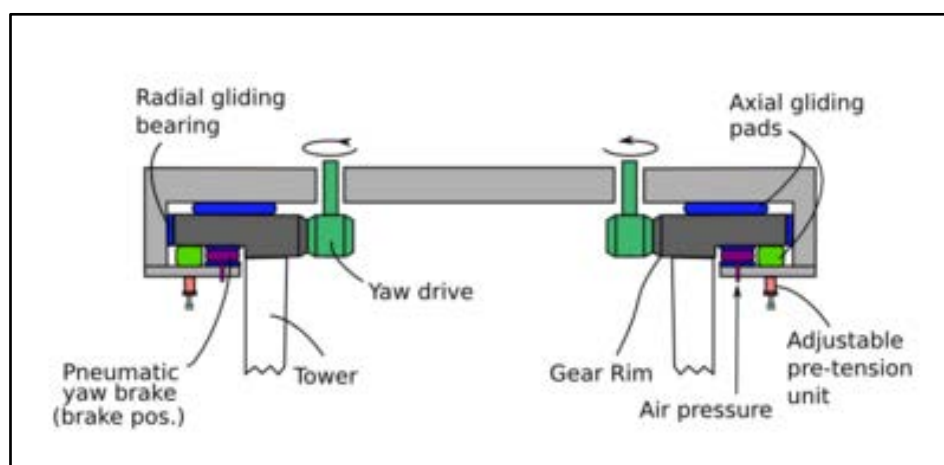
Πίνακας 3-1: Οφέλη από τα ακριβή δεδομένα κατεύθυνσης ανέμου, Πηγή: [56].

Οφέλη	Αιτιολόγηση
Αυξημένη δέσμευση ενέργειας	Διατηρώντας τα πτερύγια στραμμένα προς τον άνεμο, ο έλεγχος εκτροπής μεγιστοποιεί την ποσότητα αιολικής ενέργειας που συλλαμβάνεται, οδηγώντας σε μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
Μειωμένα φορτία πτερυγίων	Η κακή ευθυγράμμιση μπορεί να ασκήσει υπερβολική πίεση στα πτερύγια των στροβίλων, προκαλώντας ενδεχομένως ζημιά και απαιτώντας επισκευές. Ο έλεγχος εκτροπής βοηθά στην πρόληψη αυτού διατηρώντας τις λεπίδες σωστά ευθυγραμμισμένες με τον άνεμο.
Βελτιωμένη απόδοση	Η βέλτιστη δέσμευση ανέμου και η μειωμένη καταπόνηση των πτερυγίων συμβάλλουν στη συνολική απόδοση της ανεμογεννήτριας.

Οι δύο τύποι αισθητήρων που χρησιμοποιούνται είναι ο ανεμοδείκτης και το ηχητικό ανεμόμετρο. Ο ανεμοδείκτης χρησιμοποιεί ένα μηχανικό πτερύγιο που γυρίζει ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου. Η θέση του μεταφράζεται σε ένα ηλεκτρικό σήμα που δείχνει την κατεύθυνση του ανέμου. Από την άλλη, το ηχητικό ανεμόμετρο χρησιμοποιεί ηχητικά κύματα για να μετρήσει την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου. Το ηχητικό ανεμόμετρο έχει μεγαλύτερη ακρίβεια και μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και σε ασθενείς ανέμους [57].

3.3 Σύστημα αυτόματου φρεναρίσματος (Automatic braking system):

Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται για να ελέγχει την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας όταν αυτή περιστρέφεται με την ταχύτητα του αέρα. Το σύστημα αυτό βοηθά να αποτραπεί η υπερβολική ταχύτητα. Για να διατηρηθεί σταθερό το ρουλεμάν εκτροπής απέναντι στην περιστροφή, απαιτείται ένα σύστημα φρένου. Με την εφαρμογή μιας σταθερής αντίθετης ροπής στις περιστροφές εκτροπής, απαλείφεται η αντίδραση μεταξύ των γραναζιών, προκειμένου να μειωθεί η ταλάντωση της ατράκτου λόγω της περιστροφής του ρότορα. Αυτή η λειτουργία, ωστόσο, μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία των ηλεκτρικών μονάδων εκτροπής. Επομένως, μια συνηθισμένη λύση είναι η χρήση ενός δισκόφρενου με υδραυλική ενεργοποίηση. (εικόνα 3-10).



Εικόνα 3-9:Υδραυλικά ενεργοποιημένο δισκόφρενο, Πηγή: [58].

Το φρένο είναι πολύ σημαντικό σύστημα πέδησης στις ανεμογεννήτριες. Απαιτείται ένας δίσκος και διάφορα εξαρτήματα για να λειτουργήσει, όπως υδραυλικά έμβολα και τακάκια. Τα υδραυλικά φρένα μπορούν να εφαρμόσουν μεγάλη δύναμη στο φρένο μέσω ενός συστήματος υδραυλικής πίεσης, όμως το υψηλό κόστος και η ευαισθησία τους στην μόλυνση από λιπαντικά είναι πρόβλημα. Μια εναλλακτική λύση είναι τα ηλεκτρικά φρένα, όπου η δύναμη εφαρμόζεται μέσω ηλεκτρομηχανικών στοιχείων αντί υδραυλικών. Μειώνεται έτσι το κόστος συντήρησης και αποφεύγονται προβλήματα που σχετίζονται με υδραυλικά συστήματα. Επιπλέον, εταιρείες εξετάζουν τη χρήση πίεσης αέρα για τα φρένα, χρησιμοποιώντας ολισθαίνουσες επιφάνειες για τακάκια και πνευματικούς μηχανισμούς για να παράγουν ισχυρές δυνάμεις πέδησης, με χαμηλότερο κόστος και λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις [58].

3.3.1 Φρένο έκτακτης ανάγκης

Τα φρένα του ρότορα ελέγχουν την υπερβολική ταχύτητα και παρέχουν φρενάρισμα για ακινητοποίηση σε έκτακτη ανάγκη. Τα περισσότερα φρένα ρότορα στις ανεμογεννήτριες είναι του τύπου που εφαρμόζονται με ελατήριο και απελευθερώνονται υδραυλικά. Χρησιμοποιούν ισχυρά ελατήρια που ασκούν δύναμη στον δίσκο φρένου είτε άμεσα είτε μέσω ενός μηχανισμού. Για να απελευθερωθεί το φρένο, τα ελατήρια συμπιέζονται με υδραυλικό λάδι υψηλής πίεσης που παρέχεται από ένα σύστημα τροφοδοσίας [59]. Τα φρένα ρότορα μπορούν να τοποθετηθούν στον άξονα του ρότορα χαμηλής ταχύτητας, στον άξονα της γεννήτριας υψηλής ταχύτητας και σε ορισμένες περιπτώσεις και στους δύο άξονες. Η πιο αποδοτική θέση για το φρένο είναι στον άξονα υψηλής ταχύτητας μεταξύ του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας, όπου η υψηλή σχέση κιβωτίου ταχυτήτων επιτυγχάνει σημαντική μείωση της ροπής εξόδου.

3.3.2 Φρένα για έλεγχο εκτροπής (κατεύθυνσης)

Μια ανεμογεννήτρια μπορεί συνήθως να σταματήσει μετακινώντας τα πτερύγια της έξω από την κατεύθυνση του ανέμου. Ωστόσο, τα φρένα εκτροπής βοηθούν στον καλύτερο έλεγχο της ατράκτου. Η διαδικασία ξεκινά όταν ένα ανεμόμετρο ανιχνεύει μια αλλαγή στην κατεύθυνση του ανέμου και ενεργοποιεί τον κινη-

τήρα που περιστρέφει το σύστημα εκτροπής. Ο κινητήρας σταματά μόλις ο μηχανισμός εκτροπής βρεθεί στη σωστή θέση. Όταν το σύστημα εκτροπής δεν λειτουργεί, το φρένο εφαρμόζει τη μέγιστη δύναμη. Κατά τη λειτουργία εκτροπής, η υδραυλική πίεση και η δύναμη φρένου μειώνονται, αλλά παραμένουν αρκετές για να μειώσουν τα εναλλασσόμενα φορτία στα γρανάζια της κίνησης εκτροπής [53]. Η επιφάνεια φρένου μπορεί να φθαρεί, οδηγώντας σε συχνότερη συντήρηση και επιθεώρηση. Η χρήση ηλεκτρομηχανικών φρένων μπορεί να αποφύγει αυτά τα προβλήματα, αλλά έχουν μεγαλύτερο βάρος. Παρόλα αυτά, τα ηλεκτρομηχανικά φρένα προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως η απλοποίηση της συντήρησης και η αποφυγή προβλημάτων που σχετίζονται με τα υδραυλικά συστήματα, για παράδειγμα διαρροές ή μόλυνση από λιπαντικά. Αυτό μπορεί να βελτιώσει τη συνολική αξιοπιστία και να μειώσει το λειτουργικό κόστος των ανεμογεννητριών.

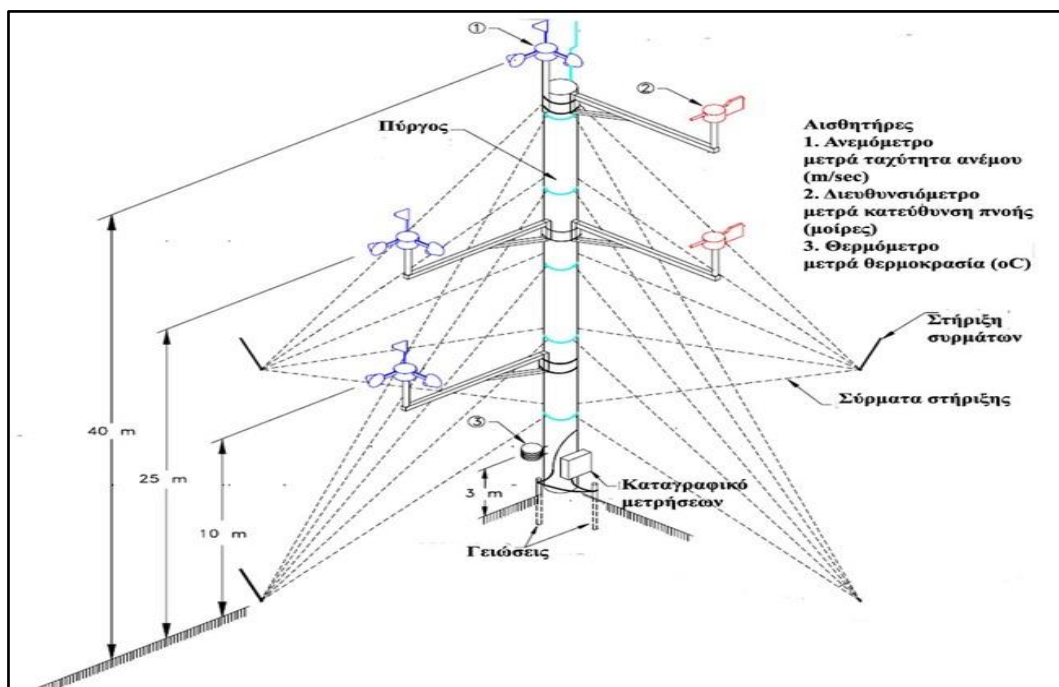
3.4 Σύστημα ελέγχου ανέμου και θερμοκρασίας (Wind and temperature monitoring system)

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες εξαρτώνται απόλυτα από την ακρίβεια και την αξιοπιστία των συστημάτων ελέγχου ανέμου και θερμοκρασίας. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν αισθητήρες και τεχνολογίες που εξασφαλίζουν τη βέλτιστη λειτουργία και την προστασία των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κύριοι τύποι αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση και την παρακολούθηση της ταχύτητας του ανέμου και της θερμοκρασίας, καθώς και οι λειτουργίες τους.

3.4.1 Αισθητήρες ανεμόμετρου (Anemometers):

Οι αισθητήρες ανεμόμετρου μετρούν την ταχύτητα του ανέμου και παρέχουν πληροφορίες για τις τρέχουσες καιρικές συνθήκες. Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού μπορεί να πραγματοποιηθεί στο μέγιστο μόνο στην περίπτωση που υπάρχουν οι απαραίτητες μετρήσεις του ανέμου. Με την σωστή καταμέτρηση σημαντικών δεδομένων του ανέμου δημιουργείται μια σαφής εικόνα για το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής. Το αιολικό δυναμικό καθώς και ο άνεμος μετρούνται με ανεμόμετρα, για την μέτρηση της ταχύτητας και ανεμοδείκτες για την διεύθυνση του ανέμου. Αυτά είναι τοποθετημένα στον μετεωρολογικό ιστό (εικόνα 3-11), ο

οποίος τοποθετείται κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα στην ψηλότερη κορυφή για την αποφυγή κάθε είδους φυσικού ή τεχνητού εμποδίου, προκειμένου να μην υπάρξει αλλοίωση αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3-10 Μετεωρολογικός ιστός, Πηγή: [61].

Οι πιο απλές συσκευές για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου είναι τα ανεμόμετρα. Αυτά λειτουργούν περιστρέφοντας το πάνω μέρος τους με την ίδια ταχύτητα που φυσά ο άνεμος στο συγκεκριμένο σημείο.

Επιπλέον, τα ανεμόμετρα μετρούν τη μέση ταχύτητα του ανέμου και γι' αυτό θεωρούνται αθροιστικά. Τα πιο κοινά ανεμόμετρα είναι τα κυπελλοφόρα (εικόνα 3-12). Αυτά αποτελούνται από έναν κατακόρυφο άξονα με τρεις ή τέσσερις οριζόντιους βραχίονες στην κορυφή. Στα άκρα κάθε βραχίονα υπάρχει ένα ημισφαιρικό ή κωνικό κύπελλο, τοποθετημένο έτσι ώστε η διαμετρική τομή του να είναι κατακόρυφη.



Εικόνα 3-11: Κυπελλοφόρα ανεμόμετρα (Vector-Thies-NRG), Πηγή: [62].

Η διεύθυνση του ανέμου μετριέται συνήθως με τη βοήθεια των ανεμοδεικτών. Ο ανεμοδείκτης (εικόνα 3-11) είναι ένα εργαλείο που μετρά την κατεύθυνση του ανέμου. Αποτελείται από έναν κάθετο άξονα στην κορυφή του οποίου περιστρέφεται ένας οριζόντιος άξονας με ένα ή δύο πτερύγια στη μία άκρη του. Όταν ο άνεμος φυσά, τα πτερύγια ισορροπούν την πίεση και ο δείκτης του ανεμοδείκτη δείχνει την κατεύθυνση από την οποία φυσά ο άνεμος, με το αντίβαρο να εξισορροπεί το πτερύγιο.



Εικόνα 3-12: Ανεμοδείκτης, Πηγή: [63].

3.4.2 Αισθητήρες θερμοκρασίας (Temperature sensors):

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας μετρούν τη θερμοκρασία σε διάφορα εξαρτήματα μέσα στις ανεμογεννήτριες και παρέχουν πληροφορίες για τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Κάποιοι από τους βασικότερους είναι οι ακόλουθοι:

1. Ανιχνευτής θερμοκρασίας μετασχηματιστή

Οι μετασχηματιστές και όλοι οι μετατροπείς ενέργειας, έχουν απώλειες που εξαρτώνται από την ισχύ τους. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι απώλειες, χρησιμοποιούνται συστήματα ψύξης. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν την κυκλοφορία λαδιού, που λειτουργεί και ως μονωτικό υλικό, ή τη χρήση αέρα για την ψύξη. Οι αισθητήρες αυτοί βρίσκονται μέσα στους μετασχηματιστές και τους μετατροπείς ενέργειας.

2. Ανιχνευτής θερμοκρασίας καμπινών ελέγχου

Λόγω του μετασχηματιστή και των ηλεκτρονικών στοιχείων στην καμπίνα ελέγχου, παράγεται θερμότητα που αυξάνει τη θερμοκρασία. Για να διατηρηθεί η

θερμοκρασία σε ασφαλή επίπεδα, χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες (fan coolers) που λειτουργούν συνεχώς. Αν κάποιος ανεμιστήρας σταματήσει να λειτουργεί, ένας αισθητήρας θερμοκρασίας ανιχνεύει την αύξηση της θερμοκρασίας και απενεργοποιεί τον μετατροπέα για να τον προστατεύσει. Οι αισθητήρες αυτοί βρίσκονται μέσα στις καμπίνες ελέγχου.

3. Αισθητήρας θερμοκρασίας λαδιού σασμάν - Ψύξη λαδιού

Όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 80°C, αποστέλλεται ένα μήνυμα σφάλματος για την υψηλή θερμοκρασία του λαδιού στο σασμάν. Για να διατηρείται το λάδι του σασμάν σε επιτρεπτά επίπεδα, υπάρχει συνήθως ένα ψυγείο με δύο ανεμιστήρες:

- Χαμηλής ταχύτητας που ξεκινάει στους 60°C και σταματάει στους 55°C.
- Υψηλής ταχύτητας που εκκινεί στους 70°C και σταματάει στους 65°C.

Αυτοί οι αισθητήρες βρίσκονται στο σύστημα ψύξης του λαδιού στο σασμάν.

4. Αισθητήρας Θερμοκρασίας Γεννήτριας

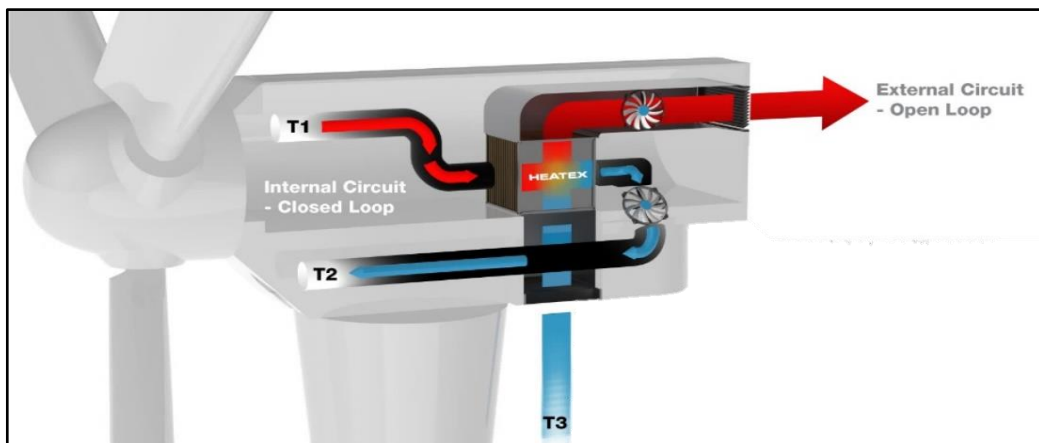
Η γεννήτρια ψύχεται από ένα εξωτερικό ανεμιστήρα δύο ταχυτήτων, ο οποίος ψύχει το εσωτερικό της νασέλας. Η λειτουργία του είναι να οδηγήσει τον αέρα από το εσωτερικό της νασέλας προς το περιβάλλον. Καθώς υπάρχουν και εδώ 2 ανεμιστήρες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας ισχύουν τα ακόλουθα :

1. Ο ανεμιστήρας θα ξεκινήσει στη 1η (χαμηλή) ταχύτητα εάν ισχύει έστω και ένα από τα παρακάτω:
 - Η Θερμοκρασία τυλιγμάτων γεννήτριας μεγαλύτερη από 70 °C
 - Η Θερμοκρασία ρουλεμάν γεννήτριας μεγαλύτερη από 80 °C
 - Η Θερμοκρασία νασέλας μεγαλύτερη από 35 °C

2. Η αλλαγή στην 2η (υψηλή) ταχύτητα θα γίνει εάν ένας από τους παρακάτω όρους είναι αληθής:

- Θερμοκρασία τυλιγμάτων γεννήτριας μεγαλύτερη από 95 °C
- Η Θερμοκρασία ρουλεμάν γεννήτριας μεγαλύτερη από 110 °C
- Θερμοκρασία νασέλας μεγαλύτερη από 40 °C

Οι αισθητήρες αυτοί βρίσκονται στην γεννήτρια και στο εσωτερικό της νασέλας.



Εικόνα 3-13: Ψύξη γεννήτριας, Πηγή: [63].

5. Αισθητήρας θερμοκρασίας δαχτυλιδιών ολίσθησης της γεννήτριας.

Ο δακτύλιος ολίσθησης (εικόνα 3-15) είναι ένα ηλεκτρικό εξάρτημα που χρησιμοποιείται στις ανεμογεννήτριες για τη μεταφορά ισχύος και δεδομένων μεταξύ των σταθερών και περιστρεφόμενων τμημάτων. Οι αισθητήρες αυτοί βρίσκονται στον χώρο των δαχτυλιδιών ολίσθησης.



Εικόνα 3-14: Δακτύλιος ολίσθησης, Πηγή: [64].

Για τη σωστή λειτουργία, ο χώρος που φιλοξενεί τον συγκεκριμένο τύπο δακτυλίου πρέπει να έχει την κατάλληλη θερμοκρασία ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος ύπαρξης υγρασίας. Για να γίνει αυτό θα πρέπει πριν ξεκινήσει η ανεμογεννήτρια, να λειτουργεί ο ανεμιστήρας και η αντίσταση να θερμαίνει το χώρο. Κάποιες επιπρόσθετες τυπικές ιδιότητες είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 3-2: ιδιότητες δακτυλίου ολίσθησης, Πηγή: [65].

Ανεμιστήρας	
Ιδιότητες	Λεπτομέρειες
Ανώτατο όριο θερμοκρασίας	70 °C.
Ενεργοποίηση Ανεμιστήρα	Όταν η ταχύτητα της γεννήτριας περάσει τις 150 rpm
Αντίσταση	
Ιδιότητες	Λεπτομέρειες
Θέρμανση του δακτυλίου ολίσθησης	Εκτελείται, εάν η θερμοκρασία του χώρου είναι κάτω από 0°C.
Θέρμανση χώρου	Συνήθως διαρκέσει 1 ώρα.
Χρόνος αντίστασης	30 λεπτά ανά διαφορά θερμοκρασίας 10°C του slip ring και της nacelle (συν ένα περιθώριο 5°C).
Χρόνος προθέρμανσης	Ελάχιστο 5 λεπτά, μέγιστο 1 ώρας

6. Αισθητήρας θερμοκρασίας ελεγκτών

Για την σωστή λειτουργία των επεξεργαστών και τον σωστό υπολογισμό, θα πρέπει η θερμοκρασία στους υπολογιστές να είναι πάντα πάνω από τους 0°C. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν αντιστάσεις θέρμανσης (thermistors) (εικόνα 3-16) στους ελεγκτές όπου κρατούν τη θερμοκρασία στα επιθυμητά όρια. Οι αντιστάσεις θερμαίνουν το χώρο μέχρι τους 10 °C και έπειτα σβήνουν. Οι αισθητήρες αυτοί βρίσκονται στους ελεγκτές.



Εικόνα 3-15: Αντιστάσεις θέρμανσης, Πηγή: [66].

7. Αισθητήρας θερμοκρασίας περιβάλλοντος

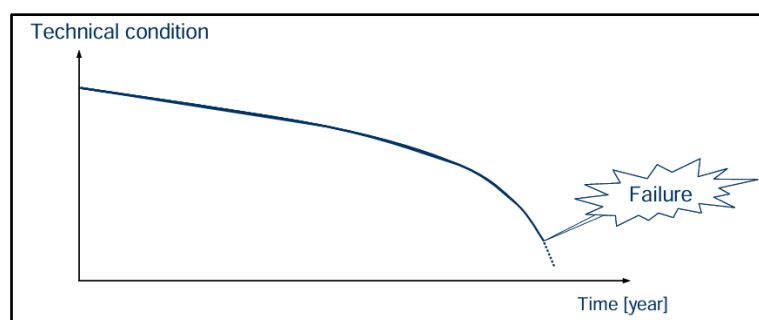
Η θερμοκρασία περιβάλλοντος μετρίεται με έναν αισθητήρα θερμοκρασίας (εικόνα 3-17) ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω στην άτρακτο. Εάν η θερμοκρασία πέσει κάτω από -20 °C για περισσότερο από 20 δευτερόλεπτα, η ανεμογεννήτρια μπαίνει σε κατάσταση αναμονής. Αυτό συμβαίνει διότι η εξωτερική θερμοκρασία επηρεάζει την πυκνότητα του αέρα την απόδοση των ανεμογεννητριών και την απόδοση των εξαρτημάτων. Επιπλέον υπάρχει και ο κίνδυνος δημιουργίας πάγου σε ευαίσθητα μηχανικά, ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά μέρη.



Εικόνα 3-16: Αισθητήρας θερμοκρασίας περιβάλλοντος, Πηγή: [67].

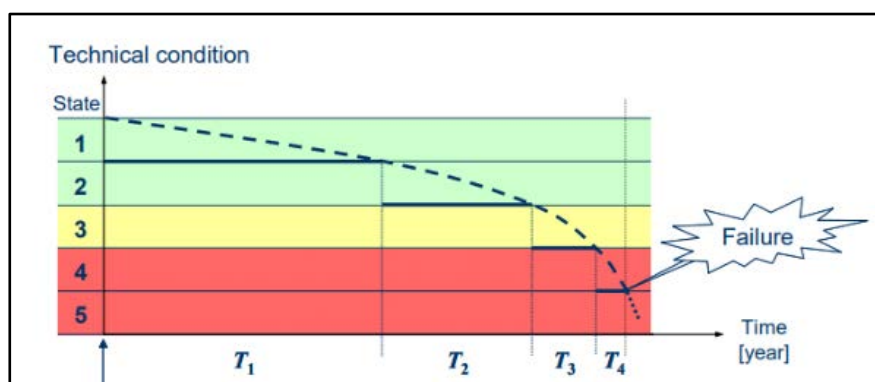
3.5 Σύστημα ελέγχου κατάστασης (condition monitoring system):

Με την πάροδο του χρόνου όλα τα εξαρτήματα μίας ανεμογεννήτριας υποβαθμίζονται με αποτέλεσμα να πέφτει η απόδοσή του συνολικού συστήματος και στο τέλος να εμφανίζουν αστοχίες (δυσλειτουργούν) όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Τέτοιες καμπύλες συχνά εκφράζονται ως καμπύλες υποβάθμισης, καμπύλες φθοράς ή καμπύλες διάρκειας ζωής.



Εικόνα 3-17: Καμπύλες υποβάθμισης, Πηγή: [68].

Ο παραδοσιακός τρόπος των εταιρειών παραγωγής ενέργειας για την παρακολούθηση της κατάστασης των εξαρτημάτων ήταν να πραγματοποιούν μόνο οπτικές επιθεωρήσεις. Όμως με την εξέλιξη της τεχνολογίας, αποδείχθηκε πως τέτοιες μέθοδοι δεν παρέχουν ακριβή γνώση και αυτό οφείλεται στο ότι οι επιθεωρήσεις γινόταν ανά περιόδους και όχι σε καθημερινή βάση. Σύμφωνα με πολλά εγχειρίδια, η υποβάθμιση ενός εξαρτήματος από θέση λειτουργίας έως την αστοχία απλοποιείται με την κατηγοριοποίηση της κατάστασης σε τέσσερα καθορισμένα στάδια (εικόνα 3-19).



Εικόνα 3-18: Κατηγοριοποίηση της κατάστασης σε τέσσερα στάδια, Πηγή: [68].

State	Description	Possible actions (depending on risk assessments)
1	No indication of degradation (the condition is "as good as new")	No further actions.
2	Incipient degradation (the condition is noticeably worse than "as good as new")	No further actions. Condition may be subject to increased attention.
3	Severe degradation (the condition is considerably worse than "as good as new")	Actions may be conducted before further operation. Condition must be subject to increased attention.
4	Critical degradation (the condition is critical)	Corrective actions should be conducted before further operation.
5	Fault	Corrective actions must be conducted before further operation.

Εικόνα 3-19: Ανάλυση της κατηγοριοποίησης της κατάστασης σε πέντε στάδια, Πηγή: [68].

Η συνθήκη 1 αναφέρεται σε μια "σαν νέα" κατάσταση, χωρίς υποβάθμιση. Η συνθήκη 2 υποδηλώνει μια φυσιολογική ή αναμενόμενη υποβάθμιση που δεν απαιτεί συντήρηση (αρχική φάση υποβάθμισης). Η κατάσταση 3 σημαίνει ότι θα χρειαστεί κάποια προληπτική συντήρηση στο μέλλον (σοβαρή υποβάθμιση). Η κατάσταση 4 είναι μια κρίσιμη φάση που απαιτεί άμεση συντήρηση (κρίσιμη υποβάθμιση). Η κατάσταση 5 σημαίνει ότι υπάρχει βλάβη και χρειάζεται άμεση συντήρηση διόρθωσης. Εάν δεν πραγματοποιηθεί προληπτική συντήρηση, η τεχνική κατάσταση του εξαρτήματος μπορεί να περάσει διαδοχικά από τις τέσσερις καταστάσεις μέχρι να συμβεί βλάβη, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Αυτές οι πέντε καταστάσεις αντιπροσωπεύουν τον ποσοτικό προσδιορισμό της ποιότητας της συνιστώσας.

Ο Πίνακας 1 παρέχει μια συνοπτική περιγραφή των πέντε καταστάσεων, περιλαμβάνοντας τις πιθανές ενέργειες συντήρησης που απαιτούνται. Αυτές οι πέντε καταστάσεις μπορούν να συσχετιστούν σαν έναν φωτεινό σηματοδότη τριών καταστάσεων:

1. Οι συνθήκες 1 και 2 είναι οι «πράσινες» ζώνες, υποδηλώνοντας ότι η κατάσταση είναι καλή και δεν απαιτεί άμεση παρέμβαση.
2. Η κατάσταση 3 αντιστοιχεί στην «κίτρινη» ζώνη, υποδηλώνοντας ότι υπάρχει ανάγκη για προληπτική συντήρηση στο μέλλον.
3. Οι καταστάσεις 4 και 5 αντιπροσωπεύουν τις «κόκκινες» ζώνες, υποδηλώνοντας κρίσιμη υποβάθμιση που απαιτεί άμεση παρέμβαση [68].

3.5.1 Αισθητήρες κατάστασης (Condition sensors):

Το σύνολο των αισθητήρων που είδαμε στις προηγούμενες ενότητες είναι μέρος των συστημάτων παρακολούθησης κατάστασης. Αυτοί οι αισθητήρες παρακολουθούν διάφορες παραμέτρους όπως πίεση, δόνηση, μέτρηση περιστροφής, υγρασία, ιξώδες λαδιού κλπ. Αυτές οι μετρήσεις παρέχουν όλες μαζί πληροφορίες που βοηθούν να δούμε ανά εξάρτημα πως επηρεάζεται το σύστημα μίας ανεμογεννήτριας προκειμένου να υπάρξει ακριβής εκτίμηση για την κατάσταση και την απόδοση του εξοπλισμού. Οι ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος άνω του 1 MW είναι εξοπλισμένες με online σύστημα παρακολούθησης κατάστασης για συνεχή παρακολούθηση των παραπάνω παραμέτρων σε καθορισμένες θέσεις των ανεμογεννητριών. Αυτό το σύστημα παρακολούθησης κατάστασης στο κιβώτιο ταχυτήτων είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την παρακολούθηση των μετρήσεων και την διασφάλιση καλής λειτουργίας των ανεμογεννητριών.

Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες, ιδιαίτερα σε αιολικά πάρκα με πολλές ανεμογεννήτριες, το σύστημα παρακολούθησης κατάστασης ενσωματώνεται στο σύστημα που συλλέγει δεδομένα, για να δημιουργήσει ένα ολοκληρωμένο σύστημα εποπτείας και ελέγχου. Αυτό επιτρέπει τη σύνδεση μεταξύ των διαφόρων ανεμογεννητριών και την ανάλυση των δεδομένων για τη σύγκριση αποτελεσμάτων. Με την εγκατάσταση διαφορετικών τύπων αισθητήρων όπως μετρητές τάσης, επιταχυνσιόμετρα, αισθητήρες δύναμης και θέσης, ανεμόμετρα και άλλες μέτρησης ηλεκτρικών παραμέτρων, υπάρχουν πολλά σημεία δεδομένων που αποθηκεύονται στο σύστημα συλλογής δεδομένων. Αυτά τα σήματα στη συνέχεια ενισχύονται και δειγματίζονται με προκαθορισμένο ρυθμό χρόνου και το σήμα μετατρέπεται στη συνέχεια σε ψηφιακά δεδομένα. Τέλος, αυτή η ψηφιακή πληροφορία μεταφέρεται ως σειριακή ροή δεδομένων χρησιμοποιώντας παλμικό κώδικα τεχνικής διαμόρφωσης των δεδομένων που επιτρέπει τη συμβατότητα και τη μεταφορά τους μέσω ενός συγκεκριμένου επικοινωνιακού καναλιού (PCM) [69].

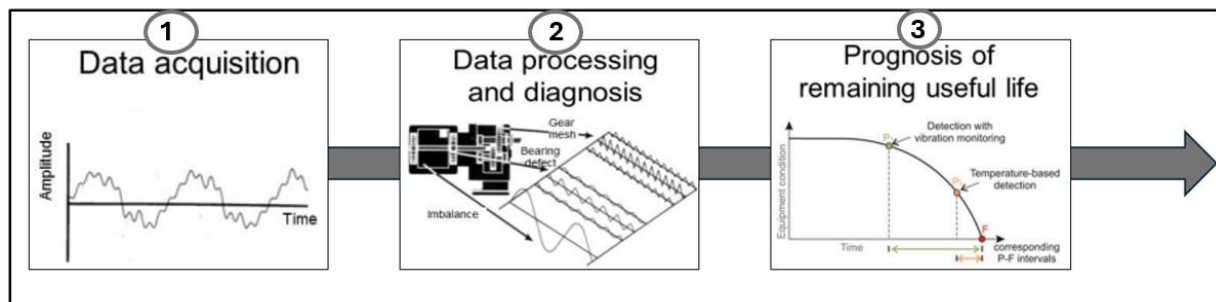
3.5.2 Μονάδες επεξεργασίας δεδομένων (Data processing units):

Οι μονάδες επεξεργασίας δεδομένων λαμβάνουν πληροφορίες από τους αισθητήρες και τις επεξεργάζονται για να δημιουργήσουν πληροφορίες σχετικά με

την κατάσταση του εξοπλισμού. Συνήθως, ο μορφοτροπέας συλλέγει σήματα από διάφορα σημεία της ανεμογεννήτριας. Για συνεχή παρακολούθηση, αυτά τα σήματα στέλνονται στη συνέχεια στη δυναμική μονάδα σάρωσης [DMS (Dynamic Monitoring System)]. Το DMS δρα ως διακομιστής για τη συλλογή δεδομένων, τα οποία μεταφέρονται για επεξεργασία ή αποθήκευση σε άλλους υπολογιστές ή συστήματα ελέγχου. Αφού τα δεδομένα παραληφθούν από τη μονάδα DMS, μεταφέρονται μέσω του δικτύου SCADA προς τον κεντρικό διακομιστή. Εκεί, τα δεδομένα υποβάλλονται σε επεξεργασία, αποθηκεύονται και αναλύονται.

Το SCADA ή αλλιώς Supervisory Control And Data Acquisition είναι ένα σύστημα που ελέγχει, παρακολουθεί και επιτρέπει την επικοινωνία με τα διάφορα μηχανήματα και αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο. Στο τέλος ο υπολογιστής διακομιστής συνδέεται με το σύστημα ελέγχου για την αποστολή πληροφοριών σχετικά με τη ροπή, το κιβώτιο ταχυτήτων, τους κραδασμούς, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τη γεννήτρια, τη γωνία πτέρυγας, τη θέση εκτροπής, την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου [70]. Υπάρχει επίσης και το CMS (Content Management System), το οποίο σημαίνει Σύστημα Διαχείρισης Περιεχομένου. Το CMS είναι ένα λογισμικό ή μια ομάδα προγραμμάτων που επιτρέπουν τη δημιουργία και τη διαχείριση ψηφιακού περιεχομένου. Οι πλατφόρμες CMS προσφέρουν μια εύχρηστη διασύνδεση που βοηθά άτομα ή ομάδες ατόμων να δημοσιεύουν, να επεξεργάζονται και να οργανώνουν περιεχόμενο σε ιστότοπους χωρίς να χρειάζεται προηγούμενη τεχνική εξειδίκευση. Το περιεχόμενο μπορεί να περιλαμβάνει κείμενο, εικόνες, βίντεο, έγγραφα και άλλα είδη πολυμέσων.

Σύμφωνα με έρευνα που αναφέρεται στη διάγνωση μηχανημάτων και την προγνωστική συντήρηση βάσει κατάστασης [71], η χρήση του CMS μπορεί να περιγραφεί ως μια διαδικασία με τρία στάδια (βλέπε εικόνα 3-21).



Εικόνα 3-20: Στάδια CMS, Πηγή: [72].

Η διαδικασία των τριών βημάτων χρήσης δεδομένων CMS για συντήρηση βάσει κατάστασης έχει ως εξής:

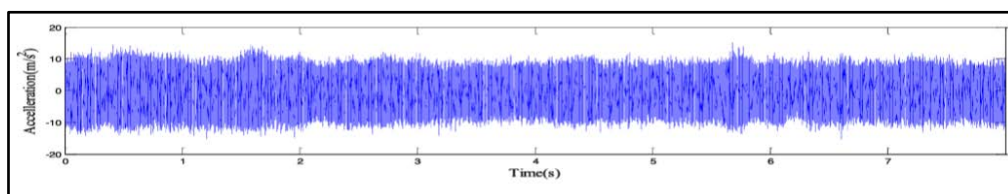
1. Data acquisition: Η απόκτηση δεδομένων καλύπτει τη συλλογή και αποθήκευση πρωτογενών δεδομένων.
2. Data processing and diagnosis: Η επεξεργασία δεδομένων είναι απαραίτητη για τη χρήση του μεγάλου όγκου δεδομένων που συλλέγονται με αυτόν τον τρόπο. Εξάγει αποτελέσματα από τα ανεπεξέργαστα δεδομένα, τα οποία είναι κατάλληλοι δείκτες για την κατάσταση του παρακολουθούμενου στοιχείου. Απαιτείται ένα διαγνωστικό βήμα προκειμένου να συσχετιστούν οι παρατηρήσεις στα δεδομένα με ορισμένα χαρακτηριστικά και τα σφάλματά τους. Αυτό το βήμα καλύπτει την ανάλυση και ερμηνεία των δεδομένων, με στόχο να ανιχνεύσει εάν αναπτύσσεται μια οποιοδήποτε δυσλειτουργία /ρήγμα ώστε να μας δείξει πού βρίσκεται και το πότε συνέβη.
3. Prognosis of remaining useful life: Η πρόγνωση της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής (ή πρόγνωση υπόλοιπης ζωής) είναι ένα σημαντικό βήμα για

την αξιοποίηση των δεδομένων CMS τον προγραμματισμό και τη βελτιστοποίηση της συντήρησης. Έτσι στο τελευταίο βήμα ο κύριος στόχος είναι η εκτίμηση του πόσο σύντομα και πόσο πιθανό θα συμβεί η αστοχία.

3.5.3 Συστήματα διάγνωσης (Diagnostic systems):

Τα συστήματα διάγνωσης αναλύουν τα δεδομένα από τους αισθητήρες και τα συγκρίνουν με πρότυπα και κανόνες για να ανιχνεύσουν ενδεχόμενες ανωμαλίες ή προβλήματα. Η παρούσα τεχνολογία λειτουργίας και συντήρησης των ανεμογεννητριών, ειδικά η τεχνολογία διάγνωσης βλαβών, δεν μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά την ταχεία ανάπτυξη της βιομηχανίας αιολικών πάρκων λόγω των ακόλουθων τριών παραγόντων [73].

1. Η μηχανική διάγνωση βλαβών πρέπει να παρακολουθείται και η κατάσταση λειτουργίας των μονάδων ανεμογεννητριών πρέπει να αναλύεται και να επεξεργάζεται τα δεδομένα λειτουργίας. Με βάση την ορθή αξιολόγηση της κατάστασης λειτουργίας των εξαρτημάτων, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της επεξεργασίας δεδομένων, πρέπει να εντοπίζονται οι κρυμμένοι κίνδυνοι των εξαρτημάτων και να υφίσταται σωστή τροποποίηση των σφάλματων των εξαρτημάτων. Ως αποτέλεσμα, οι ανεμογεννήτριες απαιτούν μεγάλο χρόνο διακοπής λειτουργίας, γεγονός που μειώνει τον χρόνο παραγωγής τους,
2. Λόγω των ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στο περιβάλλον λειτουργίας των ανεμογεννητριών και των σοβαρών δονήσεων σύζευξης μεταξύ των διαφόρων εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών, τα χαρακτηριστικά μηχανικής βλάβης δεν είναι προφανή στην ίδια ανάλυση συχνότητας. Έτσι, είναι δύσκολο να διαγνωστούν άμεσα οι βλάβες των ανεμογεννητριών (εικόνα 3-22).



Εικόνα 3-21: Διάγραμμα φάσματος αρχικού σήματος και γρήγορου μετασχηματισμού Fourier, Πηγή: [75].

3. Η διάγνωση βλαβών των ανεμογεννητριών γίνεται κυρίως με χειροκίνητο τρόπο, ο οποίος ωστόσο είναι ανεπαρκής και δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης αιολικών πάρκων. Οι ανεμογεννήτριες είναι σύνθετα συστήματα που περιλαμβάνουν διάφορους επιστημονικούς τομείς όπως η αεροδυναμική, η υλικοτεχνική, η μηχανολογία, τα ηλεκτρονικά ισχύος, η τεχνολογία αυτόματου ελέγχου και η πληροφορική.

Η τεχνολογική πρόοδος και η διαθεσιμότητα εργατικού δυναμικού μπορούν να προσφέρουν λύσεις για τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι ανεμογεννήτριες. Η ύπαρξη εξειδικευμένου προσωπικού με διαφορετικά επίπεδα τεχνικής εμπειρίας μπορεί να βοηθήσει στην γρήγορη διάγνωση βλαβών, επιλύοντας έτσι το πρώτο πρόβλημα. Για την αντιμετώπιση του δεύτερου προβλήματος, η χρήση εφαρμοσμένων μαθηματικών αποτελεί αποτελεσματικό εργαλείο. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών, όπως η περιορισμένη ικανότητα αποθήκευσης δεδομένων και ενέργειας, ο μεγάλος αριθμός μονάδων και η ευρεία γεωγραφική διασπορά, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μιας γρήγορης και αποτελεσματικής τεχνολογίας διάγνωσης βλαβών. Αυτό θα συμβάλει στη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την παρακολούθηση και ανάλυση δεδομένων και θα ελαχιστοποιήσει τον χρόνο διακοπής λειτουργίας. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3-22, η γρήγορη μετατροπή Fourier (FFT) μπορεί να μετατρέψει άμεσα το σήμα σε κυματομορφή συχνότητας. Ωστόσο, η παρακολούθηση της συχνότητας βλάβης του ρουλεμάν πάνω από 100 Hz και η παρακολούθηση των χαρακτηριστικών των δονήσεων εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (0-1 Hz) στην καμπύνα του ανεμιστήρα είναι απαραίτητη. Είναι δύσκολο να εξετάσουμε αυτά τα χαρακτηριστικά συχνότητας από το διάγραμμα φάσματος.

3.5.4 Συστήματα παρακολούθησης προγραμματιζόμενης συντήρησης (Programmable maintenance monitoring systems):

Τα Συστήματα Παρακολούθησης Προγραμματιζόμενης Συντήρησης χρησιμοποιούν τα δεδομένα κατάστασης για να προβλέψουν τις ανάγκες συντήρησης και να προγραμματίζουν εργασίες συντήρησης προληπτικά, προλαμβάνοντας την πιθανή πρόκληση προβλημάτων. Η πρόβλεψη πιθανών κινδύνων για τις ανεμογεννήτριες ξεκινά από το στάδιο της κατασκευής, όπου οι ανεμογεννήτριες είναι

εξοπλισμένες με αισθητήρες που μπορούν να ανιχνεύσουν μικρές ζημιές σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να ληφθούν μέτρα που εμποδίζουν την ανεμογεννήτρια να υποστεί περαιτέρω ζημιά. Ο εντοπισμός και η αποκατάσταση ζημιών αποτελούν μια ευκαιρία να παραταθεί η διάρκεια ζωής και να εξοικονομηθούν χρήματα.

Κλασικό παράδειγμα αποτελούν οι ζημιές στην ανεμογεννήτρια, οι οποίες συμβαίνουν συχνά, γεγονός που επιτρέπει στους ερευνητές και στους κατασκευαστές να προγραμματίζουν τη συντήρηση σε κατάλληλες χρονικές στιγμές. Υπάρχουν διάφορες εταιρίες που μπορούν να προσφέρουν εξαιρετικά ευαίσθητους αισθητήρες, οι οποίοι εισέρχονται σε ένα σύστημα καταγραφής που ελέγχει διάφορους παραμέτρους και προγραμματίζει τις κατάλληλες χρονικές στιγμές για την συντήρηση. Μερικοί παράγοντες είναι εξαιρετικά κρίσιμοι για τη λειτουργικότητά τους, όπως:

- κακή ευθυγράμμιση του δακτυλίου ζεύξης
- μετρήσεις κενού στο απλό ρουλεμάν
- παρακολούθηση θερμοκρασίας της γεννήτριας
- παρακολούθηση διακένου αέρα στη γεννήτρια

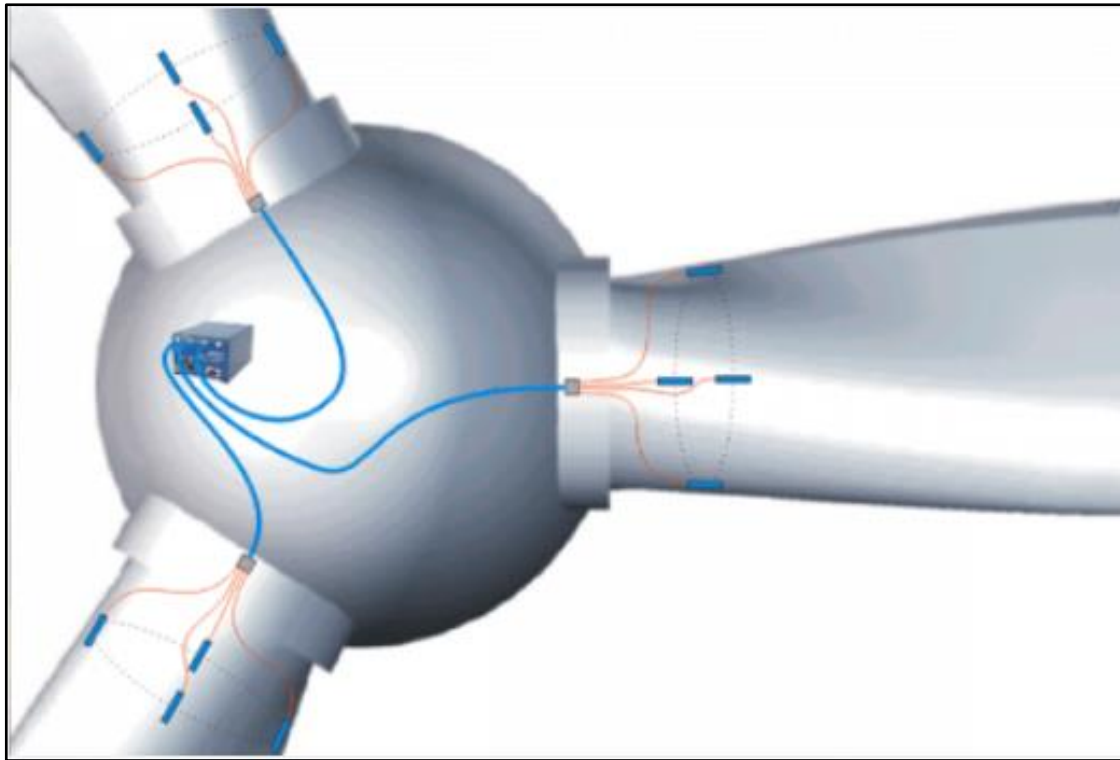
3.6 Συστήματα ελέγχου καινοτομιών (Innovation control systems):

3.6.1 Αισθητήρες νέας γενιάς (Next-generation sensors):

Οι αισθητήρες νέας γενιάς, για να μετρήσουν και να μεταδώσουν δεδομένα με μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία, χρησιμοποιούν τελευταίες τεχνολογίες, όπως αισθητήρες MEMS (MicroElectromechanical Systems) ή αισθητήρες Fiber Optic. Η τεχνολογία MEMS επιτρέπει την κατασκευή πολύ μικρών αισθητήρων που ενσωματώνονται απευθείας στα συστήματα ανεμογεννητριών. Μπορούν να μετρούν διάφορες παραμέτρους, όπως την ταχύτητα του ανέμου, την πίεση, τη θερμοκρασία, και τις δονήσεις, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

Οι αισθητήρες MEMS λειτουργούν με βάση διάφορες αρχές, όπως πιεζοαντίσταση, θερμοηλεκτρική αρχή, συντονισμός συχνοτήτων και μαγνητοαυτεπαγωγική αρχή για να μετατρέπουν τις μηχανικές μεταβολές σε ηλεκτρικά σήματα. Αυτά τα σήματα μπορούν στη συνέχεια να αναλυθούν για να παρέχουν πληροφορίες για την κατάσταση και την απόδοση της ανεμογεννήτριας. Τα δεδομένα που συλλέγονται, βοηθούν στη βελτιστοποίηση των λειτουργιών των ανεμογεννητριών και μπορούν να σηματοδοτήσουν τις ανάγκες συντήρησης προτού οδηγήσουν σε δαπανηρές επισκευές ή χρόνο διακοπής λειτουργίας [75].

Οι αισθητήρες οπτικών ινών ενισχύουν περαιτέρω τις δυνατότητες των συστημάτων ελέγχου ανεμογεννητριών, προσφέροντας εξαιρετικά ευαίσθητη παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας και των περιβαλλοντικών παραγόντων. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν την καταπόνηση και την πίεση στα πτερύγια των ανεμογεννητριών, καθώς και αλλαγές στην ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου. Παρέχοντας ακριβή και έγκαιρα δεδομένα σχετικά με αυτές τις μεταβλητές, οι αισθητήρες οπτικών ινών βοηθούν να διασφαλιστεί ότι οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν εντός ασφαλών ορίων και διατηρούν τη βέλτιστη απόδοση.



Εικόνα 3-22: Αισθητήρες Οπτικών Ινών ενσωματωμένοι στα πτερύγια, Πηγή: [76].

3.6.2 Τεχνητή νοημοσύνη και Μηχανική μάθηση (Artificial intelligence and Machine learning):

Η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση ενσωματώνονται στα συστήματα ελέγχου των ανεμογεννητριών για την ανάλυση πολύπλοκων καταστάσεων και τη λήψη αποφάσεων βασισμένων σε δεδομένα. Η τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπει στα υπολογιστικά συστήματα να προσομοιώνουν την ανθρώπινη νοημοσύνη, εκτελώντας εργασίες που απαιτούν επίλυση προβλημάτων, λήψη αποφάσεων και αναγνώριση προτύπων. Στις ανεμογεννήτριες, χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου, καθώς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες [77].

Η μηχανική μάθηση, ένας υποτομέας της τεχνητής νοημοσύνης, βασίζεται σε αλγόριθμους που μαθαίνουν από δεδομένα και προβλέπουν τάσεις ή συμπεριφορές. Για τις ανεμογεννήτριες, αυτό σημαίνει ότι μπορεί να προβλέψει την παραγωγή ενέργειας βασισμένη σε ιστορικά δεδομένα και μετεωρολογικές προβλέψεις. Επιπλέον, αναλύει δεδομένα από αισθητήρες για την ανίχνευση λειτουργικών ανωμαλιών, επιτρέποντας έγκαιρες παρεμβάσεις συντήρησης ή επισκευής..

Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης επεκτείνεται και στην προληπτική συντήρηση των ανεμογεννητριών. Η ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και η πρόβλεψη πιθανών προβλημάτων πριν εμφανιστούν είναι καίρια για τη διατήρηση της αδιάλειπτης λειτουργίας. Δεδομένα από αισθητήρες και συστήματα παρακολούθησης αξιοποιούνται μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για την ανίχνευση ανωμαλιών και την πρόβλεψη βλαβών. Έτσι, η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση συμβάλλουν στην ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων παρακολούθησης και προληπτικής συντήρησης.

Τα Συστήματα Παρακολούθησης Προληπτικής Συντήρησης χρησιμοποιούν τεχνικές συλλογής δεδομένων, ανάλυσης και μηχανικής μάθησης για να προβλέψουν πότε απαιτείται συντήρηση πριν προκύψει βλάβη. Επιπλέον, αξιοποιούν πληροφορίες και προηγμένες αναλύσεις για τη βελτίωση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού και τη μεγιστοποίηση της λειτουργικής απόδοσης.

Ο τρόπος λειτουργίας βάση των βημάτων που εκτελούνται φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3-3: Τρόπος λειτουργίας βάση των βημάτων που εκτελούνται, Πηγή: [78].

Βήματα	Επεξήγηση
1. Συλλογή δεδομένων	Δεδομένα συλλέγονται από διάφορες πηγές, όπως αισθητήρες, συσκευές IoT, και συστήματα SCADA. Αυτές οι πηγές παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις συνθήκες λειτουργίας, την απόδοση και την κατάσταση υγείας του εξοπλισμού.
2. Ανάλυση δεδομένων	Έπειτα τα δεδομένα αναλύονται με χρήση προηγμένων εργαλείων ανάλυσης για τον εντοπισμό μοτίβων, τάσεων και ανωμαλιών που μπορεί να υποδεικνύουν πιθανά προβλήματα ή αποτυχίες. Συχνά χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης για την επεξεργασία μεγάλων όγκων δεδομένων και την πρόβλεψη βάσει ιστορικών μοτίβων.
3. Παρακολούθηση κατάστασης	Με τη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης κρίσιμων εξαρτημάτων όπως ρουλεμάν, γρανάζια και κινητήρες, τα συστήματα προληπτικής συντήρησης μπορούν να ανιχνεύσουν πρώιμα σημάδια υποβάθμισης ή ανωμαλιών. Αυτή η προληπτική προσέγγιση επιτρέπει στις ομάδες συντήρησης να παρεμβαίνουν πριν συμβεί βλάβη.
4. Προγνωστικά μοντέλα	Τα συστήματα προληπτικής συντήρησης αναπτύσσουν μοντέλα βασισμένα σε ιστορικά δεδομένα και αλγόριθμους μηχανικής μάθησης για να προβλέψουν πότε πρέπει να εκτελεστούν εργασίες συντήρησης. Αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η χρήση εξοπλισμού, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και οι μετρήσεις απόδοσης για την πρόβλεψη της υπόλοιπης ωφέλιμης ζωής των εξαρτημάτων.
5. Ειδοποιήσεις συντήρησης	Όταν το σύστημα προληπτικής συντήρησης εντοπίσει ένα πιθανό πρόβλημα ή προβλέψει ότι απαιτείται συντήρηση, δημιουργεί ειδοποιήσεις. Αυτές παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες και συστάσεις για προληπτικές ενέργειες για την αποφυγή μη προγραμματισμένων διακοπών λειτουργίας.
6. Συνεχής βελτίωση	Χάρη στην συνεχόμενη μάθηση από νέα δεδομένα και ανατροφοδότηση γίνεται βελτίωση των μοντέλων πρόβλεψης και τα συστήματα γίνονται πιο αποτελεσματικά στη βελτιστοποίηση των χρονοδιαγραμμάτων συντήρησης και στη μείωση του λειτουργικού κόστους.

3.6.3 Ευέλικτη αρχιτεκτονική συστήματος (Flexible system architecture):

Η Ευέλικτη Αρχιτεκτονική Συστήματος επιτρέπει την εύκολη προσθήκη ή αφαίρεση λειτουργιών και τμημάτων, καθώς και την αναβάθμιση του συστήματος χωρίς σημαντικές αλλαγές στον κώδικα ή την υλική υποδομή. Η ευέλικτη αρχιτεκτονική συστημάτων στις ανεμογεννήτριες περιλαμβάνει το σχεδιασμό και την κατασκευή προσαρμοσμένων και κλιμακούμενων συστημάτων που ανταποκρίνονται σε διαφορετικές λειτουργικές ανάγκες και μεταβαλλόμενες συνθήκες. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στις ανεμογεννήτριες να λειτουργούν πιο αποδοτικά και αξιόπιστα σε ποικίλα περιβάλλοντα, διευκολύνοντας την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και χαρακτηριστικών με την πάροδο του χρόνου.

Ένα βασικό στοιχείο της ευέλικτης αρχιτεκτονικής είναι η αρθρωτή δομή, η οποία επιτρέπει εύκολη προσαρμογή και αναβαθμίσεις. Χωρίζοντας το σύστημα των ανεμογεννητριών σε μικρότερα, εναλλάξιμα μέρη, οι κατασκευαστές και οι διαχειριστές μπορούν να προσαρμόζουν κάθε ανεμογεννήτρια στις συγκεκριμένες συνθήκες της τοποθεσίας, όπως η ταχύτητα του ανέμου, οι αναταράξεις και η τοπογραφία. Αυτή η δομή απλοποιεί επίσης τη συντήρηση και την επισκευή, καθώς τα μεμονωμένα μέρη μπορούν να αντικατασταθούν ή να αναβαθμιστούν χωρίς να επηρεαστεί το σύνολο του συστήματος. Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό της ευέλικτης αρχιτεκτονικής είναι η διαλειτουργικότητα. Αυτή επιτρέπει τη συνεχή επικοινωνία και συνεργασία μεταξύ διαφορετικών εξαρτημάτων και υποσυστημάτων των ανεμογεννητριών, έτσι ώστε να εφαρμόζονται προηγμένες στρατηγικές ελέγχου και αναλύσεις δεδομένων. Η ενσωμάτωση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από τους αισθητήρες με προγνωστικούς αλγόριθμους συντήρησης βοηθά στον εντοπισμό προβλημάτων πριν γίνουν σοβαρά, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση και διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας.

Επιπλέον, επεκτείνεται στο ευρύτερο ενεργειακό δίκτυο, βοηθώντας τις ανεμογεννήτριες να συνεργάζονται με άλλες πηγές ενέργειας και να συμβάλλουν σε ένα πιο ανθεκτικό και αποδοτικό ενεργειακό σύστημα [79].

3.6.4 Σύνδεση και δικτύωση (Connectivity and networking):

Αυτή η λειτουργία δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα ελέγχου να συνδέεται με άλλες συσκευές, πλατφόρμες ή δίκτυα. Έτσι, μπορεί να ανταλλάσσει δεδομένα, να λαμβάνει ενημερώσεις και να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο.

Η αποτελεσματική λειτουργία, παρακολούθηση και συντήρηση των ανεμογεννητριών απαιτεί ισχυρά δίκτυα επικοινωνίας. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας LTE και 5G προσφέρουν την απαραίτητη κάλυψη, αξιοπιστία και εμβέλεια, μαζί με χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή απόδοση. Επίσης, διευκολύνουν την παρακολούθηση, τον έλεγχο και την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των εργαζομένων εντός και εκτός των εγκαταστάσεων. Επιπλέον, συμβάλλουν στη συνολική ασφάλεια και παραγωγικότητα των αιολικών πάρκων [80].

Τα αιολικά πάρκα εξαρτώνται από αισθητήρες και σημεία παρακολούθησης διασκορπισμένα σε ανεμογεννήτριες, οι οποίοι επικοινωνούν για την ανταλλαγή κρίσιμων δεδομένων περί απόδοσης, περιβαλλοντικών συνθηκών και αναγκών συντήρησης. Σύγχρονες λύσεις δικτύωσης είναι κρίσιμες για τη συνεχή ανταλλαγή δεδομένων. Με την ενίσχυση της συνδεσιμότητας και δικτύωσης, επιτυγχάνουμε τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας, βελτιώνουμε τη διαθεσιμότητα και ενισχύουμε τη συνολική απόδοση των ανεμογεννητριών σε πάρκα αιολικής ενέργειας [81].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Η συντήρηση είναι αρκετά σημαντική για τις ανεμογεννήτριες. διότι όταν χαλάσουν, συχνά προκαλούνται σοβαρές υλικές ζημιές και τραυματισμοί σε ανθρώπους. Υπάρχουν πολλά μηχανικά μέρη που αποτυγχάνουν με την πάροδο του χρόνου και καταλήγουν σε δυσλειτουργία ή και καταστροφή. Οι πιο συνηθισμένες αστοχίες συμβαίνουν σε ρουλεμάν, πτερύγια, κιβώτια ταχυτήτων και γεννήτριες. Επιπρόσθετα δίχως τη συντήρηση μειώνεται η μέση διάρκεια ζωής μιας ανεμογεννήτριας (η οποία υπολογίζεται σε 30 χρόνια). Συνεπώς οι έλεγχοι συντήρησης είναι απαραίτητοι για την αποφυγή δαπανηρών επισκευών αργότερα.

Μερικές συνήθειες εργασίες συντήρησης είναι [82]:

1. Έλεγχος :

- στα πτερύγια για ρωγμές και ζημιές: Οι πτέρυγες μπορούν να σπάσουν με την πάροδο του χρόνου λόγω έκθεσης στο ηλιακό φως, ακραίων θερμοκρασιών και διάβρωσης.
- στο κιβώτιο ταχυτήτων για φθορά: Τα κιβώτια ταχυτήτων μπορεί να αποτύχουν μετά από παρατεταμένη χρήση.
- ότι η γεννήτρια λειτουργεί σωστά: Οι γεννήτριες μπορούν να σταματήσουν να λειτουργούν λόγω μηχανικών προβλημάτων ή ηλεκτρικών προβλημάτων.
- στα ρουλεμάν για σημάδια φθοράς: Τα ρουλεμάν μπορεί να υποστούν ζημιά εάν δεν λιπαίνονται κατάλληλα.
- στην καλωδίωση για ζημιές: Η καλωδίωση μπορεί να βραχυκυκλώσει και να προκαλέσει πυρκαγιές.

2. Καθάρισμα

- στην άτρακτο: Οι νασέλες συλλέγουν σκόνη και αερόφερτα υλικά από τον αέρα, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει σοβαρούς κινδύνους για τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

3. Αλλαγή

- στο λιπαντικό: Το λιπαντικό βοηθά στην ομαλή λειτουργία των γραναζιών.

4.1 Οφέλη της συντήρησης

Στη συντήρηση ανεμογεννητριών, η χρήση υψηλής ποιότητας συγκολλητικών, στεγανωτικών και λιπαντικών κατά τη διάρκεια της κατασκευής διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ελαχιστοποίηση των δαπανηρών και χρονοβόρων εργασιών επισκευής. Αυτά τα προϊόντα προσφέρουν ευέλικτες λύσεις συγκόλλησης και επισκευής, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα και την απόδοση των εξαρτημάτων του ρότορα, μειώνοντας παράλληλα το βάρος και παρέχοντας αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες.

Τα οφέλη περιλαμβάνουν την παράταση της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων, τη βελτίωση της απόδοσης και την προστασία από ζημιές, από κραδασμούς, ενισχύοντας τελικά τη δομική ακεραιότητα της ανεμογεννήτριας. Επιπλέον, αυτά τα προϊόντα επιτρέπουν γρήγορη και ακριβή εφαρμογή, εξασφαλίζοντας αποτελεσματικές και απρόσκοπτες εργασίες συντήρησης για τους χειριστές ανεμογεννητριών και τις ομάδες συντήρησης [83].

Η συντήρηση των ανεμογεννητριών είναι μια κρίσιμη πτυχή απαραίτητη για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας, της ασφάλειας και της αποδοτικότητας των συστημάτων αιολικής ενέργειας. Οι υπηρεσίες τακτικής συντήρησης, όπως αυτές που προσφέρει η Norg Tech International [84], έχουν σχεδιαστεί για να αποτρέπουν δαπανηρές διακοπές λειτουργίας, να βελτιώνουν τα μέτρα ασφαλείας και να βελτιώνουν την παραγωγή ενέργειας. Με τη διεξαγωγή συντήρησης ρουτίνας, πιθανά ζητήματα μπορούν να εντοπιστούν και να αντιμετωπιστούν προτού κλιμακωθούν σε σημαντικά προβλήματα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εκτεταμένο χρόνο διακοπής λειτουργίας και μειωμένη παραγωγή ενέργειας.

Επιπλέον, η σωστή συντήρηση εξασφαλίζει ένα ασφαλές περιβάλλον εργασίας εντοπίζοντας και διορθώνοντας κινδύνους ασφαλείας, όπως φθαρμένα ρουλεμάν, κατεστραμμένες πτέρυγες ή φθαρμένα καλώδια. Αυτή η προληπτική προσέγγιση όχι μόνο προστατεύει τις επενδύσεις σε συστήματα αιολικής ενέργειας, αλλά μεγιστοποιεί επίσης τη λειτουργική διάρκεια ζωής τους και την ικανότητα

παραγωγής ενέργειας, βελτιστοποιώντας τελικά την απόδοση της επένδυσης και υποστηρίζοντας τους επιχειρηματικούς στόχους στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Ο τομέας της αιολικής ενέργειας αντιμετωπίζει προκλήσεις παρόμοιες με εκείνες που αντιμετωπίζονται σε άλλους βιομηχανικούς τομείς, ιδίως όσον αφορά την αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων. Ένα καλά συντηρημένο αιολικό πάρκο είναι απαραίτητο για τη διασφάλιση της βέλτιστης ενεργειακής απόδοσης και της παρατεταμένης λειτουργικότητας των ανεμογεννητριών. Τα αποτελεσματικά προγράμματα συντήρησης στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι οι ανεμογεννήτριες παραμένουν διαθέσιμες και λειτουργικές, μετριάζοντας τους κινδύνους που σχετίζονται με βλάβες εξοπλισμού και επακόλουθη απώλεια ενέργειας. Συνήθως, οι ανεμογεννήτριες έχουν διάρκεια ζωής 25 έως 30 έτη, κατά τη διάρκεια της οποίας οι φορείς εκμετάλλευσης πρέπει να εφαρμόσουν στρατηγικές συντήρησης για να διατηρήσουν τη λειτουργική αποδοτικότητα και διαθεσιμότητα.

Η διαχείριση της συντήρησης στις ανεμογεννήτριες περιλαμβάνει τόσο την προληπτική όσο και τη διορθωτική συντήρηση. Η προληπτική συντήρηση περιλαμβάνει τακτικούς συστηματικούς ελέγχους για τον προληπτικό εντοπισμό και την αποκατάσταση πιθανών προβλημάτων πριν προκαλέσουν βλάβες, ενώ η διορθωτική συντήρηση αντιμετωπίζει άμεσες επισκευές που απαιτούνται από δυσλειτουργίες ή βλάβες του εξοπλισμού. Ο βέλτιστος προγραμματισμός συντήρησης περιλαμβάνει την στρατηγική επιλογή τύπων συντήρησης προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένες ανάγκες εξοπλισμού, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη τεχνική καταλληλότητα. Ένα ολοκληρωμένο σχέδιο συντήρησης, όπως ορίζεται από το πρότυπο NF EN 13306 [85], ενσωματώνει διάφορες εργασίες όπως επιθεωρήσεις, καθαρισμό εξοπλισμού και αντικαταστάσεις εξαρτημάτων για τη διατήρηση της λειτουργικής αξιοπιστίας. Ωστόσο, ο δυναμικός χαρακτήρας των δραστηριοτήτων συντήρησης απαιτεί ευελιξία για την αντιμετώπιση απρόβλεπτων βλαβών και προκλήσεων κατανομής πόρων. Οι αποτελεσματικές στρατηγικές συντήρησης δίνουν τελικά προτεραιότητα στη παροχή ενέργειας, ελαχιστοποιούν το χρόνο διακοπής λειτουργίας και βελτιστοποιούν την απόδοση της παραγωγής για την επίτευξη μακροπρόθεσμης λειτουργικής επιτυχίας στα συστήματα αιολικής ενέργειας.

4.2 Είδη συντήρησης

Για να ελαχιστοποιήσουν το χρόνο διακοπής λειτουργίας και ως μέρος της κάλυψης εγγύησης, οι φορείς εκμετάλλευσης αιολικών πάρκων υιοθετούν τόσο προληπτική όσο και προγνωστική συντήρηση.

4.2.1 Προληπτική συντήρηση

Η προληπτική συντήρηση είναι προγραμματισμένη συντήρηση για την παράταση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού. Μπορεί να περιλαμβάνει ρυθμίσεις, καθαρισμό, λίπανση, επισκευές και αντικαταστάσεις. Η προληπτική συντήρηση στοχεύει στην αύξηση της αξιοπιστίας και στην παράταση της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών παρέχοντας κατάλληλη συντήρηση την κατάλληλη στιγμή. Αποτελείται από ετήσιες επιθεωρήσεις συστημάτων και αντικαταστάσεις εξαρτημάτων βάσει ειδικού προγράμματος συντήρησης ανεμογεννήτριας.

Οι εργασίες προληπτικής συντήρησης εκτελούνται με βάση το χρόνο ή το διάστημα για την αποφυγή καταστροφικής βλάβης του εξοπλισμού. Εδώ εκτελούνται εργασίες συντήρησης σε προγραμματισμένη και όχι απρογραμμάτιστη βάση ώστε να υπάρξει αποφυγή μελλοντικών προβλημάτων. Οι ακόλουθες υποκατηγορίες βασίζονται στον προγραμματισμό των ενεργειών:

- **Προληπτική συντήρηση περιόδου χάριτος**

Οποιαδήποτε εργασία πρέπει να ολοκληρωθεί μετά την αρχική ημερομηνία λήξης της αλλά πριν από την καθυστερημένη ημερομηνία για αυτήν, αναφέρεται ως περίοδος χάριτος στον χρονοδιάγραμμα της διαχείρισης έργου PM (Project Management). Συνήθως, αυτό το διάστημα αποτελεί το 25% επιπλέον του αρχικού χρονικού πλαισίου της εργασίας και προσφέρει ευελιξία για την ευθυγράμμιση με τις δραστηριότητες επίβλεψης, την ομαδοποίηση των λειτουργικών ομάδων εξοπλισμού (τα πτερύγια, τα κιβώτια ταχυτήτων και τις γεννήτριες), και τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων του σταθμού.

- **Αναβολή προληπτικής συντήρησης**

Η "αναβολή προληπτικής συντήρησης" αφορά στην κατάσταση όπου μια εργασία στο πλαίσιο της διαχείρισης έργων (PM) ολοκληρώνεται κάπως αργότερα από την αρχική προγραμματισμένη ημερομηνία της, αλλά πριν από την επιτρεπόμενη καθυστερημένη ημερομηνία. Αυτό γίνεται με εγκεκριμένη τεχνική αξιολόγηση, η οποία καθορίζει τη νέα ημερομηνία ολοκλήρωσης της εργασίας.

Για παράδειγμα, αν μια ανεμογεννήτρια έχει προγραμματισμένο να λάβει προληπτική συντήρηση για τη διατήρηση της λειτουργίας, αλλά η εργασία αυτή ολοκληρώνεται μερικές ώρες αργότερα από το προβλεπόμενο χρονικό πλαίσιο, μπορεί να αποφασιστεί η αναβολή της συντήρησης για την επόμενη διαθέσιμη ημερομηνία. Αυτό γίνεται με βάση την αξιολόγηση τεχνικών παραμέτρων και κριτηρίων, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι ο εξοπλισμός λειτουργεί αποτελεσματικά και αξιόπιστα, χωρίς να υποστεί καταστροφική βλάβη.

- **Καθυστερημένη προληπτική συντήρηση**

Μια εργασία PM που υπερβαίνει την καθυστερημένη ημερομηνία της (περίοδος χάριτος) χωρίς εγκεκριμένη παράταση ή αναβολή.

Στην εκτέλεση επιτόπιων εργασιών, το πρόγραμμα συντήρησης αποτελείται από:

1. Οπτική επιθεώρηση της γεννήτριας και του περιβάλλοντος λειτουργίας
2. Επιθεώρηση των συνδέσεων
3. Έλεγχος των μπουλονιών στερέωσης της γεννήτριας και της ευθυγράμμισης
4. Επιθεώρηση, δοκιμή και καθαρισμός του ρότορα
5. Παρακολούθηση της κατάστασης των ρουλεμάν και της λίπανσης
6. Καθαρισμός και έλεγχος της μόνωσης του προστατευτικού καλύμματος γύρω από το ρουλεμάν
7. Επιθεώρηση και καθαρισμός του συγκροτήματος δακτυλίου ολίσθησης

8. Καθαρισμός του συστήματος ψύξης
9. Επιθεώρηση ή/και δοκιμή των εξαρτημάτων
10. Απογραφή ανταλλακτικών γεννήτριας

Μόλις ολοκληρωθούν οι εργασίες συντήρησης και αναλυθούν πλήρως τα δεδομένα επιθεώρησης, θα πρέπει να παρέχεται λεπτομερής έκθεση για τις αλλαγές. Αυτό περιλαμβάνει συστάσεις για ενέργειες συντήρησης, πληροφορίες για ανταλλακτικά και ειδικά εργαλεία για μελλοντικές ενέργειες.

4.2.2 Προγνωστική συντήρηση

Η προγνωστική συντήρηση είναι πιο εξελιγμένη και χρησιμοποιεί αισθητήρες για την παρακολούθηση της κατάστασης των εξαρτημάτων. Οι έλεγχοι συντήρησης πραγματοποιούνται συνήθως μερικές φορές το χρόνο, με λογισμικό μηχανογραφημένου συστήματος διαχείρισης συντήρησης [CMMS (Computerized Maintenance Management System)] που χρησιμοποιείται για την καταγραφή του πότε κάθε ανεμογεννήτρια έχει συντηρηθεί. Ένα CMMS θα στέλνει επίσης αυτόματα ειδοποιήσεις όταν πρέπει να γίνει έλεγχος συντήρησης. Η προγνωστική συντήρηση για μια ανεμογεννήτρια χρησιμοποιεί αισθητήρες τοποθετημένους σε βασικά εξαρτήματα (κάποιοι από τους οποίους ειπώθηκαν προηγουμένως). Αυτοί στέλνουν πολύτιμα δεδομένα πίσω στην ομάδα συντήρησης για να ενημερώσουν για τα επίπεδα λίπανσης, τους κραδασμούς, τις θερμοκρασίες και άλλα. Οι δραστηριότητες συντήρησης ανεμογεννητριών είναι ευρείες, με τους τεχνικούς να εργάζονται μέσω εκτεταμένων λιστών ελέγχου. Γενικά, οι εργασίες που θα πραγματοποιηθούν θα περιλαμβάνουν [86]:

- Επιθεώρηση του ηλεκτρικού πίνακα, του κιβωτίου ταχυτήτων, των γεννητριών, του συστήματος εκτροπής και του φρένου
- Αξιολόγηση των πτερύγων και της κλίσης τους
- Εξέταση και σύσφιξη μπουλονιών
- Μέτρηση των επιπέδων λαδιού και λίπανσης, δειγματοληψία και, εάν είναι απαραίτητο, αντικατάσταση

- Ευθυγράμμιση του συστήματος μετάδοσης κίνησης
- Αξιολόγηση της ατράκτου
- Έλεγχος εξαερισμού, φίλτρων αέρα και αμορτισέρ
- Επισκευή ρωγμών και διάβρωσης
- Επιθεώρηση ρουλεμάν και συνδέσεων
- Ανάλυση κραδασμών για όλο τον περιστρεφόμενο εξοπλισμό
- Θερμογραφία για έρευνες θερμοκρασίας ηλεκτρικού εξοπλισμού, ανίχνευση διαρροών, υπερθέρμανση κ.λπ.
- Επιθεώρηση μπουλονιών ανεμογεννητριών

4.2.3 Περιοδική συντήρηση

Οι περιοδικές διαδικασίες συντήρησης διασφαλίζουν την ακεραιότητα και την αποτελεσματική λειτουργία του εξοπλισμού μέσω υπηρεσιών όπως λίπανση, αλλαγή φίλτρων, καθαρισμό, δοκιμές, ρυθμίσεις και επιθεωρήσεις. Επιπλέον, προλαμβάνουν πιθανές βλάβες και διασφαλίζουν τη συνεχή αξιοπιστία.

Οι τακτικές διαδικασίες συντήρησης εξασφαλίζουν την καθημερινή ακεραιότητα και λειτουργία, με στόχο τη διατήρηση της βέλτιστης απόδοσης και τη μείωση του κινδύνου απρόβλεπτων προβλημάτων. [55].

4.3 Παραδείγματα διαδικασιών συντήρησης:

Η συντήρηση χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες. Στην συντήρηση μηχανικών εξαρτημάτων, ηλεκτρικών εξαρτημάτων και στην επιφανειακή συντήρηση των πτερυγίων. Σε αυτές τις διαδικασίες, περιλαμβάνεται ο έλεγχος για σημάδια φθοράς, η λίπανση των κινούμενων μερών και ο εντοπισμός πιθανών προβλημάτων πριν κλιμακωθούν.

4.3.1 Μηχανικά εξαρτήματα

4.3.1.1 Επισκόπηση των μηχανισμών βλάβης κιβωτίου ταχυτήτων και γεννήτριας

Το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια μαζί αποτελούν τόσο το πιο δαπανηρό όσο και το λιγότερο αξιόπιστο σύστημα στις ανεμογεννήτριες. Οι γερμανικές ασφαλιστικές εταιρείες απαιτούν on-line παρακολούθηση αυτών των συστημάτων ή αλλιώς ολοκληρωτική ανακατασκευή μετά από πέντε χρόνια ή 40.000 ώρες λειτουργίας [87]. Το πιο σημαντικό ζήτημα στην αξιοπιστία του συστήματος μετάδοσης κίνησης είναι η φθορά των δοντιών και των ρουλεμάν του γραναζιού. Οι αιτίες αυτής της φθοράς περιλαμβάνουν τα εξής:

- Σωματίδια στο λάδι λόγω μόλυνσης του κατά τη συναρμολόγηση, διάβρωση και φθορά
- Διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ρότορα λόγω ανισορροπίας, διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου και άλλοι παράγοντες μπορεί να προκαλέσουν τριβή στα δόντια του γραναζιού, η οποία προκαλεί φθορά και προσθέτει σωματίδια.
- Συγκεντρώσεις φορτίων στα δόντια των γραναζιών, λόγω φθοράς ή μηχανικών διαταραχών της επιφάνειάς τους.
- Μηχανικές παρεμβολές ή άλλα κατασκευαστικά προβλήματα, όπως θερμική επεξεργασία ή φινίρισμα επιφανειών εκτός προδιαγραφών
- Απώλεια κυκλοφορίας λαδιού

4.3.1.2 Καθαρισμός στα κιβώτια ταχυτήτων και ρουλεμάν

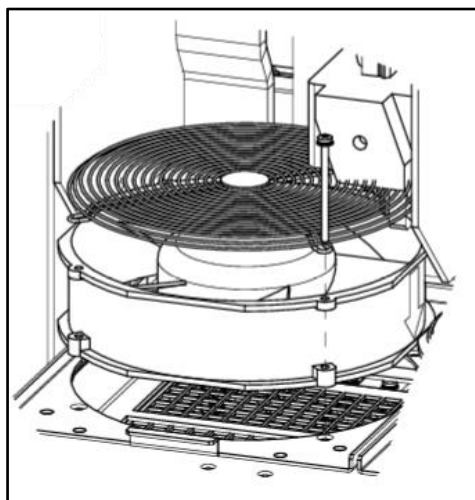
Καθώς τα κιβώτια ταχυτήτων έχουν γίνει μεγαλύτερα για εφαρμογές ανεμογεννητριών και τα επίπεδα πίεσης έχουν αυξηθεί (λόγω ανταγωνιστικών πιέσεων για μείωση του κόστους και βελτιωμένων εργαλείων μοντελοποίησης οδοντωτού πλέγματος γραναζιών), η καθαριότητα του αρχικού χάλυβα γραναζιών έχει γίνει

κρίσιμη. Ο κατασκευαστής μπορεί να παρέχει ειδικά όργανα για το κιβώτιο ταχυτήτων για την παρακολούθηση της κατάστασης ορισμένων παραμέτρων απόδοσης. Οι ακόλουθες παράμετροι απόδοσης μπορούν να παρακολουθούνται από το προσωπικό που τις ελέγχει σύμφωνα με τις οδηγίες που εξετάζονται στο παρόν τμήμα:

- Θερμοκρασία
- Πίεση λαδιού
- Θόρυβος και/ή κραδασμοί
- Ροή λαδιού

4.3.1.3 Ανεμιστήρες για ψύξη στον μετατροπέα

Η διάρκεια ζωής των ανεμιστήρων ψύξης του μετατροπέα εξαρτάται από το χρόνο λειτουργίας του ανεμιστήρα, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη συγκέντρωση σκόνης. Πολύ συχνά απαιτείται να γίνει αντικατάσταση του ανεμιστήρα ψύξης.



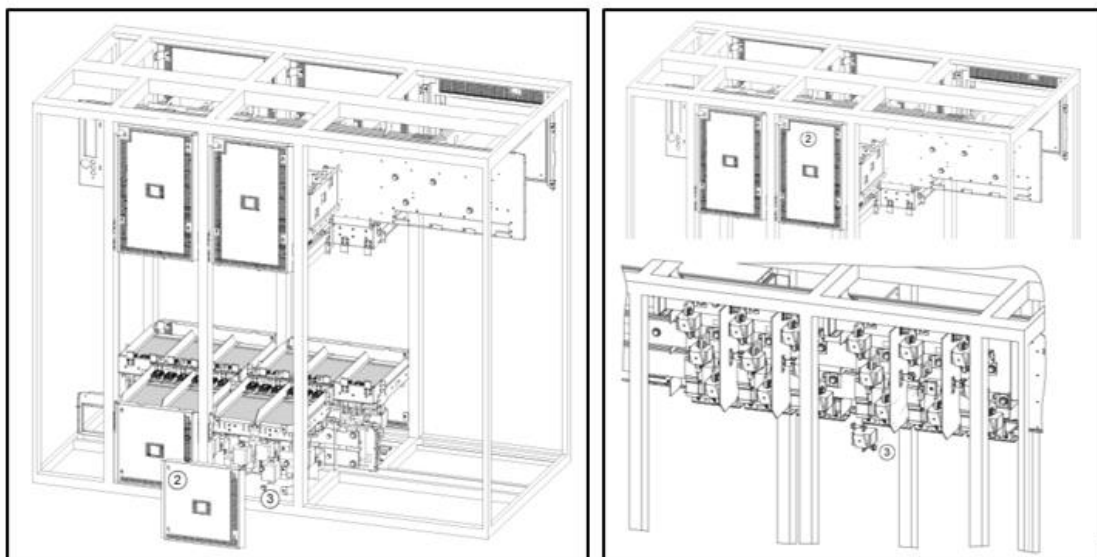
Εικόνα 4-1: Ανεμιστήρας για ψύξη στον μετατροπέα, Πηγή: [87].

4.3.2 Ηλεκτρικά Εξαρτήματα

4.3.2.1 Αντικατάσταση ασφαλειών.

Στο ηλεκτρικό σύστημα των ανεμογεννητριών, η αντικατάσταση ασφαλειών έχει μεγάλη σημασία. Αυτό περιλαμβάνει τόσο την αντικατάσταση ασφαλειών DC (Direct Current) όσο και ασφαλειών AC (Alternative Current). Οι ασφάλειες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προστασία των ηλεκτρικών εξαρτημάτων του συστήματος διακόπτοντας το κύκλωμα σε περίπτωση συνθηκών υπέρτασης [88].

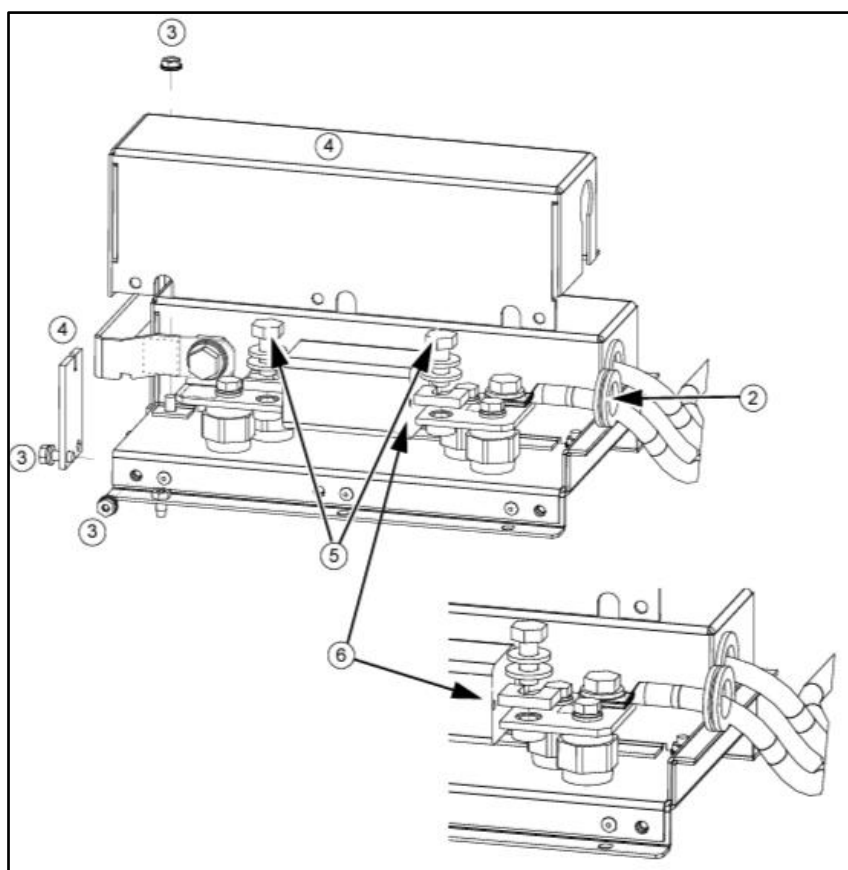
Με την πάροδο του χρόνου, οι ασφάλειες μπορεί να χαλάσουν λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως ηλεκτρικές υπερτάσεις ή φθορά που σχετίζεται με την ηλικία. Ως εκ τούτου, η τακτική επιθεώρηση και αντικατάσταση των ασφαλειών είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας του ηλεκτρικού συστήματος της ανεμογεννήτριας. Η μη έγκαιρη αντικατάσταση ελαττωματικών ασφαλειών μπορεί να οδηγήσει σε ηλεκτρικές δυσλειτουργίες, ζημιές στον εξοπλισμό ή ακόμα και κινδύνους για την ασφάλεια, υπογραμμίζοντας την κρίσιμη φύση αυτής της εργασίας συντήρησης για τη διατήρηση της ακεραιότητας και της απόδοσης του συστήματος ανεμογεννητριών.



Εικόνα 4-2: Αντικατάσταση των ασφαλειών DC αριστερά, ασφαλειών AC δεξιά, Πηγή: [89].

4.3.2.2 Αντικατάσταση προστατευτικών ασφαλειών υπερτάσεων

Οι προστατευτικές ασφάλειες υπερτάσεων βρίσκονται στο κάτω μέρος του θαλάμου μετατροπέα στην πλευρά του πλέγματος. Η αντικατάσταση αυτών των ασφαλειών είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας των ηλεκτρικών εξαρτημάτων. Αυτές οι ασφάλειες χρησιμεύουν για την προστασία του μετατροπέα και του σχετικού ηλεκτρικού εξοπλισμού από συνθήκες υπέρτασης για πιθανές ζημιές. Η μη αντικατάσταση αυτών των ασφαλειών ανάλογα με τις ανάγκες μπορεί να οδηγήσει σε διακοπές στη διαδικασία μετατροπής ισχύος και μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τη συνολική απόδοση και αξιοπιστία του συστήματος. Ως εκ τούτου, η τακτική επιθεώρηση και η έγκαιρη αντικατάσταση των ασφαλειών είναι απαραίτητες εργασίες συντήρησης για τη διατήρηση της ακεραιότητας και της αποτελεσματικότητας των ηλεκτρικών εξαρτημάτων στο σύστημα ανεμογεννητριών.



Εικόνα 4-3: ασφάλειες φίλτρου σύσφιξης, Πηγή: [89].

4.3.3 Επιφανειακή συντήρηση στα πτερύγια

Η επιφανειακή συντήρηση των πτερυγίων των ανεμογεννητριών είναι συχνά ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης και της μακροζωίας. Η τακτική συντήρηση και επισκευή των επιφανειών των πτερυγίων του ρότορα μπορεί να βοηθήσει στη διασφάλιση της βέλτιστης λειτουργίας τους, αυξάνοντας ενδεχομένως τη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοσή της.

Όταν ένα εξάρτημα αποτύχει, μπορεί να οδηγήσει σε απροσδόκητο χρόνο διακοπής λειτουργίας και να δημιουργήσει κινδύνους για τον χειριστή της ανεμογεννήτριας. Η ζημιά στην κατεστραμμένη επιφάνεια των πτερυγίων του ρότορα επιδεινώνεται όσο περισσότερο χρόνο μένει χωρίς επισκευή, με αποτέλεσμα την εξέλιξη της βλάβης. Αυτό που θα μπορούσε να ήταν μια διαχειρίσιμη επισκευή, μετατρέπεται σε ένα πιο περίπλοκο ζήτημα, που απαιτεί εξειδικευμένη και δαπανηρή υποστήριξη. Η κατάσταση αυτή όχι μόνο μειώνει τη βραχυπρόθεσμη αποτελεσματικότητα του πτερυγίου του ρότορα, αλλά μπορεί επίσης να επηρεάσει τη μακροπρόθεσμη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας.

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών εκτίθενται συνεχώς σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες, καθιστώντας την τακτική συντήρηση της επιφάνειας ζωτικής σημασίας για τη βέλτιστη απόδοση και ανθεκτικότητα. Επιπρόσθετα, η συνεχής έκθεση των πτερυγίων των ανεμογεννητριών στο ηλιακό φως, τη βροχή, το χαλάζι, τις ακραίες θερμοκρασίες και τους κεραυνούς μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση, ρωγμές και αποκόλληση προστατευτικών επικαλύψεων.

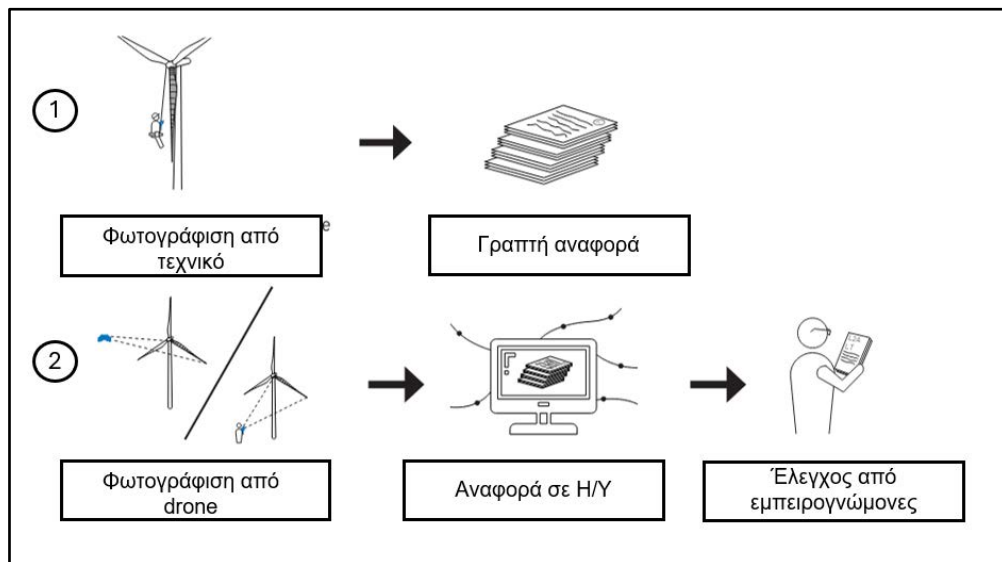
Έτσι, η τακτική συντήρηση βοηθά στον εντοπισμό και την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων προτού προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα. Οι εργασίες συντήρησης επιφανειών περιλαμβάνουν συνήθως καθαρισμό των πτερυγίων για την απομάκρυνση βρωμιάς, υπολειμμάτων και συσσώρευσης αλατιού.

Οι τεχνικοί επιθεωρούν τα πτερύγια για έλεγχο ζημιών και εφαρμόζουν προστατευτικές επικαλύψεις για την πρόληψη της διάβρωσης. Σε ορισμένες περιπτώ-

σεις, μπορεί να χρειαστούν επισκευές για την επιδιόρθωση ρωγμών ή άλλων ζημιών. Η σωστή συντήρηση της επιφάνειας επεκτείνει σημαντικά τη διάρκεια ζωής των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, μειώνει το χρόνο διακοπής λειτουργίας για επισκευές και βελτιώνει τη συνολική απόδοση, γεγονός που μεταφράζεται σε εξοικονόμηση κόστους για τους φορείς εκμετάλλευσης αιολικών πάρκων και εξασφάλιση αξιόπιστης παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Βασικοί μέθοδοι επιθεώρησης αποτελούν [90]:

- Οπτική επιθεώρηση (με φωτογραφίες από drone ή από τεχνικό)
- Έλεγχος με υπέρηχους
- Διάτμηση
- Θερμογραφία
- Ψηφιακή ακτινογραφία

Έπειτα, εφόσον γίνει ο έλεγχος, θα πρέπει να καταγραφούν τα αποτελέσματα και οι ενέργειες που πάρθηκαν είτε δια χειρός είτε σε Η/Υ, ώστε να γίνει αξιολόγηση από ειδικούς (εικόνα 4-4).



Εικόνα: 4-4 Επιθεώρηση λεπίδων Α/Γ, Πηγή: [91].

4.4 Κόστος συντήρησης

Ως συντήρηση αιολικών πάρκων θεωρείται οποιαδήποτε διαδικασία χρησιμοποιείται για τη διατήρηση των ανεμογεννητριών σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας. Οι εργαζόμενοι συντήρησης σε αιολικά πάρκα λιπαίνουν κινούμενα μέρη, όπως κιβώτια ταχυτήτων και ρουλεμάν, ελέγχουν τις συνδέσεις εντός του συστήματος και επιλύουν τυχόν σημαντικά ζητήματα που μπορεί να προκύψουν. Στις ΗΠΑ, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των αιολικών πάρκων το 2016 κυμάνθηκε μεταξύ 42.000 και 48.000 δολαρίων ανά MW [92].

Συνεπώς, ως μορφή παραγωγής ενέργειας, είναι απολύτως ζωτικής σημασίας τα αιολικά πάρκα να διατηρούνται σε βέλτιστη κατάσταση λειτουργίας ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοσή τους.

4.4.1 Θεωρητική προσέγγιση κόστους συντήρησης

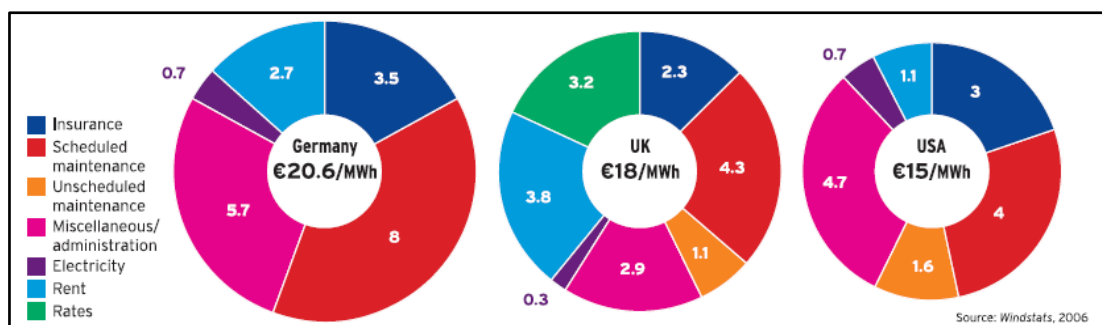
Η επένδυση σε ανεμογεννήτριες είναι σημαντική και αναμένεται να αποδώσει οφέλη σε μακροπρόθεσμη βάση.

Το αρχικό κόστος των ανεμογεννητριών ποικίλλει σημαντικά, κυμαινόμενο από 2,6 έως 4 εκατομμύρια δολάρια ανά εμπορική ανεμογεννήτρια μέσου μεγέθους, με τυπικό κόστος 1,3 εκατομμυρίων δολαρίων ανά μεγαβάτ (MW) δυναμικότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Τα μεγέθη που αναφέρονται αφορούν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των αιολικών πάρκων με δαπάνες για λειτουργία και συντήρηση. Δεν περιλαμβάνει όμως κατασκευαστικές δαπάνες όπως χωματουργικά κλπ). Ενώ οι περισσότερες εμπορικές ανεμογεννήτριες έχουν χωρητικότητα 2-3 MW, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες μπορεί να είναι τόσο μεγάλες που φτάνουν τα 16-18 MW. Το κόστος αυξάνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος των ανεμογεννητριών, αν και υπάρχουν οφέλη από τη χρήση λιγότερων και μεγαλύτερων ανεμογεννητριών. Η πολυπλοκότητα και το κατασκευαστικό αποτύπωμα του συνολικού επιχειρησιακού χώρου μειώνονται σημαντικά όταν χρησιμοποιούνται λιγότερες και μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες.

Μόλις κατασκευαστεί, η συντήρηση αποτελεί μια συνεχή δαπάνη. Το κόστος συντήρησης κυμαίνεται συνήθως από 1-2 σεντ ανά παραγόμενη κιλοβατώρα ή 42.000 - 48.000 δολάρια ετησίως [93].

Η λειτουργία και η συντήρηση (O&M) περιλαμβάνουν συνήθως ασφάλιση, μίσθωση γης, επισκευές και αντικαταστάσεις, διοικητικά έξοδα, ελάχιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για λειτουργία και διάφορα άλλα έξοδα. Παρά το γεγονός ότι αυτά τα επαναλαμβανόμενα κόστη είναι υψηλά, οι ανεμογεννήτριες αποτελούν μια επένδυση με μακροπρόθεσμα οφέλη. Η αξία της επένδυσης αυτής θα ξεπεράσει σημαντικά το κόστος συντήρησης, αποδεικνύοντας την αξιοπιστία και την βιωσιμότητα της ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Η απλούστερη μέθοδος για τον υπολογισμό είναι να υποθέσουμε ότι οι συνολικές ετήσιες χρεώσεις αντιπροσωπεύουν ένα ποσοστό του εγκατεστημένου κόστους, που συχνά αναφέρεται μεταξύ 3% και 5%. Λεπτομερέστερες εκτιμήσεις απαιτούν έλεγχο των στοιχείων που συνθέτουν τη συνολική χρέωση, η οποία μπορεί να εκφραστεί ως κόστος ανά ετήσια παραγόμενη ισχύ ή ανά παραγόμενη KWh. Η ανάλυση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης ανεμογεννητριών ξεκινά με τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται και τις αναγκαίες εργασίες συντήρησης. Η παρακάτω εικόνα, δείχνει δεδομένα που ελήφθησαν από μια ανάλυση [94] στην οποία παρατηρήθηκε πως το κόστος λειτουργίας και συντήρησης κυμαίνεται από € 15-20.6 / MWh, και ενώ αυτός είναι ένας μέσος όρος, υπάρχουν σημαντικές διακυμάνσεις τόσο πάνω όσο και κάτω από τις εκτιμήσεις που αναφέρθηκαν. Τα τελευταία στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας, που αναφέρονται από 12 διαφορετικές χώρες, δίνουν παρόμοιο εύρος 7-26 ευρώ/MWh.



Εικόνα 4-5: Κόστος λειτουργίας και συντήρησης ,Πηγή:[94].

Οι φορείς εκμετάλλευσης αιολικών πάρκων έχουν περιορισμένο έλεγχο στις περισσότερες πτυχές του O&M (Operations and Maintenance), αλλά μπορούν να επηρεάσουν το προγραμματισμένο κόστος συντήρησης. Υπάρχουν θεωρητικά πλαίσια για την ελαχιστοποίηση αυτού του κόστους, δίνοντας έμφαση στην ισορροπία μεταξύ της ελάχιστης συντήρησης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σενάρια υψηλού κινδύνου, και της υπερβολικής συντήρησης, η οποία θα μπορούσε να επιφέρει περιττά έξοδα.

Απαραίτητα για τον προγραμματισμό συντήρησης είναι τα δεδομένα σχετικά με τις πιθανότητες αστοχίας των εξαρτημάτων, που ιστορικά παρέχονται από προγράμματα όπως το Γερμανικό Πρόγραμμα Μέτρησης Αιολικής Ενέργειας. Αυτή η πρωτοβουλία, που εκτείνεται εδώ και μια δεκαετία, έδωσε κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του ρότορα και το χρόνο διακοπής λειτουργίας, επισημαίνοντας ιδιαίτερα τον ηλεκτρικό εξοπλισμό ως συχνή αιτία διακοπών. Οι βλάβες του κιβωτίου ταχυτήτων, αν και λιγότερο συχνές, οδηγούν σε σημαντικά μεγαλύτερο χρόνο διακοπής λειτουργίας, υπογραμμίζοντας τη σημασία των προληπτικών στρατηγικών συντήρησης.

Καθώς οι ανεμογεννήτριες εξελίσσονται σε μέγεθος και πολυπλοκότητα, η ανάγκη για αποτελεσματικά συστήματα παρακολούθησης της κατάστασης (CMS) καθίσταται πρωταρχικής σημασίας. Ενώ οι αρχές του CMS είναι καθιερωμένες, οι εξελίξεις στην ερμηνεία δεδομένων και την υπολογιστική ανάλυση ενισχύουν τη χρησιμότητά τους. Για παράδειγμα, τα δεδομένα κραδασμών που συλλέγονται από το CMS μπορούν να σηματοδοτήσουν πιθανά προβλήματα, με αποκλίσεις από τα επίπεδα αναφοράς να ενεργοποιούν ειδοποιήσεις στους χειριστές. Τέτοια συστήματα προσφέρουν μια προληπτική προσέγγιση στη συντήρηση, επιτρέποντας την έγκαιρη παρέμβαση για την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας και την πρόληψη διαδοχικών βλαβών.

Όσο οι ανεμογεννήτριες συνεχίζουν να αυξάνονται σε κλίμακα, η πολυπλοκότητα του CMS αναμένεται να αυξηθεί, παρέχοντας στους χειριστές ολοκληρωμένες γνώσεις σχετικά με την υγεία των ανεμογεννητριών και βελτιστοποιώντας τις στρατηγικές συντήρησης για βελτιωμένη αξιοπιστία και απόδοση.

Η ανάλυση του πραγματικού κόστους λειτουργίας και συντήρησης των ανεμογεννητριών είναι ζωτικής σημασίας για τους ενδιαφερόμενους φορείς της βιομηχανίας που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση των επενδυτικών στρατηγικών. Η πρόσφατη συνεργασία μεταξύ ανεξάρτητων αναλυτών αιολικής ενέργειας και της Wind Energy Update στο Ηνωμένο Βασίλειο δείχνει τους παράγοντες που επηρεάζουν αυτά τα κόστη και τις στρατηγικές για τον μετριασμό τους. Τα ευρήματα από την "The Wind Energy Operations & Maintenance Report" αποκαλύπτουν ότι το μέσο κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι περίπου 0,027 \$ / kWh ή 0,019 € / kWh. Ακόμη και μικρές βελτιώσεις στην απόδοση O&M μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το κέρδος, όπως σημειώνεται από τους φορείς εκμετάλλευσης της βιομηχανίας [95].

Τα κύρια προβλήματα ή προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα αιολικά πάρκα, είναι η αυξημένη δαπάνη για λειτουργία και συντήρηση που υπερβαίνει τις αρχικές εκτιμήσεις. Τονίζουν τη σημασία του προληπτικού σχεδιασμού για τη συντήρηση και την ανάγκη για οικονομικά αποδοτικές στρατηγικές που ενισχύουν την απόδοση και την μακροζωία των αιολικών πάρκων.

4.4.2 Πρακτικές για μείωση κόστους

Κατά την επιδίωξη στρατηγικών μείωσης του κόστους κατά τη λειτουργία και τη συντήρηση των ανεμογεννητριών, αρκετές βασικές πρακτικές αναδεικνύονται ως απαραίτητες. Πρώτον, ο προληπτικός σχεδιασμός και προγραμματισμός, επιτρέπει την αποτελεσματική κατανομή πόρων και ελαχιστοποιεί το χρόνο διακοπής λειτουργίας. Δεύτερον, η επένδυση στην εκπαίδευση και την ανάπτυξη του προσωπικού όπου εξασφαλίζει ένα εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό ικανό να εκτελεί τα καθήκοντα του αποτελεσματικά. Τρίτον, η προτεραιότητα στην ποιότητα του εξοπλισμού και των υπηρεσιών, που αποτρέπει τις συχνές βλάβες και το σχετικό κόστος επισκευής. Επιπλέον, η προώθηση μιας κουλτούρας καινοτομίας και συνεχούς βελτίωσης, οδηγεί σε αύξηση της αποδοτικότητας και μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κόστους. Τέλος, η αξιοποίηση της εξωτερικής υποστήριξης και η αναζήτηση συμβουλών από ειδικούς, προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες και πόρους για τη βελτιστοποίηση των πρακτικών συντήρησης και των οικονομικών αποτελεσμάτων. Με την ενσωμάτωση αυτών των πρακτικών, οι φορείς εκμετάλ-

λευσης αιολικών πάρκων μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τις προκλήσεις και να επιτύχουν βιώσιμους στόχους μείωσης του κόστους. Έτσι πιο αναλυτικά οι πρακτικές αυτές είναι [96]:

1. Προγραμματισμός-Πλάνο

Ένας από τους καλύτερους τρόπους για να μειωθεί το κόστος συντήρησης της ανεμογεννήτριας είναι να υπάρχει προγραμματισμός εκ των προτέρων για τις δραστηριότητες προληπτικής συντήρησης με βάση την κατάσταση και την απόδοση των ανεμογεννητριών. Η προληπτική συντήρηση μπορεί να βοηθήσει ώστε να αποφευχθούν δαπανηρές βλάβες, να παραταθεί η διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων και να βελτιώσει την απόδοση ενέργειας. Με χρήση δεδομένων από αισθητήρες, επιθεωρήσεις και ιστορικά αρχεία μπορούμε να παρακολουθούμε την υγεία των στροβίλων αλλά ακόμα και τον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων προτού γίνουν σοβαρά προβλήματα.

2. Χρήση ψηφιακών εργαλείων

Ένας άλλος τρόπος είναι η χρήση ψηφιακών εργαλείων που μπορούν βοηθήσουν στον αυτοματισμό, και στην βελτιστοποίηση για τις διαδικασίες συντήρησης. Για παράδειγμα, με χρήση κάποιου λογισμικού που μπορεί να αναλύσει τα δεδομένα και να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες, προτάσεις και ειδοποιήσεις στα συστήματα τηλεχειρισμού και παρακολούθησης ώστε να επιτρέπουν την πρόσβαση και τη διαχείριση των ανεμογεννητριών από οπουδήποτε. Επιπλέον, εφαρμογές για κινητά βοηθούν στην παρακολούθηση, επιβεβαίωση και επικοινωνία των δραστηριοτήτων συντήρησης. Με τα ψηφιακά εργαλεία, βελτιώνεται η αποτελεσματικότητα, η ακρίβεια και η παραγωγικότητα.

3. Εκπαίδευση προσωπικού

Ένας τρίτος τρόπος είναι η εκπαίδευση του προσωπικού. Αποκτώντας καινούργιες και βελτιωμένες δεξιότητες αλλά και τις γνώσεις που χρειάζονται για να εκτελούν τα καθήκοντά τους μπορούν να δράσουν πιο αποτελεσματικά και με ασφάλεια. Η εκπαίδευση του προσωπικού μπορεί να βοηθήσει στην μείωση του

κινδύνου από ανθρώπινο λάθος όπως ατυχήματα και τραυματισμούς, που μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο κόστος της συντήρησης αλλά και στην φήμη της εταιρίας. Το προσωπικό μπορεί να εκπαιδευτεί στο να χρησιμοποιεί τις πιο πρόσφατες τεχνολογίες και τεχνικές που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση και την ποιότητά της συντήρησης.

4. Επένδυση στην ποιότητα

Ένας τέταρτος τρόπος μείωσης του κόστους συντήρησης ανεμογεννητριών είναι η επένδυση σε ποιοτικά εξαρτήματα και υλικά που μπορούν να αντέξουν τις σκληρές συνθήκες και τις πιέσεις της παραγωγής αιολικής ενέργειας. Η επένδυση στην ποιότητα μπορεί να βοηθήσει στην μείωση της συχνότητας και την σοβαρότητα των βλαβών, των επισκευών και των αντικαταστάσεων, γεγονός που μπορεί να μειώσει το κόστος συντήρησης μακροπρόθεσμα. Επίσης πρέπει να γίνεται επένδυση σε αξιόπιστους προμηθευτές και εργολάβους που μπορούν να προσφέρουν προϊόντα και υπηρεσίες υψηλής ποιότητας. Τέλος με την επένδυση σε τακτικούς ελέγχους και αξιολογήσεις από ειδικούς τεχνικούς, παρέχονται καλύτερες μετρήσεις για την απόδοση.

5. Καινοτομία και βελτίωση

Η καινοτομία και η βελτίωση έχουν σκοπό να βοηθήσουν για να βρεθούν νέοι τρόποι για να την μείωση του κόστους, την αύξηση στην αποτελεσματικότητας και στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας μίας εταιρίας. Για παράδειγμα, η χρήση drones, ρομπότ ή τεχνητής νοημοσύνης είναι μερικές από τις καινοτομίες που βοηθούν με τις εργασίες συντήρησης.

6. Ζήτηση υποστήριξης και συμβουλών

Τελευταίο, αλλά εξίσου σημαντικό, είναι η αναζήτηση υποστήριξης και συμβουλών από ειδικούς και επαγγελματίες. Αυτοί μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση προκλήσεων και στην αξιοποίηση ευκαιριών που προκύπτουν κατά τη συντήρηση. Η αναζήτηση υποστήριξης και συμβουλών μπορεί να βοηθήσει στην απόκτηση για πρόσβαση σε πολύτιμες πληροφορίες, πόρους και δίκτυα που

βοηθούν στην βελτίωση της απόδοσης της συντήρησής και στην μείωση του κόστους. Έτσι, αναζητώντας για υποστήριξη και συμβουλές, υπάρχει ανταλλαγή γνώσεων από τις οποίες λαμβάνονται βέλτιστες πρακτικές και τεχνογνωσία. Η αναζήτηση για υποστήριξη και συμβουλές μπορεί να γίνει από διάφορες πηγές, όπως:

- ενώσεις του κλάδου,
- ερευνητικά ινστιτούτα
- συμβούλους
- συνέδρια

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΣΚΕΥΗ

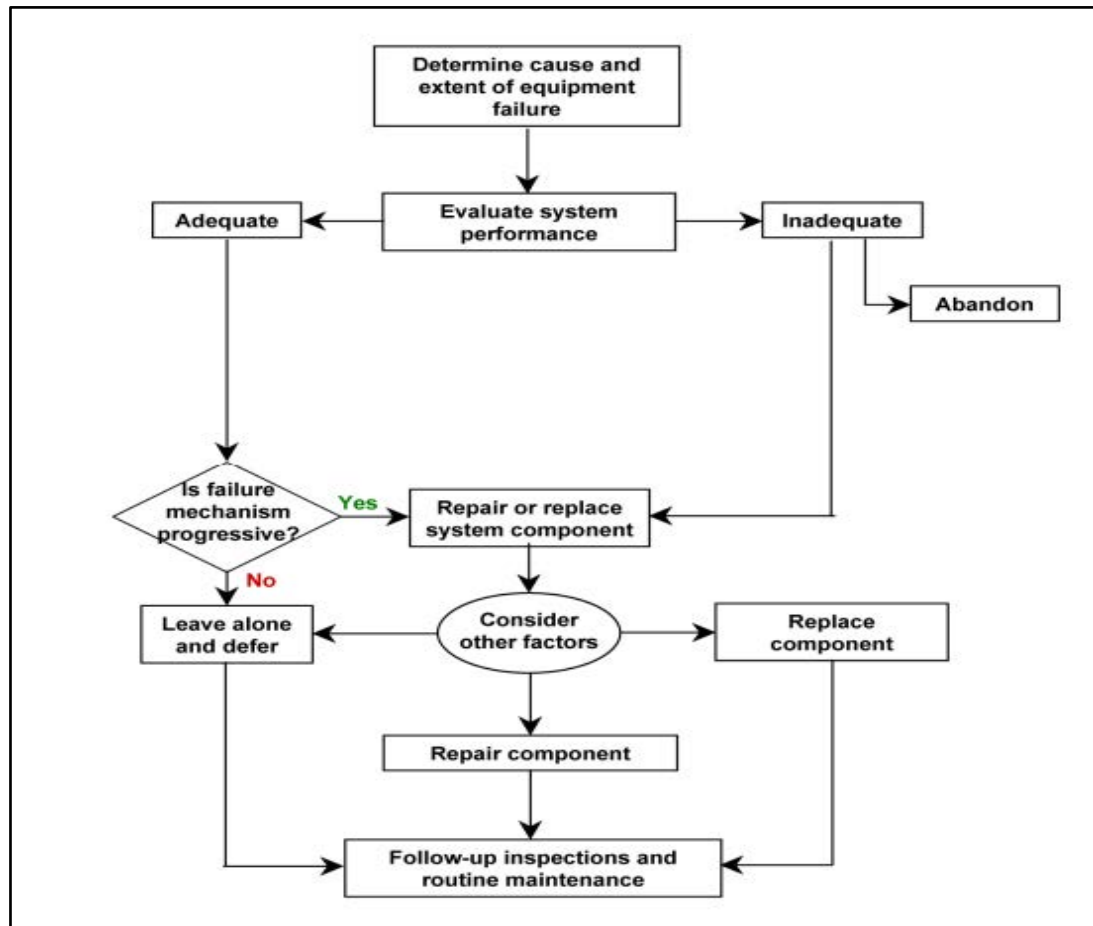
5.1 Σύγκριση επισκευής και συντήρησης

Εάν δεν γίνεται συχνά η συντήρηση ή ένα εξάρτημα έχει φθαρεί πρέπει να γίνει επισκευή ή έστω αντικατάσταση. Το ερώτημα εάν πρέπει να επισκευαστεί, να αντικατασταθεί ή να αναβληθεί η συντήρηση σε ένα εξάρτημα του συστήματος είναι συχνά περίπλοκο να απαντηθεί. Η πολυπλοκότητα του ζητήματος εντείνεται από το γεγονός ότι η ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε για ολόκληρο το σύστημα ανεμογεννητριών, είτε μόνο για ένα συγκεκριμένο στοιχείο του. Στις περισσότερες περιπτώσεις, μια μελέτη οικονομικού κόστους αποτελεί τον πιο αποτελεσματικό τρόπο για να ληφθεί μια ποσοτικοποιημένη απάντηση. Αυτός ο εμπειρικός κανόνας εφαρμόζεται ιδανικά, όταν το σύστημα μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας κατά τη διάρκεια της κατασκευής αντικατάστασης.

Μία καλή λύση προβάλλεται παρακάτω, στην εικόνα 5-1 , όπου απεικονίζεται η διαδικασία για τον προσδιορισμό του κατά πόσο πρέπει να επισκευαστεί ή να αντικατασταθεί ένα κατασκευαστικό στοιχείο/εξάρτημα του συστήματος που δεν λειτουργεί πλέον σύμφωνα με τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Κεντρικό στοιχείο αυτής της διαδικασίας είναι η αρχική αξιολόγηση της αποτυχίας, η οποία περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της αιτίας και του μεγέθους της ζημιάς. Στη συνέχεια, το διάγραμμα ροής σκιαγραφείται σε δύο κύριες οδούς, ανάλογα με το αν η αστοχία ταξινομείται ως μεμονωμένο περιστατικό ή συνεχόμενη επιδείνωση. Μια εφάπαξ αποτυχία υποδηλώνει ένα μεμονωμένο γεγονός που είναι απίθανο να επαναληφθεί, ενώ μια διαρκής φθορά σημαίνει μια συνεχή επιδείνωση με την πάροδο του χρόνου. Στο σενάριο μιας βλάβης, το διάγραμμα ροής συμβουλεύει για άμεση παρέμβασης, προτείνοντας μια στρατηγική παρακολούθησης για πρόσθετα σημάδια δυσλειτουργίας πριν από την έναρξη οποιωνδήποτε επισκευών.

Αντίθετα, σε περιπτώσεις προοδευτικής αποτυχίας, το διάγραμμα ροής προτρέπει στην εξέταση διαφόρων παραγόντων, συμπεριλαμβανομένου του κόστους επισκευής, της ηλικίας του εξοπλισμού και της κρισιμότητας του στο ευρύτερο σύστημα. Αυτές οι συζητήσεις ενημερώνουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων

σχετικά με το αν θα προχωρήσουν σε επισκευές ή θα επιλέξουν την αντικατάσταση του εξοπλισμού, βελτιστοποιώντας έτσι την κατανομή των πόρων και την αξιοπιστία του συστήματος.



Εικόνα 5-1: Διαδικασία για τον προσδιορισμό του κατά πόσον πρέπει να επισκευαστεί ή να αντικατασταθεί ένα κατασκευαστικό στοιχείο, Πηγή: [97].

Πάραυτα, συχνά είναι θέμα κόστους και όχι ποιότητας. Όπως επισημάνθηκε πιο πριν, ορισμένοι παράγοντες είναι ευκολότερο να ποσοτικοποιηθούν από άλλους, και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να εκτιμηθεί το κόστος. Έτσι βάση του κόστους επισκευής, το απαιτούμενο κόστος για την εκτέλεση του κόστους της επισκευής αποτελείται συνήθως από:

- υλικά
- εξοπλισμό
- εργασία
- προετοιμασία

Ενώ το κόστος αντικατάστασης μπορεί να ισχύει είτε για ολόκληρο το σύστημα είτε για μια συγκεκριμένη περίπτωση υπό αξιολόγηση, η λήψη της σωστής απόφασης απαιτεί την εξέταση βασικών ποιοτικών παραγόντων. Κάποιοι από αυτούς είναι:

- **Ρυθμός φθοράς**

Ο ρυθμός φθοράς είναι ένας παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση των οφελών κόστους είτε της επισκευής είτε της αντικατάστασης ενός εξαρτήματος του συστήματος. Για ένα στοιχείο που αποτυγχάνει με αργό ρυθμό, ο κάτοχος του συστήματος έχει επιπλέον χρόνο για να αποφασίσει ποια πορεία δράσης θα λάβει. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο ρυθμός φθοράς μπορεί να είναι τόσο αργός ώστε η καλύτερη πορεία δράσης είναι να αναβληθεί οποιαδήποτε ενέργεια έως ότου η κατάσταση του συστατικού γίνει πιο σοβαρή. Τα στοιχεία που αποτυγχάνουν με ταχύτερο ρυθμό απαιτούν τη λήψη πιο άμεσων μέτρων.

- **Ηλικία του συστήματος/στοιχείου**

Η ηλικία του λειτουργικού συστήματος και των στοιχείων του θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση για διάφορους λόγους. Πρώτον, όσο παλαιότερο είναι το σύστημα, τόσο λιγότερο πιθανό είναι ότι οι επισκευές θα είναι εφικτές. Αντίθετα, όσο νεότερο είναι το σύστημα, τόσο λιγότερο πιθανό είναι να είναι ωφέλιμη η αντικατάσταση ολόκληρου του συστήματος και τόσο πιο πιθανό θα ήταν να πραγματοποιηθούν επισκευές των απαραίτητων εξαρτημάτων. Δεύτερον, τα παλαιότερα συστήματα μπορεί να έχουν ορισμένα ζητήματα συντήρησης που πρέπει να εξεταστούν ταυτόχρονα. Το κόστος επισκευής αυτών των πολλαπλών ζητημάτων θα πρέπει να εξετάζεται από κοινού και όχι μεμονωμένα.

- **Κίνδυνος διακοπής της διαδικασίας**

Οι κίνδυνοι που συνδέονται με την ακούσια διακοπή των διαδικασιών θα πρέπει να εξετάζονται βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα. Βραχυπρόθεσμα, θα πρέπει να εξετάζεται ποια ενέργεια, επισκευή ή αντικατάσταση θα

παρουσίαζε τον μικρότερο κίνδυνο διακοπής των διαδικασιών και μακροπρόθεσμα έως ότου δηλαδή ολοκληρωθεί η αντικατάσταση. Στην περίπτωση αυτή, ο ιδιοκτήτης του συστήματος μπορεί επίσης να εξετάσει το κόστος της χαμένης παραγωγής που απαιτείται από την αντικατάσταση.

- **Αναμενόμενη διάρκεια ζωής της αντικατάστασης ή επισκευής**

Ανεξάρτητα από τη δράση που λαμβάνεται, η αποκατεστημένη κατάσταση δεν θα διαρκέσει για πάντα. Με την πάροδο του χρόνου, το στοιχείο (εξάρτημα) θα πρέπει είτε να επισκευαστεί μία φορά είτε επανειλημμένα. Το χρονικό διάστημα έως ότου απαιτηθεί μία από αυτές τις δραστηριότητες παρακολούθησης θα διαφέρει, ανάλογα με τις αποφάσεις συντήρησης που λαμβάνονται.

- **Ρυθμιστικά ζητήματα**

Ρυθμιστικά ζητήματα που ενδέχεται να έχουν προκύψει ή νέοι κανονισμοί που ενδέχεται να έχουν θεσπιστεί από την αρχική κατασκευή του συστήματος θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη κατά τη λήψη απόφασης σχετικά με τη βέλτιστη ενέργεια συντήρησης που πρέπει να ληφθεί.

5.2 Τεχνικές αντικατάστασης και επισκευής εξαρτημάτων:

Στον τομέα της συντήρησης, υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες: μηχανική και ηλεκτρική, καθώς και μια εξειδικευμένη κατηγορία που αφορά τις διαδικασίες επιθεώρησης και επισκευής των πτερυγίων.

5.2.1 Μηχανικά

Μερικά από τα πιο κοινά προβλήματα στα μηχανικά μέρη περιλαμβάνουν φθαρμένα ρουλεμάν, βλάβες στα γρανάζια, βλάβες στα μπουλόνια στο κιβώτιο ταχυτήτων και σε πιο ακραίες περιπτώσεις σπασμένα πτερύγια (όπως θα αναλυθεί και αργότερα) και ραγισμένα κιβώτια ταχυτήτων. Κάποια από αυτά τα προβλήματα με μεγαλύτερη λεπτομέρεια είναι:

5.2.1.1 Βλάβες στο κιβώτιο ταχυτήτων

Όταν γίνεται αναφορά για βλάβες στο κιβώτιο ταχυτήτων, συνήθως είναι επειδή συμβαίνουν μικροσκασίματα (micropitting). Τα μικροσκασίματα (εικόνα 5-2) είναι ένα φαινόμενο κόπωσης της επιφάνειας που εκδηλώνεται ως εξαιρετικά λεπτά σκασίματα στην επιφάνεια του γραναζιού [101]. Έχει αναγνωριστεί ως συνάρτηση του φορτίου, του σχεδιασμού γραναζιών, του φινιρίσματος των δοντιών (ποιότητα των οδοντωτών δοντιών μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής) και του λιπαντικού. Ένα από τα προβλήματα είναι ότι δεν υπάρχει μια, καλά αποδεκτή μέθοδος αξιολόγησης για κινδύνους στα μικροσκασίματα και έτσι η μόνο λύση αποτελεί η αλλαγή εξαρτήματος.



Εικόνα 5-2: Μικροσκασίματα (micropitting), Πηγή: [97].

5.2.1.2 Βλάβες στα μπουλόνια στο κιβώτιο ταχυτήτων

Τα μπουλόνια μέσα στα κιβώτια ταχυτήτων μπορεί να σπάσουν με την πάροδο του χρόνου. Αυτό συμβαίνει επειδή τα υλικά των μπουλονιών δεν είναι πάντα υψηλής αντοχής. Τα μπουλόνια συχνά πωλούνται μαζικά, με την ποιότητα να αναφέρεται απλώς στη συσκευασία τους, και το εργοστάσιο δεν ελέγχει συνήθως τον αρχικό χάλυβα, τη θερμική επεξεργασία ή τα στάδια επεξεργασίας. Τα πρότυπα περιορίζουν τη χρήση τέτοιων μπουλονιών στα κιβώτια ταχυτήτων.

5.2.1.3 Εξαρτήματα του συστήματος μετάδοσης κίνησης στροβίλου

Τα εξαρτήματα του συστήματος μετάδοσης κίνησης στροβίλου αντιπροσωπεύουν μεταξύ 20% και 25% του αρχικού κόστους στροβίλου. Το κόστος που

σχετίζεται με μια αστοχία αυξάνεται από τη δυσκολία αφαίρεσης και αντικατάστασης αυτών των εξαρτημάτων. Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις απαιτείται γερανός για την αφαίρεση του εξαρτήματος, το ίδιο ισχύει και για ορισμένες ανεμογεννήτριες. Ο ρότορας πρέπει να αφαιρεθεί για πρόσβαση στο κιβώτιο ταχυτήτων. Υποθέτοντας ότι μια εφεδρική μονάδα είναι διαθέσιμη, η αντικατάσταση μπορεί να διαρκέσει δύο ή τρεις ημέρες με πλήρωμα τριών ατόμων, συν ένα χειριστής γερανού. Όσον αφορά τους γερανούς, όταν το ύψος στον πύργου είναι κάτω των 65 μέτρων (μικρές ανεμογεννήτριες) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας υδραυλικός γερανός τοποθετημένος σε φορηγό ώστε να αφαιρέσει την γεννήτρια και ίσως και το κιβώτιο ταχυτήτων. Το απαιτούμενο μέγεθος γερανού επιλέγεται τις περισσότερες φορές από το ύψος του ανελκυστήρα. Οι ρότορες σε πύργους άνω των 70 μέτρων συνήθως απαιτούν συμβατικούς γερανούς, αποτελούμενους από δώδεκα φορτία ρυμουλκούμενου-φορηγού, έναν βοηθό γερανού για την ανέγερση του βραχίονα και δύο ημέρες εργασία σε κάθε πλευρά του ανελκυστήρα για συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση του κύριου γερανού. Επιπρόσθετα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τις ημέρες με ισχυρούς ανέμους διότι όταν οι συνθήκες ανέμου είναι πολύ ισχυρές η χρήση του γερανού γίνεται δυσκολότερη, το ίδιο ισχύει και για τους τεχνικούς.

5.2.2 Ηλεκτρικά

Οι ηλεκτρικές βλάβες στις ανεμογεννήτριες έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση και την αξιοπιστία του συστήματος. Οι ηλεκτρικές βλάβες συμβάλλουν περίπου στο 13% των συνολικών βλαβών ανεμογεννητριών [19]. Αυτό φανερώνει ότι τα ζητήματα που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά εξαρτήματα αποτελούν σημαντικό παράγοντα για το χρόνο διακοπής λειτουργίας και συντήρησης των ανεμογεννητριών [99]. Ωστόσο οι ηλεκτρικές βλάβες στις ανεμογεννήτριες μπορεί να προκύψουν από διάφορες πηγές και μπορεί να έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Μερικές κοινές ηλεκτρικές βλάβες στις ανεμογεννήτριες περιλαμβάνουν:

5.2.2.1 Βλάβες δικτύου

Αυτές οι βλάβες συμβαίνουν εντός του ηλεκτρικού δικτύου στο οποίο συνδέεται η ανεμογεννήτρια. Οι βλάβες δικτύου μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές στις παραμέτρους του ρεύματος, όπως η τάση και η συχνότητα, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Η ενσωμάτωση των ανεμογεννητριών στο δίκτυο είναι πολύπλοκη λόγω της ασταθούς φύσης της παραγωγής αιολικής ενέργειας και της μεταβλητότητας των αιολικών προτύπων. Κατά συνέπεια, τα σφάλματα που σχετίζονται με το δίκτυο θέτουν σημαντικές προκλήσεις για τη σταθερή και αποδοτική λειτουργία των ανεμογεννητριών, απαιτώντας ισχυρούς μηχανισμούς παρακολούθησης και ελέγχου για την μείωση των πιθανών κινδύνων και τη διασφάλιση της σταθερότητας του δικτύου. Επιπλέον, οι βλάβες του δικτύου μπορούν να διαδοθούν πέρα από το δίκτυο των ανεμογεννητριών, επηρεάζοντας ευρύτερα τμήματα του ηλεκτρικού δικτύου και ενδεχομένως διαταράσσοντας την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Η διασυνδεδεμένη φύση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας υπογραμμίζει τη σημασία της έγκαιρης αντιμετώπισης των βλαβών του δικτύου για την αποφυγή διαδοχικών βλαβών και την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας. Οι αποτελεσματικές στρατηγικές ανίχνευσης και διάγνωσης σφαλμάτων είναι επιτακτικές για την έγκαιρη παρέμβαση και την αποκατάσταση της κανονικής λειτουργίας του δικτύου. Επιπλέον, προληπτικά μέτρα, όπως η ενίσχυση του δικτύου και ο σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης, μπορούν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να αντέχουν και να ανακάμπτουν από διαταραχές που προκαλούνται από σφάλματα δικτύου. Στο πλαίσιο αυτό, οι συλλογικές προσπάθειες μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης αιολικών πάρκων, των διαχειριστών δικτύων και των σχετικών ενδιαφερόμενων μερών είναι ουσιαστικής σημασίας για την ανάπτυξη συντονισμένων απαντήσεων και την προώθηση αξιόπιστων και ανθεκτικών ενεργειακών υποδομών.

5.2.2.2 Βλάβες γεννήτριας:

Βλάβες εντός της γεννήτριας της ανεμογεννήτριας, όπως βραχυκυκλώματα στις περιελίξεις της γεννήτριας λόγω σφαλμάτων εσωτερικής μόνωσης, μπορούν να διαταράξουν το ηλεκτρικό σύστημα και να οδηγήσουν σε παροδικές συνθήκες

υπερφόρτωσης. Αυτά τα σφάλματα μπορεί να προκύψουν από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της υποβάθμισης της μόνωσης με την πάροδο του χρόνου, των μηχανικών καταπονήσεων κατά τη λειτουργία ή των κατασκευαστικών ελαττωμάτων. Βραχυκυκλώματα στις περιελίξεις της γεννήτριας μπορεί να οδηγήσουν σε μη φυσιολογικά ρεύματα και τάσεις, θέτοντας σε κίνδυνο την ακεραιότητα των ηλεκτρικών εξαρτημάτων και τη συνολική αξιοπιστία του συστήματος ανεμογεννητριών. Η ανίχνευση και η διάγνωση βλαβών εντός της γεννήτριας απαιτούν εξελιγμένες τεχνικές παρακολούθησης και διάγνωσης, όπως δοκιμές αντίστασης μόνωσης, παρακολούθηση μερικής εκφόρτισης και θερμική απεικόνιση, για τον εντοπισμό πιθανών τρωτών σημείων και τον μετριασμό των λειτουργικών κινδύνων. Επιπλέον, οι πρακτικές προληπτικής συντήρησης, όπως οι τακτικές επιθεωρήσεις, οι δοκιμές και η παρακολούθηση βάσει κατάστασης, είναι απαραίτητες για την πρόληψη καταστροφικών βλαβών και τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης απόδοσης και ανθεκτικότητας των ανεμογεννητριών.

Εκτός από τα εσωτερικά σφάλματα, εξωτερικοί παράγοντες όπως κεραυνοί και περιβαλλοντικές συνθήκες μπορούν επίσης να συμβάλουν σε δυσλειτουργίες της γεννήτριας και λειτουργικές διαταραχές. Οι κεραυνοί, ειδικότερα, μπορούν να προκαλέσουν σημαντική ζημιά στις γεννήτριες των ανεμογεννητριών προκαλώντας υπερτάσεις υψηλής τάσης και παροδικές υπερτάσεις, οδηγώντας σε βλάβη της μόνωσης και ηλεκτρική βλάβη των εξαρτημάτων. Η εφαρμογή συστημάτων προστασίας από κεραυνούς και συσκευών προστασίας από υπερτάσεις μπορεί να μετριάσει τις επιπτώσεις των κεραυνών και να διασφαλίσει την ακεραιότητα των ανεμογεννητριών. Επιπλέον, οι δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των ακραίων θερμοκρασιών, της υγρασίας και των διαβρωτικών παραγόντων, μπορούν να επιταχύνουν την υποβάθμιση των εξαρτημάτων της γεννήτριας και να επιδεινώσουν τον κίνδυνο βλαβών. Η χρήση πρακτικών σχεδιασμού, επιλογής υλικών και προστατευτικών επιστρώσεων μπορεί να ενισχύσει την ανθεκτικότητα των ανεμογεννητριών στις περιβαλλοντικές φθορές και να παρατείνει τη διάρκεια ζωής τους. Συνολικά, η αντιμετώπιση τόσο εσωτερικών όσο και εξωτερικών παραγόντων που επηρεάζουν την αξιοπιστία των γεννητριών είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ασφαλούς και αποδοτικής λειτουργίας των ανεμογεννητριών και τη βελτιστοποίηση της συμβολής τους στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας.

5.2.2.3 Βλάβες μετατροπέα συχνότητας:

Προβλήματα με τον μετατροπέα συχνότητας, ο οποίος μετατρέπει την εξαγόμενη μεταβλητή συχνότητα από την ανεμογεννήτρια σε σταθερή συχνότητα για τη σύνδεση με το δίκτυο, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη συνολική απόδοση της ανεμογεννήτριας. Ο μετατροπέας συχνότητας χρησιμεύει ως συνδετικός κρίκος μεταξύ του ηλεκτρικού συστήματος της ανεμογεννήτριας και του δικτύου, εξασφαλίζοντας συγχρονισμό και αποτελεσματική μεταφορά ισχύος. Ωστόσο, δυσλειτουργίες ή βλάβες στον μετατροπέα συχνότητας μπορούν να οδηγήσουν σε μια σειρά ηλεκτρικών βλαβών, συμπεριλαμβανομένης της αστάθειας τάσης, της αρμονικής παραμόρφωσης και των ζητημάτων ποιότητας ισχύος. Αυτές οι ηλεκτρικές βλάβες δεν επηρεάζουν μόνο την έξοδο της ανεμογεννήτριας, αλλά ενέχουν επίσης κινδύνους για τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του δικτύου. Ως εκ τούτου, οι αποτελεσματικές στρατηγικές συντήρησης και τα πρωτόκολλα παρακολούθησης για τον μετατροπέα συχνότητας είναι απαραίτητα για την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας, τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας και τη διατήρηση της σταθερότητας του δικτύου στα συστήματα αιολικής ενέργειας.

Επιπλέον, η πολυπλοκότητα της σύγχρονης τεχνολογίας μετατροπέων συχνότητας εισάγει πρόσθετες προκλήσεις στη διάγνωση και την επίλυση πιθανών προβλημάτων. Η ενσωμάτωση προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου και ηλεκτρονικών ισχύος στους μετατροπείς συχνότητας ενισχύει την αποτελεσματικότητα και την απόδοσή τους, αλλά αυξάνει την ευαισθησία τους σε σφάλματα και αστοχίες. Τα κοινά προβλήματα με τους μετατροπείς συχνότητας περιλαμβάνουν υπερθέρμανση, μείωση απόδοσης πυκνωτών, βλάβες ημιαγωγών και δυσλειτουργίες λογισμικού, οι οποίες μπορεί να έχουν αλυσιδωτές επιπτώσεις σε ολόκληρο το σύστημα ανεμογεννητριών. Η αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει πρακτικές προληπτικής συντήρησης, τεχνικές παρακολούθησης κατάστασης και πρωτόκολλα ταχείας αντίδρασης. Εφαρμόζοντας στρατηγικές προληπτικής συντήρησης και αξιοποιώντας την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, οι χειριστές μπορούν να εντοπίσουν έγκαιρα

τα πιθανά προβλήματα, να εκτελέσουν στοχευμένες παρεμβάσεις και να βελτιστοποιήσουν την αξιοπιστία και τη διάρκεια λειτουργίας των μετατροπών συχνότητας σε εφαρμογές ανεμογεννητριών.

5.2.2.4 Σφάλματα σύνδεσης:

Σφάλματα στις ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας, όπως μεταξύ της γεννήτριας και του μετατροπέα συχνότητας, μπορούν να προκαλέσουν ηλεκτρικά προβλήματα και ζημιές. Αυτά τα σφάλματα μπορεί να οδηγήσουν σε προσωρινές αυξομειώσεις φορτίου, διακυμάνσεις τάσης και άλλες διαταραχές που επηρεάζουν τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας, όπως τα γρανάζια στο κιβώτιο ταχυτήτων. Είναι πολύ σημαντικό να κατανοούμε και να μειώνουμε τις επιπτώσεις αυτών των ηλεκτρικών προβλημάτων για να εξασφαλίσουμε την αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία των ανεμογεννητριών.

5.2.3 Πτερύγια

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, λόγω της έκθεσής τους σε υψηλότερα επίπεδα υγρασίας και αλατιού, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην φθορά των πτερυγίων τους και των μεταλλικών εξαρτημάτων του συστήματος μετάδοσης κίνησης. Αυτή η φθορά είναι ένα κρίσιμο ζήτημα που όχι μόνο επηρεάζει την απόδοση και τη μακροζωία των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, αλλά θέτει επίσης σημαντικές προκλήσεις συντήρησης σε σύγκριση με τις χερσαίες ανεμογεννήτριες. Ένας ακόμα λόγος για τις αστοχίες οφείλεται και σε σχεδιαστικές/κατασκευαστικές λεπτομέρειες όπως [103]: ακατάλληλη αντικεραυνική προστασία, ανεπαρκή ακαμψία, ακατάλληλη σκλήρυνση, δυσκολίες με τις αρθρώσεις και τα σημεία σύνδεσης. Μια τυπική διαδικασία επισκευής αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα [101]:

1. Επιθεώρηση

Πριν γίνει έλεγχος και σήμανση ελαττωματικών περιοχών ώστε να γίνει η επισκευή, πρέπει η ανεμογεννήτρια να σταματήσει έχοντας τα δύο πτερύγια επάνω και το άλλο πτερύγιο ευθεία προς τα κάτω κατά μήκος του πύργου. Έπειτα γίνεται λήψη φωτογραφίας της ανεμογεννήτριας και των επιθεωρούμενων πτερύγων. Για την επιθεώρηση γίνεται χρήση εξοπλισμού όπως:

- Χρήση φωτογραφικής κάμερας (camera)
- Χρήση μη επανδρωμένου αεροσκάφους (drone)
- Δοκιμή υπερήχων (ultrasonic)
- Έλεγχος διάτμησης (shearography)
- Θερμογραφία (thermography)
- Ψηφιακή ακτινογραφία (DIGITAL X-RAY)

2. Τρίψιμο και στρογγυλέματα

Πρέπει να γίνεται τρίψιμο στις ελαττωματικές περιοχές και να αποφεύγονται φουσαλίδες αέρα, ξένα σώματα, ρωγμές. Εάν εξακολουθούν να υπάρχουν ρωγμές ή φουσαλίδες αέρα, η εσωτερική λείανση πρέπει να σταματήσει.

3. Καθαρισμός

Η επιφάνεια θα πρέπει να καθαρίζεται πολύ καλά με ηλεκτρική σκούπα ώστε η λειαντική σκόνη να αφαιρεθεί.

4. Αναφορά επισκευής

Πρέπει να καταγράφονται όλα τα στοιχεία επισκευής, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

- Ελαττωματική επέκταση.
- Επισκευή προέκτασης συμπεριλαμβανομένης της λοξοτομής
- Αριθμός στρώσεων γυαλιού
- Τύπος στρώσεων γυαλιού
- Τυχόν ενοποίηση της κύριας επισκευής

5. Επικάλυψη

Στη συνέχεια, τοποθετούνται στρώματα υαλοβάμβακα ανάλογα με τον αριθμό των στρωμάτων που έχουν υποστεί ζημιά. Κάθε στρώση εφαρμόζεται κατά μήκος της κατεύθυνσης των ινών, ξεκινώντας από την πιο εξωτερική. Το υλικό πρέπει

να σκληρυνθεί επαρκώς και να χαμηλώσει η θερμοκρασία. Αν η επισκευασμένη περιοχή απαιτεί πολλαπλά στρώματα υαλοβάμβακα, η γωνιακή τοποθέτηση πρέπει να ελεγχθεί και να διορθωθεί πριν από την εφαρμογή νέας στρώσης. Μετά την εφαρμογή, το νέο υλικό ελέγχεται για ανωμαλίες ή κάμψεις.

6. Ενίσχυση άκρων

Οι στρώσεις γυαλιού πρέπει να τοποθετούνται ανάλογα με τον αριθμό των κατεστραμμένων στρωμάτων που πρέπει να αντικατασταθούν. Είναι σημαντικό να τηρούνται τα προκαθορισμένα επίπεδα πάχους του γυαλιού, ιδίως στο πίσω μέρος, γιατί αλλιώς η αύξηση του πάχους θα δημιουργήσει προβλήματα κατά τη συναρμολόγηση των πτερυγίων. Η κάθε στρώση πρέπει να τοποθετείται σύμφωνα με την κατεύθυνση των ινών, ξεκινώντας από τη μεγαλύτερη στρώση, μακριά από το σύνολο των πτερυγίων. Επίσης, είναι σημαντικό η εφαρμογή του γυαλιού να τελειώνει στην ίδια επίπεδη επιφάνεια με το υπόλοιπο τμήμα της επισκευασμένης περιοχής. Το υλικό πρέπει να σκληρύνει μέχρι ο πολυεστέρας να φτάσει στη μέγιστη σκληρότητά του και να μειωθεί η θερμοκρασία. Αν η επισκευασμένη περιοχή απαιτεί πολλαπλές στρώσεις γυαλιού, πρέπει να ελεγχθεί και να διορθωθεί η κλίση πριν από την τοποθέτηση νέας στρώσης.

7. Επικάλυψη με κολλητικό υλικό στο περίγραμμα

Η πρόσθετη επίστρωση κολλητικού υλικού γύρω από την επισκευή πρέπει να καλύπτει τόσο το μήκος όσο και το πλάτος της περιοχής. Το υλικό θα πρέπει να σκληρυνθεί μέχρι να φτάσει στην αιχμή του ο πολυεστέρας και να μειωθεί η θερμοκρασία

8. Τρίψιμο και στρογγύλεμα

Ξαναγίνεται το τρίψιμο και σε όλες τις προεξέχουσες άκρες πρέπει να δημιουργηθεί στο κάτω μέρος του ελαττώματος ομοιόμορφη επιφάνεια. Αυτό πρέπει να ελέγχεται μέσω μιας πλάκας επιφάνειας.

9. Καθαρισμός

Είναι η ίδια διαδικασία καθαρισμού που περιγράφεται στο τρίτο βήμα.

10. Τελείωμα

Πριν από το φινίρισμα, θα πρέπει να ελεγχθεί ξανά η επισκευασμένη περιοχή της πτέρυγας. Τέλος, η επισκευασμένη περιοχή της πτέρυγας θα πρέπει να τελειώσει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

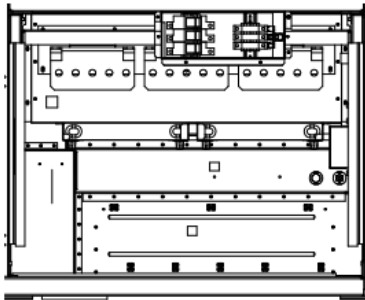
Στον τομέα των τεχνικών ανεμογεννητριών, οι δύο κύριες κατηγορίες που μπορεί να δουλέψει κανείς είναι στις επισκευές και στην συντήρηση. Επιπλέον, υπάρχουν υποκατηγορίες για καθένα από αυτά [102]. Η συντήρηση χωρίζεται σε εξωτερική και εσωτερική, ενώ στις επισκευές είναι τα μηχανικά, ηλεκτρικά και λειτουργικά τμήματα. Οι ηλεκτρικές, μηχανικές και λειτουργικές πτυχές του επαγγέλματος δίνουν προτεραιότητα στην τεχνική ικανότητα, ενώ η συντήρηση είναι πιο προσιτή, καθώς σχεδόν οποιοσδήποτε με βασική εκπαίδευση και ένα εγχειρίδιο (εικόνα 6-1) μπορεί να την αναλάβει.

■ Connection procedure

**WARNING!** See and obey the safety instructions of the converter. If you ignore them, injury or death, or damage to the equipment can occur.

**WARNING!** Apply grease to stripped aluminum conductors before attaching them to non-coated aluminum cable lugs. Obey the grease manufacturer's instructions. Aluminum-aluminum contact can cause oxidation in the contact surfaces.

1. Open the door of the main breaker cubicle. Unlock the handle, release it from the holder and turn upwards to release the door locking mechanism.
2. Remove the shroud that protects the grid cable terminals.
3. Lead the grid cables into the inside of the cubicle.
4. Fasten the grid cables to the grid connection terminals. Connect the phase conductors to terminals L1, L2 and L3. Tighten the conductors to 120 N·m (89 lbf·ft). Tightening torques are also given in chapter [Technical data](#).
5. Connect ground conductors or cables to the cabinet PEN (ground) busbar.
6. Provide support for the connections whenever necessary.
7. Refit all shrouds removed earlier.
8. Close the door.



Εικόνα 6-1: Δείγμα από εγχειρίδιο για την συντήρηση Α/Γ, Πηγή: [87].

6.1 Προϋποθέσεις και προσόντα:

Ένας τεχνικός ανεμογεννητριών είναι ένας ευρύς όρος που μπορεί να περιγράψει έναν εργαζόμενο που εκτελεί εργασίες σε μια ανεμογεννήτρια για διάφορα συστήματα στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας. Οι συγκεκριμένοι τεχνικοί διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη λειτουργία, συντήρηση και επισκευή των ανεμογεννητριών, διασφαλίζοντας την αποτελεσματική απόδοση και μακροζωία τους. Σε αυτόν τον τομέα, υπάρχουν εξειδικευμένες θέσεις όπως τεχνικοί ανεμογεννητριών για πτερύγια, διαδικασίες κατασκευής, συναρμολόγηση, επισκευές, συντήρηση, εκπαίδευση άλλων και ηγετικούς ρόλους. Αυτοί οι ειδικοί διαθέτουν σε βάθος γνώσεις και δεξιότητες προσαρμοσμένες στον συγκεκριμένο τομέα, συμβάλλοντας στη συνολική επιτυχία των έργων αιολικής ενέργειας. Οι θεμελιώδεις δεξιότητες που απαιτούνται από τους τεχνικούς ανεμογεννητριών και τους εργαζόμενους στη γραμμή περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα εργασιών όπως:

- αναρρίχηση
- βαφή
- εκτέλεση επισκευών
- συντήρηση
- λειτουργίας συστημάτων SCADA
- διεξαγωγή επιθεωρήσεων
- διατήρηση των προτύπων ασφαλείας

Οι τεχνικοί ανεμογεννητριών συχνά δεν χρειάζονται ειδικές εκπαιδευτικές προϋποθέσεις, πιστοποιήσεις ή άδειες, καθώς οι εταιρείες τους παρέχουν την απαραίτητη εκπαίδευση. Κάποια βασικά κριτήρια που ζητούν οι εργοδότες είναι η αντοχή σε δύσκολες συνθήκες και η απουσία φόβου για τα ύψη.

Οι τεχνικοί που συντηρούν τα πτερύγια των ανεμογεννητριών επιθεωρούν, επισκευάζουν και αντικαθιστούν τα πτερύγια για να εξασφαλίσουν την καλύτερη δυνατή απόδοση μειώνοντας έτσι τον χρόνο διακοπής λειτουργίας. Διεξάγουν ε-

πίσης τακτικές επιθεωρήσεις και επισκευές για να προλάβουν και να αντιμετωπίσουν μηχανικά προβλήματα. Οι έμπειροι τεχνικοί και εκπαιδευτές μεταδίδουν τις γνώσεις τους στους νέους τεχνικούς, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου εργατικού δυναμικού.

Τα καθήκοντα ενός νέου τεχνικού περιλαμβάνουν την αναρρίχηση σε πύργους άνω των 70 μέτρων πολλές φορές την ημέρα, φορώντας πάνω από 11 κιλά εξοπλισμού και εργαλεία αναρρίχησης. Πρέπει να ακολουθούν όλες τις διαδικασίες υγείας και ασφάλειας, να συμμετέχουν στον σχεδιασμό των καθημερινών δραστηριοτήτων να καταγράφουν τα δεδομένα σε υπολογιστή συντάσσοντας αναφορές, να τηρούν τις απαραίτητες γραπτές διαδικασίες και να λαμβάνουν γνώση των εγχειριδίων εξοπλισμού. Επίσης, αλληλοεπιδρούν με ενδιαφερόμενους σύμφωνα με τις οδηγίες των προϊσταμένων για την ασφάλεια τους.

Οι τεχνικοί πρέπει να γνωρίζουν τις επιπτώσεις των καιρικών συνθηκών και να ενημερώνονται από κατάλληλες πλατφόρμες για την εξέλιξη του καιρού. Η χρήση και η εξοικείωση με διάφορα μέσα ατομικής προστασίας (ΜΑΠ) είναι σημαντική για την ασφάλεια και την προστασία των τεχνικών ανεμογεννητριών κατά τη διάρκεια των εργασιών συντήρησης. Αυτό περιλαμβάνει την επιδέξια χρήση ιμάντων ασφαλείας, κατάλληλη ενδυμασία όπως γάντια, κράνος, φακοί και κάποιον επιπλέον εργαλείων, που απεικονίζεται στην εικόνα 6-2.



Εικόνα 6-2: Μέσα ατομικής προστασίας τεχνικού Α/Γ, Πηγή: [103].

Σε πιο απαιτητικές συνθήκες, μπορούν να συνεχίσουν συνεισφέρουν, αλλά πάντα υπό επίβλεψη ενός ειδικευμένου μηχανικού στη διασφάλιση της λειτουργίας και εκτέλεσης προγραμματισμένων και μη, δραστηριοτήτων μηχανικής, ηλεκτρικής και υδραυλικής συντήρησης σε ανεμογεννήτριες. Αυτό περιλαμβάνει την αντικατάσταση σημαντικών εξαρτημάτων στροβίλων (π.χ. γεννήτριες και κιβώτια ταχυτήτων), τον εντοπισμό βλαβών, σφαλμάτων και την εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών [104].

Καθώς οι εκπαιδευόμενοι προχωρούν πέρα από το αρχικό στάδιο, αναμένεται να γίνουν σημαντικά πιο αυτόνομοι και ικανοί. Αυτό συνεπάγεται διάφορες ευθύνες, όπως η ανάλυση βλαβών μέσω τηλεφωνικής επικοινωνίας με τον συντονιστή συντήρησης, την διεξαγωγή απλών επισκευών ανεμογεννητριών, την αντιμετώπιση προβλημάτων και τον εντοπισμό ζημιών. Επιπλέον, συμμετέχουν σε πολύπλοκες διαδικασίες επισκευής σε συνεργασία με τον επικεφαλής τεχνικό και εκτελούν προγραμματισμένες δραστηριότητες συντήρησης/επιθεώρησης με εργολάβους. Συντάσσουν αναφορές και λίστες ελέγχου για να ενημερώσουν διεξοδικά τον Διευθυντή Λειτουργιών, τους πελάτες σχετικά με τις εργασίες στροβίλων, να εκτελέσουν επισκευές ή αντικαταστάσεις εξαρτημάτων, να διαχειριστούν το απόθεμα ανταλλακτικών και να διασφαλίσουν την επιτόπου ευθύνη υλικών. Επιπλέον, παρακολουθούν τις αναφορές εξυπηρέτησης, καθοδηγούν τη διαδικασία εξυπηρέτησης για ακριβή καταγραφή εξόδων, εξασφαλίζουν υψηλής ποιότητας και έγκαιρη ολοκλήρωση εργασιών και εκτελούν λειτουργίες με τον πιο οικονομικό τρόπο για την εταιρεία.

Οι τεχνικοί της Nordex είναι επίσης υπεύθυνοι για τα υλικά, τα εργαλεία και την περιουσία της εταιρίας, ακολουθώντας τις οδηγίες και τους κανονισμούς της, όπως και όλες τις σχετικές οδηγίες υγείας και ασφάλειας. Είναι πολύ σημαντικό να δουλεύουν με ασφάλεια, τόσο για τον εξοπλισμό όσο και για τους ίδιους. Η μετάβασή τους σε πιο αυτόνομο ρόλο δείχνει ότι έχουν κατανοήσει καλύτερα πώς λειτουργούν οι ανεμογεννήτριες και οι διαδικασίες συντήρησης, καθώς και ότι έχουν βελτιώσει τις τεχνικές τους δεξιότητες και την ικανότητά τους να παίρνουν αποφάσεις. Αυτή η αλλαγή είναι μια σημαντική φάση στην επαγγελματική τους

ανάπτυξη, προχωρώντας από αρχάριους σε ικανούς και αυτοδύναμους επαγγελματίες που μπορούν να διαχειρίζονται αποτελεσματικά μια ποικιλία καθηκόντων και ευθυνών. [105].

6.2 Εργασιακό περιβάλλον και συνθήκες:

Οι τεχνικοί ανεμογεννητριών εργάζονται σε διάφορα μέρη, όπως χερσαία και υπεράκτια αιολικά πάρκα, σε αγροτικές και αστικές περιοχές, και σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Η δουλειά τους περιλαμβάνει σωματική καταπόνηση και πιθανούς κινδύνους. Συχνά επικοινωνούν με τους προϊσταμένους και τους συναδέλφους τους, είτε από κοντά είτε μέσω τηλεφώνου και email. Έχουν μεγάλη ευθύνη για την ασφάλεια την δική τους και των άλλων. Οι τεχνικοί εργάζονται τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους, συχνά σε επικίνδυνες συνθήκες και με επικίνδυνο εξοπλισμό. Η δουλειά τους απαιτεί συχνή αναρρίχηση σε μεγάλα ύψη, κίνηση σε στενούς χώρους και προσαρμογή σε μεταβαλλόμενο φωτισμό και θερμοκρασίες. Πρέπει να αντιμετωπίζουν τον θόρυβο και τη ρύπανση, γεγονός που καθιστά τη χρήση μέσων ατομικής προστασίας (ΜΑΠ) και την τήρηση των πρωτοκόλλων ασφαλείας πολύ σημαντική.

Η απόδοσή τους απαιτεί ακρίβεια, καθώς τα σφάλματα στη συντήρηση των στροβίλων μπορεί να έχουν επιζήμιες συνέπειες, επηρεάζοντας τόσο τους συναδέλφους τεχνικούς όσο και τη λειτουργική απόδοση των ανεμογεννητριών. Συνήθως εργάζονται με πλήρες ωράριο, υπερβαίνοντας συχνά τις 40 ώρες την εβδομάδα, και μπορεί να ακολουθούν είτε ένα καθορισμένο είτε ακανόνιστο χρονοδιάγραμμα ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τις απαιτήσεις του έργου. Επιπλέον, η μετακίνηση στους χώρους εργασίας είναι ένα πολύ συχνό φαινόμενο, απαιτώντας μεταφορά με αυτοκίνητο, ή φορτηγό ώστε να διασφαλιστεί η έγκαιρη εκτέλεση εργασιών συντήρησης και επισκευών [106]. Τα χρονοδιαγράμματα συντήρησης για τις ανεμογεννήτριες υπαγορεύονται κυρίως από τον αριθμό των ωρών λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, αν και αυτά τα χρονοδιαγράμματα μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή. Οι ανεμογεννήτριες παρακολουθούνται συνεχώς ηλεκτρονικά από ένα κεντρικό γραφείο, εξασφαλίζοντας συνεχή επιτήρηση 24 ώρες το 24ωρο.

Σε περίπτωση που εντοπιστεί κάποιο πρόβλημα, οι τεχνικοί, αποστέλλονται στο χώρο για να εκτελέσουν τις απαραίτητες επισκευές. Οι συνήθεις εργασίες συντήρησης περιλαμβάνουν την επιθεώρηση διαφόρων εξαρτημάτων και την λίπανση για τη διασφάλιση της βέλτιστης λειτουργικότητας. Για ανεμογεννήτριες που λειτουργούν όλο το χρόνο, οι προγραμματισμένες συνεδρίες συντήρησης μπορούν να πραγματοποιηθούν οπουδήποτε από μία έως τρεις φορές ετησίως. Παρά το γεγονός ότι εργάζονται κατά κύριο λόγο με πλήρες ωράριο, μπορεί επίσης να είναι σε ετοιμότητα για κλήσεις έκτακτης ανάγκης τα βράδια και τα σαββατοκύριακα, τονίζοντας την ανάγκη για γρήγορο εντοπισμό και επίλυση προβλημάτων όταν μια ανεμογεννήτρια δυσλειτουργεί.

Οι τεχνικοί συντήρησης ανεμογεννητριών συχνά διασχίζουν αγροτικά τοπία, όπου βρίσκονται πολλά αιολικά πάρκα. Το περιβάλλον εργασίας τους είναι κυρίως σε εξωτερικούς χώρους, συχνά σε μεγάλα ύψη και πάντα μαζί με έναν συνάδελφο για ασφάλεια. Κατά τη διάρκεια εργασιών όπως η επισκευή πτερύγων, χρησιμοποιούν τεχνικές καταρρίχησης για να κατέβουν από την ατράκτο σε συγκεκριμένο σημείο της πτέρυγας που απαιτεί επιθεώρηση. Τα ύψη υπερβαίνουν των 80 μέτρων, ωστόσο έχουν εξοπλισμό προστασίας από πτώση και εργαλεία μεταφοράς. Στον περιορισμένο χώρο της ατράκτου, πραγματοποιούν συντήρηση σε μηχανικά συστήματα, επιδεικνύοντας την ευελιξία τους στην μετακίνηση σε διαφορετικές συνθήκες εργασίας. Ακόμη, οι αρμοδιότητές τους επεκτείνονται στη διαχείριση του χώρου, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει τη καταγραφή αποθεμάτων ανταλλακτικών, τον συντονισμό με τους προμηθευτές και την επίβλεψη των καθημερινών λειτουργιών των ανεμογεννητριών. Επιπλέον, αναλαμβάνουν διευθυντικά καθήκοντα, ειδικά σε μεγάλα αιολικά πάρκα, όπου επιβλέπουν τη συντήρηση μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών. Αυτό σημαίνει ότι παραγγέλλουν τα απαραίτητα ανταλλακτικά, διασφαλίζουν ότι υπάρχουν αρκετά αποθέματα και συντονίζονται με άλλους ειδικούς, όπως ηλεκτρολόγους, ηλεκτρονικούς, μηχανολόγους για πιο εκτεταμένες συντηρήσεις ή επισκευές [107].

6.3 Πρωτόκολλα ασφαλείας

Υπάρχει σημαντικό επίπεδο κινδύνου στο επάγγελμα του τεχνικού ανεμογεννητριών. Για την μείωση αυτών των κινδύνων και τη διασφάλιση της ασφάλειας του προσωπικού, η τήρηση συγκεκριμένων πρωτοκόλλων είναι υψίστης σημασίας. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο είναι η Βασική Εκπαίδευση Ασφάλειας [Basic Safety Training (BST)] του Παγκόσμιου Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας [Global Wind Organization (GWO)].

Αυτό το εκπαιδευτικό πρόγραμμα, που αναπτύχθηκε από την GWO, έχει σχεδιαστεί για να δώσει στους τεχνικούς ανεμογεννητριών τις απαραίτητες δεξιότητες και γνώσεις για να εκτελούν με ασφάλεια τα καθήκοντά τους σε διάφορα περιβάλλοντα εργασίας. Αυτό περιλαμβάνει τέσσερις βασικές ενότητες, η καθεμία επικεντρώνεται σε σημαντικά θέματα ασφάλειας και αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Υλοποιείται κατά τη διάρκεια τεσσάρων ή πέντε ημερών, όπου οι συμμετέχοντες υποβάλλονται σε αυστηρή εκπαίδευση στην εργασία σε ύψος, τις πρώτες βοήθειες, την ενημέρωση για τη φωτιά και την επιβίωση στη θάλασσα.

Με την ολοκλήρωση του προγράμματος GWO BST, οι τεχνικοί ανεμογεννητριών αποδεικνύουν τη δέσμευσή τους να διατηρούν τα υψηλότερα πρότυπα ασφάλειας και επαγγελματισμού στον τομέα τους. Εξοπλισμένοι με τις γνώσεις και τις δεξιότητες που αποκτήθηκαν μέσω αυτής της εκπαίδευσης, οι τεχνικοί είναι καλύτερα προετοιμασμένοι να αντιμετωπίσουν τους κινδύνους της δουλειάς τους και να αντιδράσουν αποτελεσματικά σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Η πιστοποίηση GWO BST χρησιμεύει ως απόδειξη της ικανότητας και της αφοσίωσής τους στη διασφάλιση της ασφάλειας των ίδιων και των συναδέλφων τους, συμβάλλοντας έτσι στη συνολική ακεραιότητα και βιωσιμότητα της βιομηχανίας αιολικής ενέργειας.

6.3.1 Οδηγίες για εργασία σε ύψος

Στο πρώτο μέρος του εκπαιδευτικού προγράμματος, οι τεχνικοί ανεμογεννητριών επικεντρώνονται στην εκμάθηση βασικών δεξιοτήτων για την εργασία σε ύψος. Αυτό το μέρος του προγράμματος εστιάζει στην τεχνική αναρρίχησης και τις ασφαλείς διαδικασίες. Οι συμμετέχοντες μαθαίνουν πώς να χρησιμοποιούν

αποτελεσματικά τον εξοπλισμό ασφαλείας, όπως ιμάντες και σχοινιά αποτροπής πτώσης, για να μειώσουν τους κινδύνους της εργασίας σε μεγάλο ύψος. Επιπλέον, δίνεται μεγάλη έμφαση σε μέτρα ασφαλείας κατά τη διάσωση, έτσι ώστε οι τεχνικοί να είναι έτοιμοι να ανταποκριθούν γρήγορα και αποτελεσματικά σε περιστάσεις ανάγκης.

Η εκπαίδευση στο ανέβασμα αιωρούμενων σκαλοπατιών και στην εργασία σε εξωτερικά μέρη των ανεμογεννητριών απαιτεί τόσο σωματική δεξιότητα όσο και πνευματική επιδεξιότητα. Μέσω πρακτικών ασκήσεων και προσομοιώσεων, οι τεχνικοί εξοικειώνονται με τη δομή των σκαλοπατιών των ανεμογεννητριών και μαθαίνουν πώς να μετακινούνται αποτελεσματικά, τηρώντας αυστηρά τα πρωτόκολλα ασφαλείας.

Επιπρόσθετα, οι τεχνικοί εκπαιδεύονται στη συσκευή Milan που είναι ένα βασικό εργαλείο τόσο στις επιχειρήσεις διάσωσης όσο και στην προσωπική ασφάλεια κατά την εργασία τους σε μεγάλο ύψος (εικόνα 6-3). Αυτή η καινοτόμος συσκευή, όταν συνδυάζεται με ολοκληρωμένη εκπαίδευση, δίνει τη δυνατότητα στους τεχνικούς να εκτελούν ελεγχόμενες καταβάσεις και διασώσεις έκτακτης ανάγκης με ακρίβεια και εμπιστοσύνη.



Εικόνα 6-3: Συσκευή Milan, Πηγή: [108].

6.3.2 Πρώτες βοήθειες

Το δεύτερο μέρος του εκπαιδευτικού προγράμματος επικεντρώνεται στον εξοπλισμό των τεχνικών ανεμογεννητριών για ολοκληρωμένες δεξιότητες πρώτων βοηθειών. Δεδομένης της απουσίας άμεσης πρόσβασης σε ιατρικές υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης σε απομονωμένες περιοχές, το βάρος πέφτει στους τεχνικούς να είναι προετοιμασμένοι να χειριστούν αποτελεσματικά επείγουσες ιατρικές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Το πρόγραμμα εκπαίδευσης καλύπτει ένα ευρύ φάσμα τεχνικών πρώτων βοηθειών, που περιλαμβάνουν από τη βασική περιποίηση τραυμάτων έως την προηγμένη υποστήριξη ζωής, προσαρμοσμένες για τις ιδιαίτερες ανάγκες κατά την συντήρηση ανεμογεννητριών. Μέσω διαδραστικών ενοτήτων μάθησης και προσομοιωμένων σεναρίων, οι συμμετέχοντες αναπτύσσουν την ικανότητα και την αυτοπεποίθηση που απαιτείται για να αξιολογούν, σταθεροποιούν και διαχειρίζονται ιατρικές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης χωρίς βοήθεια. Έχει μεγάλη σημασία η εκπαίδευση για τη χρήση απινιδωτών, οι οποίοι αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την αντιμετώπιση καρδιακών προβλημάτων έκτακτης ανάγκης σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει άμεση ιατρική βοήθεια (εικόνα 6-4).



Εικόνα 6-4: Απινιδωτής, Πηγή: [109].

Οι τεχνικοί λαμβάνουν πλήρεις οδηγίες για τη σωστή χρήση των απινιδωτών. Μαθαίνουν να αναγνωρίζουν τα σημάδια καρδιακής προσβολής και να παρέχουν γρήγορες παρεμβάσεις που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τα αποτελέσματα.

Οι πρακτικές ασκήσεις επιτρέπουν στους συμμετέχοντες να εφαρμόσουν τις γνώσεις τους σε προσομοιωμένες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, βελτιώνοντας την ικανότητά τους να ανταποκρίνονται ήρεμα και αποτελεσματικά υπό πίεση. Με την εκμάθηση τεχνικών πρώτων βοηθειών και τη χρήση απινιδωτή, το εκπαιδευτικό πρόγραμμα επιτρέπει στους τεχνικούς να δρουν αποφασιστικά σε κρίσιμες στιγμές, σώζοντας ζωές και μειώνοντας τις επιπτώσεις ιατρικών εκτάκτων περιστατικών σε απομακρυσμένα αιολικά πάρκα. Εκτός από τις τεχνικές δεξιότητες, η εκπαίδευση στις πρώτες βοήθειες τονίζει τη σημασία της αποτελεσματικής επικοινωνίας και συνεργασίας σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Οι συμμετέχοντες μαθαίνουν να συντονίζονται με τους συναδέλφους τους και τις εξωτερικές υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, διευκολύνοντας τις απρόσκοπτες και συντονισμένες παρεμβάσεις σε σύνθετες ιατρικές καταστάσεις.

Μέσω ασκήσεων που βασίζονται σε σενάρια, οι συμμετέχοντες αναπτύσσουν δεξιότητες ομαδικής εργασίας και ηγεσίας, που είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική ανταπόκριση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όταν εργάζονται σε ύψος. Το εκπαιδευτικό πρόγραμμα ενθαρρύνει μια νοοτροπία ετοιμότητας και συνεργασίας, διασφαλίζοντας ότι οι τεχνικοί ανεμογεννητριών είναι όχι μόνο ικανοί στην παροχή πρώτων βοηθειών, αλλά και εξοικειωμένοι με τη συνεργασία για την προστασία της υγείας και της ευημερίας των συναδέλφων τους σε δύσκολες συνθήκες.

6.3.3 Πυροσβεστική επίγνωση

Το τρίτο μέρος του εκπαιδευτικού προγράμματος εστιάζει στην ευαισθητοποίηση για τις πυρκαγιές, αναγνωρίζοντας τους αυξημένους κινδύνους που σχετίζονται με πυρκαγιές στις ανεμογεννήτριες. Δεδομένων των μοναδικών προκλήσεων που παρουσιάζει η εκκένωση από μεγάλα ύψη κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, δίνεται έμφαση στην παροχή γνώσεων και δεξιοτήτων στο προσωπικό για να αντιμετωπίζει τέτοια σενάρια με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα.

Η εκπαίδευση πυρασφάλειας περιλαμβάνει θεωρητικές οδηγίες για τη συμπεριφορά των πυρκαγιών, τους τύπους πυροσβεστήρων και τις διαδικασίες εκκένωσης, συμπληρωμένες από πρακτικές ασκήσεις που στοχεύουν στην ενίσχυση

των δεξιοτήτων πυρόσβεσης και εκκένωσης. Το πρόγραμμα παρέχει ολοκληρωμένες γνώσεις πυρασφάλειας, επιτρέποντας στα άτομα να ανταποκρίνονται με αυτοπεποίθηση και αποφασιστικότητα σε περίπτωση πυρκαγιάς, διασφαλίζοντας τη δική τους ασφάλεια και αυτή των συναδέλφων τους.

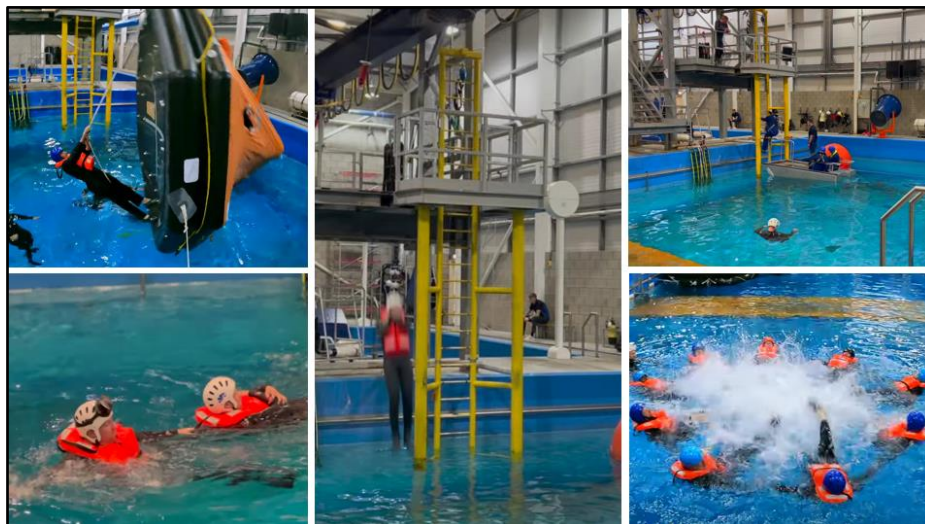
Το πρόγραμμα σπουδών καλύπτει βασικά θέματα όπως τεχνικές πρόληψης, ανίχνευσης και καταστολής πυρκαγιών, εξοπλίζοντας τους συμμετέχοντες με τις απαραίτητες γνώσεις για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των κινδύνων πυρκαγιάς. Πρακτικές επιδείξεις και προσομοιώσεις επιτρέπουν στους συμμετέχοντες να εφαρμόζουν τις δεξιότητες πυρόσβεσης σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, ενισχύοντας τη μνήμη και την ικανότητά τους για γρήγορη και αποφασιστική δράση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, οι ασκήσεις εκκένωσης ενσωματώνονται στο εκπαιδευτικό πρόγραμμα, επιτρέποντας στα άτομα να εφαρμόζουν ασφαλείς διαδικασίες εκκένωσης υπό ρεαλιστικές συνθήκες, διασφαλίζοντας την ετοιμότητα για πραγματικές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης που σχετίζονται με πυρκαγιές.

6.3.4 Επιβίωση στη θάλασσα

Το τέταρτο μέρος της βασικής εκπαίδευσης ασφάλειας του GWO εστιάζει στην επιβίωση στη θάλασσα και είναι ζωτικής σημασίας για όσους εργάζονται σε υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Δεδομένων των κινδύνων για τους τεχνικούς που εργάζονται στη θάλασσα, η γνώση των τεχνικών επιβίωσης είναι απαραίτητη για την ασφάλεια και την ευημερία του προσωπικού σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Το πρόγραμμα εκπαίδευσης έχει σχεδιαστεί προσεκτικά για να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις των υπεράκτιων περιβαλλόντων και είναι κατάλληλο για συμμετέχοντες με διαφορετικές ικανότητες κολύμβησης και επίπεδα εμπειρίας. Παρέχοντας στοχευμένη διδασκαλία και εξατομικευμένη επίβλεψη, το πρόγραμμα δημιουργεί ένα υποστηρικτικό μαθησιακό περιβάλλον που ενθαρρύνει την απόκτηση δεξιοτήτων και την ανάπτυξη ικανοτήτων, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη και την ετοιμότητα των συμμετεχόντων.

Βασικό στοιχείο αυτής της ενότητας είναι οι πρακτικές ασκήσεις που προσομοιώνουν ρεαλιστικά σενάρια υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Οι συμμετέχοντες

συμμετέχουν σε δραστηριότητες όπως μεταφορές με σκάφος, ελεγχόμενες καταβάσεις στο νερό και φούσκωμα σωσιβίων, ώστε να εξοικειωθούν με βασικές δεξιότητες και τεχνικές επιβίωσης (εικόνα 6-5).



Εικόνα 6-5: Τεχνικές επιβίωσης στην θάλασσα, Τροποποιημένο από: [110].

6.4 Σταδιοδρομία και μισθοί

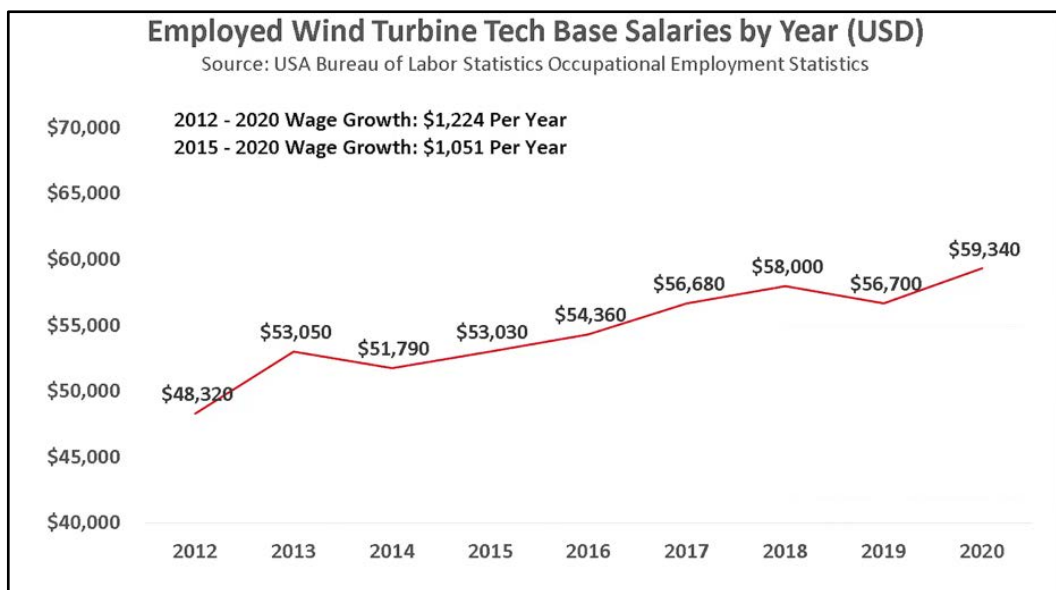
Οι εταιρείες συχνά προσφέρουν εκπαιδευτικά σεμινάρια και προγράμματα ανάπτυξης για όσους ενδιαφέρονται να γίνουν τεχνικοί ανεμογεννητριών ή εργάτες παραγωγής γραμμής. Αυτά τα προγράμματα περιλαμβάνουν: επαγγελματική κατάρτιση, τεχνικές σχολές, κολέγια και μαθητεία. Μέσα από αυτές τις επιλογές, οι ενδιαφερόμενοι αποκτούν τις απαραίτητες γνώσεις, δεξιότητες και πρακτική εμπειρία για να επιτύχουν στον τομέα τους. Επίσης, προσφέρουν ευκαιρίες για επαγγελματική ανάπτυξη και εξέλιξη, επιτρέποντας στους συμμετέχοντες να ακολουθήσουν μια επιτυχημένη καριέρα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Επιπλέον, τα προγράμματα αυτά παρέχουν ολοκληρωμένη εκπαίδευση σε θέματα όπως ηλεκτρικά συστήματα, μηχανικά εξαρτήματα, πρωτόκολλα ασφαλείας και τεχνικές αντιμετώπισης προβλημάτων. Συνδυάζοντας τη θεωρητική μάθηση με την πρακτική εξάσκηση, εξασφαλίζουν ότι οι συμμετέχοντες αναπτύσσουν ισχυρές τεχνικές γνώσεις και πρακτικές δεξιότητες που είναι απαραίτητες για την επιτυχία στον τομέα. Επίσης, συχνά συνεργάζονται με βιομηχανικούς εταίρους

για να προσφέρουν πραγματική εμπειρία και πιστοποιήσεις, ενισχύοντας την απασχολησιμότητα και τις προοπτικές καριέρας των συμμετεχόντων.

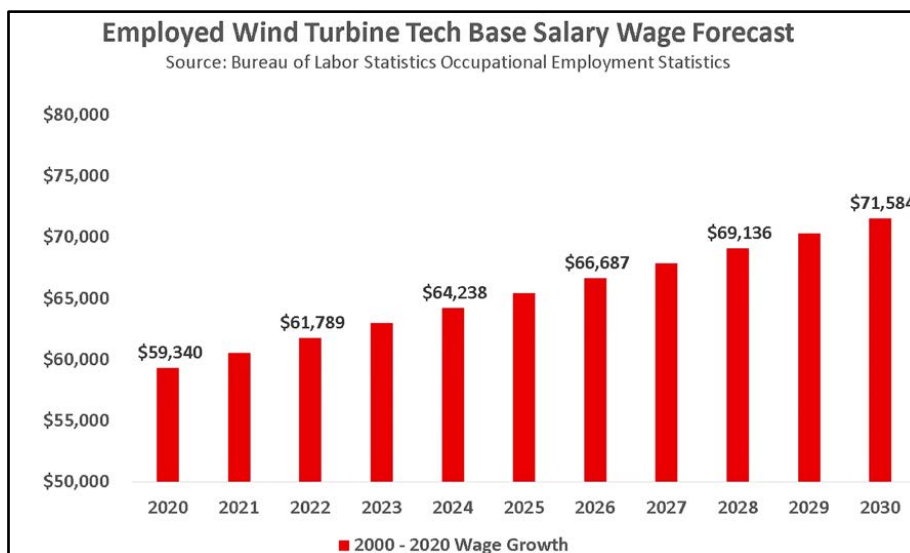
Τα προγράμματα μαθητείας είναι πολύτιμα για όσους θέλουν να μπουν στον τομέα της συντήρησης και επισκευής αιολικής ενέργειας. Αυτά τα προγράμματα περιλαμβάνουν εκπαίδευση στην εργασία και διδασκαλία στην τάξη, επιτρέποντας στους μαθητευόμενους να μαθαίνουν από έμπειρους επαγγελματίες ενώ αποκτούν πρακτική εμπειρία σε πραγματικές συνθήκες. Προσφέρουν μια δομημένη προσέγγιση για την ανάπτυξη δεξιοτήτων, με καθοδήγηση από έμπειρους τεχνικούς ή εργάτες. Με την ολοκλήρωση της μαθητείας, οι συμμετέχοντες αποκτούν τις απαραίτητες δεξιότητες, γνώσεις και πιστοποιήσεις για να ξεκινήσουν μια επιτυχημένη καριέρα στο αντικείμενο επιλογής τους [111].

Σύμφωνα με το Γραφείο Στατιστικών Εργασίας το 2020, ο μέσος βασικός μισθός για έναν τεχνικό ανεμογεννητριών ήταν 59.340 δολάρια το χρόνο για 40 ώρες εργασίας την εβδομάδα χωρίς υπερωρίες. Αυτός ο μισθός είναι υψηλότερος από αυτόν άλλων επαγγελμάτων όπως συγκολλητές, εγκαταστάτες φωτοβολταϊκών πάνελ, τεχνικοί ψυκτικοί (HVAC - Heating, Ventilation, and Air Conditioning) και μηχανικοί αυτοκινήτων. Παρότι η πλειοψηφία των τεχνικών ανεμογεννητριών δεν ανήκει σε συνδικάτα, απολαμβάνουν ικανοποιητική οικονομική αποζημίωση και έχουν δει σημαντική αύξηση μισθών με την πάροδο των ετών. Για παράδειγμα, το 2012 ο μέσος μισθός ήταν 48.320 δολάρια και αυξήθηκε σε 59.340 δολάρια το 2020. Κατά μέσο όρο, οι τεχνικοί αιολικής ενέργειας είδαν ετήσια αύξηση μισθών περίπου 1.200 δολάρια από το 2012 έως το 2020, ξεπερνώντας πολλά άλλα επαγγέλματα. [112].



Εικόνα 6-6: Μισθοί τεχνικών Α/Γ, Πηγή: [116].

Προβλέποντας αυτή τη μέση ετήσια αύξηση των μισθών στο μέλλον, εκτιμάται ότι μέχρι το 2024, ο μέσος βασικός μισθός για έναν τεχνικό ανεμογεννητριών θα μπορούσε να φτάσει τα 64.238 δολάρια, ενδεχομένως να αυξηθεί σε περίπου 72.000 δολάρια ετησίως έως το 2030 (εικόνα 6-7).



Εικόνα 6-7: Πρόβλεψη μισθών για τεχνικούς Α/Γ, Πηγή: [114].

Σε αντίθεση με ορισμένα επαγγέλματα όπου οι υπερωρίες μπορεί να μην αποζημιώνονται, οι τεχνικοί ανεμογεννητριών λαμβάνουν συνήθως δυνατότητα δι-

πλής αμοιβής. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με κλάδους όπως η διδασκαλία, οι νομικές υπηρεσίες, η διαχείριση εστιατορίων και οι πωλητές, όπου οι απλήρωτες υπερωρίες είναι πιο συχνές.

Επιπλέον, οι τεχνικοί ανεμογεννητριών παρουσιάζουν σχετικά υψηλό ποσοστό αυτοαπασχόλησης, με περίπου το 14% αυτών να είναι αυτοαπασχολούμενοι. Αυτή η επικράτηση της αυτοαπασχόλησης προσφέρει ευελιξία και επιχειρηματικές ευκαιρίες στον τομέα, διακρίνοντας τους τεχνικούς ανεμογεννητριών ως ένα μοναδικό και οικονομικά ανταποδοτικό επάγγελμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αξιοποιώντας τη δύναμη του ανέμου, οι χώρες μπορούν να μειώσουν σημαντικά το αποτύπωμα άνθρακα και να μετριάσουν τις δυσμενείς επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η αιολική ενέργεια είναι εγγενώς καθαρή και ανανεώσιμη, παράγοντας μηδενικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία. Αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, οι οποίες όχι μόνο συμβάλλουν στη ρύπανση του αέρα και των υδάτων, αλλά και επιταχύνουν την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Η διερεύνηση των συστημάτων ελέγχου ταχύτητας αποκάλυψε την καθοριστική συμβολή τους στη λειτουργία των ανεμογεννητριών, με έμφαση στους ενεργητικούς και παθητικούς μηχανισμούς ελέγχου. Τα ενεργά συστήματα προσαρμόζουν με ακρίβεια τον προσανατολισμό των πτερυγίων του ρότορα σύμφωνα με την ένταση του ανέμου, εξασφαλίζοντας βέλτιστη παραγωγή ενέργειας. Αντίθετα, οι παθητικοί μηχανισμοί βασίζονται σε απλούστερα μέσα, όπως τα ρουλεμάν και τα πτερύγια ουράς, για τον έλεγχο. Επιπλέον, η σημασία των αισθητήρων θερμοκρασίας τονίζεται, καθώς αυτοί παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για τις μεταβολές της θερμοκρασίας, απαραίτητες για την αποτελεσματική συντήρηση και βελτιστοποίηση της απόδοσης.

Η ανάλυση των ανεμογεννητριών δείχνει πώς οι διαφορετικές ταχύτητες ανέμου επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας. Η κατηγοριοποίηση των συνθηκών των στροβίλων από «σαν νέα» κατάσταση έως τις αρχικές φάσεις υποβάθμισης συμβάλλει στη βέλτιστη προγραμματισμένη συντήρηση. Μέσω της ανάλυσης παραμέτρων όπως η διάγνωση σφαλμάτων, η παρακολούθηση θερμοκρασίας και οι επιχειρησιακές περιοχές, υπογραμμίζονται τα βασικά στοιχεία των συστημάτων ελέγχου που βελτιώνουν την αποδοτικότητα και αξιοπιστία στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παράλληλα, η σημασία των τεχνικών ανεμογεννητριών είναι εμφανής, καθώς το έργο τους εκτείνεται από τη μηχανική συντήρηση έως την ανάλυση δεδομένων και την επίλυση προβλημάτων. Η συνεχής εκπαίδευση και ανάπτυξη αυτών των τεχνικών ενισχύει την αποδοτικότητα και την προσαρμοστικότητα στον ταχέως εξελισσόμενο κλάδο της αιολικής ενέργειας.

Τα έργα αιολικής ενέργειας απαιτούν ένα ευρύ φάσμα ειδικευμένων επαγγελματιών, από μηχανικούς και τεχνικούς έως διαχειριστές έργων και ερευνητές. Επενδύοντας σε υποδομές αιολικής ενέργειας και ανάπτυξη εργατικού δυναμικού, οι κυβερνήσεις μπορούν να τονώσουν τις τοπικές οικονομίες, να προσελκύσουν επενδύσεις και να δημιουργήσουν θέσεις εργασίας υψηλής ποιότητας τόσο στις αστικές όσο και στις αγροτικές περιοχές. Από τις εξελίξεις στο σχεδιασμό πτερύγων έως την ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων δικτύου, οι συνεχιζόμενες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης στοχεύουν στην ενίσχυση της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και της οικονομικής προσιτότητας των συστημάτων αιολικής ενέργειας.

Οι τεχνικοί ανεμογεννητριών αποτελούν την αιχμή του δόρατος στην μετάβαση προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα, χάρη στην τεχνογνωσία και την αφοσίωσή τους. Ως εκ τούτου, ο ρόλος τους δεν είναι μόνο ουσιαστικός για τη συντήρηση των ανεμογεννητριών, αλλά και για τον ευρύτερο στόχο της επίτευξης ενός πιο πράσινου και πιο ανθεκτικού ενεργειακού τοπίου. Με την εμπειρία και το πάθος τους, αυτοί οι επαγγελματίες εγγυώνται την αξιοπιστία, την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα των ανεμογεννητριών σε ολόκληρο τον κόσμο.

Συνεπώς, καθώς ο τομέας της αιολικής ενέργειας συνεχίζει να επεκτείνεται, η ζήτηση για ειδικευμένους τεχνικούς θα αυξηθεί, προσφέροντας άφθονες ευκαιρίες για ανάπτυξη σταδιοδρομίας και εξέλιξη. Αναγνωρίζοντας τη σημασία των τεχνικών ανεμογεννητριών και επενδύοντας στην εκπαίδευση και την ανάπτυξή τους, τα ενδιαφερόμενα μέρη μπορούν να επιταχύνουν τη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον, αποκομίζοντας παράλληλα τα οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη που τη συνοδεύουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Wikipedia, (2023), Panemone windmill, [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Panemone_windmill&oldid=1165574003, ανακτήθηκε 15/2/2024].
- [2] J.Richardson, (2024), The history of Wind Turbines, [<https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/wind-turbines/history-of-wind-turbines>, ανακτήθηκε 15/2/2024].
- [3] Z.Shahan, (2014), History of Wind Turbines, Renewable Energy World [<https://www.renewableenergyworld.com/storage/grid-scale/history-of-wind-turbines/>, ανακτήθηκε 15/2/2024].
- [4] ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ & ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, (2024) [<https://ypen.gov.gr/energeia/ape/technologies/aioliki/>, ανακτήθηκε 16/2/2024].
- [5] M.Kavakli, (2022), Analysis and assessment of damages to wind turbines, onshore and offshore with the objective to reduce the risk of wind turbine failures and collapse, Διπλωματική, Høgskulen på Vestlandet.
- [6] Y.Li, (2020), Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbines: History, Performance, and Applications. In Rotating Machinery [<https://doi.org/10.5772/intechopen.84761>, ανακτήθηκε 16/2/2024].
- [7] *Ι ΚΑΛΔΕΛΛΗΣ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΘΕΩΡΙΑ - ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ - ΑΛΥΤΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ), ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ, 2005.*
- [8] (2020), ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-1ο ΕΠΑΛ ΣΥΡΟΥ [<http://ape1epalsyrou.weebly.com/alphanuepsilonmuomicrongammaepsilonpsilonunnu942taurhoiotaepsilonsigmaf.html>, ανακτήθηκε 17/2/2024].
- [9] E.Rivis, (2024), Why Do Wind Turbines Have Three Blades?, Wind Turbine Magazine [<https://www.windturbinemagazine.com/why-do-wind-turbines-have-three-blades/>, ανακτήθηκε 19/2/2024].

- [10] (2024), WIND TURBINE DESIGN - CASE STUDIES, Aerotrope [<https://www.aerotrope.com/what-we-do/wind/wind-turbine-design-case-studies/>], ανακτήθηκε 19/2/2024].
- [11] Wikipedia, (2023), NASA wind turbines [https://en.wikipedia.org/wiki/NASA_wind_turbines], ανακτήθηκε 21/2/2024].
- [12] Free Wind Turbine Photos [<https://www.pexels.com/search/wind%20turbine/>], ανακτήθηκε 21/2/2024].
- [13] J. M. Feliz-Teixeira, (2006), Bicycle Wheel: A Surprising Wind Turbine [https://paginas.fe.up.pt/~feliz/e_paper15_BicycleWindTurbine.pdf], ανακτήθηκε 21/2/2024].
- [14] Μπεργελές Γ, Ανεμοκινητήρες, Συμewν, (2006).
- [15] Elprocus, (2024), Savonius Wind Turbine : Design, Working, Benefits & Drawbacks [<https://www.elprocus.com/what-is-a-savonius-wind-turbine-design-its-working/>], ανακτήθηκε 23/2/2024].
- [16] G. Aboufares, (2015), PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A VERTICAL AXIS WIND TURBINE OPERATING IN, Πτυχιακή Εργασία, University of Huddersfield Repository.
- [17] EWEA, (2024), Design Styles [<https://www.wind-energy-the-facts.org/design-styles.html>], ανακτήθηκε 23/2/2024].
- [18] EDM, (2024), EMD Wind Consultancy's services [<https://www.emd-international.com/wind-energy-consultancy/services/>], ανακτήθηκε 23/2/2024].
- [19] SHTech, (2023), Πλεονεκτήματα ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα [<http://el.shwindturbine.com/news/advantages-of-horizontal-axis-wind-turbines/>], ανακτήθηκε 26/2/2024].
- [20] eshops.gr, (2024), Ανεμογεννήτριες και τύποι ανεμογεννητριών όλα όσα θέλετε να ξέρετε ,[<https://www.eshops.gr/typoi-anemogennitrias/>], ανακτήθηκε 26/2/2024].

- [21] Elprocus, (2024), What is a Darrieus Wind Turbine & Its Working [<https://www.elprocus.com/darrieus-wind-turbine-working/>, ανακτήθηκε 26/2/2024].
- [22] T. Agarwal, (2024), Savonius Wind Turbine : Design, Working, Benefits & Drawbacks, - Electronic Projects for Engineering Students [<https://www.elprocus.com/what-is-a-savonius-wind-turbine-design-its-working/>, ανακτήθηκε 26/2/2024].
- [23] WindEurope ,(2023), Wind energy in Europe: 2023 Statistics [<https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2023-statistics-and-the-outlook-for-2024-2030/>, ανακτήθηκε 27/2/2024].
- [24] WindEurope ,(2023), Statistics [<https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2023-statistics-and-the-outlook-for-2024-2030/>, ανακτήθηκε 28/2/2024].
- [25] WindEurope ,(2023), Wind energy in Europe: 2023 Statistics and the outlook for 2024-2030 [<https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2023-statistics-and-the-outlook-for-2024-2030/>, ανακτήθηκε 28/2/2024].
- [26] ΟΤ, (2024), Αιολική ενέργεια: Επενδύσεις άνω των 600 εκατ. € συνδέθηκαν στο δίκτυο κατά το 2023 [<https://www.ot.gr/2024/01/19/energeia/aioliki-energeia-ependyseis-synolikou-ypsous-ano-ton-600-ekat-e-syndethikan-sto-diktyo-kata-to-2023/>, ανακτήθηκε 2/3/2024].
- [27] ΕΛΕΤΑΕΝ (2024), Statistics-Greece [https://eletaen.gr/wp-content/uploads/2024/01/2024-01-18-2023-HWEA_Statistics-Greece.pdf, ανακτήθηκε 2/3/2024].
- [28] NORDEX, (2023), Wind turbine class K08 delta [<https://www.commissiener.nl/projectdocumenten/00001748.pdf>, ανακτήθηκε 2/3/2024].
- [29] Windfair, (2014), Nordex awarded IEC Type Certificates for the N100/3300 and N117/3000 turbines by TÜV Nord [<https://w3.windfair.net/wind->

energy/news/17020-nordex-awarded-iec-type-certificates-for-the-n100-3300-and-n117-3000-turbines-by-tuv-nord ανακτήθηκε 2/3/2024].

[30] Nordex, (2024), Nordex N117/3000 - Manufacturers and turbines - [https://www.thewindpower.net/turbine_en_614_nordex_n117-3000.php, ανακτήθηκε 2/3/2024].

[31] NORDEX, (2024), Nordex_Delta_Broschuere_en [http://windturbine.co.kr/homepage/data/file/sub-menu4_1/1346264786_aBXPmJCz_Nordex_Delta_Broschuere_en.pdf, ανακτήθηκε 3/3/2024].

[32] B. Manz, (2024), Wind Turbines: Tiny Sensors Play Big Role [<https://gr.mouser.com/applications/tiny-Sensors-Role-in-Wind-Turbines/>, ανακτήθηκε 4/3/2024].

[33] NORDEX, (2024), Nordex N117/3000 [http://windturbine.co.kr/homepage/data/file/sub-menu4_1/1346264786_aBXPmJCz_Nordex_Delta_Broschuere_en.pdf, ανακτήθηκε 4/3/2024].

[34] Mouser, (2024) , Sensors [<https://gr.mouser.com/applications/tiny-Sensors-Role-in-Wind-Turbines/>, ανακτήθηκε 5/3/2024].

[35] H. Shin, M.Rüttgers, S.Lee, (2022), Neural Networks for Improving Wind Power Efficiency: A Review, Fluids, 7(12) 1-367.

[36] M.Rüttgers, (2022), Schematic of yaw and pitch control of a wind turbine [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-yaw-and-pitch-control-of-a-wind-turbine_fig2_365790461, ανακτήθηκε 7/3/2024].

[37] (2024), Typical Power Curve of a Commercial Wind Turbine [https://www.researchgate.net/figure/Typical-Power-Curve-of-a-Commercial-Wind-Turbine-Showing-the-Four-Operating-Regions-7_fig2_260288134, ανακτήθηκε 7/3/2024].

- [38] L.Sankar, (2013), Power Curve of a Commercial Wind Turbine [https://www.researchgate.net/figure/Typical-Power-Curve-of-a-Commercial-Wind-Turbine-Showing-the-Four-Operating-Regions-7_fig2_260288134, ανακτήθηκε 9/3/2024].
- [39] Α. Βαλσαμάκης, (2018), «Μεθοδολογία Υπολογισμού Μικρών Ανεμογεννητριών» Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ.
- [40] M. Chiang, (2011), “A novel pitch control system for a wind turbine driven by a variable-speed pump-controlled hydraulic servo system [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957415811000043?casa_token=N0yl903pbnMAAAAA:JvHD-FlqoR3EqO6hga1iEU6_L_RMN72gdEBcNeQHqJ61t_b3L4tsu8vgVfMJoi8RIO-1CjY9b, ανακτήθηκε 9/3/2024].
- [41] HAVE, (2024), Hydraulic pitch system for wind turbines, HAWE Hydraulik [<https://www.hawe.com/products/product-search-by-category/system-solutions/system-solutions-for-wind-turbines/hydraulic-pitch-system-for-wind-turbines/>, ανακτήθηκε 9/3/2024]./
- [42] C.Wang, M.Chiang, (2016), A Novel Pitch Control System of a Large Wind Turbine Using Two-Degree-of-Freedom Motion Control with Feedback Linearization Control., *Energies* ,9(10), 791].
- [43] R.Pelin, P.Barsanescu, I.Tita, (2018), Hydraulic systems used for pitch control of wind turbines: a literature overview, *ResearchGate*,444.
- [44] KURZ, (2024), Hydraulic and Electric Pitch Systems, Kurz Wind [<https://www.kurzwind.com/hydraulic-and-electric-pitch-systems/>, ανακτήθηκε 9/3/2024].
- [45] Wilkinson, M.Hendriks, B.Spinato, et al., (2010), Methodology and results of the reliawind reliability field study. In: *European Wind Energy ,EWEC 2010*, 20-23 Apr 2010, Warsaw, Poland.

- [46] R. Hyers, J. McGowan, K. Sullivan, J. Manwell, B. Syrett, (2013), Condition monitoring and prognosis of utility scale wind turbines: Energy Materials [https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/174892406X163397, ανακτήθηκε 9/3/2024].
- [47] M. Bertelè, C. Bottasso, S. Cacciola, (2018), Automatic detection and correction of pitch misalignment in wind turbine rotors, Wind Energy Science, vol. 3, no. 2, pp. 791–803.
- [48] C. Jauch, N. Nussel, (2014), Development of a Contactless Pitch Angle Measurement System, JSTOR, Vol. 38, No. 6 621-632.
- [49] POSITAL, (2024), Rotary Encoder for Wind Turbines: Azimut and Pitch Control, [https://www.posital.com/en/industries/renewable-energy/wind-energy/wind_turbines_encoders_1.php, ανακτήθηκε 12/3/2024].
- [50] YUMPU, (2015), Wind Energy Turbine Testing Technical MTS Sensors [https://www.yumpu.com/en/document/view/37462242/551388a-wind-energy-turbine-testing-technical-mts-sensors, ανακτήθηκε 12/3/2024].
- [51] M. Kim, P. Dalhoff, (2024), Yaw Systems for wind turbines - Overview of concepts, current challenges and design methods, *Journal of Physics*: vol. 524.
- [52] M. Moo-Gyn, K. Dalhoff, (2014), Example of a yaw system [https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-yaw-system_fig1_263127900, ανακτήθηκε 12/3/2024].
- [53] N. Raikar, S. Kale, (2015), Pressure Plot for rectangular tail at 20 degree [https://www.researchgate.net/figure/Pressure-Plot-for-rectangular-tail-at-20-degree_fig4_281522928, ανακτήθηκε 13/3/2024].
- [54] Wikipedia, (2023), Yaw [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Yaw&oldid=1176560439, ανακτήθηκε 13/3/2024].
- [55] (2024), Pressure Plot for rectangular tail at 20 degree [https://www.researchgate.net/figure/Pressure-Plot-for-rectangular-tail-at-20-degree_fig4_281522928, ανακτήθηκε 14/3/2024].

- [56] KAVAKEN, (2024), AI-powered solutions for energy companies. [<https://www.kavaken.com/blog>, ανακτήθηκε 15/3/2024].
- [57] Windmills Tech, (2024), Windmills [<https://windmillstech.com/windmills/>, ανακτήθηκε 15/3/2024].
- [58] Wikipedia, (2024), Yaw system [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Yaw_system&oldid=1214810599, ανακτήθηκε 15/3/2024].
- [59] Engineer Live, (2013), Braking ideas for yaw and pitch of wind turbines | Engineer Live [<https://www.engineerlive.com/content/braking-ideas-yaw-and-pitch-wind-turbines>, ανακτήθηκε 17/3/2024].
- [60] M. Kim, P.Dalhoff, (2014), Yaw Systems for wind turbines – Overview of concepts, current challenges and design methods [<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/524/1/012086>, ανακτήθηκε 17/3/2024].
- [61] A.E., (2024), Εκτίμηση αιολικού δυναμικού, Αιολική Γη Α.Ε. [<http://www.aiolikigi.gr/el/e-learning/wind-potential-evaluation/>, ανακτήθηκε 17/3/2024]
- [62] Ι.ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ, (2013), ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΚΥΠΕΛΛΟΦΟΡΩΝ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ LiDAR ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ.
- [63] Ε.Διαμάντη, (2018), Μελέτη και περιγραφή του συστήματος πέδησης ανεμογεννητριών, *Study and description of wind turbine braking system*, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ.
- [64] What Make Art, (2023), *What is a slip ring?* [<https://www.youtube.com/watch?v=dKRbTwEVEsQ>, ανακτήθηκε 17/3/2024].
- [65] H. G. Technology, (2024), Windmill Slip Rings: Comprehensive Insights, [<https://www.grandslipring.com/windmill-slip-ring>, ανακτήθηκε 18/3/2024].

- [66] Electronics Tutorial, (2024), Thermistors and NTC Thermistors [<https://www.electronics-tutorials.ws/io/thermistors.html>, ανακτήθηκε 18/3/2024].
- [67] Π. ΠΑΤΗΣ, (2020), ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ,ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ &ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΠΑΡΚΩΝ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΣΤΕΡΕΑ ΕΛΛΑΔΑ, Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ.
- [68] A.Eggen, O.Rommetveit, A.Reitlo, E.Midtbø, (2024), Handbook on Condition Monitoring of Wind Turbines [<https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2448105/Eggen2009Handbook.pdf?sequence=2&isAllowed=y>, ανακτήθηκε 19/3/2024].
- [69] A.Saeed, (2008), Online Condition Monitoring System for Wind Turbine [<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:830541/FULLTEXT01.pdf>, ανακτήθηκε 19/3/2024].
- [70] C. Hatch, (2004), Improved wind turbine condition monitoring using acceleration enveloping, *Orbit*.
- [71] A.Jardine, D.Lin, D.Banjevic, (2006), A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, Oct. 2006.
- [72] D. Coronado, K. Fischer, (2015), *Condition Monitoring of Wind Turbines: State of the art, user experience and recommendation*, VGB PowerTec.
- [73] Y.Pang, L.Jia, X.Zhang, Z.Liu, D.Li, (2023), Design and implementation of automatic fault diagnosis system for wind turbine, *Computers & Electrical Engineering*, vol. 87, p. 106754, Oct. 2020.
- [74] Efemag, (2023), Envision Energy Leverages MEMS Sensor Technology by Analog Devices to Build Smarter and Safer Wind Turbines [<https://efemag.co.uk/envision-energy-leverages-mems-sensor-technology-by-analog-devices-to-build-smarter-and-safer-wind-turbines/>, ανακτήθηκε 19/3/2024].

- [75] ST, (2024), MEMS Micro-Electro-Mechanical Systems [https://www.st.com/content/st_com/en/about/innovation---technology/mems.html, ανακτήθηκε 20/3/2024].
- [76] smart fibres, (2024), SmartBlade | Wind Turbine Blade Measurement | Smart Fibres [<https://www.smartfibres.com/products/smartblade>, ανακτήθηκε 20/3/2024].
- [77] N.Farrar ,M.Ali, D.Dasgupta, (2023), Artificial Intelligence and Machine Learning in Grid Connected Wind Turbine Control Systems: A Comprehensive Review, *Energies*, 16(3), 1530.
- [78] J.Chan, (2024), What is CAFM software? [<https://limblecmms.com/blog/what-is-cafm-software/>, ανακτήθηκε 20/3/2024].
- [79] E.Branlard , J.Geisler, (2022), A symbolic framework to obtain mid-fidelity models of flexible multibody systems with application to horizontal-axis wind turbines, *Wind Energy Science*, vol. 7, no. 6, pp. 2351–2371.
- [80] Ericsson, (2024), Solving wind energy’s connectivity challenge: The case for LTE and 5G cellular [<https://www.ericsson.com/en/industries/energy-utilities/solving-wind-energys-connectivity-challenge>, ανακτήθηκε 21/3/2024].
- [81] Windpower Engineering & Development, (2024), Connection and networking [<https://www.windpowerengineering.com/>, ανακτήθηκε 22/3/2024].
- [82] Safety Culture, (2024), A Simple Guide to Wind Turbine Maintenance [<https://safetyculture.com/topics/wind-turbine-maintenance/>, ανακτήθηκε 22/3/2024].
- [83] Samaro, (2023), Main maintenance and repair processes for wind turbines [<https://www.samaro.fr/en/news/main-maintenance-and-repair-processes-for-wind-turbines/>, ανακτήθηκε 24/3/2024].
- [84] Norg Tech International, (2024), Wind Turbine Maintenance [<https://norgtech-int.com/wind-turbine-maintenance/>, ανακτήθηκε 26/3/2024].

- [85] LinkedIn, (2024), The importance of maintenance management in wind energy production [<https://www.linkedin.com/pulse/importance-maintenance-management-wind-energy-maroua-boujnane/>], ανακτήθηκε 26/3/2024]./
- [86] Enerpac Blog, (2024), Wind Turbine Maintenance: Components, Strategies, and Tools [<https://blog.enerpac.com/wind-turbine-maintenance-components-strategies-and-tools/> ανακτήθηκε, 26/3/2024].
- [87] ABB Oy ,(2019), ACS880-87LC-3328A/4100A-7 wind turbine converters Hardware manual [https://library.e.abb.com/public/7b5eee0416cc474eab6e83e6cccb00dc/EN_ACS880-87LC_3328A_4100A_7_HW_E_A4.pdf], ανακτήθηκε 26/3/2024].
- [88] R. Chambers, (2012), Wind Turbine Maintenance Guide [<https://www.epri.com/#/pages/product/1024891/>, ανακτήθηκε 26/3/2024].
- [89] EPRI, (2024), Wind Turbine Maintenance Guide [<https://www.epri.com/research/products/1024891>, ανακτήθηκε 26/3/2024].
- [90] GEV, (2024), Blade maintenance: Our role as a rotor blade repair company [<https://www.gevwindpower.com/wind-industry-news/the-importance-of-regular-rotor-blade-maintenance-and-repair/>, ανακτήθηκε 27/3/2024].
- [91] CORTIR, (2019), WIND TURBINE BLADES HANDBOOK [https://www.bladena.com/uploads/8/7/3/7/87379536/cortir_handbook_2019.pdf, ανακτήθηκε 27/3/2024].
- [92] Reuters Events, (2017), US wind O&M costs estimated at \$48,000/MW; Falling costs create new industrial uses: IEA [<https://www.reutersevents.com/renewables/wind-energy-update/us-wind-om-costs-estimated-48000mw-falling-costs-create-new-industrial-uses-iea> ,ανακτήθηκε 28/3/2024].
- [93] WEATHER GUARD, (2023), Wind Turbine Cost: Worth The Million-Dollar Price In 2022? [<https://weatherguardwind.com/how-much-does-wind-turbine-cost-worth-it/>, ανακτήθηκε 28/3/2024].

- [94] D.Milborrow, (2010), Breaking down the cost of wind turbine maintenance [https://www.windpowermonthly.com/article/1010136/breaking-down-cost-wind-turbine-maintenance?utm_source=website&utm_medium=social, ανακτήθηκε 29/3/2024].
- [95] Reuters Events, Cost of wind turbines [<https://www.reutersevents.com/renewables/wind>, ανακτήθηκε 31/3/2024].
- [96] Linkedin, (2024), How can you reduce the cost of wind turbine maintenance? [<https://www.linkedin.com/advice/0/how-can-you-reduce-cost-wind-turbine-maintenance>, ανακτήθηκε 3/4/2024].
- [97] ADDINOL, (2024), Micropitting - All about micropittings on gearboxes [<https://addinol.de/en/products/industrial-lubricants/gear-oil/micropittings/>, ανακτήθηκε 4/4/2024].
- [98] P.Dhawankar, et al, An overview on various faults of Wind Turbine parts. *In International Conference on Capacity Building In The Renewable Energy Sector*, Northumbria University, Newcastle Upon Tyne, UK.
- [99] K.Busawon, (2024), faults of Wind Turbine parts [https://www.researchgate.net/publication/365960417_An_overview_on_various_faults_of_Wind_Turbine_parts, ανακτήθηκε 4/4/2024].
- [100] R. Chinnappa, (2024), Wind Turbine parts, [<https://ieeexplore.ieee.org/document/10063795>, ανακτήθηκε 5/4/2024].
- [101] SKILWIND, (2024), Maintenance [https://skillwind.com/wp-content/uploads/2017/08/SKILWIND_Maintenance_1.0.pdf, ανακτήθηκε 7/4/2024].
- [102] I.Payne, (2019), Wind Energy Operations & Maintenance Wind Turbine Technician Core Competencies [https://renewablesassociation.ca/wp-content/uploads/2021/01/Wind-Turbine-Technician-Core-Competencies_Dec2019.pdf ,ανακτήθηκε 7/4/2024].

- [103] Gravitec Systems Inc., (2024), Wind Turbine Energy Fall Protection Equipment Kit G4 Expert, [<https://gravitec.com/equipment/fall-protection-rescue-kits/wind-turbine-tech-kit-expert/>, ανακτήθηκε 10/4/2024].
- [104] ACP (2023), FAQ-ACP-Entry-Level-Wind-Technician-Standard-and-Guideline [https://cleanpower.org/wp-content/uploads/2023/05/FAQ-ACP-Entry-Level-Wind-Technician-Standard-and-Guideline_230516.docx-1.pdf ανακτήθηκε, 13/4/2024].
- [105] NORDEX, (2024), Service Technician - Øyfjellet [<https://jobs.nordex-online.com/job/Mosj%C3%B8en-Service-Technician-%C3%98yfjellet-8658/823416101/>, ανακτήθηκε 15/4/2024].
- [106] Illinois Work Net, (2024) Wind Turbine Technicians - Working Conditions [<https://apps.illinoisworknet.com/cis/clusters/OccupationDetails/100570?parentId=111300§ion=conditions§ionTitle=Working%20Conditions>, ανακτήθηκε 15/4/2024].
- [107] On the job, (2011), Wind Turbine Technician - Career Advice - Environments - On The Job [https://www.onthejob.education/environments/wind_turbine_technician.htm, ανακτήθηκε 16/4/2024].
- [108] SKYLOTEC, (2024), Evacuation Device [https://www.sky-lotec.com/uk_en/milan-2-0-a-027.html, ανακτήθηκε 17/4/2024].
- [109] Ortho Help.Medical (2024), Απινιδωτής Ημι-Αυτόματος ME-PAD [<https://www.orthohelpmedical.gr/apinidotis-aytomatos-eco-aed-a>, ανακτήθηκε 18/4/2024].
- [110] Energy Insider, (2023), GWO (BST) Wind Turbine Training - WHAT YOU NEED TO KNOW! [<https://www.youtube.com/watch?v=5EDDIDFBso8>, ανακτήθηκε 18/4/2024].
- [111] GetIntoEnergy, (2024), Educational Opportunities for Advancement.pdf [https://cewd.org/wp-content/uploads/2021/08/10_Wind-Technician-FINAL.pdf, ανακτήθηκε 21/4/2024].

[112] CarrerWatch, (2021), *Become a Wind Turbine Tech in 2021? Salary, Jobs, Education* [<https://www.youtube.com/watch?v=g1t5EUxyFx8>, ανακτήθηκε 23/4/2024].

[113] (2021), *Wind Turbine Tech* [<https://www.youtube.com/watch?v=g1t5EUxyFx8> ανακτήθηκε 23/4/2024].

[114] giz, (2017), Career Progression and Professional Progress of Wind Turbine Technicians in South Africa [<https://www.sagen.org.za/publications/capacity-building-technology-innovation/42-career-progression-and-professional-progress-of-wind-turbine-technicians-in-south-africa/file> ανακτήθηκε 23/4/2024].