



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

«Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής»



Φοιτητής: ΚΑΡΛΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΑΜ: 45489

Επιβλέπων Καθηγητής

ΚΑΛΚΑΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2020



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Wind turbine failures. Causes and avoidance strategies.



Student: KARLIS VASILEIOS
Registration Number: 45489

Supervisor

KALKANIS KONSTANTINOS
ASSISTANT PROFESSOR

ATHENS-EGALEO, NOVEMBER 2020

Καλκάνης Κωνσταντίνος Επίκουρος καθηγητής	Καμινάρης Σταύρος Καθηγητής	Ψωμόπουλος Κωνσταντίνος Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Βασίλειος Καρλής , Νοέμβριος , 2020

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπόγραφα ότι η παρούσα εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα αποκλειστικά και ότι είμαι ο αποκλειστικός συγγραφέας του κειμένου της.

Η εργασία μου δεν προσβάλλει οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας ή προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής ή λογοκλοπής.

Κάθε βοήθεια που έλαβα για την ολοκλήρωση της εργασίας είναι αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στο κείμενό της. Ειδικότερα, έχω αναφέρει ευδιάκριτα μέσα στο κείμενο και με την κατάλληλη παραπομπή όλες τις πηγές δεδομένων, κώδικα προγραμματισμού Η/Υ, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης, και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Επιπλέον, όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης κατά τα διεθνή πρότυπα.

Τέλος δηλώνω ενυπόγραφα ότι αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ημερομηνία 6/11/2020

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΚΑΡΛΗΣ



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Κωνσταντίνο Καλκάνη για την κατανόηση και την καθοδήγηση του. Καθώς και τον χρόνο που αφιέρωσε κατά την διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω όλο το διδακτικό προσωπικό του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών για τις γνώσεις που μου μετέδωσε.

Τέλος, ένα θερμό ευχαριστώ στην οικογένεια μου και στον συμφοιτητή μου Γρηγόριο Καλλάκη και την φίλη Εμμανουέλα Καλέμη για την στήριξη και την βοήθεια που μου πρόσφεραν καθόλη την διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας.

Περίληψη

Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική και είναι εκείνες οι μηχανές που τοποθετούνται στα αιολικά πάρκα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα αιτία φθορών και βλαβών στις ανεμογεννήτριες και ιδιαίτερα στους πύργους των ανεμογεννητριών ενώ διερευνάται και παρουσιάζεται η παρακολούθηση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας μέσω αισθητήρων.

Η ανίχνευση των βλαβών των πτερυγίων και των ανεμογεννητριών γενικότερα είναι μια διαδικασία που αναπτύσσεται σήμερα με την βοήθεια αισθητήρων και των δικτύων οπτικών ινών. Οι αισθητήρες έχουν πολύ υψηλή ακρίβεια στις ενδείξεις τους ενώ υπάρχει και η ικανότητα παρακολούθησης επι τόπου των ενδείξεων που οι αισθητήρες μεταδίδουν για την παρακολούθηση της μηχανικής συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας και των πτερυγίων αυτής

Αρωγός στην προσπάθεια αυτή της «πρόβλεψης» που καταβάλλεται από τους μηχανικούς ήρθε η εξέλιξη στο χώρο των ηλεκτρονικών και της οπτικής, μέσω των οποίων δημιουργήθηκαν προηγμένοι, αξιόπιστοι και χαμηλού κόστους αισθητήρες, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να τοποθετούνται μόνιμα στις ανεμογεννήτριες.

Οι συγκρούσεις πτηνών με τις ανεμογεννήτριες και η αντιμετώπιση αυτών, οι κλιματολογικές αλλαγές και το πώς επηρεάζουν αυτές την δομική ακεραιότητα των ανεμογεννητριών είναι μερικές από τις εφαρμογές που έχουν οι αισθητήρες και οι οπτικές ίνες στην πρόβλεψη της δομικής ακεραιότητας των ανεμογεννητριών.

Λέξεις – κλειδιά

Αισθητήρες, ανεμογεννήτριες, δομική ακεραιότητα, πρόβλεψη.

Abstract

Wind turbines are the machines which transform wind energy into electric energy and are installed in wind parks. In this thesis the causes of failure and subsequent damage of the wind turbines are investigated and especially in the wind turbines towers while the monitoring of operation of the wind turbine via sensors is investigated.

The investigation of failures and damages of the wind turbines is a procedure that involves sensors. Sensors are very accurate in their indications while there is also the ability in order to monitor on the spot the signals transmitted by the sensors to monitor the mechanical behavior of the wind turbine and its blades. The technological developments that have taken place in optical fibers and sensors are aiding engineers with the creation of reliable and low cost sensors for such applications. Bird collisions with wind turbines and their confrontation, climate change and how it affects the structural integrity of wind turbines are some of the applications that sensors and especially fiber optics have in predicting the structural integrity of wind turbines.

Keywords

Sensors, Wind turbines, prediction, structural integrity.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	10
Κατάλογος Εικόνων	10
Αλφαβητικό Ευρετήριο.....	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Ανεμογεννήτριες	15
1.1 Η εξέλιξη των ανεμογεννητριών	15
1.2 Αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών	15
1.3 Κατηγορίες ανεμογεννητριών.....	16
1.4 Τύποι ανεμογεννητριών.....	18
1.4.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών.....	18
1.4.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.....	18
1.5 Υλικά κατασκευής ανεμογεννητριών	19
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Τα μέρη και τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας	21
2.1 Εισαγωγή	21
2.2 Άτρακτος ανεμογεννήτριας (Nacelle).....	22
2.3 Πτερύγια.....	23
2.4 2.4 Στροφέας πτερυγίων (Pitch)	25
2.5 Ηλεκτρογεννήτρια.....	26
2.6 Μηχανικό φρένο (Brake).....	26
2.7 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας.....	27
2.8 Συντήρηση ανεμογεννήτριας.....	28
2.9 Πύργος ανεμογεννήτριας.....	30
2.10 Κατηγορίες Πύργων ανεμογεννητριών	30
2.10.1 Δικτυωτός πύργος.....	30
2.10.2 Σωληνοειδής χαλύβδινος πύργος.....	31
2.10.3 Υβριδικός πύργος σκυροδέματος/χάλυβα	33
2.10.4 Σύνθετος πυλώνας από ινοπλισμένα πολυμερή υλικά.....	33
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Πύργοι ανεμογεννητριών	34
3.1 Φορτία καταπόνησης πύργων Α/Γ	34
3.2 Κίνδυνοι κατάρρευσης των πύργων Α/Γ	35
3.2.1 Ρευστοποίηση εδάφους.....	36
3.2.2 Καθιζήσεις εδάφους.....	36
3.2.3 Σεισμικές διεγέρσεις	37
3.2.4 Ύπαρξη εγκοιλών	37
3.3 Εναλλαγές θερμοκρασίας	38
3.4 Βλάβες λόγω κεραυνών	40
3.4.1 Αντικεραυνική προστασία ανεμογεννητριών	41
3.5 Βλάβες λόγω πρόσκρουσης με χαλάζι.....	44
3.6 Καταρρεύσεις πύργων ανεμογεννητριών	48
3.7 Ζημιές και ατυχήματα σε ανεμογεννήτριες.....	50
4 Κεφάλαιο 4^ο: Αστοχίες ανεμογεννητριών	53
4.1 Ανίχνευση βλαβών.....	53
Οπτικές ίνες.....	56
4.2 Αισθητήρες για την ανίχνευση συγκρούσεων με πτηνά	58
4.2.1 Βασικές λειτουργίες αισθητήρων αποτροπής συγκρούσεων πουλιών.....	59

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

4.2.2	Εμπορικά συστήματα ανίχνευσης και παρακολούθησης συγκρούσεων πουλιών με πτερύγια ανεμογεννήτριες.....	60
4.3	Αισθητήρας μέτρησης διεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου.....	62
4.4	Αισθητήρας υπερτάχυνσης και ταλάντωσης.....	64
4.5	Αισθητήρας υπερθέρμανσης και θερμοκρασίας.....	64
5	Κεφάλαιο 5 ^ο : Παρακολούθηση λειτουργίας ανεμογεννητριών μέσω αισθητήρων....	66
6	Κεφάλαιο 6ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	68
	Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	70
	Ελληνική Βιβλιογραφία	70
	Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	72

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Εργασία στη Βάση του Πύργου – Χώρου Κυψελών Ελέγχου	28
Πίνακας 2: Εργασία στον χώρο της Μέσης Τάσης της Α/Γ	28
Πίνακας 3: Εργασία στον πύργο της ανεμογεννήτριας	28
Πίνακας 4: Εργασίες στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας	29
Πίνακας 5: Εργασίες σε Ύψος εκτός της ανεμογεννήτριας	29
Πίνακας 6: Εργασίες στον δρομέα της ανεμογεννήτριας	29
Πίνακας 7 : Αριθμός καταρρεύσεων ανεμογεννητριών κατά την τελευταία δεκαετία	50
Πίνακας 8: Ατυχήματα λεπίδων σε ανεμογεννήτριες κατά την τελευταία δεκαετία	52
Πίνακας 9: Αριθμός ατυχημάτων και θανάτων σε Α/Γ την τελευταία δεκαετία	52
Πίνακας 10: Αριθμός νεκρών πουλιών την τελευταία δεκαετία σε αιολικά πάρκα στην ΕΕ	59

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών (Βαφειάδης,2020)	16
Εικόνα 2: Ιστορική εξέλιξη μεγέθους των ανεμογεννητριών (Βαφειάδης,2020)	17
Εικόνα 3: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας με πολυστρωματικές στρώσεις πολυμερών υλικών (Ραυτογιάννης,2009)	19
Εικόνα 4: Εσωτερικό ανεμογεννήτριας (Σεμπίλι,2010)	21
Εικόνα 5: Ανύψωση ατράκτου της ανεμογεννήτριας στον πύργο (Μπίρδας,2015)	22
Εικόνα 6: Ανεμογεννήτριες 3 πτερυγίων (Πουλάς,2017)	23
Εικόνα 7: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας (Μπαλόκας,2013)	24
Εικόνα 8: Η αεροδυναμική απόδοση των πτερυγίων των ανεμογεννητριών (Βαφειάδης,2020)	25
Εικόνα 9: Σύστημα μετάδοσης κίνησης σε ανεμογεννήτρια (Πουλάς,2017)	26
Εικόνα 10: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας (Αλεξανδρίδης,2013)	27
Εικόνα 11: Διάφορες μορφές πύργων ανεμογεννητριών (Μπίρδας,2015)	30
Εικόνα 12: Ο μεγαλύτερος δικτυωτός πύργος ανεμογεννήτριας του κόσμου (Μανουσέλης,2019)	31
Εικόνα 13: Σωληνοειδής χαλύβδινος πύργος Α/Γ (Μπίρδας,2015)	32
Εικόνα 14: Τοποθέτηση πύργου ανεμογεννήτριας (Μπίρδας,2015)	32

Εικόνα 15: Κατασκευή πύργου ανεμογεννήτριας από ινοπλισμένα πολυμερή υλικά (Μανουσέλης,2019) 33

Εικόνα 16: Παραλαβή φορτίων από πύργο ανεμογεννητριών (Κώτσιας και Μανουσέλης,2019) 35

Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής των φορτίων σε πύργο ανεμογεννήτριας(Κώτσιας και Μανουσέλης,2019) 35

Εικόνα 18: Καθίζηση εδάφους (Τσιπιανίτης,2013) 37

Εικόνα 19: Πτερύγια ανεμογεννήτριας με πάγο στην επιφάνεια τους (www.ewea.org) 39

Εικόνα 20: Ψεκασμός με αντιπαγετικό υγρό του πτερυγίου 39

Εικόνα 21: Καταιγίδα σε αιολικό πάρκο (<https://www.quora.com/How-often-does-lightning-strike-wind-turbines>) 40

Εικόνα 22: Κατεστραμμένο πτερύγιο ανεμογεννήτριας από κεραυνό (Peesapati,2017) 41

Εικόνα 23: Αντικεραυνική προστασία πτερυγίου ανεμογεννήτριας (Σιάνας,2012) 43

Εικόνα 24: Γείωση μεταξύ πτερυγίων και ατράκτου (Καλατζής,2008) 43

Εικόνα 25: Τροχιές και δυνάμεις στο χαλάζι κατά την διάρκεια της πρόσκρουσης στις λεπίδες (Fiore et.al,2015) 45

Εικόνα 26: Επιφάνεια της λεπίδας που επηρεάζεται από την πρόσκρουση χαλαζιού ((Fiore et.al,2015) 46

Εικόνα 27: Ζημιά σε λεπίδα ανεμογεννήτριας από πρόσκρουση χαλαζιού (Kensche,2006) 47

Εικόνα 28: Ζημιά σε λεπίδα ανεμογεννήτριας από πρόσκρουση χαλαζιού (Kensche,2006) 48

Εικόνα 29: Λυγισμός των πυλώνων των ανεμογεννητριών (Πρόγραμμα Sea Wind,2015) 49

Εικόνα 30: Καταρρεύσεις πυλώνων ανεμογεννητριών(Πρόγραμμα Sea Wind,2015) 49

Εικόνα 31: Κατεστραμμένα πτερύγια ανεμογεννητριών (Πρόγραμμα Sea Wind,2015) 51

Εικόνα 32: Βλάβες και φθορές στα πτερύγια των ανεμογεννητριών (Πρόγραμμα Sea Wind,2015) 51

Εικόνα 33: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας εξοπλισμένο με αισθητήρες OFBG (Bang et.al,2010) 54

Εικόνα 34: Τοποθέτηση αισθητήρων σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας (Bang et.al,2010) 54

Εικόνα 35: Τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας (Joose et.al,2002) 55

Εικόνα 36 : Τομή οπτικής ίνας (Καλοβρέκτης , 2013)

Εικόνα 37: Σκαρίφιμα τοποθέτησης οπτικής ίνας σε επισκευασμένη πλάκα (Καλοβρέκτης , 2013)

- Εικόνα 38: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος ανάχνευσης συγκρούσεων με πουλιά 61
- Εικόνα 39: Ο Αισθητήρας μέτρησης της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου (Ντρέκο κ.α,2009) 63
- Εικόνα 40 : Τοποθέτηση του αισθητήρα στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας (Πατής,2010) 64

Αλφαβητικό Ευρετήριο

APA: American Psychological Association

IEEE: The Institute for Electrical and Electronics Engineers

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική και είναι εκείνες οι μηχανές που τοποθετούνται στα αιολικά πάρκα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελούνται από πάνω από 6.000 επιμέρους και ξεχωριστά στοιχεία και εξαρτήματα και τα εξαρτήματα αυτά κατασκευάζονται ξεχωριστά το καθένα και μετά γίνεται η συναρμολόγηση προκειμένου να παραχθεί το τελικό αποτέλεσμα που είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο.

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν 3 πτερύγια και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από 1,5 έως 8 MW και ο μέσος όρος ζωής των ανεμογεννητριών είναι τα 20 χρόνια και η διάμετρος τους ξεπερνάει τα 100 μέτρα (Dalili et.al,2017).

Οι εναλλαγές της θερμοκρασίας, από ακραίο ψύχος σε ακραία ζέστη μπορεί να προκαλέσει κόπωση του υλικού και τα πτερύγια να παρουσιάσουν ρωγμές που να οδηγήσουν σε ένα μεγαλύτερο πρόβλημα στην συνέχεια (Mishnaevsky et.al,2017).

Η απόδοση των ανεμογεννητριών επηρεάζεται σημαντικά όταν η επιφάνεια των πτερυγίων των ανεμογεννητριών έχει αλλοιωθεί ή έχει υποστεί φθορές από κεραυνούς, τον πάγο, από τους ανέμους ή από χαλαζοπτώσεις. Οι περιοχές εγκατάστασης των αιολικών πάρκων όπως είναι οι Βόρειες περιοχές και ο Βόρειος Ατλαντικός Ωκεανός ή σε αντίθεση οι πολύ ζεστές περιοχές που περιλαμβάνουν ερήμους και γενικότερα πολύ ζεστά κλίματα με υψηλή υγρασία, είναι περιοχές που το κλίμα είναι επιζήμιο για την επιφάνεια (Dalili et.al,2017).

Ο πάγος στα Βόρεια κλίματα μπορεί να επηρεάσει την αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων και γενικότερα της ανεμογεννήτριας, ενώ ο πάγος που προσκολλάται πάνω στα πτερύγια επηρεάζει τα βαρυντικά φορτία που δέχεται η ανεμογεννήτρια και μπορεί να προκαλέσει σε εξαιρετικές περιπτώσεις μέχρι και την κατάρρευση της ανεμογεννήτριας ενώ η πιο συνηθισμένη συνέπεια είναι ότι εξαιτίας του πρόσθετου βάρους πάνω στο πτερύγιο, αυτό να ακινητοποιείται (Dalili et.al, 2017).

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα αίτια φθορών και βλαβών στις ανεμογεννήτριες και ιδιαίτερα στους πύργους των ανεμογεννητριών ενώ διερευνάται και παρουσιάζεται η παρακολούθηση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας μέσω αισθητήρων.

Η δομή της παρούσης εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σήμερα στα αιολικά πάρκα και παρουσιάζονται οι κατηγορίες και οι τύποι των ανεμογεννητριών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια και γίνεται ανάλυση των επιμέρους στοιχείων που αποτελούνται οι ανεμογεννήτριες.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των πύργων των ανεμογεννητριών και παρουσιάζονται τα υλικά κατασκευής των πύργων των ανεμογεννητριών μαζί με τα φορτία που παραλαμβάνουν οι

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

πύργοι των ανεμογεννητριών. Ταυτόχρονα παρουσιάζονται και οι κίνδυνοι και οι λόγοι κατάρρευσης των ανεμογεννητριών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συνηθέστερες φθορές και βλάβες που παρουσιάζονται στις ανεμογεννήτριες και παρουσιάζονται επικαιροποιημένα στοιχεία από την καταγραφή ατυχημάτων σε όλο τον κόσμο που έχουν παρουσιαστεί στις ανεμογεννήτριες.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σήμερα στις ανεμογεννήτριες και με ποιο τρόπο μέσω αυτών των αισθητήρων μπορεί να πραγματοποιηθεί η παρακολούθηση των ανεμογεννητριών και να προβλεφθούν οι βλάβες και οι φθορές σε αυτές.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται σε σχέση με την παρακολούθηση των ανεμογεννητριών μέσω αισθητήρων και τις φθορές και βλάβες που αυτές μπορεί να παρουσιάσουν κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Ανεμογεννήτριες

1.1 Η εξέλιξη των ανεμογεννητριών

Πριν αρκετά χρόνια παρατηρείται η πρώτη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο. Αρχικά το 1930 η Ρωσία και η Γαλλία επιχείρησαν να εκσυγχρονίσουν τις αιολικές μηχανές ηλεκτροπαραγωγής κατασκευάζοντας μηχανές μέγιστης ισχύος 32 KW. Σε αυτή τους την προσπάθεια ωστόσο δεν είχαν τα επιθυμητά αποτελέσματα, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν πολλά προβλήματα στην υλοποίηση του αρχικού τους στόχου. Παρόλα αυτά, η πρώτη απόπειρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο παρατηρείται στην Δανία το 1950 με μέγιστη παραγωγή ισχύος τα 25KW (Χασικίδη 2013).

Οι πρώτες ανεμογεννήτριες κατασκευάστηκαν στην δεκαετία του 1970 ,ωστόσο δεν ήταν ιδιαίτερα αποδοτικές καθώς δημιούργησαν σε πολλά ατυχήματα πτηνών ακόμα και θανατηφόρα. Ερευνητές το 1980 στόχευσαν στον σχεδιασμό μεγαλύτερων μηχανών με ενισχυμένη αποδοτικότητα και αυτή θεωρείται πως είναι η πρώτη ουσιαστική προσπάθεια βελτιστοποίησης των ανεμογεννητριών (Χασικίδη 2013).

Η αύξηση της επιφάνειας σάρωσης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ύψους του πύργου και σε συνδυασμό με την αυξημένη ταχύτητα του ανέμου, οδήγησε σε αύξηση την παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ενδεικτικό παράδειγμα αυτής της τεχνολογικής εξέλιξης είναι τα μοντέλα της VESTAS, η οποία ειδικεύεται στην κατασκευή ανεμογεννητριών ξεκινώντας το 1981 από το μοντέλο V15 διαμέτρου φτερωτής 15m και καταλήγοντας στο νέο εξελιγμένο μοντέλο τους το V164 , το οποίο παράγει 8 MW ενέργειας (Χασικίδη 2013).

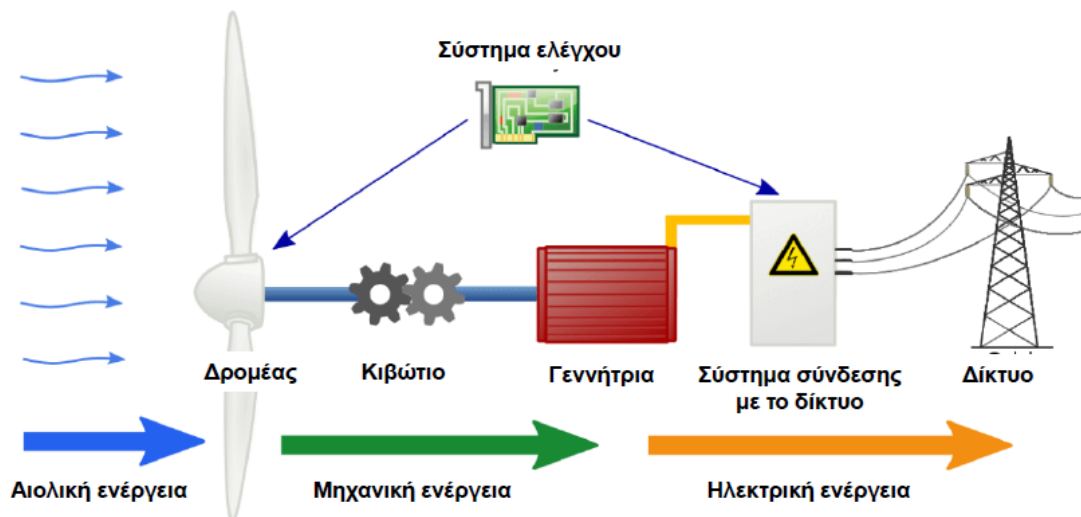
Στη σημερινή εποχή η τεχνολογία έχει προχωρήσει πολύ, υπάρχει μεγαλύτερη τεχνογνωσία σε αυτόν τον τομέα και οι ανεμογεννήτριες σταδιακά μεγαλώνουν σε ισχύ και μέγεθος, ολοένα και περισσότερο. Πολλοί κατασκευαστές επικεντρώνονται στο μέγεθος της ανεμογεννήτριας και εκμεταλλεύονται τους ισχυρούς ανέμους επιτυγχάνουν αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας .

Συγκεκριμένα η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια του κόσμου έχει ισχύ 8 MW και ύψος 135 μέτρα ενώ ο δρομέας της έχει ακτίνα 127 μέτρα. Σε γενικές γραμμές μια ανεμογεννήτρια σήμερα, μπορεί να παράγει 300 φορές περισσότερη ενέργεια από μια ανεμογεννήτρια περασμένων ετών (Χασικίδη 2013).

1.2 Αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών

Μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα αποτελείται από τα εξής μέρη: τον δρομέα , το σύστημα μετάδοσης κίνησης, την ηλεκτρογεννήτρια, το σύστημα πέδης, το σύστημα προσανατολισμού και τον πύργο (Θυμάκης, 2013).

Οι ανεμογεννήτριες είναι οι μηχανές και οι διατάξεις που μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια την κινητική ενέργεια του ανέμου (Βαφειάδης,2020).



Εικόνα 1: Αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών (https://www.kindpng.com/imgv/hoJiRjB_wind-turbine-energy-diagram-png-download-wind-power/)

Ο δρομέας είναι το τμήμα που περιστρέφεται η ανεμογεννήτρια και αποτελεί το κύριο μέρος της . Πάνω σε αυτόν είναι τοποθετημένα δύο ή τρία πτερύγια σταθερά ή με δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον άξονά τους.

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης ,δημιουργεί τις χαμηλές στροφές κίνησης στην ηλεκτρογεννήτρια (Θυμάκης ,2013)

Η ηλεκτρογεννήτρια αποτελείται από τέσσερις ή έξι πόλους και είναι συνδεδεμένη , με την έξοδο του κιβωτίου πολλαπλασιασμού στροφών και αποτελεί μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος .

Το σύστημα πέδης αποτελεί δισκόφρενο τοποθετημένο στον κύριο άξονα της γεννήτριας.

Το σύστημα προσανατολισμού ,είναι το σύστημα που προσανατολίζει τον άξονα περιστροφής του δρομέα , έτσι ώστε να βρίσκεται παράλληλα με τη φορά του ανέμου κάθε στιγμή της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας.

Ο πύργος , φέρει πάνω του όλη την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Κατασκευάζεται δικτυωτός ή σε μορφή σωλήνα .Η μορφή σωλήνα επιλέγεται περισσότερο για αισθητικούς λόγους. Το ύψος του ποικίλει και το υλικό του συνήθως αποτελείται από μέταλλο και σπάνια από σκυρόδεμα.

Ο ηλεκτρικός πίνακας και πίνακας ελέγχου , αφορά την συνολική λειτουργία της ανεμογεννήτριας (Θυμάκης 2013).

1.3 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Υπάρχουν δύο κατηγορίες ανεμογεννητριών . αυτές που είναι οριζόντιου άξονα και αυτές που είναι κατακόρυφου άξονα . Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι οι περισσότερο διαδεδομένες και χρησιμοποιούνται στα αιολικά πάρκα (Λιούμη 2010).

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

Διαθέτουν συνήθως πτερύγια με ρυθμιζόμενη κλίση στα οποία η απόδοσή τους εξαρτάται από την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου.

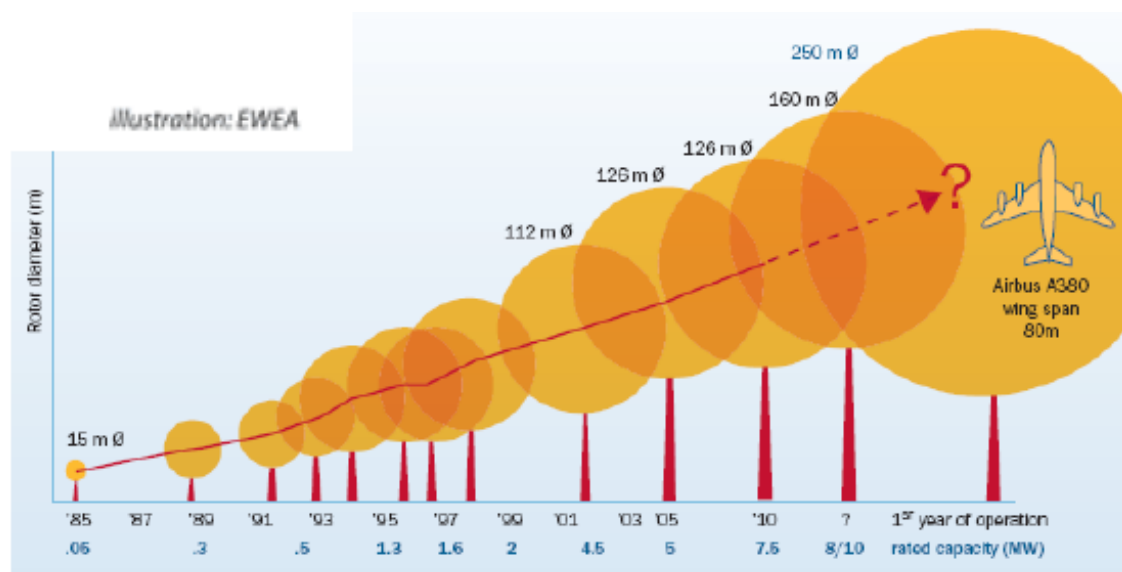
Από την άλλη πλευρά οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα δεν επηρεάζονται από την αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου και ο δρομέας περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονά του (Λιούμη 2010).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι περισσότερο διαδεδομένες ανεμογεννήτριες σήμερα είναι οι οριζόντιου άξονα και έχουν τρία πτερύγια πάνω σε κατακόρυφο άξονα (Πανίδης 2013) .Σε αυτή την κατηγορία υπάρχουν δύο υποκατηγορίες οι έχουσες τον δρομέα κατάντη και οι έχουσες τον δρομέα ανάντη.

Ο σχεδιασμός ανεμογεννήτριας τύπου κατάντη χρησιμοποιείται κυρίως σε μηχανές που χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπίσουν ισχυρούς ανέμους. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει μεταλλική πλάκα- ή πτερύγιο για να κρατά τον δρομέα με φορά προς τον άνεμο. Ο δρομέας βρίσκεται πίσω από τον πύργο και το κάλυμμα που είναι ο άξονας , με αποτέλεσμα ο άνεμος να περνά πρώτα από το κάλυμμα και μετά να χτυπά την φτερωτή (Παρασκευαδάκη 2014).

Αντίθετα ο δρομέας στον τύπο ανάντη είναι σχεδιασμένος να στρέφεται με φορά προς τον άνεμο με την βοήθεια ενός πτερυγίου, ωστόσο υπάρχει ένας μηχανισμός που σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών ανέμων μπορεί να βγάλει τον δρομέα εκτός ροής (Παρασκευαδάκη 2014). Ο σχεδιασμός του δρομέα και οι ιδιότητες του εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την διάρκεια της λειτουργίας του , καθώς η διάρκεια ζωής του δρομέα εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται αλλά και από τα μεταβλητά φορτία στα οποία υπάρχουν εκείνη τη στιγμή (Παρασκευαδάκη, 2014).

Για την κατασκευή του δρομέα επιλέγονται υλικά όπως το ξύλο, το μέταλλο, όπως ο χάλυβας ή συνθετικά υλικά, όπως ο πολυεστέρας (Παρασκευαδάκη,2014).



Εικόνα 2: Ιστορική εξέλιξη μεγέθους των ανεμογεννητριών (https://www.kindpng.com/imgv/hoJiRjB_wind-turbine-energy-diagram-png-download-wind-power/)

1.4 Τύποι ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται ουσιαστικά σε δύο τύπους οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα αιολικά πάρκα. Από την μια υπάρχουν οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών - σταθερής ταχύτητας και από την άλλη υπάρχουν οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών- μεταβλητής ταχύτητας οι οποίες θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους.

1.4.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα του δρομέα παραμένει σταθερή και είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου είναι οι επαγωγικές μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού , οι οποίες είναι οικονομικές και αρκετά δυνατές (Παρασκευαδάκη 2014). Όπως είναι φυσικό και σε αυτόν τον τύπο υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου είναι η απλή του κατασκευή , η εύκολη συντήρηση καθώς και το χαμηλό κόστος εγκατάστασής του. Στα μειονεκτήματά του ωστόσο είναι οι διαταραχές που προκαλούν στο δίκτυο (Παρασκευαδάκη 2014. Οι απότομες μεταβολές του ανέμου δημιουργούν καταπονήσεις στα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας , καθώς οι εν λόγω μηχανές λειτουργούν με πολύ μικρή ολίσθηση περίπου 1-2%. (Παρασκευαδάκη 2014). Η διαδικασία αυτή της απότομης βύθισης της τάσης θα προκαλέσει στιγμιαία ανισορροπία μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος με αποτέλεσμα η γεννήτρια να επιταχύνει και να αυξηθεί η παραγωγή της ενεργού ισχύος. Επομένως ,επειδή υπάρχουν αυξημένες μηχανικές καταπονήσεις στις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας θα πρέπει να υπάρχει μέριμνα και έγκαιρος έλεγχος ,που θα βοηθήσουν στην ομαλή λειτουργία τους (Παρασκευαδάκη 2014).

1.4.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Σε αυτόν τον τύπο ανεμογεννήτριας αξιοποιούνται οι σύγχρονες τεχνικές ελέγχου με στόχο τον έλεγχο της ταχύτητας του δρομέα ,ανάλογα με την ταχύτητα και την φορά του ανέμου, σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες ηλεκτρονικών ισχύος (Παρασκευαδάκη, 2014). Όπως αναφέρεται από την Παρασκευαδάκη τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας είναι πως εκμεταλλεύονται τον βέλτιστο συντελεστή αεροδυναμικής ισχύος, ενώ μεγιστοποιούν την παραγωγή ενέργειας και μειώνουν τις μηχανικές και αεροδυναμικές καταπονήσεις της ανεμογεννήτριας. Από την άλλη πλευρά στα μειονεκτήματα του τύπου αυτού είναι το αρκετά αυξημένο κόστος.

1.5 Υλικά κατασκευής ανεμογεννητριών

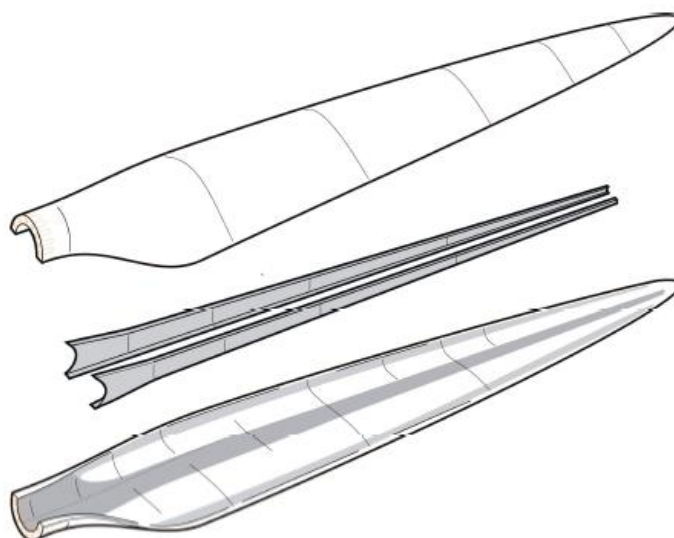
Για την κατασκευή των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας επιλέγονται πολύ συγκεκριμένα υλικά που κατά κύριο λόγο είναι σύνθετα πολυμερή σε πολυστρωματικές δομές. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται δεν είναι πολύ βαριά καθώς είναι πολύ σημαντική η εξοικονόμηση βάρους στο πτερύγιο μιας και τα φορτία βαρύτητας που δέχονται τα πτερύγια υπερβαίνουν πολλές φορές σε μέγεθος τα αεροδυναμικά φορτία. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση ισχυρότερων υλικών.

Για την κατασκευή των πτερυγίων χρησιμοποιούνται αρκετές φορές πολυστρωματικές στρώσεις συνθετικών υλικών (Μπαλόκας,2013). Για λόγους προστασίας, στην εξωτερική πλευρά των πτερυγίων χρησιμοποιούνται ίνες άνθρακα με γυαλί, καθώς εκείνες παρέχουν αντοχή, ενώ οι ίνες γυαλιού δίδουν προστασία και αντοχή σε περίπτωση πρόσκρουσης κάποιου αντικειμένου πάνω τους και χρησιμοποιούνται σαν οπλισμός των πτερυγίων των ανεμογεννητριών.

Ένα άλλο υλικό που χρησιμοποιείται συχνά ως μήτρα στην κατασκευή των πτερυγίων είναι και οι εποξειδικές ρητίνες (Ραυτογιάννης, 2009).

Αρκετές φορές τα ανθρακονήματα επειδή έχουν μεγάλο κόστος αντικαθίστανται με ίνες γυαλιού. Το κόστος των άκαμπτων ινών άνθρακα είναι αρκετά υψηλό. Παρόλα αυτά επιλέγονται καθώς το βάρος τους είναι κατάλληλο στο να προσφέρουν μεγάλη απόδοση (Μπακόλας,2013)

Στις πολυστρωματικές στρώσεις για την κατασκευή πτερυγίων χρησιμοποιούνται εποξειδικές ρητίνες καθώς αυτές φαίνεται πως προσαρμόζονται πιο εύκολα και αντέχουν περισσότερο σε διάβρωση, καθώς επηρεάζονται λιγότερο από την υγρασία και τη θερμοκρασία σε σχέση με άλλα πολυμερή (Μπακόλας, 2013).



Εικόνα 3: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας με πολυστρωματικές στρώσεις πολυμερών υλικών
(<https://www.mdpi.com/1996-1944/10/11/1285/htm>)

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

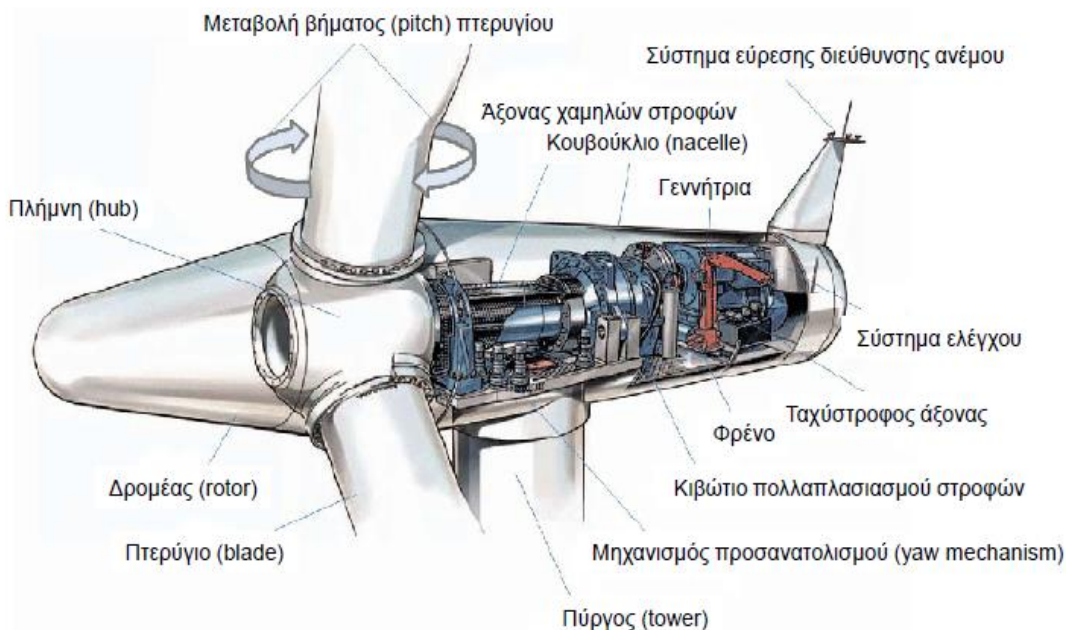
Όπως αναφέρεται και παραπάνω η επιλογή των υλικών κατασκευής των πτερυγίων είναι σημαντική και πρέπει να εξαρτάται από το εάν τα υλικά πληρούν τις ακόλουθες προδιαγραφές . Αρχικά πρέπει να διαθέτουν μεγάλη αντοχή και διάρκεια ζωής ,να έχουν χαμηλή πυκνότητα και υψηλή δυσκαμψία ώστε να διατηρηθούν τα βέλτιστα επίπεδα απόδοσης (Ραυτογιάννης,2009). Επίσης ιδιαίτερη σημασία έχουν οι ίνες άνθρακα και τα ανθρακονήματα καθώς οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι σημαντικές για την λειτουργία των ανεμογεννητριών, σε συνδυασμό με το συνδετικό υλικό που τις συγκρατεί και τις προστατεύει από τις καιρικές και θερμοκρασιακές μεταβολές. (Ραυτογιάννης, 2009)

Εν κατακλείδι είναι φανερό πως η διαδικασία βελτιστοποίησης του σχεδιασμού ενός πτερυγίου είναι μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί προσεκτικές επιλογές υλικών, συστηματικό έλεγχο της απόδοσης.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Τα μέρη και τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας

2.1 Εισαγωγή

Στο εσωτερικό μιας ανεμογεννήτριας υπάρχουν χιλιάδες εξαρτήματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με απώτερο σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο. (Σεμπίλι,2010). Στην εικόνα 4 παρουσιάζονται αναλυτικά τα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας ,τα σημαντικότερα ωστόσο από αυτά είναι τα εξής (Σεμπίλι, 2010) :



Εικόνα 4: Εσωτερικό ανεμογεννήτριας (<https://www.windpowermonthly.com/article/995556/siemens-wins-repeat-100mw-ontario-contract>)

Πύργος ανεμογεννήτριας	Συσκευή ένωσης κελύφους με τον άξονα
Δρομέας	Άξονας χαμηλής ταχύτητας
Πτερύγια	Κιβώτιο ταχυτήτων
Κύλινδρος στροφέα πτερυγίων	Πύργος ανεμογεννήτριας
Γρανάζια στροφέα πτερυγίων	Δρομέας
Κέλυφος έδρασης πτερύγιων	Κύλινδρος στροφέα πτερυγίων
Ελεγκτής κελύφους	Γρανάζια στροφέα πτερυγίων
Σύστημα στήριξης δρομέα	Κέλυφος έδρασης πτερύγιων
Ανεμόμετρο	Ελεγκτήρας κελύφους
Σημείο πρόσδεσης με γερανό για την ανύψωση	Σύστημα στήριξης δρομέα

Ελεγκτής	Ανεμόμετρο
Άτρακτος ανεμογεννήτριας(Nacelle)	Σημείο πρόσδεσης με γερανό για την ανύψωση
Πτερύγια	Ελεγκτήρας
Συσκευή ένωσης κελύφους με τον άξονα	Άξονας χαμηλής ταχύτητας
Κιβώτιο ταχυτήτων	

2.2 Άτρακτος ανεμογεννήτριας (Nacelle)

Η άτρακτος της ανεμογεννήτριας διαθέτει μεγάλο εσωτερικό χώρο ,προκειμένου να πραγματοποιούνται διάφορες συντηρήσεις. Είναι τοποθετημένη πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας και συνδεδεμένη με τον δρομέα. Κατασκευάζεται από ανθρακονήματα και η δράση του είναι να προστατεύει όλο τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό από τις καιρικές συνθήκες. Στην άτρακτο βρίσκεται η γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων και όλος ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός (Σεμπίλι, 2010).

Το υλικό κατασκευής της ατράκτου είναι ενισχυμένο με υαλοβάμβακα και προστατεύει τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό της ανεμογεννήτριας από βροχή, χιόνι, σκόνη, κ.λ.π.



Εικόνα 5: Ανύψωση ατράκτου της ανεμογεννήτριας στον πύργο (<http://www.cres.gr/cres/index.html>)

2.3 Πτερύγια

Το υλικό κατασκευής των πτερυγίων είναι τα ανθρακονήματα ή από ενισχυμένο πολυεστέρα και αυτό οφείλεται στο μικρό βάρος του υλικού (Πουλάς,2017). Συνήθως μια ανεμογεννήτρια έχει τρία πτερύγια και η περιστροφή των πτερυγίων πραγματοποιείται από την συνδυασμένη πίεση που ασκείται από τον άνεμο όταν αυτός προσπίπτει στα πτερύγια και την δύναμη της άνωσης.

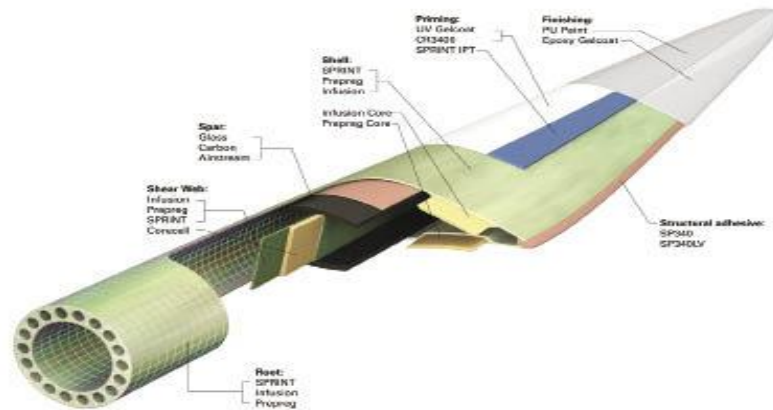


Εικόνα 6: Ανεμογεννήτριες 3 πτερυγίων (<https://www.usinenouvelle.com/article/le-parc-eolien-en-mer-de-dieppe-le-report-pret-a-prendre-le-large.N888139>)

Το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας αποτελεί συγκόλληση πολλών τμημάτων από σύνθετα υλικά μεταξύ τους και είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί μια ομοιομορφία των υλικών και των στρώσεων. (Rumsey & Paquette, 2008)

Για λόγους προστασίας, πολλές φορές, στην εξωτερική πλευρά των πτερυγίων τοποθετούνται ίνες άνθρακα οπλισμένες με γυαλί καθώς οι ίνες άνθρακα παρέχουν δυσκαμψία και αντοχή ενώ οι ίνες γυαλιού προσδίδουν προστασία έναντι πρόσκρουσης αντικειμένων πάνω στο πτερύγιο.

Στην επόμενη εικόνα 7, παρουσιάζεται ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας κατασκευασμένο με τις πολύστρωτα σύνθετα υλικά.



Εικόνα 7: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας (<https://www.mdpi.com/2073-4360/12/8/1828/html>)

Η κατασκευή των πτερυγίων πραγματοποιείται τις περισσότερες φορές με τις πολυστρωματικές στρώσεις σύνθετων υλικών (Μπαλόκας,2013).

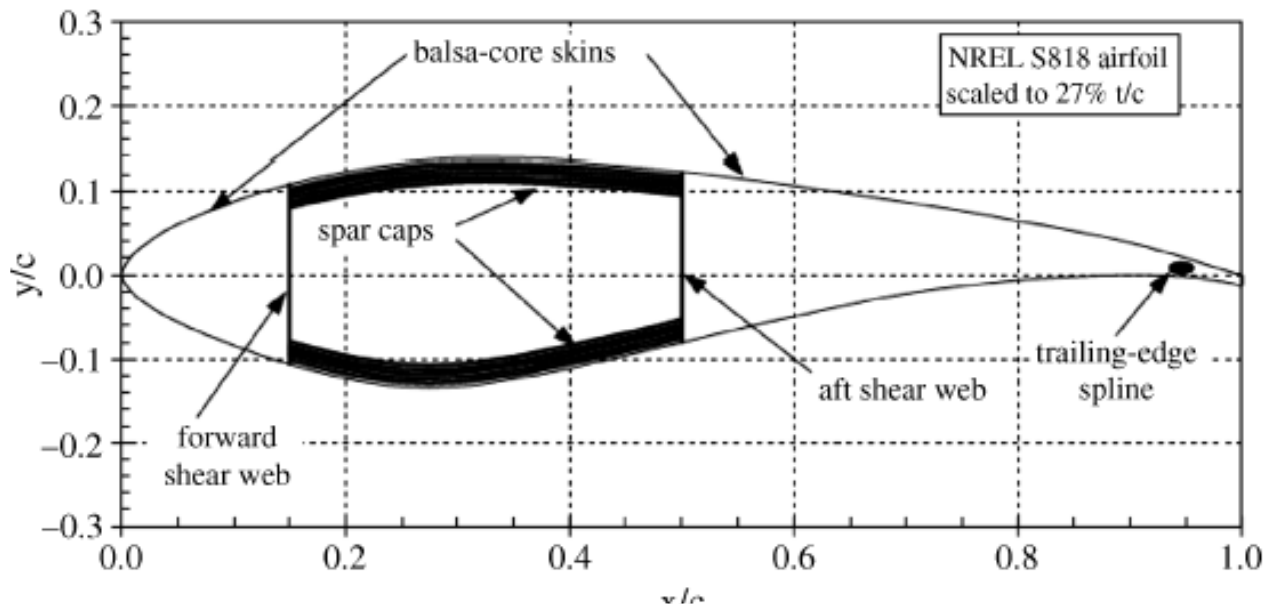
Ένας ασθενής πυρήνας από στερεοποιημένο αφρό ή με κυβελωτή διάταξη περικλείεται μεταξύ δύο ισχυρών και δύσκαμπτων διαστρωματώσεων. Ο πυρήνας μεταξύ των δύο διαστρωματώσεων παίζει το ρόλο μοχλοβραχίονα αυξάνοντας τη ροπή αδράνειας των δύο επιμέρους διαστρωματώσεων, υπό την προϋπόθεση ότι εξασφαλίζεται η μεταξύ τους συνεργασία, και τελικώς καταλήγει σε αυξημένη καμπτική δυσκαμψία του όλου συστήματος με πολύ μικρή επιβάρυνση στο βάρος και το κόστος του τελικού προϊόντος, αλλά και με αυξημένη αντοχή σε λυγισμό ενώ ένα άλλο υλικό που χρησιμοποιείται συχνά στην κατασκευή των πτερυγίων είναι και οι εποξειδικές ρητίνες (Ραυτογιάννης, 2009).

Τα ανθρακονήματα επειδή έχουν μεγάλο κόστος πολλές φορές αντικαθίστανται από ίνες γυαλιού. Γενικά, το κόστος των ινών άνθρακα υψηλής δυσκαμψίας μπορεί να δικαιολογηθεί καθώς η οικονομία σε βάρος προσφέρει μεγάλη απόδοση, όπως στις εφαρμογές ανεμογεννητριών και αεροδιαστημικής, ή όταν απαιτείται υψηλή θερμοκρασιακή μόνωση, αντοχή και βελτιωμένο όριο διαρροής ή εάν μεγάλο χρονικό διάστημα διατήρησης της αντοχής είναι καθοριστικό για την προκείμενη εφαρμογή. Το συνδετικό υλικό που χρησιμοποιείται στις πολυστρωματικές στρώσεις για την κατασκευή των πτερυγίων είναι κατά κύριο λόγο οι εποξειδικές ρητίνες όπως προαναφέρθηκε καθώς αυτές έχουν μεγάλη ικανότητα προσαρμογής, των υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων και της μεγάλης αντοχής σε διάβρωση. Επιπροσθέτως, οι εποξειδικές ρητίνες επηρεάζονται λιγότερο από την υγρασία και τη θερμοκρασία σε σχέση με άλλα πολυμερή συνδετικά. Προτιμώνται επίσης για την απλή διαδικασία στερεοποίησης που μπορεί να γίνει σε θερμοκρασίες μεταξύ 5° και 150°C.

Οι αεροδυναμικοί παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά την σχεδίαση και την κατασκευή των πτερυγίων των ανεμογεννητριών αναφέρονται από τον Βαφειάδη (2020) και είναι οι ακόλουθοι:

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

- Οι αεροτομές
- Η ονομαστική ταχύτητα και ισχύς του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης
- Ο αριθμός των πτερυγίων (συνήθως 3)
- Η τοποθέτηση του δρομέα
- Ο τρόπος ελέγχου της παραγόμενης ισχύς
- Ο σχεδιαστικός λόγος ταχυτήτων των πτερυγίων

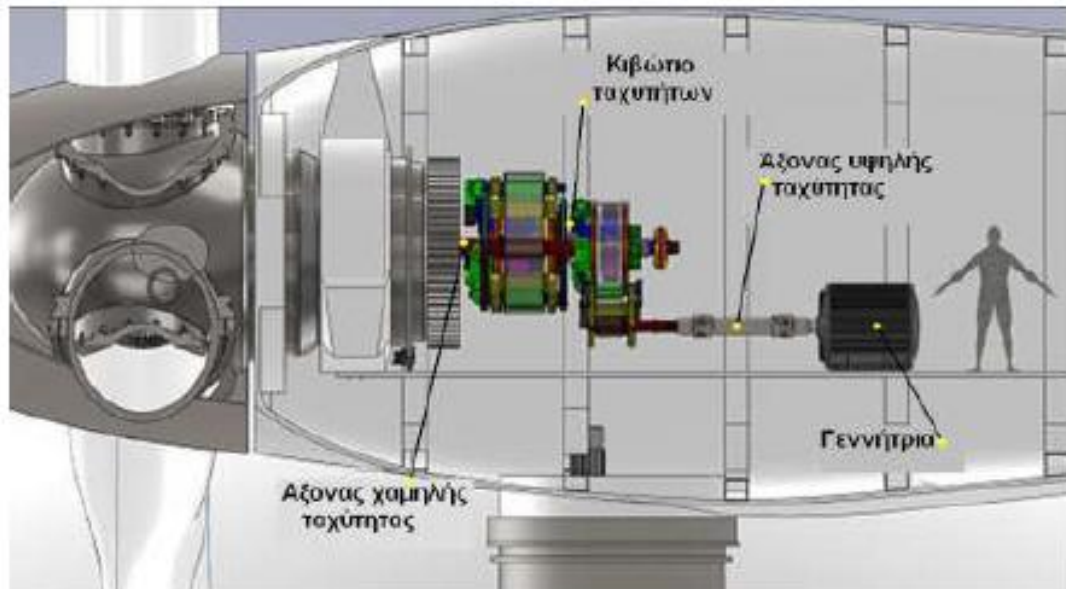


Εικόνα 8: Η αεροδυναμική απόδοση των πτερυγίων των ανεμογεννητριών

(https://www.researchgate.net/figure/Common-structural-architecture-for-wind-turbine-blade_fig3_227697710)

2.4 Στροφέας πτερυγίων (Pitch)

Σημαντικό ρόλο για την κίνηση και περιστροφή των πτερυγίων παίζει το σύστημα ελέγχου του στροφέα, που ρυθμίζει το βήμα περιστροφής των πτερυγίων. Ο στόχος τους είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα να παραμένει εντός των ορίων λειτουργίας, καθώς οι μεταβολές και η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου είναι συχνή και επαναλαμβανόμενη. Ολόκληρο το σύστημα μετάδοσης της κίνησης αποτελείται από άξονες ταχυτήτων (χαμηλών και υψηλών) καθώς επίσης και από το κιβώτιο ταχυτήτων. Το κιβώτιο ταχυτήτων βοηθά στο να πολλαπλασιάζονται οι στροφές και να προσαρμόζεται η ταχύτητα του δρομέα στην κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής, κάτι που είναι απαραίτητο για την παραγωγή ρεύματος της ηλεκτρογεννήτριας (Πουλάς, 2017).



Εικόνα 9: Σύστημα μετάδοσης κίνησης σε ανεμογεννήτρια (<https://www.windpowerengineering.com/variable-speed-hard-geared-transmission-may-improve-wind-power-efficiency-5-to-10/>)

2.5 Ηλεκτρογεννήτρια

Η ηλεκτρογεννήτρια μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να λειτουργήσει σε αρκετά υψηλές στροφές (1000-3600 στροφές/λεπτό), γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στην λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας. Για την επίλυση αυτό του προβλήματος χρησιμοποιείται το κιβώτιο ταχυτήτων (Σεμπίλι, 2010). Υπάρχουν δύο κατηγορίες ηλεκτρογεννήτριας η σύγχρονη και η επαγωγική οι οποίες συνδέονται στην έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω υδραυλικού ή ελαστικού συνδέσμου. Η τοποθέτησή της γίνεται κατά αυτόν τον τρόπο διότι στοχεύει στο να μετατρέψει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Τέλος μια ηλεκτρογεννήτρια διαθέτει και το σύστημα προσανατολισμού, μέσω ανεμόμετρου το οποίο μπορεί και ανιχνεύει την διεύθυνση του ανέμου και κρατά τον άξονα περιστροφής του δρομέα παράλληλα με την διεύθυνση του ανέμου (Σεμπίλι, 2010).

2.6 Μηχανικό φρένο (Brake)

Η ύπαρξη του μηχανικού φρένου στον δρομέα θεωρείται απαραίτητη, καθώς σε περίπτωση θυελλωδών ανέμων και υψηλών ταχυτήτων, μπορεί να προσαρμόσει την ταχύτητα ανεξάρτητα της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή κινεί τον δρομέα με μια σταθερή ταχύτητα ανεξαρτήτως της ταχύτητας του ανέμου ενώ ακινητοποιεί και τελειώνει τον δρομέα σε περίπτωση συντήρησης της ανεμογεννήτριας. (Αντωνάκη, 2010)

2.7 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγει η ηλεκτρογεννήτρια είναι μικρότερη από αυτή που έχει παραλάβει ο δρομέας στην είσοδο και αυτό οφείλεται στις απώλειες της ηλεκτρογεννήτριας. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση (Αντωνάκη,2010) :

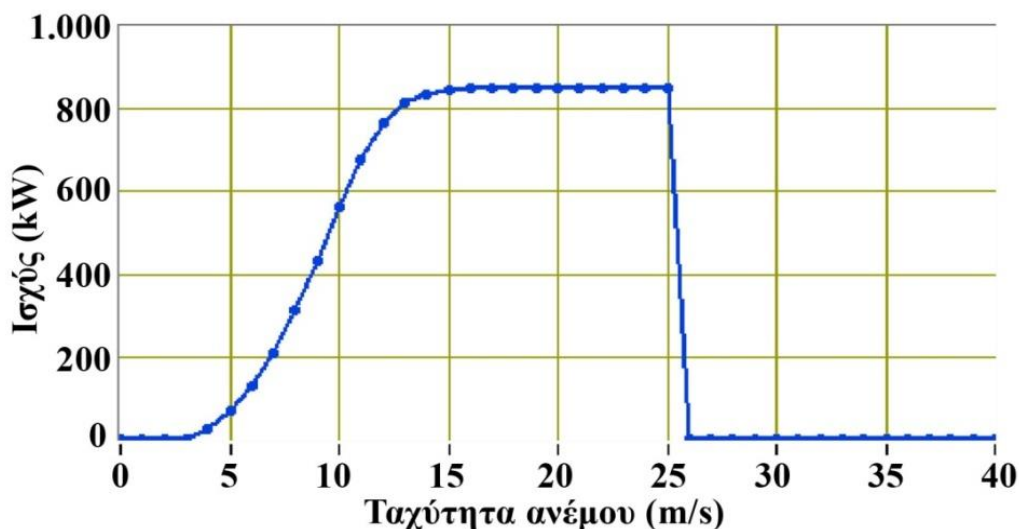
$$P_T = C_P \cdot \eta_g \cdot \eta_b \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot V^3$$

Όπου: η_g και η_b είναι οι αποδόσεις (ισχύς εξόδου/ ισχύς εισόδου) για τη γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων.

Η αποδοτικότητα των κιβωτίων ταχυτήτων κυμαίνονται συνήθως από 90-95%. Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας μας δείχνει την καθαρή ισχύ εξόδου σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου και παρέχεται από τους κατασκευαστές για κάθε ανεμογεννήτρια (Πανίδης, 2013).

Στην παρακάτω εικόνα παρατηρείται πως αυτές οι καμπύλες, διαθέτουν τρία οριακά σημεία στην ταχύτητα του ανέμου (Αλεξανδρίδης Α,2013) αναφορικά διαθέτουν την ταχύτητα ένταξης, την ονομαστική ταχύτητα και την ταχύτητα αποκοπής.

- Η ταχύτητα ένταξης αφορά την ταχύτητα του ανέμου. Αυτή η ταχύτητα θα βοηθήσει την ανεμογεννήτρια να ξεκινήσει την παραγωγή ενέργειας με τυπικές ταχύτητες ανέμου από 3 έως 5 m/s.
- Η ονομαστική ταχύτητα είναι η κατώτερη ταχύτητα στην οποία φτάνει η ανεμογεννήτρια στην ονομαστική της ισχύ εξόδου .
- η ταχύτητα αποκοπής θεωρείται η υψηλότερη ταχύτητα του ανέμου στην οποία μπορεί να λειτουργήσει μια ανεμογεννήτρια. Είναι κατασκευασμένη με αυτό τον τρόπο ώστε όταν τείνει να ξεπεράσει αυτή την ταχύτητα, να σταματάει, με στόχο την αποφυγή επικίνδυνων ατυχημάτων.



Εικόνα 10: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας (<http://www.aiolikigi.gr/el/e-learning/wind-parks-annual-electricity-production/>)

2.8 Συντήρηση ανεμογεννήτριας

Για την συντήρηση μιας ανεμογεννήτριας πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένες εργασίες και δραστηριότητες. Στους ακόλουθους πίνακες 1 έως 6 παρουσιάζονται συνοπτικά οι εργασίες καθώς και οι ενέργειες που πρέπει να ακολουθηθούν για την ορθή συντήρηση των ανεμογεννητριών σύμφωνα και με τον Πουλά(2017).

Πίνακας 1: Εργασία στη Βάση του Πύργου – Χώρου Κυψελών Ελέγχου

A/A	Εργασία
1	Εργασία στην Εσωτερική Κλίμακα – Σύσφιξη κοχλιών συγκράτησης
2	Εργασία επί των οδηγών καλωδίωσης (σύσφιξη /χαλάρωση οδηγών)
3	Εργασία στην Κυψέλη Ελέγχου
4	Έλεγχος Τάσης & Λοιποί Ηλεκτρικοί Έλεγχοι
5	Εργασία στα συστήματα φωτισμού και τα λοιπά ηλεκτρικά κυκλώματα της Α/Γ
6	Δοκιμή Υπερτάχυνσης Α/Γ
7	Αντικατάσταση καρτών πίνακα ελέγχου
8	Έλεγχος και αντικατάσταση ασφαλειών

Πίνακας 2: Εργασία στον χώρο της Μέσης Τάσης της Α/Γ

A/A	Εργασία
1	Άνοιγμα /Κλείσιμο Διακόπτη ΜΣ
2	Σύσφιξη Κοχλιών Κυψελών Ισχύος/ Ελέγχου
3	Έλεγχοι σύσφιξης ακροδεκτών καλωδίωσης
4	Εργασία Συντήρησης στους κοντάκτορες του ρελέ
5	Αντικατάσταση ασφαλειών 35Α
6	Καθαρισμός Μ/Σ και ΜΤ

Πίνακας 3: Εργασία στον πύργο της ανεμογεννήτριας

A/A	Εργασία
1	Εργασία επί της / στην εσωτερική κλίμακα της Α/Γ
2	Έλεγχος / Αντικατάσταση τμήματος της καλωδίωσης Ισχύος και Σημάτων
3	Αντικαταστάσεις / Επιδιορθώσεις μηχανολογικών εξαρτημάτων

Πίνακας 4: Εργασίες στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας

A/A	Εργασία
1	Αλλαγή συρματόσχοινου βιντσιού
2	Εργασία στο σύστημα εξαερισμού
3	Εργασία στο Κύριο Σώμα της Α/Γ και τον άξονα της Α/Γ
4	Εργασία στο κιβώτιο του συστήματος προσανεμισμού
5	Έλεγχος διακένου Η/Γ
6	Εργασία στους ανεμιστήρες της νασέλλας
7	Εργασία στο υδραυλικό σύστημα της Α/Γ
8	Δοκιμή Υπερτάχυνσης και εργασίες κατά τη διάρκεια αυτής
9	Εργασίες στην οδήγηση της καλωδίωσης
10	Εργασίες στο διακόπτη Περιορισμού στρέβλωσης της καλωδίωσης
11	Εργασίες στους κινητήρες της περύγωσης
12	Λίπανση Συστήματος Προσανεμισμού
13	Αλλαγή κιβωτίου συστήματος προσανεμισμού
14	Αλλαγή καλωδίωσης

Πίνακας 5: Εργασίες σε Ύψος εκτός της ανεμογεννήτριας

A/A	Εργασία
1	Έλεγχος Κλωβού και Λοιπών στηριγμάτων ανεμομέτρου
2	Έλεγχος ευθυγράμμισης ανεμομέτρου / στήριξης
3	Έλεγχος ανεμοδείκτη
4	Έλεγχος απόστασης μεταξύ των αισθητήρων του ανεμομέτρου (υπερηχητικά ανεμόμετρα μόνο)
5	Έλεγχος φάρων αεροπλοΐας
6	Αντικατάσταση Ανεμομέτρου, Αντικατάσταση Κλωβού, Αντικατάσταση Φάρων αεροπλοΐας

Πίνακας 6: Εργασίες στον δρομέα της ανεμογεννήτριας

A/A	Εργασία
1	Έλεγχος Πλήμνης, Έλεγχος Σύνδεσης Πτερυγίων, Έλεγχος Κιβωτίου περιστροφής πτερυγίων
2	Έλεγχος, συμπλήρωση Κεντρικού δοχείου λίπανσης
3	Έλεγχος συστήματος αντικεραυνικής προστασίας
4	Έλεγχος Καλωδιώσεων
5	Έλεγχος λειτουργίας των καταστολέων υπέρτασης
6	Έλεγχος της συστοιχίας Επαφών ολίσθησης
7	Έλεγχος ηλεκτρικών Καμπίων δρομέα
8	Έλεγχος, συντήρηση Κεντρικού δοχείου λίπανσης
9	Αντικατάσταση κινητήρα περιστροφής πτερυγίων
10	Αντικατάσταση αισθητήρων στο δρομέα
11	Αλλαγή Κιβωτίου συστήματος περιστροφής πτερυγίων

2.9 Πύργος ανεμογεννήτριας

Ο πύργος μιας ανεμογεννήτριας στηρίζει το σύστημα της ατράκτου, το οποίο ζυγίζει αρκετούς τόνους και ανυψώνει τον ρότορα σε ένα ύψος όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι σημαντικά μεγαλύτερη.

Υπάρχουν διάφορα υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας αλλά υπάρχουν και διάφορες μορφές. Πιο αναλυτικά σε ότι αφορά τις μορφές των ανεμογεννητριών υπάρχει η μονοπολική διάταξη σωλήνα (Tubular), ο δικτυωτός (lattice), η τριποδική διάταξη σωλήνα (three-legged) και μονοπολική διάταξη με αντιστήριξη καλωδίων (guy-wired pole tower) (Μπίρδας, 2015).



Εικόνα 11: Διάφορες μορφές πύργων ανεμογεννητριών

(http://oceanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/5009/mech_43005.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

2.10 Κατηγορίες Πύργων ανεμογεννητριών

2.10.1 Δικτυωτός πύργος

Ο συγκεκριμένος τύπος είναι πιο μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται περισσότερο στο παρελθόν. Για την κατασκευή και την συντήρησή τους απαιτείται μεγάλη οικονομική δαπάνη και ένα από τα βασικά τους μειονεκτήματα είναι η αισθητική όχληση που δημιουργούν. Ωστόσο για την κατασκευή τους δεν χρησιμοποιούνται πολλά υλικά μιας και είναι διαπερατές, γεγονός που συμβάλλει στον περιορισμό της καταπόνησής τους από τις καιρικές συνθήκες.

Πολλές φορές παρατηρούνται αρκετά λεπτές κατασκευές σε αυτόν τον τύπο κάτι που είναι εξαιρετικά επικίνδυνο μιας και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα λυγισμού του πύργου. Γι' αυτόν τον

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής
λόγο σε όλη την βάση του πύργου τοποθετούνται χιαστί δοκοί, προκειμένου να συμβάλλουν στην
ανθεκτικότητα και την αντοχή του πύργου. (Μπίρδας, 2015).

Στην Γερμανία και συγκεκριμένα στο Βραδεμβούργο βρίσκεται ο υψηλότερος δικτυωτός πύργος
ανεμογεννήτριας με ύψος 160 μέτρα ενώ το πλάτος στην βάση του πύργου είναι περίπου 30 μέτρα.
Αυτός ο πύργος παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα 12 από τους Κώτσια και Μανουσέλη (2019).



Εικόνα 12: Ο μεγαλύτερος δικτυωτός πύργος ανεμογεννήτριας του κόσμου
(https://www.igwindkraft.at/?mdoc_id=1004609)

2.10.2 Σωληνοειδής χαλύβδινος πύργος

Αυτός ο τύπος κατασκευής πύργου συναντάται αρκετά συχνά καθότι ο σχεδιασμός του είναι
αρκετά εύκολος. Για την κατασκευή του χρησιμοποιείται χάλυβας . Σε ότι αφορά τις διαστάσεις
του ,η διάμετρός του έχει διαστάσεις στην βάση 4,55 μέτρα και στην κορυφή 2 μέτρα. Για να
μπορέσει να κατασκευαστεί ορθά ο πύργος χρειάζονται τρία ή τέσσερα τμήματα μήκους 20-30
μέτρων, τα οποία μεταξύ τους συνδέονται με κοχλίες. Υπάρχουν περιπτώσεις που ο πύργος ξεπερνά
τα 100 μέτρα ,σε αυτές λοιπόν η βάση του κατασκευάζεται μεγαλύτερη ,για την αποφυγή
ατυχημάτων , κάτι που καθιστά την μεταφορά και την κατασκευή του πολυσύνθετη και δύσκολη
(Μπίρδας,2015)



Εικόνα 13: Σωληνοειδής χαλύβδινος πύργος Α/Γ (<http://www.cres.gr/cres/index.html>)



Εικόνα 14: Τοποθέτηση πύργου ανεμογεννήτριας (<http://www.cres.gr/cres/index.html>)

2.10.3 Υβριδικός πύργος σκυροδέματος/χάλυβα

Για την κατασκευή του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος δίδεται μεγάλη προσοχή σε διάφορες λεπτομέρειες , έτσι ώστε να αποφευχθεί ο λυγισμός τους από την επιβάρυνση των καιρικών συνθηκών. Στο κάτω μέρος του πύργου βρίσκεται το σκυροδέμα , ενώ από την άλλη πλευρά στο πάνω μέρος του πύργου βρίσκεται το κομμάτι του χάλυβα. Η αλληλεπίδραση του ενός υλικού στο άλλο και η συνεργασία τους συμβάλλει στην απόδοση της ιδιοσυχνότητας που είναι και ο απώτερος σκοπός τους. Είναι σημαντικό ,παρότι αυξάνει αρκετά το κόστος της κατασκευής, η σύνδεσή τους να γίνεται όσο το δυνατό με τον καλύτερο τρόπο , με στόχο την σωστή λειτουργία ολόκληρης της κατασκευής. (Μπίρδας, 2015).

2.10.4 Σύνθετος πυλώνας από ινοπλισμένα πολυμερή υλικά.

Μια καινούρια κατασκευαστική λύση για τους πύργους ανεμογεννητριών είναι και η κατασκευή πύργων από σύνθετα πολυμερή υλικά που είναι ινοπλισμένα. Το πλεονέκτημα αυτών των υλικών είναι η μείωση του κόστους συντήρησης της ανεμογεννήτριας αλλά και η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των υλικών ενώ το πιο χαρακτηριστικό των σύνθετων πολυμερών υλικών είναι η πολύ μεγάλη αντοχή τους σε κόπωση. Τα σύνθετα πολυμερή υλικά που είναι ινοπλισμένα έχουν επίσης και πολύ καλή συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον και αυτό το καθιστά ένα σημαντικό υλικό για την κατασκευή παράκτιων ανεμογεννητριών (Κώτσιας και Μανουσέλης, 2019).



Εικόνα 15: Κατασκευή πύργου ανεμογεννήτριας από ινοπλισμένα πολυμερή υλικά
(http://oceanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/5009/mech_43005.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Πύργοι ανεμογεννητριών

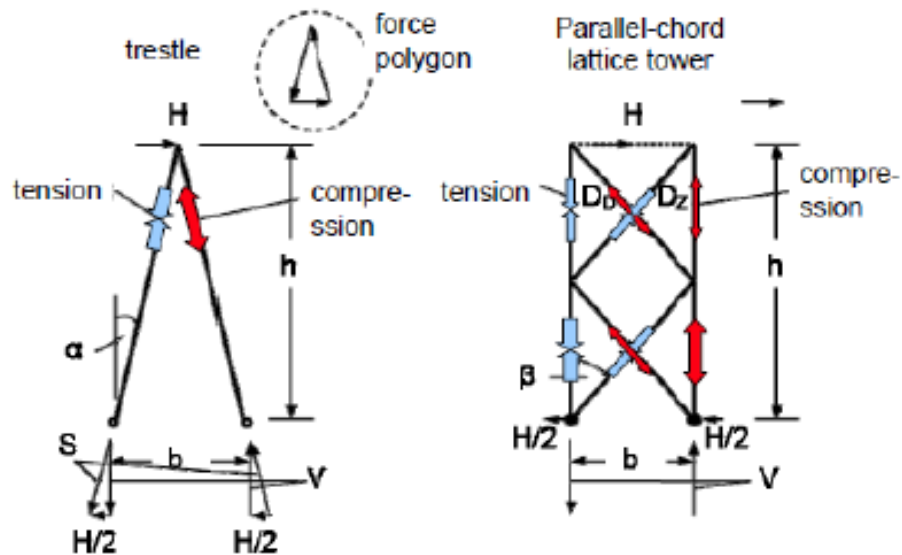
3.1 Φορτία καταπόνησης πύργων Α/Γ

Όπως είναι γνωστό από την αντοχή των υλικών, ο πύργος της ανεμογεννήτριας, που συνήθως είναι χαλύβδινος σωλήνας, καταπονείται τόσο στατικά όσο και δυναμικά. Η πιο επικίνδυνη διατομή στην οποία υπάρχουν οι περισσότερες πιθανότητες να εμφανισθεί αστοχία λόγω στατικής καταπόνησης είναι η βάση του πύργου. Η βάση του πύργου καταπονείται κυρίως θλιπτικά και καμπτικά.

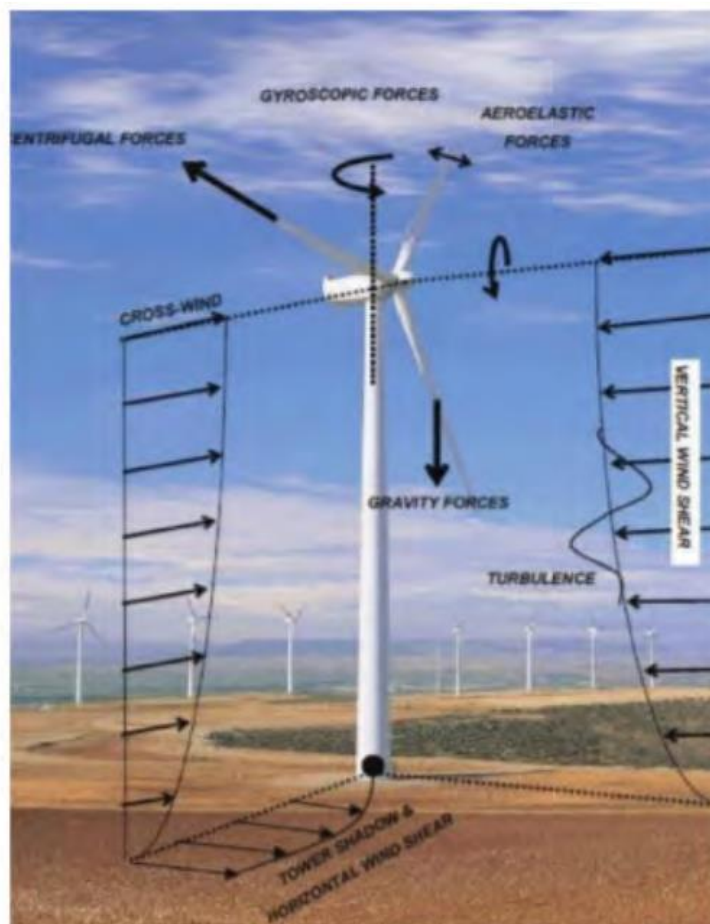
Με στόχο τον ορθό σχεδιασμό και την σωστή λειτουργία του πύργου γίνονται ειδικές μελέτες και δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στο βάρος του πύργου, καθώς και στο φορτίο του ανέμου, ο οποίος μπορεί να δημιουργήσει σοβαρό πρόβλημα στην εύρυθμη λειτουργία του πύργου. Τα θεμέλια του πύργου επιβαρύνονται από αυτό το βάρος και καλούνται να αντέξουν αυτό το φορτίο με ασφάλεια, καθώς ο άνεμος προκαλεί έντονη ταλάντωση στον πύργο. Για αυτό το λόγο τα φορτία της ανωδομής παρουσιάζουν εκκεντρότητα ως προς τη θεμελίωση, η οποία σαφώς πρέπει να ληφθεί υπόψη (Baniotopoulos, 2011).

Τα ίδια φορτία του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι το βάρος της νασέλας, το βάρος του ρότορα, οι ανεμοπιέσεις που δέχεται ο πύργος καθώς επίσης και το ίδιο βάρος της κατασκευής του πύργου. Στην κορυφή του πύργου εφαρμόζονται τα φορτία της νασέλας και του ρότορα ενώ το ίδιο βάρος του πύργου και οι ανεμοπιέσεις κατανέμονται σε όλο το ύψος του πύργου της ανεμογεννήτριας (Κώτσιας και Μανουσέλης, 2019).

Το ίδιο βάρος του πύργου υπολογίζεται με βάση την μονάδα μάζας του χάλυβα εφόσον ο πύργος είναι χαλύβδινος ενώ οι ανεμοπιέσεις υπολογίζονται για συγκεκριμένα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και σε συνδυασμό με την γεωμετρία και το ύψος του πύργου της ανεμογεννήτριας. Είναι σημαντικό κατά τον υπολογισμό των φορτίων που φέρει ο πύργος της ανεμογεννήτριας να διαχωρίζονται εκείνα τα στοιχεία του πύργου που υπόκεινται σε θλίψη και σε εκείνα που υπόκεινται σε εφελκυσμό διότι για τα θλιπτικά φορτία θα πρέπει να υπολογίζεται ο λυγισμός και ιδιαίτερα η στρέψη και η κάμψη που υπόκειται ο πύργος της ανεμογεννήτριας σε συνδυασμό με τον λυγισμό ενώ για τα εφελκυστικά φορτία είναι σημαντική η αντοχή των κοχλιών στους κόμβους του πύργου. Οι καμπτικές ροπές είναι επίσης ακόμα ένα σημαντικό στοιχείο που θα πρέπει να υπολογίζεται με ακρίβεια υπολογίζοντας τις διατομές του πύργου ξεκινώντας από την κορυφή και καταλήγοντας στην βάση του πύργου και την θεμελίωση. Οι ανεμοπιέσεις στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας οδηγούν επίσης στην δημιουργία καμπτικών ροπών στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Στην ακόλουθη εικόνα 16 και 17, παρουσιάζονται τα φορτία που εφαρμόζονται στους πύργους των ανεμογεννητριών καθώς και η παραλαβή αυτών των φορτίων από τα μέλη του πύργου . (Κώτσιας & Μανουσέλης, 2019)



Εικόνα 16: Παραλαβή φορτίων από πύργο ανεμογεννητριών
http://oceanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/5009/mech_43005.pdf?sequence=1&isAllowed=y



Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση κατανομής των φορτίων σε πύργο ανεμογεννήτριας
http://oceanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/5009/mech_43005.pdf?sequence=1&isAllowed=y

3.2 Κίνδυνοι κατάρρευσης των πύργων Α/Γ

Η συνεργασία θεμελίωσης και υπεδάφους επηρεάζεται αρκετά από διάφορους παράγοντες (έντονες βροχοπτώσεις ,σεισμούς κ.α). Είναι δυνατό να προκύψουν αστοχίες των Ανεμογεννητριών ανάλογα με το υπόβαθρο, στο οποίο θεμελιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους και διάφορους εξωτερικούς. Παρακάτω αναφέρονται όλοι οι κίνδυνοι και συνθήκες που έρχονται αντιμέτωποι οι πύργοι καθημερινά.

3.2.1 Ρευστοποίηση εδάφους

Οι μη συνεκτικοί κορεσμένοι εδαφικοί σχηματισμοί, στην περίπτωση που υπόκεινται σε φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες, παρουσιάζουν την τάση να συμπυκνωθούν. Όμως εξ 'αιτίας της αδυναμίας τους να μεταβάλλουν τον όγκο τους, αυξάνεται η πίεση του νερού, ενώ ταυτόχρονα μηδενίζεται η διατμητική τους αντοχή. Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ότι αλλάζει η κατάσταση αυτών των εδαφών από στερεά σε υγρή φάση, δηλαδή υπόκεινται σε ρευστοποίηση. Στην εμφάνιση της ρευστοποίησης βασικό ρόλο παίζουν οι τοπικές συνθήκες των εδαφικών σχηματισμών. Η ρευστοποίηση εμφανίζεται συνήθως σε κορεσμένα εδάφη κυρίως αμμώδη , ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις που εμφανίζεται και σε χάλικες και ιλύες (Σταθοπούλου,2017).

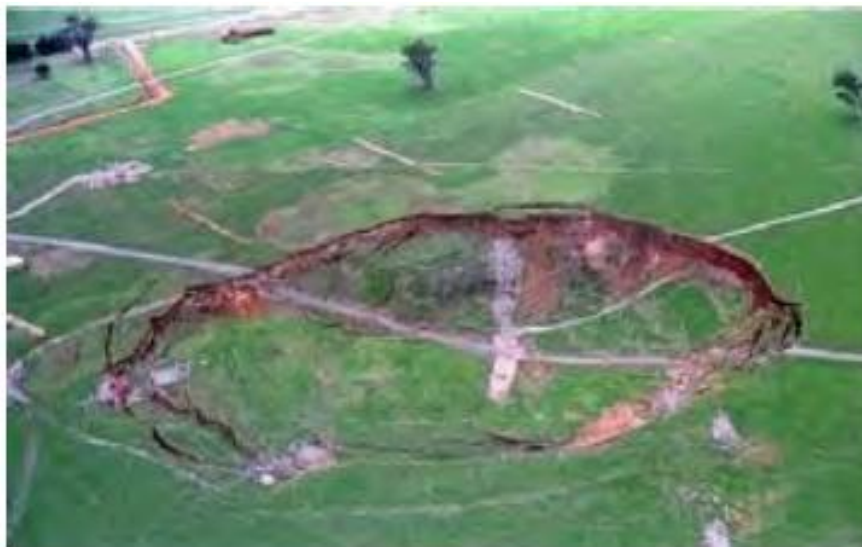
3.2.2 Καθιζήσεις εδάφους

Η αύξηση του φορτίου πάνω στο έδαφος ,μπορεί να προκαλέσει κατακόρυφη παραμόρφωση του εδαφικού στρώματος. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται καθίζηση και αφορά την υποχώρηση του εδαφικού στρώματος κατασκευής κυρίως σε εδάφη μαλακά , συμπιεστά και διαβρωμένα ,τα οποία θεωρούνται χαμηλής αντοχής και οδηγούν σε αστοχία της κατασκευής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν διάφορες μορφές εδάφους. Κατά την χειμερινή περίοδο στην περίπτωση των διογκωμένων εδαφών παρατηρείται αύξηση του όγκου τους ,καθώς περιέχουν μεγάλες ποσότητες αργίλου και οδηγούν σε πλήρη αστοχία της κατασκευής και κατάρρευση , λόγω της αποσταθεροποίησης του εδάφους. Ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες ο όγκος τους μειώνεται μιας και χάνεται το νερό λόγω θερμοκρασίας. Όλη αυτή η εναλλαγή μπορεί να δημιουργήσει έντονες ρωγμές στο έδαφος και κατ'επέκταση καθίζηση. Έχει διαπιστωθεί ότι η κύρια παραμόρφωση των εδαφών έχει την διεύθυνση των φορτίων. Για την ορθή λειτουργία μιας κατασκευής είναι σημαντική η προεκτίμηση των κατακόρυφων παραμορφώσεων ,οι οποίες προκαλούνται από τις προβλεπόμενες φορτίσεις που προέρχονται από την συμπιεστότητα του υπεδάφους (Αλεξανδρίδης, 2013).

Η αύξηση της πίεσης εκτονώνεται στην επιφάνεια του εδάφους και όπως μπορούμε να καταλάβουμε προκαλείται λόγω μίας σειράς από γεωλογικούς, γεωτεχνικούς, τοπογραφικούς, μορφολογικούς, μετεωρολογικούς λόγους και φυσικά λόγω του σεισμού (Κούκης και

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

Σαμπατακάκης 2007). Υπάρχουν δύο κατηγορίες καθιζήσεων οι καθολικές και οι διαφορικές. Στις καθολικές έχουμε ομοιόμορφη υποχώρηση του εδάφους με λίγες εδαφικές ρωγμές ενώ στις διαφορικές έχουμε ανομοιόμορφη υποχώρηση με αποτέλεσμα την έντονη δημιουργία ρωγμών με διαφορετική κλίση (Τσιπιανίτης,2013).



Εικόνα 18: Καθίζηση εδάφους

(http://oceanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/5009/mech_43005.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

3.2.3 Σεισμικές διεγέρσεις

Στην περίπτωση μιας σεισμικής δόνησης, το σημείο ενός ρήγματος μετακινείται και μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία την κατασκευή του πύργου. Η προκληθείσα ζημιά εξαρτάται αποκλειστικά από την μέθοδο θεμελίωσης, καθώς και από την δυσκαμψία της κατασκευής. (Katsanos, Thöns & Georgakis, 2016).

3.2.4 Ύπαρξη εγκοιλών

Κάτω από την επιφάνεια των θεμελίων μιας κατασκευής παρατηρείται η ύπαρξη εγκοιλών. Η τοποθέτησή τους καθιστά τη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας επικίνδυνη, καθώς λόγω της υποχώρησης της οροφής του εγκοίλου μπορεί να δημιουργηθεί αστάθεια σε ολόκληρη την κατασκευή. Επομένως σύμφωνα με ό,τι αναφέρθηκε έως τώρα, χρειάζονται ειδικές γνώσεις της γεωλογικής δομής της βραχώμαζας αλλά και των γεωτεχνικών τους παραμέτρων (Σταθοπούλου,2017).

3.3 Εναλλαγές θερμοκρασίας

Η λειτουργία των ανεμογεννητριών μπορεί πολύ συχνά να υποβαθμιστεί και η αποδοτικότητα τους να μην φτάνει στο μέγιστο δυνατό. Οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των πτερυγίων που είναι κατασκευασμένα από ανθρακονήματα και ίνες γυαλιού πολλές φορές επηρεάζονται και αλλοιώνονται εξαιτίας των θερμοκρασιακών μεταβολών στην ατμόσφαιρα και της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι Ye et.al(2019) σημειώνουν πως επειδή η κατασκευή των πτερυγίων των ανεμογεννητριών πραγματοποιείται σε πολυστρωματικές στρώσεις από διάφορα σύνθετα υλικά, είναι πολύ σημαντικό να αναλυθούν οι ιδιότητες του κάθε υλικού ξεχωριστά.

Οι εναλλαγές της θερμοκρασίας, από ακραίο ψύχος σε ακραία ζέστη μπορεί να προκαλέσει κόπωση του υλικού και τα πτερύγια να παρουσιάσουν ρωγμές που να οδηγήσουν σε ένα μεγαλύτερο πρόβλημα στην συνέχεια (Mishnaevsky et.al,2017).

Η απόδοση των ανεμογεννητριών επηρεάζεται σημαντικά όταν η επιφάνεια των πτερυγίων των ανεμογεννητριών έχει αλλοιωθεί ή έχει υποστεί φθορές από κεραυνούς, τον πάγο, από τους ανέμους ή από χαλαζοπτώσεις. Οι περιοχές εγκατάστασης των αιολικών πάρκων όπως είναι οι Βόρειες περιοχές και ο Βόρειος Ατλαντικός Ωκεανός ή σε αντίθεση οι πολύ ζεστές περιοχές που περιλαμβάνουν ερήμους και γενικότερα πολύ ζεστά κλίματα με υψηλή υγρασία, είναι περιοχές που το κλίμα είναι επιζήμιο για την επιφάνεια. Dalili et.al (2017)

Ο πάγος στα Βόρεια κλίματα μπορεί να επηρεάσει την αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων και γενικότερα της ανεμογεννήτριας, ενώ ο πάγος που προσκολλάται πάνω στα πτερύγια επηρεάζει τα βαρυτικά φορτία που δέχεται η ανεμογεννήτρια και μπορεί να προκαλέσει σε εξαιρετικές περιπτώσεις μέχρι και την κατάρρευση της ανεμογεννήτριας ενώ η πιο συνηθισμένη συνέπεια είναι ότι εξαιτίας του πρόσθετου βάρους πάνω στο πτερύγιο, αυτό να ακινητοποιείται. Dalili et.al(2017).

Η αποφυγή δημιουργίας πάγου στα πτερύγια μπορεί να αποφευχθεί με τον ψεκασμό των πτερυγίων με αντιπαγετικό υγρό όπως πραγματοποιείται στα αεροπλάνα και παρουσιάζεται στην εικόνα 20 (Βαφειάδης,2020).



Εικόνα 19: Πτερύγια ανεμογεννήτριας με πάγο στην επιφάνεια τους (<http://www.ewea.org/>)

Στα θερμά κλίματα ο υγρός και ζεστός αέρας ευνοεί την παρουσία εντόμων στον αέρα, τα οποία εάν προσκολληθούν πάνω στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, δημιουργούν μια ενιαία επιφάνεια πάνω σε αυτά και μπορούν να μειώσουν την αποδοτικότητα της κατά 50% (Dalili et.al,2017).

Από την άλλη μεριά, σε πιο εύκρατα κλίματα όπου δεν υπάρχει ο κίνδυνος του πάγου ή της υγρασίας και του θερμού αέρα, οι ισχυροί άνεμοι μπορεί να παρασέρνουν σωματίδια από το έδαφος όπως σκόνη. Η προσκόλληση των αιωρούμενων σωματιδίων πάνω στην επιφάνεια των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας επηρεάζει ξανά την αεροδυναμική συμπεριφορά των πτερυγίων και της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 20: Ψεκασμός με αντιπαγετικό υγρό του πτερυγίου (<https://www.wochenblick.at/winter-in-deutschland-zeigt-ohne-fossile-brennstoffe-geht-es-nicht/>)

3.4 Βλάβες λόγω κεραυνών

Η αύξηση των κεραυνικών πληγμάτων σε ανεμογεννήτριες τα τελευταία χρόνια, οφείλεται στην αύξηση του αριθμού των ανεμογεννητριών αλλά και του μεγέθους τους. Οι περιοχές που τοποθετούνται οι ανεμογεννήτριες τις καθιστά άμεσα εκτεθειμένες σε κεραυνούς ενώ το μεγάλο ύψος τους σχετίζεται γραμμικά με την αύξηση του κινδύνου κεραυνικού πλήγματος. Το μεγάλο μήκος των πτερυγίων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα που μπορεί να φθάσει και τα 150 m αυξάνει επιπλέον το κίνδυνο

Σε πολύ εξαιρετικές περιπτώσεις ένας κεραυνός μπορεί να οδηγήσει σε ολοκληρωτική κατάρρευση της ανεμογεννήτριας άμεσα. (Mishnaevsky et.al,2017).



Εικόνα 21: Καταιγίδα σε αιολικό πάρκο (<https://www.agenciasinc.es/Noticias/El-movimiento-de-las-turbinas-eolicas-puede-generar-rayos>)

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι τα πιο ευαίσθητα μέρη της ανεμογεννήτριας στην περίπτωση των κεραυνών και των καταιγίδων. Τα πτερύγια έχουν ένα σύστημα μείωσης των επιπτώσεων από το χτύπημα ενός κεραυνού παρόλα αυτά οι επιπτώσεις και οι ζημιές από έναν κεραυνό πάνω στο πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας δεν μπορούν να εξαλειφθούν όπως αποδεικνύεται και στην παραπάνω εικόνα 22.

Όταν ένας κεραυνός χτυπήσει τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, τότε το ρεύμα του κεραυνού διαχέεται σε όλο το σώμα της ανεμογεννήτριας μέχρι αυτό να καταλήξει στην γη (Σαραμετίδη,2013).

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

Οι καταστροφές στα πτερύγια των ανεμογεννητριών από τους κεραυνούς είναι ιδιαίτερα σοβαρές όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 22 και ο χρόνος επιδιόρθωσης αρκετά μεγάλος ενώ και το κόστος είναι αρκετά σημαντικό. Τα πτερύγια είναι περισσότερο αγωγίμα και «προσελκύουν» τους κεραυνούς εξαιτίας της υγρασίας και της ρύπανσης ενώ στην περίπτωση των παράκτιων αιολικών πάρκων όπου το νερό πάνω στα πτερύγια είναι θαλασσίνο, τότε ο κίνδυνος αυξάνεται σημαντικά. Σημαντικός κίνδυνος υπάρχει και για την καταστροφή της γεννήτριας ρεύματος εξαιτίας των κεραυνικών πληγμάτων στις ανεμογεννήτριες καθώς όπως προαναφέρθηκε, το ρεύμα από τα πτερύγια διαχέει ολόκληρη την ανεμογεννήτρια. Η γεννήτρια ρεύματος της ανεμογεννήτριας δεν διαθέτει καθόλου μόνωση και για αυτό είναι πιο επικίνδυνο να υποστεί σοβαρή ζημιά εφόσον χτυπηθεί η ανεμογεννήτρια από κεραυνό (Hongo et.al,2009).

Επίσης, ο κεραυνός διαθέτει μεγάλη ποσότητα ενέργειας, η οποία μέσω της αγωγίμης ζεύξης και της σύζευξης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, εξασφαλίζει πρόσβαση στα ηλεκτρονικά μέρη της ανεμογεννήτριας, ουσιαστικά καταστρέφοντάς τα ενώ και τα ανεμόμετρα που είναι τοποθετημένα στην κορυφή της ανεμογεννήτριας, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα εκτεθειμένα, αποτελούν «στόχο» των κεραυνικών πληγμάτων, τα οποία αποτελούν και την πιο συχνή αιτία καταστροφής τους (Σαραμετίδη,2013).



Εικόνα 22: Κατεστραμμένο πτερύγιο ανεμογεννήτριας από κεραυνό (<https://www.windpowerengineering.com/the-importance-of-testing-wind-turbine-lightning-protection/>)

3.4.1 Αντικεραυνική προστασία ανεμογεννητριών

Η αντικεραυνική προστασία των ανεμογεννητριών είναι ένα δύσκολο εγχείρημα καθώς απόλυτα αντικεραυνική προστασία δεν μπορεί να υπάρξει για τις ανεμογεννήτριες.

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

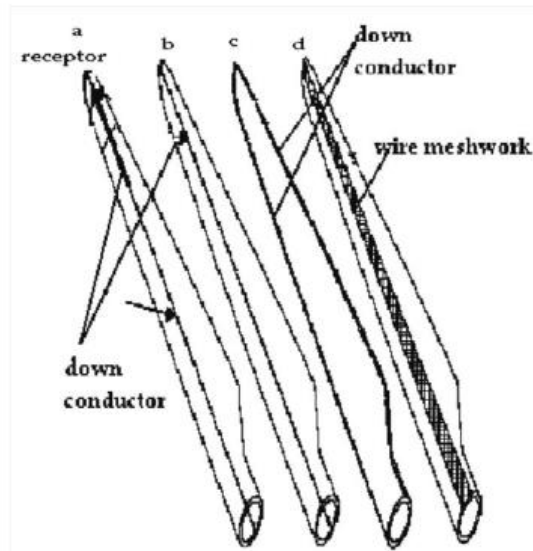
Τα αντικεραυνικά συστήματα προστασίας των ανεμογεννητριών μπορεί να είναι εσωτερικά και εξωτερικά και η εξωτερική προστασία αποτελείται από συλλεκτήριους αγωγούς και αγωγούς καθόδου. Τα εσωτερικά αντικεραυνικά συστήματα προστασίας των ανεμογεννητριών αποτελούνται από συστήματα προστασίας της υπέρτασης και είναι τα σημαντικότερα συστήματα προστασίας των ανεμογεννητριών σε ότι αφορά τα συστήματα ελέγχου και των ηλεκτρονικών συστημάτων των ανεμογεννητριών. Έτσι λοιπόν, μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από διαφορετικά συστήματα αντικεραυνικής προστασίας όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα 25 και διαθέτει 3 ζώνες προστασίας συνήθως. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται συστηματική και αποτελεσματική προστασία όλων των στοιχείων της ανεμογεννήτριας. (Τιόπουλος,2018).

Οι ζώνες αντικεραυνικής προστασίας (Lightning Protection Zone) ορίζονται ανάλογα με το αν είναι πιθανή μια άμεση πτώση κεραυνού, εξαρτάται από το μέγεθος του κεραυνικού ρεύματος και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που αναμένεται στη ζώνη αυτή, ενώ πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η αρχιτεκτονική της κατασκευής της ανεμογεννήτριας.

Η ζώνη προστασίας με την ονομασία LPZ-0 προστατεύει τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας και το ανεμόμετρο που είναι τα πιο εκτεθειμένα μέρη της ανεμογεννήτριας ενώ η ζώνη προστασίας με την ονομασία LPZ-1 προστατεύει το εσωτερικό τμήμα της ανεμογεννήτριας. Η ζώνη προστασίας με την ονομασία LPZ-2 προστατεύει τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό της ανεμογεννήτριας με την χρήση μιας ηλεκτρομαγνητικής ασπίδας (Σιάνας,2012).

Τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας είναι εξοπλισμένα με αυτόνομα συστήματα αντικεραυνικής προστασίας, τα οποία αποτελούνται από έναν ατσάλινο υποδοχέα σε κάθε τμήμα ο οποίος αποτελείται από ένα σιδερένιο σύρμα το οποίο είναι τοποθετημένο στον ιστό του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας (Σιάνας,2012).

Ο σίδηρος χρησιμοποιείται γιατί είναι πιο ανθεκτικός από άλλα υλικά στις διάφορες κλιματικές συνθήκες όπως βροχή, υγρασία και διάβρωση. Το σύρμα επικάθεται πάνω σε μια ατσάλινη πλάκα όπως παρουσιάζεται από τον Σιάνα (2012) στην ακόλουθη εικόνα 23.



Εικόνα 23: Αντικεραυνική προστασία πτερυγίου ανεμογεννήτριας (<http://www.tdsiam.com/product.html>)

Με αυτό τον τρόπο το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας προστατεύεται από τους κεραυνούς καθώς μόλις αυτό, δεχτεί έναν κεραυνό, τότε μέσω του σύρματος το ρεύμα του κεραυνού οδηγείται στην βάση του πτερυγίου, χωρίς αυτό να υφίσταται καταστρεπτικές συνέπειες. Η αντικεραυνική προστασία της ανεμογεννήτριας επιτρέπει το ρεύμα που διοχετεύεται από τον κεραυνό να γειωθεί με ταχύτητα και ασφάλεια χωρίς να περάσει μέσα από τα ηλεκτρικά κυκλώματα και τα ρουλεμάν. Το κάλυμμα της ατράκτου λειτουργεί σαν προστατευτικός κλωβός ο οποίος προστατεύει τα όργανα και τα συστήματα που βρίσκονται μέσα του από τον κεραυνό ενώ τα ηλεκτρικά συστήματα της ανεμογεννήτριας προστατεύονται από τις υπερτάσεις και τα υπερρεύματα που μπορεί να προκληθούν από τον κεραυνό (Καλαντζής,2008). Στην ακόλουθη εικόνα 24 παρουσιάζεται η γείωση που δημιουργείται μεταξύ της ατράκτου και των πτερυγίων.



Εικόνα 24: Γείωση μεταξύ πτερυγίων και ατράκτου
(<http://apothesis.teicm.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/660/kalantzis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>)

Σε κάθε πτερύγιο της ανεμογεννήτριας τοποθετείται ένας σπινθηριστής ο οποίος συνδέεται με τον ρότορα και το ρεύμα του κεραυνού μεταφέρεται από το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας στο κέλυφος της ατράκτου και από εκεί μεταφέρεται στην γείωση της ανεμογεννήτριας (Καλαντζής,2008). Αλεξικέραυνα βρίσκονται επίσης στο πίσω μέρος της ατράκτου του ρότορα και του πύργου της ανεμογεννήτριας προκειμένου να προστατεύονται και τα ηλεκτρικά συστήματα της ανεμογεννήτριας. Ο Καλατζής (2008) σημειώνει πως οι χαλύβδινοι πύργοι ανεμογεννητριών είναι αγωγιμοί και για αυτό τον λόγο στην βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας γειώνεται μέσω δυο δαχτυλιδιών γείωσης τα οποία βρίσκονται εσωτερικά και εξωτερικά του πύργου της ανεμογεννήτριας.

3.5 Βλάβες λόγω πρόσκρουσης με χαλάζι

Το χαλάζι είναι το βαρύτερο αιωρούμενο σωματίδιο που υπάρχει στην ατμόσφαιρα και σε σχέση με την άμμο, την βροχή, το χιόνι και τα έντομα. Αυτό συνεπάγεται πως έχει και διαφορετική αεροδυναμική συμπεριφορά σε σχέση με τα άλλα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας (Fiore et.al,2015).

Οι τροχιές που έχει το χαλάζι επηρεάζονται σε ένα μικρό βαθμό και από τις αεροδυναμικές ροές γύρω από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τις απότομες γωνίες πρόσκρουσης πάνω στα πτερύγια.

Οι διαστάσεις του χαλαζιού και το βάρος του είναι κάτι που αλλάζει από περιοχή σε περιοχή.

Οι Fiore et.al (2015) στην μελέτη τους για την επίδραση του χαλαζιού στις λεπίδες των ανεμογεννητριών επέλεξαν σαν σημείο αναφοράς, χαλάζι με διάμετρο 50 χιλιοστά και βάρος 62 γραμμαρίων σύμφωνα και με τα στατιστικά στοιχεία της μετεωρολογικής υπηρεσίας των ΗΠΑ.

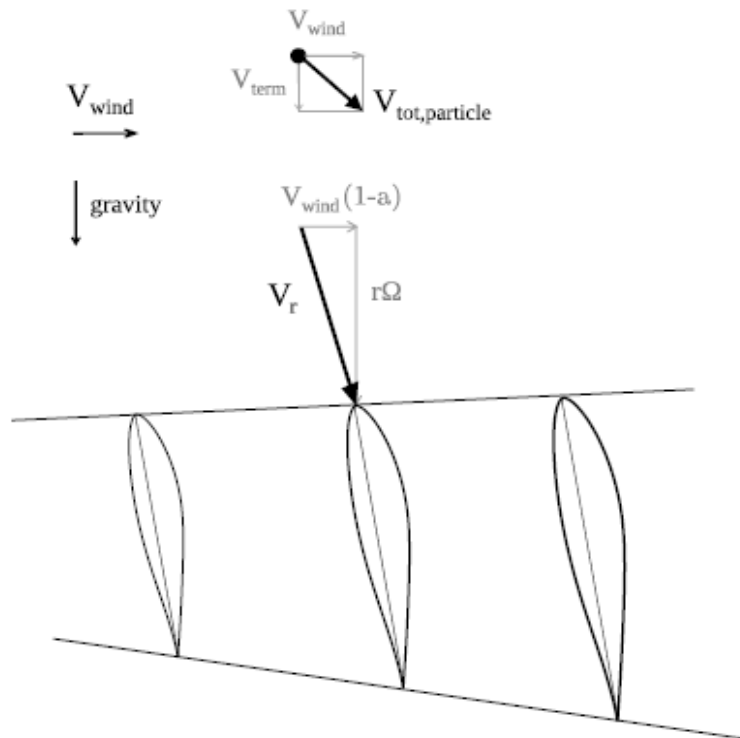
Για τις ανάγκες της προσομοίωσης επιλέχτηκε ανεμογεννήτρια παραγωγικότητας 1,5 MW, με 3 λεπίδες και διάμετρο λεπίδων τα 38 μέτρα.

Η ταχύτητα περιστροφής, επιλέχθηκε στα 10 m/s, που αντικατοπτρίζει ήπιες καιρικές συνθήκες αλλά κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας που περιλαμβάνει και χαλαζοπτώσεις η ταχύτητα αυτή φτάνει τα 19 m/s.

Κατά την διάρκεια της χαλαζόπτωσης, το χαλάζι ενισχύεται και με τις βαρυτικές δυνάμεις και επηρεάζεται και από τις αεροδυναμικές δυνάμεις των λεπίδων της ανεμογεννήτριας κατά την διάρκεια της περιστροφής τους.

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

Το αποτέλεσμα της τροχιάς του χαλαζιού και των δυνάμεων που ασκούνται στην λεπίδα, παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα 25 από τους Fiore et.al (2015).



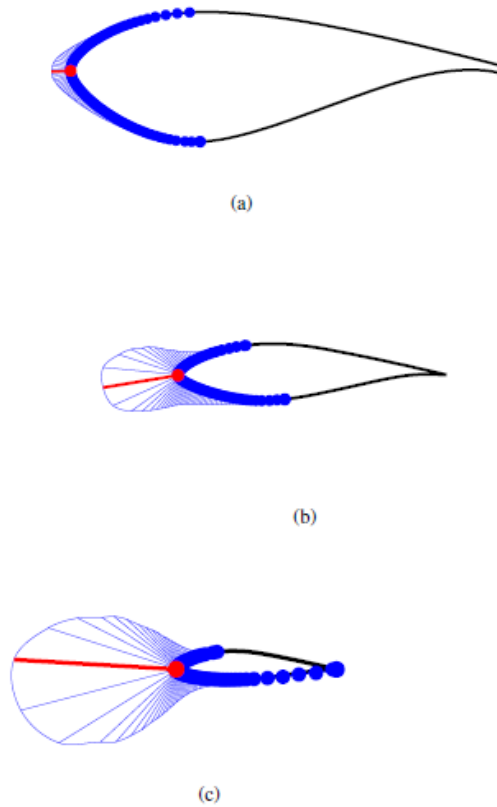
Εικόνα 25: Τροχιές και δυνάμεις στο χαλάζι κατά την διάρκεια της πρόσκρουσης στις λεπίδες

(https://www.researchgate.net/figure/Particle-and-blade-velocities-a-axial-induction-factor-O-angular-velocity-r-local-span_fig1_280300715)

Η γωνία της πρόσκρουσης του χαλαζιού μπορεί να είναι σε οξεία γωνία ή σε αμβλεία γωνία (Fiore et.al,2015). Η ζημιά που προκύπτει στις λεπίδες εξαρτάται από την οριακή τιμή αποκόλλησης των πολυμερών σύνθετων υλικών που απαρτίζουν την λεπίδα σε συνδυασμό με την ταχύτητα πρόσκρουσης που έχει το χαλάζι ενώ οι αεροδυναμικές δυνάμεις των λεπίδων επηρεάζουν ελάχιστα το χαλάζι.

Στην ακόλουθη εικόνα 26, παρουσιάζονται τα σημεία πρόσκρουσης του χαλαζιού στις λεπίδες σύμφωνα με τους Fiore et.al (2015). Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η επιφάνεια των λεπίδων που επηρεάζεται από την πρόσκρουση του χαλαζιού είναι αρκετά μεγάλη, αγκαλιάζει σχεδόν ολόκληρη την λεπίδα της ανεμογεννήτριας.

Παρόλα αυτά η κυριότερη επιφάνεια που επηρεάζεται και στις 3 λεπίδες είναι αυτή στα άκρα της λεπίδας προς την εξωτερική μεριά. Fiore et.al (2015).



Εικόνα 26: Επιφάνεια της λεπίδας που επηρεάζεται από την πρόσκρουση χαλαζιού (<https://armouredge.com/leading-edge-erosion/>)

Σε παλαιότερη μελέτη του Kensche (2006) όπου μελετήθηκε η πρόσκρουση χαλαζιού διαμέτρου 20 χιλιοστών με ταχύτητα 100 m/s απέδειξαν σοβαρές ζημιές στην λεπίδα. Το αποτέλεσμα προσομοιάστηκε με την ζημιά που θα είχε η λεπίδα εάν κάποιος πετούσε πέτρες εσκεμμένα πάνω στην λεπίδα.

Ένα τέτοιο αποτέλεσμα ζημιάς στην λεπίδα παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα 27 (Kensche,2006).



Εικόνα 27: Ζημιά σε λεπίδα ανεμογεννήτριας από πρόσκρουση χαλαζιού (<https://armouredge.com/leading-edge-erosion/>)

Οι Stack & Nash (2018) μελέτησαν τις επιπτώσεις της πρόσκρουσης χαλαζιού σε λεπίδες ανεμογεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη τα μετεωρολογικά δεδομένα της Μεγάλης Βρετανίας.

Οι ερευνητές λαμβάνουν υπόψη την ταχύτητα πρόσκρουσης του χαλαζιού, την ταχύτητα του ανέμου αλλά και την ταχύτητα περιστροφής των λεπίδων της ανεμογεννήτριας, ενώ υπολογίζονται επίσης και το μέγεθος του χαλαζιού. Η έρευνα τους έδειξε την μείωση της παραγωγικότητας ηλεκτρικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας εξαιτίας των ζημιών που προκαλούνται στις λεπίδες. Επιπροσθέτως επηρεάζεται ολόκληρη η ανεμογεννήτρια από την πρόσκρουση του χαλαζιού καθώς και η γεννήτρια της ανεμογεννήτριας καθίσταται ασταθής από τις προσκρούσεις του χαλαζιού και τις συνεπακόλουθες δονήσεις που προκαλούνται. Τα αποτελέσματα αυτών των ζημιών, εκτός από την μείωση της παραγωγικότητας της ανεμογεννήτριας έχουν σαν αποτέλεσμα να χρειάζεται επισκευή τόσο η γεννήτρια όσο και οι λεπίδες της. Οι επισκευές και οι συντηρήσεις των ανεμογεννητριών εκτός από κόστος συνεπάγονται και έναν χρόνο στον οποίο οι ανεμογεννήτριες μένουν εκτός λειτουργίας ενώ πολλές φορές και η προσβασιμότητα σε αυτές δεν είναι απλή υπόθεση, ιδιαίτερα όταν μιλάμε για παράκτια αιολικά πάρκα (Stack & Nash,2018).

Τα συμπεράσματα της έρευνας των Stack & Nash(2018) για τα δεδομένα της Μεγάλης Βρετανίας είναι τα ακόλουθα:

- Οι πιο συνήθεις χαλαζοπτώσεις που συμβαίνουν περιλαμβάνουν χαλάζι με μέγεθος μικρότερο των 5 χιλιοστών
- Τα περιστατικά όπου το χαλάζι ξεπερνά τα 20 χιλιοστά σε διάμετρο είναι αρκετά σπάνια

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

- Στα περισσότερα αιολικά πάρκα, οι χαλαζοπτώσεις δεν ξεπερνάνε τις 5 τον χρόνο, με τις βροχοπτώσεις να είναι πολύ περισσότερες ασφαλώς και πάντα για τα δεδομένα της Μεγάλης Βρετανίας.
- Οι ζημιές που προκαλούνται είναι επισκευάσιμες και δεν προκαλούν την καταστροφή της ανεμογεννήτριας ακόμα και μετά από μια σφοδρή χαλαζόπτωση.



Εικόνα 28: Ζημιά σε λεπίδα ανεμογεννήτριας από πρόσκρουση χαλαζιού (Kensche,2006)

3.6 Καταρρεύσεις πύργων ανεμογεννητριών

Οι πύργοι και οι πυλώνες των ανεμογεννητριών είναι από εκείνα τα στοιχεία που υπόκεινται σε αστοχίες και καταρρεύσεις. Όπως σημειώθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο, οι πυλώνες των ανεμογεννητριών μεταφέρουν πολλά και σημαντικά φορτία και οι αστοχίες που παρατηρούνται είναι ο τοπικός λυγισμός του κυλινδρικού κελύφους και η κόπωση στις συνδέσεις, ενώ έχουν επίσης καταγραφεί περιπτώσεις αστοχίας της θεμελίωσης ή της αγκύρωσης του πυλώνα στη θεμελίωση. Χαρακτηριστικές εικόνες αστοχιών σε πυλώνες παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες 29 και 30 (Πρόγραμμα Sea Wind,2015).



Εικόνα 29: Λυγισμός των πλώνων των ανεμογεννητριών (<https://www.independent.co.uk/news/uk/home-news/wind-turbine-crashes-ground-after-rotor-blades-spin-out-control-under-light-winds-a219426.html?amp>)



Εικόνα 30: Καταρρεύσεις πλώνων ανεμογεννητριών (<https://www.irishexaminer.com/news/arid-20305978.html>)

Σύμφωνα και με το Caithness Windfarm Information Forum 2020 τα ατυχήματα των καταρρεύσεων των πύργων των ανεμογεννητριών είναι πολύ δαπανηρά και καταστρεπτικά καθώς τίθεται ολόκληρη η ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας και είναι σαφέστερα δαπανηρότερα από τα ατυχήματα των λεπίδων, εν τούτοις όμως δεν κοστίζουν σε ανθρώπινες ζωές καθώς συμβαίνουν μέσα στην περίμετρο της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας ενώ οι καταρρεύσεις κατά μεγάλο ποσοστό συμβαίνουν σε ημέρες και ώρες που δεν βρίσκονται άνθρωποι εκεί γύρω. Στον ακόλουθο πίνακα 7, παρουσιάζονται τα ατυχήματα των καταρρεύσεων πύργων των ανεμογεννητριών κατά την τελευταία δεκαετία.

Έτος	Αριθμός καταρρεύσεων πύργων
2010	9
2011	13
2012	10
2013	15
2014	13
2015	12
2016	11
2017	14
2018	9
2019	8
2020	3

3.7 Ζημιές και ατυχήματα σε ανεμογεννήτριες

Μια ανεμογεννήτρια έχει κατά μέσο όρο διάρκεια ζωής 25-30 χρόνια και τα πτερύγια και οι πυλώνες των ανεμογεννητριών, κατά την διάρκεια της ζωής καταπονούνται συνεχώς από καταστάσεις φορτίσεων που έχουν να κάνουν και με τις περιβαλλοντικές και κλιματολογικές συνθήκες των περιοχών στις οποίες βρίσκονται. Τα αεροδυναμικά φορτία, οι τυχαίες προσκρούσεις πτηνών, η απορρόφηση υγρασίας και οι κεραυνοί και οι ριπές ανέμου είναι μερικά από τα φορτία που καταπονούν τις ανεμογεννήτριες.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες οδηγούν σε συσσωρευμένη ζημιά, επιτάχυνση των πιθανών βλαβών λόγω κόπωσης, ακόμα και ξαφνική διακοπή της λειτουργίας του πτερυγίου, η οποία μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για την ανεμογεννήτρια συνολικά. Την ίδια στιγμή, η διακοπή λειτουργίας των πτερυγίων για εκτεταμένη επισκευή και συντήρηση μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες οικονομικές απώλειες.

Στις ανεμογεννήτριες καταγράφονται κάθε χρόνο αρκετά ατυχήματα με τα πτερύγια αυτών να αποτελούν τα πιο ευαίσθητα σημεία των ανεμογεννητριών και ταυτόχρονα και τα πιο ακριβά

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής
στοιχεία των ανεμογεννητριών. Οι βλάβες και οι φθορές των πτερυγίων των ανεμογεννητριών
αποτελεί την πιο συχνή βλάβη στις ανεμογεννήτριες όπως παρουσιάζεται στις ακόλουθες
εικόνες 31 και 32. (Πρόγραμμα Sea Wind,2015).



Εικόνα 31: Κατεστραμμένα πτερύγια ανεμογεννητριών
(<https://www.deviantart.com/hurricanewindpower/art/Hurricane-Wind-Power-Generators-557564514>)



Εικόνα 32: Βλάβες και φθορές στα πτερύγια των ανεμογεννητριών
(<https://www.google.com/amp/s/stopthesethings.com/2017/06/23/more-wind-turbine-self-incinerations-10-tonne-blade-throws/amp/>)

Υπάρχουν μαρτυρίες ότι κομμάτια πτερυγίων έχουν βρεθεί μέχρι και 2 χιλιόμετρα μακριά από το σημείο που βρίσκονται οι ανεμογεννήτριες ενώ στην Γερμανία σε ατυχήματα με αποκολλήσεις πτερυγίων, αυτά έχουν προσγειωθεί σε στέγες σπιτιών και σε αυτοκίνητα και σε κάποιες περιπτώσεις έχουν προκαλέσει σοβαρούς τραυματισμούς. Για αυτό τον λόγο προτείνεται οι ανεμογεννήτριες να μην τοποθετούνται σε αστικούς οικισμούς και οι κοντινότερες κατοικίες και κτίρια στα αιολικά πάρκα να είναι πάνω από 3 χιλιόμετρα. Στον ακόλουθο πίνακα 8 παρουσιάζονται τα ατυχήματα των πτερυγίων των ανεμογεννητριών κατά την τελευταία δεκαετία.

Πίνακας 8: Ατυχήματα λεπίδων σε ανεμογεννήτριες κατά την τελευταία δεκαετία (Caithness Windfarm Information Forum 2020)

Έτος	Αριθμός ατυχημάτων λεπίδων
2010	20
2011	20
2012	29
2013	36
2014	32
2015	22
2016	21
2017	18
2018	27
2019	24
2020	7

Τα στοιχεία για το 2020 είναι ανανεωμένα μέχρι και τον Απρίλιο του 2020.

Τα ατυχήματα των ανεμογεννητριών μπορεί σε πολλές να είναι και θανατηφόρα εξαιτίας πτώσεων των εργατών από μεγάλα ύψη κατά την διάρκεια επισκευών και συντηρήσεων. Τα συνολικά ατυχήματα σε ανεμογεννήτριες, ανεξαρτήτως αιτίας, κατά την τελευταία δεκαετία και οι θάνατοι που έχουν προκληθεί παρουσιάζονται από το Caithness Windfarm Information Forum 2020 στον ακόλουθο πίνακα 9.

Πίνακας 9: Αριθμός ατυχημάτων και θανάτων σε Α/Γ την τελευταία δεκαετία (Caithness Windfarm Information Forum 2020)

Έτος	Αριθμός ατυχημάτων Α/Γ	Θάνατοι από ατυχήματα σε Α/Γ
2010	124	8
2011	171	15
2012	174	17
2013	181	5
2014	167	3
2015	160	8

2016	166	6
2017	185	9
2018	194	3
2019	181	5
2020	60	3

4 Κεφάλαιο 4ο- Αστοχίες ανεμογεννητριών

4.1 Ανίχνευση βλαβών

Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα ατυχήματα και οι φθορές στις ανεμογεννήτριες αποτελούν ένα πολύ συχνό φαινόμενο. Τα ατυχήματα και οι φθορές αυτές εκτός από τον επηρεασμό της αποδοτικότητας της ανεμογεννήτριας, κοστίζουν σε χρόνο και χρήμα για την επισκευή της ανεμογεννήτριας εφόσον αυτή δεν καταρρεύσει ενώ δεν είναι αμελητέες και οι ανθρώπινες ζωές που χάνονται εξαιτίας των ανεμογεννητριών όπως αυτές παρουσιάστηκαν στον πίνακα 9 του προηγούμενου κεφαλαίου.

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι από τα πιο ευαίσθητα σημεία των ανεμογεννητριών καθώς είναι εκτεθειμένα, σε βροχές, χαλάζι, κεραυνούς και σε κάθε είδους ατμοσφαιρικές πιέσεις και μεταβολές των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Η ανίχνευση των βλαβών των πτερυγίων και των ανεμογεννητριών γενικότερα είναι μια διαδικασία που αναπτύσσεται σήμερα με την βοήθεια αισθητήρων και των δικτύων οπτικών ινών. Οι αισθητήρες έχουν πολύ υψηλή ακρίβεια στις ενδείξεις τους ενώ υπάρχει και η ικανότητα παρακολούθησης επι τόπου των ενδείξεων που οι αισθητήρες μεταδίδουν για την παρακολούθηση της μηχανικής συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας και των πτερυγίων αυτής.

Βασικό χαρακτηριστικό των οπτικών ινών, όπως εξάλλου προκύπτει και από την ονομασία τους, είναι ότι επιτρέπουν την ταχεία μετάδοση πληροφοριών υπό μορφή παλμών φωτός μέσα από τον πυρήνα τους.

Βασική διαφορά σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους μετάδοσης σήματος είναι ότι η ίνα δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά αυτής της μετάδοσης με συνέπεια το αρχικό σήμα να φθάνει στον προορισμό του συγκριτικά ανεπηρέαστο.

Οι Bang et.al (2010) σημειώνουν πως μέσω αισθητήρων μπορεί να παρακολουθηθούν οι τυχόν παραμορφώσεις των πτερυγίων αλλά και τις παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία της

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής
ανεμογεννήτριας όπως είναι στα σημεία των συγκολλήσεων του πύργου και σε άλλα κρίσιμα
σημεία για την λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

Η μέθοδος κατασκευής των οπτικών αισθητήρων στηρίζεται στην κατάλληλη ολοκλήρωση
δυνατοτήτων αίσθησης στις ίνες, η οποία ουσιαστικά μεταφράζεται σε ανίχνευση μεταβολής
χαρακτηριστικών της μετάδοσης φωτός όπως ένταση, φάση, πόλωση, συχνότητα, κ.α. που
προκαλείται από την μεταβολή των μετρούμενων μεγεθών πεδίου.

Στις ακόλουθες εικόνες 33 και 34 παρουσιάζεται η τοποθέτηση αισθητήρων σε περύγιο
ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 33: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας εξοπλισμένο με αισθητήρες OFBG
(<http://www.mhxmeftp.com/windturbines/images/P9.1.pdf>)



Εικόνα 34: Τοποθέτηση αισθητήρων σε περύγιο ανεμογεννήτριας
(<http://www.mhxmeftp.com/windturbines/images/P9.1.pdf>)

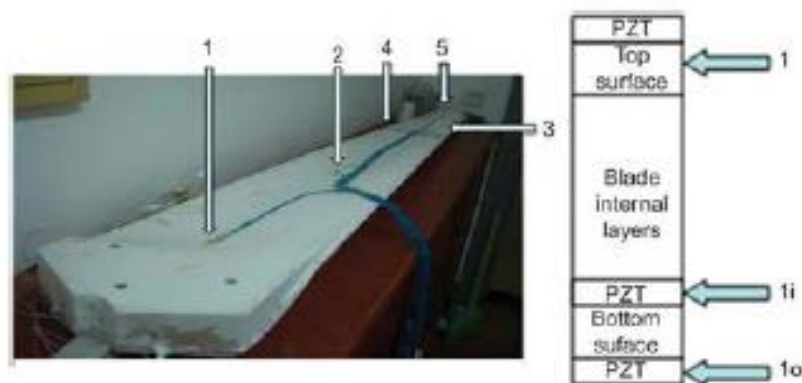
Οι οπτικοί αισθητήρες, οι οποίοι ενσωματώνονται εσωτερικά της φέρουσας οπτικής ίνας καλούνται
αισθητήρες εσωτερικού τύπου (intrinsic) ενώ οι αισθητήρες οι οποίοι ενσωματώνονται εξωτερικά ή

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

στη διεπαφή μεταξύ οπτικών ινών και άλλης διάταξης, με κατάλληλες μεθόδους (όπως π.χ. με fusion splicing, με κόλληση ή άλλη μηχανική συνδεσμολογία), καλούνται αισθητήρες εξωτερικού τύπου (extrinsic).

Ένας άλλος τρόπος παρακολούθησης και ανίχνευσης των βλαβών και των φθορών των ανεμογεννητριών είναι η χρήση αισθητήρων με πιεζοηλεκτρικά υλικά. Οι Joosse et.al (2002) αναφέρουν πως οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες συλλαμβάνουν τα κύματα που δημιουργούνται από τα σημεία εκείνα της ανεμογεννήτριας που έχουν υποστεί φθορές και βλάβες.

Η τοποθέτηση των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων σε πτερύγιο της ανεμογεννήτριας παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα 35.



Εικόνα 35: Τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων σε πτερύγιο ανεμογεννήτριας (<http://www.mhxmeftp.com/windturbines/images/P9.1.pdf>)

Οι αισθητήρες όμως μπορούν να ανιχνεύσουν τις βλάβες σε εκείνα τα σημεία της ανεμογεννήτριας στα οποία έχουν τοποθετηθεί. Σε περίπτωση που κάποιες βλάβες ή φθορές προκύψουν σε σημεία μακριά από τους αισθητήρες, τότε έχουν τοποθετηθεί επιταχυνσιόμετρα που μετρούν τις δονήσεις της ανεμογεννήτριας και μεταδίδουν τυχόν ανωμαλίες στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας. (Πρόγραμμα Sea Wind, 2015).

Σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του προγράμματος Sea Wind η παρακολούθηση και ανίχνευση των βλαβών στις ανεμογεννήτριες μπορεί να γίνει μέσω μιας διαδικασίας 3 σταδίων και την εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου που εφαρμόζεται κυρίως στις παράκτιες ανεμογεννήτριες. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, μετριοούνται οι κραδασμοί των πτερυγίων των ανεμογεννητριών προκειμένου να ανιχνευτούν τυχόν βλάβες στα πτερύγια. Με παρόμοιους τρόπους μπορεί να γίνει η παρακολούθηση ολόκληρης της ανεμογεννήτριας αλλά οι μετρήσεις που στηρίζονται στην μέτρηση των δονήσεων και των κραδασμών μπορούν να επηρεαστούν διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, ο άνεμος και η υγρασία.

Εξαιτίας αυτής της δυσλειτουργίας των μετρήσεων των δονήσεων και των κραδασμών είναι πολύ πιθανή η λήψη ψευδών μετρήσεων κατά την διάρκεια της ανίχνευσης και παρακολούθησης της λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας. Για παράδειγμα, η περιστροφική κίνηση του πτερυγίου της

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

ανεμογεννήτριας είναι πολύ πιθανό να επηρεάσει τις μετρήσεις των δονήσεων και των κραδασμών που αυτό υφίσταται . Σε αυτή την περίπτωση, οι μέθοδοι ανίχνευσης βλάβης με δόνηση θα είναι ανακριβείς, διότι οι μηχανικές ιδιότητες ποικίλουν ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων των ανεμογεννητριών.

Οι Basseville et.al(2004) σημειώνουν πως για τα πτερύγια των υπεράκτιων ανεμογεννητριών εφαρμόζεται μια μέθοδος παρακολούθησης και ανίχνευσης βλαβών που χρησιμοποιεί αισθητήρες και μετρήσεις δονήσεων ταυτόχρονα λαμβάνοντας υπόψη την περιστροφική κίνηση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.

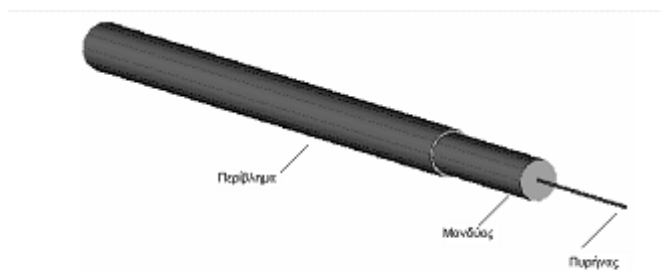
Μια άλλη μεθοδολογία ανίχνευσης βλαβών και παρακολούθησης των ανεμογεννητριών είναι η τοποθέτηση αισθητήρα σύνθετων μικρό-ινών και τοποθετείται στην επιφάνεια του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας. Γίνεται χρήση ενός κυματικού παλμού για την ανίχνευση της βλάβης αλλά και ακουστική ανάλυση του σήματος εκπομπής.

Τελικά, όλες οι προαναφερόμενες μέθοδοι μπορούν να συνδυαστούν για να καλύψουν το σύνολο της κατασκευής, με κατάλληλη επίλυση θεμάτων που αφορούν τη βέλτιστη θέση για την τοποθέτηση των αισθητήρων, την αναβάθμιση του τρόπου προσομοίωσης και την επεξεργασία του σήματος.

Πρέπει επίσης να επισημανθεί η μεγάλη ευκολία παρακολούθησης της δομικής υγείας από απόσταση, μέσω καταγραφών κατάλληλων οργάνων, σε σύγκριση με την ανάγκη επιτόπου επιθεωρήσεων.

Οπτικές ίνες

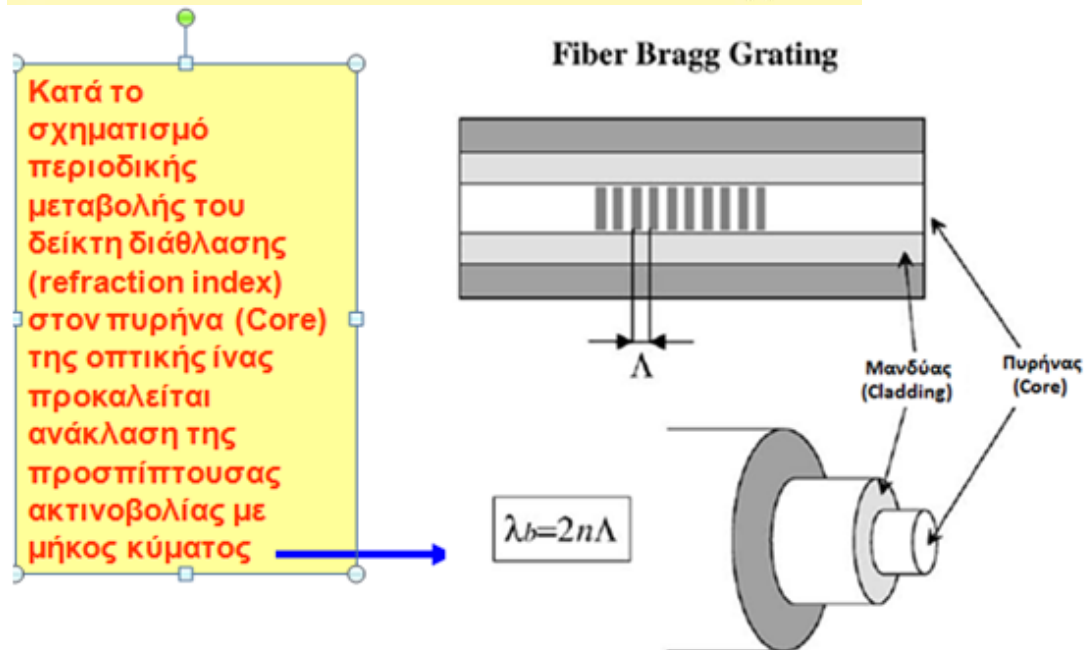
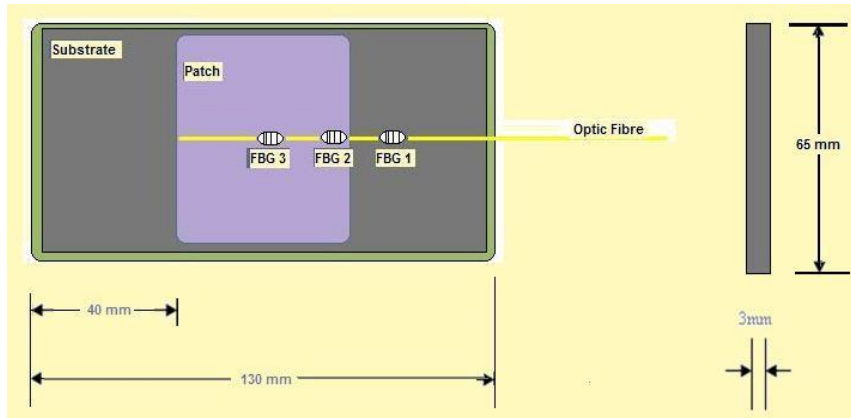
Μελετώντας τις εξελίξεις στον χώρο των τηλεπικοινωνιών, διαπιστώνεται η σαφής ανάπτυξη που επήλθε στο χώρο μετά την χρήση οπτικών ινών για την μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων. Βασικό χαρακτηριστικό των οπτικών ινών, όπως εξάλλου προκύπτει και από την ονομασία τους, είναι ότι επιτρέπουν την ταχεία μετάδοση πληροφοριών υπό μορφή παλμών φωτός μέσα από τον πυρήνα τους.(Καλοβρέκτης,2013)



Εικόνα 36: Τομή Οπτικής Ίνας.(Καλοβρέκτης,2013)

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

Στη Εικόνα 36 παρουσιάζεται μια οπτική ίνα σε τομή όπου διακρίνονται ο πυρήνας, ο μανδύας και ο προστατευτικό κάλυμμα αυτής. Βασική διαφορά σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους μετάδοσης σήματος είναι ότι η ίνα δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά αυτής της μετάδοσης με συνέπεια το αρχικό σήμα να φθάνει στον προορισμό του συγκριτικά ανεπηρέαστο.



λ_b : Ανακλώμενο μήκος κύματος (Bragg wavelength)

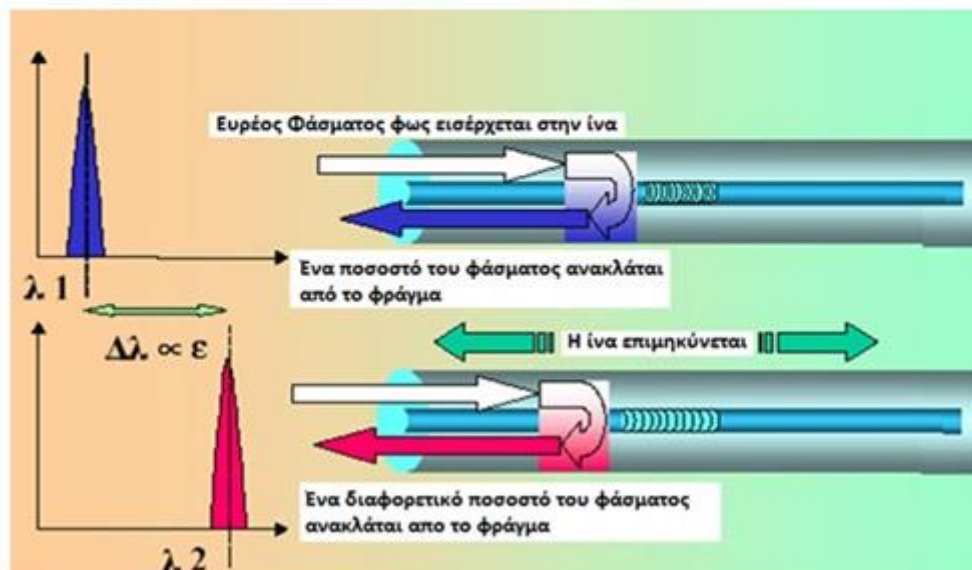
Λ : Περίοδος μεταβολής του δείκτη διάθλασης

n : Δείκτης διάθλασης

Αρχή Λειτουργίας Αισθητήρα

Η μεταβολή της περιόδου Λ του δείκτη διάθλασης (δηλαδή η μεταβολή του μήκους της περιοχής) προκαλεί αντίστοιχη μεταβολή του ανακλώμενου μήκους κύματος

$$\lambda_{b1} \rightarrow \lambda_{b2}$$



Εικόνα 37: Σκαρίφημα τοποθέτησης οπτικής ίνας σε επισκευασμένη πλάκα.(Καλοβρέκτης,2013)

4.2 Αισθητήρες για την ανίχνευση συγκρούσεων με πτηνά

Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών και κύριο επιχείρημα των κατοίκων που αντιτίθεται στα αιολικά πάρκα είναι η αυξημένη θνησιμότητα των πουλιών εξαιτίας της σύγκρουσης τους με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Οι Marques et.al (2014) προσπάθησαν να διερευνήσουν τους λόγους που συμβαίνει αυτό το φαινόμενο και κατέληξαν πως η φυσιολογία των πουλιών όπως είναι το άνοιγμα των φτερών τους, το μήκος της ουράς τους και το συνολικό μήκος των πουλιών είναι παράγοντες που επηρεάζουν την πτητική συμπεριφορά των πουλιών και άρα αυξάνει τον κίνδυνο για σύγκρουση με μια ανεμογεννήτρια. Επίσης μια άλλη παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο στις συγκρούσεις των πουλιών με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι η οπτική οξύτητα των πουλιών καθώς αυτά πολλές φορές δεν μπορούν να διακρίνουν τι βρίσκεται μπροστά τους (Martin,2012).

Τα τελευταία 20 χρόνια, σε αιολικό πάρκο στην Αυστραλία έχουν σκοτωθεί πάνω από 2.000 χρυσαετοί ενώ στην Γερμανία πάνω από 32 πουλιά έχουν συγκρουστεί πάνω στα πτερύγια του αιολικού πάρκου του Βραδεμβούργου. Σύμφωνα με το Caithness Windfarm Information Forum 2020 στον ακόλουθο πίνακα 10 παρουσιάζεται η περιβαλλοντική καταστροφή από σύγκρουση με ανεμογεννήτριες στην ΕΕ.

Έτος	Αριθμός Νεκρών Πουλιών
2010	20
2011	20
2012	20
2013	16
2014	21
2015	18
2016	22
2017	16
2018	24
2019	25
2020	17

Για την αποτροπή των θανάτων των πουλιών εξαιτίας συγκρούσεων στα πτερύγια των ανεμογεννητριών έχουν αναπτυχθεί συστήματα παρακολούθησης και αποτροπής συγκρούσεων με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών στις ανεμογεννήτριες. Τα συστήματα αυτά πρέπει να μπορούν να επαληθεύουν μια σύγκρουση όταν αυτή συμβαίνει και να αναγνωρίζει το είδος των πουλιών που συγκρούονται στις ανεμογεννήτριες. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν και κατά την διάρκεια της ημέρας και κατά την διάρκεια της νύχτας όπου τα πουλιά είναι πιο επιρρεπή στις συγκρούσεις ενώ θα πρέπει να καλύπτεται ολόκληρη η περιοχή που καλύπτει ο ρότορας της ανεμογεννήτριας(Collier et.al,2011).

4.2.1 Βασικές λειτουργίες αισθητήρων αποτροπής συγκρούσεων πουλιών

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα παρακολούθησης και αποτροπής της σύγκρουσης των πτηνών με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών χωρίζονται σε 2 κατηγορίες σύμφωνα με τους Collier et.al,(2011):

- Στους αισθητήρες που είναι σε άμεση επαφή με το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας
- τους αισθητήρες που δεν είναι σε άμεση επαφή με το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας

Οι αισθητήρες οπτικών ινών και τα επιταχυνσιόμετρα είναι αισθητήρες σε επαφή με τα πτερύγια ενώ οι ακουστικοί αισθητήρες είναι αισθητήρες που δεν έρχονται σε επαφή με τα πτερύγια. Οι Pandey et.al (2006) σημειώνουν πως οι αισθητήρες που δεν είναι σε επαφή με τα πτερύγια της

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

ανεμογεννήτριας είναι ευκολότεροι στην εγκατάσταση και είναι έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής ενώ οι αισθητήρες που έρχονται σε επαφή με την ανεμογεννήτρια κοστίζουν ακριβότερα, είναι ευαίσθητοι στις δονήσεις και η εγκατάσταση τους είναι πολύπλοκη.

Οι αισθητήρες ακουστικών εκπομπών είναι ίσως ο καλύτερος τρόπος για την ανίχνευση και αποτροπή των συγκρούσεων. Σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, τα μικρόφωνα των ακουστικών αισθητήρων κατάφεραν να ανιχνεύσουν πιθανές συγκρούσεις ιπτάμενων αντικειμένων με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών που ήταν τοποθετημένα. Οι μηχανικοί ήχοι ή οι θόρυβοι εξαιτίας των καιρικών συνθηκών μπορούν να προκαλέσουν 5 ψευδή σήματα μέσα στην ημέρα αλλά η ευαισθησία των ακουστικών αισθητήρων μπορεί να ρυθμιστεί όπως σημειώνουν οι Verhoef et.al(2012).

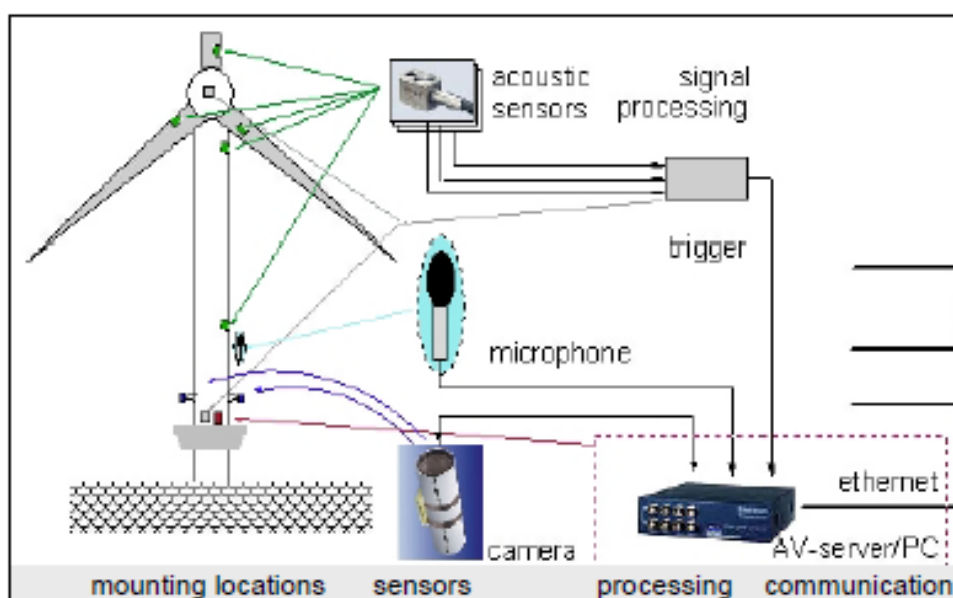
Οι αισθητήρες εικόνας που έχουν κάμερες μπορούν να καταγράψουν εικόνες και να επιβεβαιώσουν πιθανά περιστατικά συγκρούσεων πουλιών με ανεμογεννήτριες. Οι εικόνες αυτές μπορεί να είναι είτε σε video είτε σε εικόνα ενώ πλέον οι κάμερες είναι ψηφιακές και καταγράφουν ψηφιακές εικόνες (Collier,et.al,2011). Οι κάμερες μπορούν να καταγράψουν επίσης με υπέρυθρο φως και μήκος κύματος το οποίο είναι μη ορατό στο ανθρώπινο μάτι. Επίσης υπάρχουν και οι θερμικές κάμερες που ανιχνεύουν την θερμότητα που εκπέμπουν τα αντικείμενα και αυτό βοηθάει στο να μην απαιτείται τεχνητό φως (Collier et.al,2011). Ένας άλλος τρόπος ανίχνευσης των συγκρούσεων των πουλιών με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι η τοποθέτηση ραντάρ μικρής ισχύος τα οποία ανιχνεύουν τα πτηνά σε απόσταση 10 χιλιομέτρων. Τα ραντάρ όμως επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την υγρασία και την ομίχλη. Οι Collier et.al(2011) σημειώνουν πως το μειονέκτημα των ραντάρ είναι πως δεν μπορούν να ανιχνεύσουν τον αριθμό των πουλιών και το είδος των πουλιών.

4.2.2 Εμπορικά συστήματα ανίχνευσης και παρακολούθησης συγκρούσεων πουλιών με πτερύγια ανεμογεννήτριες

Στις ανεμογεννήτριες σήμερα τοποθετούνται τα ακόλουθα συστήματα ανίχνευσης και παρακολούθησης των πτερυγίων ανεμογεννητριών για πιθανές συγκρούσεις πτηνών με τα πτερύγια. Τα συστήματα αυτά έχουν έναν μηχανισμό ενεργοποίησης ο οποίος ενεργοποιείται όταν πραγματοποιείται η σύγκρουση ενός πτηνού με το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας.

Το σύστημα WT-Bird το οποίο είναι ολλανδικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί ακουστικούς αισθητήρες, κάμερες και μηχανισμό ενεργοποίησης και κατασκευάστηκε από τον Κέντρο Ενεργειακών Ερευνών της Ολλανδίας.

Στην ακόλουθη εικόνα 36 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση του συστήματος. Οι Barhorst et.al(2004) οι οποίοι περιγράφουν το σύστημα σημειώνουν πως το σύστημα αυτό μπορεί να εφαρμοστεί ταυτόχρονα σε πολλές ανεμογεννήτριες ενός αιολικού πάρκου ενώ οι καταγραφές που πραγματοποιεί το σύστημα αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων και έτσι η καταμέτρηση των συμβάντων να πραγματοποιείται με μεγάλη ακρίβεια. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος βασίζεται στην μέτρηση των δονήσεων που προκαλούνται στην Α/Γ από την σύγκρουση ενός πτηνού με την Α/Γ. Το σύστημα λειτουργεί με βάση τις δονήσεις που προκαλούνται από τις συγκρούσεις των πτηνών με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών και ανιχνεύονται με τους αισθητήρες των ακουστικών δονήσεων. Οι μετρήσεις αυτές , υπόκεινται σε επεξεργασία προκειμένου να αποκλείονται οι παρεμβολές και να μην δίνονται λάθος μετρήσεις.



Εικόνα 38: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος ανίχνευσης συγκρούσεων με πουλιά(<https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Dirksen-2017.pdf>)

Στην περίπτωση σύγκρουσης πτηνού με τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας τότε οι εικόνες πριν και μετά την σύγκρουση καταγράφονται ενώ αποθηκεύεται και η ημερομηνία και ώρα της σύγκρουσης μαζί με τον αριθμό της ανεμογεννήτριας. Επίσης καταγράφονται και αποθηκεύονται και οι ακουστικές καταγραφές της σύγκρουσης ενώ και ένα e-mail ειδοποίησης αποστέλλεται στον χειριστή του συστήματος και στον ιδιοκτήτη της ανεμογεννήτριας (Barhorst et.al,2004).

Τα πλεονεκτήματα του συστήματος είναι η συνεχής καταγραφή των συγκρούσεων μέρα και νύχτα και η δυνατότητα ταυτοποίησης των ειδών των πτηνών που συγκρούονται με την ανεμογεννήτρια κατά την διάρκεια της ημέρας αλλά όχι και κατά την διάρκεια της νύχτας.

Ένα άλλο σύστημα ανίχνευσης και παρακολούθησης των συγκρούσεων των πτηνών με τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας είναι το VARS (Visual Automated Recording System). Οι Collier et.al,(2011) σημειώνουν πως το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί υπέρυθρες κάμερες σε συνδυασμό με υπέρυθρο

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής

φωτισμό. Οι κάμερες αυτές τοποθετούνται στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας αλλά έχουν περιορισμένο οπτικό πεδίο στην περιοχή. Τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι ότι είναι λειτουργικό και σε ανεμογεννήτριες που βρίσκονται στην θάλασσα, στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες ενώ οι υπέρυθρες κάμερες μπορούν να ανιχνεύουν με ακρίβεια και μέρα και νύχτα.

Ο Πολίτης (2018) αναφέρει πως το συγκεκριμένο σύστημα έχει το μειονέκτημα πως έχει πολύ περιορισμένο εύρος ανίχνευσης ενώ τα γεγονότα ανίχνευσης και οι ειδοποιήσεις που δίνει το σύστημα απαιτεί ανθρώπινη ερμηνεία πράγμα που το καθιστά χρονοβόρο και κοστοβόρο σαν σύστημα ανίχνευσης.

Οι Willmott et.al(2015) αναφέρουν το σύστημα ανίχνευσης και παρακολούθησης των συγκρούσεων των πτηνών με τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας ATOM (Acoustic and Thermographic Offshore Monitoring) το οποίο χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ και συνδυάζει τις θερμικές κάμερες με ακουστικούς αισθητήρες για την παρακολούθηση των πουλιών που πετάνε κοντά στις ανεμογεννήτριες. Ο Κρητικός (2018) αναφέρει πως υπάρχει ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης και αποθήκευσης των δεδομένων και εκεί πέρα καταλήγουν τα στοιχεία των ειδοποιήσεων και καταγραφών ενώ μέσω ενός αλγόριθμου πραγματοποιείται η διαχείριση των δεδομένων της καταγραφής. Το σύστημα διαθέτει 2 υπέρυθρες κάμερες και 2 ακουστικούς αισθητήρες συνδεδεμένους με ένα μικρόφωνο ενώ επιπροσθέτως υπάρχει και μίνι μετεωρολογικός σταθμός στο σύστημα που καταγράφει την ταχύτητα του ανέμου, την διεύθυνση, την υγρασία και την θερμοκρασία. Στην ακόλουθη εικόνα 38 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση του συστήματος.

4.3 Αισθητήρας μέτρησης διεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου

Ένας σημαντικός αισθητήρας για την παρακολούθηση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας είναι και ο αισθητήρας μέτρησης της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου. Ο αισθητήρας αυτός δεν έχει κινούμενα μέρη ενός η διεύθυνση του ανέμου μετριέται σε σχέση με την θέση της άτρακτου της ανεμογεννήτριας.

Ο αισθητήρας αυτός μετράει την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου πάρα πολύ γρήγορα και είναι εξοπλισμένος και με μια αντίσταση θέρμανσης έτσι ώστε να μην επηρεάζεται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές και τα χιόνια, τον πάγο και από τις έντονες βροχοπτώσεις (Πατής,2010).

Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα βασίζεται σε 4 υπερηχητικούς μετασχηματιστές οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ανα 2 σε ζευγάρια και είναι το κάθε ζευγάρι απέναντι από το άλλο. Οι πορείες μέτρησης διαμορφώνονται κάθετα μεταξύ τους και πραγματοποιούνται μετρήσεις ανα 20 msec. Η κατεύθυνση των μετρήσεων πραγματοποιείται και στις 4 κατευθύνσεις δεξιόστροφα:

- Από την Δύση στην Ανατολή και από την Ανατολή στην Δύση
- Από τον Βορρά στον Νότο και από τον Νότο στον Βορρά

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου δεν χρειάζεται καμία συντήρηση και λειτουργεί κάτω από ιδιαίτερα δυσμενείς καιρικές συνθήκες και μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και στις παράκτιες ανεμογεννήτριες (Ντρέκο κ.α.,2009). Ο αισθητήρας αυτός δεν έχει καθόλου κινούμενα μέρη όπως προαναφέρθηκε και άρα δεν χρειάζεται συντήρηση ούτε διακόπτεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας για τυχόν βλάβες. Ο αισθητήρας παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα 37.

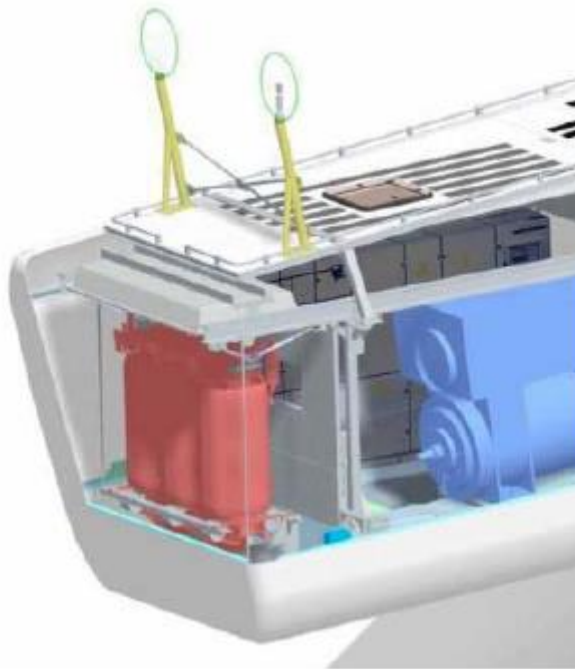


Εικόνα 39: Ο Αισθητήρας μέτρησης της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου (<https://www.environmental-expert.com/products/model-ft702-wind-sensor-578626>)

Η βασική μορφή της λειτουργίας του αισθητήρα ο οποίος αποτελείται από 2 μικρές παράλληλες στρογγυλές πλάκες, από τις οποίες περνά ελεύθερα ο αέρας από μέσα, ενώ η κάθετη κατεύθυνση του αέρα είναι αμελητέα.

Τα ακουστικά υπερηχητικά κύματα που παράγονται παραλαμβάνονται από διαφράγματα που συνδέονται με έναν αριθμό πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων.

Ο αισθητήρας μπορεί επίσης να απορρίψει τα ηχητικά κύματα που παράγονται από τον άνεμο καθώς και τις θερμοκρασιακές μεταβολές και την υγρασία χωρίς να επηρεάζονται οι μετρήσεις του. Στην ακόλουθη εικόνα 38 παρουσιάζεται η θέση μέσα στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας όπου τοποθετούνται οι αισθητήρες μέτρησης της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου (Πατής,2010).



Εικόνα 40: Τοποθέτηση του αισθητήρα στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας (Πατής,2010)

4.4 Αισθητήρας υπερτάχυνσης και ταλάντωσης

Οι αισθητήρες ταλάντωσης και υπερτάχυνσης είναι τοποθετημένοι σε επίκαιρα σημεία στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας και αφενός ανιχνεύουν και αναγνωρίζουν τις μεγάλες ταλαντώσεις του πύργου της ανεμογεννήτριας. Μόλις ανιχνευθούν μεγάλες ταλαντώσεις της ανεμογεννήτριας τότε ενεργοποιείται άμεσα η διαδικασία της παύσης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας μέσω αυτόματων ρυθμίσεων της γωνίας των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας (Σταθοπούλου,2017). Στην περίπτωση του αισθητήρα υπερτάχυνσης, τότε εφόσον ανιχνευτή υπερτάχυνση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας τότε ο αισθητήρας αυτός ενεργοποιεί την διαδικασία της έκτακτης διακοπής λειτουργίας με τον ίδιο τρόπο που διακόπτεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε περίπτωση ταλαντώσεων (Κώτσιας και Μανουσέλης,2019).

4.5 Αισθητήρας υπερθέρμανσης και θερμοκρασίας

Οι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας της ηλεκτρογεννήτριας και γενικότερα της ανεμογεννήτριας τοποθετούνται σε διάφορα κρίσιμα σημεία και εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας όπως είναι τα ρουλεμάν και ο μετασχηματιστής. Στην περίπτωση που ο αισθητήρας της ηλεκτρογεννήτριας ανιχνεύσει πως ξεπεράστηκε η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας της

Καταστροφές σε ανεμογεννήτριες. Λόγοι και πιθανοί τρόποι αποφυγής ηλεκτρογεννήτριας τότε ενεργοποιείται το φρένο του δρομέα της ανεμογεννήτριας (Καλατζής,2008).

Στα ρουλεμάν της ανεμογεννήτριας εξαιτίας της τριβής που αναπτύσσεται, αναπτύσσονται και μεγάλες θερμοκρασίες και για αυτό τον λόγο, κατά την διάρκεια της συντήρησης της ανεμογεννήτριας, η λίπανση των ρουλεμάν είναι απαραίτητη. Στην περίπτωση που ο ανιχνευτής θερμοκρασίας των ρουλεμάν διαπιστώσει πως η θερμοκρασία στα ρουλεμάν έχει υπερβεί την μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τότε ενεργοποιείται το φρένο της ανεμογεννήτριας μέχρι η θερμοκρασία των ρουλεμάν να επανέλθει σε ανεκτά επίπεδα για την λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Η θερμοκρασία των ρουλεμάν, επηρεάζεται σημαντικά από τις θερμοκρασιακές μεταβολές του περιβάλλοντος αλλά και από τις απότομες εναλλαγές της ταχύτητας λειτουργίας των πτερυγίων. Αυτό μπορεί να συμβεί εξαιτίας και απότομων ριπών ανέμων.

5 Κεφάλαιο 5^ο – Παρακολούθηση λειτουργίας ανεμογεννητριών μέσω αισθητήρων

Η παρακολούθηση για την ορθή λειτουργία ανεμογεννητριών γίνεται μέσω αισθητήρων μηχανισμών ώστε να αποφευχθούν τυχόν βλάβες. Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο τέτοιοι αισθητήρες είναι :

- Οπτική ίνα
- Πιεζοηλεκτρικοί
- Επιταχυνσιόμετρα
- Αισθητήρας ταχύτητας ανέμου
- Αισθητήρας θερμοκρασίας
- Αισθητήρας ταλάντωσης

Οι αισθητήρες βοηθούν ώστε να έχουμε μια έγκαιρη διάγνωση αλλά και αντιμετώπιση βλαβών. Για αυτόν τον λόγο δημιουργήσαμε το πίνακα 11 ώστε να παρουσιάσουμε τις κύριες αιτίες βλαβών των ανεμογεννητριών αλλά και τον αισθητήρα με τον οποίο συλλέγουμε την πληροφορία όπου διαπιστώνουμε την αιτία βλάβης. Υπάρχουν αισθητήρες για κάθε βλάβη που μπορεί να προκύψει. Οι πιο συνηθισμένες βλάβες μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να είναι μείωση αποδοτικότητας, κόπωση υλικού, καθώς και βλάβη στα πτερύγια όπως για παράδειγμα ρωγμή. Τα αίτια που προκαλούν τέτοιες βλάβες είναι κατά κύριο λόγο φυσικά φαινόμενα, όπως χαλάζι, πάγος, θυελλώδεις άνεμοι και εναλλαγές της θερμοκρασίας. Βεβαίως, οφείλονται και σε φυσικές καταστροφές (πχ. Σεισμός).

ΑΙΤΙΑ	ΒΛΑΒΕΣ	ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ
Εναλλαγές θερμοκρασίας	<ul style="list-style-type: none"> • Μείωση αποδοτικότητας • Κόπωση υλικού • Ρωγμές πτερυγίων 	<ul style="list-style-type: none"> • Οπτικές ίνες • Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες • Επιταχυνσιόμετρα
Δυσμενής καιρικές συνθήκες (Π.χ. Θυελλώδεις άνεμοι)	Μείωση αποδοτικότητας & κόπωση υλικού	Αισθητήρας μέτρησης διεύθυνσης και ταχύτητας άνεμου
Θυελλώδεις άνεμοι	Υπερτάχυνση πτερυγίων	Αισθητήρας υπερτάχυνσης
Πάγος	Ακινητοποίηση δρομέα ή Κατάρρευση πύργου	<ul style="list-style-type: none"> • Οπτικές ίνες • Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες • Επιταχυνσιόμετρα • Αισθητήρας σύνθετων μικρο-ινών
Κερανοί	<ul style="list-style-type: none"> • Καταρευση Α/Γ • Καταστροφή πτερυγίων • Ζημία στη γεννήτρια ρεύματος & στα ηλεκτρονικά μέρη της Α/Γ 	<ul style="list-style-type: none"> • Οπτικές ίνες • Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες • Επιταχυνσιόμετρα
Χαλάζι	<ul style="list-style-type: none"> • Ζημία στις λεπίδες • Μείωση παράγωγης ηλεκτρικής ενεργείας • Αστάθεια στη γεννήτρια 	<ul style="list-style-type: none"> • Οπτικές ίνες • Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες • Επιταχυνσιόμετρα
Απότομες εναλλαγές ταχύτητας στη λειτουργία των πτερυγίων	Υπερθέρμανση λόγω τριβής ρουλεμάν	Αισθητήρας υπερθέρμανση & θερμοκρασίας
<ul style="list-style-type: none"> • Αστοχία θεμελίωσης • Καθίζηση εδάφους • Ρευστοποίηση εδάφους • Σεισμικές διεγέρσεις 	Ταλάντωση του πύργου	Αισθητήρα ταλάντωσης

Σύγκρουση με πτηνά	Βλάβες στα πτερύγια	Ακουστικοί αισθητήρες (εναλλακτικά : <ul style="list-style-type: none"> • Αισθητήρας οπτικών ινών • Επιταχυνσιόμετρο • Αισθητήρες εικόνας • Ραντάρ μικρής ισχύος)
--------------------	---------------------	--

6 Κεφάλαιο 6ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αιολική ενέργεια και η εκμετάλλευση αυτής μέσω των αιολικών πάρκων βοηθάει στην προστασία του περιβάλλοντος, στην μείωση των εκπομπών αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ενώ ενισχύει την ενεργειακή αυτάρκεια της χώρας σε πηγές και στην κατανάλωση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αιολικά πάρκα είναι οι χώροι που εγκαθίστανται οι ανεμογεννήτριες οι οποίες μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι ανεμογεννήτριες είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες και ακριβές μηχανολογικές διατάξεις και το κόστος του είναι αρκετά μεγάλο. Για αυτό τον λόγο η προστασία, η ανίχνευση και παρακολούθηση των βλαβών και των φθορών των ανεμογεννητριών είναι ένας πολύ κρίσιμος παράγοντας για την διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών και κατά συνέπεια των αιολικών πάρκων. Οι ανεμογεννήτριες είναι εκτεθειμένες στα καιρικά φαινόμενα όπως είναι οι χιονοπτώσεις, οι βροχές και οι κεραυνοί ενώ και οι συγκρούσεις πτηνών στα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι ένα ακόμα συχνό φαινόμενο που χρήζει αντιμετώπισης ενώ είναι και το κύριο επιχείρημα όσον αντιτίθεται στην αιολική ενέργεια και στην εγκατάσταση ανεμογεννητριών στην περιοχή τους. Άλλα ατυχήματα και φθορές που συμβαίνουν στις ανεμογεννήτριες όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας είναι οι καταρρεύσεις και οι πτώσεις των πύργων των ανεμογεννητριών αλλά και οι αποκολλήσεις των πτερυγίων από αυτές και η εκτόξευση τους χιλιόμετρα μακριά από την περιοχή που αυτά βρίσκονται.

Ο τρόπος παρακολούθησης και ανίχνευσης των βλαβών των ανεμογεννητριών μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εγκατάσταση συστημάτων αισθητήρων σε κάθε ένα από τα κρίσιμα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας όπως παρουσιάστηκε και στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας ενώ τα επιμέρους συστήματα προστασίας μπορούν να προστατέψουν την ανεμογεννήτρια από καταστροφικές βλάβες και φθορές. Τα αντικεραυνικά συστήματα προστασίας για παράδειγμα είναι πολύ σημαντικά για την προστασία της ανεμογεννήτριας καθώς οι βλάβες και οι φθορές των πτερυγίων των ανεμογεννητριών και των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων των

ανεμογεννητριών από την πτώση ενός κεραυνού πάνω σε αυτά, είναι ιδιαίτερα σημαντική και δαπανηρή στην επιδιόρθωση της. Τα αντικεραυνικά συστήματα που έχουν αναπτυχθεί σήμερα μπορούν να προστατεύσουν τις ανεμογεννήτριες σε πολύ σημαντικό βαθμό αλλά δεν μπορούν να αποκλείσουν τις πτώσεις των κεραυνών πάνω σε αυτές. Τα συστήματα παρακολούθησης των συγκρούσεων πτηνών πάνω στις ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται στις ανεμογεννήτριες αφού έχει προηγηθεί ενδελεχής μελέτη της περιοχής για το είδος των ενδιατημάτων που βρίσκονται στην περιοχή και είναι υπο κίνδυνο. Ο κίνδυνος της σύγκρουσης των πτηνών με τις ανεμογεννήτριες είναι αμφίδρομος καθώς δεν είναι μόνο περιβαλλοντικά επιβαρυντικός για την περιοχή και την πανίδα της περιοχής αλλά και για την ίδια ανεμογεννήτρια ως προς την διάρκεια ζωής της και των βλαβών που δημιουργούνται κατά την σύγκρουση. Τα συστήματα που παρουσιάστηκαν στο πέμπτο κεφάλαιο για την παρακολούθηση των συγκρούσεων είναι εύκολο να εγκατασταθούν στις ανεμογεννήτριες και μπορούν να προστατεύσουν και τα πτηνά και τις ανεμογεννήτριες μέσω των αισθητήρων κίνησης και καταγραφής των πτήσεων των πτηνών κοντά σε αυτές. Το κόστος εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος είναι σημαντικό αλλά ιδιαίτερα μικρότερο σε σχέση με το όφελος που προκύπτει για την περιοχή και την ίδια την ανεμογεννήτρια.

Από όλα τα παραπάνω και από όσα αναφέρθηκαν μέσα στην εργασία η ύπαρξη ενός ενόργανου συστήματος παρακολούθησης της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και ανίχνευσης των βλαβών αυτής είναι απαραίτητο κατά την διάρκεια του σχεδιασμού ενός αιολικού πάρκου και των ανεμογεννητριών που θα το απαρτίζουν. Το σύστημα αυτό θα απαρτίζεται από πλήθος αισθητήρων παρακολούθησης και ανίχνευσης διότι όπως προαναφέρθηκε οι ανεμογεννήτριες είναι εκτεθειμένες σε πλήθος κινδύνων και για τον λόγο αυτό η πρόληψη επικείμενων βλαβών και η έγκαιρη επέμβαση και αντιμετώπιση σε αρχικό στάδιο, αποκτά πολύ μεγάλη σημασία, ιδιαίτερα αν υπολογιστεί το υψηλό κόστος των συναφών επενδύσεων και τις μεγάλες οικονομικές απώλειες σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας.

Η εγκατάσταση ενός τέτοιου ενόργανου συστήματος παρακολούθησης απαιτεί την απόλυτη τεχνογνωσία στη λειτουργία και συμπεριφορά του κάθε εξαρτήματος των κύριων μερών της ανεμογεννήτριας. Έτσι είναι καθοριστική η σημασία των στατιστικών δεδομένων των βλαβών, αφού με την ανάλυση αυτών λαμβάνονται οι αποφάσεις ως προς το σε ποιο εξάρτημα θα δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στην παρακολούθηση και θα αντιμετωπίζεται ως ιδιαίτερα κρίσιμο για την λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

Συμπερασματικά, η ανάπτυξη της τεχνολογίας και των ηλεκτρονικών συστημάτων και των αισθητήρων έχει δώσει ώθηση στην ανάπτυξη διατάξεων ανίχνευσης και παρακολούθησης των βλαβών και των φθορών των ανεμογεννητριών με ένα κόστος το οποίο είναι ιδιαίτερα χαμηλό σε σχέση με το κόστος της κατασκευής της ανεμογεννήτριας αλλά και των κερδών που αποκομίζονται από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

Ελληνική Βιβλιογραφία

- 1) Αλεξανδρίδης Α., (2013) Τεχνολογίες ελέγχου στα αιολικά συστήματα», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα
- 2) Αντωνάκη Ι., (2010) Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και ο ρόλος της Αιολικής Ενέργειας στην Τοπική και Περιφερειακή Ανάπτυξη, Εθνική Σχολή Τοπικής Αυτοδιοίκησης, Αθήνα.
- 3) Βαφειάδης, Κ., (2020) Ανεμογεννήτριες, Σημειώσεις μαθήματος σχολής μηχανολόγων μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη
- 4) Θυμάκης Γ., Τσουνής Δ., (2013) Μελέτη Αιολικού Πάρκου Ισχύος 2,4 MW, Τμήμα Ηλεκτρολογίας ΤΕΙ Πειραιά, Πειραιάς
- 5) Καλατζής, Μ., (2008) Ανεμογεννήτριες: Περιγραφή-Προδιαγραφές, Σχέση Κόστους-Ωφέλειας, ΤΕΙ Σερρών, Σέρρες
- 6) Κούκης, Γ., Σαμπατακάκης, Ν., (2007) Γεωλογία Τεχνικών Έργων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
- 7) Κώτσιας, Δ., Μανουσέλης, Δ., (2019) Δημιουργία αυτόματης διαδικασίας σχεδιασμού πύργων ανεμογεννητριών μέσω προγραμματιστικής διεπαφής τρισδιάστατου στερεού μοντελοποιητή CAD, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Αθήνα
- 8) Λιούμη, Ι., (2010) Περιβαλλοντική διερεύνηση των παράκτιων εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με έμφαση στις φυσικές επιπτώσεις, Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα
- 9) Μπαλόκας Γ., (2013) Ανάλυση εσωτερικής στηρίξεως πτερυγίου ανεμογεννήτριας από σύνθετα υλικά με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ΕΜΠ, Τομέας Μηχανικής, Αθήνα.
- 10) Μπίρδας, Μ., (2012) Βέλτιστος Δομικός σχεδιασμός Ανεμογεννητριών, ΕΜΠ, Αθήνα
- 11) Πανίδης, Α., (2013) Αιολική Ενέργεια- Αιολική Πάρκα, ΕΜΠ, Αθήνα
- 12) Παρασκευαδάκη, Ε., (2014) Ανάλυση ανεμογεννήτριας, ΕΜΠ, Αθήνα
- 13) Πατής, Π., (2010) Κατασκευή, Λειτουργία & Συντήρηση Αιολικών Πάρκων στην Στερεά Ελλάδα, ΤΕΙ Κρήτης, Χανιά
- 14) Πολίτης, Η., (2018) Μελέτη Ενσωμάτωσης Περιβαλλοντικών Αισθητήρων σε Ανεμογεννήτριες, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα

- 15) Πουλιάς Γ.,(2017) Μελέτη και Κατασκευή Μονοφασικού Αντιστροφέα Τάσης για την σύνδεση ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος με το δίκτυο χαμηλής Τάσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
- 16) Πρόγραμμα SeaWind – Σχεδιασμός θαλάσσιων ανεμογεννητριών με βάση την επιτελεσματικότητα, Οδηγίες για την παρακολούθηση της δομικής κατάστασης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών,.(2015) ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ, Αθήνα
- 17) Ραυτογιάννης Ι.,(2009) “Σύνθετα Υλικά”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Δομοστατικής, Αθήνα.
- 18) Σεμπίλι Τ.,(2010) Μελέτη ανάπτυξης αιολικού πάρκου στην Κρήτη, ΤΕΙ Κρήτης Ηράκλειο,
- 19) Σιανάς,Δ.,(2012) Αντικεραυνική προστασία ανεμογεννητριών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
- 20) Σταθοπούλου,Μ.,(2017) Τεχνικογεωλογικές – γεωτεχνικές συνθήκες και διαστασιολόγηση θεμελιώσεων ειδικών τεχνικών έργων: Η περίπτωση των αιολικών πάρκων, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα
- 21) Τιοπούλος,Α.,(2018) Επισκόπηση αντικεραυνικών τεχνολογιών σε αιολικά πάρκα, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πειραιά, Πειραιάς
- 22) Τσαλίκη, Ε.,(2006) Ανάπτυξη συστήματος παρακολούθησης βλαβών και συντήρησης ανεμογεννητριών σε αιολικά πάρκα, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Χανιά
- 23) Τσιπιανίτης,Α.,(2013) Μελέτη του Ρόλου του Υπεδάφους στη Δυναμική απόκριση Πυλώνων Ανεμογεννητριών, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- 24) Χασικίδη,Φ.,(2013) Η αιολική ενέργεια σε Ελλάδα και Ευρώπη, Πάτρα
- 25) Καλοβρέκτης, Κ. & Κατέβας, Ν. (2013). *Αισθητήρες μέτρησης και ελέγχου*. Θεσσαλονίκη: Τζιόλα.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- 1)Baniotopoulos, C.,(2011) Environmental wind engineering and design of wind energy structures
- 2)Basseville,M,. Mevel, L,. Goursat,M,. (2004) Statistical model-based damage detection and localization: subspace-based residuals and damage-to noise sensitivity ratios, *Journal of Sound and Vibration* 275 (3-5) (2004)769–794.
- 3)Collier, M. P., Dirksen, S., & Krijgsveld, K. L. (2011),. A review of methods to monitor collisions or micro-avoidance of birds with offshore wind turbines. *Part, 1*, 11-078.
- 4)Fiore G, Fujiwara G, Selig M,.(2015) A Damage Assessment for Wind Turbine Blades from Heavy Atmospheric Particles, 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Florida, USA
- 5)Ghoshal,A,. M. J. Sundaresan, M. J. Schulz, P. F. Pai,.(2000) Structural health monitoring techniques for wind turbine blades, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 85 (2000) 309–324.
- 6)H. joon Bang, H. ki Shin, Y. Chu LJu,.(2010) Structural health monitoring of a composite wind turbine blade using fiber bragg grating sensors, Vol. 7647, SPIE, 2010, p. 76474H
- 7)Hongo Y., Yokoyama Σ,.(2009) Observation Results of Characteristics of Winter Lightning and Experimental Results on Lightning Protection for Wind Turbines” CIGRE SC C4 Kushiro Colloquium (Japan)
- 8)Joosse,P,. M. Blanch,M,. Dutton,A,. Kouroussis,D,. Philippidis,T,. Vionis,P,.(2002) Acoustic emission monitoring of small wind turbine blades, *Journal of Solar Energy Engineering*
- 9)Katsanos, E.,Thöns, S,. Georgakis, C,.(2016) Wind turbines and seismic hazard: a state-of-the-art review,” *Wind Energy*, vol. 19, no. 11, p. 2113–2133
- 10)Kensche C,.(2006) Fatigue of composites for wind turbines, *International Journal of Fatigue* 28 (2006) 1363–1374
- 11)Marques, A. T., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Pereira, M. J. R., Fonseca, C., Bernardino, J,.(2014). Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation*, 179, 40-52.
- 12)Martin, G. R. (2012). Through birds’ eyes: insights into avian sensory ecology. *Journal of Ornithology*, 153(1), 23-48.

- 13) Pandey, A., (2006) Development of a Cost-Effective System to Monitor Wind Turbines for Bird and Bat Collisions—Phase I: Sensor System Feasibility Study. California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research. CEC-500-2007-004.
- 14) Stack M, Nash D.,(2018) Assesing the likelihood of hail impact damage on Wind turbine blades, University of Strathclyde, Glasgow, UK
- 15) Terzaghi,K.,(1943) Theoretical soil mechanics
- 16) Verhoef, J. P., Eecen, P. J., Nijdam, R. J., Korterink, H., & Scholtens, H.,(2012). WT-Bird: a low cost solution for detecting bird collisions. *Wind Energy*, 2011, 2013.
- 17) Whelan,M., Janoyan, K., Qiu,T.,(2008) Integrated monitoring of wind plant systems, in: Proceeding of SPIE: Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems
- 18) Wiggelinkhuizen, E.J., L.W.M.M. Rademakers, H.J. den Boon., (2006) Monitoring of bird collisions in wind farm under offshore-like conditions using WT-BIRD system. Report ECN-E--09-033. Energy research Center of the Netherlands.
- 19) Willmott, J. R., Forcey, G. M., & Hooton, L. A.,. (2015). Developing an automated risk management tool to minimize bird and bat mortality at wind facilities. *Ambio*, 44(4), 557-571.
- 20) Ye J, , Chenchen Chu, Heng Cai, Xiaonan Hou, Baoquan Shi, Shaohua Tian, Xuefeng Chen, Jianqiao Ye.,. (2019) A multi-scale model for studying failure mechanisms of composite wind turbine blades, *Composite Structures* 212 (2019) 220–229
- 21) Zaruba,Q.,Vojtech,M.,. (1969) Landslides and their control, Elsevier
- 22) Summary of Wind Turbine Accident data to 30 April 2020 available at www.caithnesswindfarms.co.uk

Διαδικτυακές Πηγές

https://www.kindpng.com/imgv/hoJiRjB_wind-turbine-energy-diagram-png-download-wind-power/
<https://www.google.com/imgres?imgurl=https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q%3Dtbid:ANd9GcQoeFwuUbH5B9SVjM9ch51NFecpMinXx4FDzAR7MZvU1n0gULjE&imgrefurl=https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/61470/1/Gonzalez-A-2018-PhD-Thesis.pdf&h=431&w=712&tbid=TOOWZYEwztSVYM&tbnh=175&tbnw=289&osm=1&hcb=1&source=lens-native&usq=AI4-kSgYXIP9w01768cyAqZ-hwm8LdkKg&docid=elblyi6WXmbvbM>
<https://www.mdpi.com/1996-1944/10/11/1285/htm>
<https://www.windpowermonthly.com/article/995556/siemens-wins-repeat-100mw-ontario-contract>
<http://www.cres.gr/cres/index.html>
<https://www.usinenouvelle.com/article/le-parc-eolien-en-mer-de-dieppe-le-treport-pret-a-prendre-le-large.N888139>
<https://www.mdpi.com/2073-4360/12/8/1828/htm>
https://www.researchgate.net/figure/Common-structural-architecture-for-wind-turbine-blade_fig3_227697710
<https://www.windpowerengineering.com/variable-speed-hard-geared-transmission-may-improve-wind-power-efficiency-5-to-10/>
<http://www.aiolikigi.gr/el/e-learning/wind-parks-annual-electricity-production/>
https://www.igwindkraft.at/?mdoc_id=1004609
<http://apothesis.teicm.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/660/kalantzis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
http://oceanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/5009/mech_43005.pdf?sequence=1&isAllowed=y
<https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/963a4ec7217a5b64ff05/1020150008464.pdf>
<http://www.ewea.org/>
<https://www.wochenblick.at/winter-in-deutschland-zeigt-ohne-fossile-brennstoffe-geht-es-nicht/>
<https://www.agenciasinc.es/Noticias/El-movimiento-de-las-turbinas-eolicas-puede-generar-rayos>
<https://www.windpowerengineering.com/the-importance-of-testing-wind-turbine-lightning-protection/>
<https://nemertes.library.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/5296/1/%CE%91%CE%BD%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CF%81%CE%B1%CF%85%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1%20%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CE%B5%CE%BD%CE%BD%CE%B7%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%8E%CE%BD.pdf>
<http://www.tdsiam.com/product.html>
https://www.researchgate.net/figure/Particle-and-blade-velocities-a-axial-induction-factor-O-angular-velocity-r-local-span_fig1_280300715
<https://armouredge.com/leading-edge-erosion/>
<https://www.independent.co.uk/news/uk/home-news/wind-turbine-crashes-ground-after-rotor-blades-spin-out-control-under-light-winds-a219426.html?amp>
<https://www.irishexaminer.com/news/arid-20305978.html>
<https://www.deviantart.com/hurricanewindpower/art/Hurricane-Wind-Power-Generators-557564514>