

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΡΟΤΣΗΣ ΣΠΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΠΑΛΥΜΠΕΡΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ  
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2009

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στην αξιοπιστία των εξαρτημάτων των παράκτιων ανεμογεννητριών. Ως γνωστό οι συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις αλλά ταυτόχρονα και η σημαντική επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας, έχουν οδηγήσει στην απαίτηση για πιο καθαρές μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας. Αιχμή του δόρατος και βαριά βιομηχανία των ήπιων μορφών ενέργειας αποτελούν οι ανεμογεννήτριες, με αποτέλεσμα να έχουμε πολλαπλασιασμό τα τελευταία χρόνια τόσο στο δυναμικό τους όσο και στον αριθμό τους.

Σε αυτή την εργασία σκοπός μας είναι να προβλεφθούν τα επίπεδα αξιοπιστίας των εξαρτημάτων των παράκτιων ανεμογεννητριών που υπάρχουν αυτή τη στιγμή στην αγορά αλλά και αυτών που πρόκειται να κατασκευαστούν στο προσεχές μέλλον, να ερευνησουμε για το πιο αναξιόπιστο υποσύστημα αυτών και να προτείνουμε λύσεις για τη βελτίωσή τους. Για να πετύχουμε το στόχο μας, αφού αναλύσουμε τα συστήματα που απαρτίζουν μια ανεμογεννήτρια, θα μελετήσουμε τις υπάρχουσες βάσεις δεδομένων στη Γερμανία, τη Δανία και τη Σουηδία για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες και με τη χρήση ενός μαθηματικού προτύπου θα υπολογίσουμε τις νέες τιμές οι οποίες θα αναφέρονται στις παράκτιες ανεμογεννήτριες.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Χρήστο Παπαλυμπέρη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας

Κρότσης Σπύρος

Ιανουάριος 2009

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία ασχολείται κυρίως με τις έννοιες της αξιοπιστίας και της τεχνολογίας της λειτουργίας των παράκτιων ανεμογεννητριών. Στο προκαταρκτικό μέρος θα γίνει μια αναφορά στην ιστορία της αιολικής ενέργειας και στους στόχους και τη δομή της μελέτης αυτής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αφού γίνει μια αναδρομή στην ιστορία της ανεμογεννήτριας, θα αναλυθεί η αγορά της αιολικής βιομηχανίας και οι μελλοντικές τάσεις της καθώς και ο ρόλος των παράκτιων αιολικών πάρκων.

Το τρίτο κεφάλαιο αφιερώνεται στην έρευνα των βασικών εννοιών λειτουργίας των σύγχρονων ανεμογεννητριών. Επιπλέον θα γίνει μια βαθύτερη έρευνα για τα ηλεκτρικά συστήματα και για τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας καθώς και για αυτά που θα χρησιμοποιηθούν στις μελλοντικές ανεμογεννήτριες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα γίνει μια πλήρης μελέτη αξιοπιστίας για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες, χρησιμοποιώντας στοιχεία από τρεις διαφορετικές ευρωπαϊκές χώρες, την Γερμανία, τη Σουηδία και τη Δανία. Στο τέλος θα ερευνηθούν και θα αναλυθούν τα κύρια αποτελέσματα σχετικά με τη διαθεσιμότητα, τα ποσοστά βλαβών ανά εξάρτημα και τη σχέση μεταξύ της απόδοσης και της αξιοπιστίας. Επίσης θα εξεταστούν πλήρως οι αιτίες των βλαβών και η μέση διαθεσιμότητα των χερσαίων ανεμογεννητριών για όλες τις χώρες που συμμετέχουν στην έρευνα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μια διαδικασία ώστε να προβλεφθούν τα επίπεδα αξιοπιστίας τόσο για τις υπάρχουσες όσο και για τις μελλοντικές παράκτιες ανεμογεννήτριες και θα χρησιμοποιηθεί ένα μαθηματικό πρότυπο βασισμένο σε μια γενερική διαδικασία αποτυχιών ('generic failure application'), για να υπολογίσει αυτές τις τιμές. Δίδουμε τα γραφικά αποτελέσματα, από την εφαρμογή της διαδικασίας στο Παράρτημα Β σε γλώσσα προγραμματισμού 'matlab'.

Στο έκτο κεφάλαιο θα γίνει μια έρευνα για το πιο αναξιόπιστο υποσύστημα στις τρέχοντες χερσαίες ανεμογεννήτριες και θα συζητηθεί ένα σύνολο λύσεων για τη βελτίωσή τους.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των συμπερασμάτων και μια περεταίρω ανάλυση προκειμένου να γίνουν κάποιες συστάσεις.

Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ότι με αυτή την μελέτη έγινε κατανοητό, ότι τα επίπεδα αξιοπιστίας των χερσαίων ανεμογεννητριών σήμερα, δεν είναι επαρκή για να τοποθετηθούν σε παράκτιες θέσεις. Εντούτοις η αύξηση των επιπέδων αξιοπιστίας με το χρόνο και οι βελτιώσεις που εισάγονται στα υπάρχοντα συστήματα, θα διευκολύνουν στο κοντινό μέλλον την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών σε θέσεις μακριά από την ακτή, μιας και όλα δείχνουν ότι το μέλλον της Αιολικής Ενέργειας βρίσκεται στη θάλασσα.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	1
1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ.....	2

## 2. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ .....	4
2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ.....	6
2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ.....	6
2.5 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ.....	8
2.6 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ....	10
2.7 ΣΥΜΒΟΛΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΧΑΡΤΗ.....	11
2.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	13

## 3. ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	14
3.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	14
3.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	16

3.3.1 Έλεγχος της κλίσης του πτερυγίου ('pitch control') .....	17
3.3.2 Έλεγχος απώλειας στήριξης στην πτέρυγα ('stall control') .....	17
3.3.3 Ενεργός έλεγχος της απώλειας στήριξης στην πτέρυγα ('active stall control') .....	18
<b>3.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....</b>	<b>19</b>
3.4.1 Γεννήτριες.....	21
3.4.2 Διατάξεις συστημάτων ανεμογεννητριών .....	22
3.4.3 Ηλεκτρονικά ισχύος στη δομή λειτουργίας των ανεμογεννητριών .....	27
3.4.4 Μεταφορά ενέργειας.....	32
<b>3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>36</b>
<b>4. ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ</b>	
<b>4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ .....</b>	<b>37</b>
4.2.1 Ορισμοί.....	37
4.2.2 Βασικοί υπολογισμοί ποσοστών ελαττωμάτων.....	38
4.2.3 Παρουσίαση της απόδοσης αξιοπιστίας .....	40
4.2.4 Υπολογισμός της διαθεσιμότητας.....	41
<b>4.3 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΑΠΟΤΥΧΙΑΣ ΤΩΝ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ....</b>	<b>42</b>
<b>4.4 ΧΕΡΣΑΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ: ΠΟΣΟΣΤΑ ΑΠΟΤΥΧΙΑΣ.....</b>	<b>43</b>
4.4.1 Γερμανία: ποσοστά αποτυχίας χερσαίων ανεμογεννητριών .....	43
4.4.2 Σουηδία: Ποσοστά βλαβών χερσαίων ανεμογεννητριών .....	55
4.4.3 Δανία: Ποσοστά βλαβών χερσαίων ανεμογεννητριών .....	57
<b>4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ ΤΩΝ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....</b>	<b>58</b>
<b>4.6 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....</b>	<b>62</b>
<b>4.7 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΙΤΙΩΝ ΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ.....</b>	<b>65</b>
<b>4.8 ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>66</b>
4.8.1 Ομοιότητες των αποτελεσμάτων κάθε χώρας.....	66
4.8.2 Διαφορές των αποτελεσμάτων κάθε χώρας.....	67
4.8.3 Παράθεση των αποτελεσμάτων .....	67
<b>4.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>68</b>
<b>5. ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ</b>	
<b>5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>69</b>
<b>5.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ .....</b>	<b>69</b>
<b>5.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΠΟΤΥΧΙΩΝ.....</b>	<b>70</b>
<b>5.4 ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ .....</b>	<b>70</b>
5.4.1 Παράγοντας περιβαλλοντικής καταπόνησης $K_1$ ('Environmental stress factor') .....	71
5.4.2 Διαβαθμισμένος παράγοντας καταπόνησης $K_2$ ('Rating stress factor').....	72
<b>5.5 ΠΟΣΟΣΤΑ ΒΛΑΒΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....</b>	<b>74</b>
5.5.1 Γερμανία: ποσοστά βλαβών παράκτιων ανεμογεννητριών.....	75
5.5.2 Σουηδία: ποσοστά βλαβών παράκτιων ανεμογεννητριών .....	77

5.5.3 Δανία: ποσοστά βλαβών παράκτιων ανεμογεννητριών .....	78
<b>5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>80</b>
<b>6. ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ</b>	
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	81
6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	81
6.3 ΑΙΤΙΕΣ ΒΛΑΒΩΝ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ .....	82
6.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ.....	84
6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	85
<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΝΑΛΥΣΗ</b>	
7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	86
7.2 ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	87
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>89</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....</b>	<b>93</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....</b>	<b>96</b>

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Είναι γνωστό ότι οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια αυξάνονται καθημερινά. Παρότι οι συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν την απαίτηση, το παγκόσμιο ζήτημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη και οι ελλείψεις ορυκτού καυσίμου, αναγκάζουν τις κυβερνήσεις να εφαρμόσουν φιλικούς προς το περιβάλλον τρόπους παραγωγής ενέργειας.<sup>1</sup> Ειδικά τα τελευταία χρόνια έντονες πιέσεις έχουν εφαρμοστεί στη διεθνή κοινότητα, για να προωθηθεί μεγαλύτερη περιβαλλοντική υπευθυνότητα.<sup>2</sup> Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κιότο του 1997, οι βιομηχανικές χώρες που υπέγραψαν, συμφώνησαν να μειώσουν τις εκπομπές τους σε αέρια του θερμοκηπίου κατά έναν συλλογικό μέσο όρο του 5% κάτω από τα επίπεδα του 1990.<sup>1</sup>

Επειδή μεγάλο μέρος εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου οφείλεται στην βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν διερευνηθεί εναλλακτικοί τρόποι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι αρχίζουν να συμμετέχουν στη συνολική παγκόσμια ηλεκτρική παραγωγή. Αυτές οι νέες τεχνολογίες χρησιμοποιούν τις φυσικές πηγές ενέργειας (αέρας, ήλιος, κύματα, κ.λ.π.) και τις μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ένας από τους πιο κοινούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που υιοθετείται σήμερα, είναι οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Ειδικά μετά από τη δεκαετία του '90 η αιολική ενέργεια ήταν η ταχύτερα αναπτυσσόμενη ενεργειακή τεχνολογία, με βάση το ποσοστό ετήσιας αύξησης της εγκατεστημένης ικανότητας παραγωγής ρεύματος ανά είδος τεχνολογίας.<sup>2</sup> Τα τελευταία χρόνια η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας στράφηκε σε μια νέα περιοχή, τα παράκτια αιολικά πάρκα. Διάφοροι είναι οι λόγοι για την στροφή αυτή της βιομηχανίας. Η απέραντη περιοχή κατάλληλη για τα αιολικά πάρκα, η έλλειψη ανησυχίας σχετικά με τα υψηλά επίπεδα θορύβου, η δυνατότητα να



καταστεί η περιοχή έτοιμη για εγκατάσταση πιο εύκολα και τα πιο δυνατά και πιο σταθερά επίπεδα ανέμου που υπάρχουν στην ανοικτή θάλασσα, είναι οι σημαντικότεροι λόγοι.<sup>3</sup> Επιπλέον αυτή η κίνηση βοήθησε τη βιομηχανία ανεμογεννητριών να εξελιχθεί με τη δημιουργία μεγαλύτερων και αποδοτικότερων ανεμογεννητριών, οι οποίες έχουν καλύτερο ενεργειακό ισοζύγιο απόδοσης και έτσι να μπορούν πιο γόνιμα να συμβάλουν στη παγκόσμια ενεργειακή παραγωγή.

Παρά το γεγονός ότι τα παράκτια αιολικά πάρκα έδωσαν τις λύσεις σε σημαντικά θέματα και σε περιορισμούς που η προϋπάρχουσα χερσαία βιομηχανία αέρα άρχισε να αντιμετωπίζει, δημιουργήθηκαν δύο νέα προβλήματα, το ζήτημα της αξιοπιστίας και το υψηλό κόστος συντήρησης των ανεμογεννητριών. Η ανάλυση αξιοπιστίας των παράκτιων ανεμογεννητριών είναι ένας από τους πιο σημαντικούς κλάδους έρευνας της αιολικής βιομηχανίας. Αυτό συμβαίνει κυρίως διότι η συντήρηση αυτών των εγκαταστάσεων (παράκτιων) είναι ιδιαίτερα ακριβή, δύσκολη και με έναν μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας έναντι των χερσαίων ισοδύναμων προγραμμάτων, λόγω της εξάρτησης από τον καιρό.<sup>3</sup> Έτσι με την ανάλυση και τη μελέτη των ελαττωμάτων των προϋπάρχουσων εγκαταστάσεων αιολικών πάρκων, μπορεί να επιτευχθεί μια μείωση των βλαβών και να χρησιμοποιηθούν πιο αξιόπιστες τεχνολογίες, παρέχοντας χαμηλότερο κόστος συντήρησης και πιο υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας.

## **1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ**

Ο στόχος αυτής της πτυχιακής εργασίας, είναι να παρασχεθεί μια γενική επισκόπηση των διαφορετικών εννοιών λειτουργίας των παράκτιων ανεμογεννητριών, εστιάζοντας στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα τους και επίσης να εκτελεστεί μια πλήρης ανάλυση αξιοπιστίας που να καθορίζει τα βασικά προβλήματά τους και να παρέχει τις λύσεις για τις μελλοντικές εγκαταστάσεις.

Ως εκ τούτου, τα σημεία αυτής της πτυχιακής που πρέπει να αναλυθούν ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της, μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα.

- Βιβλιογραφική επισκόπηση στην διεθνή υπάρχουσα παράκτια τεχνολογία ανεμογεννητριών, προκειμένου να προσδιοριστούν οι περιορισμοί αλλά και οι διαφορές της από τα χερσαία προγράμματα και να διερευνηθεί η συμβολή τους στην ανάπτυξη των μελλοντικών παράκτιων προγραμμάτων.

- Προσδιορισμός των σημαντικών τμημάτων των παράκτιων ανεμογεννητριών και των εναλλακτικών επιλογών στο σχέδιο ηλεκτρικών συστημάτων μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας ('HVDC' ή 'HVAC').
  - Έρευνα για τους λόγους αποτυχίας των ηλεκτρικών κυκλωμάτων.
  - Προσδιορισμός και εκτίμηση της αξιοπιστίας και του ποσοστού βλαβών κάθε κύριου εξαρτήματος των χερσαίων ανεμογεννητριών.
    - Προσδιορισμός των εξαρτημάτων με τη μεγαλύτερη ευαισθησία.
    - Ανάπτυξη ενός μοντέλου που θα προβλέπει τα επίπεδα αξιοπιστίας των παράκτιων ανεμογεννητριών.
      - Ανάλυση των αποτελεσμάτων.
      - Πρόταση των πιθανών λύσεων των κυρίων προβλημάτων αξιοπιστίας που εντοπίζονται στις ανεμογεννήτριες.

## **2. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η προέλευση της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας και θα γίνει μια σαφής επισκόπηση των σύγχρονων τάσεων της αγοράς, εστιάζοντας ειδικά στην παράκτια περιοχή. Επιπλέον θα ερευνηθούν πλήρως τα οφέλη και οι περιορισμοί της παράκτιας εκμετάλλευσης του αέρα στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και θα απαριθμηθούν οι σημαντικότερες παράκτιες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών.

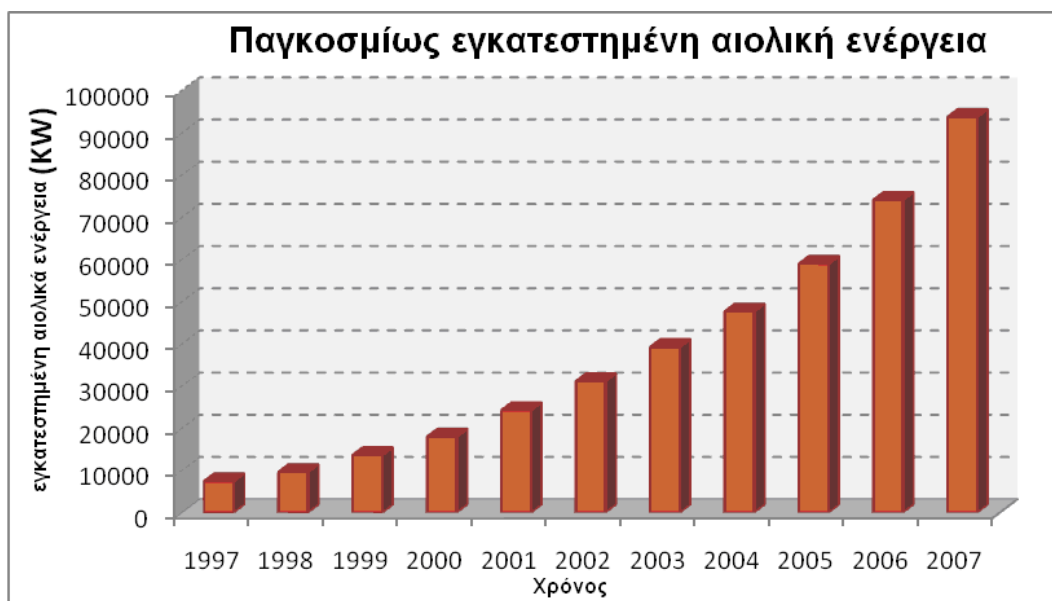
### **2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ**

Η χρησιμοποίηση της ενέργειας του αέρα δεν είναι μια νέα τεχνολογία αλλά φωτογραφίζεται στην ανάσυρση μιας μακροχρόνιας παράδοσης τεχνολογίας αιολικής ενέργειας. Οι πρώτες εγκαταστάσεις έχουν ιστορία πολλών αιώνων, από το 644 Μ.Χ. χρονολογείται ο πρώτος γνωστός ανεμόμυλος στα σύνορα Περσίας Αφγανιστάν.<sup>1</sup>

Εντούτοις οι πρώτες προσπάθειες να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα με τη βοήθεια της αιολικής ενέργειας έγιναν σημαντικά αργότερα, στο τέλος του 19ου αιώνα στη Δανία το 1881,<sup>1</sup> ο 'Poul La Cour' ήταν ο πρώτος που σχεδίασε και κατασκεύασε έναν εναλλάκτη καθοδηγούμενο από τον αέρα.<sup>1</sup> Μέχρι το 1908, η επιχείρηση 'Lykkegard' είχε εγκαταστήσει ήδη ανεμογεννήτριες παραγωγής ρεύματος, που διαμορφώθηκαν μετά από τις δοκιμές του πρωτοτύπου του 'Poul La Cour'. Η ισχύς παραγωγής αυτών των μηχανών κυμαινόταν από 10 - 35 KW και ο στροφέας με μια διάμετρο μέχρι 20μ, είχε τέσσερα πανιά τύπου παραθυρόφυλλου, καθιστώντας το ικανό να παραμείνει κάτω από μια ορισμένη ταχύτητα περιστροφής.<sup>1</sup> Παρά την πρόωρη και ενθουσιώδη έναρξη στον τομέα της αιολικής ενέργειας, η ανάπτυξη και η έρευνα παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα μέχρι τα τέλη του 20ού αιώνα.

Μόνο μετά την πρώτη ενεργειακή κρίση στη δεκαετία του '70 και όταν η τιμή του πετρελαίου ανήλθε σε πολλαπλάσιες από τις μέχρι τότε τιμές, οι δυτικές βιομηχανικές χώρες συνειδητοποίησαν την υψηλότερη εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα και προέκυψε το ενδιαφέρον τους για άλλες πηγές ενέργειας και ιδιαίτερα η χρησιμοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.<sup>1</sup> Πολύ σύντομα διαφάνηκαν τα πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας σε σχέση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δίνοντας πολλές υποσχέσεις για το μέλλον.

Από τότε και στο εξής αρχίζει εντατική έρευνα στον τομέα των ανεμογεννητριών σε διάφορες χώρες όπως τη Γερμανία, τη Δανία, τη Σουηδία και τις Ηνωμένες Πολιτείες, παρέχοντας σημαντικές ανακαλύψεις στην ανάπτυξή τους. Χάρη σε αυτήν, το μέγεθος και η αποδοτικότητα των αιολικών εγκαταστάσεων έχουν φθάσει σε επίπεδα που τις καθιστούν ανταγωνιστικές σε σχέση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Ως συνέπεια αυτού τα τελευταία δέκα έτη η βιομηχανία αιολικής ενέργειας, έχει εξελιχθεί σε μία από τις περισσότερο αναπτυσσόμενες βιομηχανίες στο κόσμο, όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.1**.<sup>4</sup>



**Σχήμα 2.1:** Παγκόσμια ισχύς αιολικών πάρκων εγκατεστημένων την περίοδο 1997 – 2007, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [4]

## **2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ**

Ως επί το πλείστον, τα αιολικά πάρκα που λειτουργούν σήμερα βρίσκονται σε χερσαίες περιοχές. Εντούτοις σημαντικά μειονεκτήματα που συνδέονται με τις χερσαίες αιολικές εγκαταστάσεις, έχουν αναγκάσει τη βιομηχανία να στρέψει το βλέμμα της προς τη θάλασσα. Τα σημαντικότερα ζητήματα που σχετίζονται με την εγκατάσταση σε παράκτιες ή χερσαίες θέσεις, αναλύονται στα ακόλουθα κεφάλαια.

## **2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ**

Τα τελευταία χρόνια η χρησιμοποίηση της παράκτιας αιολικής ενέργειας, δηλαδή η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών μέσα στην θάλασσα, έκανε ένα όραμα των πρωτοπόρων της αιολικής ενέργειας πραγματικότητα.<sup>1</sup> Τα κίνητρα για αυτή την αλλαγή είναι αρκετά.

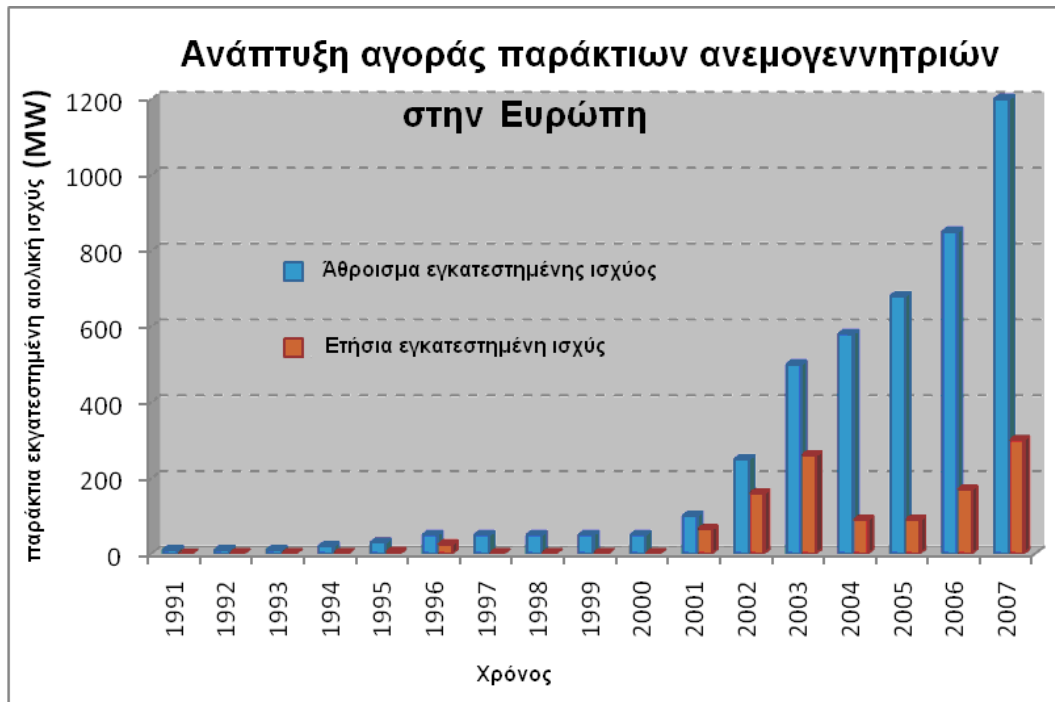
Το πρώτο επιχείρημα που μπορεί να ειπωθεί, είναι ο περιορισμός στη διαθεσιμότητα της απαραίτητης περιοχής που απαιτείται για την περαιτέρω ανάπτυξη ενεργειακών αιολικών εγκαταστάσεων, ειδικά σε χώρες όπως η Δανία, η Ολλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο, που οδηγούν στη λύση της εγκατάστασης σε παράκτιες θέσεις.<sup>1</sup>

Πολύ σημαντικό είναι επίσης οι υψηλότερες διαθέσιμες ταχύτητες ανέμου στην ανοιχτή θάλασσα. Όπως δείχνουν τα νέα ερευνητικά αποτελέσματα, οι ταχύτητες ανέμου εν πλω είναι υψηλότερες από ότι είχε εκτιμηθεί, διευκολύνοντας την ανάπτυξη μεγαλύτερων και αποδοτικότερων ανεμογεννητριών.<sup>3</sup> Βρέθηκε ότι για περιοχές που βρίσκονται σε κάποια απόσταση από την ακτή, μια αύξηση της ταχύτητας του ανέμου της τάξης του 20% δεν είναι κάτι το ασυνήθιστο.<sup>3</sup> Ειδικά λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το ενεργειακό περιεχόμενο της αιολικής ενέργειας αυξάνεται με τον κύβο της έντασης του ανέμου, γίνεται κατανοητό ότι η ενεργειακή παραγωγή μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 70% σε σχέση με αυτήν που κερδίζεται στη ξηρά.<sup>3</sup>

Επιπλέον ένα σημαντικό πλεονέκτημα των παράκτιων περιοχών σε σύγκριση με τις χερσαίες, είναι ότι η ροή του ανέμου είναι πιο ομαλή.<sup>2</sup> Ο κύριος λόγος για την

ύπαρξη σταθερότερων ανέμων στη θάλασσα, είναι η διαφορετική επίδραση της ακτινοβολίας του ηλίου στην επιφάνεια του νερού και του χώματος. Δεδομένου ότι η χερσαία επιφάνεια έχει σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία από την επιφάνεια της θάλασσας οδηγούμαστε σε μια μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα και της χερσαίας επιφάνειας, που κάνει τον αέρα να ρέει με περισσότερες δίνες.<sup>3</sup> Η καλύτερη ποιότητα του αέρα σημαίνει κυρίως ότι η μηχανική καταπόνηση θα είναι λιγότερη και έτσι η ανεμογεννήτρια θα λειτουργήσει αποτελεσματικότερα και θα έχει περισσότερο χρόνο ζωής. Παρά το γεγονός ότι δεν έχει εκτελεστεί κανένας ακριβής υπολογισμός, εκτιμάται ότι η διάρκεια ζωής τους μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 30%, με συνέπεια μια οικονομικά αποδοτικότερη εγκατάσταση.<sup>3</sup> Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των παράκτιων αιολικών πάρκων είναι ότι βρίσκονται σε απόμακρες και απομονωμένες περιοχές, όπου ο αντίκτυπος της οπτικής και ηχητικής ρύπανσης αναμένεται να είναι από ελάχιστος έως και ανύπαρκτος, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Σε αντίθεση οι χερσαίες εγκαταστάσεις θεωρούνται ότι παραγάγουν υπερβολικό θόρυβο, αντανάκλασεις φωτός και αποτελούν μια αιτία για τη μείωση της αξίας των παρακείμενων ιδιοκτησιών. Έτσι είναι σύνηθες να βλέπεις τοπικές κοινότητες να στέφονται ενάντια στις χερσαίες εγκαταστάσεις, πράγμα που οδηγεί όχι μόνο σε σοβαρές καθυστερήσεις στη λήψη των αδειών των εγκαταστάσεων και της λειτουργίας αλλά και σε μερικές περιπτώσεις της πλήρους ματαίωσης του έργου.<sup>3</sup> Εντούτοις όλοι οι παραπάνω λόγοι δεν θα μπορούσαν από μόνοι τους να αντισταθμίσουν την τεράστια αύξηση των κατασκευαστικών και λειτουργικών δαπανών των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας ορुकτού καυσίμου. Έτσι το σημαντικότερο επιχείρημα για την παράκτια ενεργειακή εκμετάλλευση του ανέμου, είναι η δυνατότητα να αναπτυχθούν τεράστια αιολικά πάρκα ονομαστικής ισχύος πάνω από 500 MW, όμοια με τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, τη στιγμή που στις χερσαίες θέσεις οι ικανότητες εγκαταστάσεων αιολικών πάρκων περιορίζονται πιθανότατα σε λίγες δεκάδες μεγαβάτ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προσέλκυση βιομηχανιών παροχής ηλεκτρισμού που είναι σε θέση για επενδύσεις σε έργα μεγάλης κλίμακας.<sup>1</sup>

Απόδειξη αυτής της μεταστροφής προς τα παράκτια αιολικά πάρκα αποτελούν οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις και οι αιτήσεις για την έκδοση νέων αδειών. Όπως διευκρινίζεται στο **σχήμα 2.2** η ισχύς των παράκτιων εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας, κατά τη διάρκεια της περιόδου 1991 έως 2007, αυξάνει κάθε χρόνο.<sup>5</sup>



**Σχήμα 2.2:** Ανάπτυξη παράκτιων αιολικών πάρκων εγκατεστημένων την περίοδο 1991 – 2007, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [5]

## 2.5 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ

Τα βασικά μειονεκτήματα και οι κύριοι λόγοι για την αργοπορημένη ανάπτυξη των παράκτιων αιολικών πάρκων, όπως αναλύονται κατωτέρω, είναι το ζήτημα των υψηλών δαπανών και της χαμηλής αξιοπιστίας της κατασκευής.

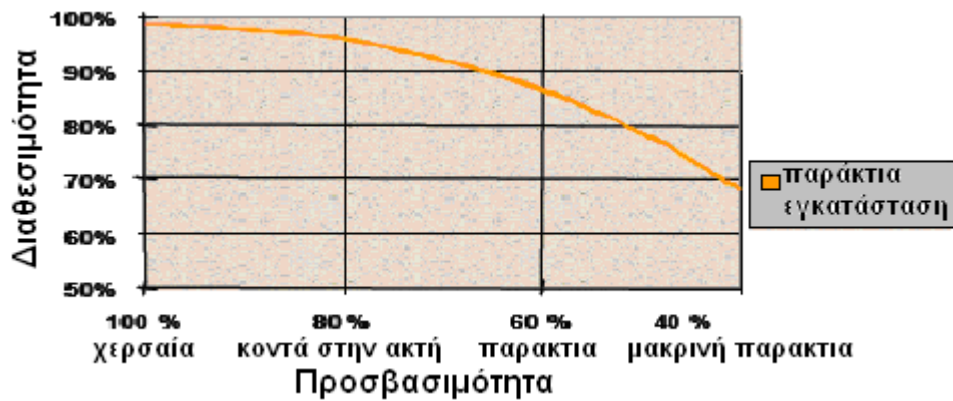
Παρά το γεγονός ότι το κόστος απόκτησης μιας ανεμογεννήτριας έχει μειωθεί κατά 20% ανά KW, το γενικό κόστος μίας παράκτιας ανεμογεννήτριας παραμένει επί της ουσίας σταθερό, αφού το κύριο κόστος της εντοπίζεται στις θαλάσσιες εγκαταστάσεις και στη σύνδεση με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικού ρεύματος.<sup>6</sup> Όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.3** το μέσο κόστος ενός παράκτιου αιολικού πάρκου σε σχέση με ένα χερσαίο είναι περίπου διπλάσιο.<sup>6</sup>



**Σχήμα 2.3:** Σύγκριση δαπανών παράκτιων και χερσαίων αιολικών πάρκων, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [6]

Εντούτοις, το κρισιμότερο μειονέκτημα των παράκτιων αιολικών πάρκων είναι η περιορισμένη πρόσβαση για τη συντήρηση και την επισκευή τους. Ειδικά όταν είναι γνωστό για μια ανεμογεννήτρια ότι για να λειτουργήσει με ένα χαμηλό ποσοστό βλαβών, η ελάχιστη συντήρηση που πρέπει να πραγματοποιηθεί είναι δύο φορές το χρόνο.<sup>7</sup> Έτσι μπορεί να γίνει κατανοητό ότι η δυνατότητα πρόσβασης συνδέεται άμεσα με την αξιοπιστία και την καλή λειτουργία των ανεμογεννητριών. Στα παράκτια αιολικά πάρκα όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το **σχήμα 2.4** η δυνατότητα πρόσβασης μειώνεται σημαντικά. Επιπλέον όπως μπορεί να φανεί από τη γραφική παράσταση, όσο η εγκατάσταση απομακρύνεται από την ακτή, τόσο η δυνατότητα πρόσβασης μειώνεται εντυπωσιακά, κυρίως λόγω των ακραίων περιβαλλοντικών συνθηκών που υπάρχουν στην ανοικτή θάλασσα. Ως συνέπεια αυτού λοιπόν έχουμε τον περιορισμό της συντήρησης και σε πολλές περιπτώσεις την αύξηση του ποσοστού των βλαβών των ανεμογεννητριών.





**Σχήμα 2.4:** Σχέση μεταξύ της διαθεσιμότητας και της δυνατότητας πρόσβασης για τα παράκτια αιολικά πάρκα, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [8]

Έτσι για τις παράκτιες εγκαταστάσεις απαιτείται μια σημαντικά πιο αξιόπιστη γενιά ανεμογεννητριών, ειδικά για αυτές που προγραμματίζονται να είναι ιδιαίτερα απομακρυσμένες από την ακτή.

## 2.6 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Έχοντας κάνει μια εκτίμηση για τα θετικά και τα αρνητικά ζητήματα που σχετίζονται με τα παράκτια αιολικά πάρκα, δύο βασικά συμπεράσματα μπορούν να συναχθούν. Το πρώτο είναι ότι η μελλοντική ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας αναγκάζει τη βιομηχανία να κινηθεί προς την θάλασσα και μακριά από την ακτή. Το δεύτερο είναι ότι πρέπει να γίνει επανασχεδιασμός των υπαρχόντων εγκαταστάσεων με γνώμονα την αξιοπιστία.<sup>7</sup> Είναι προφανές ότι εάν τα τρέχοντα σχέδια ανεμογεννητριών συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται για τις παράκτιες εγκαταστάσεις, οι ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες θα οδηγήσουν σε μη βιώσιμες λύσεις όπως δείχνουν τα μέχρι τώρα ποσοστά βλαβών.<sup>1</sup> Έτσι οι νέες ανεμογεννήτριες πρέπει να επανασχεδιαστούν λαμβάνοντας υπόψη το θαλάσσιο περιβάλλον και στοχεύοντας ειδικά στην παραγωγή προτύπων με μεγάλη αξιοπιστία και αποδοτικότητα, όπως εξηγείται στις ακόλουθες παραγράφους.

## 2.7 ΣΥΜΒΟΛΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΧΑΡΤΗ

Το ενδιαφέρον για τη χρησιμοποίηση της παράκτιας αιολικής ενέργειας αυξάνεται σημαντικά παγκοσμίως. Όπως παρουσιάζεται στον **πίνακα 2.1** το συνολικό ποσό της αιολικής ενέργειας που εγκαταστάθηκε σε παράκτιες θέσεις μέχρι το 2002 περιορίστηκε σε περίπου 90 MW, εντούτοις μέχρι το έτος 2004 η εγκατεστημένη ισχύς είχε αυξηθεί σε περίπου 587 MW.

Επιπλέον τα αιολικά πάρκα αυξάνουν σε μέγεθος και σε ηλεκτρική ισχύ, για παράδειγμα σύμφωνα με τον **πίνακα 2.1** στις αρχές του 1990 το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο ήταν περίπου στα 10 MW και μέχρι τις αρχές του 2000 τα μεγάλα αιολικά πάρκα προσέγγιζαν τα 160 MW.

**Πίνακας 2.1:** Παράκτια αιολικά ενεργειακά προγράμματα, πίνακας βασισμένος στην αναφορά [9]

Τοποθεσία	Χώρα	Έτος έναρξης	MW	Μονάδες	Κατάταξη
Vindeby	Δανία	1991	4,95	11	Bonus 450 KW
Lely (Ijsselmeer)	Ολλανδία	1994	2	4	NedWind 500 KW
Tuno Knob	Δανία	1995	5	10	Vestas 500 KW
Dronten (Ijsselmeer)	Ολλανδία	1996	11,4	19	Nordtank 600 KW
Gotland (Bockstigen)	Σουηδία	1997	2,5	5	Wind World 500 KW
Blyth Offshore	Μ.Βρετανία	2000	3,8	2	Vestas 2 MW
Middelgruden	Δανία	2001	40	20	Bonus 2 MW
Uttgruden, Kalmar Sound	Σουηδία	2001	10,5	7	GE Wind 1,5 MW

<b>Yttre Stengrud</b>	Σουηδία	2001	10	5	NEG Micon NM72
<b>Horns Rev</b>	Δανία	2002	160	80	Vests 2 MW
<b>Frederikhaven</b>	Δανία	2003	10,6	4	2 Vestas 3 MW, 1 Bonus 2,3 MW and 1 Nordex 2,3 MW
<b>Samsø</b>	Δανία	2003	23	10	Bonus 2,3 MW
<b>North Hoyle</b>	Μ.Βρετανία	2003	60	30	Vestas 2 MW
<b>Nysted</b>	Δανία	2004	158	72	Bonus 2,3 MW
<b>Arklow Bank</b>	Ιρλανδία	2004	25,2	7	GE 3,6 MW
<b>Scroby Sands</b>	Μ.Βρετανία	2004	60	30	Vestas 2 MW
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>			<b>587</b>	<b>316</b>	

Όπως φαίνεται στον **πίνακα 2.1** η αιολική βιομηχανία καθώς κινείται προς το θαλάσσιο περιβάλλον, εισάγει μεγαλύτερα και αποδοτικότερα πρότυπα ανεμογεννητριών. Ειδικά συγκρίνοντας τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις με τις επερχόμενες, διαφαίνεται μια μεγάλη αύξηση στην ισχύ και το μέγεθος των αιολικών πάρκων. Στον **πίνακα 2.2** παρατίθενται μερικά από τα σημαντικότερα μελλοντικά παράκτια αιολικά πάρκα σύμφωνα με το έτος εγκατάστασής τους.

**Πίνακας 2.2:** Μελλοντικά παράκτια προγράμματα αιολικής ενέργειας, πίνακας βασισμένος στις αναφορές [9, 10, 11, 12]

Τοποθεσία	Χώρα	Έτος εγκατάστασης	MW	Μονάδες	Κατάσταση
<b>Alpha Ventus</b>	Γερμανία	2008	60	12	Εγκριμένο
<b>Butendiek</b>	Γερμανία		240	80	Εγκριμένο
<b>Sky 2000</b>	Γερμανία		100		Προγραμματισμένο
<b>Skottarevet</b>	Σουηδία	2008	150		Προγραμματισμένο
<b>Lynn Dowsing</b>	Μ.Βρετανία	2008		30	Εγκριμένο

<b>Trolleboda</b>	Σουηδία	2009	150		Προγραμματισμένο
<b>Shell Flat</b>	Μ.Βρετανία	2009		90	Προγραμματισμένο
<b>Kriegers Flak</b>	Σουηδία	2010	640		Προγραμματισμένο
<b>Stora Middlegrund</b>	Σουηδία	2010	860		Προγραμματισμένο
<b>Solway Firth</b>	Μ.Βρετανία			60	Εγκεκριμένο
<b>Docking Schoal</b>	Μ.Βρετανία		500		Προγραμματισμένο
<b>Race Bank</b>	Μ.Βρετανία		500		Προγραμματισμένο
<b>Sheringham</b>	Μ.Βρετανία		315		Προγραμματισμένο
<b>Humber</b>	Μ.Βρετανία		300		Προγραμματισμένο
<b>Triton Knoll</b>	Μ.Βρετανία		1200		Προγραμματισμένο
<b>London Array</b>	Μ.Βρετανία		1000		Προγραμματισμένο
<b>Gwint Mor</b>	Μ.Βρετανία		750		Προγραμματισμένο

## 2.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκε το φαινόμενο της τεράστια αύξησης της παραγωγής αιολικής ενέργειας κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών ειδικά στην Ευρώπη. Επιπλέον εστιάσαμε στην παράκτια αγορά αιολικής ενέργειας και παρουσιάσαμε τα σημαντικότερα σε λειτουργία αλλά και επερχόμενα προγράμματα. Τέλος προβλέψαμε και αναλύσαμε τους λόγους για τη μετατόπιση της αιολικής βιομηχανίας προς τη θάλασσα.

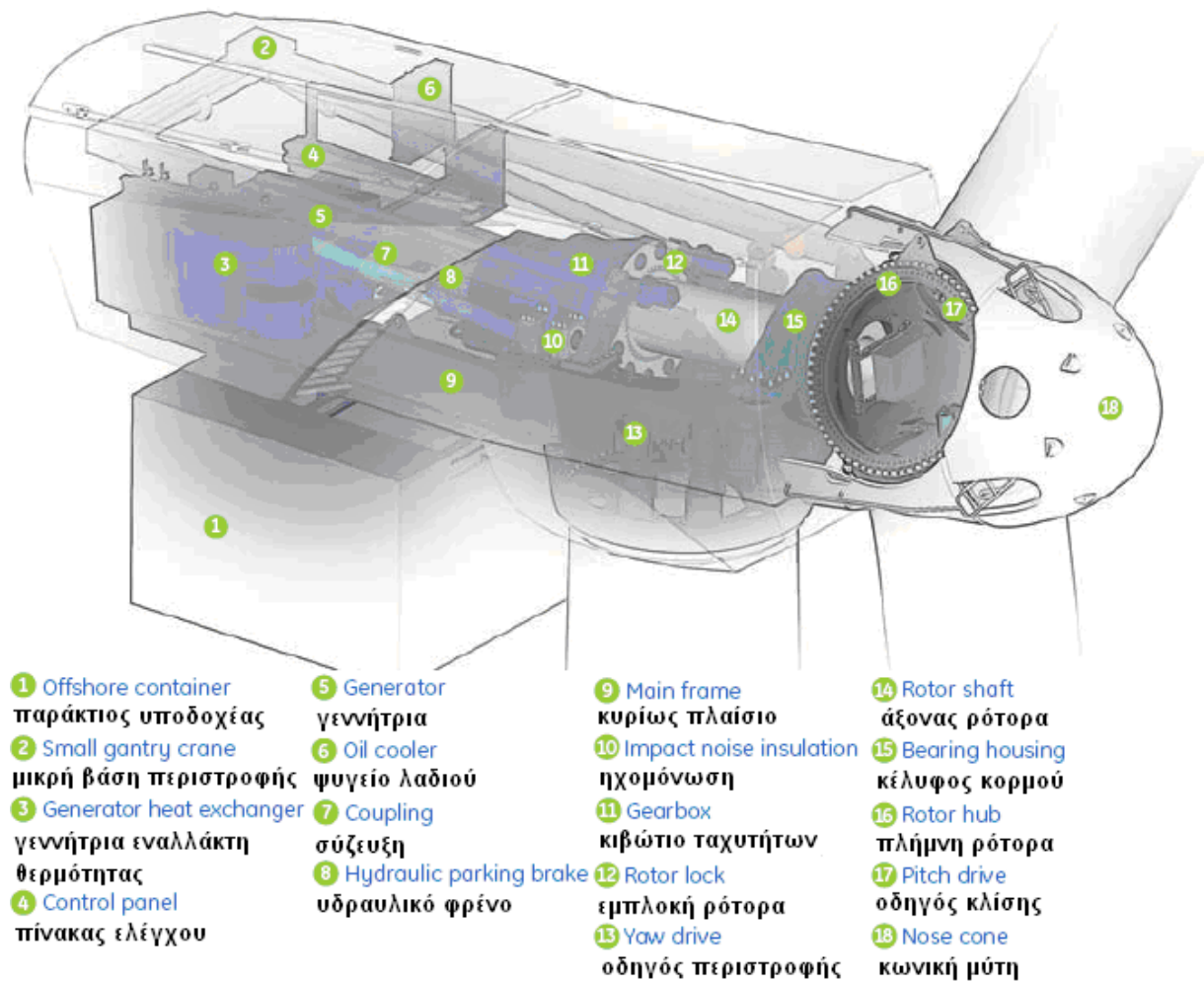
## 3. ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα προσδιοριστούν τα βασικά μέρη των ανεμογεννητριών. Θα γίνει επιπλέον μια λεπτομερής ανάλυση των διαθέσιμων πρότυπων λειτουργίας των παράκτιων ανεμογεννητριών. Θα προσδιοριστούν οι βασικές επιλογές και τα πλεονεκτήματα αυτών όσον αφορά τη σύνδεση με το δίκτυο διανομής και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας και στο τέλος θα αναλυθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα όλων των πρότυπων λειτουργίας.

### 3.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

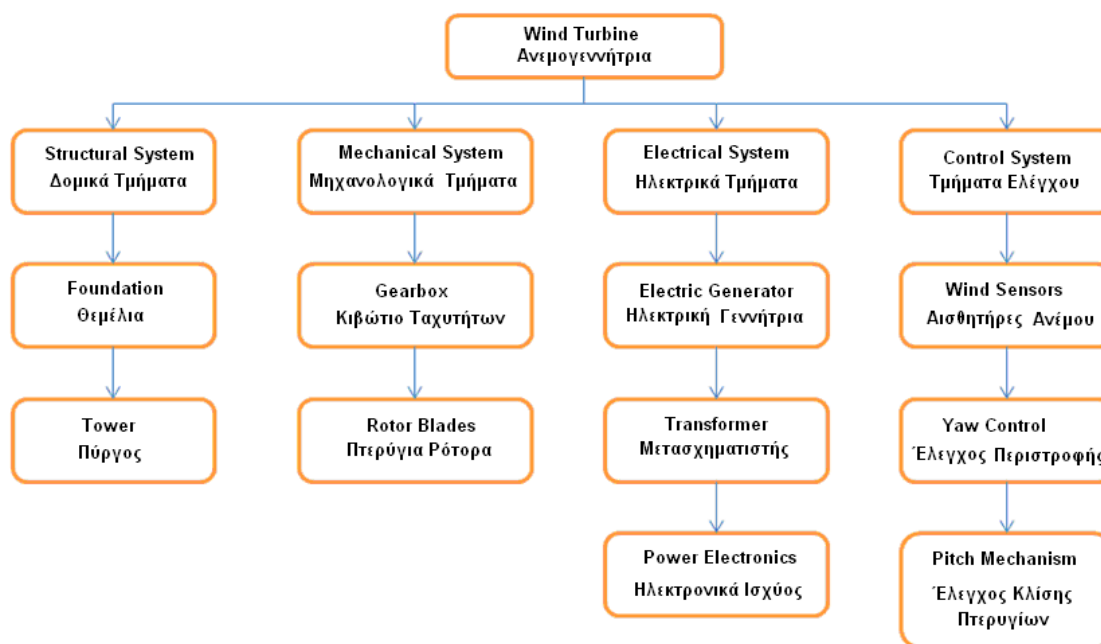
Ο σκοπός των ανεμογεννητριών είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Εντούτοις η διαδικασία αυτή απαιτεί την συνδυασμένη λειτουργία ηλεκτρικών, μηχανολογικών και ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου. Στο ακόλουθο **σχήμα 3.1** φαίνεται μια γραφική αντιπροσώπευση μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας.<sup>14</sup>



**Σχήμα 3.1:** Γραφική απεικόνιση μιας ανεμογεννήτριας και των εξαρτημάτων της, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [14]

Όπως μπορεί να γίνει κατανοητό τα εξαρτήματα που αναφέρονται παραπάνω αντιπροσωπεύουν μια συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια. Εντούτοις είναι σημαντική μια γενική κατανόηση των εξαρτημάτων που συνθέτουν την ανεμογεννήτρια. Για αυτόν τον λόγο παρουσιάζεται ένα διάγραμμα δομής που επεξηγεί αυτά τα συστήματα και σχετίζει την αγγλική και κατ' επέκταση διεθνή ορολογία με την ελληνική ορολογία στο **σχήμα 3.2.**

## Διάγραμμα δομής της ανεμογεννήτριας



**Σχήμα 3.2:** Διάγραμμα της δομής της ανεμογεννήτριας, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [2]

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα δομής της, η ανεμογεννήτρια μπορεί να διαιρεθεί σε τέσσερις σημαντικές περιοχές, το ηλεκτρικό σύστημα, το μηχανολογικό σύστημα, το σύστημα ηλεκτρονικού ελέγχου και το δομικό σύστημα. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες που κυκλοφορούν στην αγορά περιέχουν πολλαπλάσια καινοτόμα πρότυπα λειτουργίας με προέλευση τις ηλεκτρικές γεννήτριες αλλά και τα ηλεκτρονικά ισχύος.<sup>2</sup> Το κύριο ενδιαφέρον αυτής της έρευνας στρέφεται στα ηλεκτρικά και τα συστήματα ελέγχου της ανεμογεννήτριας και στην έννοια της μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, τομείς που αποτελούν την Αχίλλειο πτέρνα όσον αφορά την αξιοπιστία των ανεμογεννητριών. Κατά συνέπεια θα ακολουθήσει στις επόμενες παραγράφους μια βαθύτερη ανάλυση αυτών των συστημάτων.

### 3.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Η ανάγκη να ελεγχθούν οι αεροδυναμικές δυνάμεις στο ρότορα της γεννήτριας για να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα και να προστατευτεί η ανεμογεννήτρια στις

ακραίες καιρικές συνθήκες, έχει αναγκάσει τη βιομηχανία να τις εξοπλίσει με διάφορα συστήματα αυτόματου ελέγχου. Αυτή τη στιγμή στην αγορά μπορούν να βρεθούν τρεις τύποι αυτών των συστημάτων όσον αφορά το είδος αεροδυναμικού ελέγχου που παράσχουν. Ανεμογεννήτρια με έλεγχο του βήματος του έλικα (κλίση του έλικα, 'pitch control'), ανεμογεννήτρια με έλεγχο της απώλειας στήριξης στην πτέρυγα (έλεγχος αεροδυναμικής ανύψωσης, 'stall control') και ανεμογεννήτρια ενεργού ελέγχου της απώλειας στήριξης στην πτέρυγα (ενεργού αεροδυναμικού ελέγχου, 'active stall control')<sup>1</sup>

### **3.3.1 Έλεγχος της κλίσης του πτερυγίου ('pitch control')**

Η βασική έννοια του ελέγχου βήματος του έλικα στηρίζεται στη δυνατότητα να περιστρέφονται οι λεπίδες του ρότορα γύρω από τον διαμήκη άξονά τους.<sup>1</sup> Γενικά αυτό έχει δύο σκοπούς σε μια ανεμογεννήτρια. Αφενός με τη ρύθμιση της γωνίας του βήματος των λεπίδων, επιτυγχάνεται ο έλεγχος της δύναμης και της ταχύτητας του ρότορα και αφετέρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα σύστημα αεροδυναμικού φρεναρίσματος.<sup>1</sup>

Ο βασικός τύπος ελέγχου βήματος του έλικα που χρησιμοποιήθηκε ήταν υδραυλικός, εντούτοις τα τελευταία χρόνια έχουν αντικατασταθεί από ηλεκτρονικά ελεγχόμενες μηχανές πολύ μικρού μεγέθους, που ελέγχουν το βήμα των λεπίδων.<sup>2</sup> Πέρα από τα προφανή πλεονεκτήματα που έχει αυτή η μέθοδος όσον αφορά τον έλεγχο για βέλτιστη δύναμη, εισάγει ανησυχίες σχετικά με υψηλής ισχύος διακυμάνσεις σε δυνατούς ανέμους και έλλειψης αξιοπιστίας λόγω μεγάλης πολυπλοκότητας.<sup>2</sup>

### **3.3.2 Έλεγχος απώλειας στήριξης στην πτέρυγα ('stall control')**

Αυτή η έννοια του μηχανικού ελέγχου απώλειας στήριξης στις λεπίδες είναι η απλούστερη και φτηνότερη από όλες. Οι λεπίδες αμπαρώνονται επάνω στην πλήμνη σε μια σταθερή γωνία και το αεροδυναμικό σχέδιο του ρότορα τον αναγκάζει να ελαχιστοποιήσει την ταχύτητα του, 'να στολάρει', όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει ένα ορισμένο όριο.<sup>2</sup> Προφανώς η χρησιμοποίηση της παθητικής επιλογής

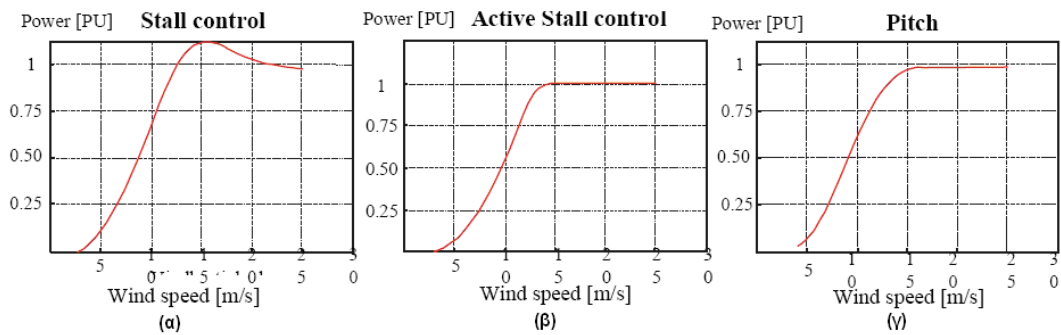


ελέγχου και η απουσία υδραυλικών ή ηλεκτρικών κινήσεων, ηλεκτρονικών ισχύος και ρυθμίσεων ελέγχου της ταχύτητας, είναι χωρίς αμφιβολία μια επιθυμητή απλότητα.<sup>1</sup> Εντούτοις τα προβλήματα που προκύπτουν ιδιαίτερα στις μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι πολύ πιο σοβαρά. Για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκκίνησης ή σταματήματος έκτακτης ανάγκης, είναι αμφισβητήσιμο εάν ένα παθητικό σύστημα λεπίδων είναι μια πρακτική λύση.<sup>1</sup>

### **3.3.3 Ενεργός έλεγχος της απώλειας στήριξης στην πτέρυγα ('active stall control')**

Η τελευταία πιθανή στρατηγική ελέγχου είναι ο ενεργός αεροδυναμικός έλεγχος. Με αυτήν την έννοια ο έλεγχος των λεπίδων γίνεται ενεργά, ελέγχοντας την κλίση των πτερυγίων.<sup>1</sup> Οι βασικές έννοιες της λειτουργίας αυτής της διαδικασίας είναι οι εξής. Στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου οι λεπίδες ελέγχονται όπως με τη διαδικασία ελέγχου του βήματος του έλικα (pitch control) και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνουμε υψηλότερα επίπεδα αποδοτικότητας και στις υψηλές ταχύτητες ανέμου ελαχιστοποιούν καλύτερα την περιστροφική τους ταχύτητα με απώλεια στήριξης ('deep stall') στρέφοντας τις λεπίδες ελαφρώς προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που τη στρέφουν ανεμογεννήτριες με έλεγχο του βήματος του έλικα.<sup>2</sup> Αυτή η μέθοδος ελέγχου δεν παρέχει μόνο υψηλότερη αποδοτικότητα στις χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου από τον απλό έλεγχο της αεροδυναμικής της προηγούμενης παραγράφου αλλά και καθιστά ευκολότερη την εκκίνηση της ανεμογεννήτριας καθώς και την πραγματοποίηση έκτακτης διακοπής της λειτουργίας.<sup>1</sup>

Μια σύγκριση και των τριών μεθόδων ελέγχου μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του ακόλουθου **σχήματος 3.3** όπου παρουσιάζονται οι καμπύλες ισχύος.<sup>15</sup>



**Σχήμα 3.3:** Χαρακτηριστικά ισχύος σταθερών ανεμογεννητριών και ταχύτητας, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [15].

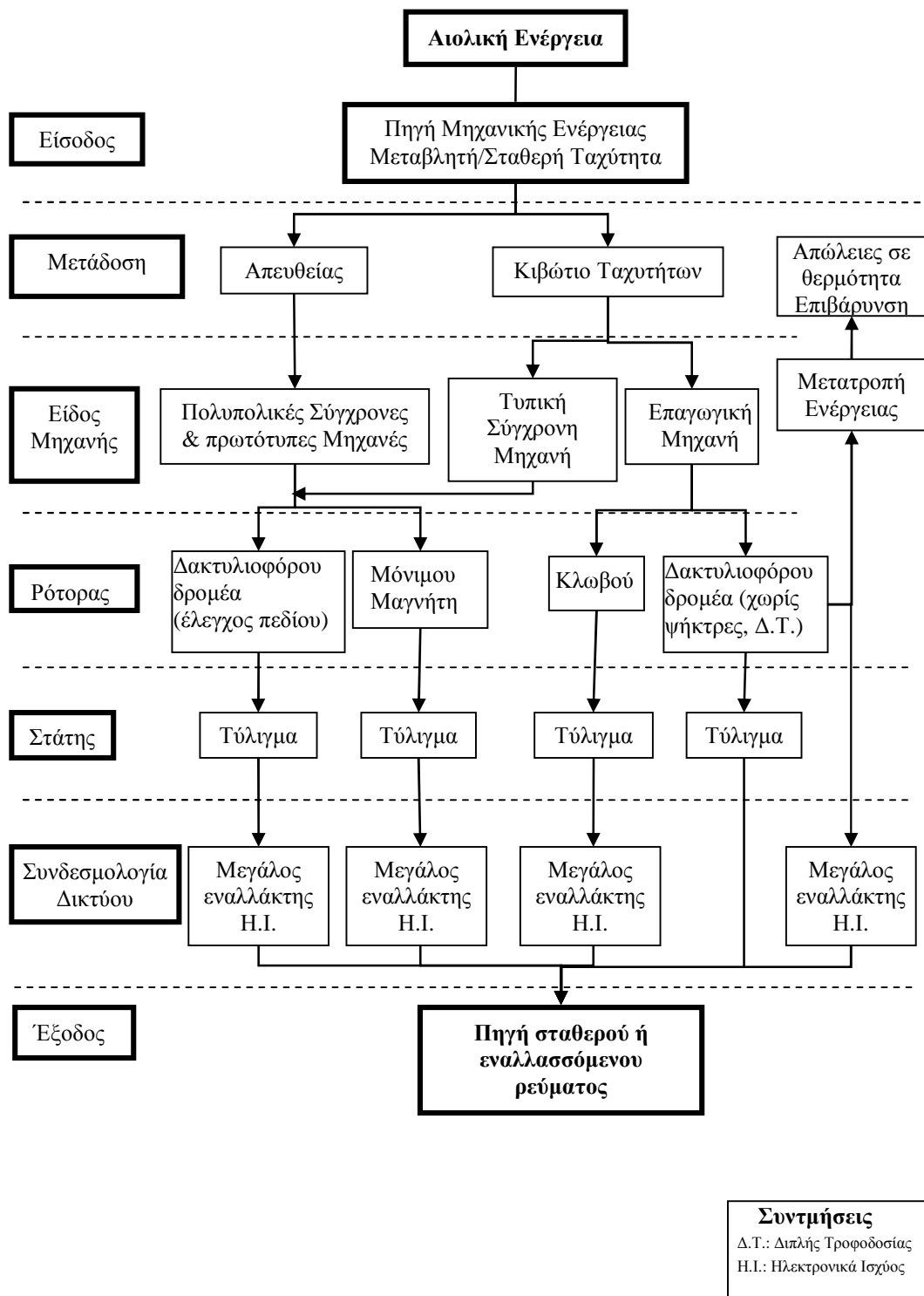
**(α)** έλεγχος της απώλειας στήριξης (stall control), **(β)** ενεργού ελέγχου απώλειας στήριξης (active stall control), **(γ)** ελέγχου της κλίσης των πτερυγίων (pitch control).

Όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.3** και η μέθοδος του ενεργού ελέγχου απώλειας στήριξης ('active stall control') και η μέθοδος του ελέγχου της κλίσης των πτερυγίων ('pitch control') μπορούν να περιορίσουν τη δύναμη ομαλά, ρυθμίζοντας τις λεπίδες. Αντιθέτως όταν χρησιμοποιείται ο μηχανικός έλεγχος της απώλειας στήριξης ('stall control'), εμφανίζεται μια μικρή υπερφόρτωση. Έτσι είναι προφανές ότι η τελευταία μέθοδος ελέγχου δεν είναι η βέλτιστη καθώς και επειδή εξαρτάται ιδιαίτερα από το τελικό αεροδυναμικό σχέδιο των λεπίδων, η υπερφόρτωση ποικίλει με αυτό.<sup>16</sup>

### 3.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Το ηλεκτρικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει όλα τα εκείνα τα εξαρτήματα που απαιτούνται για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική καθώς και τα ηλεκτρικά βοηθήματα.<sup>1</sup> Μετά το μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το ηλεκτρικό σύστημα αποτελεί το δεύτερο ουσιαστικό υποσύστημα σε μια ανεμογεννήτρια. Στο **σχήμα 3.4** έχουμε την γραφική επίδειξη των βασικών βημάτων της διαδικασίας μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, για όλους τους τύπους ανεμογεννητριών.<sup>17</sup>

## Διάγραμμα ροής μετατροπής μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια



**Σχήμα 3.4:** Διαδικασία μετατροπής της μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια στις ανεμογεννήτριες, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [17]

Προκειμένου να κατανοήσουμε πλήρως όλους τους τομείς της λειτουργίας των ανεμογεννητριών που είναι διαθέσιμες στην αγορά, στις επόμενες παραγράφους θα γίνει μια βασική εισαγωγή στις γεννήτριες και στα συστήματα διαχείρισης.

### 3.4.1 Γεννήτριες

Σε γενικές γραμμές μία ανεμογεννήτρια μπορεί να εξοπλιστεί με οποιοδήποτε τύπο γεννήτριας. Σήμερα, με τη χρήση μετατροπών συχνότητας η εγκατάσταση είναι συμβατή με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικού ρεύματος ακόμα κι αν η γεννήτρια παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα μεταβλητής ταχύτητας ή συνεχές ρεύμα.<sup>1</sup> Το πιο σύνηθες είδος εναλλάκτη που χρησιμοποιείται από τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι η ασύγχρονη (επαγωγική) και η σύγχρονη γεννήτρια.<sup>1</sup>

Η **ασύγχρονη γεννήτρια** παραμένει ο ευρύτερα χρησιμοποιημένος τύπος για τις ανεμογεννήτριες.<sup>1</sup> Το χαμηλό κόστος, η υψηλή αξιοπιστία, η μηχανική απλότητα και η δυνατότητα να προσαρμοστεί η ταχύτητα ακόμα και όταν ποικίλλει η ροπή, αποτελούν τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των γεννητριών επαγωγής και οι κύριοι λόγοι που χρησιμοποιούνται ευρέως.<sup>1</sup> Εντούτοις, οι υψηλές ζητήσεις άεργους ισχύος που απαιτούνται από το δίκτυο αναγκάζουν τον συντελεστή ονομαστικής ισχύος να είναι σχετικά χαμηλός.<sup>2</sup> Δύο είδη επαγωγικών μηχανών χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιομηχανία, με δρομέα με δακτύλιο και με δρομέα κλωβού.<sup>1</sup> Επιπλέον ο δρομέας με δακτύλιο είναι απαραίτητος, όταν συνδέεται ένας μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος με το ρότορα, προκειμένου να ελεγχθεί η ολίσθηση.<sup>18</sup>

Οι **σύγχρονες γεννήτριες** αντιθέτως είναι σημαντικά ακριβότερες και μηχανικά πιο περίπλοκες από μια επαγωγική μηχανή παρόμοιου μεγέθους.<sup>1</sup> Εντούτοις, έχει ένα σαφές πλεονέκτημα έναντι της επαγωγικής γεννήτριας, το ότι δεν απαιτεί μαγνητικό ρεύμα άεργου ισχύος, δεδομένου ότι το μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί με τη χρησιμοποίηση των μόνιμων μαγνητών ή με ένα συμβατικό τύλιγμα ισχύος.<sup>2</sup> Επιπλέον οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές άμεσης κίνησης ('direct driven') χωρίς τη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων.<sup>1</sup> Έτσι παρακάμπτεται ένα ιδιαίτερα απαιτητικό τμήμα της ανεμογεννήτριας, με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου επισκευής της.<sup>1</sup>

### 3.4.2 Διατάξεις συστημάτων ανεμογεννητριών

Προκειμένου να αναλύσουμε τα συστήματα των ανεμογεννητριών, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι λειτουργίας αυτών. Οι **σταθερής ταχύτητας ('fixed speed')** και **μεταβαλλόμενης ταχύτητας ('variable speed')**.<sup>1</sup>

**Σταθερής ταχύτητας ('fixed speed')**. Η έννοια της λειτουργίας με σταθερή ταχύτητα εμφανίζεται πρώτη στις αρχές της δεκαετίας του '90.<sup>1</sup> Με αυτόν τον τύπο λειτουργίας η ταχύτητα του ρότορα των ανεμογεννητριών καθορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου διανομής ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου.<sup>2</sup> Έχει ως πλεονέκτημα την αξιοπιστία, την απλότητα και την τεχνολογική ωριμότητα, καθώς χρησιμοποιείται για μεγάλη χρονική περίοδο. Εντούτοις υπάρχουν μερικά μειονεκτήματα όπως οι υψηλές μηχανικές καταπονήσεις, ο περιορισμένος έλεγχος της ισχύος και η ανεξέλεγκτη αντιστάθμιση της άεργου ισχύος, που είναι πολύ σημαντικά.<sup>1</sup> Αυτοί οι περιορισμοί ανάγκασαν τη βιομηχανία να ψάξει για διαφορετικούς τρόπους λειτουργιών για τις ανεμογεννήτριες. Έτσι κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, εμφανίστηκαν οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας.<sup>1</sup>

**Μεταβλητής ταχύτητας ('variable speed')**. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας σχεδιάστηκαν για να επιτύχουν τη μέγιστη αεροδυναμική απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα ανέμων.<sup>1</sup> Η βασική αρχή λειτουργίας αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας είναι η διατήρηση της ροπής της γεννήτριας όσο το δυνατόν πιο σταθερή και τις μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου να τις απορροφά η εναλλαγή της ταχύτητας της γεννήτριας.<sup>2</sup> Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογία είναι πολλά. Όχι μόνο το ποσό ενέργειας που προσλαμβάνεται είναι αυξημένο αλλά και η ποιότητά του είναι αισθητά βελτιωμένα.<sup>1</sup> Τέλος ένα ζωτικής σημασίας πλεονέκτημα αυτού του τύπου λειτουργίας είναι ότι καθιστά τις γεννήτριες σημαντικά πιο αξιόπιστες μηχανικά, με τη μείωση των μηχανικών καταπονήσεων στην ανεμογεννήτρια και με την αφαίρεση των κιβωτίων ταχυτήτων από εκεί που προηγουμένως ήσαν απαραίτητα.<sup>1</sup> Εντούτοις, αυτός ο τύπος λειτουργίας απαιτεί ένα πιο περίπλοκο ηλεκτρικό σύστημα σε σχέση με αυτό μιας γεννήτριας σταθερής ταχύτητας. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερο κόστος και απαιτεί την εξειδικευμένη συντήρηση των ηλεκτρονικών που χρησιμοποιούνται.<sup>1</sup>

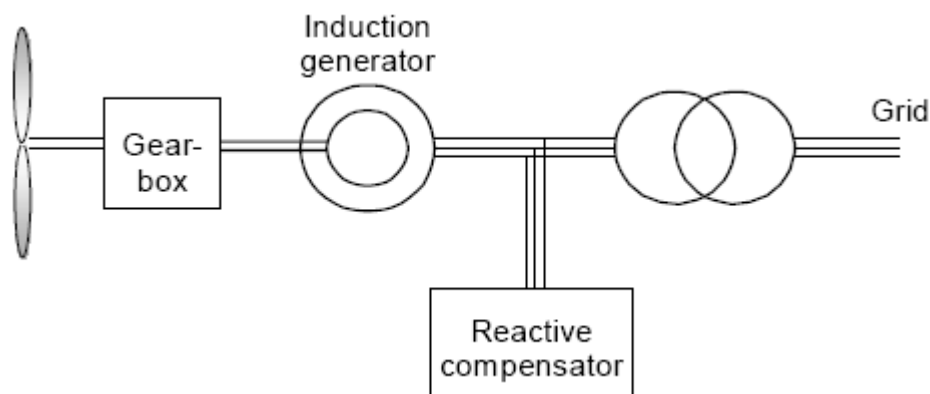
Στις ακόλουθες παραγράφους θα γίνει μια περαιτέρω ανάλυση στους διαθέσιμους τύπους ανεμογεννητριών. Οι παραλλαγές της χρησιμοποιούμενης

τεχνολογίας θα εξαρτηθούν από τις βασικές έννοιες που εισήχθησαν νωρίτερα, δηλαδή της μεταβλητής και σταθερής λειτουργίας ταχύτητας των γεννητριών.

### 3.4.2.1 Τρόποι λειτουργίας ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες διαιρούνται σε τρεις τύπους λειτουργίας, με βάση την έννοια της σταθερής ή της μεταβλητής ταχύτητας. Ο ένας τύπος ανήκει στις σταθερής ταχύτητας ανεμογεννήτριες και οι άλλοι δύο στις μεταβαλλόμενης ταχύτητας.<sup>3</sup> Ακολούθως θα προσδιοριστούν οι ακριβείς προδιαγραφές σχετικά με κάθε τύπο χωριστά.

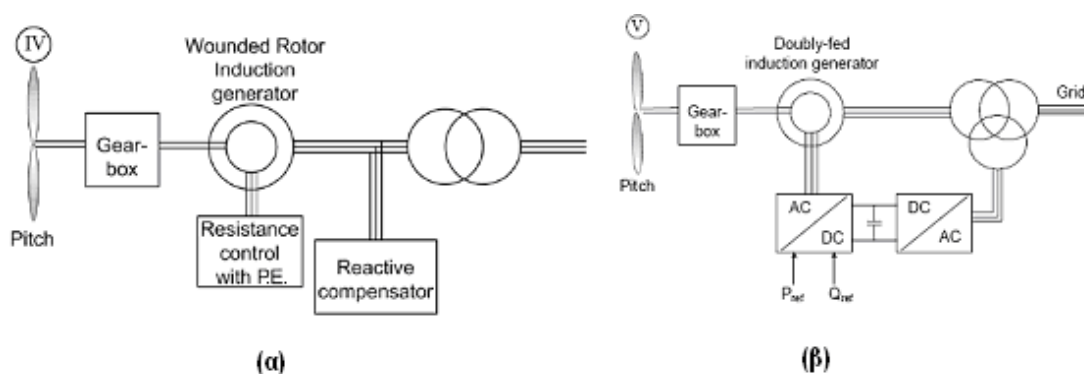
**Τύπος A: Άμεση σύνδεση στο δίκτυο ('direct grid connection') - σταθερής ταχύτητας** Οι περισσότερες από τις εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες, ιδιαίτερα οι μικρότερου μεγέθους, λειτουργούν με βάση την άμεση σύνδεση με το δίκτυο διανομής. Μια επαγωγική γεννήτρια κλωβού ('squirrel cage induction generator') που συνδέεται άμεσα με το δίκτυο διανομής διαμέσου ενός μετασχηματιστή, παρουσιάζεται στο **σχήμα 3.5**.<sup>2</sup> Ένα πολλαπλών επιλογών κιβώτιο ταχυτήτων χρησιμοποιείται για να μεταφέρει την απαραίτητη περιστροφική ταχύτητα στο κινητήρα.<sup>15</sup> Το σύστημα ομαλής εκκίνησης ('soft starter') χρησιμοποιείται για να μειώσει τις ηλεκτρικές καταπονήσεις της εγκατάστασης ('inrush current') και να επιτύχει μια πιο ήπια σύνδεση με το δίκτυο διανομής. Οι πυκνωτές ('capacitor banks') απαιτούνται για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος.<sup>1</sup>



**Σχήμα 3.5:** Επαγωγική γεννήτρια άμεσης σύνδεσης στο δίκτυο διανομής ('Grid') με αντισταθμιστή άεργου ισχύος ('Reactive compensator'), γράφημα βασισμένο στην αναφορά [15]

Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η μηχανική απλότητα και η υψηλή αξιοπιστία. Εντούτοις διάφορα σοβαρά μειονεκτήματα έχουν αναγκάσει τη βιομηχανία να εγκαταλείψει αυτήν την μέθοδο λειτουργίας και να στραφεί προς τις γεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας επιτρέποντας την κατασκευή μεγαλύτερων και αποδοτικότερων ανεμογεννητριών.<sup>1</sup> Τα σημαντικότερα λοιπόν μειονεκτήματα είναι ο περιορισμένος έλεγχος της ταχύτητας και το μικρό εύρος λειτουργίας, πέρα από το οποίο μόνο οι μεταβλητής ταχύτητας γεννήτριες μπορούν να παράγουν έργο.<sup>18</sup> Ένα περαιτέρω μειονέκτημα των γεννητριών σταθερής ταχύτητας, είναι ότι όλες οι διακυμάνσεις του αέρα μετατρέπονται σε ηλεκτρομηχανικές διακυμάνσεις ροπής, που οδηγούν σε υψηλή μηχανική κόπωση και καταπόνηση της γεννήτριας.<sup>18</sup> Τελικά η αεροδυναμική αποδοτικότητα της μηχανής δεν μεγιστοποιείται καθώς η ταχύτητα της ανεμογεννήτριας δεν μπορεί να ρυθμιστεί.<sup>18</sup>

**Τύπος Β: Μεταβλητής ταχύτητας – γεννήτρια περιορισμένου φορτίου με μετατροπέα συχνότητας ('Partial Scale Frequency Converter').** Η συγκεκριμένη γεννήτρια ('Partial Scale Frequency Converter') είναι επίσης γνωστή και ως επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας ('Double Fed').<sup>17</sup> Οι λύσεις που χρησιμοποιούνται για αυτού του τύπου γεννήτριες από την αιολική βιομηχανία, φαίνονται στη γραφική αντιπροσώπευση του **σχήματος 3.6**.<sup>15</sup>



**Σχήμα 3.6:** Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [15]  
**(α)** επαγωγική γεννήτρια με δακτυλιοφόρο δρομέα ('wound rotor Induction generator'), **(β)** γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας ('Doubly-Fed induction generator')

Ο πρώτος τύπος αντιστοιχεί σε ανεμογεννήτρια περιορισμένου φορτίου με επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα και μια πρόσθετη αντίσταση συνδεδεμένη σε αυτό που μπορεί να ελέγχεται με ηλεκτρονικά ισχύος ('Power Electronics').<sup>15</sup> Με αυτήν την διάταξη επιτυγχάνεται διακύμανση της ταχύτητας μεταξύ 2 και 5%. Όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.6(α)** απαιτείται εκκινητής και αντισταθμιστής άεργου ισχύος ('reactive power compensation').

Ο δεύτερος τύπος αντιστοιχεί σε ανεμογεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδοσίας η οποία αποτελείται από μια γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο Εναλλασσόμενου Ρεύματος (EP) και τα τυλίγματα του ρότορα συνδεδεμένα σε μια διάταξη διασύνδεσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος/Συνεχούς Ρεύματος/Εναλλασσόμενου Ρεύματος (EP/ΣΡ/ΕΣ) με μετατροπείς πηγής τάσης **σχήμα 3.6(α)**.<sup>2</sup> Ο όρος 'διπλής τροφοδότησης' αναφέρεται στο γεγονός ότι η τάση στο στάτη εφαρμόζεται από το δίκτυο και η τάση στο ρότορα εφαρμόζεται από το μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική συχνότητα εκχύνοντας στο ρότορα ένα ρεύμα με μεταβλητή συχνότητα. Έτσι, κατά την κανονική λειτουργία αλλά και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, η συμπεριφορά της γεννήτριας ελέγχεται από τον μετατροπέα ισχύος και τους ελεγκτές του.

Η διάταξη των μετατροπέων αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης, ο ένας στην πλευρά του ρότορα και ο άλλος στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι ελέγχονται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Ο μετατροπέας που βρίσκεται στην πλευρά του ρότορα ελέγχει την πραγματική και την άεργο ισχύ ελέγχοντας τις συνιστώσες του ρεύματος του ρότορα, ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση Συνεχούς Ρεύματος (ΣΡ) ώστε η άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο να είναι ίση με μηδέν. Ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας στο σύστημα οδήγησης, η ισχύς τροφοδοτείται στο ρότορα ή απορροφάται από αυτόν. Σε μια υπερ-σύγχρονη κατάσταση λειτουργίας, η ισχύς οδηγείται από το ρότορα μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ στην υπο-σύγχρονη κατάσταση λειτουργίας η κατεύθυνση της ισχύος είναι από το δίκτυο προς το ρότορα. Και στις δύο καταστάσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο.

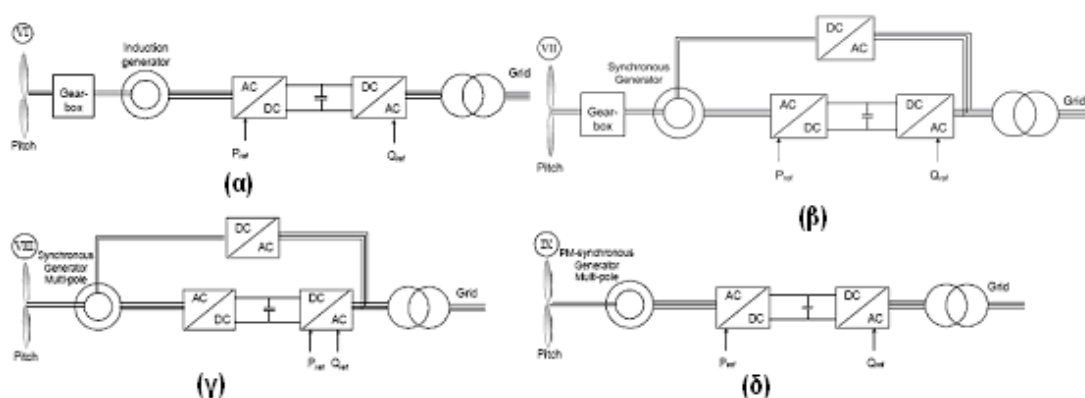
Η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Έχει την ιδιότητα να ελέγχει ανεξάρτητα την πραγματική από την άεργο ισχύ μέσω του ρεύματος στο ρότορα. Δεν είναι αναγκαίο να μαγνητιστεί από το δίκτυο, καθώς μπορεί να μαγνητιστεί και από το δίκτυο του ρότορα. Έχει επίσης την ικανότητα να



παράγει άεργο ισχύ, η οποία τροφοδοτείται στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα που βρίσκεται προς την πλευρά του δικτύου. Παρόλα αυτά αυτός ο μετατροπέας υπό κανονικές συνθήκες λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν εμπλέκεται σε ανταλλαγή άεργου ισχύος ανάμεσα στην ανεμογεννήτρια και το δίκτυο. Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ασθενές με διακυμάνσεις στην τάση, η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παράγει ή να καταναλώνει ένα ποσό άεργου ισχύος με σκοπό τον έλεγχο της τάσης.

Για αυτό λοιπόν σύμφωνα με έρευνα αγοράς του 2002,<sup>15</sup> στη σύγχρονη βιομηχανία χρησιμοποιείται συνήθως ο δεύτερος τρόπος λειτουργίας.

**Τύπος Γ: Μεταβλητής ταχύτητας - Πλήρους φορτίου μετατροπέας συχνοτήτων ('Full Scale Frequency Converter').** Η τελευταία μέθοδος λειτουργίας εφαρμόζεται με τη τοποθέτηση ενός πλήρους φορτίου μετατροπέα συχνοτήτων μεταξύ γεννήτριας και δικτύου διανομής.<sup>1</sup> Με αυτήν την λύση οι δύο γεννήτριες είναι σύγχρονες αλλά και επαγωγικές και μπορεί να επιτευχθεί η μη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων.<sup>15</sup> Στο **σχήμα 3.7** έχουμε την γραφική αντιπροσώπευση της λειτουργίας όλων των διαφορετικών παραλλαγών αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας.<sup>15</sup>



**Σχήμα 3.7:** Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με μετατροπέα συχνότητας πλήρους φορτίου, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [15]

**(α)** επαγωγική γεννήτρια με κιβώτιο ταχυτήτων, **(β)** σύγχρονη γεννήτρια με κιβώτιο ταχυτήτων, **(γ)** ('Multi-Pole') Πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια, **(δ)** ('Multi-Pole') Πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών.

Τα **σχήματα 3.7(α)** και **3.7(β)** αντιπροσωπεύουν τις λύσεις με κιβώτιο ταχυτήτων, στα **σχήματα 3.7(γ)** και **3.7(δ)** παρουσιάζονται τα πολυπολικά συστήματα σύγχρονων γεννητριών χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων. Ο σκοπός του τρίτου

τύπου είναι να εξασφαλίσει ότι η συχνότητα και η ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια, είναι ίδιες με αυτές του δικτύου. Χρησιμοποιώντας αυτή τη διάταξη συγχρονισμού της γεννήτριας με το δίκτυο, επιτυγχάνεται η μέγιστη αποδοτικότητα με την άνευ κιβωτίου ταχυτήτων λειτουργία, μειώνοντας αισθητά τις ανάγκες συντήρησης.<sup>15</sup> Εντούτοις αυξάνεται το κόστος και η πολυπλοκότητα του συστήματος.<sup>1</sup>

### 3.4.3 Ηλεκτρονικά ισχύος στη δομή λειτουργίας των ανεμογεννητριών

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων είκοσι ετών τα ηλεκτρονικά ισχύος ('power electronics') έχουν αλλάξει δραματικά και έχουν εξελιχθεί, χάρη στην εξέλιξη των ημιαγωγών ('semiconductors') και των μικροεπεξεργαστών ('microprocessors').<sup>20</sup> Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα να αποτελούν πλέον μέρος σχεδόν όλων των σύγχρονων ηλεκτρικών συστημάτων.<sup>1</sup> Προφανώς οι ανεμογεννήτριες με τη σειρά τους σήμερα, είναι στενά συνδεδεμένες με τα ηλεκτρονικά ισχύος. Για αυτό τον λόγο θα κάνουμε μια χωριστή έρευνα για όλους διαθέσιμους τύπους της αγοράς.

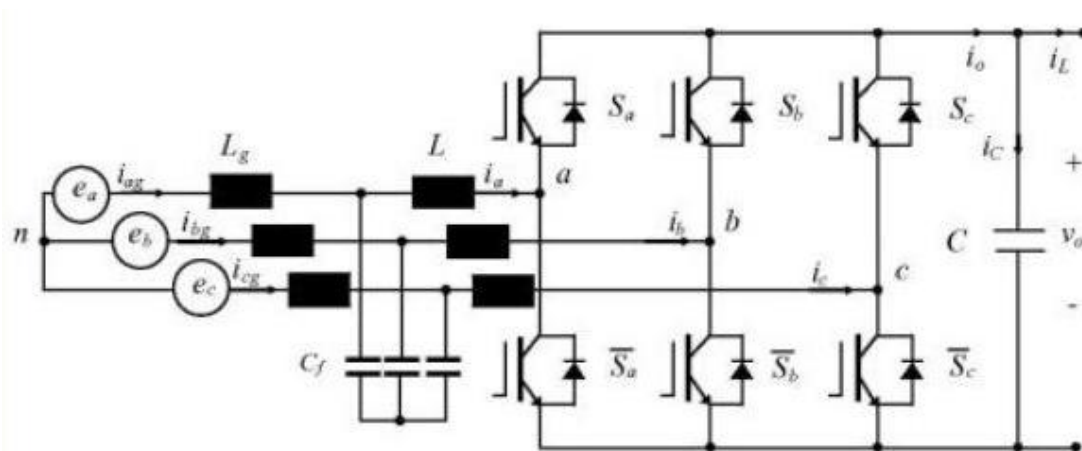
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στη παράγραφο 3.4.2, σχεδόν όλοι οι νέοι τύποι ανεμογεννητριών λειτουργούν με την έννοια της μεταβλητής ταχύτητας, γεγονός που απαιτεί τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος ικανών να ρυθμίζουν τη συχνότητα και την τάση των γεννητριών με αυτές του δικτύου.<sup>2</sup>

Δύο κυρίως τύποι ημιαγωγών ισχύος χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας. Οι δίοδοι ('diodes') και οι ηλεκτρονικοί διακόπτες ('electronic') (συμβατικά και μεταβαλλόμενα θυρίστορ ('conventional and switchable thyristors') και τρανζίστορ ('transistors')).<sup>2</sup> Δίοδοι και θυρίστορ χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για τους ανορθωτές ('rectifiers') και τους μετατροπείς ('converters') των μεταβλητών συστημάτων ταχύτητας κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '80.<sup>2</sup> Εντούτοις τώρα αυτές οι συσκευές έχουν αντικατασταθεί από διακόπτες ηλεκτρονικών ισχύος ('IGBT'), οι οποίοι έχουν διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις διόδους και τα θυρίστορ.<sup>18</sup> Αυτές οι συσκευές είναι ενσωματωμένες στους μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες και ανάλογα με την τοπολογία και την εφαρμογή, μπορούν να επιτρέψουν την αμφίπλευρη ροή του ρεύματος και μπορούν να διασυνδέσουν την γεννήτρια με το δίκτυο διανομής.<sup>20</sup> Δύο κυκλώματα

μετατροπέων χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία ανεμογεννητριών, γραμμικής μεταγωγής ('line commutated') και αυτομεταγωγής ('self commutated').<sup>20</sup>

Τα κυκλώματα γραμμικής μεταγωγής βασίζονται κυρίως στα θυρίστορ έξι ή δώδεκα παλμών.<sup>20</sup> Αυτοί οι τύποι μετατροπέων όμως, έχουν ως μειονέκτημα ότι παράγουν υψηλές διακοπτικές συχνότητες ('high integer harmonics') που απαιτούν φιλτράρισμα.<sup>20</sup> Επιπλέον δεν είναι δυνατός κανένας ενεργός ή και αντιδραστικός έλεγχος της ισχύος.<sup>20</sup>

Απ' την άλλη το κύκλωμα αυτομεταγωγής είναι κυρίως μετατροπέις παλμών διαμορφωμένων κατά εύρος ('pulse width modulated converter', 'PWM'), με 'IGBT'. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των μετατροπέων είναι αφενός η ενεργός και αντιδραστική ικανότητα ελέγχου της ισχύος και αφετέρου η παραγωγή ημιτονοειδών αρμονικών υψηλών συχνοτήτων, που είναι σχετικά ευκολότερο να αφαιρεθούν από φίλτρα μικρού μεγέθους.<sup>20</sup> Στο **σχήμα 3.8** φαίνεται ένας χαρακτηριστικός μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος που αποτελείται από ημιαγωγούς αυτομεταγωγής όπως τα 'IGBT'.<sup>20</sup>

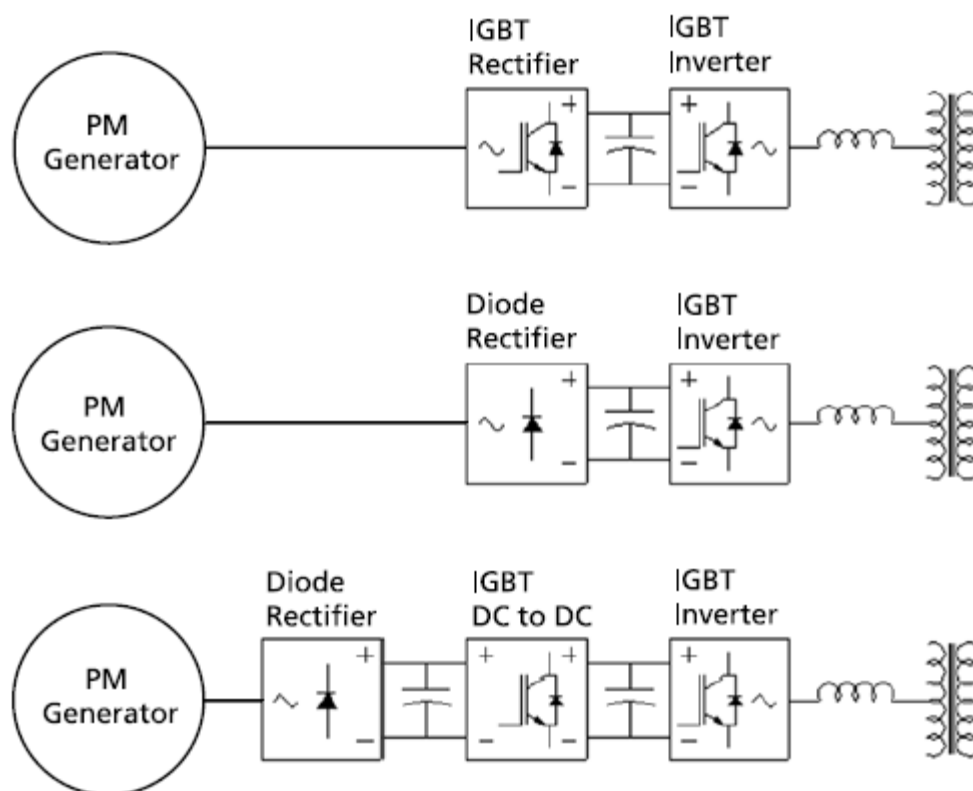


**Σχήμα 3.8:** Διάγραμμα κυκλωμάτων ενός μετατροπέα πηγής τάσης ('VSC') με 'IGBT', γράφημα βασισμένο στην αναφορά [20].

Η σύνδεση των κυκλωμάτων αυτών των μετατροπέων σε ανεμογεννήτριες μεταβαλλόμενης ταχύτητας θα εξηγηθεί στις ακόλουθες παραγράφους.

### 3.4.3.1 Μετατροπές συχνότητας για τη λειτουργία μεταβλητή ταχύτητας

Όταν μία ανεμογεννήτρια συνδέεται άμεσα με το δίκτυο διανομής, η ταχύτητά της καθορίζεται άμεσα από τη συχνότητα του δικτύου. Εντούτοις μπορεί να επιτευχθεί μεταβολή στη ταχύτητα της λειτουργίας εάν παρεμβληθεί ένας μετατροπέας συχνότητας μεταξύ του στάτη ή του ρότορα της γεννήτριας και του δικτύου.<sup>20</sup> Στο ακόλουθο **σχήμα 3.9**, δίνονται διαγράμματα κυκλωμάτων που αντιπροσωπεύουν τις διαφορετικές επιλογές για τους μετατροπείς στις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας που εξοπλίζονται οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών.

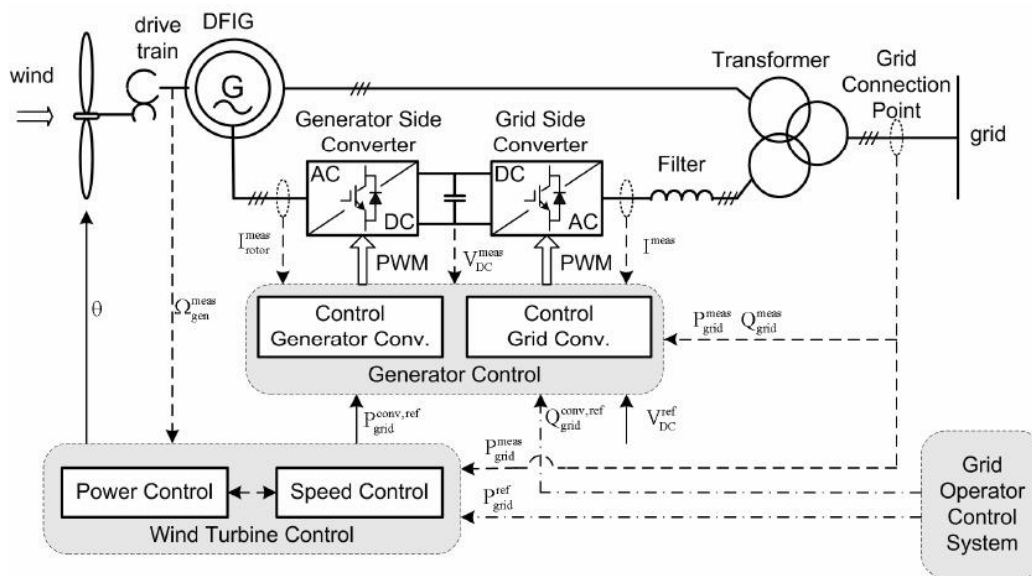


**Σχήμα 3.9:** Ηλεκτρονικά ισχύος ανεμογεννητριών με σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [21]

Όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.9** χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις διαφορετικές μέθοδοι διασύνδεσης του δικτύου διανομής με τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας εφοδιασμένες με πλήρους φορτίου μετατροπέα συχνοτήτων. Εντούτοις σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως μια οικονομικώς πιο αποδοτική λύση,

στην οποία υπάρχουν μερικού φορτίου μετατροπείς συχνοτήτων ('Partial Scale Frequency Converter').<sup>41</sup>

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, στη παράγραφο 3.4.1, αυτή η διάταξη χρησιμοποιεί επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας ('Double Fed') και μερικού φορτίου μετατροπείς συχνοτήτων ('Partial Scale Frequency Converter'), όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.8**, συνδεδεμένο στο ρότορα της γεννήτριας. Στο **σχήμα 3.10** παρουσιάζεται το διάγραμμα των κυκλωμάτων που αντιπροσωπεύει τις συνδέσεις των ηλεκτρονικών ισχύος και το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας.<sup>15</sup>



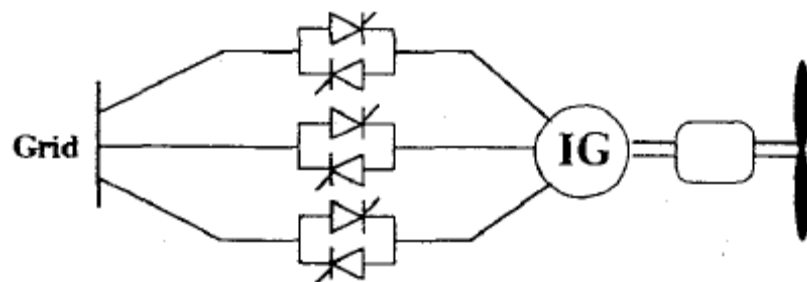
**Σχήμα 3.10:** Ηλεκτρονικά ισχύος ανεμογεννητριών με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας ('Double Fed'), γράφημα βασισμένο στην αναφορά [15]

Εκτός από τους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος που απαιτούνται στις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, στις παλαιότερες σταθερής ταχύτητας ανεμογεννήτριες με επαγωγική γεννήτρια χρησιμοποιήθηκαν στατικοί μετατροπείς.<sup>20</sup> Περαιτέρω ανάλυση αυτού του ηλεκτρονικού συστήματος πραγματοποιείται στις ακόλουθες παραγράφους.

### 3.4.3.2 Στατικοί μετατροπείς (μαλακού εκκινήτη – 'soft starting')

Όπως δηλώνεται στην παράγραφο 3.4.1 οι ανεμογεννήτριες είναι εξοπλισμένες με σύγχρονες ή επαγωγικές γεννήτριες. Στην περίπτωση που λειτουργούν με επαγωγικές γεννήτριες δημιουργείται πρόβλημα διασύνδεσης με το

δίκτυο από την εισροή κυμάτων υψηλής συχνότητας.<sup>20</sup> Αυτά τα ρεύματα απαιτούνται από τη γεννήτρια επαγωγής την περίοδο εκκίνησης και είναι συνήθως πέντε φορές υψηλότερα από τα λειτουργίας.<sup>20</sup> Προφανώς αυτή η κατάσταση είναι ανεπιθύμητη όχι μόνο επειδή μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σταθερότητας στο δίκτυο αλλά και γιατί μπορεί να έχει ως συνέπεια σοβαρούς κλειδονισμούς και πιθανώς ζημία στο κιβώτιο ταχυτήτων.<sup>20</sup> Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιείται ένας στατικός μετατροπέας ('static converter') προκειμένου να συνδέσει την ανεμογεννήτρια με το δίκτυο διανομής, όπως φαίνεται στο **σχήμα 3.11**.<sup>20</sup>



**Σχήμα 3.11:** Διάταξη μαλακού εκκινήτη ανεμογεννήτριας με επαγωγική γεννήτρια, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [20]

Όπως βλέπουμε στο **σχήμα 3.11** αυτός ο μετατροπέας λειτουργεί με τρία ζεύγη ελεγκτών φάσης αντιπαράλληλων θυρίστορ. Αυτή η συσκευή χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τις εφαρμοσμένες τάσεις στο στάτη, στοχεύοντας η ανεμογεννήτρια να επιταχύνει με έλεγχο του βήματος στη σύγχρονη ταχύτητα, μόνο μέσω της αιολικής ενέργειας και έπειτα το ρεύμα να οδηγηθεί στο δίκτυο. Μετά από το συγχρονισμό της ανεμογεννήτριας τα θυρίστορ συνήθως παρακάμπτωνται.<sup>20</sup>

Η ανάγκη χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος στις ανεμογεννήτριες διαφαίνεται από το γεγονός ότι τα σύγχρονα αιολικά πάρκα απαιτείται να έχουν χαρακτηριστικά εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα χρησιμοποιούνται για να εκτελεστεί ο έλεγχος συχνότητας και τάσης, για να ρυθμίσει την ενεργό και άεργο ισχύ και για να αντιδρά γρήγορα στις διάφορες διακυμάνσεις του ρεύματος του συστήματος.<sup>2</sup> Όπως γίνεται αντιληπτό τα ηλεκτρονικά ισχύος θα γίνουν όλο και περισσότερο ελκυστικά στη χρήση τους στις μελλοντικές ανεμογεννήτριες. Στον ακόλουθο **πίνακα 3.1** διατυπώνονται τα βασικά πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρησιμοποίησης ηλεκτρονικών ισχύος.

**Πίνακας 3.1:** Πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρησιμοποίησης ηλεκτρονικών ισχύος στις ανεμογεννήτριες, πίνακας βασισμένος στην αναφορά[2]

	<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
	Βέλτιστη ενεργειακά λειτουργία	Επιπλέον κόστος
<b>Έλεγχος συχνότητας</b>	Ομαλό σύστημα μετάδοσης κίνησης ('Soft drive train')	Επιπλέον απώλειες
<b>Σημαντικές παράμετροι για τις ανεμογεννήτριες</b>	Έλεγχος φόρτισης	
	Επιλογή για μη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων	
	Μείωση θορύβου	
<b>Χαρακτηριστικά Αιολικού Πάρκου</b>	Έλεγχος άεργου ισχύος ('Controllable active and reactive power')	Υψηλές συχνότητες ('High harmonics')
<b>Σημαντικές παράμετροι για το δίκτυο</b>	Τοπική πηγή άεργου ισχύος ('Local reactive power source')	
	Βελτιωμένη σταθερότητα δικτύου	
	Βελτιωμένη ποιότητα ρεύματος	

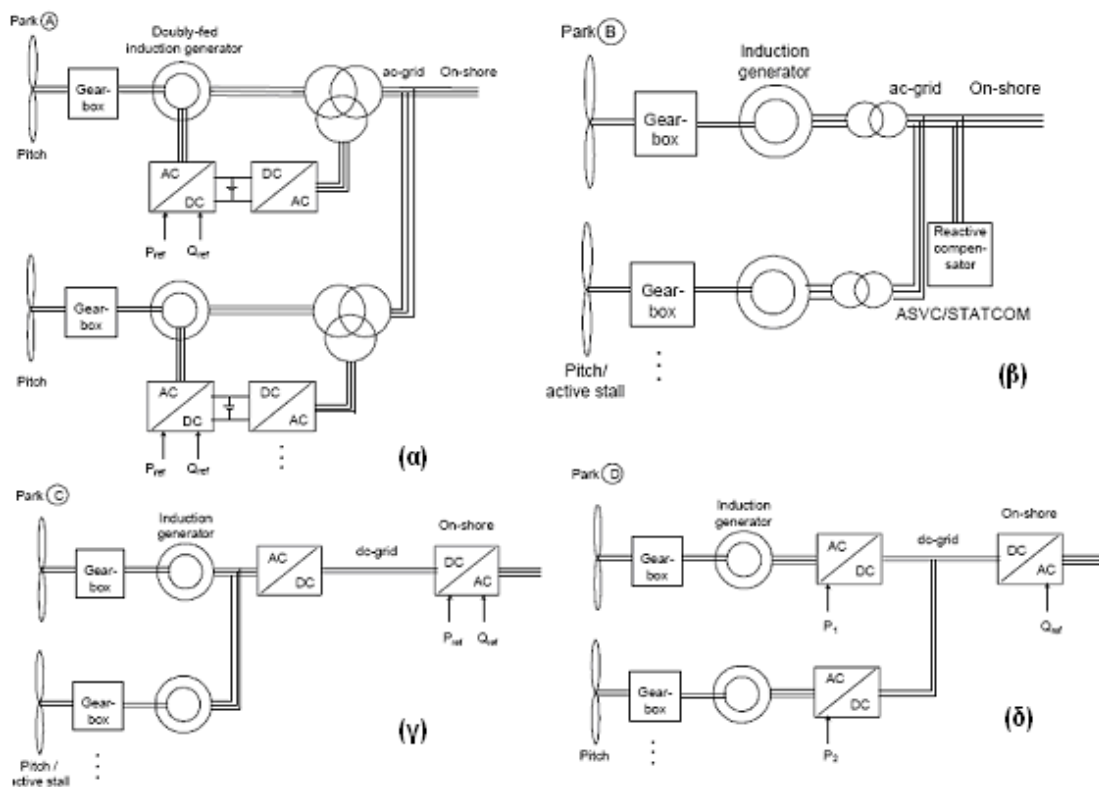
#### 3.4.4 Μεταφορά ενέργειας

Γενικά τα περισσότερα από τα παράκτια αιολικά πάρκα που κατασκευάστηκαν μέχρι σήμερα είναι κοντά στην ακτή (14 χλμ) και με μια μέγιστη εκτιμώμενη ικανότητα των 160 MW. Αυτό θα αλλάξει στο κοντινό μέλλον σύμφωνα με τα δεδομένα του **πίνακα 2.2**. Έτσι η μεταφορά της ενέργειας γίνεται ένα μεγάλο ζήτημα καθώς οι εγκαταστάσεις επεκτείνονται και απομακρύνονται από την ακτή.

Οι απώλειες και ο πλεονασμός ισχύος είναι δύο σημαντικά θέματα που απασχολούν όλο και περισσότερο όσους ασχολούνται με την μεταφορά της ενέργειας από παράκτια αιολικά πάρκα. Οι βασικές επιλογές για τη σύνδεση με το δίκτυο διανομής στην ακτή είναι η εξής:<sup>22</sup>

1. Πολλαπλά υποβρύχια καλώδια 33 KV
2. Απλό υποβρύχιο καλώδιο 132 KV
3. Σύνδεση συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης ('HVDC')

Η πρώτη επιλογή είναι ιδανική για τα μικρής κλίμακας παράκτια αιολικά πάρκα που βρίσκονται μέχρι 20 χλμ από την ακτή και εκτιμώμενη δύναμη μέχρι 200 MW.<sup>22</sup> Οι δύο άλλες επιλογές προορίζονται κυρίως για τα μεγαλύτερα αιολικά πάρκα. Ο δεύτερος τύπος είναι κατάλληλος για τις παράκτιες εγκαταστάσεις με απόσταση μέχρι 25 χλμ και ο τρίτος για αποστάσεις από την ακτή πάνω από 50 χλμ και με επίπεδα ισχύος μεγαλύτερα από 200 MW.<sup>22</sup> Όπως μπορεί να γίνει κατανοητό ο βασικός διαχωρισμός του τρόπου μεταφοράς του ρεύματος είναι με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος ('AC') και με χρήση συνεχούς ρεύματος ('DC'). Μια γραφική αντιπροσώπηση των επιλογών μεταφοράς 2 και 3 για μεγάλα αιολικά πάρκα έχουμε στο **σχήμα 3.12**.<sup>15</sup>



**Σχήμα 3.12:** Διατάξεις επιλογών μεταφοράς ενέργειας, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [15]

(α) 'DFIG' δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, (β) 'IG' δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, (γ) ελεγχόμενης ταχύτητας 'IG' με κοινή 'DC' δίοδο, (δ) ελεγχόμενης ταχύτητας 'IG' με κοινό δίκτυο 'AC' και 'DC' μετάδοση



Το **σχήμα 3.12(α)** αντιπροσωπεύει ένα αιολικό πάρκο που εξοπλίζεται με μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος που μπορούν να αντισταθμίσουν την πραγματική και άεργο ισχύ ('active and reactive compensation') και να διαβιβάσουν την ενέργεια στην ακτή μέσω μιας γραμμής εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτή η διάταξη είναι σε λειτουργία στη Δανία σε ένα παράκτιο αιολικό πάρκο της τάξης των 160 MW.<sup>17</sup> Παρόμοια μεταφορά ισχύος παρουσιάζεται στο **σχήμα 3.12(β)**, αλλά η αντιστάθμιση της άεργου ισχύος εδώ γίνεται από πυκνωτές. Και οι δύο αυτές οι επιλογές είναι κατάλληλες για τα αιολικά πάρκα μέσης απόστασης από την ακτή. Για τη διαβίβαση της ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις ενδείκνυνται οι επιλογές (**γ**) και (**δ**) που φαίνονται στο **σχήμα 3.12**.

Με την πρώτη διάταξη η χαμηλή ή η μέση τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος στο αιολικό πάρκο, μετατρέπεται σε μια υψηλή συνεχής τάση και μεταφέρεται στο χερσαίο σύστημα όπου η συνεχής τάση μετατρέπεται πάλι σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Με τη δεύτερη επιτυγχάνεται μια πιο ευέλικτη λύση, όπου κάθε ανεμογεννήτρια είναι εξοπλισμένη με έναν μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος έτσι ώστε η κάθε μία ξεχωριστά να μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα με τη βέλτιστη ταχύτητα.<sup>17</sup>

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να συνοψιστούν τα βασικά πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρησιμοποίησης της τεχνολογίας μετάδοσης του ρεύματος, συνεχούς υψηλής τάσης ('HVDC'), σε σχέση με του συμβατικού εναλλασσόμενου ρεύματος, ώστε να είμαστε σε θέση να αποκτήσουμε μια σαφή άποψη των δυσκολιών που έχουν αποτρέψει μέχρι σήμερα την υιοθέτηση αυτής της νέας τεχνολογίας από τα παράκτια αιολικά προγράμματα

#### **3.4.4.1 Πλεονεκτήματα συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης ('HVDC')**

Προφανώς το βασικό πλεονέκτημα της διάταξης συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης, είναι η δυνατότητα της διαβίβασης μεγάλων ποσών ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις και με χαμηλότερες απώλειες από το εναλλασσόμενο ρεύμα ('AC'). Επιπλέον επιτρέπει τη μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ ασυγχρόνιστων συστημάτων διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος. Κατά συνέπεια μπορεί να βοηθήσει στην αύξηση της σταθερότητας του συστήματος.<sup>13</sup>

### 3.4.4.2 Μειονεκτήματα συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης ('HVDC')

Οι απώλειες ισχύος της μετάδοσης συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης προέρχονται από τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιούνται στους στατικούς μετατροπείς ('static inverters'). Έτσι οι απώλειες σε μικρές αποστάσεις στους στατικούς μετατροπείς μπορούν να είναι μεγαλύτερες από ότι στις γραμμές μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος. Επιπλέον το κόστος των ηλεκτρονικών συσκευών που απαιτούνται είναι εξαιρετικά υψηλό και οδηγεί στην ελάχιστη μέχρι τώρα χρήση αυτής της τεχνολογίας και όχι στα παράκτια αιολικά προγράμματα.<sup>13</sup>

Όπως φαίνεται από τη παραπάνω σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών επιλογών μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, καθεμία έχει διαφορετικές ενεργειακές δυνατότητες, μερικές καλύτερες από τις άλλες, εντούτοις γίνεται αντιληπτό ότι η τελική απόφαση βασίζεται στο κόστος, την αξιοπιστία, σε ζητήματα συντήρησης και φυσικά από τον τρόπο σχεδιασμού. Για αυτόν τον λόγο μέχρι σήμερα κανένα αιολικό πάρκο δε λειτουργεί με σύστημα μετάδοσης συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης.

Συμπερασματικά παρατίθεται ο **πίνακας 3.2** που συγκρίνει τις διαφορετικές τοπολογίες της ηλεκτρικής παραγωγής και της μετάδοσης για μεγάλα αιολικά πάρκα, που είναι βασισμένος στα κυκλώματα που παρουσιάστηκαν στο **σχήμα 3.12**.

**Πίνακας 3.2:** Σύγκριση αιολικών πάρκων, πίνακας βασισμένος στην αναφορά[15]

Αιολικά Πάρκα σχήματος 2.12	(α)	(β)	(γ)	(δ)
Ανεξάρτητος έλεγχος ταχύτητας	NAI	OXI	NAI	
Έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος (‘Control active and reactive power’)	NAI	OXI	NAI	NAI
Έλεγχος άεργου ισχύος (‘Control reactive power’)	NAI		NAI	NAI

<b>Ασφάλεια Βραχυκυκλώματος (ενεργός)</b>	ΜΕΡΙΚΩΣ	ΜΕΡΙΚΩΣ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
<b>Ασφάλεια Βραχυκυκλώματος</b>	ΠΡΟΣΦΕΡΕΤΑΙ	ΠΡΟΣΦΕΡΕΤΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ
<b>Έλεγχος εύρους λειτουργίας</b>	10-100 ms	200 ms - 2 s	10-100 ms	10 ms - 10 s
<b>Έλεγχος κυματομορφής ('Stability - function')</b>	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
<b>Ανάγκη ομαλού εκκινήτη</b>	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ
	ΝΑΙ	ΜΕΡΙΚΩΣ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
<b>Εφεδρικήτητα ('Rolling capacity on grid')</b>	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ
<b>Επένδυση</b>	+	++	+	+
<b>Συντήρηση</b>	+	++	+	+

### 3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αυτό το κεφάλαιο αφιερώθηκε στην κατανόηση των βασικών συστημάτων που συνθέτουν μία σύγχρονη ανεμογεννήτρια. Έγινε μια βαθύτερη ανάλυση στα ηλεκτρικά και τα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούν οι περισσότερες ανεμογεννήτριες και αναφέρθηκαν τα είδη γεννητριών και τα ηλεκτρονικά ισχύος τους. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε μια έρευνα στις διαφορετικές έννοιες μεταφοράς της ισχύος που είτε λειτουργούν είτε αναμένονται να λειτουργήσουν στο κοντινό μέλλον για τα παράκτια προγράμματα παραγωγής αιολικής ενέργειας και παρουσιάστηκαν τα βασικά πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους.

## **4. ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση και ανάλυση των στοιχείων αξιοπιστίας των χερσαίων αιολικών πάρκων σε διάφορες χώρες. Επιπλέον θα εξεταστούν διάφοροι τεχνολογικοί σχεδιασμοί ηλεκτρικών και συστημάτων ελέγχου, με γνώμονα τα επίπεδα αξιοπιστίας τους και τις σημαντικότερες διαφορές που εμφανίζονται μεταξύ τους. Τέλος θα κάνουμε μια χωριστή έρευνα στις διαφορές που εμφανίζονται στα αποτελέσματα κάθε χώρας και στα αίτια αυτών των διαφορών αυτών.

### **4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ**

Η διερεύνηση των επιπέδων αξιοπιστίας και της δυνατότητας πρόσβασης των ανεμογεννητριών μπορεί να γίνει μια πολύ περίπλοκη και δύσκολη διαδικασία. Πρέπει να συγκεντρωθούν μεγάλα ποσά στοιχείων σχετικά με το ποσοστό αποτυχίας (βλάβες), για όλα τα συστήματα που χρησιμοποιούνται από τις ανεμογεννήτριες, να αναλυθούν και να ταξινομηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να γίνουν κατανοητά και να συγκριθούν το ένα με το άλλο. Έτσι είναι ζωτικής σημασίας να γίνουν κατανοητές οι βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται σε μια στατιστική μελέτη αξιοπιστίας.

#### **4.2.1 Ορισμοί**

Για να κατανοήσουμε πλήρως την στατιστική μελέτη αξιοπιστίας είναι ζωτικής σημασίας να διευκρινιστούν αρχικά διάφοροι όροι που χρησιμοποιούνται συχνά. Εξηγούμε τους σημαντικότερους παρακάτω.

**Αξιοπιστία ('Reliability')** ενός συστήματος είναι η δυνατότητα που έχει να εκτελέσει μια απαιτούμενη εργασία, υπό τους δεδομένους περιβαλλοντικούς και όρους λειτουργίας, για μια δηλωμένη χρονική περίοδο. Επιπλέον συνήθως καθορίζεται μέσα σε ένα δεδομένο ποσοστό χρόνου.<sup>22</sup>

**Διαθεσιμότητα ('Availability')**, είναι η πιθανότητα το σύστημα να λειτουργεί ικανοποιητικά. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ της αξιοπιστίας και της διαθεσιμότητας είναι η στρατηγική 'Λειτουργίας και Συντήρησης' ('Obtain & Maintenance') του συστήματος.<sup>7</sup>

**Συντηρησιμότητα ('Maintainability')**, είναι ένας ποιοτικός όρος που εκφράζει την ευκολία επισκευής. Μπορεί να εκφραστεί σε ώρες που απαιτούνται για να ολοκληρωθεί η επισκευή.<sup>7</sup>

**Χρησιμότητα ('Serviceability')**, εκφράζει με παρόμοιο τρόπο, την ευκολία με την οποία γίνεται η προγραμματισμένη συντήρηση.<sup>7</sup>

**Αποτυχία ('Failure')**, είναι ο τερματισμός της δυνατότητας να εκτελεστεί μια λειτουργία του συστήματος, βλάβη.

**Προσβασιμότητα ('Accessibility')**, εκφράζει τα ποσοστά χρόνου που απαιτούνται για να προσεγγιστεί μια (παράκτια) κατασκευή.

#### **4.2.2 Βασικοί υπολογισμοί ποσοστών ελαττωμάτων**

Τα μαθηματικά πρότυπα που χρησιμοποιούνται για να αναλύσουν το μεγάλο ποσό στοιχείων που ανακτάται από τις διάφορες μελέτες αξιοπιστίας είναι αρκετά. Η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται στην στατιστική μιγαδική ανάλυση ('reliability analysis of complex'), για την επισκευασιμότητα του εξοπλισμού είναι η διαδικασία του νόμου της ισχύος ('Power Law Process').<sup>24, 27, 28</sup>

Η σχέση της έντασης λειτουργίας ή του ποσοστού αποτυχίας λ, δίνεται από τη **σχέση 4.1**.<sup>24, 27</sup>

$$I(t) = \frac{b}{q} \left( \frac{t}{q} \right)^{b-1}, \quad b, q > 0; t \geq 0 \quad (\text{Σχέση 4.1})$$

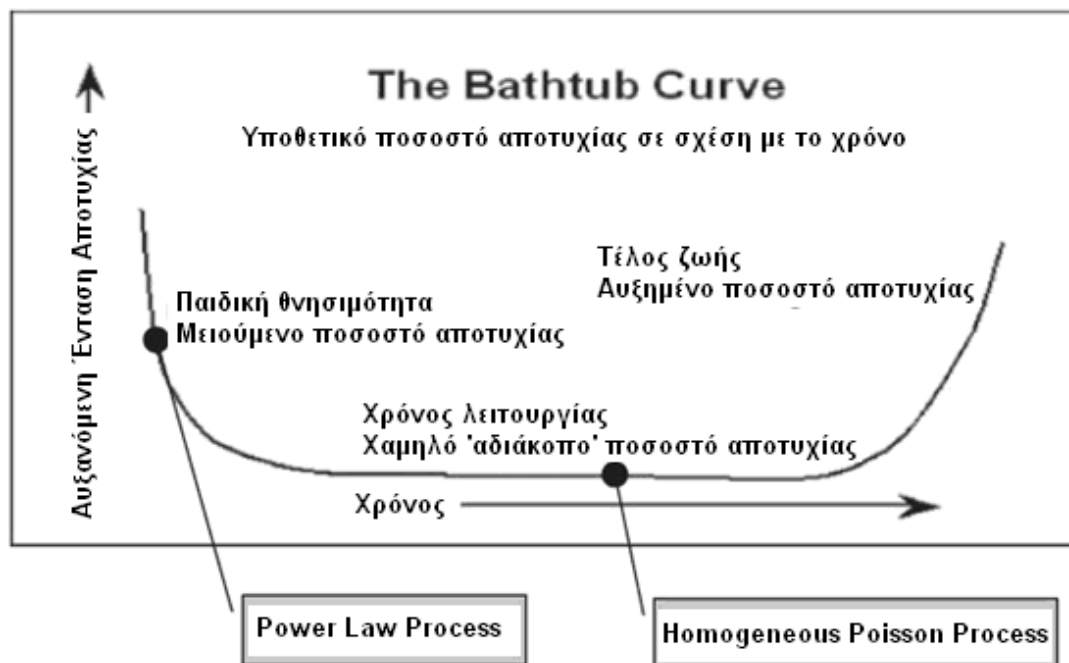
Αυτό επιτρέπει σε ένα ευρύ φάσμα των διαδικασιών αποτυχίας να μοντελοποιηθεί, με βάση την παράμετρο της μορφής ('Shape Parameter') β, και της χρονικής παραμέτρου ('Time Parameter') θ.

• Όταν  $\beta < 1$  η ένταση της αποτυχίας στην **σχέση 4.1** μειώνεται με το χρόνο, ως εκ τούτου η διαδικασία του νόμου της ισχύος ('Power Law Process') περιγράφει την βελτίωση της αξιοπιστίας.<sup>27</sup>

• Όταν  $\beta > 1$  η ένταση αποτυχίας στην **σχέση 4.1** αυξάνεται με το χρόνο, ως εκ τούτου η διαδικασία του νόμου της ισχύος ('Power Law Process') περιγράφει την επιδείνωση της αξιοπιστίας ή τη φθορά.<sup>27</sup>

• Όταν  $\beta = 1$  η διαδικασία του νόμου της ισχύος ('Power Law Process') προσπίπτει σε ομοιογενή διαδικασία 'Poisson' ('Homogeneous Poisson Process'), με σταθερή ένταση  $\lambda = 1/\theta$  οπότε σ' αυτή την περίπτωση το  $\theta$  γίνεται ο Μέσος Χρόνος Μεταξύ Αποτυχιών (ΜΧΜΑ).<sup>27</sup>

Το **σχήμα 4.1** επιδεικνύει μια καμπύλη έντασης αποτυχίας, που αναφέρεται συνήθως ως καμπύλη 'μπανιέρων' ('bathtub curve'), της οποίας οι τρεις περιοχές περιγράφονται από την **σχέση 4.1** με τη χρησιμοποίηση διαφορετικών τιμών για την παράμετρο  $\beta$ .<sup>27</sup>

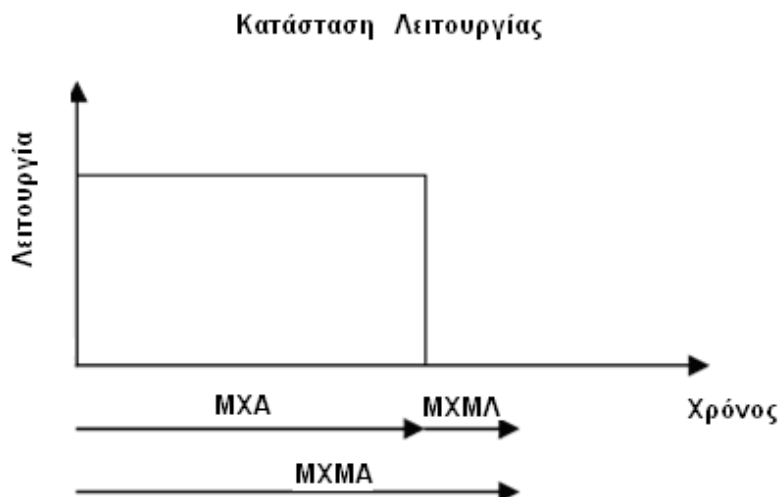


**Σχήμα 4.1:** Καμπύλη 'μπανιέρων' ('bathtub curve') καμπύλη ζωής που περιγράφεται από τη διαδικασία του νόμου της ισχύος ('Power Law Process'), γράφημα βασισμένο στην αναφορά [27]

Όπως μπορεί να φανεί με τη βοήθεια του **σχήματος 4.1**, η διαδικασία του νόμου της ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια των περιόδων όπου τα ποσοστά αποτυχίας αυξάνονται ή μειώνονται με το χρόνο και η ομοιογενής διαδικασία 'Poisson' στη σταθερή περίοδο ποσοστού αποτυχίας.

### 4.2.3 Παρουσίαση της απόδοσης αξιοπιστίας

Προκειμένου να γίνει η παρουσίαση της απόδοσης αξιοπιστίας ενός συστήματος, μπορούν να γίνουν διάφορες προσεγγίσεις ανάλογα με τη περίπτωση. Ο μέσος χρόνος μέχρι την αποτυχία ή ο αριθμός βλαβών ανά μονάδα χρόνου.<sup>22</sup> Στο **σχήμα 4.2** έχουμε μια γραφική αντιπροσώπηση που συνδέει τις διαφορετικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της αξιοπιστίας, ο μέσος χρόνος μεταξύ των αποτυχιών (βλαβών) (ΜΧΜΑ), ο μέσος χρόνος αποτυχίας (βλάβης) (ΜΧΑ) και ο μέσος χρόνος μη λειτουργίας (ΜΧΜΛ).<sup>22</sup>



**Σχήμα 4.2:** Αντιπροσώπηση αξιοπιστίας, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [22]

**Μέσος χρόνος αποτυχίας (ΜΧΑ) ('mean time to failure')**, αντιπροσωπεύει το μέσο χρόνο μεταξύ της αρχικής λειτουργίας και του πρώτου περιστατικού βλάβης ή δεισλειτουργίας.<sup>22</sup>

**Μέσος χρόνος μη λειτουργίας (ΜΧΜΛ) ('mean down time')**, αντιπροσωπεύει το χρόνο που απαιτείται για να ολοκληρωθεί μια επισκευή.<sup>22</sup>

**Μέσος χρόνος μεταξύ των αποτυχιών (ΜΧΜΑ) ('mean time between failures')**, αντιπροσωπεύει το μέσο χρόνο που η συσκευή λειτουργεί κανονικά.<sup>22</sup> Προφανώς γίνεται κατανοητό από το **σχήμα 3.2** ότι ο ΜΧΜΑ αποτελεί τον συνδυασμό των ΜΧΑ και ΜΧΜΛ.

#### 4.2.4 Υπολογισμός της διαθεσιμότητας

Εκτός από την παροχή του βασικού ορισμού της διαθεσιμότητας είναι σημαντικό να καθορισθεί η μαθηματική έκφραση που χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τη διαθεσιμότητα σε μια περιπτώσιακή μελέτη αξιοπιστίας ('reliability case study'). Ο χρησιμοποιούμενος τύπος είναι συνδυασμός των προηγούμενων εκφράσεων και φαίνεται στη **σχέση 4.2**.<sup>22</sup>

$$\text{Διαθεσιμότητα} = \frac{M_{XA}}{M_{XA} + M_{XMA}} = \frac{M_{XA}}{M_{XMA}} \quad (\text{σχέση 4.2})$$

$$M_{XA} = \frac{1}{I}$$

Στη **σχέση 4.2** η διαθεσιμότητα ενός συστήματος περιγράφεται ως η μερίδα του λειτουργικού χρόνου,  $M_{XA}$ , κατά τη διάρκεια μιας ονομαστικής χρονικής περιόδου, σε αυτήν την περίπτωση  $M_{XMA}$ , δεδομένου του ότι ο χρόνος  $t$  τείνει στο άπειρο. Εντούτοις στην διερεύνηση της αξιοπιστίας για την αιολική ενέργεια, εμφανίζονται ελάχιστες διαφορές. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται συνηθέστερα για τη μέτρηση της διαθεσιμότητας εκφράζεται από το ποσό χρόνου πραγματικής λειτουργίας προς τη διάρκεια του ονομαστικού χρόνου λειτουργίας όπως παρουσιάζεται στη **σχέση 4.3**. Αυτός ο τύπος καθορισμού χρησιμοποιείται παραδείγματος χάριν στη Σουηδία.<sup>30</sup>

$$\text{Διαθεσιμότητα} = \frac{\text{Ονομαστικός χρόνος λειτουργίας} - \text{Χρόνος επισκευής της βλάβης}}{\text{Ονομαστικός χρόνος λειτουργίας}} \quad (\text{Σχέση 4.3})$$

Μια επιπλέον έκφραση για την αξιοπιστία που χρησιμοποιείται για τα συστήματα αιολικής ενέργειας παρουσιάζεται στην **σχέση 4.4**. Σε αυτόν τον τύπο οι χρόνοι διακοπής που δεν προκαλούνται από τις εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας



όπως οι εξωτερικές βλάβες του δικτύου διανομής, παραβλέπονται. Αυτός ο τύπος καθορισμού χρησιμοποιείται στη Φιλανδία.<sup>31</sup>

$$\Delta iaq / ta = \frac{\text{Ον.χρ.λειτουργίας} - (\text{Χρ.επισκευής βλάβης} - \text{Χρ.επισκευής εξωτ.βλάβων})}{\text{Ονομαστικός χρόνος λειτουργίας}}$$

**(Σχέση 4.4)**

Τέλος υπάρχει και μια άλλη επιλογή για τον ορισμό της διαθεσιμότητας και σε αυτή ο ονομαστικός χρόνος ενός έτους που χρησιμοποιείται και στις δύο ανωτέρω μεθόδους, αντικαθίσταται με τον πραγματικό διαθέσιμο λειτουργικό χρόνο, όπως όταν φυσά ο αέρας. Εντούτοις αυτή η μέθοδος δεν χρησιμοποιείται στην ακόλουθη μελέτη.<sup>31</sup>

#### **4.3 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΑΠΟΤΥΧΙΑΣ ΤΩΝ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

Σύμφωνα με το στόχο αυτής της μελέτης, το κύριο μέρος είναι αρμόδιο για την έρευνα των επιπέδων αξιοπιστίας των ηλεκτρικών συστημάτων των παράκτιων ανεμογεννητριών.

Εντούτοις βασιζόμενοι στη διαθεσιμότητα των στοιχείων βλαβών που υπάρχουν σήμερα για αυτό το κλάδο ανεμογεννητριών, αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί. Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί περιλαμβάνει τη χρήση των στοιχείων ποσοστών βλαβών των χερσαίων ανεμογεννητριών και με την εφαρμογή μιας γενικής εφαρμογής ποσοστού αποτυχίας σε αυτά τα στοιχεία να γίνει μια πρόβλεψη του ποσοστού αποτυχίας για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες.<sup>28</sup> Η ακριβής διαδικασία που ακολουθείται αναλύεται πλήρως στο τέταρτο κεφάλαιο.

Προφανώς σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να παρουσιάσουμε όλα τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες από τις διάφορες χώρες. Θα κάνουμε μια ανάλυση σχετικά με τις διαφορές τους, ώστε να προσδιοριστούν οι λόγοι ύπαρξης αυτών των βλαβών. Αν θα είναι λόγω τεχνολογικών, κλιματολογικών ή χρονολογικών αιτιών αυτές οι διαφορές.

#### 4.4 ΧΕΡΣΑΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ: ΠΟΣΟΣΤΑ ΑΠΟΤΥΧΙΑΣ

Σε αυτό το τμήμα θα ερευνηθούν τα στοιχεία ποσοστών αποτυχίας τριών σημαντικών παραγωγών αιολικής ενέργειας, της Γερμανίας, της Σουηδίας και της Δανίας. Για να γίνει καλύτερη ανάλυση τα ποσοστά αποτυχίας κάθε χώρας θα παρουσιαστούν χωριστά και θα συγκριθούν στο τέλος.

##### 4.4.1 Γερμανία: ποσοστά αποτυχίας χερσαίων ανεμογεννητριών

Δεδομένου ότι η Γερμανία είναι πρωτοπόρος στη αιολική βιομηχανία, είναι η χώρα με το μεγαλύτερο αριθμό εν ενεργεία ανεμογεννητριών στο κόσμο.<sup>1</sup> Κατά συνέπεια πολλές από τις μελέτες αξιοπιστίας που γίνονται τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούν τις γερμανικές βάσεις δεδομένων ανεμογεννητριών. Πρόσφατα διενεργήθηκαν δύο σημαντικές μελέτες με στόχο να αποκτήσουμε μια πιο λεπτομερή γνώση σχετικά με τις βλάβες των ανεμογεννητριών. Αυτές οι δύο μελέτες καλούνται 'Γερμανικό αιολικό πρόγραμμα των 250 MW' και το πρόγραμμα 'DOWEC'. Και οι δύο αυτές οι μελέτες χρησιμοποιούν τη βάση δεδομένων 'WMEP'. Εντούτοις το πρόγραμμα 'DOWEC' χρησιμοποιεί επίσης και το ενημερωτικό δελτίο 'WindStats' και τις βάσεις δεδομένων 'Landwirt-schaftskammer Schleswig-Holstein'.<sup>23,33</sup> Στον ακόλουθο **πίνακα 4.1**, φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά και των τριών βάσεων δεδομένων.<sup>23,33</sup>

**Πίνακας 4.1:** Στατιστικές προδιαγραφές πηγών δεδομένων για τη Γερμανία, πίνακας βασισμένος στην αναφορά [23,33]

Πηγή δεδομένων	WindStats	LWK	WMEP
Χώρα	Γερμανία	Γερμανία	Γερμανία
Χρονική έκταση στοιχείων	1999-2001	1999-2000	1998-2006
Αριθμός ανεμογεννητριών	2750	510	1435
Εκατοστιαία ποσόστωση μεγάλων ανεμογεννητριών(>500kW)	-	57%	5%

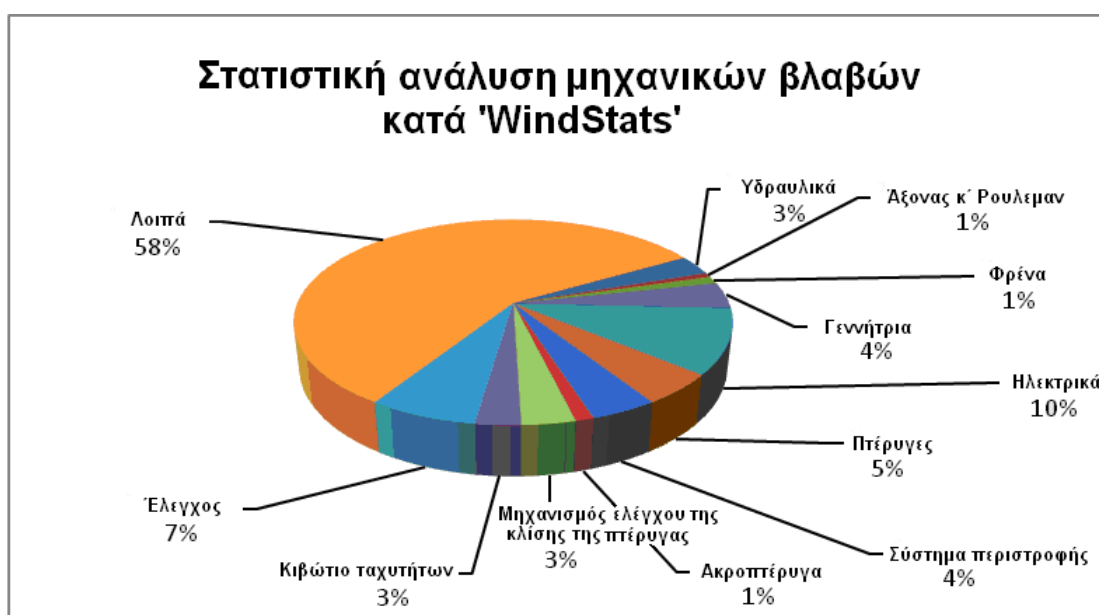
#### 4.4.1.1 Πρόγραμμα 'DOWEC'

Στο πρόγραμμα 'DOWEC' εκτελέστηκε μια βασική ανάλυση αξιοπιστίας, στοχεύοντας όχι μόνο στο να καθορίσει τα επίπεδα αξιοπιστίας γενικά των ανεμογεννητριών αλλά και τη διανομή του ποσοστού των βλαβών στα εξαρτήματα που συνθέτουν την ανεμογεννήτρια, έτσι ώστε να βρεθούν τα πιο προβληματικά. Εντούτοις επειδή σε αυτήν την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές βάσεις δεδομένων, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη κατανόηση, θα κάνουμε διαχωρισμό των αποτελεσμάτων όσον αφορά τη χρησιμοποιούμενη βάση δεδομένων.

#### 4.4.1.2 Βάση δεδομένων 'WindStats'

Τα δεδομένα της βάσης 'WindStats' προέρχονται από έναν σημαντικό μεγάλο αριθμό ανεμογεννητριών στη Γερμανία, 2750 στο σύνολο. Εντούτοις η ακριβής ενεργός ηλικία των γεννητριών που συμμετέχουν στο πρόγραμμα δεν είναι γνωστή.<sup>33</sup>

Αρχικά μια ανάλυση των βλαβών των διάφορων τμημάτων της ανεμογεννήτριας παρέχεται στο **σχήμα 4.3**.<sup>33</sup>



**Σχήμα 3.3:** Κατανομή μηχανικών βλαβών σύμφωνα με τη 'WindStats' για την περίοδο 1999-2001, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [33]

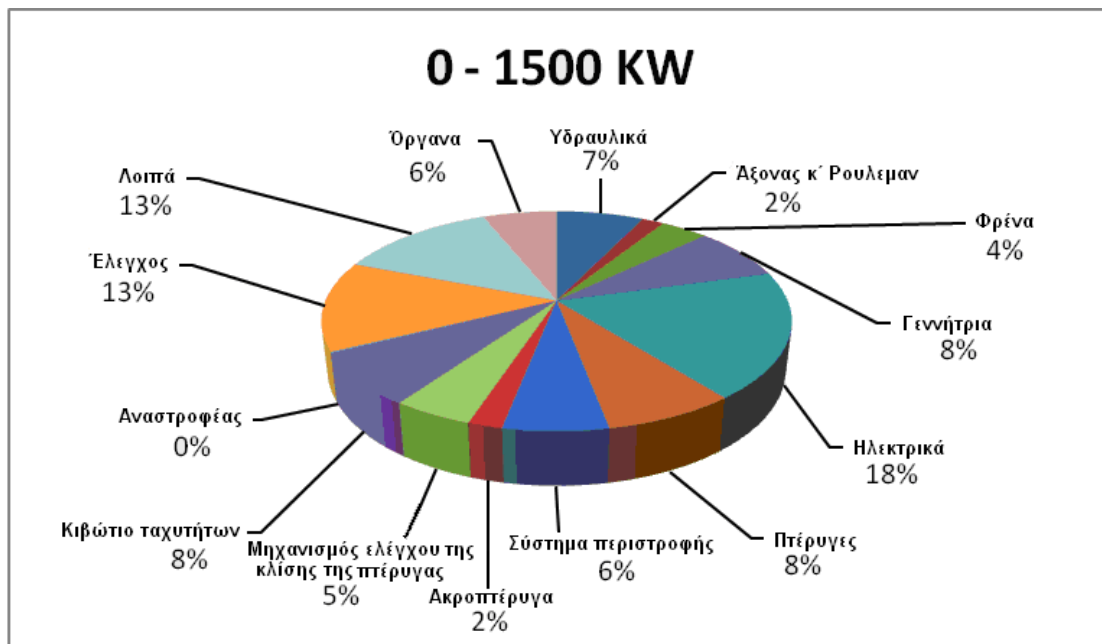
Όπως φαίνεται στο γράφημα, σύμφωνα με την κατανομή του ποσοστού βλαβών, τα περισσότερα προβλήματα αφορούν τα ηλεκτρικά και τα συστήματα ελέγχου. Επιπλέον παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνει η αναφορά 'λοιπά', που αφορά αιτίες που αναφέρθηκαν ως βλάβες χωρίς να αναφερθούν τα ακριβή αίτια.<sup>33</sup> Προφανώς αυτό έχει σοβαρή επίπτωση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά αυτά τα προβλήματα είναι αναπόφευκτα στην ανάλυση αξιοπιστίας και η μόνη λύση είναι η χρήση διαφόρων βάσεων δεδομένων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

#### **4.4.1.3 Βάση δεδομένων 'Landwirt-Schafskammer Schleswig-Holstein' ('LWK')**

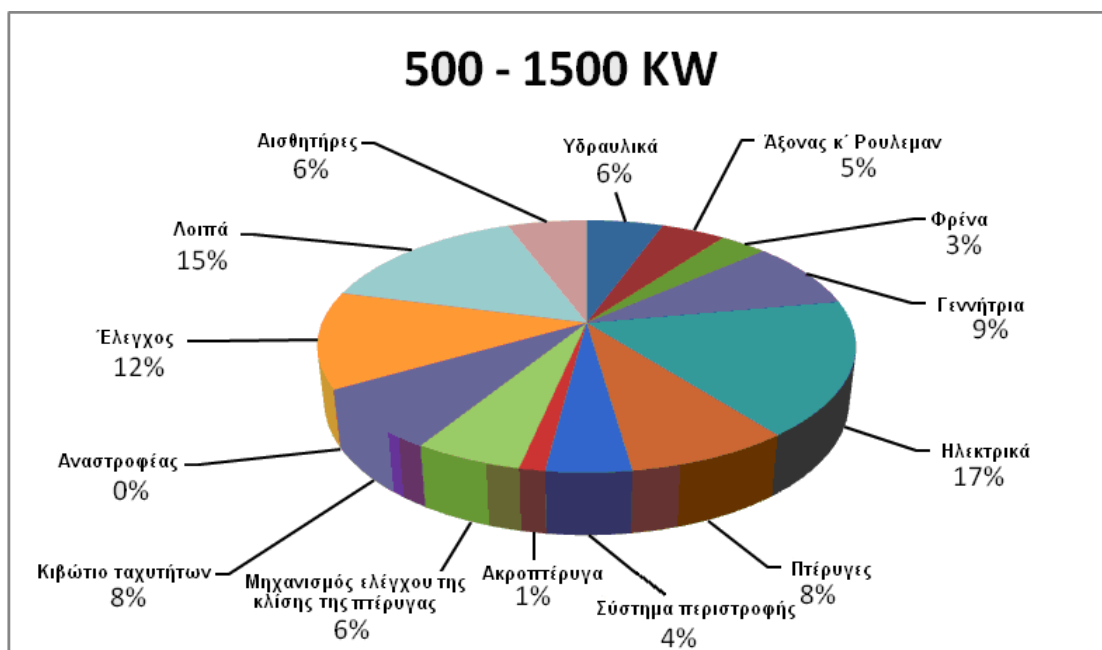
Η βάση δεδομένων 'LWK' ελέγχει τις ανεμογεννήτριες που βρίσκονται στη βόρεια περιοχή της Γερμανίας στην επαρχία 'Schleswig-Holstein'.<sup>33</sup> Αυτήν η βάση δεδομένων παρά το γεγονός ότι απαρτίζεται από ένα σημαντικά λιγότερο αριθμό ανεμογεννητριών σε σχέση με την 'WindStats', έχει ένα βασικό πλεονέκτημα. Αναφέρεται ο τύπος και το μέγεθος και των 510 ανεμογεννητριών που ελέγχονται, έτσι τα στοιχεία μπορούν να αναλυθούν καλύτερα και τα αποτελέσματα μπορούν να είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικά.<sup>33</sup>

Κατά συνέπεια σε αυτό το πρόγραμμα, τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων μπορούν να διαιρεθούν σε δύο ομάδες. Η πρώτη θα συνδυάσει όλες τις ανεμογεννήτριες που συμμετέχουν στο πρόγραμμα και η άλλη θα αφορά μόνο τις μεγάλες ανεμογεννήτριες της τάξεως των 500 έως 1500 KW. Αυτός ο διαχωρισμός έγινε επειδή οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες είναι νεότερες και τα ποσοστά βλαβών είναι πολύ χειρότερα. Επιπλέον είναι ζωτικής σημασίας να αναφερθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος (57%) των ανεμογεννητριών είναι πάνω από 500 KW, πράγμα που μας οδηγεί σε αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια για τη συγκεκριμένη κατηγορία.<sup>33</sup>

Η μέση κατανομή του ποσοστού βλαβών στα τμήματα των ανεμογεννητριών για τα έτη 1999 μέχρι και 2000 φαίνονται στα επόμενα δύο διαγράμματα του **σχήματος 4.4** και του **σχήματος 4.5**.<sup>33</sup>



**Σχήμα 4.4:** Κατανομή μηχανικών βλαβών σύμφωνα με τη 'LWK' βάση δεδομένων για το 1999 - 2000, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [33]

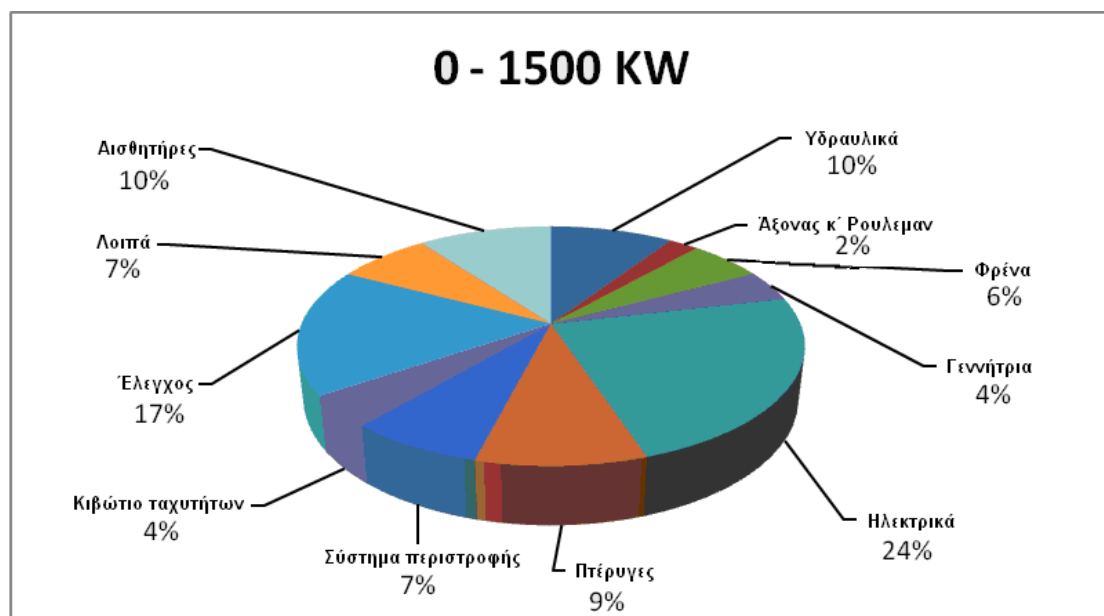


**Σχήμα 4.5:** Κατανομή μηχανικών βλαβών σύμφωνα με τη 'LWK' βάση δεδομένων για το 1999 - 2000, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [33]

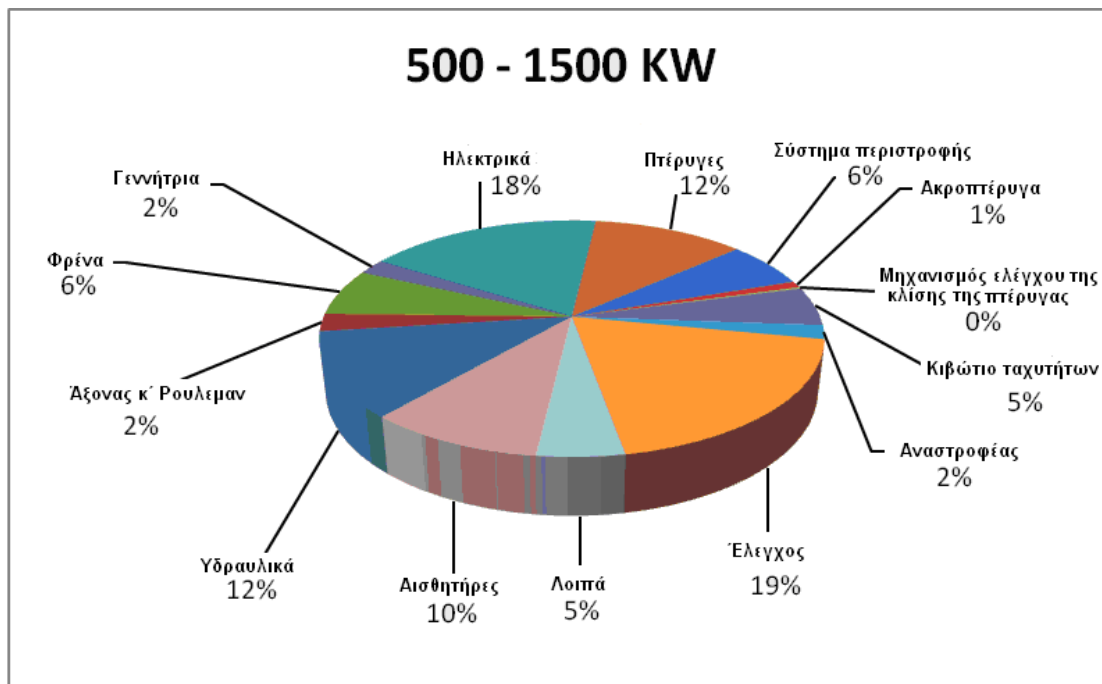
Όπως παρατηρείται στα **σχήματα 4.4** και **4.5** τα ποσοστά βλαβών είναι υψηλότερα για τις μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες. Επιπλέον είναι προφανές ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά αποτυχίας, συσχετίζονται με τα ηλεκτρικά και τα συστήματα ελέγχου όπως είδαμε και από τα στοιχεία της 'WindStats'.

#### 4.4.1.4 Βάση δεδομένων 'WMEP'

Η 'WMEP' είναι η τρίτη βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα 'DOWEC' για να καθοριστούν τα ποσοστά βλαβών των γερμανικών ανεμογεννητριών. Ο αριθμός των ελεγχόμενων ανεμογεννητριών αυτής της βάσης δεδομένων είναι 1435 στο σύνολο. Επιπλέον το κύριο μέρος των δεδομένων (95%) αφορά μικρές ανεμογεννήτριες σε αντίθεση με την βάση δεδομένων 'LWK'.<sup>33</sup> Εντούτοις επειδή και η διαβάθμιση και ο τύπος αναφέρονται αναλυτικά στη βάση δεδομένων, τα αποτελέσματα διαχωρίζονται στις δύο κατηγορίες μεγέθους όπως και προηγουμένως. Το σύνολο των ανεμογεννητριών που συμμετέχουν στη βάση δεδομένων αναλύονται στο **σχήμα 4.6** και αυτές με εκτιμώμενη απόδοση άνω των 500 KW στο **σχήμα 4.7**.<sup>33</sup> Προφανώς εξαιτίας του γεγονότος ότι η πλειοψηφία των ανεμογεννητριών που συμμετέχουν σε αυτή την βάση δεδομένων είναι μικρών διαστάσεων, τα αποτελέσματα σχετικά με τις μεγάλες ανεμογεννήτριες δεν θα πρέπει να αντιμετωπιστούν ως εξαιρετικά αξιόπιστα.

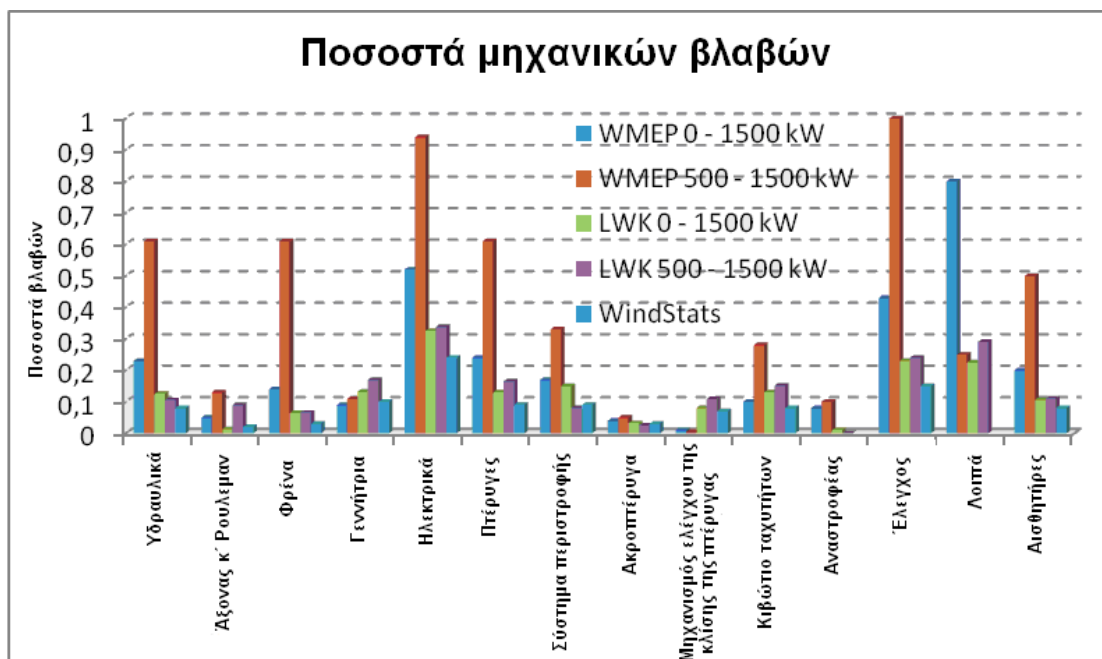


**Σχήμα 4.6:** Κατανομή μηχανικών βλαβών σύμφωνα με τη 'WMEP' βάση δεδομένων για το 1998 - 2000, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [33]



**Σχήμα 4.7:** Κατανομή μηχανικών βλαβών σύμφωνα με τη 'WMEP' βάση δεδομένων για το 1998 - 2000, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [33]

Στη συνέχεια βλέπουμε μια γραφική παράσταση όπου παρέχονται τα αποτελέσματα και των τριών βάσεων δεδομένων προκειμένου να γίνει άμεση σύγκριση. Στο **σχήμα 4.8** λοιπόν φαίνεται η κατανομή του ποσοστού των μηχανικών βλαβών, χωρισμένες ανάλογα με την ισχύ και την βάση δεδομένων από την οποία προέρχονται.



**Σχήμα 4.8:** Συγκεντρική κατανομή μηχανικών βλαβών από όλες τις βάσεις δεδομένων, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [33]

Παρατηρώντας το **σχήμα 4.8** που συνδυάζει τα ποσοστά βλαβών και από τις τρεις βάσεις δεδομένων, δύο βασικά πράγματα μπορούν να γίνουν κατανοητά. Αφενός τα ποσοστά βλαβών των μεγάλων ανεμογεννητριών είναι υψηλότερα σε σχέση με τις μικρότερες. Θα ήταν λογικό να θεωρήσουμε ότι οι νεότερες ανεμογεννήτριες που αποτελούνται από σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα θα είχαν λιγότερες βλάβες. Αυτό δεν συμβαίνει κυρίως λόγω του ότι η νέα τεχνολογία που είναι ενσωματωμένη στις μεγαλύτερες μηχανές, είναι διαφορετική από αυτήν των ανεμογεννητριών με μικρότερη ισχύ και κατά συνέπεια η τεχνολογία αυτή δεν έχει φτάσει σε ένα υψηλό επίπεδο ωριμότητας, τέτοιο ώστε να σταθεροποιήσει και να μειώσει τα ποσοστά βλαβών. Αφετέρου τα περισσότερα ποσοστά βλαβών συσχετίζονται με τα ηλεκτρικά και τα συστήματα ελέγχου, δεδομένου ότι σε όλες τις βάσεις δεδομένων εμφανίζουν ποσοστά της τάξης του 20%. Έτσι είναι προφανές ότι για να επιτευχθεί μια καλύτερη ανάλυση, αυτά τα δύο συμπεράσματα πρέπει να ερευνηθούν πιο αναλυτικά.

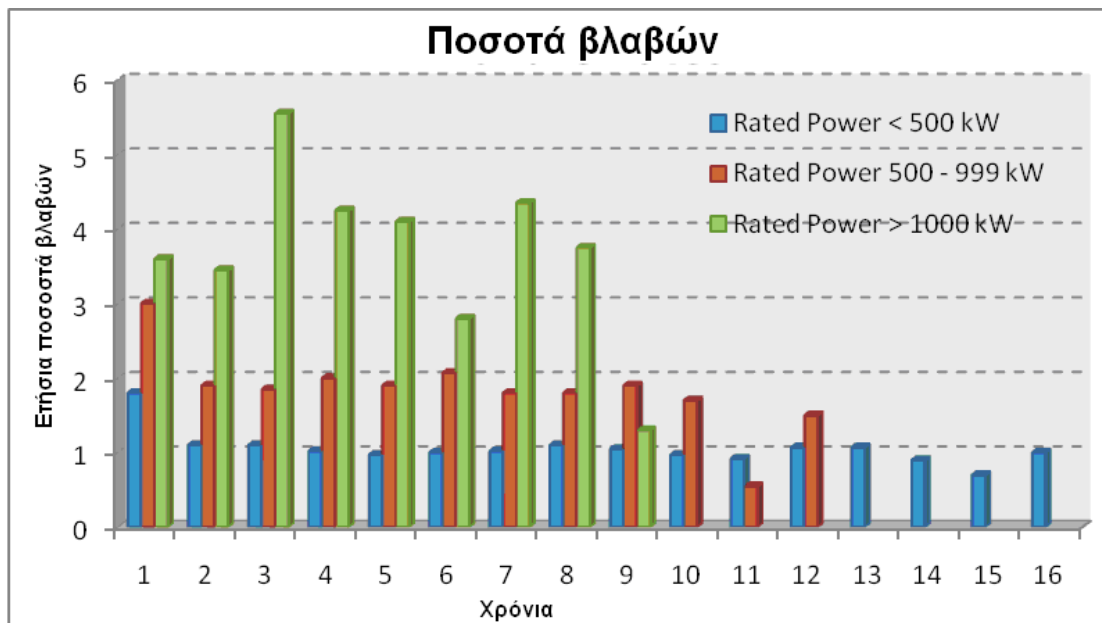
Η επόμενη μελέτη αξιοπιστίας το 'Γερμανικό Αιολικό πρόγραμμα των 250 MW' παρέχει όχι μόνο μια ευρύτερη ανάλυση στη σχέση των ποσοστών βλαβών και της ισχύος αλλά και ερευνά τα ποσοστά βλαβών διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών και συστημάτων ελέγχου που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες.

#### **4.4.1.5 Γερμανικό πρόγραμμα δοκιμής '250 MW Wind'**

Η κύρια βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται σε αυτήν την ανάλυση αξιοπιστίας είναι η 'WMEP' βάση δεδομένων.<sup>23</sup> Εντούτοις σε αντίθεση με τα στοιχεία του προγράμματος 'DOWEC' που χρησιμοποιείται στο 'Γερμανικό Αιολικό πρόγραμμα των 250 MW' περιέχει ένα σημαντικά ευρύτερο φάσμα των ετών (1989 - 2006).<sup>34</sup>

Σύμφωνα με τη βάση δεδομένων του προγράμματος δοκιμών εισάγονται δύο κρίσιμες έννοιες διάκρισης των ανεμογεννητριών που σχετίζονται με την ισχύ τους και τα χρόνια λειτουργίας τους. Έτσι μπορεί να παραχθεί ένας πιο αξιόπιστος συνδυασμός συμπερασμάτων, αναλύοντας τις διαφορετικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε σχέση με τις προαναφερθείσες δύο διακρίσεις. Στο **σχήμα 4.9** παρουσιάζουμε τα ποσοστά βλαβών των ανεμογεννητριών που ταξινομούνται σύμφωνα με την ισχύ τους.<sup>34</sup>





**Σχήμα 4.9:** Ποσοστά βλαβών ανεμογεννητριών ταξινομημένες σύμφωνα με την αποδιδόμενη ισχύ τους, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [34]

Από τα δεδομένα του **σχήματος 4.9** βλέπουμε ότι τα ποσοστά βλαβών των ανεμογεννητριών εξαρτώνται όχι μόνο από το έτος λειτουργίας τους αλλά και από την ισχύ τους. Η ομάδα των ανεμογεννητριών της τάξεως των μεγαβάτ που κυρίως εγκαθίστανται σήμερα και είναι προγραμματισμένες για τα μελλοντικά παράκτια προγράμματα, παρουσιάζει ένα σημαντικά υψηλότερο ποσοστό βλαβών που μειώνεται ελαφρώς καθώς αυξάνουν τα έτη λειτουργίας.<sup>23</sup> Οι κύριοι λόγοι για τα υψηλά αυτά ποσοστά αποτυχίας για τις ανεμογεννήτριες κατηγορίας μεγαβάτ είναι τρεις.

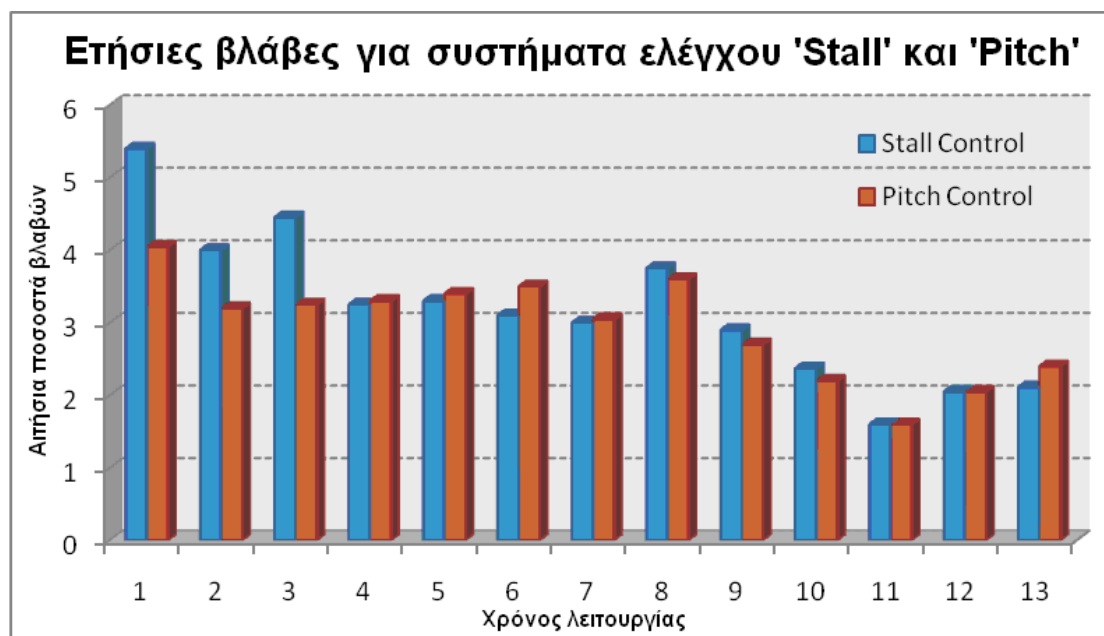
- Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες που συμμετέχουν στο πρόγραμμα προέρχονται κυρίως από τα πρώτα πρότυπα και η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ήταν ακόμα υπό ανάπτυξη και όχι πλήρως δοκιμασμένη.
- Ο αριθμός αυτών των μεγάλων ανεμογεννητριών που συμμετέχουν στο πρόγραμμα είναι πολύ περιορισμένος σε σχέση με τις μικρές.<sup>23</sup>
- Ο μικρός λειτουργικός τους χρόνος τις κατατάσσει στον τομέα των πρώιμων βλαβών στη γραφική παράσταση 'μπανιέρα'.<sup>23</sup>

Εντούτοις είναι προφανές ότι τα ποσοστά βλαβών αυτής της κατηγορίας ανεμογεννητριών είναι σημαντικά υψηλότερα από τις υπόλοιπες (μικρότερες και παλαιότερου τύπου), έτσι πρέπει να εκτελεστεί μια βαθύτερη έρευνα με εστίαση στα συστήματα ελέγχου και τα ηλεκτρικά συστήματα που χρησιμοποιούνται καθώς αυτές

οι δύο ομάδες προκαλούν τα υψηλότερα ποσοστά βλαβών όπως αυτά προσδιορίζονται στη μελέτη 'DOWEC'.

#### 4.4.1.6 Σύστημα ελέγχου

Το σύστημα ελέγχου μιας ανεμογεννήτριας είναι μια από τις πιο ζωτικής σημασίας περιοχές λειτουργίας και το τμήμα που εμφανίζονται τα περισσότερα ελαττώματα. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι ελέγχου, ο έλεγχος της κλίσης των πτερυγίων ('pitch') και έλεγχος απώλειας στήριξης την πτέρυγα ('stall'). Παρά το γεγονός ότι τις περισσότερες κατά την αναφορά των ελαττωμάτων δεν διευκρινίζεται ο τύπος ελέγχου που χρησιμοποιείται, μπορούμε εύκολα να εκτιμήσουμε τον τύπο από την ηλικία της γεννήτριας και την παραγόμενη ισχύ.<sup>23</sup> Έτσι οι μεγάλες και σύγχρονες ανεμογεννήτριες σχεδόν πάντα χρησιμοποιούν τον έλεγχο της κλίσης των πτερυγίων ('pitch') για να αυξήσουν την αποδοτικότητά τους και να μειώσουν την μηχανική καταπόνηση στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης.<sup>23</sup>



**Σχήμα 4.10:** Ετήσιες βλάβες του συνόλου των εξαρτημάτων για ανεμογεννήτριες με σύστημα ελέγχου κλίσης της πτέρυγας ('pitch control') και έλεγχου απώλειας στήριξης στη πτέρυγα ('stall control'), γράφημα βασισμένο στην αναφορά [12]

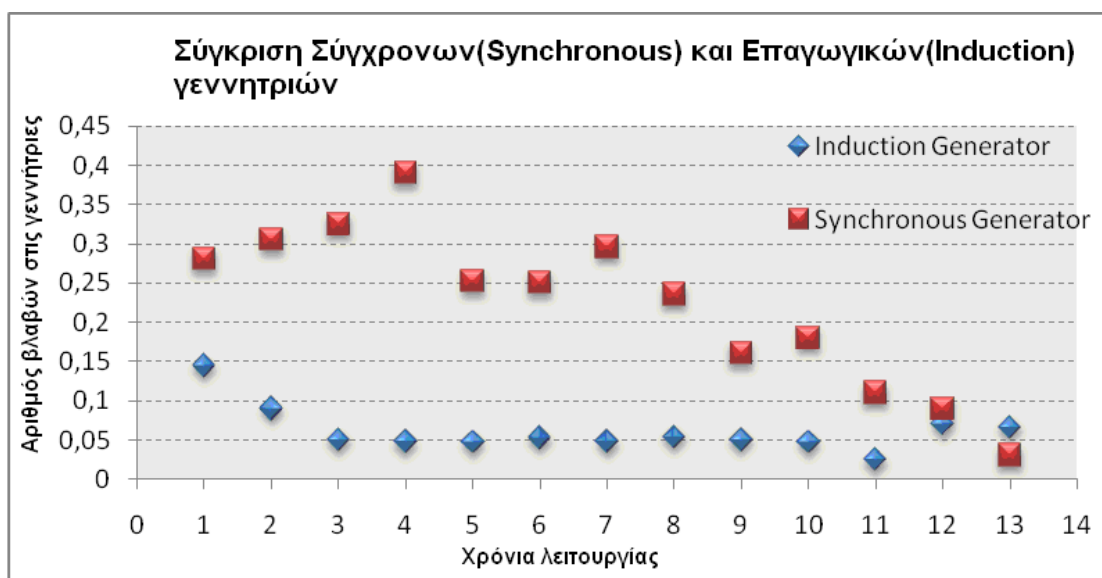
Αν και θα μπορούσε να υποθέσει κανείς ότι ένα πιο σύνθετο σύστημα ελέγχου όπως ο έλεγχος της κλίσης των πτερυγίων θα είχε πιο υψηλά επίπεδα βλαβών, στην πράξη δεν συμβαίνει αυτό.<sup>23</sup> Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο παραπάνω **σχήμα 4.10** τα επίπεδα βλαβών και για τους δύο τρόπους ελέγχου είναι σχεδόν ίδια. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι κυρίως επειδή ορισμένα τμήματα των συστημάτων ελέγχου των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούν την απώλεια στήριξης, είναι σχετικά 'φτωχά' σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούν τον έλεγχο της κλίσης.<sup>23</sup> Ειδικά η αξιοπιστία των κιβωτίων ταχυτήτων, τα υδραυλικά συστήματα και τα μηχανικά φρένα των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούν τον έλεγχο απώλειας στήριξης έχουν την τάση να παρουσιάζουν περισσότερες βλάβες, ενώ αντίστοιχα το σύστημα στροφών των ανεμογεννητριών με έλεγχο κλίσης των πτερυγίων τείνει φυσικά σε υψηλότερα ποσοστά βλαβών.<sup>23</sup>

#### **4.4.1.7 Ανάλυση ηλεκτρικών συστημάτων (γεννήτρια/ηλεκτρονικά ισχύος)**

Το δεύτερο πιο σημαντικό σύστημα σε μία ανεμογεννήτρια είναι το ηλεκτρικό. Παρά τις προσπάθειες για βελτίωσή του, παραμένει ακόμα ένα από τα πιο αναξιόπιστα μέρη της ανεμογεννήτριας.<sup>23</sup> Το ηλεκτρικό τμήμα μιας ανεμογεννήτριας, όπως είδαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια, αποτελείται από διάφορα ηλεκτρικά συστήματα όπως τις ασφάλειες, τους διακόπτες και φυσικά την γεννήτρια και τα κατάλληλα ηλεκτρονικά ισχύος. Η βασική σύγκριση των τεχνολογιών θα γίνει βάσει της χρησιμοποιημένης γεννήτριας, επαγωγικής ή σύγχρονης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι κυρίως επειδή τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιούνται συνδέονται στενά με την λειτουργία των εναλλακτών. Για παράδειγμα οι επαγωγικές γεννήτριες, σε μικρότερες και παλαιότερου τύπου ανεμογεννήτριες, χρησιμοποιούνται για σταθερής ταχύτητας ανεμογεννήτριες και τα ηλεκτρονικά ισχύος που περιλαμβάνουν χρησιμοποιούνται για την ομαλή εκκίνηση ('soft starter') και την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος ('reactive compensation'). Από την άλλη οι σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται με μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριες (με ή και χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων) και τα ηλεκτρονικά ισχύος που περιλαμβάνονται χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν τη συχνότητα και το μήκος κύματος που παράγουν.<sup>23</sup>

#### 4.4.1.8 Γεννήτριες

Αρχικά θα γίνει μια σύγκριση των δύο βασικών τύπων γεννητριών χρησιμοποιούνται. Στο **σχήμα 4.11** παρουσιάζονται οι ετήσιες βλάβες για τους δύο τύπους εναλλακτών.



**Σχήμα 4.11:** Σύγκριση ετήσιων βλαβών σύγχρονων και επαγωγικών γεννητριών, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [23]

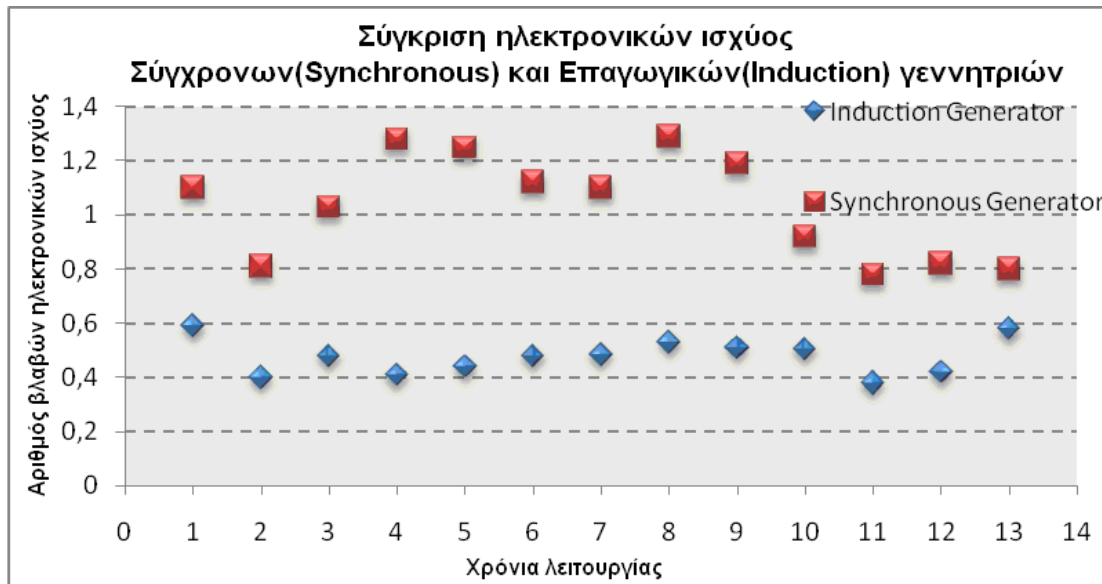
Γίνεται σαφώς κατανοητό με την παρατήρηση του **σχήματος 4.11** ότι οι γεννήτριες επαγωγής είναι σημαντικά πιο αξιόπιστες από τις σύγχρονες γεννήτριες. Ο μέσος ετήσιος αριθμός βλαβών για τους επαγωγικούς εναλλάκτες είναι περίπου 0,06 και για τους σύγχρονους εναλλάκτες είναι περίπου 0,22 δηλαδή σχεδόν τρεις φορές υψηλότερος.<sup>23</sup>

Παρόμοια αποτελέσματα παράγονται και από τα στοιχεία της 'LWK' από τη Γερμανία. Εκεί η σύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει ποσοστό αποτυχίας που είναι δύο φορές μεγαλύτερο από της επαγωγικής γεννήτριας.<sup>26</sup> Επιπλέον μετά από έρευνα που έγινε καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι οι αιτίες των προβλημάτων της σύγχρονης γεννήτριας είναι κυρίως δύο.<sup>24</sup> Αρχικά οι μεγάλες διαμέτροι έχουν ως αποτέλεσμα να είναι πιο δύσκολη η στεγανοποίηση από το περιβάλλον, πράγμα που εκθέτει τη γεννήτρια σε ζημιές από κακή μόνωση λόγω της παρουσίας υγρασίας ή άλλων μολυσματικών παραγόντων της ατμόσφαιρας και αφετέρου υπάρχει

ανεπαρκής τυποποίηση στην κατασκευή των μηχανών, με συνεπεία οι γραμμές παραγωγής να είναι μικρές.<sup>26</sup>

#### 4.4.1.9 Ηλεκτρονικά ισχύος

Εκτός από τη σύγκριση των δύο τύπων γεννητριών που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες, θα πρέπει να γίνει και μια σύγκριση όσον αφορά την αξιοπιστία μεταξύ των σχετικών ηλεκτρονικών ισχύος τους. Στο **σχήμα 4.12** βλέπουμε τα ετήσια ποσοστά βλαβών των ηλεκτρονικών ισχύος.<sup>23</sup>



**Σχήμα 4.12:** Σύγκριση ετήσιων βλαβών ηλεκτρονικών ισχύος σύγχρονων και επαγωγικών γεννητριών, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [23]

Μπορεί να γίνει κατανοητό από το **σχήμα 4.12** ότι οι βλάβες στα ηλεκτρονικά ισχύος για τις επαγωγικές γεννήτριες παρουσιάζονται με σχετικά σταθερά ποσοστά, γεγονός που οδηγεί στην υπόθεση ότι η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία είναι ώριμη. Εντούτοις στην περίπτωση των σύγχρονων γεννητριών η εισαγωγή νέων συστημάτων, όπως ένας μετατροπέας πλήρους ισχύος, οδηγεί σε μια αύξηση των βλαβών μεγαλύτερη από 20%.<sup>23</sup> Λεπτομερέστερα η ετήσια μέση τιμή βλαβών των ηλεκτρονικών που χρησιμοποιούνται στις επαγωγικές γεννήτριες είναι 0,47 και για τις σύγχρονες γεννήτριες είναι 1,03, διπλασιάζοντας το ποσοστό βλαβών.<sup>23</sup> Αυτό

οφείλεται στον τύπο των ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση και το είδος του φορτίου που έχουν να αντιμετωπίσουν.

#### 4.4.2 Σουηδία: Ποσοστά βλαβών χερσαίων ανεμογεννητριών

Η σουηδική βιομηχανία αιολικής ενέργειας έχει επεκταθεί πολύ τα τελευταία χρόνια. Αυτό έχει δυσμενείς επιπτώσεις σε όλες τις προσπάθειες για παραγωγή πιο αξιόπιστων ανεμογεννητριών, καθώς τα νέα σχέδια που εγκαθίστανται δεν είναι πάντα πλήρως ελεγμένα και η διάρκεια ζωής των 20 ετών των προϋπάρχουσων γεννητριών δεν επιτυγχάνεται προτού δημιουργηθεί η νέα.<sup>23</sup> Εντούτοις έχουν διενεργηθεί μερικές μελέτες που χρησιμοποιούν τα Σουηδικά στοιχεία ποσοστού αποτυχίας και στοχεύουν στο να βελτιωθεί η αξιοπιστία και να μειωθεί η συντηρησιμότητα των ανεμογεννητριών. Οι βασικές πηγές αυτών των στοιχείων είναι δύο, η Σουηδική ετήσια έκθεση ('Driftuppföljning av vindkraftverk from Elforsk')<sup>10</sup> και η Σουηδική βάση δεδομένων ('Felanalys from Vattenfall Power Consultant').<sup>11</sup> Οι ακριβείς προδιαγραφές αυτών των δύο πηγών φαίνονται στον **πίνακα 4.2**.<sup>25</sup>

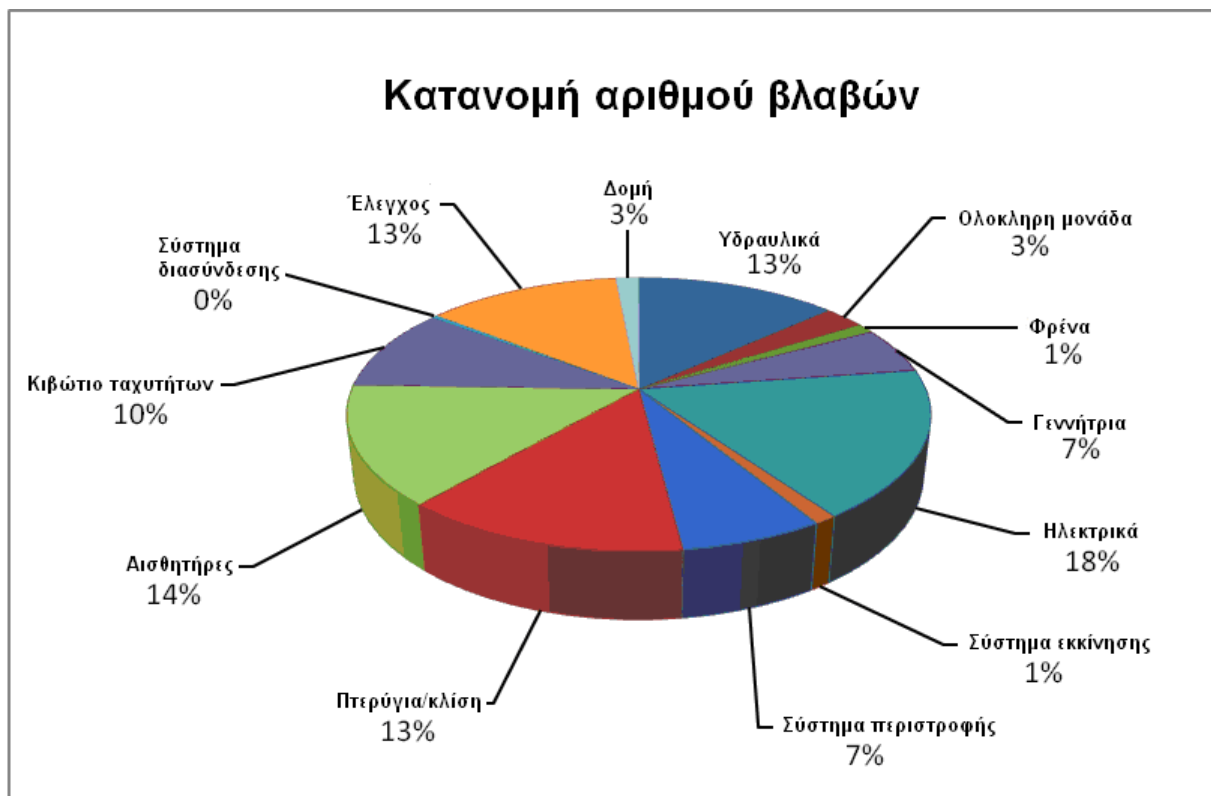
**Πίνακας 4.2:** Προδιαγραφές των στατιστικών πηγών, πίνακας βασισμένος στην αναφορά [25]

Όνομα πηγής	Driftuppföljning av vindkraftverk	Felanalys
Χώρα	Σουηδία	Σουηδία
Χρονική έκταση στοιχείων	1977 - 2004	1989 - 2005
Αριθμός ενεργών γεννητριών (2005)	723	786
Ποσοστό κάλυψης της χώρας	>95%	>95%
Συσσωρευμένος αριθμός καταγεγραμμένων βλαβών	1658	1658

Από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα, είναι προφανές ότι ο αριθμός ανεμογεννητριών που συμμετέχουν σε αυτήν την στατιστική ανάλυση είναι αρκετά μεγάλος ώστε να παράσχει αξιόπιστα αποτελέσματα. Επιπλέον πρέπει να

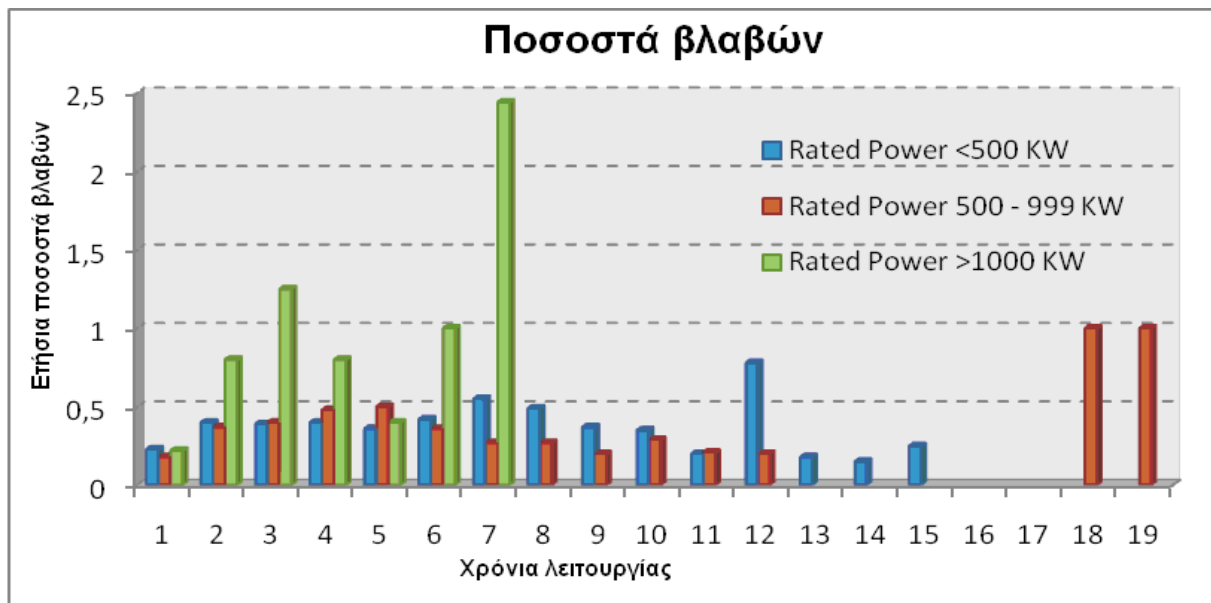
επισημανθεί ότι αναφέρεται ο τύπος και το μέγεθος όλων των ελεγχόμενων ανεμογεννητριών.<sup>25</sup>

Έχοντας δείξει τις προδιαγραφές των στατιστικών πηγών, η ανάλυση αξιοπιστίας παρέχει μια επισκόπηση των ποσοστών βλαβών των επιμέρους τμημάτων των σουηδικών εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας στο **σχήμα 4.13**.<sup>25</sup>



**Σχήμα 4.13:** Η κατανομή του αριθμού βλαβών για τα Σουηδικά αιολικά πάρκα το 2000-2004, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [25]

Με την παρατήρηση του **σχήματος 4.13** είναι σαφές ότι τα εξαρτήματα με τα υψηλότερα ποσοστά βλαβών είναι αυτά που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά και τα συστήματα ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Όπως και στις Γερμανικές μελέτες θα κάνουμε μια σύγκριση των ποσοστών βλαβών όσον αφορά την παρερχόμενη ισχύ σε σχέση με τα χρόνια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Θα κατατάξουμε τις ανεμογεννήτριες σε τρεις κατηγορίες ισχύος, κάτω από 500 KW, μεταξύ 500 KW και 999 KW και πάνω από 1000 KW. Ο λόγος για τη δημιουργία αυτών των ομάδων είναι να μας δοθεί η δυνατότητα να γίνει σύγκριση των διαφορετικών τεχνολογιών με την πάροδο του χρόνου.<sup>25</sup> Στο **σχήμα 4.14** θα δούμε και θα συγκρίνουμε τα ποσοστά βλαβών και για τις τρεις κατηγορίες.<sup>25</sup>



**Σχήμα 4.14:** Ποσοστά βλαβών ανεμογεννητριών που ταξινομούνται με βάση την ισχύ τους, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [25]

Στο **σχήμα 4.14** είναι σαφές ότι τα ποσοστά βλαβών των μεγάλων ανεμογεννητριών, με ισχύ 1000 KW και πάνω, έχουν σημαντικά υψηλότερες τιμές από τις υπόλοιπες. Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι τα ποσοστά αποτυχίας αυτών των γεννητριών αυξάνονται αντί να μειώνονται με το πέρασμα του χρόνου.<sup>25</sup>

#### 4.4.3 Δανία: Ποσοστά βλαβών χερσαίων ανεμογεννητριών

Η βιομηχανία αιολικής ενέργειας της Δανίας παρά το γεγονός ότι έχει παρελθόν πολλών ετών, έχει δημοσιεύσει μόνο λίγες εκθέσεις σχετικά με την αξιοπιστία των ανεμογεννητριών της. Η πιο γνωστή είναι το πρόγραμμα 'DOWEC'. Σε αυτή την μελέτη η βασική πηγή στοιχείων για την ανάλυση αξιοπιστίας στη Δανία παρέχεται από τη βάση δεδομένων 'WindStats'. Οι ακριβείς προδιαγραφές αυτής της πηγής παρέχονται στον ακόλουθο **πίνακα 4.3**.

**Πίνακας 4.3:** Προδιαγραφές των στατιστικών πηγών, πίνακας βασισμένος στην αναφορά [25]

Όνομα πηγής	WindStats
Χώρα	Δανία
Χρονική έκταση στοιχείων	1999 -2001
Αριθμός ενεργών γεννητριών	2000



Έχοντας δείξει τις προδιαγραφές των στατιστικών πηγών, η ανάλυση αξιοπιστίας παρέχει μια επισκόπηση των ποσοστών βλαβών των επιμέρους τμημάτων των Δανικών εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας στο **σχήμα 4.15**.<sup>33</sup>



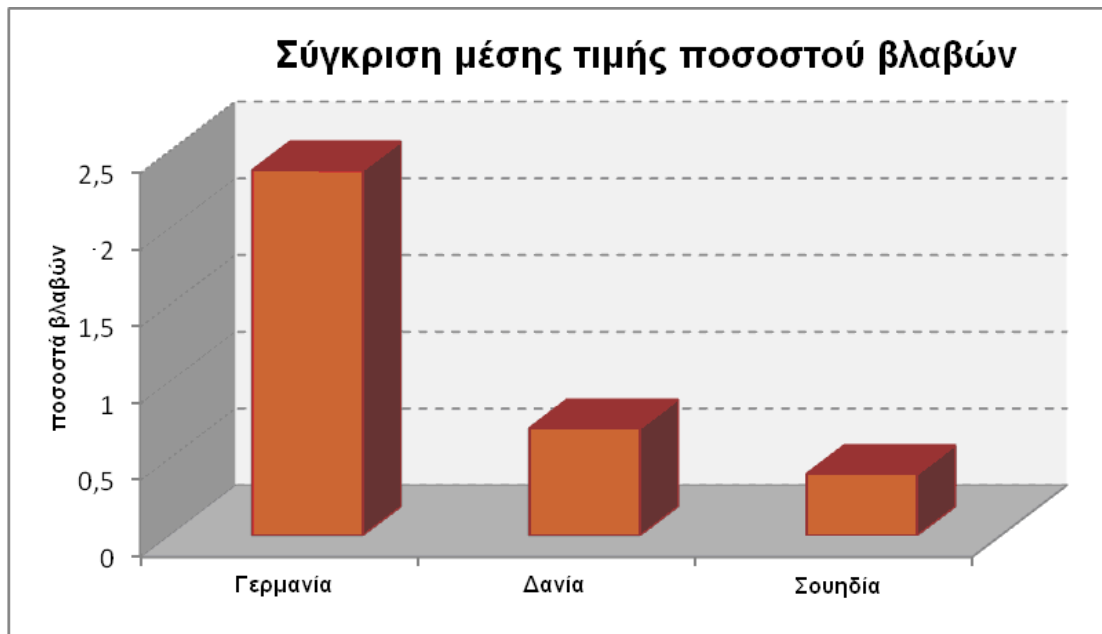
**Σχήμα 4.15:** Κατανομή ποσοστού μηχανικών βλαβών σύμφωνα με τη βάση δεδομένων 'WindStats' για την περίοδο 1999 - 2001, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [33]

Παρά το γεγονός ότι στις προηγούμενες δύο αναλύσεις βλαβών για τη Γερμανία και τη Σουηδία τα πιο προβληματικά τμήματα ανεμογεννητριών ήταν τα συστήματα ελέγχου και τα ηλεκτρικά, σε αυτήν την μελέτη τα παρεχόμενα στοιχεία δεν είναι επαρκή ώστε να το υποστηρίξουν, δεδομένου ότι από το ανωτέρω **σχήμα 4.15** φαίνεται ότι το σύστημα ελέγχου έχει πραγματικά υψηλά ποσοστά αποτυχίας. Εντούτοις για το ηλεκτρικό σύστημα η μελέτη δεν παρέχει καμία πληροφόρηση.

#### 4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ ΤΩΝ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Αφού δηλώσαμε τα ποσοστά βλαβών των ανεμογεννητριών για κάθε χώρα είναι σημαντικό να συζητηθούν και οι διαφορές που παρουσιάζονται στις τιμές. Αρχικά θα κάνουμε μια σύγκριση του συνολικού μέσου όρου των ποσοστών βλαβών των ανεμογεννητριών. Στο **σχήμα 4.16** έχουμε μια γραφική απεικόνιση των

συνολικών μέσων τιμών του ποσοστού βλαβών των ανεμογεννητριών και για τις τρεις χώρες, Γερμανία (2,38), Δανία (0,7) και Σουηδία (0,402).<sup>25,32,33</sup>



**Σχήμα 4.16:** Σύγκριση ολικού ποσοστού βλαβών Γερμανίας, Δανίας, Σουηδίας, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [25,32,33]

Προφανώς με τη βοήθεια του **σχήματος 4.16** συμπεραίνουμε ότι τα ποσοστά βλαβών των ανεμογεννητριών που λειτουργούν σε κάθε χώρα δεν είναι τα ίδια. Η Γερμανία έχει σχεδόν τέσσερις φορές υψηλότερα ποσοστά αποτυχίας και από τη Σουηδία και από τη Δανία.<sup>25,33</sup> Παρά το γεγονός ότι η διαφορά στα αποτελέσματα είναι πολύ υψηλή, τα αίτια δεν είναι προφανή.

Σύμφωνα με σχεδόν όλες τις περιπτώσιακές μελέτες ('case studies'), η πηγή των στοιχείων, το μέγεθος, η ηλικία των στροβίλων και η μέθοδος συλλογής στοιχείων, ποικίλλουν ανάλογα τη χώρα, με συνέπεια αυτές τις τεράστιες διαφορές στη μέση τιμή των ποσοστών βλαβών.<sup>33</sup> Για να γίνουν πλήρως κατανοητές αυτές οι έννοιες θα γίνει μια περαιτέρω ανάλυση. Το υψηλό ποσοστό βλαβών στη Γερμανία οφείλεται σε πολλούς λόγους με κυριότερους τους παρακάτω.

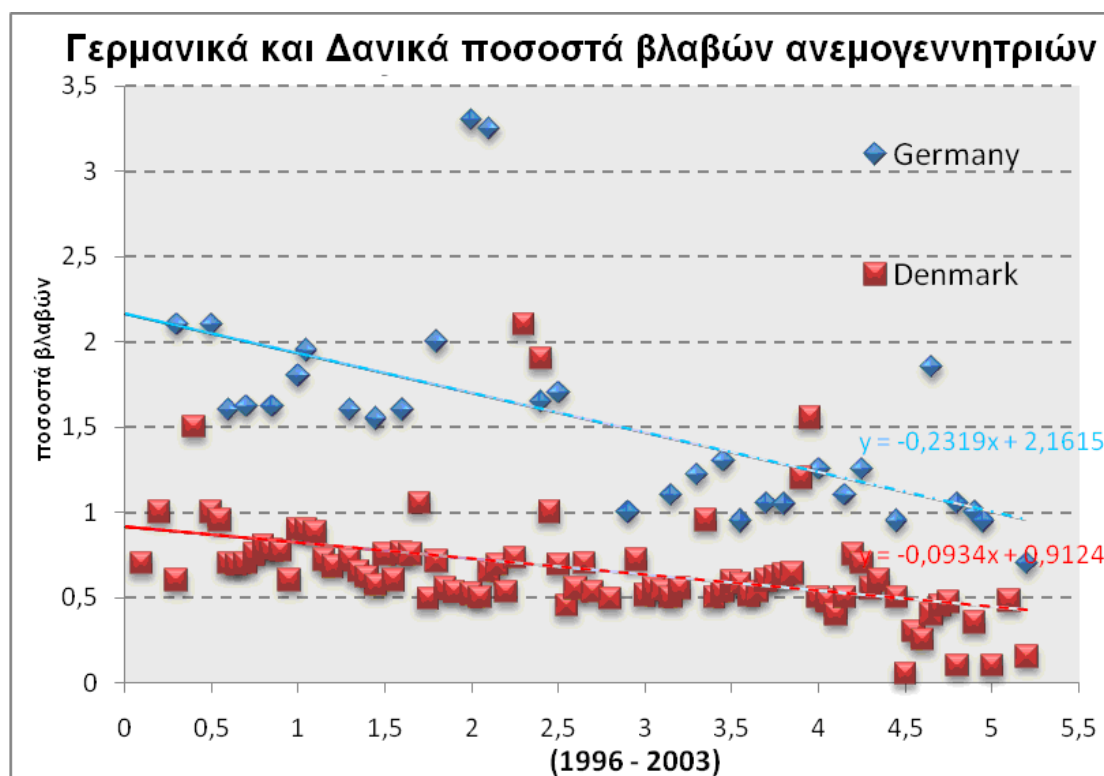
- Η Γερμανία είναι μια χώρα που εγκαθιστά πολλές νέες ανεμογεννήτριες.<sup>33</sup> Αυτό έχει μεγάλη επίδραση στα ποσοστά βλαβών, δεδομένου ότι οι νέες ανεμογεννήτριες έχουν τρεις φορές μεγαλύτερα ποσοστά βλαβών απ' ό,τι οι μεγαλύτερης των τεσσάρων ετών ηλικίας ανεμογεννήτριες.<sup>33</sup>

- Η Γερμανία εγκαθιστά μεγάλες ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, τεχνολογία που είναι νέα και περιλαμβάνει μη δοκιμασμένα τεχνολογικά συστήματα.<sup>33</sup>

- Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες από τις νέες ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται στη Γερμανία είναι σύγχρονες, που έχουν διπλάσιο ποσοστό βλαβών από τις επαγωγικές γεννήτριες παλαιότερων μοντέλων που χρησιμοποιούνται σε άλλες χώρες.<sup>23</sup>

- Τα στοιχεία σε κάθε χώρα δεν συλλέγονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο και ως συνέπεια αυτού τα λάθη που μπορεί να είχαν συμβεί αποτελούν μια ακόμα αιτία.

Παρόλα αυτά διαπιστώθηκε ότι τα Γερμανικά ποσοστά αποτυχίας βελτιώνονται γρηγορότερα.<sup>27</sup> Αυτό φαίνεται στο **σχήμα 4.17**.

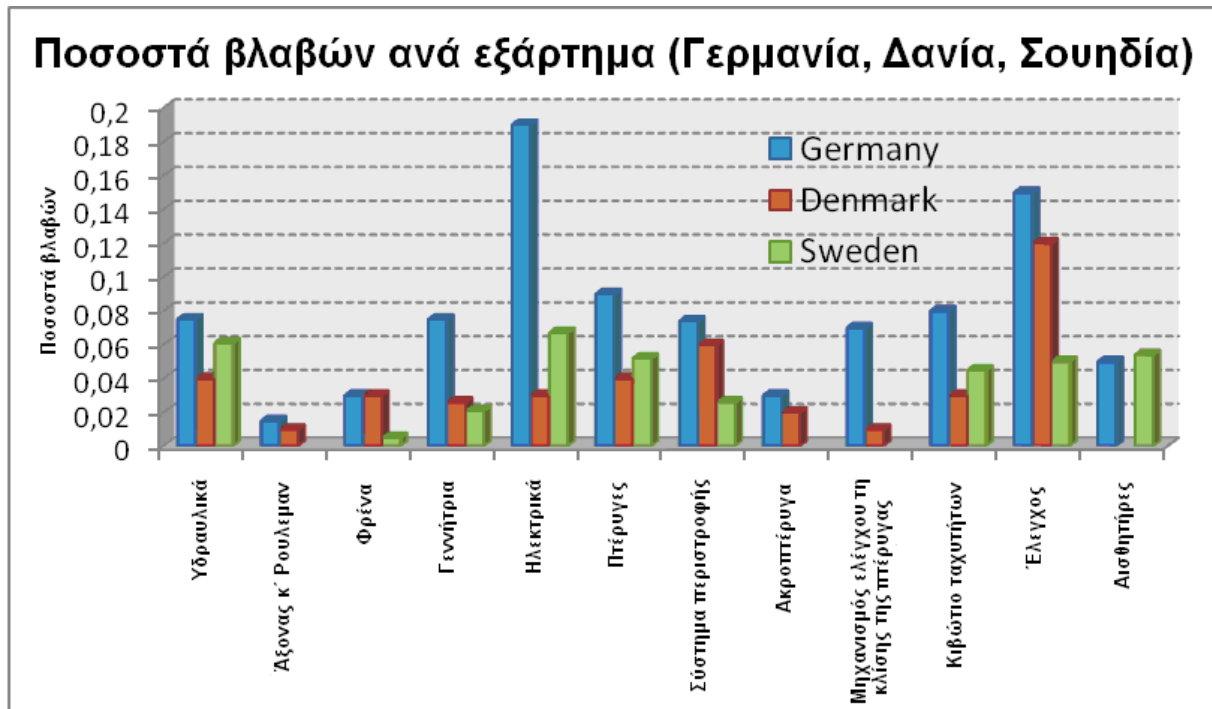


**Σχήμα 4.17:** Γερμανικά και Δανικά ποσοστά βλαβών ανεμογεννητριών σε συνδυασμό, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [27]

Με τη σύγκριση των κλίσεων των δύο γραμμών ποσοστού αποτυχίας για τη Γερμανία και τη Δανία, είναι σαφές ότι τα ποσοστά βλαβών των Γερμανικών ανεμογεννητριών βελτιώνονται δυόμιση φορές το χρόνο γρηγορότερα από τα Δανικά. Έτσι μπορεί να γίνει κατανοητό ότι σημαντικός αριθμός ανεμογεννητριών λειτουργεί ακόμα στο αρχικό στάδιο 'βλαβών νεότητας'.<sup>27</sup> Επιπλέον βρίσκουμε ότι τα γερμανικά

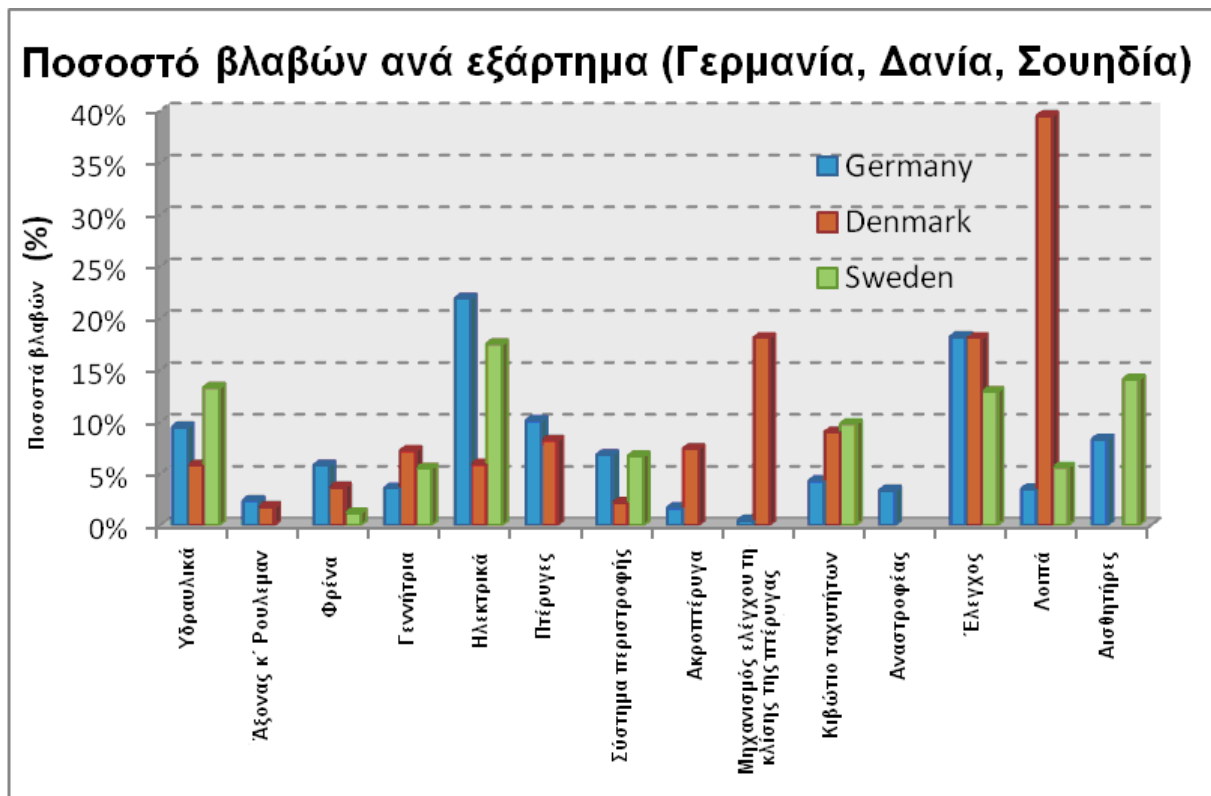
ποσοστά βλαβών θα εμπέσουν σε παρόμοια επίπεδα με τις Δανικές ανεμογεννήτριες σε μια περίοδο μικρότερη των επτά ετών.<sup>27</sup>

Στη συνέχεια κάνουμε μια λεπτομερή ανάλυση των ποσοστών βλαβών των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών που λειτουργούν και σε στις τρεις χώρες. Στο **σχήμα 4.18** βλέπουμε το ποσοστό βλαβών για κάθε εξάρτημα της ανεμογεννήτριας ανά χώρα.



**Σχήμα 4.18:** Γερμανικά, Δανικά και Σουηδικά ποσοστά βλαβών ανεμογεννητριών ανά εξάρτημα, γράφημα βασισμένο στην αναφορά[13,19,30]

Παρακάτω έχουμε μια άλλη γραφική παράσταση που αντιπροσωπεύει τις αναλογίες του ποσοστού βλαβών, **σχήμα 4.19**. Με αυτό το γράφημα διευκρινίζονται τα πιο προβληματικά τμήματα σε σχέση με τα ποσοστά βλαβών τους.



**Σχήμα 4.19:** Γερμανικά, Δανικά και Σουηδικά ποσοστά βλαβών ανεμογεννητριών ανά εξάρτημα, γράφημα βασισμένο στην αναφορά[13,19,30]

Σύμφωνα με το **σχήμα 4.19**, τα πιο προβληματικά συστήματα των ανεμογεννητριών και των τριών χωρών, είναι τα ηλεκτρικά και τα συστήματα ελέγχου. Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι τα μέσα ποσοστά ελαττωμάτων είναι εντυπωσιακά διαφορετικά (η Γερμανία έχει σχεδόν τέσσερις φορές υψηλότερα ποσοστά), τα ποσοστά ελαττωμάτων για τα συστήματα ελέγχου έχουν μια διαφορά μικρότερη του 5% και τα ηλεκτρικά συστήματα της Γερμανίας και της Σουηδίας έχουν μικρότερη από 3%.<sup>25</sup>

#### 4.6 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα από τα κρισιμότερα μέρη μιας μελέτης αξιοπιστίας, περιλαμβάνει τον υπολογισμό των επιπέδων διαθεσιμότητας των συστημάτων που αναλύονται. Για τις ανεμογεννήτριες και ειδικά για τις παράκτιες, η αξιοπιστία συνδέεται στενά με τη διαθεσιμότητα δεδομένου ότι η δυνατότητα πρόσβασης είναι περιορισμένη. Έτσι μπορεί να γίνει κατανοητό ότι η αξιοπιστία των ανεμογεννητριών ή των εξαρτημάτων τους, μετριέται όχι μόνο από τη συχνότητα των βλαβών αλλά και από τη χρονική

περίοδο που απαιτείται για να επιστρέψει σε πλήρη λειτουργία.<sup>34</sup> Για να καθορίσουν τα επίπεδα διαθεσιμότητας μιας ανεμογεννήτριας απαιτούνται δύο βασικές αναγνώσεις, τα ποσοστά βλαβών και ο χρόνος μη λειτουργίας ανά βλάβη.<sup>22</sup>

Στις προηγούμενες παραγράφους υπολογίσαμε τα ποσοστά βλαβών ανά εξάρτημα για κάθε ανεμογεννήτρια και καθορίσαμε τα μέσα ποσοστά βλαβών κάθε χώρας. Εντούτοις ο χρόνος μη λειτουργίας ανά βλάβη δεν έχει δηλωθεί. Αντιπροσωπευτικές τιμές του μέσου χρόνου μη λειτουργίας (ΜΧΜΛ) για κάθε εξάρτημα χωριστά μιας χερσαίας ανεμογεννήτριας, μπορεί να βρεθεί στη Γερμανική βάση δεδομένων 'WMEP'.<sup>34</sup> Προφανώς μπορούμε να υποθέσουμε ότι αυτές οι τιμές μπορούν να είναι παρεμφερείς για τις ανεμογεννήτριες όλων των χωρών, δεδομένου ότι ο βασικός χρόνος επισκευής για κάθε εξάρτημα δεν επηρεάζεται. Ο μέσος χρόνος μη λειτουργίας ανά βλάβη φαίνεται στο ακόλουθο **σχήμα 4.20**.<sup>34</sup>



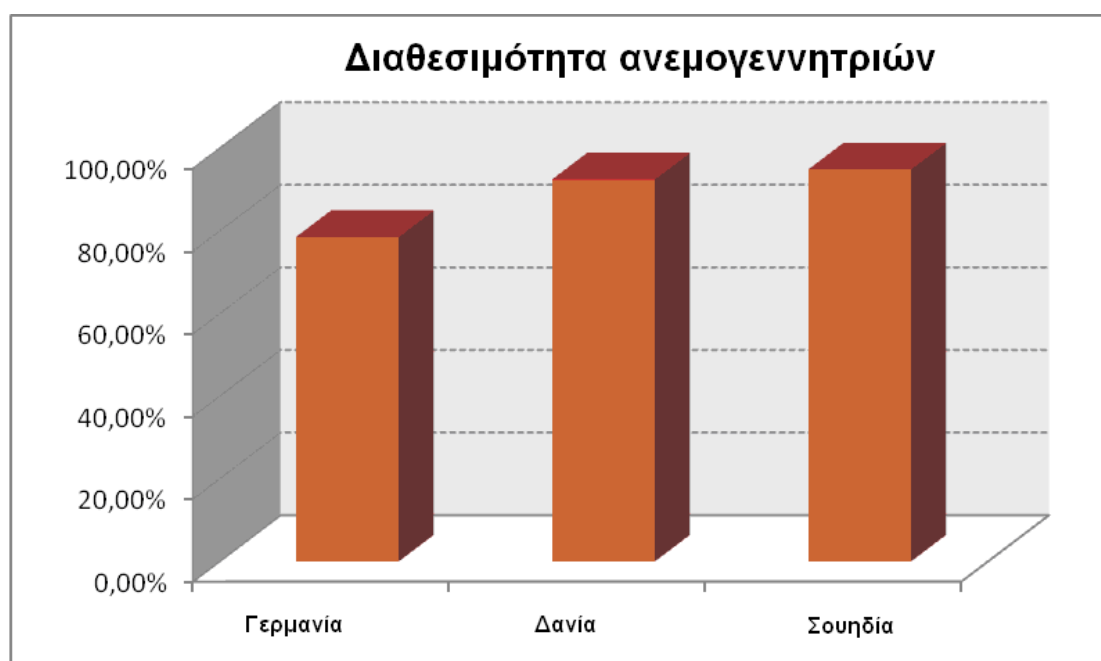
**Σχήμα 4.20:** Χρόνος μη λειτουργίας ανά βλάβη για κάθε εξάρτημα, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [34]

Με βάση το **σχήμα 4.20** και τα στοιχεία του ποσοστού βλαβών που είναι γνωστά για κάθε χώρα, μπορούν να υπολογιστούν ο Μέσος Χρόνος πριν την Αποτυχία (ΜΧΑ) και ο Μέσος Χρόνος Μη Λειτουργίας (ΜΧΜΛ). Στον ακόλουθο **πίνακα 4.4** επιδεικνύονται αυτές οι τιμές.

**Πίνακας 4.4:** Υπολογισμός Μέσου Χρόνου πριν την Αποτυχία (ΜΧΑ) και Μέσου Χρόνου Μη Λειτουργίας (ΜΧΜΛ)

	Ποσοστά Βλαβών	ΜΧΑ (1/λ)	ΜΧΜΛ (χρόνος μη λειτουργίας/365μέρες)
Γερμανία	2,38	0,42	0,114
Δανία	0,7	1,428	0,114
Σουηδία	0,402	2,487	0,114

Τέλος για να υπολογίσει η διαθεσιμότητα για τις ανεμογεννήτριες κάθε χώρας που ερευνάται, θα χρησιμοποιηθεί η **σχέση 4.2**. Στο ακόλουθο **σχήμα 4.21** φαίνεται η διαθεσιμότητα και για τις τρεις χώρες.



**Σχήμα 4.21:** Διαθεσιμότητα ανεμογεννητριών, γράφημα βασισμένο στους υπολογισμούς της εξίσωσης [2]

Όπως βλέπουμε από το **σχήμα 4.21** η Γερμανία έχει τα χαμηλότερα επίπεδα διαθεσιμότητας από τις τρεις χώρες. Περίπου το ένα τέταρτο των ανεμογεννητριών που βρίσκονται στη Γερμανία θα είναι κάθε χρόνο εκτός λειτουργίας, σύμφωνα με τη παραπάνω γραφική παράσταση.

Προφανώς από αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό ότι η διαθεσιμότητα είναι εξαιρετικά σημαντική και πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ειδικά εάν οι

ανεμογεννήτριες πρόκειται να βρεθούν στις περιοχές με χαμηλή δυνατότητα πρόσβασης, όπως μακριά από την ακτή.

#### 4.7 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΙΤΙΩΝ ΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ

Μέχρι τώρα στο κεφάλαιο αυτό ερευνήθηκαν δύο βασικά θέματα. Καταρχάς το μέσο επίπεδο αξιοπιστίας και η διαθεσιμότητα των ανεμογεννητριών και στη συνέχεια η σχέση μεταξύ της ισχύος των ανεμογεννητριών, της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας και των ποσοστών βλαβών. Εντούτοις δεν έχει γίνει ακόμα μια ζωτικής σημασίας μελέτη σχετικά με τις αιτίες των βλαβών.

Σύμφωνα με τις περισσότερες μελέτες αξιοπιστίας, βασικό ρόλο στη μείωση των ποσοστών βλαβών παίζει ο προσδιορισμός των αιτιών των βλαβών, ώστε να είμαστε σε θέση να δώσουμε λύσεις πριν την εμφάνιση της εκάστοτε βλάβης.<sup>22</sup> Στο **σχήμα 4.22** επιδεικνύονται οι βασικές αιτίες βλαβών και η σχέση τους με τα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας.



**Σχήμα 4.22:** Αιτίες βλαβών των ανεμογεννητριών, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [41]



Από το **σχήμα 4.22** βλέπουμε ότι οι βασικές αιτίες βλαβών για μια χερσαία ανεμογεννήτρια εντοπίζονται στα ελαττωματικά εξαρτήματα και τον έλεγχο των εγκαταστάσεων. Εντούτοις ένα σημαντικό μέρος των βλαβών συνδέεται με τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, περίπου 12% επί του συνόλου.<sup>41</sup> Επιπλέον είναι προφανές ότι οι εκτιμήσεις αυτές θα αλλάξουν εάν υποθέσουμε ότι αναφερόμαστε σε θαλάσσιο περιβάλλον. Ειδικά οι καιρικές συνθήκες θα έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο.

Είναι δεδομένο ότι οι καιρικές συνθήκες γίνονται λιγότερο φιλικές όσο η θέση της εγκατάστασης απομακρύνεται από στεριά.<sup>41</sup> Επιπλέον το μέγεθος και η συχνότητα των καταιγίδων και των αστραπών αυξάνεται σημαντικά.<sup>41</sup> Για αυτόν τον λόγο στη στατιστική βάση δεδομένων 'WMEP' έγινε μια βαθύτερη έρευνα στις σχέσεις μεταξύ των κλιματολογικών όρων και των αιτιών των βλαβών των ανεμογεννητριών.<sup>40</sup> Στα πλαίσια αυτής της έρευνας μελετήθηκαν συστηματικά οι κλιματολογικές και εξωτερικές ηλεκτρικές επιρροές στη λειτουργία των ανεμογεννητριών στη Γερμανία και βρέθηκε μια δομή ανάλυσης των βλαβών βασισμένη σε αυτές τις συνθήκες.<sup>40</sup>

## **4.8 ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Προκειμένου να εκτιμήσουμε τα συμπεράσματα της ανάλυσης των ελαττωμάτων των Γερμανικών, Σουηδικών και Δανικών ανεμογεννητριών, θα συνοψίσουμε και θα αναλύσουμε τα αποτελέσματα.

### **4.8.1 Ομοιότητες των αποτελεσμάτων κάθε χώρας**

- Τα πιο προβληματικά εξαρτήματα των ανεμογεννητριών εντοπίζονται στα ηλεκτρικά και τα συστήματα ελέγχου.
- Οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν το διπλό ποσοστό βλαβών από τις επαγωγικές γεννήτριες.
- Και οι δύο τύποι ελέγχου των πτερυγίων ('pitch control - stall control') έχουν περίπου τα ίδια ποσοστά βλαβών.

- Τα ποσοστά βλαβών των ανεμογεννητριών κλιμακώνουν καθώς αυξάνεται το μέγεθος.

#### **4.8.2 Διαφορές των αποτελεσμάτων κάθε χώρας**

- Οι Γερμανικές ανεμογεννήτριες έχουν τη χαμηλότερη αξιοπιστία και από τις τρεις χώρες, περίπου τέσσερις φορές υψηλότερα μέσα ποσοστά βλαβών.

- Τα Γερμανικά ποσοστά βλαβών των ανεμογεννητριών βελτιώνονται γρηγορότερα από τα Δανικά ποσοστά. Κατά συνέπεια τα Γερμανικά επίπεδα αξιοπιστίας, θα φθάσουν αυτά της Δανίας μέσα σε επτά έτη.

- Οι Γερμανικές ανεμογεννήτριες έχουν τα χαμηλότερα επίπεδα διαθεσιμότητας.

#### **4.8.3 Παράθεση των αποτελεσμάτων**

Από τα παραπάνω μπορούν να γίνουν κατανοητά διάφορα πράγματα. Αρχικά παρά το γεγονός ότι οι νεότερες και μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες έχουν τα υψηλότερα μέσα ποσοστά βλαβών, είναι ενδεχομένως τόσο αξιόπιστες όσο οι μικρότεροι προκάτοχοί τους. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό με τη βοήθεια του **σχήματος 4.16**, όπου οι Γερμανικές σύγχρονες και μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες έχουν τα υψηλότερα μέσα ποσοστά βλαβών, αλλά η τάση των ποσοστών αυτών είναι μειούμενη με γρηγορότερο ρυθμό από το Δανικό πληθυσμό των μικρότερων και παλαιότερων ανεμογεννητριών.<sup>32</sup> Από την άλλη τα επίπεδα αξιοπιστίας των ανεμογεννητριών και στις τρεις χώρες υπερβαίνουν αυτά μιας εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας πετρελαίου και πλησιάζουν την αξιοπιστία της εγκατάστασης γεωθερμικής παραγωγής ενέργειας.<sup>32</sup> Επίσης έγινε σαφές ότι τα ποσοστά βλαβών των ανεμογεννητριών αυξάνονται καθώς αυξάνεται η ισχύς τους.

Επιπλέον ένα κρίσιμοτατο σημείο που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα δεν συνδέονται εξ ολοκλήρου, αλλά η διαθεσιμότητα εξαρτάται επίσης από χρόνο μη λειτουργίας λόγω βλάβης. Έτσι είναι σημαντικό να μειωθούν οι βλάβες στα συστήματα που απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο για να επισκευαστούν ακόμα κι αν αυτό σημαίνει την μείωση της αξιοπιστίας σε ένα άλλο

σύστημα. Παραδείγματος χάριν με την αφαίρεση του κιβωτίου ταχυτήτων η αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος της ανεμογεννήτριας μειώνεται, αλλά η διαθεσιμότητα βελτιώνεται σημαντικά.

#### **4.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Σε αυτό το κεφάλαιο διεξήχθησαν μελέτες για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες σε τρεις διαφορετικές ευρωπαϊκές χώρες. Αναλύθηκαν κυρίως τα ποσοστά βλαβών ανά εξάρτημα, η διαθεσιμότητα και η σχέση μεταξύ του τύπου ανεμογεννήτριας και της αξιοπιστίας. Τα αποτελέσματα των ποσοστών βλαβών που υπολογίστηκαν, θα χρησιμοποιηθούν στο ακόλουθο κεφάλαιο για να προβλέψουν τα επίπεδα αξιοπιστίας των παράκτιων ανεμογεννητριών με τη χρησιμοποίηση ενός μαθηματικού τύπου.

## **5. ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει εφαρμογή των βασικών διαδικασιών αποτυχίας σε διάφορα στοιχεία ποσοστών βλαβών των χερσαίων ανεμογεννητριών, που έχουν συγκεντρωθεί από ποικίλες βάσεις δεδομένων χωρών, για να προβλέψουμε τα ποσοστά βλαβών των παράκτιων αιολικών πάρκων. Προφανώς με αυτήν την μέθοδο δεν θα παραχθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός αλλά ένα εύρος αξιοπιστίας, δεδομένου ότι υπάρχει έντονη επιρροή από τις μεταβλητές περιβαλλοντικές συνθήκες που υπάρχουν στις παράκτιες θέσεις. Επιπλέον θα παραχθεί ένας συνοπτικός πίνακας για να συγκρίνει τα επίπεδα αξιοπιστίας χερσαίων και παράκτιων ανεμογεννητριών.

### **5.2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο δηλώθηκαν και αναλύθηκαν τα επίπεδα αξιοπιστίας για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες διάφορων κρατών. Εντούτοις είναι βασικό να εκτιμηθεί ότι αυτά τα αποτελέσματα θα άλλαζαν σημαντικά εάν οι ανεμογεννήτριες βρίσκονταν στη θάλασσα. Έτσι είναι σημαντικό να καθοριστούν τα νέα επίπεδα αξιοπιστίας για τις ανεμογεννήτριες που βρίσκονται μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Αν και η ανάλυση αξιοπιστίας που έγινε βασίστηκε στα στατιστικά στοιχεία που παρήχθησαν από πραγματικές βλάβες και ελέγχους συντήρησης καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας των εγκατεστημένων των ανεμογεννητριών, σε αυτό το κεφάλαιο η διαδικασία θα είναι εντελώς διαφορετική. Αυτό συμβαίνει επειδή για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες δεν υπάρχουν στατιστικά στοιχεία βλαβών και κατά συνέπεια θα ακολουθηθεί μια διαφορετική διαδικασία βασισμένη σε μαθηματικά μοντέλα για την πρόβλεψη. Με αυτή την διαδικασία τα στοιχεία των ποσοστών βλαβών των χερσαίων ανεμογεννητριών θα χρησιμοποιηθούν σε ένα ενιαίο

μαθηματικό πρότυπο και θα παραχθεί μια σειρά από προβλέψεις ποσοστών βλαβών για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες. Το μαθηματικό πρότυπο που χρησιμοποιούμε βασίζεται στην εφαρμογή της βασικής διαδικασίας αποτυχιών.<sup>28</sup>

### 5.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΠΟΤΥΧΙΩΝ

Αρχικά θα αναλυθούν οι βασικές έννοιες της εφαρμογής της βασικής διαδικασίας αποτυχιών. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για να προβλέψει τα ποσοστά βλαβών των μηχανικών εξαρτημάτων υπό διαφορετικές καταστάσεις (παράγοντες περιβαλλοντικής καταπόνησης, λειτουργούν καθήκον κ.λ.π.), με την κατασκευή ενός μαθηματικού προτύπου. Η βασική μορφή αυτού του προτύπου μπορεί να φανεί στην **σχέση 5.1**.<sup>38</sup>

$$\lambda_{XA} = \lambda_0(K_1 \times K_2 \times \dots \times K_n) \times p(A) \quad (\text{Σχέση 5.1})$$

Όπου,

$\lambda_{XA}$  το ποσοστό αποτυχίας που έχει προβλεφθεί για το X εξάρτημα στην κατάσταση A

$\lambda_0$  ολικό ποσοστό αποτυχίας για εξαρτήματα παρόμοια με το X

$K_i$  ο παράγοντας καταπόνησης για καταπόνηση i

$p(A)$  αναλογία αποτυχιών στην κατάσταση A

### 5.4 ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην **σχέση 5.1** εξαρτώνται από την πολυπλοκότητα του συστήματος που πρόκειται να αναλυθεί. Προφανώς ο προσδιορισμός των επιπέδων αξιοπιστίας για τα παράκτια αιολικά πάρκα θα απαιτήσει μια απλουστευμένη μορφή αυτού του τύπου. Μια αντιπροσώπευση αυτής της απλουστευμένης μορφής φαίνεται στην **σχέση 5.2**.<sup>38</sup>

$$\lambda_{XA} = \lambda_0 \times K_1 \times K_2 \times \rho(A)$$

(σχέση 5.2)

Όπου,

$K_1$  ο παράγοντας καταπόνησης περιβάλλοντος

$K_2$  ο παράγοντας καταπόνησης ονομαστικής κατάταξης εξαρτημάτων

Όπως φαίνεται οι μεταβλητές καταπόνησης που χρησιμοποιούνται στον απλουστευμένο μαθηματικό τύπο θα περιοριστούν σε δύο. Μία που εισαγάγει τις θαλάσσιες περιβαλλοντικές συνθήκες και μία που εισάγει την ονομαστική κατάταξη των εξαρτημάτων. Προφανώς μπορούμε να συνειδητοποιήσουμε ότι ακριβείς τιμές για τους παράγοντες καταπόνησης δεν υπάρχουν, εντούτοις βασισμένοι σε συναφείς περιστάσεις θα χρησιμοποιηθεί μια αντιπροσωπευτική σειρά.

#### 5.4.1 Παράγοντας περιβαλλοντικής καταπόνησης $K_1$ ('Environmental stress factor')

Ο παράγοντας περιβαλλοντικής καταπόνησης  $K_1$  μπορεί να οριστεί ως η επίδραση που έχουν οι εξωτερικές καιρικές συνθήκες στην αξιοπιστία ενός εξαρτήματος.<sup>38</sup> Για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες δύο γενικοί παράγοντες περιβαλλοντικής καταπόνησης μπορούν να συνδεθούν, οι παράγοντες καταπόνησης προφυλαγμένων και εκτεθειμένων εξαρτημάτων.<sup>38</sup> Έτσι μπορεί να εισαχθεί μια σειρά τιμών στον τύπο, οι οποίες αντιπροσωπεύουν ένα εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών από τις πιο ήπιες στις πιο ακραίες. Στον **πίνακα 5.1** βλέπουμε μια σειρά τιμών για τον παράγοντα περιβαλλοντικής καταπόνησης  $K_1$ .<sup>38</sup>

**Πίνακας 5.1:** παράγοντας περιβαλλοντικής καταπόνησης εξαρτημάτων σε διάφορες συνθήκες, πίνακας βασισμένος στην αναφορά [38]

Περιβαλλοντικές συνθήκες	$K_1$
Σε ιδεατές, σταθερές συνθήκες	0,1
Σε ελεγχόμενο περιβάλλον χωρίς κραδασμούς	0,5
Γενική χρήση, επίγειο	1
Σε πλοίο σε σημείο που προφυλάσσεται ('Ship sheltered')	1,5

Σε πλοίο σε σημείο που εκτίθεται ('Ship exposed')	2
Σε αυτοκινητόδρομο	3
Σε σιδηροδρομική γραμμή	4
Στον αέρα	10
Στο διάστημα	100

Έτσι για τον παράγοντα περιβαλλοντικής καταπόνησης  $K_1$  θα χρησιμοποιηθεί ένα εύρος τιμών από 1,5 έως 2, το οποίο αντιστοιχεί στις συνθήκες που αφορούν τις παράκτιες ανεμογεννήτριες, σύμφωνα με τον **πίνακα 5.1**.

#### 5.4.2 Διαβαθμισμένος παράγοντας καταπόνησης $K_2$ ('Rating stress factor')

Ο διαβαθμισμένος παράγοντας καταπόνησης  $K_2$ , μπορεί να οριστεί ως η επίδραση που θα έχουν οι διαφορετικές μέσες εκτιμήσεις λειτουργίας στην αξιοπιστία ενός συστήματος.<sup>38</sup> Για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες αυτός ο παράγοντας συνδέεται στενά με τον παράγοντα αποδοτικότητας.

Ο παράγοντας αποδοτικότητας είναι απλά η πραγματική ενεργειακή παραγωγή των ανεμογεννητριών ανά έτος, διαιρεμένη με την ενεργειακή παραγωγή εάν η μηχανή χρησιμοποιείτο στα επίπεδα της ονομαστικής της ισχύος για ολόκληρο το χρόνο.<sup>39</sup> Επιπλέον είναι γνωστό ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μιας ανεμογεννήτριας καθορίζεται από τη μέση ταχύτητα των ανέμων της περιοχής που βρήσκειται.<sup>39</sup> Έτσι ανάλογα με τη ταχύτητα του ανέμου η ίδια ανεμογεννήτρια μπορεί να έχει διαφορετικές τιμές του παράγοντα αποδοτικότητας και λαμβάνοντας υπόψη ότι στις παράκτιες ζώνες πνέουν κατά μέσο όρο άνεμοι υψηλότερων ταχυτήτων, είναι προφανές ότι ο παράγοντας αποδοτικότητας θα είναι επίσης υψηλότερος.<sup>2</sup>

Σύμφωνα με μετρήσεις που διεξήχθησαν, ο παράγοντας αποδοτικότητας για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες μπορεί να κυμανθεί από 18% έως 28%, με μια μέση τιμή του 25%, όπου στις παράκτιες ανεμογεννήτριες αυξάνεται σε μια μέση τιμή της τάξης του 34,2% σήμερα και στο κοντινό μέλλον αναμένεται να φτάσει σε τιμές κοντά στο 45%.<sup>40,41</sup> Έτσι θα πρέπει να παραχθούν διαφορετικές τιμές για τον διαβαθμισμένο παράγοντα καταπόνησης για ανεμογεννήτριες με διαφορετικούς

παράγοντες αποδοτικότητας. Ο **πίνακας 5.2** μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συνδέσει τους λειτουργικούς παράγοντες αποδοτικότητας των χερσαίων ανεμογεννητριών με αυτούς των παράκτιων.

**Πίνακας 5.2:** διαβαθμισμένος παράγοντας καταπόνησης, πίνακας βασισμένος στην αναφορά [38]

Εκατοστιαία ονομαστική κατάταξη εξαρτημάτων (‘Percentage of component nominal rating’)	$K_2$
140	4
120	2
100	1
80	0,6
60	0,3
40	0,2
20	0,1

Με την ανάλυση των στοιχείων του **πίνακα 5.2** σχετικά με τον παράγοντα καταπόνησης  $K_2$  διαπιστώνεται ότι οι τιμές ακολουθούν μία εκθετική ακολουθία βασισμένη στην **σχέση 5.3**.

$$y=0,0541e^{0,0301x} \quad (\text{σχέση 5.3})$$

Επεξεργαζόμενοι την εκατοστιαία ονομαστική κατάταξη των εξαρτημάτων του **πίνακα 5.2**, μπορούμε μαζί με τον παράγοντα αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών να υπολογίσουμε και τον παράγοντα καταπόνησης  $K_2$ . Επιπλέον η ακόλουθη **σχέση 5.4** θα χρησιμοποιηθεί για να συνδέσει τον παράγοντα καταπόνησης  $K_2$  των χερσαίων ανεμογεννητριών (‘onshore’), με των παράκτιων (‘offshore’).

$$I_{offshore} = K_1 x \frac{K_{2offshore}}{K_{2onshore}} I_{onshore} \quad (\text{σχέση 5.4})$$



Έτσι διαπιστώνεται ότι οι παράγοντες αποδοτικότητας 34.2% και 45% για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες θα ισούται με τον παράγοντα καταπόνησης  $K_2$  1.32 και 1.829 αντίστοιχα.

Εντούτοις μπορεί να γίνει κατανοητό ότι η καλύτερη προσέγγιση στη χρησιμοποίηση των δύο παραγόντων καταπόνησης δεν είναι να εισαχθούν στην εξίσωση οι ακριβείς τιμές τους, αλλά ένα εύρος τιμών του πρώτου και ο ακριβής αριθμός του άλλου. Με αυτόν τον τρόπο θα ερευνηθεί μια σειρά περιβαλλοντικών όρων και ένα εύρος ανέμων, όσον αφορά την επίδραση τους στην αξιοπιστία των ανεμογεννητριών. Θα δημιουργηθεί λοιπόν ένα σύνολο εξισώσεων βασισμένες στην απλουστευμένη **σχέση 5.2**. Θα χρησιμοποιηθούν λοιπόν δύο τιμές για τον παράγοντα καταπόνησης  $K_2$ , αντιπροσωπεύοντας τα τρέχοντα και μελλοντικά παράκτια προγράμματα αέρα σύμφωνα με τον παράγοντα αποδοτικότητάς τους και οι τιμές για τον παράγοντα καταπόνησης  $K_1$  θα είναι μεταβλητές.

#### **Εν ενεργεία παράκτιες ανεμογεννήτριες**

$$\lambda_{XA} = \lambda_0 \times K_1 \times 1,32 \times p(A) \quad (\text{σχέση 5.5})$$

#### **Μελλοντικές παράκτιες ανεμογεννήτριες**

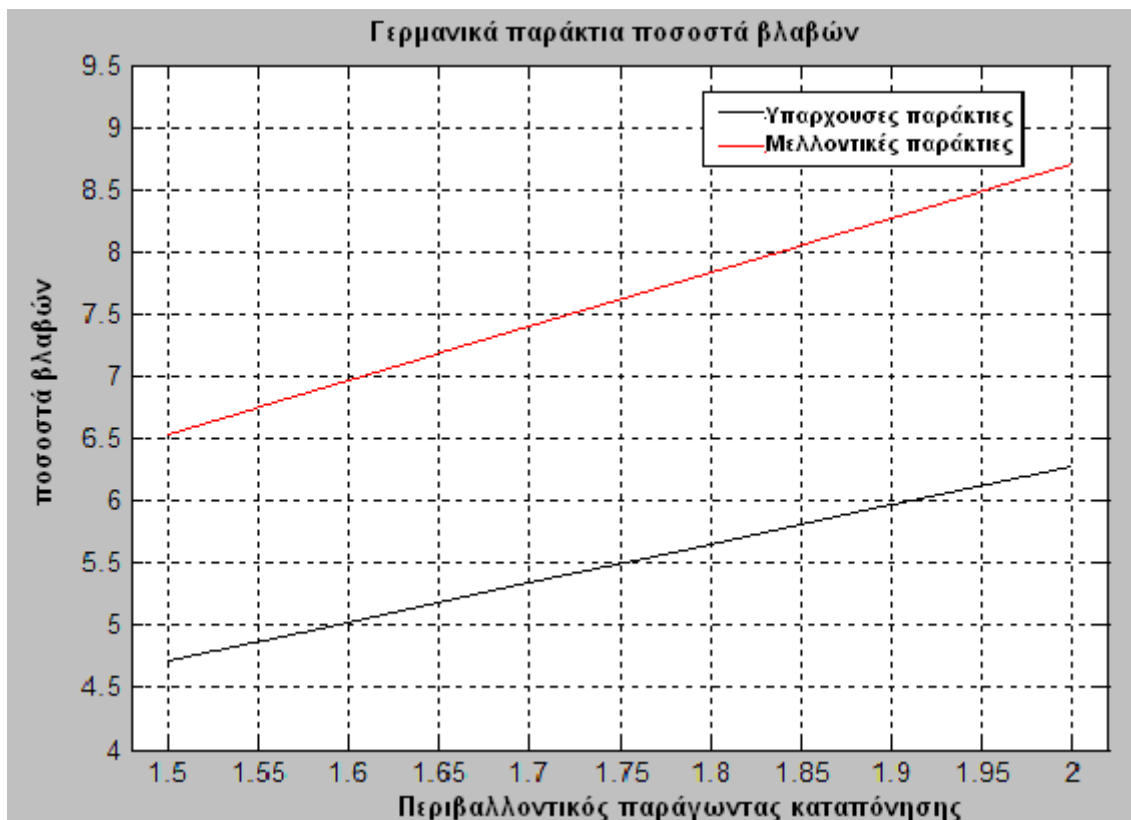
$$\lambda_{XA} = \lambda_0 \times K_1 \times 1,829 \times p(A) \quad (\text{σχέση 5.6})$$

### **5.5 ΠΟΣΟΣΤΑ ΒΛΑΒΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

Σε αυτό το σκέλος θα εφαρμόσουμε τις **σχέσεις 5.5** και **5.6** που δημιουργήσαμε προηγουμένως στα δεδομένα τριών διαφορετικών χωρών, της Γερμανίας, της Σουηδίας και της Δανίας, προκειμένου να προβλέψουμε τα ποσοστά βλαβών για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες.

### 5.5.1 Γερμανία: ποσοστά βλαβών παράκτιων ανεμογεννητριών

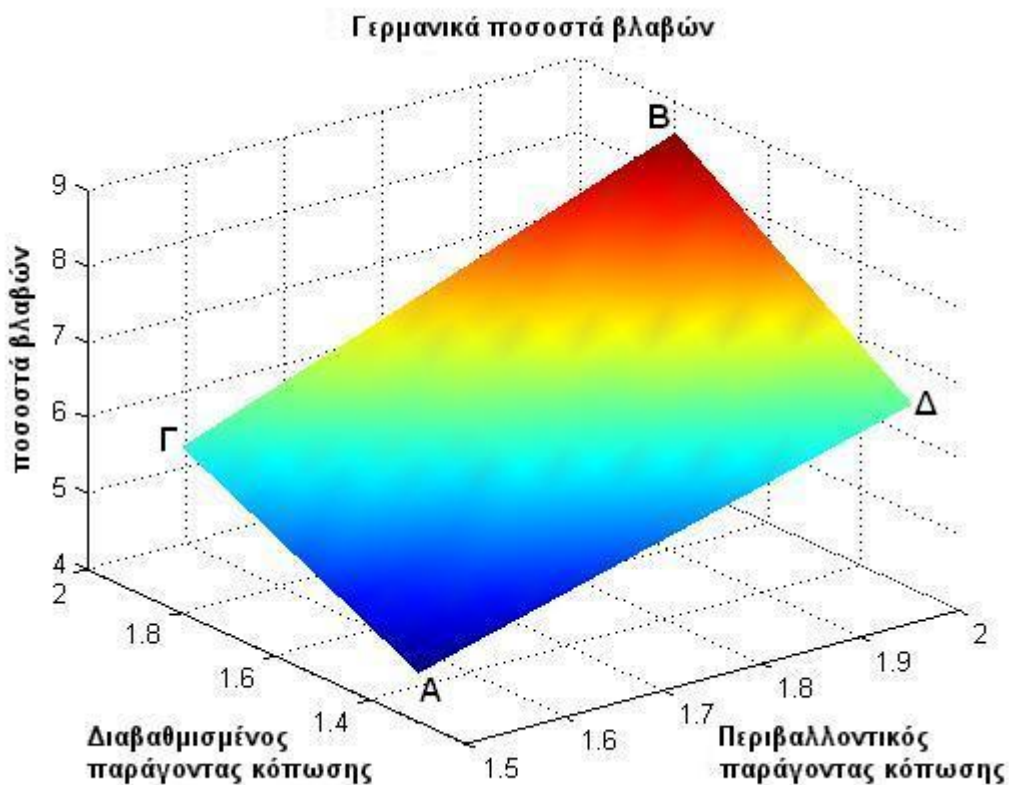
Αρχικά θα προβλέψουμε το μέσο όρο των ποσοστών βλαβών των Γερμανικών παράκτιων ανεμογεννητριών, λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία που βρέθηκαν στο κεφάλαιο 4.5. Το μέσο ποσοστό βλαβών για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες υπολογίστηκε ότι είναι 2,38. Έτσι με την αντικατάσταση των κατάλληλων τιμών (ποσοστά βλαβών και εύρος παράγοντα περιβαλλοντικής καταπόνησης) στις μαθηματικές **εξισώσεις 5.5** και **5.6**, δημιουργούνται οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις.



**Σχήμα 5.1:** Γραφική παράσταση ποσοστού βλαβών υπαρχουσων και μελλοντικων παρακτιων αιολικων παρκων στη Γερμανια, γράφημα προμηθευμένο από το ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, πρόγραμμα matlab.

Στο **σχήμα 5.1** φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις για δύο διαφορετικούς παράγοντες αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών. Η μαύρη και κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύουν τα τρέχοντα και μελλοντικά παράκτια προγράμματα ανεμογεννητριών αντίστοιχα. Παρατηρώντας τη γραφική παράσταση βλέπουμε ότι η

αξιοπιστία των ανεμογεννητριών επηρεάζεται και από τον περιβαλλοντικό και από τον διαβαθμισμένο παράγοντα κόπωσης. Εντούτοις μετά από μια πιο λεπτομερή επιθεώρηση και στις δύο γραφικές παραστάσεις, μπορεί να γίνει κατανοητό ότι ο διαβαθμισμένος παράγοντας κόπωσης (για τις μελλοντικές ανεμογεννήτριες) όχι μόνο αυξάνει το ποσοστό βλαβών των ανεμογεννητριών, αλλά έχει και επιπτώσεις στην κλίση της γραμμής του ποσοστού αποτυχίας την οποία καθιστά πιο απότομη. Αυτό έχει σαν συνέπεια να καταστήσει τον αντίκτυπο του παράγοντα περιβαλλοντικής καταπόνησης στην αξιοπιστία των ανεμογεννητριών πιο δριμύ. Στη συνέχεια βλέπουμε μια πρόσθετη τρισδιάστατη γραφική παράσταση που παρουσιάζει τα ποσοστά βλαβών των Γερμανικών παράκτιων ανεμογεννητριών, **σχήμα 5.2**



**Σχήμα 5.2:** Γραφική παράσταση του ποσοστού βλαβών με τους δύο παράγοντες καταπόνησης να ποικίλλουν, γράφημα προμηθευμένο από το ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, πρόγραμμα matlab.

Όπως φαίνεται από το **σχήμα 5.2** το ποσοστό βλαβών της ανεμογεννήτριας επηρεάζεται και από τους δύο παράγοντες καταπόνησης. Με την αύξηση της τιμής οποιουδήποτε παράγοντα καταπόνησης το ποσοστό βλαβών αυξάνει. Για μια

καλύτερη κατανόηση της τρισδιάστατης γραφικής παράστασης εξηγούνται παρακάτω τέσσερα σημεία κλειδιά.

**A** Σε αυτό το σημείο και οι δύο παράγοντες καταπόνησης  $K_1$  (περιβαλλοντικός) και  $K_2$  (διαβαθμισμένος) έχουν την ελάχιστη τιμή τους. Συνεπώς το ποσοστό βλαβών είναι το χαμηλότερο δυνατό.

**B** Σε αυτό το σημείο και οι δύο παράγοντες καταπόνησης  $K_1$  και  $K_2$  έχουν την μέγιστη τιμή τους. Συνεπώς το ποσοστό βλαβών είναι το υψηλότερο δυνατό.

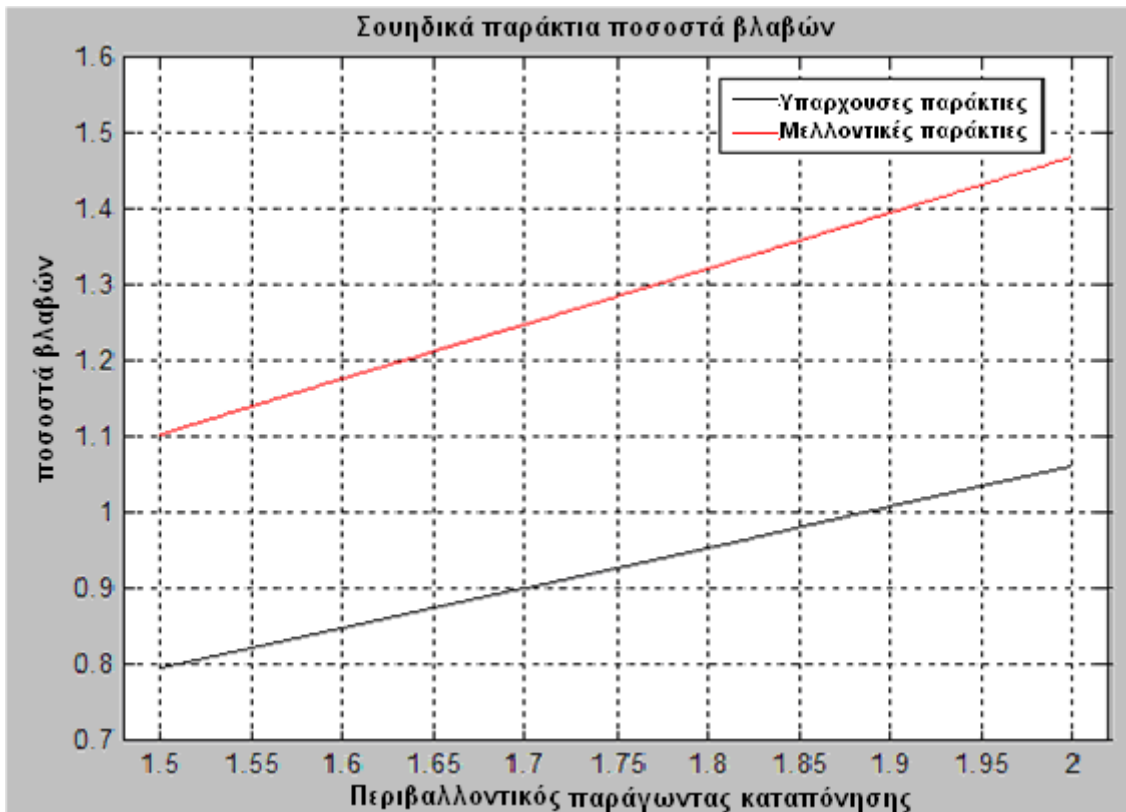
**Γ** Σε αυτό το σημείο ο παράγοντας καταπόνησης  $K_1$  (περιβαλλοντικός) έχει την ελάχιστη τιμή του και ο παράγοντας καταπόνησης  $K_2$  (διαβαθμισμένος) έχει τη μέγιστη τιμή του.

**Δ** Σε αυτό το σημείο ο παράγοντας καταπόνησης  $K_1$  (περιβαλλοντικός) έχει τη μέγιστη τιμή του και ο παράγοντας καταπόνησης  $K_2$  (διαβαθμισμένος) έχει την ελάχιστη τιμή του.

Εντούτοις πρέπει να επισημανθεί ότι με την αύξηση του διαβαθμισμένου παράγοντα καταπόνησης, η επιρροή του παράγοντα περιβαλλοντικής κόπωσης στην αξιοπιστία της ανεμογεννήτριας είναι πιο έντονη. Για αυτόν τον λόγο η τρισδιάστατη γραφική παράσταση δεν είναι συμμετρική. Επιπλέον μπορεί να παρατηρηθεί ότι μέσα στο μπλε και ανοικτό μπλε χρώμα είναι η περιοχή που αντιστοιχεί στις τρέχοντες ανεμογεννήτριες όπου τα ποσοστά βλαβών δεν είναι πολύ υψηλά και μέσα στο κόκκινο και σκούρο κόκκινο χρώμα είναι η περιοχή που αντιστοιχεί στις μελλοντικές ανεμογεννήτριες όπου τα ποσοστά αποτυχίας είναι εξαιρετικά υψηλά.

### **5.5.2 Σουηδία: ποσοστά βλαβών παράκτιων ανεμογεννητριών**

Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, για να γίνει η πρόβλεψη των μέσων ποσοστών βλαβών για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες που βρίσκονται στη Σουηδία, θα χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία από την παράγραφο 4.5. Έτσι λαμβάνοντας υπόψη το χερσαίο μέσο ποσοστό βλαβών που βρέθηκε 0,402 και εφαρμόζοντας το στις μαθηματικές **εξισώσεις 5.5** και **5.6**, βρίσκουμε το εύρος του ποσοστού βλαβών για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες και σχεδιάζουμε την ακόλουθη γραφική παράσταση.



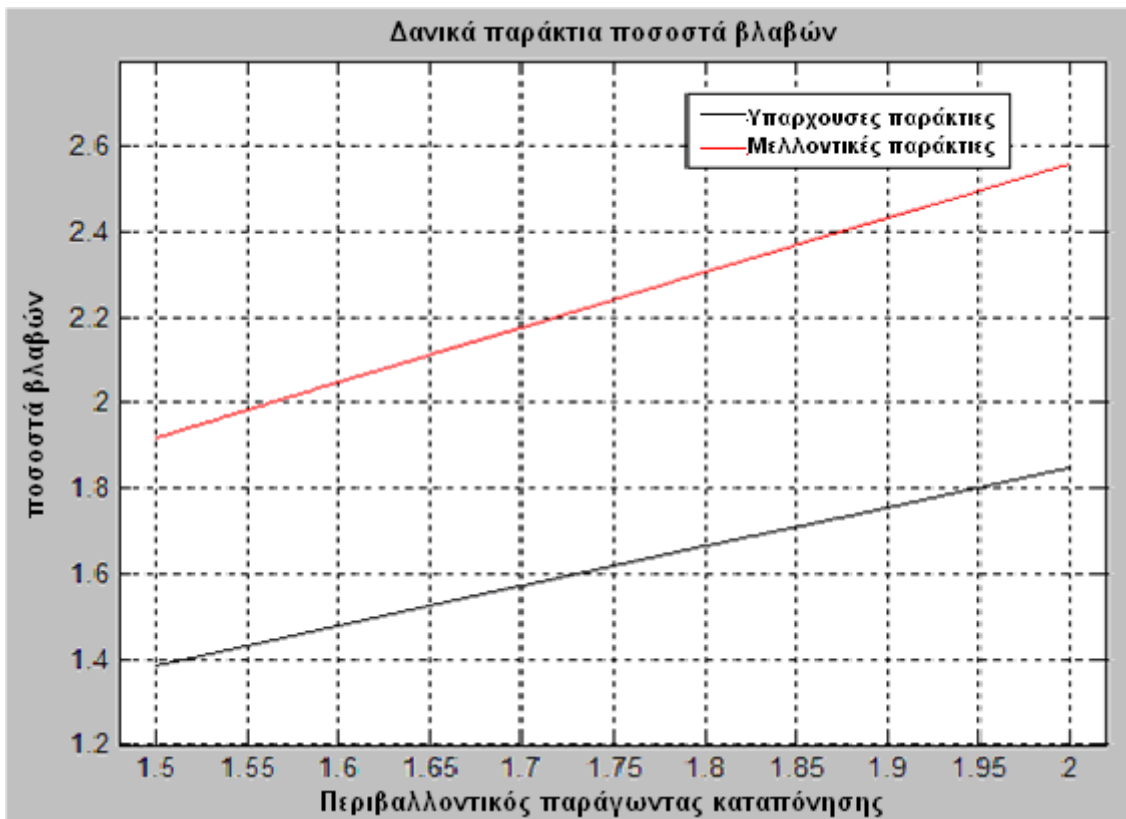
**Σχήμα 4.3:** Γραφική παράσταση ποσοστού βλαβών υπάρχουσων και μελλοντικών παράκτιων αιολικών πάρκων στη Σουηδία, γράφημα προμηθευμένο από το ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, πρόγραμμα matlab.

Όπως στις γραφικές παραστάσεις προβλέψεων για τη Γερμανία, οι δύο διαφορετικοί παράγοντες αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών διακρίνονται στην μαύρη και στη κόκκινη, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τα τρέχοντα και μελλοντικά παράκτια προγράμματα ανεμογεννητριών αντίστοιχα. Εντούτοις σε αυτήν την γραφική παράσταση μπορεί να φανεί ότι τα ποσοστά βλαβών και για τις τρέχοντες και για τις μελλοντικές ανεμογεννήτριες, είναι σημαντικά χαμηλότερα από αυτών που βρίσκονται για τη Γερμανία. Αυτό εμφανίζεται επειδή τα χερσαία επίπεδα αξιοπιστίας των ανεμογεννητριών για τη Σουηδία είναι σημαντικά χαμηλότερα από τα Γερμανικά.

### 5.5.3 Δανία: ποσοστά βλαβών παράκτιων ανεμογεννητριών

Τέλος χρησιμοποιώντας τα ποσοστά βλαβών του κεφαλαίου 4.5, θα γίνει πρόβλεψη και για τα μέσα ποσοστά βλαβών για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες που βρίσκονται στη Δανία. Έτσι λαμβάνοντας υπόψη το χερσαίο μέσο ποσοστό βλαβών που βρέθηκε να είναι 0,7 και με την εφαρμογή του στις μαθηματικές **εξισώσεις 5.5**

και 5.6 παράγεται το εύρος του ποσοστού βλαβών για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες και δημιουργείται η ακόλουθη γραφική παράσταση.



**Σχήμα 5.4:** Γραφική παράσταση ποσοστού βλαβών υπαρχουσων και μελλοντικών παράκτιων αιολικών πάρκων στη Δανία, γράφημα προμηθευμένο από το ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, πρόγραμμα matlab.

Τα αποτελέσματα που φαίνονται στο **σχήμα 5.3** σχετικά με τα ποσοστά βλαβών των παράκτιων ανεμογεννητριών που βρίσκονται στη Δανία, παρουσιάζουν αποτελέσματα παρόμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Εντούτοις προκειμένου να είμαστε σε θέση να καταλάβουμε τις διαφορές της αξιοπιστίας και στις τρεις χώρες που αναλύσαμε, θα παρουσιάσουμε έναν συνοπτικό πίνακα με τα ποσοστά βλαβών για όλους τους τύπους των ανεμογεννητριών που ερευνήθηκαν, χερσαίες και παράκτιες, τρέχοντες και μελλοντικές.

**Πίνακας 5.3:** Ποσοστά βλαβών ανεμογεννητριών, πίνακας βασισμένος στις αναφορές [9,10]

	Χερσαίες	Παράκτιες(Υπάρχουσες)	Παράκτιες(Μελλοντικές)
Γερμανία	2,38	4,712	8,706
Σουηδία	0,7	1,386	2,56
Δανία	0,402	0,796	1,47

Σύμφωνα με τον **πίνακα 5.3** το θαλάσσιο περιβάλλον έχει σοβαρές επιπτώσεις στην αξιοπιστία μιας ανεμογεννήτριας. Στις εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες βλέπουμε σχεδόν τον διπλασιασμό της πτώσης των επιπέδων αξιοπιστίας και στα μελλοντικά αιολικά προγράμματα τα επίπεδα αξιοπιστίας μειώνονται σχεδόν τέσσερις φορές.

## 5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύξαμε ένα μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για να προβλέψει τα ποσοστά βλαβών των παράκτιων ανεμογεννητριών, με τη χρησιμοποίηση των στοιχείων των ποσοστών βλαβών που συλέχθηκαν από τις χερσαίες ανεμογεννήτριες. Επιπλέον δημιουργήθηκαν οι γραφικές παραστάσεις που αντιπροσωπεύουν την πτώση στην αξιοπιστία για τις τρέχοντες και μελλοντικές παράκτιες ανεμογεννήτριες για τρεις διαφορετικές χώρες. Τέλος διαπιστώθηκε ότι τα ποσοστά βλαβών των ανεμογεννητριών όταν τοποθετούνται σε παράκτιες θέσεις θα διπλασιαστούν στην καλύτερη και θα τετραπλασιάσουν στη χειρότερη περίπτωση.

## 6. ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο τέταρτο κεφάλαιο καταλήξαμε ότι το σύστημα που είναι κυρίως υπεύθυνο για τα υψηλά ποσοστά βλαβών των σύγχρονων ανεμογεννητριών, είναι το ηλεκτρικό. Για αυτό θα γίνει μια περαιτέρω έρευνα σε αυτόν τον τομέα σε ότι αφορά τα ζητήματα αξιοπιστίας και θα παρασχεθούν λύσεις για τη βελτίωση της αξιοπιστίας τους.

### 6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Αρχικά θα πρέπει να ταξινομήσουμε τα κύρια εξαρτήματα των ηλεκτρικών συστημάτων που είναι υπεύθυνα για τις βλάβες. Στον ακόλουθο **πίνακα 5.1** φαίνονται τα ηλεκτρικά εξαρτήματα που βρίσκονται στη γερμανική βάση δεδομένων 'WMEP'.

**Πίνακας 6.1:** Τμήματα των ηλεκτρικών συστημάτων, πίνακας βασισμένος στην αναφορά [34]

Ηλεκτρικά συστήματα
Μετατροπέας ('converter')
Ασφάλειες ('fuses')
Καλώδια/συνδέσεις
Ηλεκτρικά σχετικά με το δίκτυο διανομής

Από τον **πίνακα 6.1** το κύριο εξάρτημα που αποτυγχάνει ή που προκαλεί άλλες βλάβες είναι ο μετατροπέας, συγκεκριμένα ο αναστροφέας ('inverter'). Το βασικό σχέδιο του αναστροφέα εξηγήθηκε νωρίτερα στην παράγραφο 3.4.3 και αναφέρθηκαν οι πιο κοινοί ηλεκτρονικοί διακόπτες ισχύος που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες.



### 6.3 ΑΙΤΙΕΣ ΒΛΑΒΩΝ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ

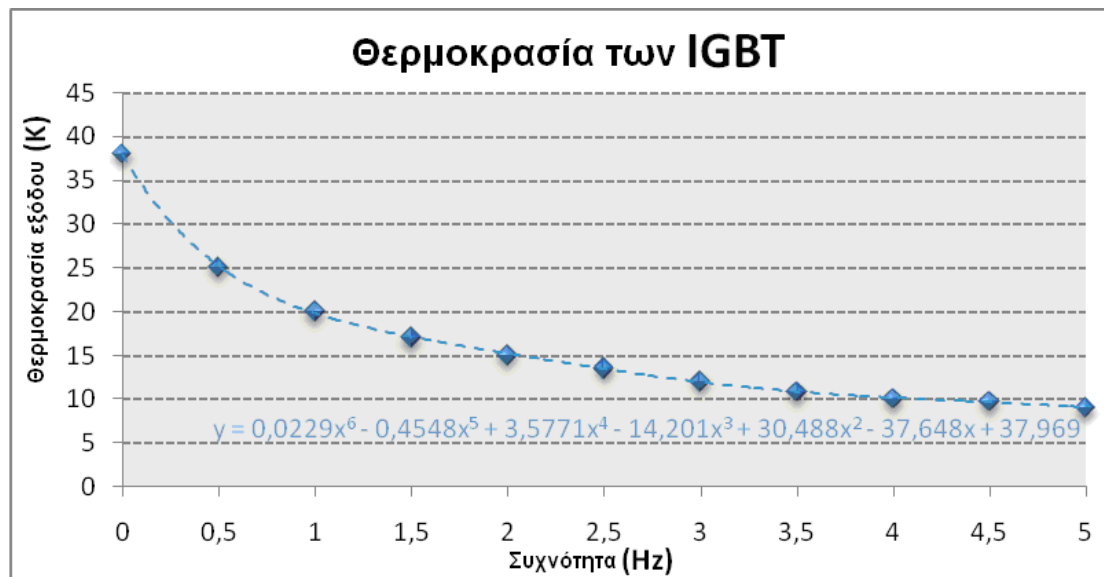
Παρά το γεγονός ότι τα ηλεκτρονικά ισχύος έχουν μικρά ποσοστά αποτυχίας, τα επίπεδα αξιοπιστίας των αναστροφέων στις ανεμογεννήτριες είναι σημαντικά χαμηλά. Προφανώς μπορεί να γίνει κατανοητό ότι τα υψηλά ποσοστά βλαβών συνδέονται άμεσα με το φορτίο λειτουργίας των ανεμογεννητριών ('load condition'), που έχει να κάνει με την παραγωγή ρεύματος μέγιστου μήκους κύματος σε πολύ χαμηλές συχνότητες ('full output current at very low output frequencies').<sup>43</sup> Επιπλέον είναι ζωτικής σημασίας να επισημανθεί ότι η λειτουργία και ο τύπος του αναστροφέα εξαρτώνται από τον τρόπο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Για παράδειγμα μία ανεμογεννήτρια άνευ κιβωτίου ταχυτήτων χρησιμοποιεί έναν πλήρως διαβαθμισμένο αναστροφέα ('fully scaled inverter') που συνδέεται άμεσα με το δίκτυο, όταν μια διπλής τροφοδοσίας επαγωγική ανεμογεννήτρια, χρησιμοποιεί έναν μερικής διαβάθμισης αναστροφέα ('partial scale inverter') συνδεδεμένο με τον στροφέα. Εντούτοις σύμφωνα με την έρευνα οι περισσότερες από τις εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες που λειτουργούν σήμερα είναι εξοπλισμένες με τις διπλής τροφοδοσίας επαγωγικές γεννήτριες με τους μερικής διαβάθμισης αναστροφέες.<sup>15</sup> Έτσι θα ερευνηθούν οι αιτίες βλαβών για αυτούς τους τύπους ανεμογεννητριών.

Για την ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας που εξοπλίζεται με την διπλής τροφοδοσίας επαγωγική γεννήτρια, ο κύριος λόγος βλαβών για τους ημιαγωγούς ισχύος ('power semiconductors') 'IGBT', είναι ότι τις περισσότερες φορές λειτουργούν μέσα στα μέγιστα επιτρεπτά θερμοκά πλαίσια.<sup>43</sup> Ο λόγος της εμφάνισης θερμικών καταπονήσεων στον αναστροφέα έχει να κάνει με βασικές αρχές λειτουργίας της γεννήτριας. Είναι γνωστό ότι μια διπολική μηχανή έχει μια σύγχρονη ταχύτητα 1500<sup>ωv</sup> στροφών/λεπτό σε συχνότητα 50 Hz.<sup>43</sup> Αυτό σημαίνει ότι ο αναστροφέας πρέπει να παραδώσει την δύναμη διέγερσης ('excitation energy') μέσα σε εύρος συχνότητας από 16,6 Hz (δεξιόστροφο) σε μηδέν Hertz (σύγχρονη γεννήτρια) και σε 16,6 Hz (αριστερόστροφο).

Από το θερμικό πρότυπο του 'IGBT' είναι γνωστό ότι ο σταθερός θερμικός χρόνος των διακοπών είναι μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου και ότι η θερμική ικανότητα ανακύκλωσης είναι ακόμα περιορισμένη.<sup>43</sup> Ως εκ τούτου, αυτό σημαίνει ότι ο αναστροφέας που συνδέεται με τον ρότορα της επαγωγική γεννήτριας διπλής

τροφοδοσίας, λειτουργεί τις περισσότερες φορές μέσα στα πλαίσια της μέγιστης θερμικής καταπόνησης των μερικών μόνο 'Hertz', όπου η θερμοκρασία διακοπής ακολουθεί την περίοδο κάθε ημιτονοειδούς κύματος του παραγόμενου ρεύματος.<sup>43</sup>

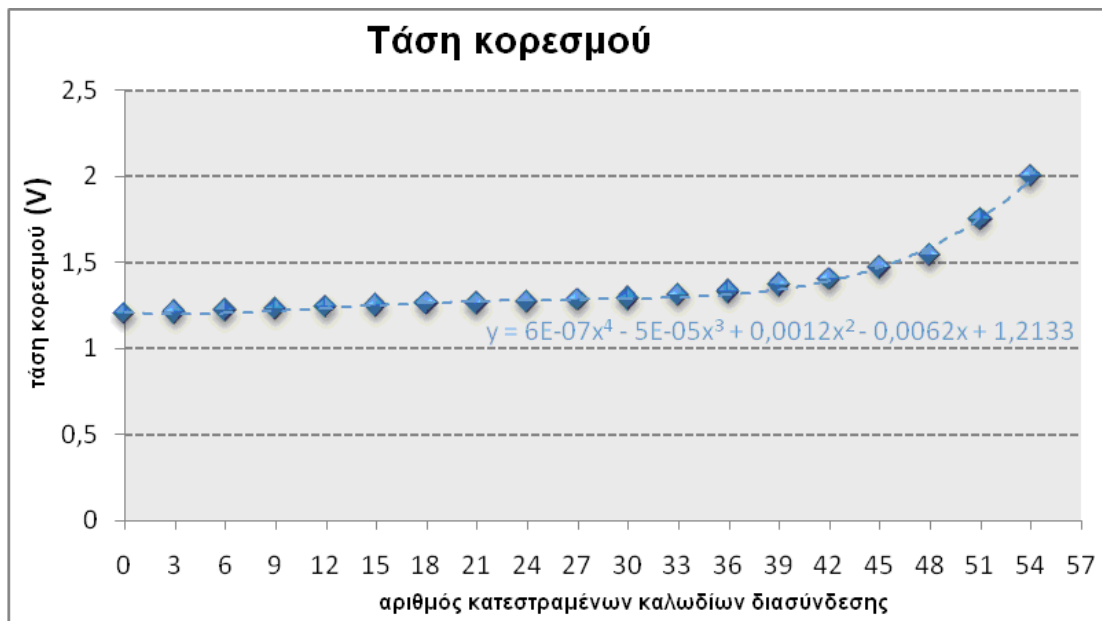
Με τη βοήθεια του **σχήματος 6.1** βλέπουμε την ακριβή θερμοκρασία του 'IGBT', σύμφωνα με τη συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος. Όπως φαίνεται, η ταλάντευση της θερμοκρασίας αυξάνεται με τις χαμηλότερες συχνότητες.



**Σχήμα 6.1:** Θερμοκρασία του 'IGBT' σε σχέση με τη συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [43]

Ο αντίκτυπος της υψηλής θερμοκρασίας στα 'IGBT' είναι η εμφάνιση ζημιών στα καλώδια σύνδεσης. Εντούτοις προκειμένου να εκτιμήσουμε την αναμενόμενη διάρκεια ζωής για τα 'IGBT', πρέπει να βρεθεί πόσο θα αυξηθεί η τάση κορεσμού ('saturation voltage') εάν τα καλώδια των συνδέσεων καταστραφούν.<sup>43</sup>

Το **σχήμα 6.2** μας δίνει μια σχέση μεταξύ της τάσης κορεσμού και των καλωδίων των συνδέσεων με το δίκτυο διανομής.



**Σχήμα 6.2:** Τάση κορεσμού των 'IGBT' σε σχέση με τα χαλασμένα καλώδια διασύνδεσης, γράφημα βασισμένο στην αναφορά [43]

Όπως φαίνεται στο **σχήμα 6.2**, στην αρχή η αύξηση της τάσης κορεσμού είναι αρκετά σταθερή, περίπου 2 MV, εντούτοις στο τέλος τα καλώδια που απομένουν λειτουργούν σαν ασφάλειες και εκρήγνυνται άμεσα.<sup>43</sup>

#### 6.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

Το προκαταρκτικό μέρος για την παροχή λύσεων σε ένα πρόβλημα είναι ο προσδιορισμός των αιτίων. Έτσι για τον μετατροπέα ισχύος στις ανεμογεννήτριες σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο, τα κύρια προβλήματα προέρχονται από το ύψος των φορτίων στο οποίο πρέπει να λειτουργήσει. Εντούτοις είναι σαφές ότι δεν μπορούν να γίνουν εύκολα αλλαγές στο ύψος φόρτωσης, άρα θα πρέπει να υιοθετηθεί μια διαφορετική προσέγγιση στην επίλυση του προβλήματος. Ο επανασχεδιασμός των μετατροπέων είναι η απλούστερη αλλά συγχρόνως και πιο δαπανηρή λύση. Για τον επανασχεδιασμό λοιπόν δύο διαφορετικές λύσεις μπορούν να προταθούν, η χρησιμοποίηση 'n συν μίας' διάταξης πλεονασμού ('n plus one redundancy') ή η χρησιμοποίηση καλύτερου συστήματος ψύξης.

Η χρήση της 'n συν μίας' διάταξης πλεονασμού βασικά μεγαλώνει το σύστημα έτσι ώστε να υπάρχει τουλάχιστον μια περισσότερη μονάδα, από το ελάχιστο που απαιτείται για να φέρει το φορτίο.<sup>44</sup> Έτσι για τους μετασχηματιστές ('power

converters’) μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον ‘IGBT’ για να αποτραπεί η βλάβη όταν καταστρέφεται ένα από αυτά. Προφανώς με αυτόν τον τρόπο θα επιτευχθεί αύξηση στην αξιοπιστία του συστήματος. Εντούτοις το κόστος θα αυξηθεί σημαντικά όχι μόνο εξαιτίας των πρόσθετων ημιαγωγών που απαιτούνται αλλά και επειδή αυτά τα σχέδια είναι μοναδικά και πρωτότυπα.

Η χρήση συστήματος ψύξης θα μπορούσε να αποτελέσει μια λύση του προβλήματος, δεδομένου ότι το πρόβλημα συνδέεται άμεσα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Παρόλα αυτά η παροχή ικανοποιητικής ψύξης για τους ημιαγωγούς μέσα στους μετατροπείς δεν είναι τόσο απλή. Επιπλέον είναι προφανές ότι θα απαιτούσαν μια νέα έκδοση μετασχηματιστών η οποία θα ανέβαζε το κόστος υπερβολικά.

## **6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάσαμε μια βαθύτερη έρευνα για την αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος των ανεμογεννητριών. Επιδείξαμε τα βασικά προβλήματα στους μετατροπείς (‘converters’) για τους δημοφιλέστερους τύπους ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται σήμερα και προτείναμε λύσεις για την ελαχιστοποίηση αυτών των προβλημάτων.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι να γίνουν κατανοητά τα θέματα που σχετίζονται με την αξιοπιστία λειτουργίας των χερσαίων ανεμογεννητριών και να προβλεφθούν τα επίπεδα αξιοπιστίας των παράκτιων ανεμογεννητριών, χρησιμοποιώντας μια γενερική διαδικασία αποτυχιών ('generic failure application').

Στο προκαταρκτικό μέρος ασχοληθήκαμε κυρίως με την έρευνα της υπάρχουσας τεχνολογίας των ανεμογεννητριών, εστιάζοντας στα ηλεκτρικά και τα συστήματα ελέγχου. Διαπιστώσαμε ότι κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας έγιναν πολύ σημαντικά βήματα προόδου. Οι ανεμογεννήτριες από σταθερής ταχύτητας εξελίχθηκαν και λειτουργούν τώρα με μεταβλητή ταχύτητα χωρίς την ανάγκη του κιβωτίου ταχυτήτων και τα συστήματα ελέγχου, όσον αφορά την παραγόμενη ισχύ, βελτιώθηκαν πολύ χάρη στα ηλεκτρονικά ισχύος. Τέλος ερευνήθηκαν οι νέες τεχνολογίες όσον αφορά τη μεταφορά της ενέργειας και παρουσιάστηκαν εναλλακτικές λύσεις για τα προβλήματα που θα εμφανιστούν στα παράκτια αιολικά πάρκα.

Το κύριο μέρος στράφηκε κυρίως στα προβλήματα αξιοπιστίας των τρεχόντων και μελλοντικών ανεμογεννητριών. Στο πρώτο τμήμα ερευνήθηκε η αξιοπιστία των εν ενεργεία χερσαίων ανεμογεννητριών. Χάρη στην έρευνα που έγινε και βασίστηκε σε διάφορες υπάρχουσες βάσεις δεδομένων μελετών της αξιοπιστίας ('reliability case studies') και ποσοστών αποτυχίας, προσδιορίστηκαν τέσσερις καίριες περιοχές σχετικές με την αξιοπιστία ανεμογεννητριών και αναλύθηκαν τα ποσοστά βλαβών ανά εξάρτημα, η σχέση μεταξύ της αξιοπιστίας και του τύπου ανεμογεννήτριας, κατατάσσοντας τις αιτίες των βλαβών και την μέση διαθεσιμότητα.

Τα κύρια εξαγόμενα αυτής της έρευνας είναι τα εξής:

- Τα βασικά συστήματα τα οποία είναι αρμόδια για τα υψηλά ποσοστά βλαβών, είναι τα συστήματα ελέγχου και τα ηλεκτρικά. Συγκεκριμένα τα ηλεκτρονικά ισχύος του ηλεκτρικού συστήματος.
- Η διαθεσιμότητα συσχετίζεται άμεσα με τα ποσοστά βλαβών και μέσο χρόνο επισκευής.
- Τα ποσοστά βλαβών αυξάνουν παράλληλα με το μέγεθος των ανεμογεννητριών.
- Η αξιοπιστία των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών βελτιώνεται με το χρόνο.

Το επόμενο τμήμα ασχοληθήκαμε με την αξιοπιστία των παράκτιων ανεμογεννητριών. Χάρη στο μαθηματικό πρότυπο που δημιουργήθηκε, παραγάγαμε μια σειρά τιμών σχετικά με τα επίπεδα αξιοπιστίας των εν ενεργεία και των μελλοντικών παράκτιων αιολικών πάρκων, για τρεις διαφορετικές χώρες. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς, διαπιστώθηκε ότι τα ποσοστά βλαβών των παράκτιων ανεμογεννητριών αυξάνουν σημαντικά, φτάνοντας σχεδόν να γίνουν δύο φορές υψηλότερα στα προσεχή προγράμματα.

Στο τελευταίο τμήμα διεξήχθη μια βαθύτερη έρευνα στα ηλεκτρικά συστήματα. Διαπιστώθηκε ότι τα βασικά προβλήματα αφορούσαν τα ηλεκτρονικά ισχύος και παρήχθησαν λύσεις.

Με αυτή την μελέτη έγινε κατανοητό ότι τα επίπεδα αξιοπιστίας των υπάρχοντων ανεμογεννητριών δεν είναι επαρκή για να τις τοποθετήσουν σε παράκτιες θέσεις. Εντούτοις έχει γίνει κατανοητό ότι η αύξηση των επιπέδων αξιοπιστίας με το χρόνο και οι βελτιώσεις που εισάγονται στα υπάρχοντα συστήματα, θα διευκολύνουν στο κοντινό μέλλον την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών σε θέσεις μακριά από την ακτή.

## **7.2 ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Από αυτή τη μελέτη είχαμε δύο βασικά αποτελέσματα. Τα επίπεδα αξιοπιστίας των χερσαίων ανεμογεννητριών που βρίσκονται σε τρεις διαφορετικές χώρες και ένα σύνολο προβλέψεων του ποσοστού βλαβών για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες.

Εντούτοις έγινε κατανοητό ότι τα στοιχεία που ανακτήθηκαν για τα επίπεδα αξιοπιστίας των χερσαίων ανεμογεννητριών δεν ήταν πολύ ακριβή. Κάθε βάση δεδομένων παρείχε τα στοιχεία με διαφορετικό τρόπο και τις περισσότερες φορές χωρίς να συγκεκριμενοποιείται. Έτσι η σύγκριση συνήθως ήταν πολύ δύσκολη και έπρεπε να γίνουν πολλές υποθέσεις. Επιπλέον σχεδόν όλες οι βάσεις δεδομένων χρησιμοποίησαν κυρίως τα παλαιά πρότυπα των ανεμογεννητριών που είναι τελείως διαφορετικά από αυτούς που χρησιμοποιούμε σήμερα ή θα χρησιμοποιήσουμε στο μέλλον. Προφανώς στο μέλλον θα δημιουργηθούν πιο συγκεκριμένες βάσεις δεδομένων και θα συμμετάσχει σημαντικά μεγαλύτερος αριθμός σύγχρονων ανεμογεννητριών σε αυτές. Έτσι οι πληροφορίες που θα συγκεντρώνονται από αυτές θα είναι πιο ακριβείς και πιο εύκολα χρησιμοποιήσιμες.

Όσον αφορά το μαθηματικό πρότυπο το οποίο δημιουργήθηκε για να παραγάγει μια εκτίμηση των επιπέδων αξιοπιστίας για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες, μπορούμε να εισαγάγουμε δύο βασικά συστατικά για να το βελτιώσουμε.

Πρώτον η χρήση συγκεκριμένου παράγοντα καταπόνησης είναι βασικό σημείο για να πετύχουμε ακριβέστερα αποτελέσματα. Και ο περιβαλλοντικός παράγοντας καταπόνησης αλλά και ο διαβαθμισμένος παράγοντας συνδέονται με τις πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Έτσι είναι προφανές ότι σε κάθε γεωγραφική θέση αντιστοιχούν διαφορετικοί παράγοντες καταπόνησης. Προφανώς η παραγωγή διαφορετικού μαθηματικού προτύπου για κάθε πιθανή θέση παράκτιας εγκατάστασης αιολικών πάρκων θα ήταν σαφώς πιο ακριβής.

Δεύτερον η χρήση πιο συγκεκριμένων χερσαίων στοιχείων αξιοπιστίας. Για να είμαστε πιο ακριβής η χρήση των στοιχείων αξιοπιστίας των τεχνολογικά παρόμοιων χερσαίων ανεμογεννητριών και όχι των μέσων αποτελεσμάτων ποσοστού βλαβών διάφορων τύπων, είναι εξαιρετικά κρίσιμη. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή τα ποσοστά βλαβών των ανεμογεννητριών που λειτουργούν κάτω από διαφορετικές συνθήκες ποικίλλουν παρά πολύ και καθιστούν την τελική πρόβλεψη όχι απολύτως ακριβή.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Erich Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Applications, Economics*, 2<sup>nd</sup> Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [2] Thomas Ackerman, *Wind Power in Power Systems*, John Wiley and Sons Ltd, 2005
- [3] Soren Krohn, *Offshore Wind Energy: Full Speed Ahead*, Danish Wind Industry Association, 2002
- [4] World Wind Energy Association, 2008, [Online], Available from: <http://www.wwindea.org/home/index.php>, [3 August 2008]
- [5] Gordon Edge, Loic Blanchard, *Delivering Offshore Wind Power in Europe*, European Wind Energy Association, 2007
- [6] Bill Grainger, Technical Director, Border Wind, [Online], *Offshore Wind Turbines*, Available from: [http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/98-9/offshore/wind/wintr.htm](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/98-9/offshore/wind/wintr.htm), [2 June 2008]
- [7] G.J.W. van Bussel, M.B. Zaaijer, *Reliability, Availability and Maintenance aspects of large-scale offshore wind farms a concept study*, Faculty of Civil Engineering, Delf University of Technology, Netherlands
- [8] G.J.W. van Bussel, A.R. Henderson, *State of the Art and Technology Trends for Offshore Wind Energy: Operation and Maintenance Issues*, Delft University of Technology, The Netherlands
- [9] BWEA, 2007, [Online], *Delivering the UK's wind, wave and tidal energy*, Available from: <http://bwea.com/offshore/worldwide.html>, [2 June 2008]
- [10] Focus on 2030, 2006, [Online], Available from: [http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/WD/2006\\_november/WD26-focus.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WD/2006_november/WD26-focus.pdf), [15 July 2008]
- [11] Starforze, 2002, [Online], *Offshore Wind Energy Research Project Portal*, Available from: <http://www.offshorewindenergy.org>, [25 August 2008]



- [12] Richard Brooks, *'The World Offshore Renewable Energy Report 2004 – 2008'*, 2010 Target Team
- [13] Siemens AG, *'High Voltage Direct Current Transmission – Proven Technology for Power Exchange'*, High Voltage Division, Germany
- [14] Tanvet P. J., van Bussl, G. J. W. Spinato, *'Machine and converter reliabilities in wind turbines'*, Proc PEMD, Dublin, Ireland, 2006
- [15] F. Blaabjerg, Z. Chen, R. Teodorescu, F. Lov, *'Power Electronics in Wind Turbine Systems'*, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark
- [16] Frede Blaabjerg, Zhe Chen, *'Power Electronics for Modern Wind Turbines'*, 1<sup>st</sup> Edition, Morgan and Claypool, 2006
- [17] Hansen, L.H. Madsen, P.H. Blaabjerg, F. Christensen, H.C. Lindhard, U. Eskildsen, *'Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines'*, Wind Energy Deptment, IEEE, 2001
- [18] Bauer, P. De Haan, S.W.H. Meyl, C.R. Pierik, *'Evaluation of Electrical Systems for Offshore Wind Farms'*, 3<sup>rd</sup> Volume, IEEE, 2000
- [19] Li, H. Chen, *'Overview of Different Wind Generator Systems and their Comparisons'*, 2<sup>nd</sup> Volume, 2<sup>nd</sup> Issue, IEEE, 2008
- [20] Use of power electronic converters in wind turbines and photovoltaic generators
- [21] Flex Phase Technology, *'Wind Turbine Power Converters'*, Distributed Energy Systems
- [22] System reliability theory: Models, Statistical Methods, and Applications
- [23] E. Echavarria, T. Tomiyama, and G.J.W. van Bussel, *'How has reliability of technology developed through time?'*, ISET
- [24] P. J. Tavner, J. Xiang, F. Spinato, *'Research Article: Reliability Analysis for Wind Turbines'*, InterScience, 2006
- [25] Johan Ribrant, Lina Margareta, *'Survey of failures in wind power system with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005'*, Vol. 22, No. 1, IEEE, 2007
- [26] M. Wilkinson, F. Spianto, M. Knowles, *'Towards the zero maintenance wind turbine'*, School of Engineering, University of Durham, UK
- [27] P. J. Tavner, J. Xiang, F. Spinato, *'Improving the Reliability of Wind Turbine Generation and its Impact on Overall Distribution Network Reliability'*, University of Durham, School of Engineering, UK, 2005

- [28] John Davidson, *'The reliability of Mechanical Systems'*, The Institute of Mechanical Engineers, 1988
- [29] Garrad Hassan & Partners, Tractebel Energy Engineering, Risø National Laboratory, *'Offshore Wind Energy Ready to Power a Sustainable Europe'*, Delft University of Technology, Netherlands, 1999
- [30] N.E. Carlstedt, C. Szadkowski, C. Karlström, *'Driftuppföljning av Vindkraftverk, Årsrapport'*, Elforsk, 1997-2004, Available from: <http://www.elforsk.se>
- [31] Johan Ribrant, *'Reliability Performance and Maintenance: A Survey of Failures in Wind Power Systems'*, KTH School of Engineering, 2006
- [32] P. J. Tavner, J. Xiang, *'Wind turbine reliability, how does it compare with other embedded generation sources'*, School of Engineering, University of Durham, UK
- [33] Dowec, *'Estimation of turbine reliability figures within the DOWEC project'*, 4<sup>th</sup> issue, 2002
- [34] WMEP, *'Wind Energy Report Germany 2006'*, ISET, 2006
- [35] H. Holttinen, T. Lakso, *'Tuulivoiman Tuotantotilastot Vuosiraportti'*, VTT, Espoo, Finland, 2000 – 2005, Available from: <http://www.vtt.fi>
- [36] GE Energy, 2005, [Online], *'3.6 MW offshore series wind turbine'*, Available from:  
[http://www.gepower.com/prod\\_serv/products/wind\\_turbines/en/downloads/ge\\_3\\_6\\_brochure\\_new.pdf](http://www.gepower.com/prod_serv/products/wind_turbines/en/downloads/ge_3_6_brochure_new.pdf),
- [37] World Wind Energy Association, 2008, [Online], *'Press Release'*, Available from:  
[http://www.wwindea.org/home/images/stories/pr\\_statistics2007\\_210208\\_red.pdf](http://www.wwindea.org/home/images/stories/pr_statistics2007_210208_red.pdf)  
 [15 June 2008]
- [38] H. Ng. Chong, Max A. Parker, Li Ran, Peter J. Tavner, Jim R. Bumby, *'A Multilevel Modular Converter for a Large, Light Weight Wind Turbine Generator'*, 3<sup>rd</sup> Volume, IEEE, 2008
- [39] American Wind Energy Association, 1998, [Online], *'How Does a Wind Turbine's Energy Production Differ from Its Power Production'*, Available from:  
<http://www.awea.org/faq/basicen.html>, [25 August 2008]
- [40] W. Grainger, N. Jenkins, *'Offshore Wind Farm Electrical Connection Options'*, Border Wind Ltd, UMIST University

- [41] REISI Wind, [Online], '*Offshore Wind Energy*', Available from: [http://reisi.iset.uni-kassel.de/pls/w3reisiwebdad/www\\_reisi\\_page\\_new\\_show\\_page?page\\_nr=353&lang=en](http://reisi.iset.uni-kassel.de/pls/w3reisiwebdad/www_reisi_page_new_show_page?page_nr=353&lang=en), [20 August 2008]
- [42] P. J. Tavner, F. Spinato, G.J.W. van Bussel, E. Koutoulakos, '*Reliability of Different Wind Turbine Concepts with Relevance to Offshore Applications*', EWEC, 2008
- [43] M. Bartram, J. von Bloh, Rik W. De Doncker, '*Doubly-Fed-Machines in Wind-Turbines Systems: Is this Application Limiting the Lifetime of IGBT-Frequency-Converters?*' Institute for Power Electronics and Electrical Drives (ISEA), IEEE, 2004
- [44] Kepco INC, [Online], '*Application Handbook – Redundancy*', Available from: <http://www.kepcopower.com/hbkrdnc.htm>, [5 September 2008]

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

#### Βάση δεδομένων ποσοστών αποτυχίας 'DOWEC'

<b>WMEP Germany failure rates [1/year]</b>		1998		1999		2000	
Avg reported turbines:		0-1500 kW	560-1500 kW	0-1500 kW	560-1500 kW	0-1500 kW	560-1500 kW
		1400	60	1470	70	1035	70
<b>WMEP components</b>	<b>Report components</b>						
Rotorhub	Blade	0.039	0.145	0.049	0.143	0.044	0.043
Pitch mechanism	Pitch mechanism	0.014	0.014	0.013	0.000	0.007	0.014
Blades	Blade	0.206	0.725	0.208	0.386	0.172	0.386
Air brake	Blade tip	0.035	0.058	0.048	0.029	0.039	0.057
Generator	Generator	0.100	0.217	0.076	0.071	0.081	0.043
Electrical	Electric	0.566	1.101	0.515	0.714	0.484	1.000
Invertor	Invertor	0.084	0.072	0.090	0.057	0.067	0.171
Instrumentation	Instrumentation	0.213	0.565	0.199	0.486	0.182	0.443
Elect control	Control	0.457	1.464	0.468	0.771	0.371	0.757
Gear box	Gear box	0.080	0.203	0.117	0.400	0.108	0.229
Mech brake	Brake	0.154	0.406	0.147	0.357	0.114	0.243
Drive train	Shaft & Bearing	0.047	0.087	0.066	0.129	0.055	0.157
Hydraulics	Hydraulics	0.225	0.696	0.253	0.729	0.201	0.400
Yaw gear	Yaw System	0.163	0.333	0.149	0.257	0.177	0.400
Frame&Tower&Found.	Other	0.062	0.304	0.106	0.129	0.084	0.300
Total:		2.445	6.391	2.504	4.657	2.185	4.643

Σχήμα Α.1: Γερμανία, 'WMEP Germany Failure Data' [33]

<b>LWK Schleswig-Holstein failure rates [1/year]</b>		1999		2000	
Avg reported turbines:		0-1500 kW	500-1500 kW	0-1500 kW	500-1500 kW
		543	288	480	298
<b>LWK components</b>	<b>Report components</b>				
Rotorblade	Blade	0.140	0.198	0.123	0.124
Rotorbrake	Blade tip	0.028	0.017	0.040	0.034
Pitch Adjustment	Pitch mechanism	0.085	0.122	0.075	0.091
Mech. Brake	Brake	0.037	0.038	0.096	0.094
Main shaft/bearing	Shaft & Bearing	0.026	0.139	0.035	0.040
Gearbox	Gear box	0.112	0.135	0.154	0.168
Generator	Generator	0.122	0.163	0.146	0.171
Hydraulics	Hydraulics	0.105	0.076	0.144	0.138
Yaw System	Yaw System	0.103	0.073	0.106	0.094
Windvane/anemometer	Instrumentation	0.039	0.038	0.046	0.050
Elec. Controls	Control	0.219	0.229	0.238	0.252
Elec. System	Electric	0.335	0.368	0.306	0.305
Convertor	Invertor	0.002	0.000	0.002	0.000
Sensors	Instrumentation	0.068	0.080	0.056	0.054
Other	Other	0.221	0.337	0.227	0.255
Total:		1.641	2.014	1.794	1.869

Σχήμα Α.2: Δανία, 'LWK Schleswig – Holstein Denmark Failure Data' [33]

Denmark failure rates per year according to Windstats Newsletter																			
		3rd quarter 99		4th quarter 99		1st quarter 00		2nd quarter 00		3rd quarter 00		4th quarter 00		1st quarter 01		2nd quarter 01		Average 1990.1	
Avg reported turbines:		2032.3		1961.7		1942.0		1793.3		2111.0		2111.0		2073.0		1896.7		1990.1	
Windstats component	Report components																		
Blades	Blade	0.045	0.061	0.047	0.029	0.023	0.036	0.037	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.04
Hub	Blade	0.002	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.000	0.00
Axle/Bearing	Shaft & Bearing	0.010	0.014	0.016	0.011	0.004	0.008	0.004	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.004	0.004	0.013	0.013	0.01	0.01
Air brake	Blade tip	0.012	0.031	0.019	0.011	0.008	0.015	0.012	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.012	0.012	0.017	0.017	0.02	0.02
Mech. Brake	Gearbox	0.045	0.049	0.076	0.036	0.042	0.036	0.075	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.075	0.075	0.046	0.046	0.05	0.05
Pitch Adjustment	Shaft & Bearing	0.004	0.006	0.004	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.00	0.00
Main shaft/bearing	Brake	0.020	0.047	0.047	0.018	0.015	0.017	0.015	0.017	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.023	0.023	0.03	0.03
Gearbox	Generator	0.045	0.053	0.074	0.036	0.042	0.036	0.066	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042	0.066	0.066	0.030	0.030	0.05	0.05
Generator	Yaw system	0.045	0.077	0.091	0.051	0.045	0.044	0.050	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.050	0.050	0.051	0.051	0.06	0.06
Yaw System	Other	0.004	0.008	0.004	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
Windvane/anemometer	Other	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
Elec. Controls	Grid (s left out)	0.102	0.167	0.165	0.145	0.133	0.117	0.096	0.117	0.117	0.117	0.117	0.117	0.096	0.096	0.074	0.074	0.12	0.12
Elec. System	Other	0.004	0.027	0.010	0.009	0.011	0.011	0.012	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.012	0.012	0.002	0.002	0.01	0.01
Hydraulics	Hydraulic	0.037	0.061	0.056	0.018	0.047	0.038	0.027	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.027	0.027	0.034	0.034	0.04	0.04
Sensors	Other	0.008	0.016	0.008	0.002	0.000	0.000	0.006	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.006	0.006	0.002	0.002	0.01	0.01
Other components	Other	0.018	0.163	0.122	0.022	0.019	0.027	0.021	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.021	0.021	0.057	0.057	0.06	0.06
Only failure reported	Other	0.159	0.290	0.301	0.132	0.165	0.155	0.224	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.224	0.224	0.158	0.158	0.20	0.20
	Total:	0.563	1.071	1.048	0.522	0.561	0.565	0.679	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.679	0.679	0.563	0.563	0.70	0.70

Germany failure rates per year according to Windstats Newsletter																			
		3rd quarter 99		4th quarter 99		1st quarter 00		2nd quarter 00		3rd quarter 00		4th quarter 00		1st quarter 01		2nd quarter 01		Average excl. 3rd quarter 99	
Avg reported turbines:		2516.7		2766.3		2553.0		2611.3		2895.7		3032.3		2798.7		3017.7		2810.7	
Windstats component	Report components																		
Non-component	Other	0.670	0.159	0.154	0.163	0.162	0.107	0.102	0.093	0.093	0.093	0.093	0.102	0.102	0.093	0.093	0.13	0.13	0.13
Rotor	Blade	0.730	0.132	0.142	0.094	0.080	0.065	0.077	0.061	0.061	0.061	0.061	0.077	0.077	0.061	0.061	0.09	0.09	0.09
Air brake	Blade tip	0.148	0.037	0.028	0.036	0.025	0.025	0.019	0.013	0.013	0.013	0.013	0.019	0.019	0.013	0.013	0.03	0.03	0.03
Mech. Brake	Brake	0.150	0.024	0.025	0.033	0.022	0.034	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.022	0.022	0.021	0.021	0.03	0.03	0.03
Pitch Adjustment	Pitch mechanism	0.432	0.102	0.093	0.099	0.044	0.069	0.057	0.049	0.049	0.049	0.049	0.057	0.057	0.049	0.049	0.07	0.07	0.07
Main shaft/bearing	Shaft & Bearing	0.087	0.009	0.031	0.024	0.011	0.022	0.017	0.015	0.015	0.015	0.015	0.017	0.017	0.015	0.015	0.02	0.02	0.02
Gearbox	Gearbox	0.215	0.082	0.107	0.067	0.052	0.096	0.109	0.061	0.061	0.061	0.061	0.109	0.109	0.061	0.061	0.08	0.08	0.08
Generator	Generator	0.476	0.146	0.163	0.079	0.048	0.090	0.083	0.064	0.064	0.064	0.064	0.083	0.083	0.064	0.064	0.10	0.10	0.10
Yaw System	Yaw system	0.532	0.083	0.098	0.123	0.104	0.048	0.078	0.104	0.104	0.104	0.104	0.078	0.078	0.104	0.104	0.09	0.09	0.09
Windvane/anemometer	Instrumentation	0.174	0.037	0.048	0.033	0.019	0.048	0.045	0.021	0.021	0.021	0.021	0.045	0.045	0.021	0.021	0.03	0.03	0.03
Elec. Controls	Control	0.839	0.174	0.233	0.178	0.107	0.161	0.160	0.067	0.067	0.067	0.067	0.160	0.160	0.067	0.067	0.15	0.15	0.15
Elec. System	Electric	1.212	0.333	0.260	0.277	0.191	0.203	0.264	0.166	0.166	0.166	0.166	0.264	0.264	0.166	0.166	0.24	0.24	0.24
Hydraulics	Hydraulic	0.301	0.096	0.107	0.081	0.080	0.080	0.091	0.064	0.064	0.064	0.064	0.091	0.091	0.064	0.064	0.08	0.08	0.08
Sensors	Instrumentation	0.328	0.096	0.079	0.044	0.019	0.037	0.042	0.043	0.043	0.043	0.043	0.042	0.042	0.043	0.043	0.05	0.05	0.05
Other components	Other	0.363	0.060	0.076	0.071	0.051	0.056	0.038	0.033	0.033	0.033	0.033	0.038	0.038	0.033	0.033	0.06	0.06	0.06
Only failure reported	Other	1.466	1.201	1.442	1.511	1.577	1.850	2.345	2.552	2.552	2.552	2.552	2.345	2.345	2.552	2.552	1.78	1.78	1.78
	Total:	8.113	2.744	3.087	2.933	2.590	2.968	3.557	3.428	3.428	3.428	3.428	3.557	3.557	3.428	3.428	3.04	3.04	3.04

Σχήμα A.3: Δανία – Γερμανία, ‘WindStats Denmark–Germany Failure Rate Data’ [33]

Component	Entire unit	Structure	Yaw system	Hydraulics	Mechanical brakes	Gears	Sensors	Drive train	Control system	Electric system	Generator	Blades/Pitch	Hub	Total
Total downtime per component, 2000-2004 (hours)	2631	1874	20754	6918	1881	30286	8357	3788	28620	22395	13906	14743	50	156202
Average downtime per year (hours/year)	526	375	4151	1384	376	6057	1671	758	5724	4479	2781	2949	10	31240
Average downtime per year per turbine (hours)	0,8	0,6	6,6	2,6	0,6	11,6	2,7	1,2	9,2	7,2	4,5	4,7	0,0	52,4
Distribution of downtime, 2000-2004 (%) (see Fig. 2)	1,7	1,2	13,3	4,4	1,2	19,4	5,4	2,4	18,3	14,3	8,9	9,4	0,0	100,0
Total number of failures per component, 2000-2004	33	18	80	160	15	118	169	13	155	210	66	161	4	1202
Average number of failures per year	6,6	3,6	16,0	32,0	3,0	23,6	33,8	2,6	31,0	42,0	13,2	32,2	0,8	240,4
Average number of failures per year per turbine	0,011	0,006	0,026	0,061	0,005	0,045	0,054	0,004	0,050	0,067	0,021	0,052	0,001	0,402
Distribution of failures, 2000 -2004 (%) (see Fig. 1)	2,7	1,5	6,7	13,3	1,2	9,8	14,1	1,1	12,9	17,5	5,5	13,4	0,3	100,0
Average downtime per failure, 2000-2004 (hours)	79,7	104,1	259,4	43,2	125,4	256,7	49,4	291,4	184,6	106,6	210,7	91,6	12,5	130,0

Σχήμα Α.4: Σουηδία, ‘Swedish Failure Rate Data 2000 – 2004’ [25]

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### *ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ Matlab*

```
%% ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ  
%% ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
%% ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ  
%% ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ  
%% Κρότσης Σπύρος
```

```
clc
```

```
clear all
```

```
%% Stress Factors (παράγοντες καταπόνησης)
```

```
K1 = 1.5:0.1:2;
```

```
K2l = 1.32; %% K2 for CF = 34,2
```

```
K2h = 1.829; %% K2 for CF = 45
```

```
K2r = 1.32:0.1:1.829; %% K2 for range CF
```

```
%% Onshore Failure Rates (ποσοστά βλαβών χερσαίων ανεμογεννητριών)
```

```
fG = 2.38; %% Γερμανία
```

```
fD = 0.7; %% Δανία
```

```
fS = 0.402; %% Σουηδία
```

```
%% Conversion Onshore – Offshore (μετατροπή χερσαίων σε παράκτιες)
%% Germany (Γερμανία)
%% Capacity Stress Factor Constant (σταθερά παράγοντα αποδοτικότητας)
```

```
figure(1)
clf
x = fG*K2l*K1;
plot (K1,x,'k')
axis([1.48 2.02 4 9.5])
hold on
grid
title('Γερμανικά παράκτια ποσοστά βλαβών')
xlabel('Περιβαλλοντικός παράγοντας κόπωσης')
ylabel('ποσοστά βλαβών')
x = fG*K2h*K1;
plot (K1,x,'r')
legend('Υπάρχουσες παράκτιες','Μελλοντικές παράκτιες')
```

```
%% Denmark (Δανία)
%% Capacity Stress Factor Constant (σταθερά παράγοντα αποδοτικότητας)
```

```
figure(2)
clf
x = fD*K2l*K1;
plot (K1,x,'k')
axis([1.48 2.02 1.2 2.8])
hold on
grid
title('Δανικά παράκτια ποσοστά βλαβών')
xlabel('Περιβαλλοντικός παράγοντας κόπωσης')
ylabel('ποσοστά βλαβών')
x = fD*K2h*K1;
plot (K1,x,'r')
legend('Υπάρχουσες παράκτιες','Μελλοντικές παράκτιες')
```



```
%% Sweden (Σουηδία)
```

```
%% Capacity Stress Factor Constant (σταθερά παράγοντα αποδοτικότητας)
```

```
figure(3)
```

```
clf
```

```
x = fS*K2l*K1;
```

```
plot (K1,x,'k')
```

```
axis([1.48 2.02 0.7 1.6])
```

```
hold on
```

```
grid
```

```
title('Σουηδικά παράκτια ποσοστά βλαβών')
```

```
xlabel('Περιβαλλοντικός παράγοντας κόπωσης')
```

```
ylabel('ποσοστά βλαβών')
```

```
x = fS*K2h*K1;
```

```
plot (K1,x,'r')
```

```
legend('Υπάρχουσες παράκτιες','Μελλοντικές παράκτιες')
```

```
%
```

```
% 3D plote
```

```
%
```

```
figure(4)
```

```
clf
```

```
x = 1.5:0.05:2;
```

```
y = 1.3:0.05:1.8;
```

```
z = 2.38*[x(1,1)*y(1,1) x(1,1)*y(1,2) x(1,1)*y(1,3) x(1,1)*y(1,4) x(1,1)*y(1,5)
```

```
x(1,1)*y(1,6) x(1,1)*y(1,7) x(1,1)*y(1,8) x(1,1)*y(1,9) x(1,1)*y(1,10)
```

```
x(1,1)*y(1,11)
```

```
x(1,2)*y(1,1) x(1,2)*y(1,2) x(1,2)*y(1,3) x(1,2)*y(1,4) x(1,2)*y(1,5)
```

```
x(1,2)*y(1,6) x(1,2)*y(1,7) x(1,2)*y(1,8) x(1,2)*y(1,9) x(1,2)*y(1,10)
```

```
x(1,2)*y(1,11)
```

```
x(1,3)*y(1,1) x(1,3)*y(1,2) x(1,3)*y(1,3) x(1,3)*y(1,4) x(1,3)*y(1,5)
```

```
x(1,3)*y(1,6) x(1,3)*y(1,7) x(1,3)*y(1,8) x(1,3)*y(1,9) x(1,3)*y(1,10)
```

```

x(1,3)*y(1,11)
x(1,4)*y(1,1) x(1,4)*y(1,2) x(1,4)*y(1,3) x(1,4)*y(1,4) x(1,4)*y(1,5)
x(1,4)*y(1,6) x(1,4)*y(1,7) x(1,4)*y(1,8) x(1,4)*y(1,9) x(1,4)*y(1,10)
x(1,4)*y(1,11)
x(1,5)*y(1,1) x(1,5)*y(1,2) x(1,5)*y(1,3) x(1,5)*y(1,4) x(1,5)*y(1,5)
x(1,5)*y(1,6) x(1,5)*y(1,7) x(1,5)*y(1,8) x(1,5)*y(1,9) x(1,5)*y(1,10)
x(1,5)*y(1,11)
x(1,6)*y(1,1) x(1,6)*y(1,2) x(1,6)*y(1,3) x(1,6)*y(1,4) x(1,6)*y(1,5)
x(1,6)*y(1,6) x(1,6)*y(1,7) x(1,6)*y(1,8) x(1,6)*y(1,9) x(1,6)*y(1,10)
x(1,6)*y(1,11)
x(1,7)*y(1,1) x(1,7)*y(1,2) x(1,7)*y(1,3) x(1,7)*y(1,4) x(1,7)*y(1,5)
x(1,7)*y(1,6) x(1,7)*y(1,7) x(1,7)*y(1,8) x(1,7)*y(1,9) x(1,7)*y(1,10)
x(1,7)*y(1,11)
x(1,8)*y(1,1) x(1,8)*y(1,2) x(1,8)*y(1,3) x(1,8)*y(1,4) x(1,8)*y(1,5)
x(1,8)*y(1,6) x(1,8)*y(1,7) x(1,8)*y(1,8) x(1,8)*y(1,9) x(1,8)*y(1,10)
x(1,8)*y(1,11)
x(1,9)*y(1,1) x(1,9)*y(1,2) x(1,9)*y(1,3) x(1,9)*y(1,4) x(1,9)*y(1,5)
x(1,9)*y(1,6) x(1,9)*y(1,7) x(1,9)*y(1,8) x(1,9)*y(1,9) x(1,9)*y(1,10)
x(1,9)*y(1,11)
x(1,10)*y(1,1) x(1,10)*y(1,2) x(1,10)*y(1,3) x(1,10)*y(1,4) x(1,10)*y(1,5)
x(1,10)*y(1,6) x(1,10)*y(1,7) x(1,10)*y(1,8) x(1,10)*y(1,9) x(1,10)*y(1,10)
x(1,10)*y(1,11)
x(1,11)*y(1,1) x(1,11)*y(1,2) x(1,11)*y(1,3) x(1,11)*y(1,4) x(1,11)*y(1,5)
x(1,11)*y(1,6) x(1,11)*y(1,7) x(1,11)*y(1,8) x(1,11)*y(1,9) x(1,11)*y(1,10)
x(1,11)*y(1,11)];
i = [ 1.5 1.6 2.0 1.9 1.8 1.7 ];
axis ij
[x,y] = meshgrid(x,y);
surf(x,y,z);
shading interp
title('Γερμανικά παράκτια ποσοστά βλαβών');
xlabel('Περιβαλλοντικός παράγοντας κόπωσης');
ylabel('Διαβαθμισμένος παράγοντας κόπωσης');
zlabel('ποσοστά βλαβών');

```