ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΟΠΤΙΚΩΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΜΑΡΤΙΝ ΙΓΚΝΙΑΤΟΒΙΤΣ 01116024

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΜΑΣΗΣ

Περίληψη

Η αιολική ενέργεια, όντας ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην πράσινη μετάβαση του πλανήτη και την ολοκληρωτική απεξάρτηση του από τα ορυκτά καύσιμα. Παρόλο που διαταράχτηκε από την έξαρση του Covid 19 και από την έναρξη του πολέμου στην Ουκρανία, φαίνεται πως εξακολουθεί να είναι μία από τις κυρίαρχες πηγές ενέργειας. Η συνεχής ανάγκη αύξησης του μεγέθους των ανεμογεννητριών ωστόσο, προς ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών οδηγεί στην διαρκή επανεξέταση των χρησιμοποιούμενων υλικών και του κόστους που τα συνοδεύει. Καθώς οι δομικές ανησυχίες και το κόστος των πρώτων υλών αυξάνονται, είναι κρίσιμο να μελετηθεί η διαμόρφωση της μοντέρνας ανεμογεννήτριας, η ενέργεια που παράγει και οι μελλοντικές προοπτικές της. Σε αυτήν την εργασία θα μελετηθεί ο σχεδιασμός μίας ανεμογεννήτριας, με πιο σημαντικό κομμάτι τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα επιμέρους εξαρτήματά της. Έπειτα θα αναλυθούν τα κόστη της κατασκευής των ανεμογεννητριών, με μία έμφαση στις σπάνιες γαίες που χρησιμοποιούνται στις γεννήτριες τους. Τέλος, θα προταθούν εναλλακτικές λύσεις οι οποίες θα μπορούσαν να μειώσουν το κόστος κατασκευής και συντήρησης των ανεμογεννητριών, να αυξήσουν την παραγωγικότητα και να μειώσουν την περιβαλλοντική επιβάρυνση η οποία τη συνοδεύει, διατηρώντας παράλληλα την στατική επάρκεια τους.

Abstract

Wind energy, being a renewable energy source, will play an important role in the planet's green transition and its complete decarbonisation. Although disrupted by the Covid 19 outbreak and the start of the war in Ukraine, it still seems to be one of the dominant energy sources. The constant need to increase the size of wind turbines in order to meet energy demand, however, is leading to a constant rethinking of the materials being used and their costs. As structural concerns and raw material costs increase, it is critical to examine the layout of a modern wind turbine, its energy production and future prospects. This paper will study the design of a wind turbine, with the most important part being the materials that make up its individual components. Afterwards it will analyze the costs of manufacturing wind turbines, with a specific focus on the rare earths used in their generators. Finally, it will propose alternatives that could reduce the cost of construction and maintenance of wind turbines, increase productivity and reduce the negative environmental impact that comes with its construction, while maintaining structural adequacy.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Σχημάτων 5
Ευρετήριο Πινάκων 7
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 8
1.1. Σκοπός της εργασίας 8
1.2. Ορισμός της αιολικής ενέργειας 8
1.3. Ιστορική αναδρομή ανεμογεννητριών 9
2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ 19
2.1. Μέρη μίας ανεμογεννήτριας 19
2.2. Επιλογή τοποθεσίας ανέγερσης ανεμογεννήτριας 21
2.3. Δραστηριότητες κατασκευής αιολικού πάρκου 22
2.4. Καμπύλες ισχύος 23
2.5. Εκτίμηση ταχύτητας ανέμου για την πρόβλεψη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 26
3. ΥΛΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ 33
3.1. Χρήση υλικών στις σημερινές ανεμογεννήτριες 33
3.2. Πτερύγια 34
3.3. Ατρακτίδιο 36
3.4. Άξονας μετάδοσης κίνησης 37
3.4.1. Σπάνιες γαίες 39
3.5. Πύργος 41
4. ΚΟΣΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ 43
4.1. Γενικά 43
4.2. Αλυσίδα εφοδιασμού 47
4.3. Κόστος χάλυβα 50
4.4. Κόστος υπεράκτιων ανεμογεννητριών 53
4.5. Κόστος δεδομένης ανεμογεννήτριας 55
5. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ 57
5.1. Σκυρόδεμα αντί για χάλυβα 57
5.2. Εναλλακτικές σπανίων γαιών 59
5.3. Εναέριες ανεμογεννήτριες 66
5.4. Ξύλο αντί για χάλυβα 70
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 75

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Ανεμόμυλοι Nehbandan (Περσία), 8ος αιώνας μ.Χ.)…….. σελ. 10

Σχήμα 1.2 Εξέλιξη μεγέθους ανεμογεννητριών και μελλοντικές προοπτικές…… σελ. 13

Σχήμα 1.3 Σύγκριση μεγέθους μεγάλης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με Airbus 380.. σελ. 17

Σχήμα 1.4 Συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας (MW)…… σελ. 18

Σχήμα 2.1 Βασικά δομικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας…….. σελ. 19

Σχήμα 2.2 Τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας…… σελ. 24

Σχήμα 2.3 Καμπύλες ισχύος εν ενεργεία ανεμογεννητριών (MW)…… σελ. 26

Σχήμα 2.4 Μεταβολή του λόγου ταχυτήτων ανέμου (m/s) σε μετεωρολογικό ιστό καθ' ύψος για 3 υψόμετρα (80, 60 και 40 m) και διάρκεια 3 έτη……. σελ. 27

Σχήμα 2.5 Μετρήσεις μήκους τραχύτητας z_0 από την εφαρμογή του λογαριθμικού νόμου στα δεδομένα που ελήφθησαν από μετεωρολογικό ιστό για 3 υψόμετρα (80, 60 και 40 m) και διάρκεια 3 έτη…….. σελ. 29

Σχήμα 2.6 Μετρήσεις συντελεστή διάτμησης a από την εφαρμογή του λογαριθμικού νόμου στα δεδομένα που ελήφθησαν από μετεωρολογικό ιστό για 3 υψόμετρα (80, 60 και 40 m) και διάρκεια 3 έτη…….. σελ. 30

Σχήμα 3.1 Σχηματική απεικόνιση της κατασκευής πτερυγίου δρομέα ανεμογεννήτριας με συναρμολόγηση και συγκόλληση δύο αεροτομών και δύο διατμητικών πλεγμάτων (το γκρι χρώμα υποδεικνύει τα σύνθετα υλικά που φέρουν το κύριο φορτίο)…….. σελ. 34

Σχήμα 3.2 Κύριοι τύποι ανεμογεννητριών ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος μετάδοσης κίνησης…….. σελ. 38

Σχήμα 3.3 Ποσοστά υλικών που απαρτίζουν έναν μόνιμο μαγνήτη ανεμογεννήτριας.. σελ. 40

Σχήμα 3.4 Ανεμογεννήτρια της Nordex με έναν υβριδικό πύργο ύψους 168 m στην Φινλανδία……. σελ. 42

Σχήμα 4.1 Μεταβολή LCOE από το 2010 μέχρι το 2021 σε €/KWh……. σελ. 43

Σχήμα 4.2 Οικονομικά της αιολικής ενέργειας…….. σελ. 45

Σχήμα 4.3 Μεταβλητό κόστος για τις γερμανικές ανεμογεννήτριες κατανεμημένο σε διάφορες κατηγορίες ως μέσος όρος για τη χρονική περίοδο 1997-2001……σελ. 46

Σχήμα 4.4 Ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής σπάνιων γαιών ανά χώρα……. σελ. 49

Σχήμα 4.5 Μεταβολή του κόστους του χάλυβα από το 1980 μέχρι και το 2020…….. σελ. 52

Σχήμα 4.6 Εκτίμηση της κατανομής του κόστους κεφαλαίου για ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο…….. σελ. 53

Σχήμα 5.1 Εκτιμώμενη παγκόσμια ζήτηση για μέταλλα νεοδυμίου, πρασεοδυμίου, δυσπροσίου και τερβίου σε t για γεννήτριες ανεμογεννητριών, κινητήρες για ηλεκτρικά οχήματα και άλλους τομείς, σύμφωνα με τα σενάρια χαμηλής και υψηλής ζήτηση….. σελ. 60

Σχήμα 5.2 Αναλογία ζήτησης/προσφοράς για τα μέταλλα νεοδυμίου, πρασεοδυμίου, δυσπροσίου και τερβίου, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους τομείς……. σελ. 61

Σχήμα 5.3 Μεταβολή κόστους σπανίων γαιών από το 2015 μέχρι το 2022 σε €/kg……... σελ. 62

Σχήμα 5.4 Διάταξη των μαγνητών της Niron στις ακτινικές (αριστερά) και αξονικές (δεξιά) μηχανές με τις προκύπτουσες γραμμές ροής…….. σελ. 63

Σχήμα 5.5 Τεχνολογία Twinstact της Sandia……. σελ. 64

Σχήμα 5.6 Μια εναέρια ανεμογεννήτρια Skysails στο Klixbüll της Γερμανίας…… σελ. 67

Σχήμα 5.7 Ένα σκληρό φτερωτό drone Makani εξοπλισμένο με ανεμογεννήτριες….. σελ. 69

Σχήμα 5.8 Ξύλινη ανεμογεννήτρια της Modvion στη Σουηδία……. σελ. 71

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1 Ποσοστό εξαρτημάτων ανεμογεννήτριας ως προς το σύνολό της……. σελ. 20

Πίνακας 2.2 Τυπικές τιμές παραμέτρου μήκους τραχύτητας z_0 για διάφορες φυσικές επιφάνειες…… σελ. 28

Πίνακας 3.1 Ποσοστό των υλικών που χρησιμοποιούνται στα εξαρτήματα των ανεμογεννητριών……. σελ. 33

Πίνακας 3.2 Αξιολόγηση των κύριων τεχνολογιών αιολικής ενέργειας που είναι διαθέσιμες για μεγάλες ανεμογεννήτριες. Σημειώσεις: "++" ισχυρό πλεονέκτημα- "+" πλεονέκτημα- "-" μειονέκτημα- "- -" ισχυρό μειονέκτημα…….. σελ. 39

Πίνακας 4.1 Βάρος χάλυβα, χαλκού και αλουμινίου σε t/MW…….. σελ. 55

Πίνακας 4.2 Ποσότητα και κόστος επιμέρους υλικών μίας ανεμογεννήτριας……... σελ. 56

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση της διάρθρωσης των υλικών και του κόστους ανεμογεννητριών, καθώς και η διερεύνηση προοπτικών της αιολικής ενέργειας. Θα ασχοληθούμε επομένως με τα επιμέρους τμήματα μίας ανεμογεννήτριας, δηλαδή τον πύργο, τα πτερύγια, το ατρακτίδιο και τον άξονα μετάδοσης κίνησης. Τα υλικά τα οποία θα αναλυθούν αφορούν την πλήρη σύνθεση της ανεμογεννήτριας, από τα δομικά μέρη του κελύφους μέχρι τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, με πρώτο και κύριο τον χάλυβα και μία ιδιαίτερη έμφαση στις σπάνιες γαίες.

Για να καταλήξουμε στις προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις που ενδεχομένως θα μειώσουν το συνολικό κόστος χωρίς να επηρεάζουν την στατικότητα ή λειτουργία της ανεμογεννήτριας, θα μελετήσουμε τα επιμέρους κόστη των υλικών που την απαρτίζουν. Μετά το τέλος της εργασίας, θα έχουμε πλήρη επίγνωση των προοπτικών της αιολικής ενέργειας, η οποία παρόλες τις δυσκολίες που αντιμετωπίζει στον εφοδιασμό και τις αυξήσεις των τιμών, φαίνεται πως θα συνεχίσει να είναι μία από τις κυρίαρχες πηγές ενέργειας στην σταδιακή πράσινη μετάβαση του πλανήτη.

1.2. Ορισμός της αιολικής ενέργειας

Ενέργεια είναι η ικανότητα ενός σώματος ή ενός συστήματος σωμάτων να εκτελεί έργο και είναι απαραίτητη για την εκπόνηση οποιασδήποτε δραστηριότητας. Σε κάθε ιστορική εποχή, ο άνθρωπος στήριξε την ανάπτυξή του στην εκμετάλλευση των πόρων, με στόχο την παραγωγή ενέργειας.

Η κύρια ταξινόμηση που γίνεται γενικά, από φυσική άποψη, είναι μεταξύ των πρωτογενών πηγών ενέργειας, ή εκείνων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα από τον άνθρωπο, και των δευτερογενών πηγών που απαιτούν μετασχηματισμό για να είναι αξιοποιήσιμες. Οι πρωτογενείς πηγές διακρίνονται με τη σειρά τους σε ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες πηγές. Οι ανανεώσιμες πηγές υπάρχουν σε απεριόριστες ποσότητες, ή έχουν το χαρακτηριστικό ότι μπορούν να αναγεννηθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Ο άνεμος είναι μία από τις κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και, εκ των πραγμάτων, αποτελεί ένα φυσικό φαινόμενο που συνίσταται από αέριες μάζες βρισκόμενες σε ομαλή κίνηση, σχεδόν οριζόντια, και απορρέουν από τις διαφορές πιέσεων που δημιουργούνται μεταξύ δύο ζωνών της ατμόσφαιρας. Κατά συνέπεια, δημιουργείται μια δύναμη που προσπαθεί να αποκαταστήσει την ισορροπία, καθορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τον "άνεμο".

Η αιολική ενέργεια είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε άλλες μορφές ενέργειας (μηχανική και ηλεκτρική) - στο παρελθόν μετατρεπόταν κυρίως σε μηχανική

ενέργεια για εφαρμογές όπως η άντληση, η άλεση, ενώ σήμερα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Υπάρχουν τρία στοιχεία που ευνοούν ιδιαίτερα αυτό το είδος ενέργειας:

- ✓ είναι ανανεώσιμη, επειδή είναι συνέπεια της θερμικής ακτινοβολίας του ήλιου
- ✓ είναι καθαρή από οικολογική άποψη, καθώς η χρήση της δεν παράγει CO2 και αέριους ρύπους (NOx, SO2 κ.α.)
- ✓ είναι διαθέσιμη σε όλα τα σημεία της επιφάνειας του πλανήτη

Ωστόσο, υπάρχουν προφανείς περιορισμοί που εμποδίζουν την εξάπλωσή της σε μεγάλη κλίμακα, μεταξύ των οποίων είναι:

- o η ακανόνιστη παρουσία των ανέμων, μια πτυχή που δεν εγγυάται την τακτικότητα της παραγωγής, αλλά μπορεί να μετριαστεί με παρεμβάσεις όπως οι "προβλέψεις", και η εύρεση και μελέτη της μέσης τιμής μίας ευρείας ζώνης παρατήρησης του φαινομένου
- o τα μεγέθη της τελευταίας γενιάς ανεμογεννητριών, τα οποία περιορίζουν την δυνατότητα εγκατάστασής τους σε χώρους που έχουν χαρακτηριστεί ως "πολύπλοκοι", είτε πρόκειται για πτυχές που συνδέονται με τη μορφολογία, ή και με την ποιότητα των ενεργειακών πόρων που υπάρχουν (ENEL Green Power, 2011).

1.3. Ιστορική αναδρομή ανεμογεννητριών

Οι άνθρωποι έχουν επωφεληθεί διαχρονικά από την ενέργεια του ανέμου για διάφορους σκοπούς, όπως η κίνηση ιστιοφόρων σκαφών, η ψύξη των σπιτιών μέσω της κυκλοφορίας του εξωτερικού αέρα και η λειτουργία μηχανημάτων στη γεωργία. Για αιώνες, οι κάτοικοι διαφόρων περιοχών του πλανήτη, όπου υπάρχουν ισχυροί άνεμοι και ανάγκες νερού και σίτισης, έχουν αναγκαστεί να βρουν τρόπους εκμετάλλευσης αυτών των ανέμων. Ανέπτυξαν ανεμόμυλους, οι οποίοι αποτέλεσαν μια τεχνική καινοτομία, με τη χρήση λαϊκών οικοδομικών τεχνικών και βασιζόμενοι στην επιστήμη της μηχανικής.

Τον 1ο αιώνα μ.Χ., για πρώτη φορά στη γνωστή ιστορία, ένας ανεμοκίνητος τροχός χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση μιας μηχανής, από έναν Έλληνα μηχανικό, τον Ήρωνα της Αλεξάνδρειας, δημιουργώντας έτσι τον ανεμοτροχό.

Τον 8ο αιώνα μ.Χ., ανεμόμυλοι στο Ιράν σχεδιάστηκαν για να μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια μέσω της κίνησης ενός ανεμοτροχού (Zarrabi. & Valibeig, 2021). Στο Σχήμα 1.1 φαίνονται οι πρώτοι ανεμόμυλοι Nehbandan που χρησιμοποιήθηκαν για την άρδευση και το άλεσμα στο Σιστάν (Περσία).

Σχήμα 2.1 *Ανεμόμυλοι Nehbandan (Περσία), 8ος αιώνας μ.Χ. (Πηγή: Zarrabi. & Valibeig, 2021)*

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, ο εν λόγω ανεμοτροχός ενεργοποιεί ένα σύστημα κάθετης περιστροφής (κατακόρυφος άξονας) μέσω ενός συστήματος γραναζιών που με τη σειρά του περιστρέφει τις μυλόπετρες για να αλέσει τα δημητριακά. Ακόμη, με άλλες διατάξεις μπορεί να αντλήσει νερό από πηγάδια.

Μέχρι το 1000 μ.Χ., οι ανεμόμυλοι έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται για την άντληση νερού προς παρασκευή αλατιού στην Κίνα και τη Σικελία. Ενώ την δεκαετία του 1180 οι κατακόρυφοι ανεμόμυλοι χρησιμοποιούνται στη βορειοδυτική Ευρώπη για το άλεσμα των σιτηρών.

Περίπου 7 αιώνες μετά, το 1887, κατασκευάζεται στη Σκωτία από τον James Blyth η πρώτη γνωστή ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάζεται στον κήπο του σπιτιού του και χρησιμοποιείται για τη

φόρτιση συσσωρευτών που ανέπτυξε ο Γάλλος Camille Alphonse Faure, ώστε να τροφοδοτείται ο φωτισμός του σπιτιού, καθιστώντας το έτσι το πρώτο σπίτι στον κόσμο που η ηλεκτρική του ενέργεια παρέχεται από την αιολική. Το 1888 κατασκευάζεται από τον εφευρέτη Charles Brush η πρώτη γνωστή ανεμογεννήτρια των ΗΠΑ που δημιουργήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στην έπαυλή του στο Οχάιο.

Λίγο αργότερα, το 1891, ο Poul la Cour, ένας Δανός επιστήμονας, κατασκευάζει μια ανεμογεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ανακαλύπτει πώς να παρέχει μια σταθερή ροή ενέργειας από αυτήν με τη χρήση ρυθμιστή (Gipe & M\llerstr\m, 2022). Ύστερα το 1895, ο Poul la Cour μετατρέπει τον ανεμόμυλό του σε πρωτότυπο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για τον φωτισμό του χωριού Askov. Μέχρι τα τέλη του 19ου αιώνα, περίπου 2.500 ανεμόμυλοι με συνολική μέγιστη ισχύ 30 MW χρησιμοποιούνται σε ολόκληρη τη Δανία για μηχανικούς σκοπούς, όπως το άλεσμα σιτηρών και την άντληση νερού. Το 1903 ο Poul la Cour ιδρύει την Εταιρεία Ηλεκτρολόγων Αιολικής Ενέργειας. Είναι επίσης ο πρώτος που ανακαλύπτει ότι οι ανεμογεννήτριες με λιγότερα πτερύγια τα οποία περιστρέφονται ταχύτερα είναι πιο αποδοτικές από τις ανεμογεννήτριες με πολλά πτερύγια που περιστρέφονται αργά. Το 1904 η Εταιρεία Αιολικών Ηλεκτρολόγων διοργανώνει το πρώτο της μάθημα για τον αιολικό ηλεκτρισμό. Εντούτοις, μέχρι το 1908 λειτουργούν 72 αιολικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη τη Δανία. Το μέγεθος των ανεμογεννητριών κυμαίνεται από 5 έως 25 kW.

Το 1927 οι Joe και Marcellus Jacobs ανοίγουν το εργοστάσιο "Jacobs Wind" στη Μινεάπολη της Μινεσότα. Κατασκευάζουν ανεμογεννήτριες για χρήση σε αγροκτήματα, καθώς αυτά συχνά δεν είχαν πρόσβαση στο δίκτυο. Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται γενικά για τη φόρτιση μπαταριών και την λειτουργία φωτισμού. Το 1931 ένας Γάλλος αεροναυπηγός μηχανικός, ο Georges Jean Marie Darrieus, κατοχυρώνει με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας ένα σχέδιο ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα που ονομάζεται ανεμογεννήτρια Darrieus. Αυτός ο τύπος ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα, αλλά για πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως σε σκάφη, και όχι τόσο ευρέως όσο οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Την ίδια χρονιά κατασκευάζεται στη Γιάλτα μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα παρόμοια με αυτές που χρησιμοποιούμε σήμερα. Η ανεμογεννήτρια έχει ισχύ 100 kW και πύργο ύψους 32 m. Μία δεκαετία μετά, το 1941 η πρώτη ανεμογεννήτρια μεγέθους 1 MW συνδέεται σε τοπικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή ονομάζεται Smith-Putnam, είναι ισχύος 1,25 MW και ανεγείρεται στο Castletown του Βερμόντ, έχοντας πτερύγια μήκους περίπου 25 m (Shahan, 2014).

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου χρησιμοποιούνται μικρές ανεμογεννήτριες σε γερμανικά υποβρύχια ώστε να φορτίζουν οι μπαταρίες τους και να εξοικονομούνται

καύσιμα. Μετά τον πόλεμο, το 1957 η Jacobs Wind έχει κατασκευάσει και πουλήσει περίπου 30.000 ανεμογεννήτριες. Την ίδια χρονιά, ένας πρώην μαθητής του Poul la Cour, ο Johannes Juul κατασκευάζει μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα με διάμετρο 24 m και 3 πτερύγια που μοιάζει πολύ στο σχεδιασμό με τις ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σήμερα. Η ανεμογεννήτρια αυτή έχει ισχύ 200 kW και χρησιμοποιεί μια νέα εφεύρεση, τις αεροδυναμικές κυρτώσεις άκρων πτερυγίων, οι οποίες χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα στις ανεμογεννήτριες αλλά και στα αεροσκάφη.

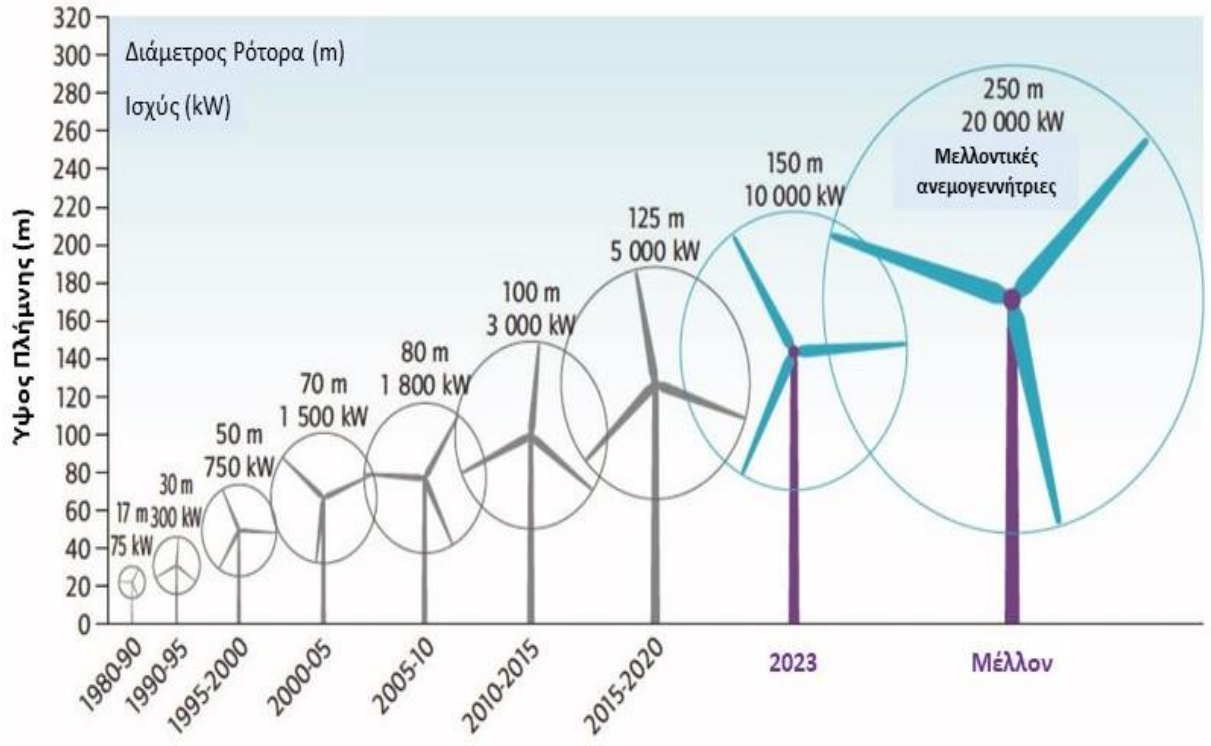
Περίπου δύο δεκαετίες έχουν περάσει όταν το 1975, ξεκινά ένα πρόγραμμα της NASA για την ανάπτυξη ανεμογεννητριών κοινής ωφέλειας. Αυτό το πρόγραμμα έρευνας και ανάπτυξης ήταν πρωτοπόρο σε πολλές από τις τεχνολογίες ανεμογεννητριών πολλαπλών MW που χρησιμοποιούνται σήμερα, όπως πύργοι από χαλύβδινο σωλήνα, γεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, σύνθετα υλικά πτερυγίων, έλεγχος κλίσης, καθώς και δυνατότητες αεροδυναμικού, δομικού και ακουστικού σχεδιασμού. Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο αυτής της προσπάθειας έθεσαν αρκετά παγκόσμια ρεκόρ για τη διάμετρο και την ισχύ εξόδου. Την ίδια περίοδο τίθεται σε λειτουργία το πρώτο αιολικό πάρκο των ΗΠΑ, παράγοντας αρκετή ενέργεια για πάνω από 4.000 σπίτια.

Έπειτα από 3 χρόνια, το 1978 κατασκευάζεται η πρώτη ανεμογεννήτρια πολλών MW στον κόσμο από καθηγητές και μαθητές του σχολείου Tvind. Η ανεμογεννήτρια των 2 MW πρωτοστάτησε σε πολλές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες και επέτρεψε στη Vestas, τη Siemens και άλλους να προμηθευτούν τα εξαρτήματα που χρειάζονταν. Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η καινοτόμος κατασκευή του φτερού με τη βοήθεια Γερμανών ειδικών της αεροναυπηγικής. Αυτό ωθεί και την δανέζικη εταιρεία κατασκευής ανεμογεννητριών Vestas να κατασκευάσει την πρώτη της ανεμογεννήτρια. Την ίδια χρονιά θεσπίζεται στις ΗΠΑ ο νόμος περί ρυθμιστικών πολιτικών των δημόσιων υπηρεσιών (PURPA P.L. 95-617). Ο PURPA απαιτεί από τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να συνδέουν έργα ανανεώσιμης ενέργειας με το δίκτυο.

Το 1980, ιδρύονται δύο από τις βασικές εταιρείες ανάπτυξης αιολικής ενέργειας μέχρι και σήμερα, η GE Wind Energy και η Siemens Wind Power, ενώ παράλληλα τίθεται σε λειτουργία το πρώτο αιολικό πάρκο στον κόσμο που περιλαμβάνει 20 ανεμογεννήτριες. Παράλληλα, η Δανία αρχίζει τη χωροθέτηση υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Τη στιγμή αυτή, το 1980, το ισοσταθμισμένο κόστος της αιολικής ενέργειας είναι 0,38 $/kWh στις Ηνωμένες Πολιτείες. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980 οι εμπορικοί δρομείς των ανεμογεννητριών φτάνουν σε διάμετρο τα 17 m και σε ισχύ τα 75 kW (Σχήμα 1.2). Το 1981 κατασκευάζεται ένα δεύτερο αιολικό πάρκο στις ΗΠΑ, στις οποίες η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας είναι τώρα περίπου 10 MW, αρκετή για περίπου 8.575 σπίτια. Μέσα σε 3 χρόνια (1984), τα αιολικά πάρκα που βρίσκονται σε λειτουργία στις

ΗΠΑ είναι πλέον 15, παράγοντας αρκετή ενέργεια για 146.000 σπίτια. Το 1984 ιδρύεται η Enercon και γίνεται ο μεγαλύτερος κατασκευαστής ανεμογεννητριών της Γερμανίας. Το 1986 η Vestas, η οποία είχε προηγουμένως επικεντρωθεί σε άλλους τύπους μηχανών, αποφασίζει να επικεντρωθεί 100% στην αγορά των ανεμογεννητριών. Ιδρύει την Vestas Wind Systems A/S και πουλάει τους άλλους επιχειρηματικούς της βραχίονες. Την επόμενη χρονιά, μια ανεμογεννήτρια 3,2 MW αναπτύσσεται από το πρόγραμμα ανεμογεννητριών της NASA. Διαθέτει "το πρώτο σύστημα κίνησης μεταβλητής ταχύτητας μεγάλης κλίμακας και ένα τμηματοποιημένο δρομέα με δύο πτερύγια", το οποίο επιτρέπει την ευκολότερη μεταφορά (Shahan, 2014).

Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η εξέλιξη μεγέθους των ανεμογεννητριών από την αρχή της δεκαετίας του 1980 μέχρι το 2020, καθώς και οι μελλοντικές εκτιμήσεις αύξησης του.



Σχήμα 1.2. *Εξέλιξη μεγέθους ανεμογεννητριών και μελλοντικές προοπτικές. (Πηγή: https://www.researchgate.net)*

Όπως γίνεται εύλογα κατανοητό, το μέγεθος και η ισχύς των ανεμογεννητριών έχουν υποστεί ραγδαία αύξηση και αναμένεται να συνεχίσουν να αυξάνονται με παρόμοιους ρυθμούς τόσο στο εγγύς όσο και στο μακρινό μέλλον.

Μετά το τέλος της δεκαετίας του 1980, έχουν τεθεί σε λειτουργία 46 αιολικά πάρκα στις ΗΠΑ, παρέχοντας αρκετή ενέργεια για σχεδόν 300.000 σπίτια. Με την αρχή της δεκαετίας του 1990 η ανθεκτικότητα και οι επιδόσεις αρχίζουν να αποκτούν μεγαλύτερη σημασία για

τους πελάτες, οπότε χρησιμοποιούνται πύργοι από σωληνωτό χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα κάτω από τις ανεμογεννήτριες. Το 1991 κατασκευάζεται το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στον κόσμο στη νότια Δανία. Περιλαμβάνει 11 ανεμογεννήτριες κατασκευασμένες από την Siemens Wind Energy, η καθεμία με ισχύ 450 kW. Την ίδια χρονιά κατασκευάζεται το πρώτο χερσαίο αιολικό πάρκο του Ηνωμένου Βασιλείου στην Κορνουάλη. Το αιολικό πάρκο περιλαμβάνει 10 ανεμογεννήτριες που μαζί παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για περίπου 2.700 σπίτια. Το 1994 η Vestas παρουσιάζει το OptiSlip, που επιτρέπει στην ανεμογεννήτρια να παρέχει σταθερό ρεύμα ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Ταυτόχρονα ιδρύεται η Gamesa Eólica στην Ισπανία με σκοπό την κατασκευή ανεμογεννητριών, την ώρα που η Vestas παράγει την πρώτη υπεράκτια ανεμογεννήτρια.

Το 1995 ιδρύεται η Suzlon Energy στην Ινδία για την κατασκευή και εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Από το 1995 μέχρι το 2000, οι δρομείς των εμπορικών ανεμογεννητριών φτάνουν σε διάμετρο τα 50 m και οι ανεμογεννήτριες φτάνουν σε ισχύ τα 750 kW (Σχήμα 1.2), 10 φορές περισσότερο από ό,τι πριν από περίπου 10 χρόνια. Το 1997 η Enron εξαγοράζει τη GE Wind Energy και τον γερμανικό κατασκευαστή ανεμογεννητριών Tackle. Το 1998 ιδρύεται η Goldwind με έδρα την Κίνα για την κατασκευή ανεμογεννητριών. Την ίδια χρονιά η Vestas λανσάρει μια ανεμογεννήτρια με "OptiSpeed", η οποία την καθιστά κατάλληλη για τοποθεσίες με χαμηλό άνεμο.

Με το ξεκίνημα της νέας χιλιετίας, 97 αιολικά πάρκα τίθενται σε λειτουργία στις ΗΠΑ, παρέχοντας αρκετή ενέργεια για 592.000 σπίτια. Η εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στις ΗΠΑ ανέρχεται σε 2.554 MW. Την ίδια περίοδο η ισπανική Gamesa παραγγέλνει 1.800 ανεμογεννήτριες Vestas, τη μεγαλύτερη παραγγελία ανεμογεννητριών στον κόσμο. Εντωμεταξύ, με όλες αυτές τις ραγδαίες εξελίξεις, η παγκόσμια ισχύς αιολικής ενέργειας φτάνει τα 17.400 MW (Σχήμα 1.3). Το 2002 η GE εξαγοράζει την Enron Wind κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πτώχευσης της Enron. Το 2003 ανοίγει το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο του Ηνωμένου Βασιλείου στη βόρεια Ουαλία. Περιλαμβάνει 30 ανεμογεννήτριες, η καθεμία με ισχύ 2 MW. Το 2004 η Vestas και η NEG Micon συγχωνεύονται με αποτέλεσμα η Vestas να κατέχει το 34% της αγοράς ανεμογεννητριών, πολύ περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη εταιρεία.

Το 2005, η παγκόσμια ισχύς αιολικής ενέργειας φτάνει τα 59.091 μεγαβάτ (Σχήμα 1.3). Δύο χρόνια αργότερα, το Ηνωμένο Βασίλειο ανακοινώνει σχέδια για την εγκατάσταση χιλιάδων υπεράκτιων ανεμογεννητριών, αρκετών για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια για κάθε σπίτι στη Βρετανία μέχρι το 2020. Περί το 2008 σχεδόν 2000 αιολικά πάρκα λειτουργούν στο Ηνωμένο Βασίλειο, παράγοντας αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για πάνω από 1,5 εκατομμύριο βρετανικά σπίτια. Το επόμενο έτος αρχίζει να λειτουργεί η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια μεγάλης ισχύος στον κόσμο στα ανοικτά των ακτών της Νορβηγίας. Την ίδια στιγμή το

αιολικό πάρκο Roscoe στο Τέξας γίνεται το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο στον κόσμο. Έχει ισχύ 781,5 MW και περιλαμβάνει 634 ανεμογεννήτριες (Shahan, 2014).

Με την έναρξη της επόμενης δεκαετίας, 581 αιολικά πάρκα βρίσκονται σε λειτουργία στις ΗΠΑ, παρέχοντας αρκετή ενέργεια για έως και 10 εκατομμύρια σπίτια. Επιπρόσθετα, το μέσο ισοσταθμισμένο κόστος της αιολικής ενέργειας είναι τώρα 0,08 $/kWh στις Ηνωμένες Πολιτείες, μια μείωση 80% σε σχέση με τη δεκαετία του 1980. Την ίδια χρονιά, η Κίνα ξεπερνά τις ΗΠΑ και γίνεται η χώρα με τη μεγαλύτερη αθροιστική εγκατεστημένη αιολική ισχύ στον κόσμο, ενώ η παγκόσμια ισχύς αιολικής ενέργειας έχει φτάσει πλέον τα 197.039 MW (Σχήμα 1.3). Το 2011 οι δρομείς των εμπορικών ανεμογεννητριών φτάνουν σε διάμετρο τα 126 m και οι ανεμογεννήτριες φτάνουν σε ισχύ τα 7.5 MW (Σχήμα 1.2), περίπου 100 φορές περισσότερο από ό,τι στη δεκαετία του 1980. Το 2012 το Κέντρο Αιολικής Ενέργειας Alta στην Καλιφόρνια γίνεται το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο στον κόσμο με δυναμικότητα ισχύος 1.320 MW και 440 ανεμογεννήτριες. Πλέον, στις ΗΠΑ λειτουργούν 815 αιολικά πάρκα, με συνολική ισχύ περίπου 60 GW, αρκετή για να τροφοδοτήσει έως και 15 εκατομμύρια αμερικανικά σπίτια. Έτσι, η αιολική ενέργεια γίνεται η πρώτη πηγή ισχύος στις ΗΠΑ, με 45.100 εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες, αντιπροσωπεύοντας το 42% του συνόλου της ηλεκτρικής ισχύος των ΗΠΑ. Ως αποτέλεσμα, οι ΗΠΑ γίνονται και πάλι η μεγαλύτερη αγορά αιολικής ενέργειας στον κόσμο. Την ίδια χρονιά η εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Κίνα φτάνει τα 75 GW, η μεγαλύτερη στον κόσμο για μία μόνο χώρα. Επίσης, το Ηνωμένο Βασίλειο έχει εγκαταστήσει πάνω από 3 GW υπεράκτιας αιολικής ισχύος, τη μεγαλύτερη στον κόσμο και υπερ-τριπλάσια από τη Δανία, η οποία έρχεται δεύτερη, στην οποία πλέον η αιολική ενέργεια παράγει πάνω από το 30% των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια.

Το 2013 εγκαθίσταται η πρώτη υβριδική ανεμογεννήτρια στον κόσμο που λειτουργεί με αιολική ενέργεια στα ανοικτά των ακτών της Ιαπωνίας. Επιπλέον, ολοκληρώνεται το αιολικό πάρκο London Array στο Ηνωμένο Βασίλειο, το οποίο καθίσταται το μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στον κόσμο. Περιλαμβάνει 175 ανεμογεννήτριες συνολικής δυναμικότητας 630 MW, αρκετή για να καλύψει την ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας 480.000 βρετανικών σπιτιών. Παράλληλα, η GE παρασκευάζει ανεμογεννήτριες που ενσωματώνουν αποθήκευση ενέργειας. Την ίδια στιγμή, η αιολική ενέργεια γίνεται η τρίτη μεγαλύτερη ενεργειακή πηγή της Κίνας, περνώντας την πυρηνική ενέργεια, οδηγώντας την να ξεπεράσει και πάλι τις ΗΠΑ και να γίνει η πρωτοπόρος αγορά αιολικής ενέργειας παγκοσμίως. Επιπρόσθετα, ξεκινά η λειτουργία της πρώτης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας στις ΗΠΑ (Shahan, 2014).

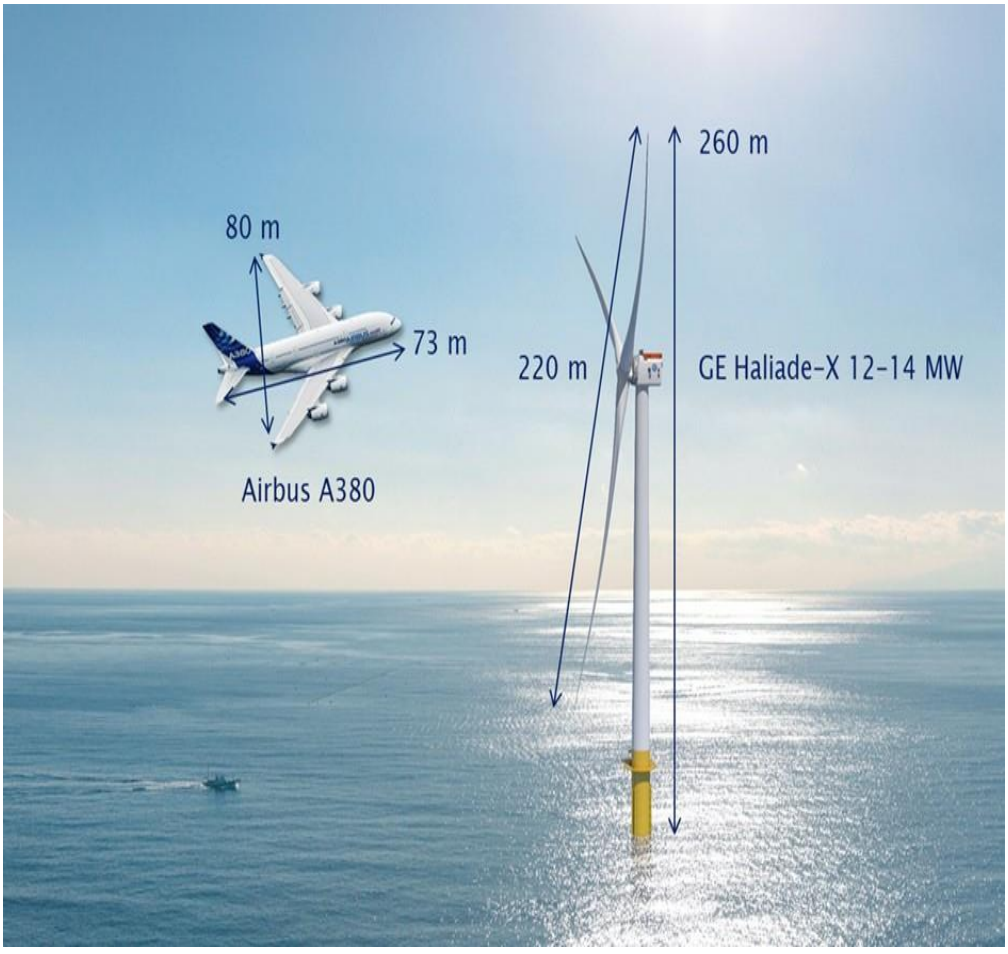
Το 2014, η βιομηχανία αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη εγκαθιστά περισσότερη νέα δυναμικότητα από ό,τι το φυσικό αέριο και ο άνθρακας μαζί, ενώ η χερσαία αιολική ενέργεια

καθίσταται φθηνότερη από τον άνθρακα, το φυσικό αέριο και την πυρηνική ενέργεια. Έναν χρόνο αργότερα, το 2015, η ΙΚΕΑ ανακοινώνει δέσμευση ύψους 1 δισ. € για αιολική και ηλιακή ενέργεια στα πλαίσια καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής. Και άλλες εταιρείες επιλέγουν την αιολική ενέργεια για την τροφοδοσία των επιχειρήσεών τους, όπως η BMW, η General Motors, η Nissan, η Honda, η CEMEX, η Heineken, η LEGO, το Facebook, η Google, η Amazon, η Microsoft και η Apple. Εν συνεχεία, μέχρι το τέλος του 2016, η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς έχει φθάσει τα 487 GW, εκ των οποίων τα 454 είναι χερσαία (Σχήμα 1.3). Μόνο στις ΗΠΑ, η εγκατεστημένη χερσαία ισχύς ξεπερνά τα 100 GW. Το Ηνωμένο Βασίλειο είναι πλέον η μεγαλύτερη υπεράκτια αιολική αγορά στον κόσμο και αντιπροσωπεύει πάνω από το 36% της εγκατεστημένης ισχύος (Zhang, 2021). Ταυτόχρονα, η Κίνα ξεπερνά την ΕΕ σε αθροιστικές αιολικές εγκαταστάσεις.

Το 2017, τίθεται σε λειτουργία το πρώτο πλωτό αιολικό πάρκο στον κόσμο στο Hywind της Σκωτίας. Συνδέονται 5 ανεμογεννήτριες των 6 MW η καθεμία για να δοκιμαστεί η πλωτή τεχνολογία σε διάταξη πάρκου. Επί του παρόντος, το μακρύτερο πτερύγιο ανεμογεννήτριας είναι 88,4 m, που παράγεται για μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια 8 MW. Την επόμενη χρονιά, το 2018, το Walney Extension της Ersted, που βρίσκεται στη Θάλασσα της Ιρλανδίας, γίνεται το μεγαλύτερο σε λειτουργία υπεράκτιο αιολικό πάρκο στον κόσμο με 659 MW συνολικά.

Το 2019, η εγκατεστημένη αιολική ενέργεια στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει πάνω από 28 εκατομμύρια σπίτια, την στιγμή που το Ηνωμένο Βασίλειο έχει πλέον αρκετά υπεράκτια αιολικά πάρκα για την ηλεκτροδότηση 4,5 εκατομμυρίων κατοικιών, ενώ υπάρχουν περισσότερα από 1.500 χερσαία αιολικά πάρκα σε λειτουργία. Συλλογικά, οι μεγάλες ανεμογεννήτριες παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για να τροφοδοτήσουν περισσότερα από 7 εκατομμύρια σπίτια. Δύο χρόνια αργότερα, το 2021, η Κίνα προσθέτει 16,9 GW νέας υπεράκτιας αιολικής ισχύος, περισσότερα από όσα είναι εγκατεστημένα σε ολόκληρη την ΕΕ. Την ίδια χρονιά, η Δανία κάλυψε το 99% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στις 6 Μαρτίου 2021 με αιολική ενέργεια, ενώ στην Ισπανία η παραγωγή αιολικής ενέργειας ήταν η κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τις ανεμογεννήτριες να παράγουν 60.600 GWh.

Το 2023, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι πλέον οι μεγαλύτερες περιστρεφόμενες μηχανές στη Γη. Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται η σύγκριση μίας μοντέρνας μεγάλης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με το μεγαλύτερο πολιτικό μεταφορικό αεροσκάφος στον κόσμο, το A380.



Σχήμα 1.3 *Σύγκριση μεγέθους μεγάλης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με Airbus 380. (Πηγή : https://www.ge.com/)*

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 1.3, χρειάζονται τρία A380, το μεγαλύτερο πολιτικό μεταφορικό αεροπλάνο στον κόσμο, για να καλύψουν τη διάμετρο του δρομέα μιας μεγάλης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας (Paul Veers et al., 2023).

Στο Σχήμα 1.4 φαίνεται η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας από το 2000 μέχρι το 2021, καθώς και οι επιμέρους συνεισφορές της χερσαίας και της υπεράκτιας.

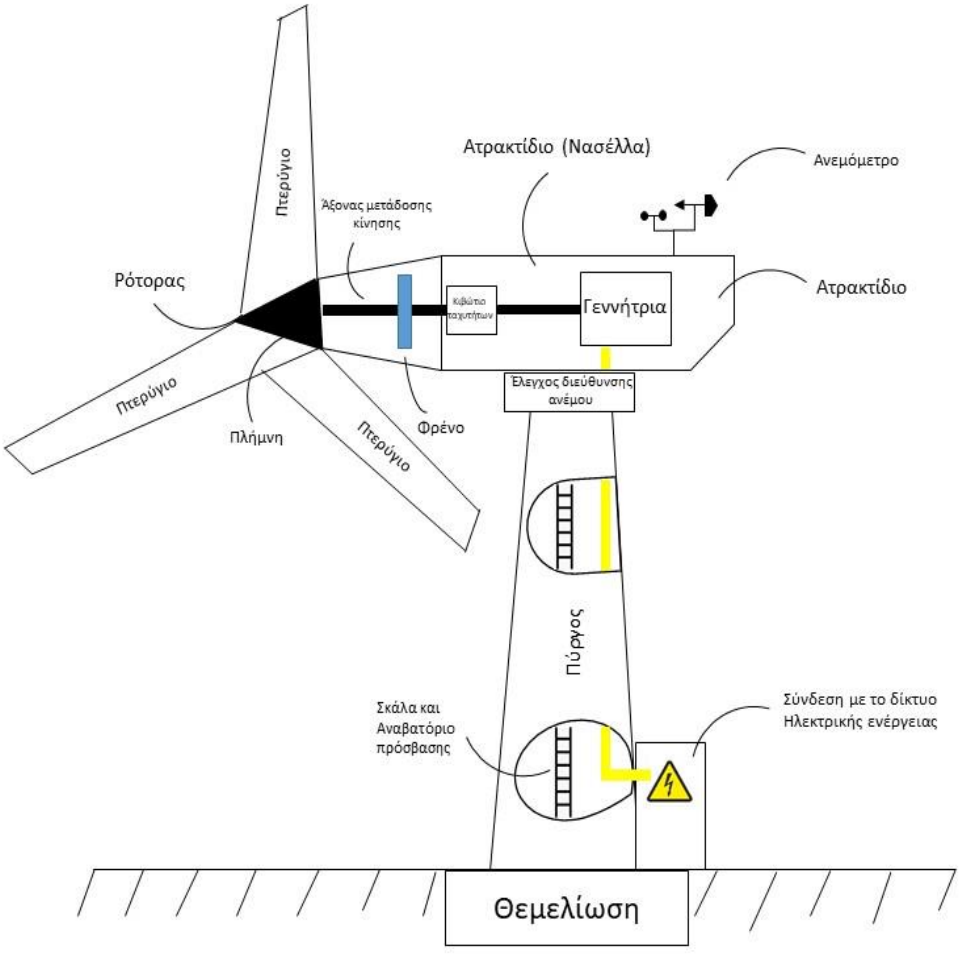
Σχήμα 1.4 *Συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας. (MW) (Πηγή : Our World in Data)*

Από το Σχήμα 1.4, παρατηρείται ότι τα τελευταία 20 περίπου χρόνια, η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται εκθετικά, υπερτονίζοντας την άνοδο της αιολικής ενέργειας, τόσο της χερσαίας όσο και της υπεράκτιας. Περί το τέλος του 2023, φημολογείται ότι η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς έφτασε το 1 TW (Global Wind Report, 2023).

2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

2.1. Μέρη μίας ανεμογεννήτριας

Οι ανεμογεννήτριες διατίθενται σε πολλά μεγέθη και διαμορφώσεις και κατασκευάζονται από ένα ευρύ φάσμα υλικών. Στο Σχήμα 2.1 φαίνονται τα βασικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι κομβικής σημασίας στη στήριξη, λειτουργία της αλλά και στην πρόσβαση σε αυτή.



Σχήμα 2.1 *Βασικά δομικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας.*

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από τον δρομέα που έχει πτερύγια προσαρτημένα σε μια πλήμνη, το ατρακτίδιο που στεγάζει έναν άξονα μετάδοσης κίνησης (αποτελείται από κιβώτιο ταχυτήτων, συνδετικούς άξονες, έδρανο στήριξης), τη γεννήτρια και άλλα μηχανήματα, τον πύργο και ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό που εδράζεται στο έδαφος μέσω εγκιβωτισμένης θεμελίωσης βαρύτητας από σκυρόδεμα (Ancona, McVeigh, 2001).

Τα πτερύγια συλλέγουν την ενέργεια του ρεύματος του ανέμου και ο δρομέας μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε περιστροφική κίνηση μεταδίδοντας έτσι την αιολική ενέργεια (μέσω του άξονα μετάδοσης κίνησης) στη γεννήτρια. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να διανεμηθεί απευθείας στο δίκτυο κοινής ωφέλειας.

Τα πτερύγια, το ατρακτίδιο και ο πύργος καθορίζουν τη λειτουργικότητα των ανεμογεννητριών. Ο πύργος εδράζεται στο θεμέλιο και στηρίζει τα πτερύγια και το ατρακτίδιο. Αυτός σχεδιάζεται έτσι ώστε να συγκρατεί το βάρος των πτερυγίων, του ατρακτιδίου και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, αλλά και να αντιστέκεται σε ακανόνιστες μεταβολές δυνάμεων, οφειλόμενες σε αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου γύρω από την ανεμογεννήτρια. Επιβάλλεται επίσης ο πύργος να κατασκευάζεται σε τμήματα και να συναρμολογείται στη συγκεκριμένη θέση για την εξάλειψη ή τη μείωση του κόστους (Olabi et al., 2021).

Το ατρακτίδιο που φαίνεται στο Σχήμα 2.1 είναι ο ακρογωνιαίος λίθος του στροβίλου.. Τα υλικά του ατρακτιδίου πρέπει να είναι ελαφριά, απλά στη μορφοποίηση και ικανά να αντέχουν στη διάβρωση. Στο περίβλημα του προσαρτάται το ανεμόμετρο, το οποίο μετράει την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου συνήθως σε 10λεπτη χρονική βάση. Η προσβασιμότητα στο ατρακτίδιο για την τακτική συντήρηση είναι επίσης μια πρόκληση λόγω της θέσης του στην ανεμογεννήτρια, οπότε τοποθετούνται τόσο σκάλα όσο και αναβατόριο πρόσβασης.

Στον Πίνακα 2.1 φαίνεται το ποσοστό βάρους του κάθε εξαρτήματος από το οποίο καταρτίζεται μία ανεμογεννήτρια.

Πίνακας 2.1 *Ποσοστό εξαρτημάτων ανεμογεννήτριας ως προς το σύνολό της. (Πηγή:Ancona & McVeigh, 2001).*

Εξάρτημα	**Ποσοστό βάρους (%)**
Δρομέας	10-14
Ατρακτίδιο και ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός	25-40
Κιβώτιο ταχυτήτων και άξονας μετάδοσης κίνησης	10-15
Γεννήτρια	5-15
Πύργος	35-65

2.2. Επιλογή τοποθεσίας ανέγερσης ανεμογεννήτριας

Υπάρχουν διάφορες τοποθεσίες για την κατασκευή ανεμογεννητριών. Υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε κάθε τοποθεσία, οπότε είναι σημαντική η αξιολόγηση της καλύτερης, σύμφωνα με τις ανάγκες του εκάστοτε έργου:

1) Πεδιάδες: Τα πλεονεκτήματα της κατασκευής ανεμογεννητριών σε μία πεδιάδα είναι ότι θα απαιτηθεί ελάχιστη διαμόρφωση του χώρου, επειδή η τοποθεσία είναι πιθανότατα ήδη επίπεδη. Η κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας θα μπορούσε επίσης να φέρει περισσότερες θέσεις εργασίας σε αυτές τις συνήθως αγροτικές περιοχές κατά την κατασκευή των ανεμογεννητριών και στη συνέχεια συντήρησή τους, αλλά και σε άλλους ποικίλους τομείς μετέπειτα. Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την απώλεια αυτής της γης για καλλιέργεια και το γεγονός ότι τα πτερύγια των ανεμογεννητριών μπορούν να είναι επικίνδυνα για τα πτηνά.

2) Βουνά: Τα πλεονεκτήματα της κατασκευής ανεμογεννητριών στα βουνά είναι ότι αυτά δημιουργούν διαδρόμους κίνησης του αέρα που επιτρέπουν στις ανεμογεννήτριες να παράγουν περισσότερη ενέργεια από ότι σε επίπεδες περιοχές, καθώς η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται η δυσκολία κατασκευής λόγω της πολυπλοκότητας της μορφολογίας του εδάφους και ενδεχομένως ο περιορισμένος αριθμός ανεμογεννητριών που μπορούν να κατασκευαστούν σε ορεινή περιοχή. Επιπροσθέτως, τα φορτηγά που μεταφέρουν τα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας μπορεί να αντιμετωπίσουν δυσκολίες στους ορεινούς δρόμους.

3) Αυτοκινητόδρομοι: Τα πλεονεκτήματα της κατασκευής ανεμογεννητριών γύρω από αυτοκινητόδρομους δε διαφέρουν πολύ από αυτά σε αγροτικές εκτάσεις. Η περιοχή γύρω από τους αυτοκινητόδρομους έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, ήδη αναπτυχθεί, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο υφιστάμενος αυτοκινητόδρομος για την μεταφορά. Επίσης, τα ρεύματα που γεννούνται από τα διερχόμενα αυτοκίνητα επαυξάνουν την ένταση του ανέμου. Ένα άλλο θετικό της κατασκευής ανεμογεννητριών κοντά σε αυτοκινητόδρομους είναι ότι η γύρω περιοχή συνήθως δεν χρησιμοποιείται για οικιστική ανάπτυξη, επειδή οι άνθρωποι δεν θέλουν να ζουν ακριβώς δίπλα τους. Όσον αφορά τα αρνητικά, τίθεται θέμα ασφάλειας, αφού σε περίπτωση βλάβης εξαρτήματος αυτό ενδέχεται να πέσει πάνω στον αυτοκινητόδρομο (Champagnie et al., 2013). Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της κατασκευής, θα υπάρχει όχληση του αυτοκινητόδρομου.

4) Υπεράκτια: Τα πλεονεκτήματα της κατασκευής υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι ο ανεμπόδιστος άνεμος στα ανοιχτά της θάλασσας και η λιγότερη ηχορύπανση. Ορισμένοι άνθρωποι θεωρούν επίσης τις ανεμογεννήτριες ενοχλητικές, οπότε η τοποθέτησή τους εκτός ακτής επιλύει και αυτό το πρόβλημα. Το αρνητικό της κατασκευής υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι ότι είναι η πιο δαπανηρή μέθοδος, καθώς το κόστος δεν περιλαμβάνει

μόνο την κατασκευή της ανεμογεννήτριας και την στήριξή της, αλλά και τη σύνδεσή της στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω υποθαλάσσιων αγωγών. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες διαταράσσουν επίσης την αλιεία, τη ναυσιπλοΐα των σκαφών, τους βιότοπους των ωκεανών και τη θαλάσσια ζωή.

2.3. Δραστηριότητες κατασκευής αιολικού πάρκου

Για να καταστεί δυνατή η τοποθέτηση μίας ανεμογεννήτριας σε ένα προκαθορισμένο σημείο, προ-απαιτούνται αρκετές σύνθετες δραστηριότητες οι οποίες μόνο δεδομένες δεν πρέπει να θεωρούνται. Οι δραστηριότητες αυτές περιγράφονται παρακάτω:

1. Παράδοση χώρου και εγκατάσταση εργοταξίου (γραφεία, αποθηκευτικός χώρος, παροχή ρεύματος και νερού, σηματοδότηση κ.λπ.).
2. Καθαρισμός φυτικής γης και κατασκευή νέων δρόμων (ή βελτίωση υπαρχόντων).
3. Διεξαγωγή γεωτεχνικών ερευνών για την εξακρίβωση της κατάστασης του υπεδάφους στις θέσεις βάσεων ανεμογεννητριών.
4. Κατασκευή της πλατείας ανέγερσης και της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας.

α) Εκσκαφή, ισοπέδωση και προκαταρκτική συμπύκνωση της πλατείας.

β) Εκσκαφή θεμελίωσης, ισοπέδωση και συμπύκνωση της θεμελίωσης, και εκσκαφή του καναλιού καλωδίων κάτω από το θεμέλιο.

γ) Τοποθέτηση σκυροδέματος καθαριότητας, εγκατάσταση του κλωβού αγκύρωσης της ανεμογεννήτριας και τοποθέτηση οπλισμού.

δ) Εγκατάσταση ξυλοτύπων ή μεταλλικών κατασκευών και συστήματος γείωσης θεμελίων.

ε) Σκυροδέτηση θεμελίου.

ζ) Συντήρηση και προστασία του σκυροδέματος.

η) Επίχωση του θεμελίου.

θ) Τελική διαμόρφωση της πλατείας ανέγερσης, επίχωση και συμπύκνωση της πλατφόρμας με θραυστό υλικό.

5. Κατασκευή Δικτύου Μέσης Τάσης Αιολικού πάρκου.

Το δίκτυο Μέσης Τάσης (στην Ελλάδα συνήθως 20-33 kV) συνδέει σειριακά τις ανεμογεννήτριες και μεταφέρει την παραγόμενη ενέργεια από το Αιολικό Πάρκο στον πλησιέστερο Υποσταθμό υψηλής τάσης.

Η κατασκευή περιλαμβάνει:

α) Εκσκαφή τάφρου προς εγκατάσταση καλωδίων και εγκατάσταση αγωγού γείωσης στον πυθμένα εκσκαφής εφόσον απαιτεί η μελέτη (επίχωση του πυθμένα ύστερα).

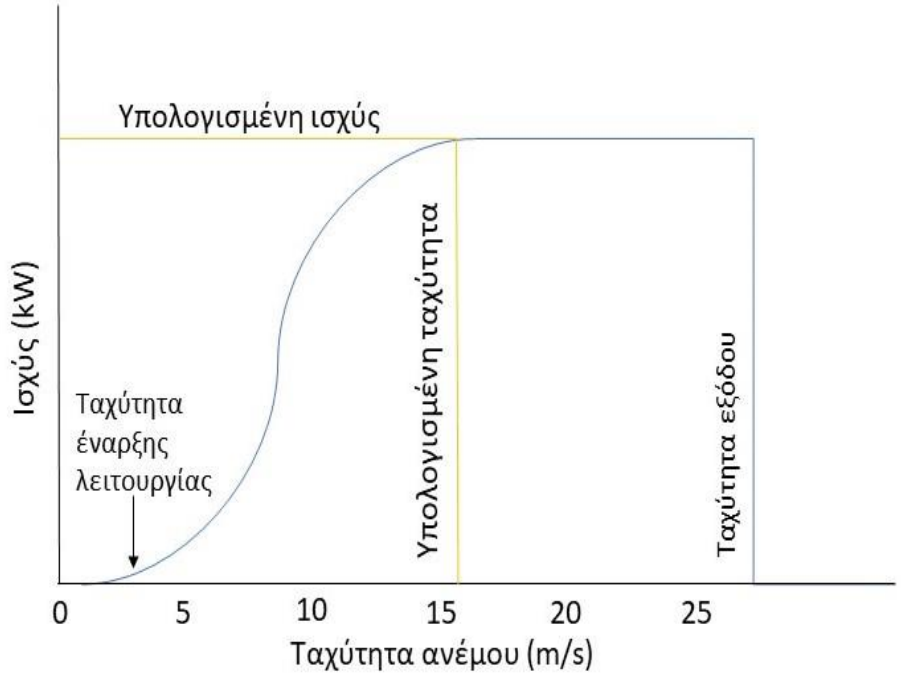
β) Τοποθέτηση του καλωδίου γείωσης και του σωλήνα πολυαιθυλενίου HDPE (για το καλώδιο οπτικών ινών) από μία γεννήτρια στην άλλη ή προς τον Υποσταθμό.

γ) Επίχωση με άμμο πάνω από την στέψη καλωδίων, τοποθέτηση των προστατευτικών πλακών και της ταινίας σήμανσης.
δ) Τελική επίχωση της τάφρου.
ε) Σύνδεση των καλωδίων και ηλεκτρικές μετρήσεις.
6. Μεταφορά των ανεμογεννητριών.
7. Εγκατάσταση των ανεμογεννητριών.
8. Κατασκευή του κτιρίου ελέγχου.
9. Δοκιμές πριν την ενεργοποίηση του Αιολικού Πάρκου.
10. Σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο, δοκιμαστική λειτουργία και στην συνέχεια έναρξη εμπορικής λειτουργίας.
11. Φύτευση, περιβαλλοντικές εργασίες και έλεγχος.
12. Από-κινητοποίηση του εργοταξίου.

2.4. Καμπύλες ισχύος

Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας περιγράφει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη ισχύος είναι ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας και του συντελεστή ισχύος (Teyabeen et al., 2017), καθώς ποσοτικοποιεί τη σχέση μεταξύ του εισερχόμενου ανέμου και της παραγωγής ισχύος μιας ανεμογεννήτριας. Πρέπει να πραγματοποιούνται ταυτόχρονες μετρήσεις της ταχύτητας ανέμου u(t) και της ισχύος εξόδου P(t) για την εκάστοτε ανεμογεννήτρια. Η ισχύς εξόδου P(t) είναι η καθαρή ισχύς που εκλύεται από την ανεμογεννήτρια στο ηλεκτρικό δίκτυο. Από αυτή τη συλλογή δεδομένων μπορεί να προκύψει μια σχέση εξόδου ισχύος P(u) σε συνάρτηση με την ταχύτητα του εισερχόμενου ανέμου. Η διαδικασία αυτή μπορεί στη συνέχεια να εφαρμοστεί σε μεμονωμένες ανεμογεννήτριες προκειμένου να χαρακτηριστεί η απόδοση ισχύος τους, να παρακολουθείται η συμπεριφορά τους διαχρονικά, καθώς και να προβλέπεται η παραγωγή ισχύος τους.

Προκειμένου να ελεγχθεί η απόδοση ισχύος, πρέπει να γίνει μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου. Καθώς μια ανεμογεννήτρια παραμορφώνει το εισερχόμενο πεδίο ανέμου, η μέτρηση στο επίπεδο του δρομέα δεν είναι χρήσιμη, τουλάχιστον όχι χωρίς περαιτέρω διορθώσεις. Αντ' αυτού, η εισερχόμενη ανάντη ταχύτητα επιλέγεται γενικά ως αντιπροσωπευτική του και μετριέται από έναν μετεωρολογικό ιστό στο ύψος της πλήμνης της ανεμογεννήτριας, σε ορισμένη απόσταση μπροστά από την ανεμογεννήτρια. Με βάση αυτές τις εκτιμήσεις, γίνεται δυνατή η ποσοτικοποίηση της απόδοσης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας (Milan et al., 2010). Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται μία τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.2 *Τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας. (Πηγή: Bošnjakovic´ et al., 2022).*

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.2, μία καμπύλη ισχύος επιδεικνύει την ελάχιστη ταχύτητα με την οποία ξεκινάει την λειτουργία της μία ανεμογεννήτρια, την ταχύτητα με την οποία πιάνει την μέγιστη ισχύ και τέλος, την ταχύτητα εξόδου, την μέγιστη ταχύτητα δηλαδή με την οποία διακόπτεται η λειτουργία της.

Η καμπύλη ισχύος απεικονίζει την απόκριση της ισχύος μιας ανεμογεννήτριας σε διάφορες ταχύτητες ανέμου. Τα ακριβή μοντέλα των καμπυλών είναι χρήσιμα σε πολλές εφαρμογές αιολικής ενέργειας. Οι στόχοι της μοντελοποίησης της καμπύλης ισχύος ανεμογεννήτριας παρατίθενται παρακάτω:

1. Εκτίμηση και πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της αιολικής ισχύος. Ο καθορισμός του αιολικού πόρου μιας περιοχής όσον αφορά την ταχύτητα του ανέμου, της πυκνότητας αιολικής ισχύος και του αιολικού δυναμικού, γίνονται για τον εντοπισμό περιοχών που είναι κατάλληλες για την ανάπτυξη αιολικής ενέργειας. Κατά τη διαδικασία αυτή, η εκτίμηση της ενέργειας γίνεται αξιοποιώντας τα διαθέσιμα ανεμολογικά δεδομένα και την καμπύλη ισχύος των ανεμογεννητριών. Απαιτείται επίσης η πρόβλεψη της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας (σε μια υποψήφια τοποθεσία) για τη διαστασιολόγηση και τις μελέτες βελτιστοποίησης κόστους κατά το στάδιο σχεδιασμού ενός αιολικού συστήματος. Η ακρίβεια στην πρόβλεψη της ισχύος είναι σημαντική, καθώς η υπερεκτίμηση μπορεί να οδηγήσει σε

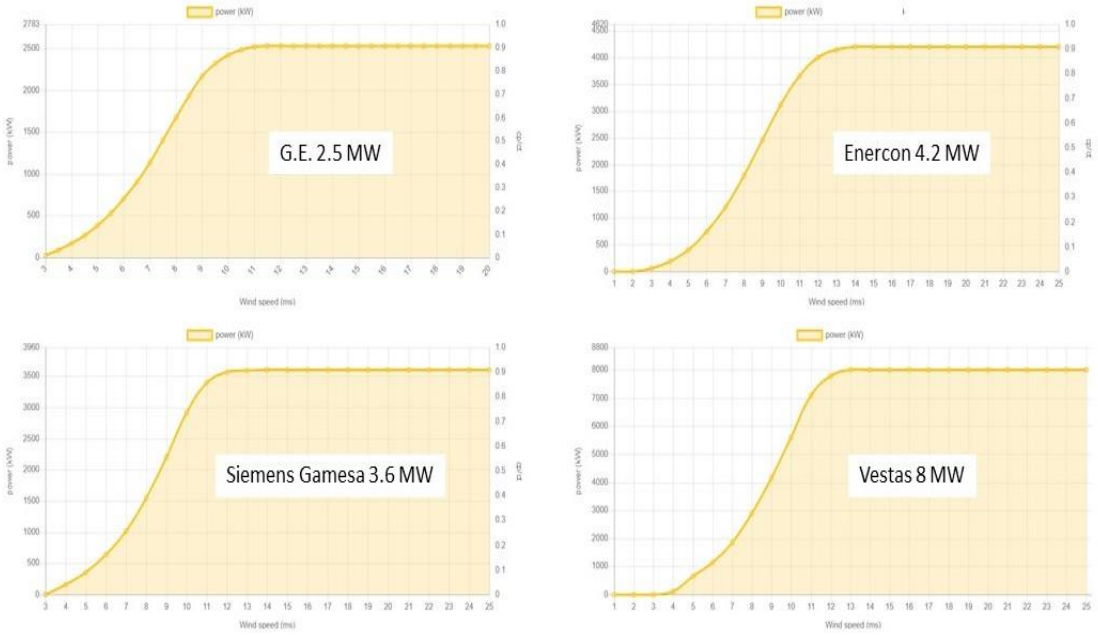
κακή αξιοπιστία και μια υποεκτίμηση μπορεί να οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση του αιολικού συστήματος ενέργειας. Οι φορείς εκμετάλλευσης ανεμογεννητριών που εμπορεύονται ηλεκτρική ενέργεια στην αγορά, πρέπει επίσης να προβλέπουν την παραγωγή ισχύος των ανεμογεννητριών τους με ακρίβεια, ώστε να μπορούν να παραδώσουν την ποσότητα ισχύος που διαπραγματεύονται (Sohoni et al., 2016).

2. Εκτίμηση του συντελεστή δυναμικότητας. Ο συντελεστής δυναμικότητας μίας ανεμογεννήτριας είναι ο λόγος της μέσης ισχύος εξόδου προς την ονομαστική ισχύ εξόδου της γεννήτριας και αποτελεί δείκτη αποδοτικότητας της. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης παραγωγής μιας ανεμογεννήτριας που απαιτείται για τις μελέτες διαστασιολόγησης και βελτιστοποίησης κόστους, και την κατάταξη των πιθανών τοποθεσιών.

3. Επιλογή των ανεμογεννητριών. Η καμπύλη ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνει γενική σύγκριση μεταξύ μοντέλων και μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή της ανεμογεννήτριας από τις διαθέσιμες επιλογές. Η επιλογή των χαρακτηριστικών της ανεμογεννήτριας που ταιριάζουν με το καθεστώς ανέμου του τόπου βοηθά στη βελτιστοποίηση της παραγωγής του συστήματος αιολικής ενέργειας.

4. Διαδικτυακή παρακολούθηση των καμπυλών ισχύος. Οι καμπύλες ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τακτική παρατήρηση της εναλλαγής της απόδοσης των ανεμογεννητριών. Για το λόγο αυτό κατασκευάζεται μια καμπύλη αναφοράς η οποία αντιπροσωπεύει την απόδοση μίας ανεμογεννήτριας που λειτουργεί κανονικά. Αυτή η καμπύλη αναφοράς μπορεί να εξαχθεί από τη μετρούμενη ισχύ εξόδου και την ταχύτητα ανέμου των ανεμογεννητριών. Η πραγματική καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας μπορεί να συγκριθεί με αυτήν την καμπύλη αναφοράς. Οι αποκλίσεις των πραγματικών τιμών από την αναμενόμενη παραγωγή δύνανται να υποδηλώνουν υπο-απόδοση ή σφάλματα, όπως βλάβες στα πτερύγια και σφάλματα του συστήματος ζυγοστάθμισης και κλίσης. Ως εκ τούτου, μία στατιστική ανάλυση των δεδομένων αποκλίσεων μπορεί να δώσει ενδείξεις για τον συγκεκριμένο λόγο της εκάστοτε ανωμαλίας και να οδηγήσει σε έγκαιρη αναγνώριση των αναδυόμενων βλαβών και έγκαιρη επισκευή και συντήρηση του εξοπλισμού (Sohoni et al., 2016).

Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται 4 παραδείγματα καμπύλων ισχύος υπαρχόντων ανεμογεννητριών από 4 από τις μεγαλύτερες κατασκευαστικές εταιρείες ανεμογεννητριών στον κόσμο, την General Electric, την Siemens Gamesa, την Vestas και την Enercon.



Σχήμα 2.3 *Καμπύλες ισχύος εν ενεργεία ανεμογεννητριών (MW). (Πηγή : https://en.wind-turbine-models.com/)*

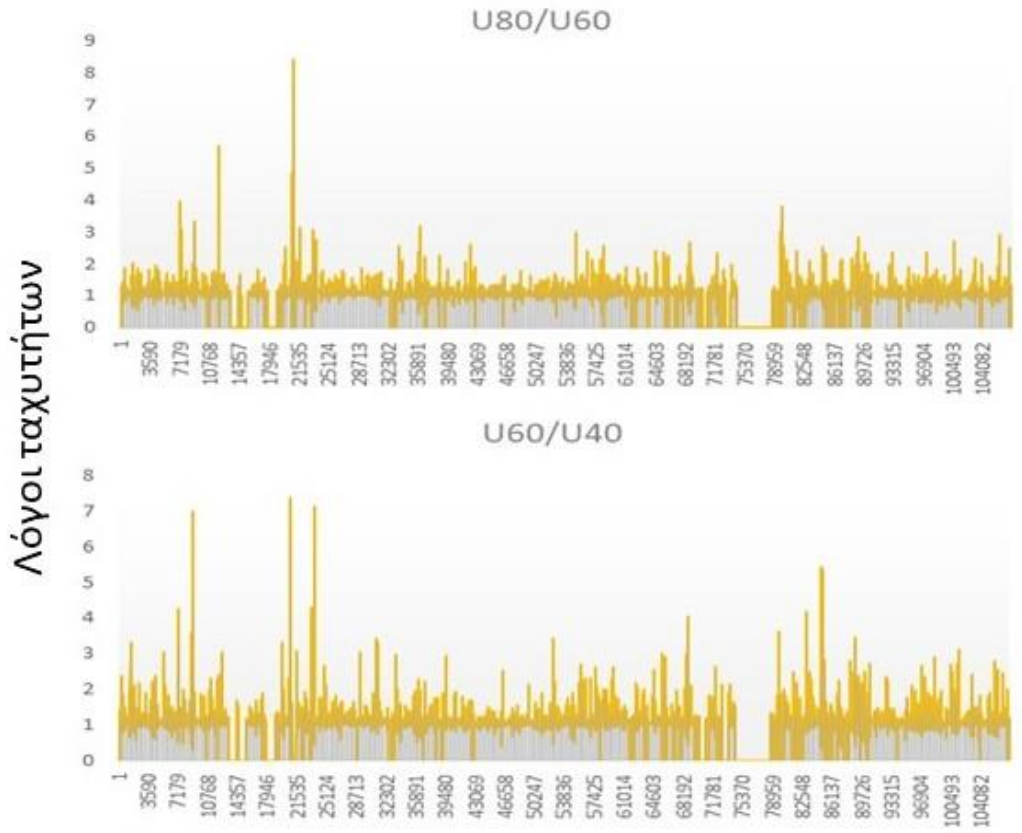
Ενώ στο Σχήμα 2.3 δεν φαίνονται οι ταχύτητες εξόδου των ανεμογεννητριών, είναι ορατές οι ενδείξεις των ταχυτήτων έναρξης λειτουργίας καθώς και οι ταχύτητες, στις οποίες πετυχαίνουν οι ανεμογεννήτριες την επίδοση της ισχύος που αναγράφεται στο μοντέλο τους.

2.5. Εκτίμηση ταχύτητας ανέμου για την πρόβλεψη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η έρευνα σχετικά με τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με το ύψος, χρησιμοποιώντας δεδομένα λειτουργίας ανεμογεννητριών, αποτελεί κρίσιμη πτυχή της ανάλυσης και βελτιστοποίησης της αιολικής ενέργειας. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι ταχύτητες του ανέμου μεταβάλλονται με την αύξηση του ύψους πάνω από το έδαφος είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό αποδοτικών ανεμογεννητριών, τη μεγιστοποίηση της συλλογής ενέργειας και την αξιολόγηση της απόδοσης των υφιστάμενων αιολικών πάρκων.

Η έρευνα ξεκινά συνήθως με τη συλλογή δεδομένων ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου από ανεμογεννήτριες που βρίσκονται σε λειτουργία. Οι ερευνητές αναλύουν τα δεδομένα ταχύτητας ανέμου για να εκτιμήσουν πώς οι ταχύτητες ανέμου μεταβάλλονται με το ύψος και συνθέτουν το κατακόρυφο προφίλ ανέμου, που περιγράφει την μεταβολή αυτή. Ωστόσο, η λήψη των δεδομένων από έναν μετεωρολογικό ιστό δημιουργεί συχνά

αβεβαιότητες λόγω λανθασμένων μετρήσεων του ανεμομέτρου ή και σταδιακή διακοπή λειτουργίας του. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται η μεταβολή του λόγου της ταχύτητας καθ' ύψος, από δεδομένα που ελήφθησαν από μετεωρολογικό ιστό που βρίσκεται σε λειτουργία, σε τρία υψόμετρα και για διάρκεια τριών χρόνων.



Σχήμα 2.4 *Μεταβολή του λόγου ταχυτήτων ανέμου (m/s) σε μετεωρολογικό ιστό καθ' ύψος για 3 υψόμετρα (80, 60 και 40 m) και διάρκεια 3 έτη.*

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.4, ενώ η αναμενόμενη διακύμανση του λόγου θα πρέπει να είναι κατά βάση οριακά μεγαλύτερη από την μονάδα (αφού η ταχύτητα του ανέμου είναι κατά κύριο λόγο μεγαλύτερη σε μεγαλύτερα υψόμετρα), υπάρχουν αρκετά σημεία στα οποία είναι μικρότερη της μονάδας, ενώ δεν λείπουν και μερικά ακραία σημεία, στα οποία ο λόγος είναι αισθητά μεγαλύτερος από την μονάδα. Επιπροσθέτως, ο λόγος προσεγγίζει το 0 τόσο σε μεμονωμένα σημεία, όσο και για ένα μη αμελητέο χρονικό διάστημα, το οποίο υποδηλώνει πιθανότατα διακοπή λειτουργίας για αυτό το διάστημα.

Η μεγαλύτερη πρόκληση για τη μέτρηση του ανέμου είναι η πραγματοποίηση ακριβών μετρήσεων σε πολύπλοκο ή/και απόκρημνο έδαφος (McKenna et al., 2016). Εδώ είναι που εισάγεται ο όρος της τραχύτητας. Η έννοια του μήκους τραχύτητας ξεκίνησε με τον

χαρακτηρισμό του προφίλ ταχύτητας σε ιδανικές ροές μηχανικής (π.χ. σωλήνες), όπου η ταχύτητα έχει άμεση φυσική ερμηνεία, ενώ υιοθετήθηκε περαιτέρω για την περιγραφή του προφίλ του ανέμου στο ατμοσφαιρικό επιφανειακό στρώμα (ASL). Στον Πίνακα 2.2 αναγράφονται οι τυπικές τιμές του μήκους τραχύτητας σε cm για διαφορετικές επιφάνειες.

Πίνακας 2.2 *Τυπικές τιμές παραμέτρου μήκους τραχύτητας z_0 για διάφορες φυσικές επιφάνειες (Πηγή : Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999)*

Τυπικές τιμές παραμέτρου τραχύτητας z_0 για διάφορες φυσικές επιφάνειες (cm)	
Πάγος	0.001
Ασφαλτοστρωμένη επιφάνεια	0.002
Υδάτινη επιφάνεια	0.01-0.06
Χλόη ύψους μέχρι 1cm	0.1
Χλόη ύψους μέχρι 1-10 cm	0.1-0.2
Χλόη-σιτηρά ύψους 10-50 cm	2.0-5.0
Φυτοκάλυψη ύψους 1-2 m	20
Δένδρα ύψους 10-15 m	40-70

Από τον Πίνακα 2.2 παρατηρείται η μεγάλη επίδραση που έχει η χλωρίδα και η ποικίλη διαμόρφωσή της πάνω στο μήκος τραχύτητας, ειδικά όταν πρόκειται για ψηλά φυτά και δέντρα.

Ο βασικός ρόλος του μήκους τραχύτητας και ο ορισμός του μπορεί να γίνει αντιληπτός μέσω της ιδανικής έκφρασης για το μέσο προφίλ ανέμου U(z) πάνω από μια ομοιογενή επίπεδη επιφάνεια σε ουδέτερες συνθήκες (Kelly & Jørgensen, 2016). Οι δύο βασικές μέθοδοι μέτρησης του μήκους τραχύτητας είναι ο Λογαριθμικός Νόμος και ο Νόμος Ισχύος.

Ο Λογαριθμικός Νόμος (LL) είναι ίσως η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος πρόβλεψης του οριακού στρώματος. Περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$U_2/U_1 = \ln(z_2/z_0)/\ln(z_1/z_0)$, όπου

U_1 η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς

U_2 η εκτιμώμενη ταχύτητα του ανέμου

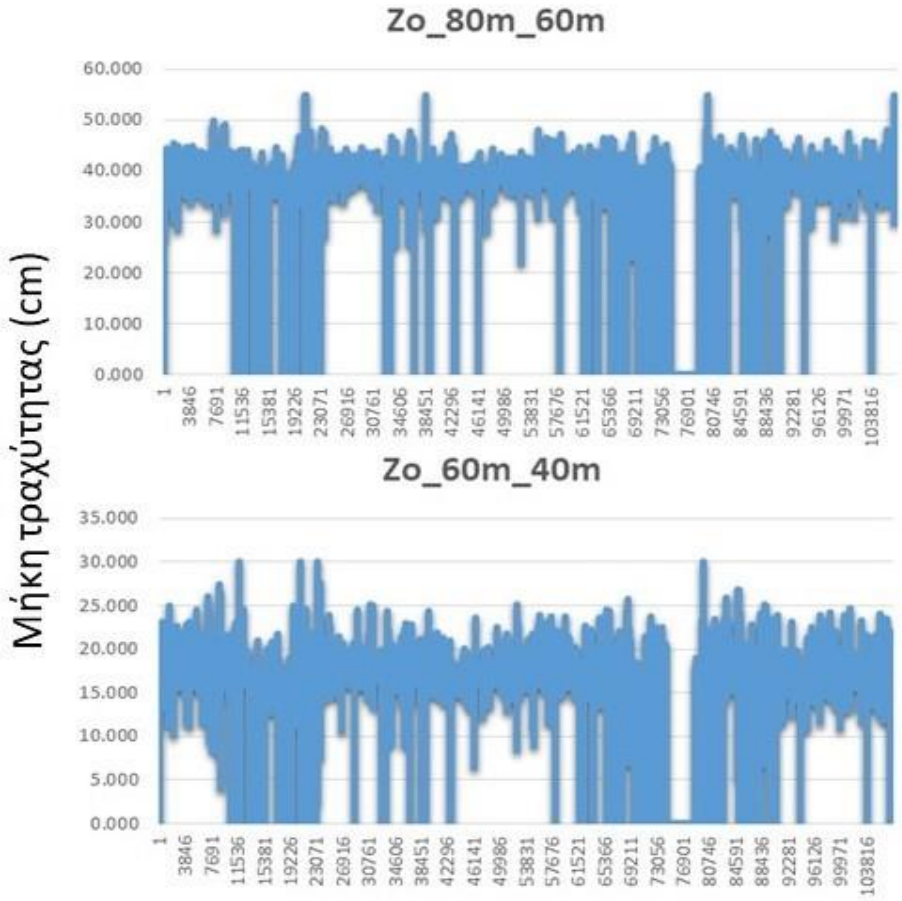
z_0 το μήκος τραχύτητας

z_1 το ύψος αναφοράς

z_2 το ύψος στο οποίο εκτιμάται η ταχύτητα του ανέμου

Η εφαρμογή LL δεν λαμβάνει υπόψη την ατμοσφαιρική σταθερότητα και υποθέτει ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες (Zoumakis, 1993).

Στο Σχήμα 2.5 φαίνονται τα αποτελέσματα μετρήσεων του μήκους τραχύτητας από την εφαρμογή του λογαριθμικού νόμου στα δεδομένα που ελήφθησαν από τον μετεωρολογικό ιστό.



Σχήμα 2.5 *Μετρήσεις μήκους τραχύτητας z_0 από την εφαρμογή του λογαριθμικού νόμου στα δεδομένα που ελήφθησαν από μετεωρολογικό ιστό για 3 υψόμετρα (80, 60 και 40 m) και διάρκεια 3 έτη.*

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5, ενώ η περιοχή για την οποία ελήφθησαν τα ανεμολογικά δεδομένα καλυπτόταν κυρίως από θάμνους και μερικά δέντρα, οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας ειδικά στα μεγάλα υψόμετρα υπερβαίνουν ακόμα και την μέγιστη τιμή 40 (Σχήμα 2,6), η οποία αναφέρεται κυρίως σε περιοχές με ψηλά δέντρα.

Η μέθοδος του νόμου ισχύος (PL) θεωρεί ότι η σχέση της αυξανόμενης ταχύτητας του ανέμου με το ύψος μπορεί να προσεγγιστεί με μια εκθετική συνάρτηση, όπως φαίνεται στην εξίσωση παρακάτω.

$U_2/U_1 = (z_2/z_1)^{\wedge}\alpha$, όπου

U_1 η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς

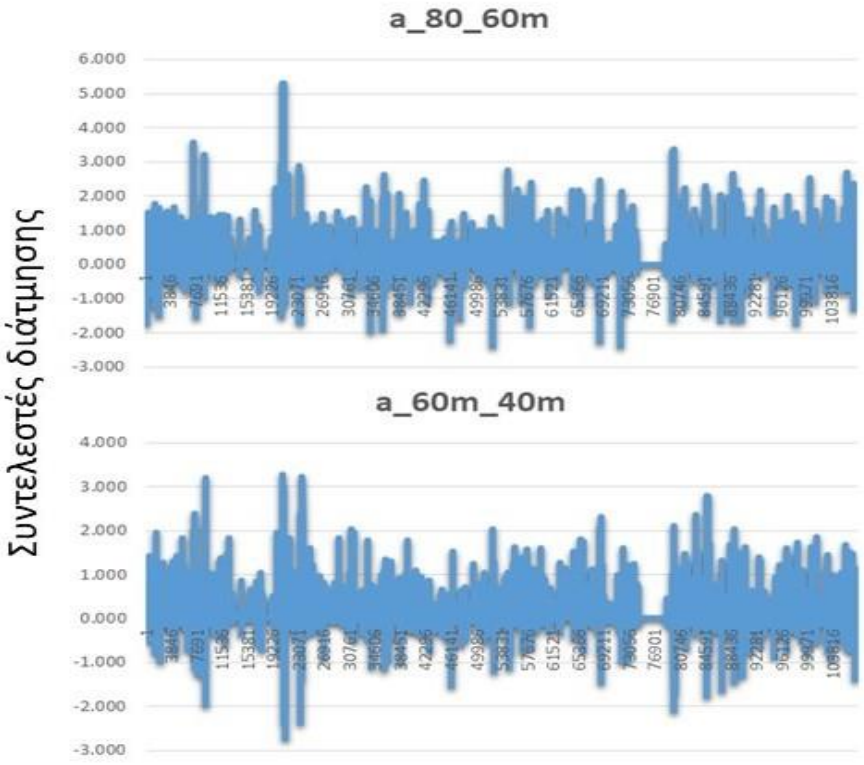
U_2 η εκτιμώμενη ταχύτητα του ανέμου

α ο συντελεστής διάτμησης (αντίστοιχος του μήκους τραχύτητας)

z_1 το ύψος αναφοράς

z_2 το ύψος στο οποίο εκτιμάται η ταχύτητα του ανέμου

Επομένως, για την εκτίμηση του συντελεστή διάτμησης του ανέμου απαιτούνται μόνο μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου σε δύο υψόμετρα (Tormo Soler, 2017). Οι χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή διάτμησης κυμαίνονται από 0.01 για γυμνές αμμώδεις επιφάνειες έως και 0.4 για δάση και κατοικημένες περιοχές, ενώ η τυπική της τιμή για υψόμετρα από 65 έως 120 m είναι 0.143 (Werapun et al., 2017). Στο Σχήμα 2.6 φαίνονται τα αποτελέσματα του συντελεστή διάτμησης από την εφαρμογή του λογαριθμικού νόμου στα δεδομένα που ελήφθησαν από τον μετεωρολογικό ιστό.



Σχήμα 2.6 *Μετρήσεις συντελεστή διάτμησης α από την εφαρμογή του λογαριθμικού νόμου στα δεδομένα που ελήφθησαν από μετεωρολογικό ιστό για 3 υψόμετρα (80, 60 και 40 m) και διάρκεια 3 έτη.*

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2.6, οι τιμές του συντελεστή διάτμησης δεν υπακούν σταθερά στις τυπικές τιμές 0.01 – 0.4, οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω, και ξεφεύγουν αρκετά από τις ενδεδειγμένες αυτές τιμές για σημαντικό χρονικό διάστημα.

Η επιλογή μεταξύ της χρήσης του νόμου ισχύος ή του λογαριθμικού προφίλ ταχύτητας ανέμου εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και το επίπεδο ακρίβειας που απαιτείται.

Πιο συγκεκριμένα, ο λογαριθμικός νόμος χαρακτηρίζεται από την ακρίβεια και την χρησιμότητά του όταν το έδαφος είναι πολύπλοκο (Σχήμα 2.5). Ωστόσο, απαιτεί περισσότερα δεδομένα, συμπεριλαμβανομένου του μήκους τραχύτητας (z_0) και της ταχύτητας ανέμου αναφοράς (V_{ref}), τα οποία μπορεί να μην είναι πάντα άμεσα διαθέσιμα. Χρησιμοποιείται συνήθως στον μηχανολογικό σχεδιασμό και στις αξιολογήσεις επιδόσεων των ανεμογεννητριών για να διασφαλίσει ακριβείς προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος πλήμνης της ανεμογεννήτριας.

Ο νόμος ισχύος από την άλλη, είναι γνωστός για την απλότητά του και την ευκολία στη χρήση, καθώς απαιτεί λιγότερα δεδομένα και παραμέτρους, καθιστώντας τον ιδανικό για γρήγορες και συχνές μετρήσεις. Μολαταύτα, διέπεται από περιορισμένη ακρίβεια (Σχήμα 2.6), και παρέχει μια βασική προσέγγιση που ενδέχεται να μην αποτυπώνει καλά τις τοπικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου σε όλες τις συνθήκες και εδάφη. Χρησιμοποιείται συνήθως για γενικές εκτιμήσεις της τοποθεσίας και στα αρχικά στάδια σχεδιασμού.

Οι περιορισμοί και οι αβεβαιότητες χρήσης και των δύο τύπων είναι εμφανείς. Καθώς η πρόγνωση του ανέμου ως επιστημονικός τομέας έχει εδραιωθεί σε μεγάλο βαθμό τις τελευταίες δεκαετίες, αποτελεί πλέον συνήθη πρακτική να χρησιμοποιούνται εξελιγμένα μοντέλα για την παροχή μετρήσεων του ανέμου και των προβλέψεων παραγωγής αιολικής ενέργειας.

Για την ακριβή μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου σε ύψη άνω των 80 m, η οποία είναι απαραίτητη για την επαρκή πρόγνωση του ανέμου, θα καθιερωθούν πιθανότατα οι κινητές μέθοδοι ανίχνευσης και εμβέλειας φωτός (LIDAR) και ηχητικής ανίχνευσης και εμβέλειας (SODAR) σε συνδυασμό με μοντέλα πρόγνωσης. Ο λόγος είναι ότι, σε αντίθεση με τους συμβατικούς ιστούς μέτρησης, μετά από μια μη επαναλαμβανόμενη επένδυση η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλαπλές μετρήσεις. Ενώ η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου με LIDAR είναι πολύ ακριβής, η μέτρηση της έντασης της τύρβης είναι περιορισμένη. Ως εκ τούτου, θα ήταν πολύ χρήσιμο να υπάρχουν ακριβέστερες μετρήσεις των συγκεκριμένων στροβιλισμών της περιοχής, προκειμένου να μειωθεί ο συντηρητισμός που συνδέεται με τις εκτιμήσεις στροβιλισμών. Ωστόσο, οι τεχνικές αυτές δεν έχουν ακόμη τελειοποιηθεί πλήρως, ιδίως σε σύνθετα εδάφη, όπου μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά από την τύρβη. Επηρεάζονται επίσης από την τοπογραφία της επιφάνειας, καθώς και από τις βροχοπτώσεις και την ομίχλη.

Στον τομέα της πρόβλεψης του ανέμου, η κύρια πρόκληση έγκειται επομένως στην επίτευξη ακριβέστερων προβλέψεων, δεδομένου ότι η πραγματική ταχύτητα του ανέμου μπορεί συχνά να αποκλίνει αρκετά από την προβλεπόμενη. Οι τρέχουσες μέθοδοι βραχυπρόθεσμης και μεσοπρόθεσμης πρόβλεψης έχουν περιορισμένη ακρίβεια. Εκτός από την ακριβέστερη πρόβλεψη των ταχυτήτων του ανέμου, και επομένως της σχετικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι μέθοδοι αυτές πρέπει να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν σε πιο σύνθετα εδάφη (McKenna et al., 2016), ώστε να είναι ακριβής η επικύρωση της καμπύλης ισχύος, η αξιολόγηση της τοποθεσίας και τελικά η απόδοση του αιολικού πάρκου.

3. ΥΛΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

3.1. Χρήση υλικών στις σημερινές ανεμογεννήτριες

Οι τρέχουσες εξελίξεις στην παραγωγή αιολικής ενέργειας δείχνουν ότι χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός τύπων ανεμογεννητριών για την κάλυψη των διαφόρων ειδικών χερσαίων και υπεράκτιων συνθηκών (Pavel et al., 2017). Σχεδιάζονται ειδικά για να βελτιώσουν την απόδοσή τους όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας, την αξιοπιστία, τη λειτουργία, τη συντήρηση, το κόστος κεφαλαίου και τη μεταφορά. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες ενσωματώνουν μια σειρά ευρέων και εξαιρετικά βελτιστοποιημένων εξαρτημάτων για την παραγωγή του χαμηλότερου δυνατού ενεργειακού κόστους.

Για να προκύψει ένα σύνολο, η χρήση υλικών σταθμίζεται με βάση το εκτιμώμενο μερίδιο αγοράς των διαφόρων κατασκευαστών και τύπων μηχανών. Η εκτιμώμενη χρήση υλικών σε μικρές και μεγάλες ανεμογεννήτριες παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1. Οι παρενθέσεις επιδεικνύουν τα ποσοστά για μικρές ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος μικρότερης των 100 kW.

Πίνακας 3.1 *Ποσοστό των υλικών που χρησιμοποιούνται στα εξαρτήματα των ανεμογεννητριών. (Ancona & McVeigh, 2001)*

Μεγάλες ανεμογεννήτριες και *(μικρές)*								
Συστατικό/ Υλικό (% κατά βάρος)	Μόνιμα μαγνητικά υλικά	Προεντεταμένο σκυρόδεμα	Χάλυβας	Αλουμίνιο	Χαλκός	Πλαστικό ενισχυμένο με γυαλί	Εποξειδικό ξύλο	Πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα
Πλήμνη			(95) - 100	(5)				
Πτερύγια			5			95	(95)	(95)
Ατρακτίδιο	(17)		(65) - 80	(3) - 4	14	(1) - 2		
Κιβώτιο ταχυτήτων			98 - (100)	(0) - 2	(<1) - 2			
Γεννήτρια	(50)		(20) - 65		(30) - 35			
Πλαίσιο, Μηχανήματα & Κέλυφος			85 - (74)	9 - (50)	4 - (12)	3 - (5)		
Πύργος		2	98	(2)				

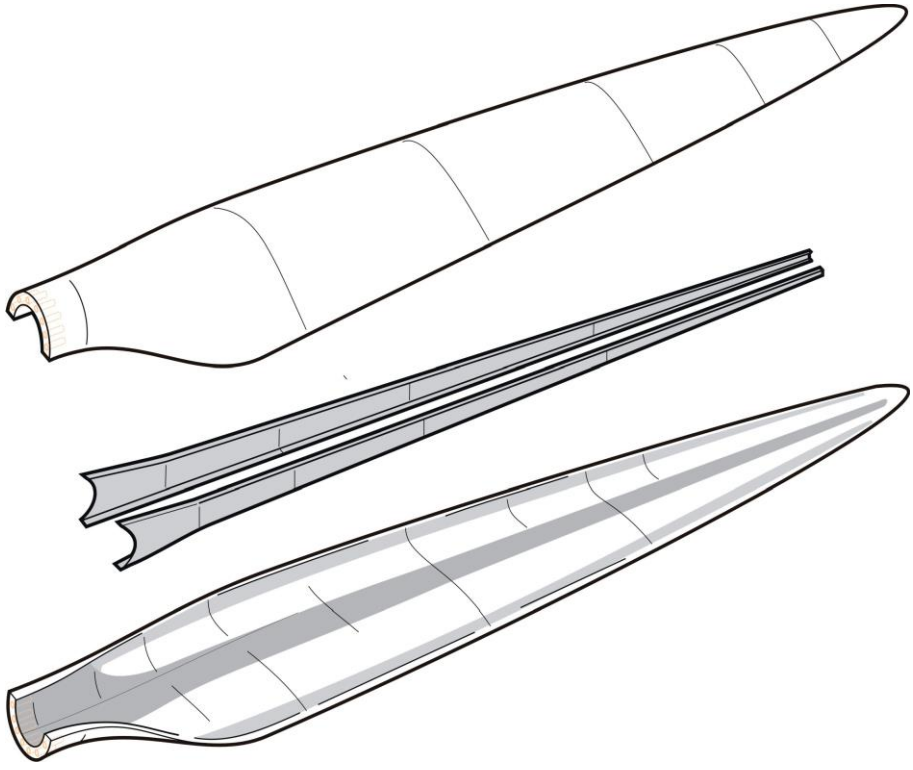
Ο πίνακας 3.1 είναι αρκετά ακριβής, αν και πλέον η χρήση σπανίων γαιών είναι επικρατούσα τόσο στις μικρές όσο και στις μεγάλες ανεμογεννήτριες.

3.2. Πτερύγια

Τα πτερύγια είναι το σημαντικότερο τμήμα μιας ανεμογεννήτριας, βασίζεται σε σύνθετα υλικά και είναι το στοιχείο με το υψηλότερο κόστος των ανεμογεννητριών (Mishnaevsky. et al., 2017).

Τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας αποτελούνται από δύο επιφάνειες (στην πλευρά αναρρόφησης και στην πλευρά πίεσης), οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους και σκληραίνουν είτε με ένα ή περισσότερα διατμητικά πλέγματα που συνδέουν το άνω και το κάτω μέρος του κελύφους του πτερυγίου είτε με μια κιβωτιοειδή δοκό (με περιβλήματα κελύφους).

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η αναπαράσταση της κατασκευής ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας με συναρμολόγηση και συγκόλληση δύο αεροτομών και δύο διατμητικών πλεγμάτων.



Σχήμα 3.1 *Σχηματική απεικόνιση της κατασκευής πτερυγίου δρομέα ανεμογεννήτριας με συναρμολόγηση και συγκόλληση δύο αεροτομών και δύο διατμητικών πλεγμάτων (το γκρι χρώμα υποδεικνύει τα σύνθετα υλικά που φέρουν το κύριο φορτίο). (Πηγή: Mishnaevsky et al., 2017*)

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τα πτερύγια των ανεμογεννητριών πρέπει να είναι χαμηλής πυκνότητας και να διαθέτουν υψηλή αντοχή στην κόπωση και ανοχή σε βλάβες.

Μεγάλα τμήματα των πτερυγίων είναι από σύνθετα υλικά, δηλαδή υλικά που αποτελούνται από περισσότερα συστατικά.

Τα κελύφη που καθορίζουν το προφίλ του αεροδυναμικού πτερυγίου κατασκευάζονται συνήθως χρησιμοποιώντας σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (PMC) και δομές σάντουιτς που αποτελούνται από φύλλα PMC και ελαφρές κλειστές κυψέλες πολυμερούς αφρού ή πυρήνες από ξύλο balsa. Η κιβωτιοειδής δοκός κατασκευάζεται με τη χρήση σύνθετων υλικών από υαλοβάμβακα.

Όσον αφορά τα ελάσματα, η πλειονότητα των μεγάλων πτερυγίων των ανεμογεννητριών χρησιμοποιεί ελάσματα βοριοπυριτικού γυαλιού. Επειδή η μάζα του πτερυγίου είναι κρίσιμος παράγοντας σχεδιασμού, τα ακριβότερα σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται επίσης όλο και περισσότερο. Εκτός από πολύ χαμηλότερη πυκνότητα οι ίνες άνθρακα προσφέρουν διάφορα πλεονεκτήματα για εφαρμογές πτερυγίων, συμπεριλαμβανομένου ενός πολύ υψηλότερου μέτρου ελαστικότητας, αντοχή και διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται σήμερα από ορισμένους κατασκευαστές πτερυγίων ελαστομερή φύλλα άνθρακα και υβριδικά φύλλα άνθρακα/γυαλιού (Ong & Tsai, 2000). Περαιτέρω, μια αποτελεσματική εναλλακτική είναι η χρήση ινών χωρίς γυαλί, υψηλής αντοχής, κατά βάση αραμιδίου και βασάλτη. Οι ίνες αραμιδίου παρουσιάζουν υψηλή μηχανική αντοχή και είναι ανθεκτικές και ανεκτικές σε φθορές. Ωστόσο, έχουν χαμηλή θλιπτική αντοχή, χαμηλή πρόσφυση στις πολυμερείς ρητίνες, απορροφούν υγρασία και υπόκεινται σε βλάβες λόγω της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Συνήθως, ως μήτρες στα σύνθετα υλικά των ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται θερμοσκληρυντικά ή θερμοπλαστικά.

Τα σύνθετα υλικά με βάση τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς ενισχυμένων πολυμερών. Τα πλεονεκτήματα των θερμοσκληρυνόμενων υλικών είναι η ικανότητα σκλήρυνσης σε χαμηλή θερμοκρασία και η χαμηλότερη τριβή. Επί του παρόντος, ο πολυεστέρας είναι η πιο κοινή επιλογή ως μήτρα για τα ελάσματα υαλοβάμβακα, αλλά οι εποξειδικές ρητίνες και ο βινυλεστέρας χρησιμοποιούνται επίσης λόγω των ανώτερων μηχανικών ιδιοτήτων τους. Για τα σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα, οι εποξειδικές ρητίνες είναι το πιο συνηθισμένο υλικό μήτρας.

Τα θερμοπλαστικά αντιπροσωπεύουν μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση στις θερμοσκληρυνόμενες μήτρες. Το σημαντικό πλεονέκτημα των θερμοπλαστικών σύνθετων υλικών είναι η ανακυκλωσιμότητά τους. Τα μειονεκτήματά τους είναι η ανάγκη επεξεργασίας σε υψηλές θερμοκρασίες και, δυσκολίες στην κατασκευή μεγάλων και παχιών τεμαχίων, λόγω του πολύ υψηλότερου ιξώδους. Τα θερμοπλαστικά έχουν χαμηλότερες θερμοκρασίες τήξης από τις θερμοκρασίες αποσύνθεσής τους και, επομένως, μπορούν να ανασυντεθούν κατά την τήξη. Ενώ η αντοχή σε θραύση των θερμοπλαστικών είναι

υψηλότερη από εκείνη των θερμοσκληρυνόμενων υλικών, η συμπεριφορά τους σε κόπωση δεν είναι τόσο καλή όσο των θερμοσκληρυνόμενων υλικών. Άλλα πλεονεκτήματα των θερμοπλαστικών είναι η μεγαλύτερη επιμήκυνση κατά τη θραύση, η δυνατότητα αυτόματης επεξεργασίας και η απεριόριστη διάρκεια ζωής του κελύφους των πρώτων υλών.

Σε αρκετές εργασίες, καταδείχθηκαν οι δυνατότητες βελτίωσης των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών με την προσθήκη νανοενίσχυσης στη μήτρα. Η προσθήκη μικρής ποσότητας (σε επίπεδο 0,5% βάρους) νανοενίσχυσης (νανοσωλήνες άνθρακα ή νανοάργιλος), η διαστασιολόγηση ινών ή οι διαστρωματικές στρώσεις ενδέχεται να οδηγήσουν σε αύξηση της αντοχής σε κόπωση, της διατμητικής ή θλιπτικής αντοχής καθώς και της ανθεκτικότητας σε θραύση των σύνθετων υλικών κατά 30-80 % (Mishnaevsky et al., 2017).

Δεδομένου ότι τα περισσότερα πτερύγια ανεμογεννητριών συνδέονται μεταξύ τους, οι κόλλες που χρησιμοποιούνται για την ένωση των πτερυγίων θα έχουν άμεση επίδραση στην αξιοπιστία τους. Οι κόλλες που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια είναι κυρίως εποξειδικές, πολυουρεθανικές και μεθακρυλικής βάσης. Η ποιότητα και οι μηχανικές ιδιότητες (π.χ. αντοχή, ερπυσμός) των συγκολλητικών ουσιών των πτερυγίων είναι κρίσιμες, δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση πολύ μεγάλων περιοχών του αεροθαλάμου του πτερυγίου και της δοκού του κιβωτίου και υπόκεινται σε πολύπλοκες κυκλικές ιστορίες φόρτισης. Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, οι δομές σάντουιτς χρησιμοποιούνται ευρέως στο κέλυφος αεροτομής πτερυγίων και σε διατμητικούς ιστούς σε ορισμένα σχέδια ατρακτιδίων. Το υλικό του πυρήνα είναι χαμηλής πυκνότητας, κυρίως ξύλο balsa και πολυμερείς αφροί.

Τέλος, η επιφάνεια των πτερυγίων των ανεμογεννητριών βάφεται με ζελατίνες για την προστασία των σύνθετων υλικών από ζημιές που προέρχονται από την υπεριώδη ακτινοβολία και για να περιοριστεί η περιβαλλοντική έκθεση του πτερυγίου (Tong, 2010).

3.3. Ατρακτίδιο

Το ατρακτίδιο περιέχει μια σειρά από πολύπλοκα μηχανήματα, όπως κινητήρες περιστροφής, μηχανισμούς αλλαγής βήματος πτερυγίων, φρένα κίνησης, άξονες, ρουλεμάν, αντλίες και ψύκτες λαδιού, ελεγκτές και άλλα.

Ανάλογα με τους τύπους των ανεμογεννητριών (μικρές, μεσαίες ή μεγάλες), το μέγεθος του ατρακτιδίου μπορεί να ποικίλλει, αλλά συχνά σχεδιάζονται έτσι ώστε να έχουν ικανό χώρο για λόγους συντήρησης. Η προσβασιμότητα στο ατρακτίδιο για την τακτική συντήρηση και το σέρβις είναι επίσης μια άλλη πρόκληση λόγω της θέσης της στην ανεμογεννήτρια. Τα περισσότερα ατρακτίδια στις ανεμογεννήτριες σήμερα κατασκευάζονται από σύνθετο υλικό από ίνες γυαλιού, δομικά ελαφριά πάνελ από αφρό, αλουμίνιο, χάλυβα ή άλλα κράματα και

συνήθως έναν συνδυασμό από αυτά τα υλικά.

3.4. Άξονας μετάδοσης κίνησης

Υπάρχουν τρεις γενικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα στον άξονα μετάδοσης κίνησης των ανεμογεννητριών. Η πρώτη είναι ένα κιβώτιο ταχυτήτων σε συνδυασμό με μια ασύγχρονη γεννήτρια επαγωγής (βραχυκυκλωμένου κλωβού ή διπλής τροφοδότησης) (SCIG και DFIG αντίστοιχα). Η δεύτερη είναι ένα κιβώτιο ταχυτήτων σε συνδυασμό με μια σύγχρονη γεννήτρια (εξωτερικής διέγερσης ή μόνιμου μαγνήτη) (EESG και PMSG αντίστοιχα). Και η τρίτη είναι ένας δρομέας άμεσης κίνησης (χωρίς γρανάζια) συνδεδεμένος με μια σύγχρονη γεννήτρια (μόνιμου μαγνήτη) (PMSG). Η επιλογή της προσέγγισης που θα υιοθετηθεί εξαρτάται ουσιαστικά από το κόστος και την αποδοτικότητα της μετατροπής μέσω της γεννήτριας από μια μεταβλητή συχνότητα (του δρομέα) σε μια σταθερή συχνότητα (του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας).

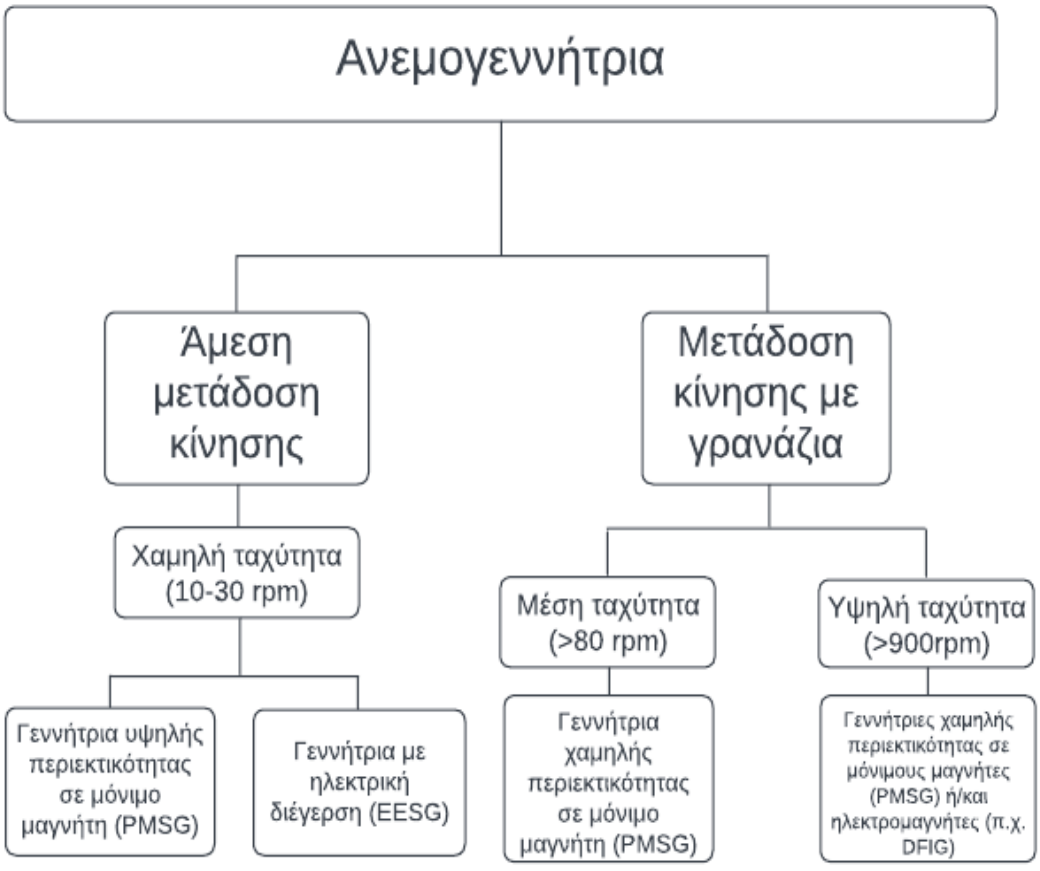
Το κιβώτιο ταχυτήτων που χρησιμοποιείται σήμερα σε μεγάλες ανεμογεννήτριες αναμένεται να αντικατασταθεί σε πολλές μελλοντικές μηχανές. Οι περισσότερες μικρές ανεμογεννήτριες που έχουν σχεδιαστεί για τη φόρτιση μπαταριών χρησιμοποιούν μια γεννήτρια μεταβλητής συχνότητας και ταχύτητας, μόνιμου μαγνήτη, συνδεδεμένη με ανορθωτή.

Σήμερα, η χερσαία αγορά κυριαρχείται από τις παραδοσιακές επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδότησης (DFIG) με δυναμικότητα έως 6 MW. Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (PMSG) είναι επίσης παρούσες στην αγορά. Οι δύο αυτές τεχνολογίες διαφέρουν κυρίως ως προς τον τύπο της γεννήτριας, το σύστημα κίνησης και τη διασύνδεση με το δίκτυο. Ενώ η τοπολογία DFIG με κιβώτιο ταχυτήτων επιτρέπει τη λειτουργία σε μεταβλητές ταχύτητες σε ένα περιορισμένο εύρος στροφών ανά λεπτό (rpm), η διαμόρφωση PMSG με απευθείας κίνηση έχει πλήρη μετατροπή ισχύος και λειτουργεί σε ένα σημαντικότερο εύρος μεταβλητών ταχυτήτων.

Με βάση τη διαμόρφωση του συστήματος μετάδοσης κίνησης που συνδέει την πλήμνη του πτερυγίου με τη γεννήτρια, χρησιμοποιούνται σήμερα τρεις κύριοι τύποι μετάδοσης κίνησης:

- Χαμηλή ταχύτητα ή άμεση κίνηση (DD) (περίπου 20 rpm)
- Μέση ταχύτητα (100-500 rpm)
- Υψηλή ταχύτητα (πάνω από 900 rpm)

Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται όλες οι διακλαδώσεις των κατηγοριοποιήσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, βασιζόμενες στον τύπο μετάδοσης κίνησης.



Σχήμα 3.2 *Κύριοι τύποι ανεμογεννητριών ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος μετάδοσης κίνησης. (Πηγή: Pavel et al., 2017)*

Η μεγάλη ποικιλία σχεδίων ανεμογεννητριών αντιπροσωπεύει διαφορετικές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση των τεχνικών προκλήσεων στην παραγωγή αιολικής ενέργειας, ιδίως σε υπεράκτιες συνθήκες.

Οι τεχνολογίες αυτές έχουν τα επιμέρους δυνατά και αδύνατα σημεία τους τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 *Αξιολόγηση των κύριων τεχνολογιών αιολικής ενέργειας που είναι διαθέσιμες για μεγάλες ανεμογεννήτριες. Σημειώσεις: "++" ισχυρό πλεονέκτημα- "+" πλεονέκτημα- "-" μειονέκτημα- "- -" ισχυρό μειονέκτημα. (Πηγή: Pavel et al., 2017)*

Χαρακτηριστικά	Άμεση κίνηση χαμηλής ταχύτητας (PSMG)	Άμεση κίνηση χαμηλής ταχύτητας (EESG)	Άμεση κίνηση υψηλής ταχύτητας (PSMG)	Άμεση κίνηση υψηλής ταχύτητας με γρανάζια (PSMG)
Συνολική αποτελεσματικότητα της γεννήτριας	++	++	++	+
Συντήρηση υπεράκτιων	++	Δ.Ε.	+	+
Βάρος γεννήτριας και κιβωτίου ταχυτήτων	++	+	++	++
Εξάρτηση από σπάνιες γαίες, κίνδυνος τιμών	--	++	-	++
Κόστος	-	--	+	++

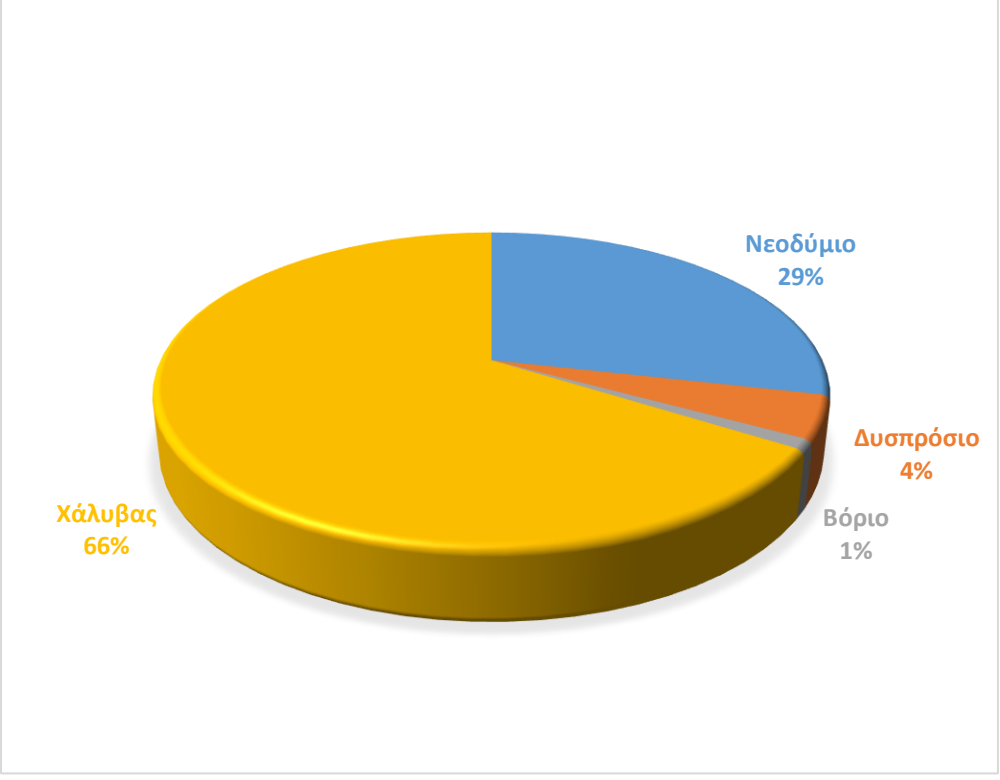
Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2 δείχνουν ότι γενικά η ανεμογεννήτρια χαμηλών στροφών/άμεσης κίνησης που περιέχει σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών (DD-PMSG) προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα. Ωστόσο, συνδέεται με την υψηλότερη ζήτηση σπάνιων γαιών.

3.4.1. Σπάνιες γαίες

Οι σπάνιες γαίες περιλαμβάνουν μια ομάδα χημικών στοιχείων με παρόμοιες ιδιότητες που χρησιμοποιούνται σε μια σειρά εφαρμογών υψηλής τεχνολογίας. Μεταξύ αυτής της ομάδας, τα στοιχεία-κλειδιά για τις τεχνολογίες καθαρής ενέργειας είναι το νεοδύμιο, το πρασεοδύμιο, το δυσπρόσιο και το τέρβιο, τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB). Αν και υπάρχουν διάφοροι τύποι μόνιμων μαγνητών, οι μαγνήτες NdFeB χρησιμοποιούνται περισσότερο λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους. Όσον αφορά τις ιδιότητές τους, ισοδυναμούν μόνο με τους

μαγνήτες σαμαρίου - κοβαλτίου ωστόσο, αυτοί οι μαγνήτες είναι σημαντικά ακριβότεροι (Lucas et al., 2014).

Η ακριβής σύνθεση των σπάνιων γαιών σε έναν μόνιμο μαγνήτη NdFeB μπορεί να ποικίλει, με διαφορετικές αναλογίες των διαφόρων στοιχείων να οδηγούν σε διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες. Το νεοδύμιο και το πρασεοδύμιο συμβάλλουν στη μαγνητική ισχύ, ενώ το δυσπρόσιο και το τέρβιο βελτιώνουν την αντοχή στην απομαγνήτιση, ιδίως σε υψηλές θερμοκρασίες. Το νεοδύμιο και το πρασεοδύμιο μπορούν βέβαια να αντικατασταθούν από άλλα στοιχεία, όμως αυτό συχνά περιορίζεται από τις προδιαγραφές των συνθηκών λειτουργίας. Τα τελευταία χρόνια η περισσότερη έρευνα έχει επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση της χρήσης του δυσπροσίου και του τερβίου, τα οποία είναι τόσο δαπανηρά όσο και ελάχιστα διαθέσιμα. Η χρήση του τερβίου είναι προς το παρόν περιορισμένη, καθώς έχει την ίδια λειτουργία με το δυσπρόσιο, αλλά είναι σημαντικά ακριβότερο (Reimer et al., 2018). Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζεται το ποσοστό του κάθε υλικού από το οποίο διαρθρώνεται ένας μόνιμος μαγνήτης ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 3.3 *Ποσοστά υλικών που απαρτίζουν έναν μόνιμο μαγνήτη ανεμογεννήτριας. (Πηγή: Rabe et al., 2017)*

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, για τις ανεμογεννήτριες, ένας μέσος μόνιμος μαγνήτης περιέχει 28,5 % νεοδύμιο, 4,4 % δυσπρόσιο, 1 % βόριο και 66 % σίδηρο και ζυγίζει έως και 4 t (Rabe et al., 2017).

3.5. Πύργος

Το ύψος του πύργου μιας τυπικής ανεμογεννήτριας έχει αυξηθεί από περίπου 40 m τη δεκαετία του 1990 σε πάνω από 100 m σήμερα. Τα υλικά χαμηλού κόστους είναι ιδιαίτερα σημαντικά στους πύργους, καθώς αυτοί μπορεί να αντιπροσωπεύουν έως και το 65% του βάρους της ανεμογεννήτριας.

Κατά κύριο λόγο, οι πύργοι ανεμογεννητριών κατασκευάζονται είτε αμιγώς από χάλυβα πάνω σε θεμέλια από σκυρόδεμα συνήθως ως κωνικές σωληνωτές χαλύβδινες κατασκευές, είτε ως χαλύβδινοι πύργοι με στύλους (για μικρότερες ανεμογεννήτριες). Για τους τυποποιημένους πύργους από χάλυβα, το ύψος κυμαίνεται συνήθως από 60 - 120 m (Pons, 2017).

Η αξιοποίηση του σκυροδέματος στην κατασκευή πύργων ανεμογεννητριών γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη, καθώς οι εγκαταστάσεις αυξάνονται δραστικά σε κλίμακα, από το μέγεθος του δρομέα μέχρι το ύψος της πλήμνης. Οι αυξήσεις κλίμακας οφείλονται στην αυξανόμενη αγορά για λιγότερο τυρβώδεις και ισχυρότερους αιολικούς πόρους, που οδηγούν σε βελτιωμένους συντελεστές δυναμικότητας (Lantz, 2017). Σε απάντηση, οι υποστηρικτικές κατασκευές, όπως ο πύργος της ανεμογεννήτριας, πρέπει να σχεδιάζονται για να αντέχουν τα αυξημένα φορτία και τις καταπονήσεις, οδηγώντας γενικά και σε μεγαλύτερους πύργους. Οι αμιγώς χαλύβδινοι πύργοι αντιμετωπίζουν περιορισμούς που υπαγορεύονται από τις απαιτήσεις μεταφοράς, όπως τα όρια βάρους των δρόμων και οι περιορισμοί ύψους, δημιουργώντας την ευκαιρία για πύργους από σκυρόδεμα να γίνουν μια βιώσιμη επιλογή (Von Der Haar & Marx, 2015). Επιπλέον, οι πύργοι που κατασκευάζονται εξ ολοκλήρου από σκυρόδεμα έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από ότι ο αμιγής χάλυβας (McKenna et al., 2016).

Οι πύργοι από σκυρόδεμα, είτε συναρμολογούνται επί τόπου είτε προκατασκευασμένοι, έχουν παρόμοιο εύρος ύψους, από 60-115 m για την πρώτη συναρμολόγηση επί τόπου έως 80-120 m για τους τελευταίους προκατασκευασμένους πύργους (Pons, 2017). Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με τις προβλέψεις κόπωσης και βλάβης σε πύργους από σκυρόδεμα, καθώς ο χάλυβας μπορεί να υποθέσει μια γραμμική σχέση συσσώρευσης βλάβης, ενώ το σκυρόδεμα όχι (Paredes, 2011). Εάν η βλάβη του πύργου εμφανιστεί με τη μορφή ρωγμών, η ανθεκτικότητα του διακυβεύεται και μπορεί να επηρεάσει την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας (Harte, 2007). Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, αναπτύσσεται ελαφρύ τσιμεντοειδές σύνθετο υλικό

κατάλληλο για εφαρμογή σε εξωτερικές επιφάνειες πύργων από σκυρόδεμα (Jin, 2019). Το υλικό αυτό έχει το πλεονέκτημα της υψηλής εφελκυστικής αντοχής και ολκιμότητας, καθώς και των ελεγχόμενων και προβλέψιμων μοτίβων ρηγμάτωσης που ελαχιστοποιούν τη διάβρωση του εσωτερικού δομικού υλικού.

Οι υβριδικοί πύργοι αποτελούνται από ένα κατώτερο τμήμα κατασκευασμένο από σκυρόδεμα και ένα ανώτερο τμήμα από χάλυβα. Μπορούν να έχουν ύψος κόμβου πολύ μεγαλύτερο από τους αντίστοιχους πύργους από χάλυβα ή σκυρόδεμα, που κυμαίνεται από 80 - 146 m (Pons, 2017). Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται μία ανεμογεννήτρια της Nordex με έναν υβριδικό πύργο ύψους 168 m στην Φινλανδία.

Σχήμα 3.4 *Ανεμογεννήτρια της Nordex με έναν υβριδικό πύργο ύψους 168 m στην Φινλανδία. (Πηγή: https://ir.nordex-online.com)*

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3.4, περίπου 100 m απαρτίζουν το τμήμα του σκυροδέματος, το οποίο πιθανότατα αποτελείται από 5 προκατασκευασμένα τμήματα των 20 m, και το υπόλοιπο κομμάτι είναι χαλύβδινο. Σε αντίθεση με τα αμιγώς χαλύβδινα τμήματα που παράγονται σε περιορισμένες τοποθεσίες, τα εργοστάσια για την κατασκευή προκατασκευασμένων τμημάτων μπορούν να εγκατασταθούν πιο κοντά σε ένα αιολικό πάρκο (Sritharan, 2015).

4. ΚΟΣΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

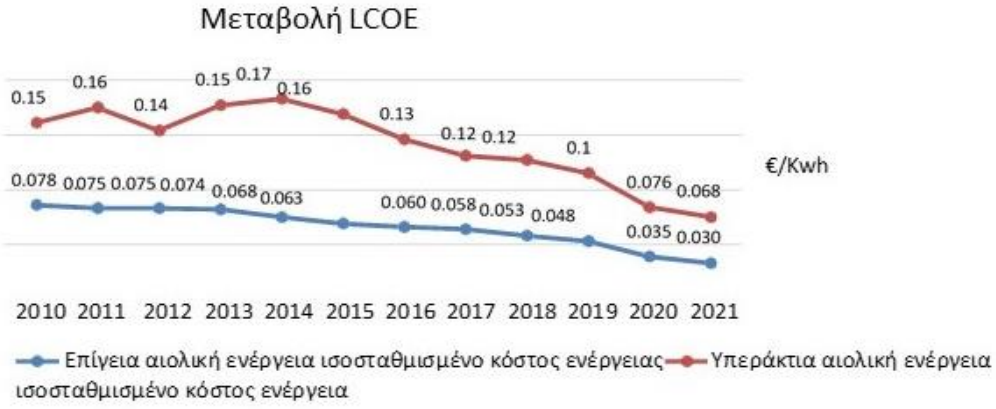
4.1. Γενικά

Το μέλλον της αιολικής ενέργειας θα εξαρτηθεί από την ικανότητα της βιομηχανίας να συνεχίσει να επιτυγχάνει μειώσεις κόστους.

Οι τρεις εξωγενείς παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές των ανεμογεννητριών είναι: πρώτα οι μεταβολές των συναλλαγματικών ισοτιμιών, ύστερα οι τιμές των υλικών και στη συνέχεια οι τιμές της ενέργειας. Αυτοί είχαν σχετικά μεγαλύτερο αντίκτυπο στις τιμές των ανεμογεννητριών από ό,τι οι τέσσερις ενδογενείς παράγοντες (κόστος εργασίας, προβλέψεις εγγύησης, περιθώρια κέρδους και κλιμάκωση των ανεμογεννητριών), τόσο πριν όσο και μετά την κορύφωση των τιμών ανεμογεννητριών το 2008. Η σχετική επιρροή των εξωγενών παραγόντων υποδηλώνει ότι οποιαδήποτε μετατόπιση από τις τρέχουσες μακροοικονομικές συνθήκες, που χαρακτηρίζονται από παρατεταμένη περίοδο ισχύος του δολαρίου και αδυναμίας των τιμών βασικών εμπορευμάτων, μπορεί να δημιουργήσει προκλήσεις για περαιτέρω μειώσεις των τιμών των ανεμογεννητριών.

Το ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCOE) είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για ένα έργο όπου τα έσοδα θα είναι ίσα με το κόστος. Μια τιμή ηλεκτρικής ενέργειας πάνω από αυτήν θα απέφερε μεγαλύτερη απόδοση του κεφαλαίου, ενώ μια τιμή κάτω από αυτήν θα απέφερε χαμηλότερη απόδοση του κεφαλαίου ή ακόμη και ζημία.

Το κόστος των ανεμογεννητριών, που αντιπροσωπεύει περίπου τα δύο τρίτα του συνολικού κόστους εγκατάστασης ενός αιολικού έργου, αποτελεί τη μεγαλύτερη συνιστώσα του LCOE της αιολικής ενέργειας. Αφού το κόστος των ανεμογεννητριών περίπου διπλασιάστηκε από το 2001 έως το 2008, μειώθηκε κατά περίπου 40% έως το 2015, συμβάλλοντας στην εκτόξευση του LCOE της αιολικής ενέργειας σε νέα χαμηλά επίπεδα. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η μεταβολή του LCOE από το 2010 μέχρι το 2021.



Σχήμα 4.1 *Μεταβολή LCOE από το 2010 μέχρι το 2021 σε €/KWh. (Πηγή: Liu et al., 2023)*

Από το Σχήμα 4.1 φαίνεται ότι και μετά το 2015 η μείωση του LCOE είναι σταθερή, και στο διάστημα 2015 – 2021 ήταν συνολικά της τάξεως του 50 %.

Μετά από μια δεκαετία λοιπόν αξιόπιστης μείωσης του κόστους, οι ανεμογεννήτριες, και η ισχύς του δικτύου που παράγουν, γίνονται όλο και πιο ακριβές. Παρά τα σχεδόν TW αιολικής ενέργειας που έχουν εγκατασταθεί παγκοσμίως, το κόστος των βασικών προϊόντων και οι διαταραχές της αλυσίδας εφοδιασμού αποδεικνύεται ότι έχουν ισχυρότατη επίδραση στην οικονομία της αιολικής ενέργειας.

Ενώ οι τιμές των ανεμογεννητριών έχουν μειωθεί σταθερά από 1.800 $ ανά kW το 2008 σε 770 έως 850 $ ανά kW το 2021, τα στοιχεία της GlobalData δείχνουν ότι το μέσο κόστος ανά kW μιας ανεμογεννήτριας έχει αυξηθεί κατά 38% τα τελευταία δύο χρόνια.

Η αιολική ενέργεια δεν είναι η μόνη σε αυτή την αντιστροφή της τάσης των τιμών - κάθε σημαντική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της συμβατικής ορυκτής ενέργειας, βιώνει επίσης μια αιχμή στο κόστος της εργασίας, των μισθώσεων γης, των εξαρτημάτων και του κεφαλαίου. Το φαινόμενο οφείλεται στα προβλήματα της παγκόσμιας εφοδιαστικής αλυσίδας, στις συνεχιζόμενες επιπτώσεις της πανδημίας Covid-19 και στην αύξηση της τιμής των ορυκτών καυσίμων και των ορυκτών πρώτων υλών.

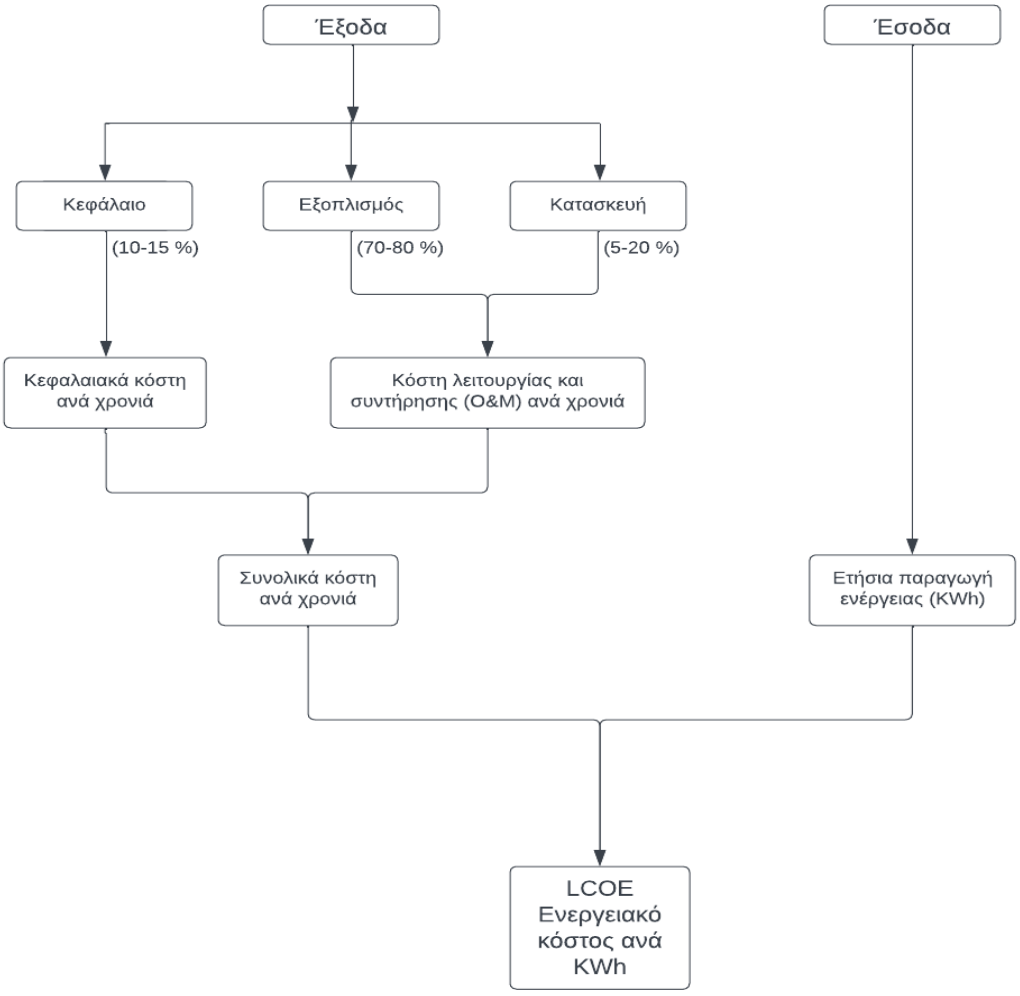
Ειδικότερα για την κατασκευή υλικού αιολικής ενέργειας, το κόστος αυξάνεται όταν αυξάνεται η τιμή των εμπορευμάτων όπως ο χάλυβας, καθώς και ο χαλκός, ο ψευδάργυρος, το μαγγάνιο, το χρώμιο, το νικέλιο, το μολυβδαίνιο και οι σπάνιες γαίες που χρησιμοποιούνται στο κιβώτιο ταχυτήτων, τη γεννήτρια και τη μεταλλουργία του πύργου.

Η τιμή αυτών των κρίσιμων μετάλλων αυξήθηκε σημαντικά μεταξύ Ιανουαρίου 2020 και Μαρτίου 2023, σύμφωνα με το Energy Monitor, "από 23% αύξηση της τιμής του ψευδαργύρου έως 285% αύξηση της τιμής του μολυβδαινίου". Οι τιμές των βασικών εμπορευμάτων τείνουν να μειώνονται με την πάροδο του χρόνου, αλλά αυτό δεν αλλάζει το γεγονός ότι οι βραχυπρόθεσμες αιχμές μπορεί να δυσχεράνουν την κατασκευή έργων.

Η οικονομία της αιολικής ενέργειας σχετίζεται με λίγες αλλά σημαντικές παραμέτρους (Lemming et al., 2014):

- Κόστος κεφαλαίου
- Μεταβλητό κόστος
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας
- Επιτόκιο προεξόφλησης

Στο Σχήμα 4.2 φαίνονται τα οικονομικά της αιολικής ενέργειας, και πιο συγκεκριμένα, πως διαμορφώνεται το ενεργειακό κόστος ανά kWh (LCOE).



Σχήμα 4.2 *Οικονομικά της αιολικής ενέργειας. (Πηγή: Olabi et al., 2021)*

Από το Σχήμα 4.2 βλέπουμε ότι είναι σύνθετη η διαδικασία εντοπισμού του LCOE, αφού επηρεάζεται από αρκετά επιμέρους κόστη.

Το κόστος κεφαλαίου των αιολικών έργων χωρίζεται στις εξής επιμέρους κατηγορίες (Blanco, 2008):

- το κόστος της ίδιας της ανεμογεννήτριας (εκ του εργοστασίου), στο οποίο περιλαμβάνεται η παραγωγή, τα πτερύγια, ο μετασχηματιστής, η μεταφορά στον τόπο εγκατάστασης και η εγκατάσταση
- το κόστος σύνδεσης με το δίκτυο, συμπεριλαμβανομένων των καλωδίων, των υποσταθμών, των συστημάτων σύνδεσης και εκκένωσης ενέργειας
- το κόστος των τεχνικών έργων, συμπεριλαμβανομένων των θεμελίων, της οδοποιίας και των κτιρίων
- άλλες κεφαλαιουχικές δαπάνες, συμπεριλαμβανομένων των δαπανών ανάπτυξης, των

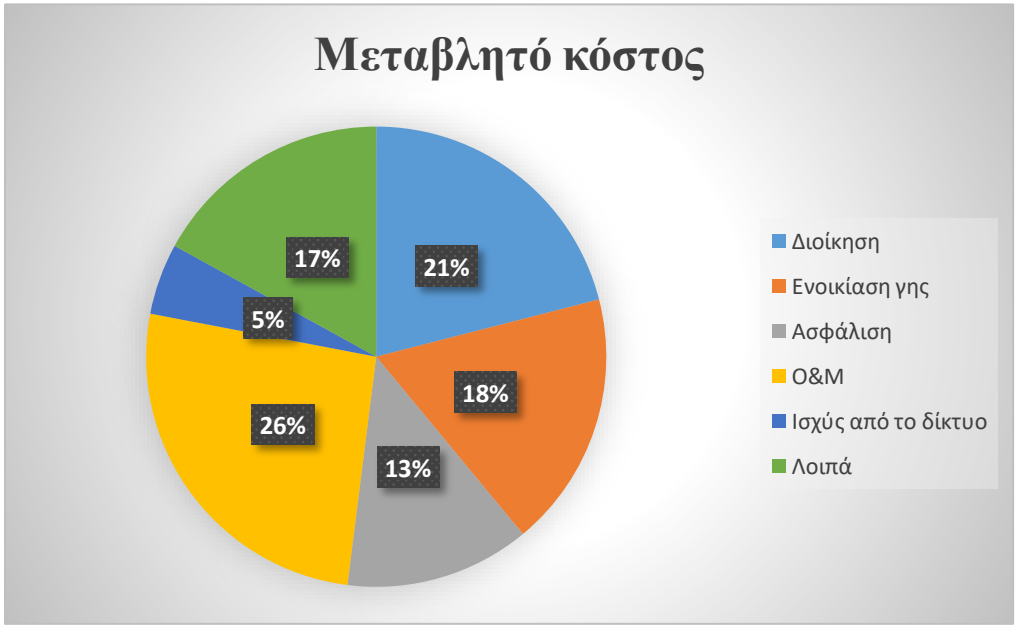
διαδικασιών αδειοδότησης, των συστημάτων SCADA (συστημάτων παρακολούθησης)

Οι ανεμογεννήτριες, όπως και κάθε άλλος βιομηχανικός εξοπλισμός, έχουν έξοδα λειτουργίας και συντήρησης (O&M), τα οποία αποτελούν σημαντικό ποσοστό του συνολικού ετήσιου κόστους (Blanco, 2008). Για μια καινούργια ανεμογεννήτρια, το κόστος λειτουργίας και διαχείρισης μπορεί να ανέρχεται σε περίπου 10-15% του συνολικού κόστους ανά παραγόμενη kWh, ενώ αυξάνεται σε τουλάχιστον 20-30% στο τέλος της διάρκειας ζωής της (Olabi et al., 2021).

Τα σημαντικότερα μεταβλητά κόστη μιας επένδυσης σε αιολική ενέργεια είναι:

- O&M, συμπεριλαμβανομένων των προβλέψεων για την επισκευή, τα ανταλλακτικά και τη συντήρηση της ηλεκτρικής εγκατάστασης
- ενοικίαση γης και υποσταθμών
- ασφάλιση και φόροι
- διαχείριση και διοίκηση, συμπεριλαμβανομένων των ελέγχων, των υπηρεσιών πρόβλεψης και των μέτρων ελέγχου από απόσταση

Το μεταβλητό κόστος δεν είναι τόσο γνωστό όσο το κόστος κεφαλαίου και επομένως ενδέχεται να διαπιστωθούν σημαντικές διαφορές μεταξύ περιοχών και χωρών. Στο Σχήμα 4.3 φαίνονται τα επιμέρους κόστη που απάρτιζαν το μεταβλητό κόστος για τις γερμανικές ανεμογεννήτριες από το 1997 - 2001.



Σχήμα 4.3 *Μεταβλητό κόστος για τις γερμανικές ανεμογεννήτριες κατανεμημένο σε διάφορες κατηγορίες ως μέσος όρος για τη χρονική περίοδο 1997-2001. (Πηγή: Blanco, 2008)*

Από το Σχήμα 4.3 παρατηρείται σχετική ισοκατανομή του κόστους, με μεγαλύτερο να είναι

αυτό της λειτουργίας και συντήρησης O&M και μικρότερο αυτό της απορρόφησης ισχύος από το δίκτυο. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, αυτό είναι σχετικό και όχι σταθερό από έργο σε έργο.

Ορισμένες δαπάνες μπορούν να εκτιμηθούν εύκολα. Για την ασφάλιση και την τακτική συντήρηση και εκμετάλλευση, είναι δυνατόν να συναφθούν τυποποιημένα συμβόλαια που καλύπτουν σημαντικό μέρος της συνολικής διάρκειας ζωής της ανεμογεννήτριας. Το κόστος για την επισκευή και τα σχετικά ανταλλακτικά είναι πολύ πιο δύσκολο να εκτιμηθεί, καθώς οι πληροφορίες αυτές δεν είναι άμεσα διαθέσιμες.

Επί του παρόντος, ένα από τα πρωταρχικά μελήματα των κατασκευαστών ανεμογεννητριών είναι ο περιορισμός του μεταβλητού κόστους, κυρίως εκείνου που σχετίζεται με τη λειτουργία και τη συντήρηση, με την ανάπτυξη νέων τύπων ανεμογεννητριών που να χρειάζονται λιγότερη συντήρηση, με στόχο τη μεγαλύτερη παραγωγικότητά τους.

4.2. Αλυσίδα εφοδιασμού

Η ραγδαία αύξηση της ζήτησης για έργα αιολικής ενέργειας ασκεί πίεση στην αλυσίδα εφοδιασμού. Επιπλέον, οι ταχέως αναπτυσσόμενες οικονομίες, όπως η Κίνα, ανεβάζουν το κόστος των πρώτων υλών. Σε αυτές περιλαμβάνονται ο χάλυβας, ο χαλκός, το σκυρόδεμα, το αλουμίνιο και οι ίνες άνθρακα, οι οποίες βρίσκονται στα κύρια υποσυστήματα των ανεμογεννητριών. Από την πλευρά της προσφοράς, ένας βασικός παράγοντας είναι η τιμή, η διαθεσιμότητα και η ποιότητα των πρώτων υλών.

Πτερύγια

Πρόκειται για ένα κρίσιμο συστατικό που απαιτεί εξελιγμένες τεχνικές παραγωγής. Ο παγκόσμιος εφοδιασμός κυριαρχείτο από έναν ανεξάρτητο κατασκευαστή πτερυγίων, αν και πολλοί μεγάλοι κατασκευαστές ανεμογεννητριών παράγουν τα δικά τους πτερύγια. Προς το παρόν δεν υπάρχει έλλειψη προσφοράς, αλλά η διαθεσιμότητα και η τιμή των ινών άνθρακα παραμένει πρόβλημα. Αρκετές εταιρείες άνθρακα έχουν εισέλθει στην αγορά αιολικής ενέργειας για να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα.

Κιβώτια ταχυτήτων

Τα κιβώτια ταχυτήτων είναι το εξάρτημα για το οποίο έχουν σημειωθεί οι περισσότερες ελλείψεις εφοδιασμού. Οι κυριότεροι λόγοι για αυτό είναι ο περιορισμένος αριθμός εγκαταστάσεων παραγωγής προσαρμοσμένων στην αγορά αιολικής ενέργειας, η έλλειψη μεγάλων ρουλεμάν και η συμφόρηση που προκαλείται από τις απρόβλεπτες επισκευές των κιβωτίων ταχυτήτων που λειτουργούν, συμπεριλαμβανομένης της αντικατάστασης των ρουλεμάν. Ωστόσο, οι περισσότεροι κατασκευαστές βρίσκονται ήδη σε διαδικασία

επέκτασης της δυναμικότητάς τους και περαιτέρω βελτίωσης της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων τους, με τη λειτουργία νέων γραμμών παραγωγής στην Ευρώπη και στην Ασία.

Χυτοσίδηρος και σφυρήλατα εξαρτήματα

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα κύρια πλαίσια που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη της πλήμνης και του ατρακτιδίου, τις ίδιες τις πλήμνες και τον κύριο άξονα, ο οποίος συνδέει τον δρομέα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Η αγορά έχει επηρεαστεί από την αύξηση δραστηριότητας στον τομέα της βαριάς βιομηχανίας, με αυξημένη ζήτηση τόσο για τον σφυρήλατο χάλυβα όσο και για τον χυτοσίδηρο, που έχει οδηγήσει στην μείωση τόσο της τιμής όσο και της ποιότητάς τους.

Πύργοι

Οι περισσότεροι πύργοι των ανεμογεννητριών κατασκευάζονται από χάλυβα, αν και ορισμένοι κατασκευαστές στρέφονται όλο και περισσότερο στο σκυρόδεμα ως φθηνότερη εναλλακτική λύση. Παρόλο που η κατασκευή είναι μια όλο και πιο εξελιγμένη διαδικασία, η βασική τεχνογνωσία είναι πιο ευρέως διαθέσιμη από ότι για άλλα εξαρτήματα. Συνολικά, οι πύργοι είναι απίθανο να δημιουργήσουν προβλήματα εφοδιασμού, αλλά εξακολουθεί να είναι σημαντικό να παρακολουθείται προσεκτικά η τιμή του χάλυβα και του σκυροδέματος και η διαθεσιμότητα ποιοτικού χάλυβα.

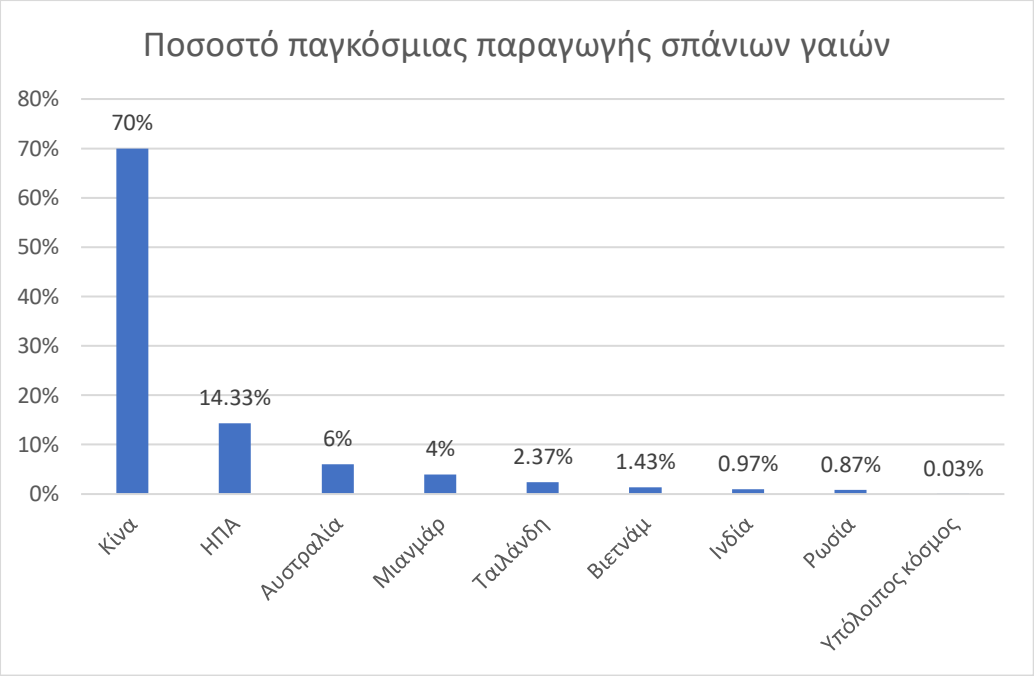
Γεννήτριες

Αυτές παρέχονται στην αιολική βιομηχανία από διάφορες μεγάλες εταιρείες και δεν υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις έλλειψης. Παρόλα αυτά επηρεάζονται άμεσα από τις σπάνιες γαίες, που αποτελούν περίπου το 35 % των μονίμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται σε αυτές.

Σπάνιες γαίες

Με γνώμονα την αυξημένη ζήτηση για τεχνολογικές εφαρμογές, η παραγωγή οξειδίων των σπάνιων γαιών σημείωσε τριπλάσια αύξηση μεταξύ 1992 και 2017 (BGS, 2020). Το 2019, παρήχθησαν περίπου 210.000 t, σημειώνοντας αύξηση 13% σε σχέση με το προηγούμενο έτος (USGS, 2020).

Από το δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1990, το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας παραγωγής οξειδίων σπάνιων γαιών βρίσκεται στην Κίνα. Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται το ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής σπάνιων γαιών ανά χώρα.



Σχήμα 4.4 *Ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής σπάνιων γαιών ανά χώρα. (Πηγή: https://www.statista.com)*

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.4, η επίσημη παραγωγή της Κίνας αντιπροσώπευε το 2022 το 70% της συνολικής προσφοράς. Άλλοι σημαντικοί προμηθευτές βρίσκονται στις Ηνωμένες Πολιτείες (14.33%), στην Αυστραλία (6%) και στο Μιανμάρ (4%).

Τα παγκόσμια μερίδια παραγωγής των επιμέρους στοιχείων σπάνιων γαιών δεν είναι σε μεγάλο βαθμό διαθέσιμα, αλλά μπορούν να εκτιμηθούν με βάση την παραγωγή κάθε λειτουργούντος ορυχείου και τη σχετική κατανομή των οξειδίων σπάνιων γαιών *in situ*. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, η παραγωγή νεοδυμίου, πρασεοδυμίου, τερβίου και δυσπροσίου αποτελεί περίπου το ένα τέταρτο της παγκόσμιας παραγωγής σπάνιων γαιών. Για το πρασεοδύμιο και το νεοδύμιο, οι ανεμογεννήτριες και τα ηλεκτρικά οχήματα αντιπροσωπεύουν μόνο το 7% και το 9% της συνολικής ζήτησης, αντίστοιχα, ενώ για το δυσπρόσιο αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 37% και για το τέρβιο το 30% της συνολικής ζήτησης.

Μία από τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στο κόστος και την οικονομική βιωσιμότητα των έργων είναι πιθανό να είναι η συνεχιζόμενη υπερπαραγωγή λανθανίου και κερίου. Καθώς δεν είναι δυνατόν να στοχευθεί επιλεκτικά ένα συγκεκριμένο στοιχείο της ομάδας των σπάνιων γαιών για εξόρυξη, όλες οι σπάνιες γαίες πρέπει να εξορύσσονται μαζί και στη συνέχεια διαχωρίζονται με πολύπλοκες μεταλλουργικές διεργασίες. Αφού το λανθάνιο και το κέριο συγκαταλέγονται μεταξύ των πιο άφθονων σπάνιων γαιών, εξορύσσονται σε μεγάλες ποσότητες, πολύ μεγαλύτερες από τη σχετικά μικρή ζήτησή τους στην αγορά, και ως εκ

τούτου αντιπροσωπεύουν ένα κόστος τόσο όσον αφορά την εξόρυξη όσο και τη διάθεση (Barakos et al., 2018).

Υπάρχουν επίσης περιβαλλοντικές ανησυχίες, καθώς τα μεταλλεύματα σπάνιων γαιών συχνά περιέχουν θόριο και ουράνιο, εγείροντας έτσι το ζήτημα της διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων. Τα τελευταία χρόνια αυτό αποτέλεσε σημαντικό αποτρεπτικό παράγοντα για την εξάπλωση των ορυχείων σπάνιων γαιών εκτός Κίνας (Seaman, 2019).

Ο ρόλος της Κίνας προκαλεί επίσης ανησυχίες σε πολλά μέτωπα. Η Κίνα ασκούσε πάντοτε ισχυρό έλεγχο στην αγορά σπάνιων γαιών, μεταξύ άλλων με τη θέσπιση αυστηρών ποσοστώσεων εξαγωγών το 2010. Αν και οι ποσοστώσεις αυτές καταργήθηκαν το 2014 μετά από απόφαση του Παγκόσμιου Οργανισμού Εμπορίου, ο έλεγχος της Κίνας στην παραγωγή και την εξαγωγή σπάνιων γαιών δεν έχει μειωθεί.

4.3. Κόστος χάλυβα

Με απλουστευμένους όρους, οι τιμές παραγωγού για τις χαλύβδινες κατασκευές εκ του εργοστασίου αποτελούνται κυρίως από τέσσερις παράγοντες:

- Κόστος εργασίας (κοπή, συγκόλληση, τοποθέτηση, συντήρηση και συναρμολόγηση των εξαρτημάτων)
- Κόστος υλικών (πλάκες, δοκοί, χαλύβδινα προφίλ ή σωλήνες, καθώς και βοηθητικά υλικά όπως ηλεκτρόδια συγκόλλησης ή τροχοί λείανσης)
- Κόστος διοίκησης και κέρδος (κόστος έργου, διασφάλιση ποιότητας, διανομή, λογιστική μισθοδοσίας, εισφορές)
- Εξωτερικές δαπάνες (γαλβανισμός, βαφή σε σκόνη, άλλη επιφανειακή ή θερμική επεξεργασία)

Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εσωτερικά έξοδα επιτόπιας υποστήριξης του προμηθευτή, αλλά και τα έξοδα παράδοσης, προκειμένου να καταλήξουμε σε μια ουσιαστική συνολική σύγκριση του κόστους.

Στο παρελθόν, οι τιμές του χάλυβα ήταν σχετικά σταθερές και ομοιογενείς. Μετά το ξέσπασμα της πανδημίας COVID 19, ωστόσο, αυτό έχει αλλάξει και οι τιμές είναι εξαιρετικά ευμετάβλητες, και κορυφώθηκαν μετά την αρχή της σύγκρουσης στην Ουκρανία.

Το κόστος μεταφοράς και η διαθεσιμότητα των υλικών παίζουν σημαντικό ρόλο, οπότε οι κατασκευαστικές εταιρείες που βρίσκονται κοντά σε ευνοϊκούς παραγωγούς ή διανομείς χάλυβα έχουν ελαφρά πλεονεκτήματα κόστους. Στην περίπτωση των βαριών χαλύβδινων κατασκευών με μεγάλο πάχος τοιχωμάτων και λίγα στάδια επεξεργασίας, το κόστος των υλικών έχει μεγαλύτερη επιρροή από ότι στην περίπτωση των ελαφρών χαλύβδινων κατασκευών με λεπτά πάχη πλακών και πιο πολύπλοκες δομές.

Για παραγγελίες με υψηλό επίπεδο προστιθέμενης αξίας από μηχανές, το κόστος εργασίας χάνει την επιρροή του και άλλα κόστη, ιδίως το κόστος μεταφοράς, αποκτούν μεγαλύτερη βαρύτητα.

Όσον αφορά το διοικητικό κόστος, εκτός από το κέρδος της εταιρείας, το κόστος αυτό περιλαμβάνει δαπάνες για κτίρια, μηχανήματα και για το προσωπικό που δεν είναι σταθερά.

Ανάλογα με τις απαιτήσεις, το εξωτερικό κόστος μπορεί επίσης να επηρεάσει τον υπολογισμό. Το πιο συνηθισμένο από αυτά είναι το κόστος γαλβανισμού των χαλύβδινων κατασκευών. Η βαφή πραγματοποιείται εσωτερικά από τους περισσότερους προμηθευτές χαλύβδινων κατασκευών, και το κόστος της εξαρτάται αρκετά από το κόστος εργασίας.

Οι δαπάνες που δεν είναι άμεσα ορατές στο τιμολόγιο του έργου (κρυφές δαπάνες) είναι πολύ δύσκολο να καταγραφούν. Ωστόσο, είναι πολύ σημαντικές, ιδίως στην περίπτωση των χαλύβδινων στοιχείων, και είναι απολύτως απαραίτητο να αποσαφηνιστούν.

Επιπλέον, υπάρχουν και άλλα κόστη που πρέπει να ληφθούν υπόψη, ειδικά με την κατασκευή χαλύβδινων εξαρτημάτων:

- Κόστος μεταφοράς
- Τέλη εμπορευμάτων
- Εσωτερικές δαπάνες για την υποστήριξη των προμηθευτών
- Διασφάλιση ποιότητας
- Κόστος ταξιδιών και τηλεπικοινωνιών
- Κόστος επανεπεξεργασίας
- Κόστος για ανταλλακτικά που απαιτούνται σε σύντομο χρονικό διάστημα
- Κόστος λόγω καθυστερήσεων (κυρώσεις, μεταγενέστερες παραδόσεις κ.λπ.)

Η κατανομή αυτών των δαπανών επηρεάζεται από την ποικιλομορφία και τον τύπο των στοιχείων χάλυβα, και από την περιοχή παραγωγής.

Ανάλογα με τον τύπο των χαλύβδινων στοιχείων, ο μέσος καταμερισμός του κόστους σε επίπεδο ΕΕ για τα χαλύβδινα στοιχεία μπορεί να χωριστεί σε περίπου 35% εργατικό κόστος, 40% κόστος υλικών και 25% διοικητικό και λοιπό κόστος.

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η μεταβολή του κόστους του χάλυβα από το 1980 μέχρι και το 2020, όπου οι τιμές μετρούνται σε σχέση με το έτος 1980 (1980 = 100).

Σχήμα 4.5 *Μεταβολή του κόστους του χάλυβα από το 1980 μέχρι και το 2020. (Πηγή:Our World in Data)*

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.5, μετά την ραγδαία αύξηση του 2008, όταν και το κόστος των ανεμογεννητριών είχε φτάσει στο ζενίθ του, το κόστος του χάλυβα είχε υποστεί μία σταδιακή μείωση μέχρι πριν την έξαρση του COVID-19. Επιπλέον, οι τιμές του χάλυβα έχουν γενικά αυξηθεί απότομα από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, προκαλώντας αύξηση 38% στο κόστος των πρώτων υλών για έναν τυπικό χαλύβδινο πύργο, επιπλέον των πρόσθετων υλικών που απαιτούνται για την κατασκευή ενός μεγαλύτερου πύργου (Lantz, 2017).

Στις αρχές του 2022, υπήρξαν μαζικές αυξήσεις του κόστους χάλυβα, καθώς η παραγωγή αυξήθηκε για να προσπαθήσει να επανέλθει στα προ-COVID επίπεδα. Στη συνέχεια, ο πληθωρισμός, τα ζητήματα της αλυσίδας εφοδιασμού όπως οι ελλείψεις φορτηγών και οι διεθνείς υποθέσεις προσέθεσαν ταυτόχρονα στην αύξηση του κόστους του χάλυβα. Η εισβολή της Ρωσίας στην Ουκρανία, συγκλόνισε την αγορά μετάλλων και οδήγησε σε μείωση των εξαγωγών χάλυβα από την περιοχή. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συνδυάστηκαν για να αυξήσουν σταδιακά το κόστος του δομικού χάλυβα πάνω από 200% σε διάστημα μόλις δύο ετών.

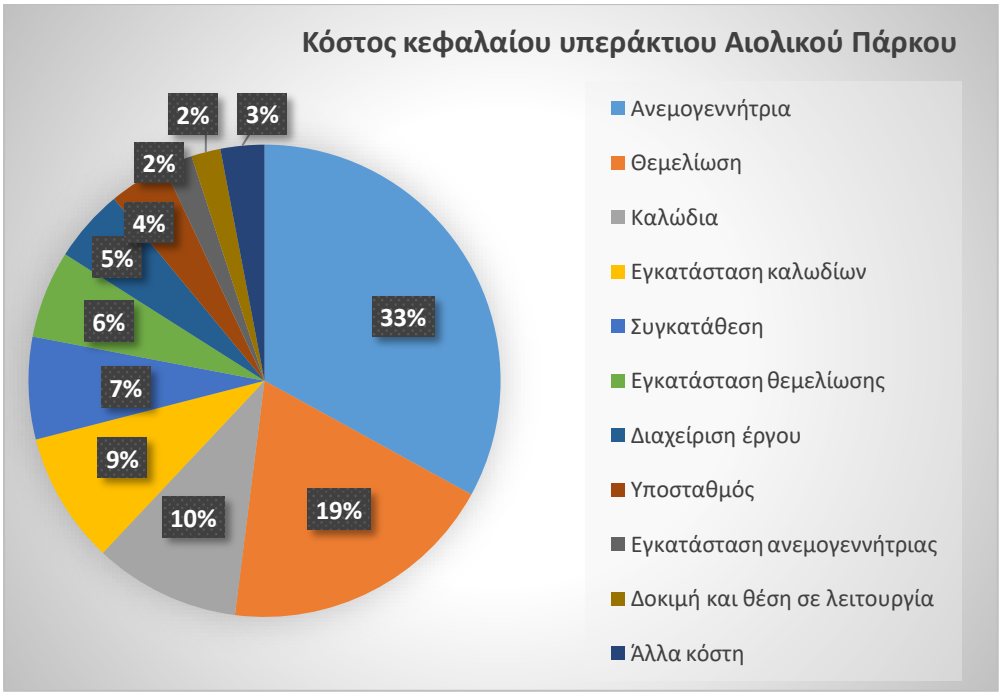
Περί το τέλος του 2022, οι τιμές των αμερικανικών χαλυβουργείων μειώθηκαν, μια ένδειξη ότι η παραγωγή άρχισε να καλύπτει τη ζήτηση. Φαίνεται αυτό να συνεχίστηκε και το 2023,

καθώς το κόστος σταθεροποιήθηκε. Αφού το κόστος του δομικού χάλυβα αυξήθηκε κατά 268% από το τελευταίο τρίμηνο του 2020, από τότε σημειώνει σταθερή πτώση. Τα τρία πρώτα τρίμηνα του 2023, το κόστος δομικού χάλυβα μειώθηκε κατά 35%, παρέχοντας κάποια ανακούφιση στους ιδιοκτήτες έργων.

Το κόστος του χάλυβα οπλισμού ακολούθησε παρόμοιο μοτίβο, αυξάνοντας περισσότερο από 45% καθ' όλη τη διάρκεια του 2021 προς το 2022, προτού μειωθεί κατά 24% στο τέλος του έτους.

4.4. Κόστος υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Οι διαφορετικές αποστάσεις από την ακτή, το βάθος των υδάτων και η κατασκευή και σύνδεση του δικτύου επηρεάζουν το κόστος του υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Σε γενικές γραμμές, η μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας που προκύπτει από τις καλύτερες συνθήκες ανέμου σε σύγκριση με την ξηρά δεν αντισταθμίζει το υψηλότερο αρχικό κόστος κεφαλαίου και διαχείρισης. Συνεπώς, η υπεράκτια αιολική ενέργεια είναι ακριβότερη από την αιολική ενέργεια στην ξηρά (Blanco, 2008). Το κόστος της ανεμογεννήτριας αποτελείται από: το κόστος κεφαλαίου (85%), την αποστολή και συναρμολόγηση (5%) και την ηλεκτρική εγκατάσταση (10%) (Douglas-Westwood, 2010). Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται μία ενδεικτική κατανομή του κόστους κεφαλαίου ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου.



Σχήμα 4.6 *Εκτίμηση της κατανομής του κόστους κεφαλαίου για ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο. (Πηγή: Blanco, 2008)*

Από το Σχήμα 4.6 φαίνεται ότι παρόλο που το μεγαλύτερο μέρος του κόστους προέρχεται από την ίδια την ανεμογεννήτρια, υπάρχουν περισσότερα επιμέρους κόστη σε σχέση με την χερσαία κατασκευή, τα οποία δύνανται να επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό την διάρθρωση του συνολικού κόστους.

Για την κατανόηση των οικονομικών των έργων υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες βασικές παράμετροι:

- Τα θεμέλια είναι σημαντικά ακριβότερα. Το κόστος εξαρτάται τόσο από το βάθος του νερού όσο και από την επιλεγμένη αρχή κατασκευής (Blanco, 2008). Περιλαμβάνει τη μεταφορά, την εγκατάσταση και την προστασία από τη διάβρωση των ιζημάτων γύρω από τα θεμέλια. Το κόστος εξαρτάται αρκετά από τον τύπο της θεμελίωσης (βαρύτητα, μονοπάσσαλος ή τρίποδας) και, στην περίπτωση χαλύβδινων λύσεων, από την τιμή αυτού του εμπορεύματος. Το είδος της θεμελίωσης εξαρτάται, με τη σειρά του, από το βάθος του νερού και τα χαρακτηριστικά του πυθμένα, και σε μικρότερο βαθμό από την ισχύ της ανεμογεννήτριας και τις κυματικές συνθήκες (Gonzalez-Rodriguez, 2017).
- Για την ανέγερση χρησιμοποιούνται πλωτοί γερανοί οι οποίοι έχουν πολύ υψηλό κόστος λειτουργίας. Επίσης χρειάζονται και βοηθητικά σκάφη κατά την διάρκεια κατασκευής / ανέγερσης.
- Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι σημαντικά υψηλότερο από ότι για τα χερσαία έργα. Το υψηλότερο κόστος μεταφοράς, καθώς και η μειωμένη πρόσβαση στον τόπο του έργου, λόγω των κυματισμών και των καιρικών συνθηκών, είναι οι κύριες αιτίες. Το κόστος O&M μπορεί να αποτελεί έως και το 30% του συνολικού κόστους για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα (Blanco. 2008).
- Οι ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των ανεμογεννητριών και μεταξύ του πάρκου και του χερσαίου δικτύου γίνονται με υποθαλάσσια καλώδια, τα οποία δημιουργούν σημαντικό πρόσθετο κόστος σε σύγκριση με τα χερσαία αιολικά έργα. Η δραστηριότητα τοποθέτησης καλωδίων είναι από τις πιο δύσκολες της κατασκευής και γίνεται με ειδικά σκάφη και προσωπικό. Το εν λόγω κόστος μπορεί να είναι χαμηλότερο από ότι στην περίπτωση των καλωδίων εξαγωγής, επειδή, χάρη στο χαμηλότερο κόστος μεταφοράς, το βάθος ταφής είναι χαμηλότερο. Ωστόσο, οι στατιστικές των ασφαλιστών δείχνουν ότι τα καλώδια ευθύνονται για περίπου 50% των αποζημιώσεων που καταβάλλονται (Slengesol et al., 2010).
- Οι περιβαλλοντικές αναλύσεις τείνουν να είναι πιο αυστηρές, περιλαμβάνοντας ενίοτε προγράμματα για την παρακολούθηση των επιπτώσεων στα θηλαστικά και σε άλλες θαλάσσιες κοινότητες και φυτά. Η τιμή πώλησης της ενέργειας βασίζεται σε σημαντικό βαθμό στην περιβαλλοντική πολιτική της χώρας και την τιμή της ενέργειας στη γενική αγορά (EWEA, 2009).

- Μία οικονομικά αποδοτική σύνδεση δικτύου μέσης τάσης σε υφιστάμενους χερσαίους υποσταθμούς είναι δυνατή εάν ο υποσταθμός είναι μικρός ή βρίσκεται κοντά στην ακτή (Douglas-Westwood, 2010, Slengesol et al., 2010). Διαφορετικά, πρέπει να συμπεριληφθεί ένας υπεράκτιος υποσταθμός με τον ηλεκτρικό εξοπλισμό για τη μετατροπή της μέσης τάσης μεταξύ των συστοιχιών (συνήθως 30-34 kV) στην υψηλή τάση του δικτύου μεταφοράς. Η χωρητικότητα του υποσταθμού καθορίζει το κόστος και το βάρος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (κυρίως μετασχηματιστές και ηλεκτρονόμοι με μόνωση αερίου), και με τη σειρά του το βάρος και το κόστος της υποκατασκευής, το οποίο εξαρτάται επίσης από το βάθος του νερού.
- Ο υπεράκτιος παροπλισμός αφορά την απομάκρυνση της υπερκατασκευής (π.χ. πτερύγια, ατρακτίδιο, πύργοι), της θεμελίωσης, της προστασίας από ξέπλυμα και των υπεράκτιων καλωδίων. Η υπολειμματική αξία εξαρτάται από το αν τα θεμέλια είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα ή χάλυβα, αν και, σε γενικές γραμμές, πρόκειται για μια μικρή τιμή σε σύγκριση με το κόστος παροπλισμού (περίπου 10%) (Kaiser and Snyder, 2010).
- Ο επενδυτής αντιμετωπίζει υψηλότερους κινδύνους, οι οποίοι μεταφράζονται σε υψηλότερα επιτόκια και ασφάλιστρα, επιδοτήσεις επενδύσεων και φόρους επί των ταμειακών ροών.

Κατά συνέπεια, η αβεβαιότητα του υπολογισμού του κόστους στην περίπτωση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από ότι για την χερσαία αιολική ενέργεια.

4.5. Κόστος δεδομένης ανεμογεννήτριας

Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μίας ανεμογεννήτριας είναι ο χάλυβας, το σκυρόδεμα, ο χαλκός, το αλουμίνιο, οι σπάνιες γαίες και τα σύνθετα υλικά από ίνες γυαλιού ή άνθρακα. Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται τα βάρη σε t/MW του χάλυβα, του χαλκού και του αλουμινίου για μία ανεμογεννήτρια.

Πίνακας 4.1 *Βάρος χάλυβα, χαλκού και αλουμινίου σε t/MW. (Πηγή: BNEF, EU commission, GPG internal)*

Υλικό	**Βάρος (t/MW)**
Χάλυβας	170
Χαλκός	2,1
Αλουμίνιο	1

Το βάρος του σκυροδέματος θεωρείται περίπου 300 t/MW (Carrara et al., 2020). Όσον αφορά τις ίνες γυαλιού που χρησιμοποιούνται για σύνθετα υλικά, έχουν ποσότητα 9.6 t/MW σε μία ανεμογεννήτρια (Arias, 2016). Ενώ, τα βάρη των σπανίων γαιών νεοδυμίου και

δυσπροσίου είναι 0.216 t/MW και 0.017 t/MW (Verma et al., 2022). Για το βόριο, η ποσότητα λαμβάνεται από το Σχήμα 3.3.

Με αυτά τα δεδομένα, παρατίθεται ο ενδεικτικός Πίνακας 4.2, στον οποίο αναγράφονται τα υλικά κατασκευής μίας ανεμογεννήτριας 5 MW, το βάρος τους και το κόστος που προκύπτει για το κάθε υλικό. Τα κόστη ανά τόνο (€/t) έχουν παρθεί από διάφορες πηγές και είναι ενδεικτικά, αφού μεταβάλλονται τόσο με τον χρόνο όσο και με τον τόπο παραγωγής.

Πίνακας 4.2 *Ποσότητα και κόστος επιμέρους υλικών ανεμογεννήτριας 5MW*

MW	Ανεμογεννήτρια				
5	Βάρος σε t/MW	Βάρος σε τόνους (t)	Κόστος ανά τόνο (€/t)	Κόστος υλικού	Ποσοστό κόστους (%)
Χάλυβας	170	850	628	533.800	47,2
Χαλκός	2,1	10,5	7.460	78.330	6,9
Αλουμίνιο	1	5	2.004	10.020	0,9
Νεοδύμιο	0,216	1,08	126.000	136.080	12,0
Δυσπρόσιο	0,017	0,085	351.000	29.835	2,6
Βόριο	-	0,04	1.235.400	49.416	4,4
Ίνες γυαλιού	9,6	48	2.372	113.856	10,1
Σκυρόδεμα	300	1.500	119	178.500	15,8
Σύνολο		2.414,705		1.129.837	100

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4.2, το καθαρό κόστος των υλικών μίας μέσης ανεμογεννήτριας 5 MW ξεπερνάει τα 1100000 €, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το κόστος κατασκευής και συντήρησης. Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το 19% του κόστους υλικών αφορά τους μόνιμους μαγνήτες και το 10% τις ίνες γυαλιού.

5. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

5.1. Σκυρόδεμα αντί για χάλυβα

Οι πρωταρχικές δομικές ανησυχίες για όλους τους πύργους ανεμογεννητριών περιλαμβάνουν το σχεδιασμό έναντι λυγισμού σε θλίψη, την αντοχή υπό φόρτιση κόπωσης και τη δυσκαμψία του πύργου σε σχέση με τη συχνότητα ταλάντωσης. Είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ποιος τύπος φόρτισης είναι πιο κρίσιμος από τον άλλο, καθώς πρόσθετοι παράγοντες όπως ο τύπος της ανεμογεννήτριας και η χωροθέτηση του έργου μπορεί να δημιουργήσουν συνθήκες όπου ένας τύπος φόρτισης αξίζει μεγαλύτερη προσοχή (Burton, 2011).

Μέσα σε έναν αμιγώς χαλύβδινο πύργο, το πιο αδύναμο τμήμα που φέρει φορτίο είναι οι αρθρώσεις του πύργου. Η κρίσιμη τάση λυγισμού για έναν τυπικό χαλύβδινο πύργο εξαρτάται από την αντοχή των συγκολλήσεων (Burton, 2011). Η κατασκευή ενός πύργου από χυτό σκυρόδεμα εξαλείφει τις ανησυχίες για το λυγισμό των αρθρώσεων, καθώς η μέθοδος αυτή εξαλείφει τις αρθρώσεις στη δομή και βελτιώνει τη θλιπτική αντοχή μέσω της μετα-έντασης (Von Der Haar & Marx, 2015).

Λόγω της επαναλαμβανόμενης και ασυνεχούς φόρτισης που υφίσταται ένας πύργος ανεμογεννήτριας, ένα άλλο μείζον ζήτημα στο σχεδιασμό είναι το φορτίο κόπωσης του πύργου. Τα φορτία κόπωσης επιδεινώνονται από την παραμόρφωση ενός πύργου. Η εναπομένουσα αντοχή του χάλυβα σε κόπωση ερμηνεύεται ως απεριόριστη πέραν ενός αρχικού ορίου αποκοπής που επιτυγχάνεται κατά τους πρώτους μήνες ζωής μιας ανεμογεννήτριας (Harte, 2007). Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με τις προβλέψεις κόπωσης και βλάβης σε πύργους από σκυρόδεμα, καθώς ο χάλυβας έχει μια γραμμική σχέση συσσώρευσης βλάβης, ενώ το σκυρόδεμα όχι (Paredes, 2011).

Τέλος, η συχνότητα ταλάντωσης ενός πύργου είναι ένας σοβαρός παράγοντας σχεδιασμού που γίνεται μεγαλύτερο ζήτημα όσο αυξάνεται το ύψος του πύργου. Η ευρύτερη βάση ενός πύργου από σκυρόδεμα επιτρέπει μεγαλύτερη δυσκαμψία του πύργου σε σύγκριση είτε με χαλύβδινους είτε με υβριδικούς πύργους. Λόγω της αυξημένης δυσκαμψίας και της πυκνότητας μάζας ενός πύργου από σκυρόδεμα σε σύγκριση με έναν αμιγώς χαλύβδινο, οι πρώτοι έχουν υψηλότερη συχνότητα ταλάντωσης από τις αναμενόμενες συχνότητες που προκαλούνται από τον δρομέα ή τα διερχόμενα πτερύγια.

Ένας αμιγώς χαλύβδινος πύργος αναμένεται να έχει ωφέλιμη ζωή 20 - 25 έτη. Λόγω των πλεονεκτημάτων της ελάχιστης παραμόρφωσης, η μοντελοποίηση πύργων από σκυρόδεμα έχει δείξει ότι η ωφέλιμη ζωή μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη, είτε πρόκειται για προκατασκευασμένους είτε για χυτούς πύργους (Sritharan, 2015).

Ενώ το σκυρόδεμα καθιστά εφικτούς τους ψηλούς πύργους ανεμογεννητριών, η τάση του για ρηγμάτωση εγείρει ανησυχίες σχετικά με τη διάρκεια ζωής. Οι ρωγμές στο κάλυμμα του σκυροδέματος παρέχουν διόδους για επιθετικές χημικές ουσίες, όπως τα χλωρίδια, που φθάνουν στον οπλισμό του χάλυβα και επιταχύνουν τη φθορά του σκυροδέματος. Ως αποτέλεσμα, τόσο η ανθεκτικότητα όσο και η μακροπρόθεσμη απόδοση ενός ψηλού πύργου ανεμογεννήτριας από σκυρόδεμα μπορεί να διακυβευθούν, και απαιτείται δαπανηρή συντήρηση και ανεπιθύμητος χρόνος διακοπής λειτουργίας. Αυτές οι ανησυχίες επιδεινώνονται από την καμπτική φόρτιση και την κόπωση και ειδικά εάν ο πύργος βρίσκεται σε ένα δυσμενές περιβάλλον, όπως για παράδειγμα μια παράκτια περιοχή με ανέμους υψηλής ταχύτητας (Jin, 2019).

Το κόστος των πύργων ανεμογεννητριών έχει αποδειχθεί ότι αυξάνεται σημαντικά με το μέγεθος και προβλέπεται να αποτελέσει το μεγαλύτερο μερίδιο του κόστους καθώς αυξάνονται τα μεγέθη (Lantz, 2017), (Ashuri, 2016). Παρά την αναλογική συσχέτιση μεταξύ κόστους και μεγέθους πύργου, οι βελτιώσεις στο σχεδιασμό πύργων από σκυρόδεμα ή υβριδικών πύργων, παρέχουν την ευκαιρία να μειωθούν αυτές οι αυξήσεις. Η αυξημένη ακαμψία και το βάρος ενός πύργου από σκυρόδεμα μειώνουν τις απαιτήσεις ακαμψίας θεμελίωσης, καθώς και εξαλείφουν τις διεπαφές θεμελίωσης-πύργου, μειώνοντας την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και το κόστος της θεμελίωσης του πύργου.

Πέρα από το αυξανόμενο κόστος των πρώτων υλών του χάλυβα για αυτόν τον τύπο πύργου, ένα μεγάλο μέρος του συνολικού κόστους μπορεί να αποτελείται από το κόστος μεταφοράς, ιδίως για απομακρυσμένες ή μη ανεπτυγμένες τοποθεσίες. Αν και το προκατασκευασμένο σκυρόδεμα έχει επίσης συναφή κόστη μεταφοράς και συναρμολόγησης, η δυνατότητα δημιουργίας εργοστασίου κοντά στην τοποθεσία μπορεί να αποδειχθεί πιο οικονομική από τη μεταφορά χαλύβδινων τμημάτων (Sritharan, 2015). Οι πύργοι από χυτό σκυρόδεμα έχουν χαμηλό κόστος μεταφοράς, καθώς μόνο τα εξαρτήματα μεταφέρονται σε μια τοποθεσία.

Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες στο κόστος του πύργου, όπως η κατασκευή και η συντήρηση. Τόσο οι αμιγώς χαλύβδινοι όσο και οι προκατασκευασμένοι πύργοι μπορούν να συναρμολογηθούν αρκετά γρήγορα, αν και οι χυτοί πύργοι απαιτούν μεγαλύτερη περίοδο κατασκευής που εξαρτάται από τις επιτόπιες καιρικές συνθήκες.

Από κοινωνική άποψη, οι πύργοι από σκυρόδεμα έχουν μεγαλύτερες ιδιότητες απόσβεσης του θορύβου σε σχέση με τους πλήρως χαλύβδινους, γεγονός που οδηγεί στη δυνατότητα τοποθέτησης αιολικών πάρκων πιο κοντά σε κατοικημένες περιοχές (Burton, 2011). Επιπλέον, το φυσικό χρώμα του σκυροδέματος, ένα ουδέτερο γκρι, είναι αισθητικά ευχάριστο και εξαλείφει την ανάγκη για βαφή, όπως γίνεται στα μέρη από χάλυβα.

Περιβαλλοντικά οι ανεμογεννήτριες έχουν μερικές από τις χαμηλότερες επιπτώσεις από όλες τις μορφές παραγωγής ενέργειας, αν και μεγάλο μέρος των συνολικών εκπομπών

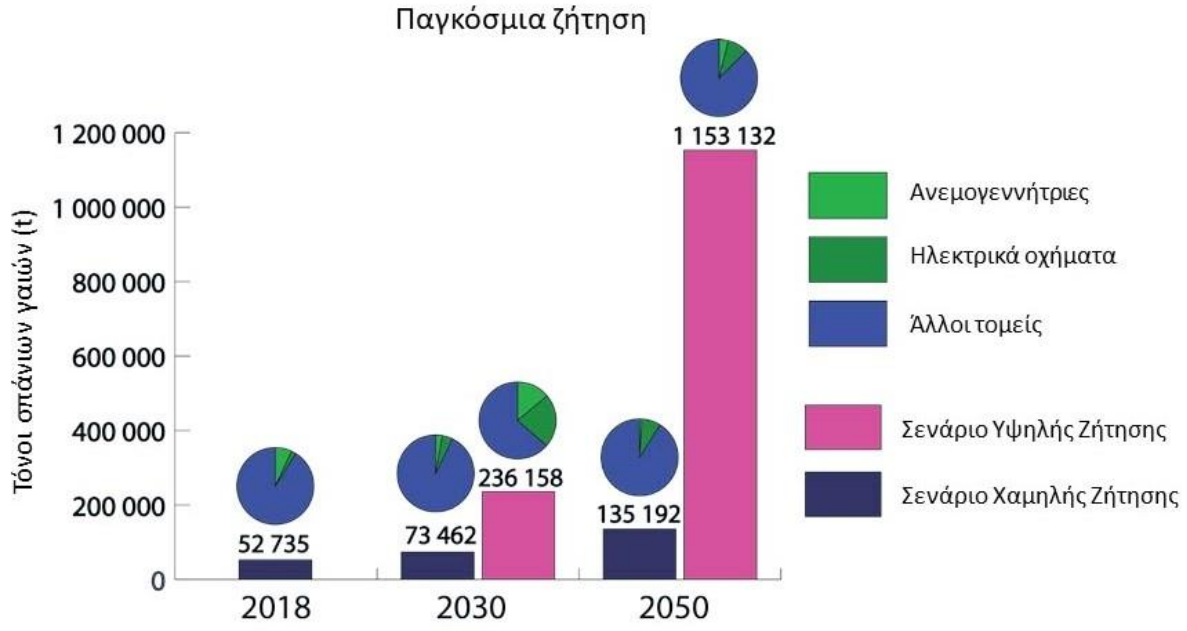
αερίων του θερμοκηπίου συμβαίνει κατά τα στάδια της μεταφοράς και της εγκατάστασης (Wang, 2019). Η χρήση χυτών πύργων μπορεί να έχει τη δυνατότητα να μειώσει αυτές τις εκπομπές. Εκτός από τις εκπομπές που παράγονται από ένα αιολικό πάρκο, η κατασκευή διαταράσσει τον βιότοπο (Saidur, 2011). Η δημιουργία ενός εργοστασίου σκυροδέματος επί τόπου θα αυξήσει το αποτύπωμα μιας εγκατάστασης, παρέχοντας περαιτέρω διαταραχή των οικοτόπων που μπορεί να χρειαστεί να εξεταστεί εάν υπάρχουν ευαίσθητοι πληθυσμοί φυτών ή ζώων στην περιοχή. Οι απαιτήσεις χρήσης νερού για την παραγωγή πύργων είναι ένας άλλος σημαντικός αντίκτυπος που μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την επιλεγμένη τεχνολογία πύργων.

5.2. Εναλλακτικές σπανίων γαιών

Αν και πολλά υποσχόμενοι, οι περισσότεροι αντικαταστάτες των μόνιμων μαγνητών είναι όλο και λιγότερο αποδοτικοί και συνεπώς δεν αποτελούν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις (Rabe et al., 2017).

Τα δύο σενάρια (χαμηλής και υψηλής ζήτησης) για τις καθαρές ενεργειακές τεχνολογίες θεωρούνται ως λογικά άκρα στο πλαίσιο της παγκόσμιας πράσινης μετάβασης, ενώ οι μελλοντικές τάσεις είναι πιθανό να κυμανθούν μεταξύ τους. Ειδικότερα, το σενάριο χαμηλής ζήτησης υποθέτει μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2,7 °C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, όπως έχουν δεσμευτεί όλες οι χώρες στο πλαίσιο της συμφωνίας του Παρισιού, και λαμβάνει υπόψη τους δεσμευτικούς στόχους της ΕΕ για το 2030 σχετικά με την κλιματική αλλαγή (Bobba et al., 2020). Υποθέτει επίσης ότι η έρευνα και η καινοτομία θα οδηγήσουν σε σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών και των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς και σε σημαντική βελτιστοποίηση όσον αφορά τη χρήση υλικών. Υποτίθεται επίσης ότι οι εναλλακτικές τεχνολογίες θα έχουν σημαντικά μερίδια αγοράς, ιδίως για τις γεννήτριες ανεμογεννητριών.

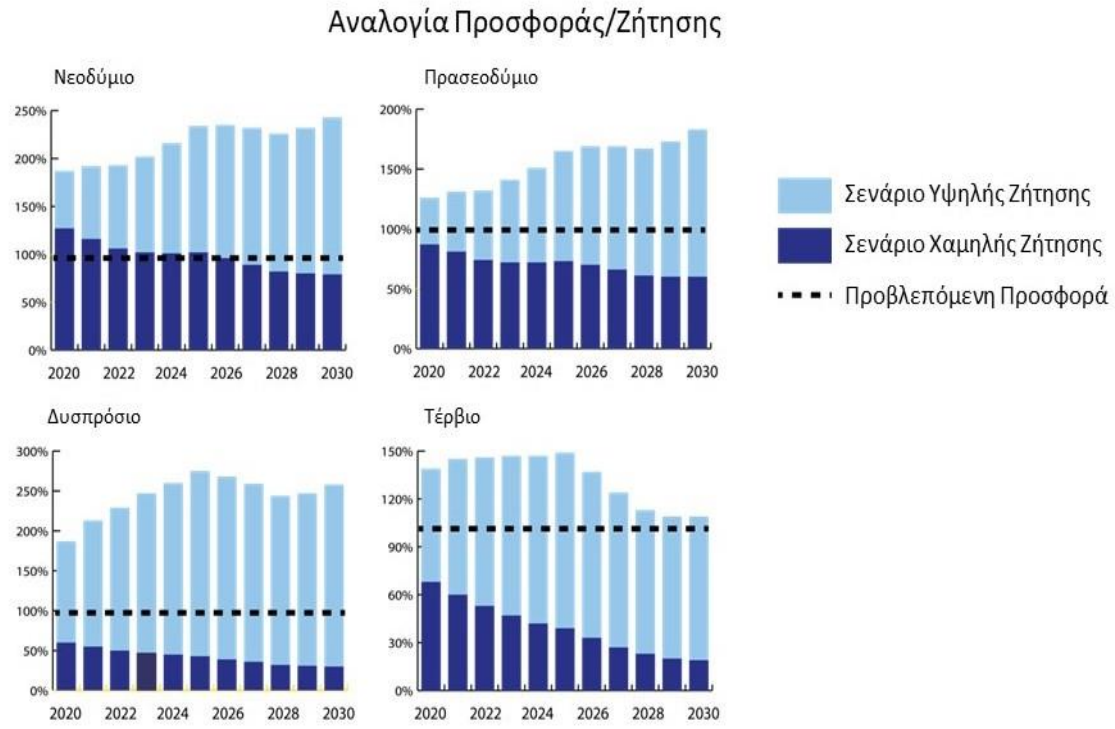
Το σενάριο υψηλής ζήτησης θεωρεί ισχυρότερες πολιτικές φιλοδοξίες, που οδηγούν σε μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1,5 °C, 100 % ανανεώσιμη πρωτογενή ενέργεια και πλήρη απεξάρτηση της ΕΕ από τον άνθρακα έως το 2050 (Bobba et al., 2020). Η έρευνα και η καινοτομία υποτίθεται ότι θα επιφέρουν μόνο μικρές βελτιώσεις και τα προϊόντα μόνιμων μαγνητών υποτίθεται ότι θα έχουν σταθερά ή αυξανόμενα μερίδια αγοράς, με ελάχιστα περιθώρια για εναλλακτικές τεχνολογίες. Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η εκτιμώμενη παγκόσμια ζήτηση των 4 σπανίων γαιών (νεοδυμίου, πρασεοδυμίου, δυσπροσίου και τερβίου*)* που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες μέχρι το 2050.



Σχήμα 5.1 *Εκτιμώμενη παγκόσμια ζήτηση για μέταλλα νεοδυμίου, πρασεοδυμίου, δυσπροσίου και τερβίου σε t για γεννήτριες ανεμογεννητριών, κινητήρες για ηλεκτρικά οχήματα και άλλους τομείς, σύμφωνα με τα σενάρια χαμηλής και υψηλής ζήτηση. (Πηγή:* Bobba et al., 2020)

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.1, και στα δύο άκρα η συνολική ζήτηση σπάνιων γαιών αναμένεται να αυξηθεί, αν και με πολύ διαφορετικούς ρυθμούς. Η ζήτηση για ανεμογεννήτριες μπορεί να μειωθεί στο σενάριο χαμηλής ζήτησης, κυρίως λόγω του θετικού αντίκτυπου των τεχνολογικών εξελίξεων, αλλά η μείωση αυτή θα επισκιαστεί από τη μεγάλη αύξηση της ζήτησης για ηλεκτρικά οχήματα, έναν τομέα που αναμένεται να γνωρίσει έκρηξη σε οποιοδήποτε σενάριο. Ακόμη και στο σενάριο υψηλής ζήτησης, στο οποίο υπάρχει σημαντική αύξηση της ζήτησης για ανεμογεννήτριες, η μεγαλύτερη ζήτηση αφορά τα ηλεκτρικά οχήματα.

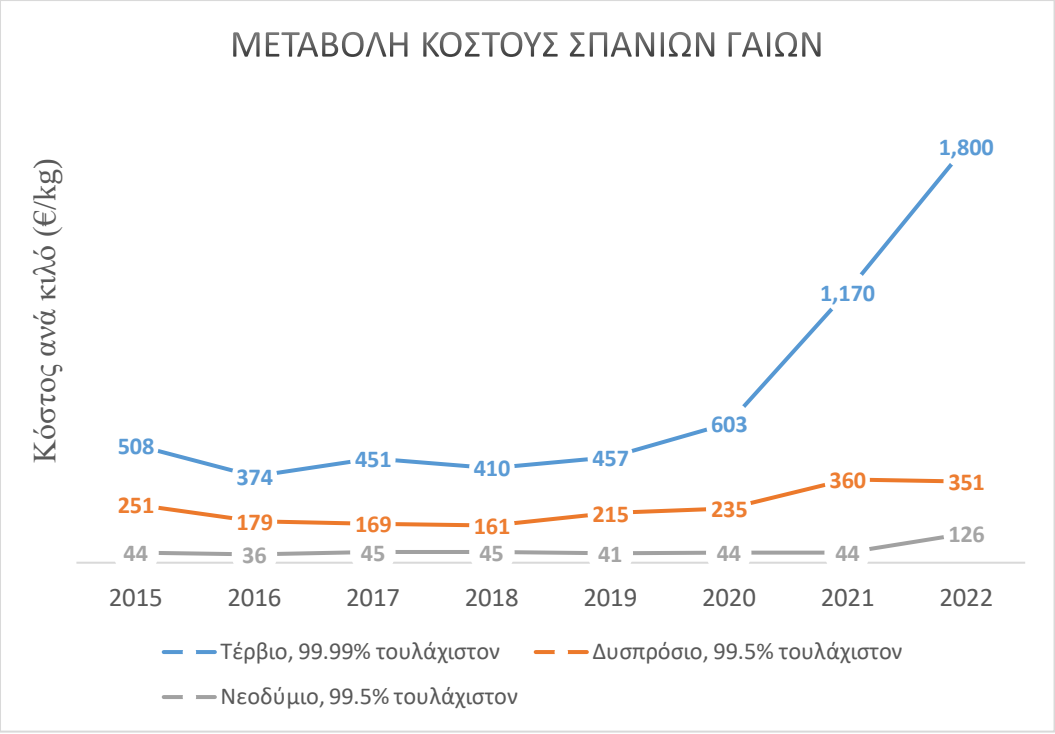
Είναι ενδιαφέρον ότι, ενώ η διαφορά στα επίπεδα προσφοράς μεταξύ των δύο σεναρίων είναι αρκετά μέτρια, η διαφορά στα επίπεδα ζήτησης είναι υπερδεκαπλάσια. Αυτό δείχνει ότι το μέλλον εξακολουθεί να είναι πολύ αβέβαιο και ότι υπάρχει η δυνατότητα να επηρεαστούν οι μελλοντικές τάσεις της ζήτησης μέσω του επανακαθορισμού των κλιματικών φιλοδοξιών, των επενδύσεων στην έρευνα και την καινοτομία και των κινήτρων που προωθούν την υιοθέτηση εναλλακτικών τεχνολογιών μόλις αυτές είναι διαθέσιμες. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται η αναλογία ζήτησης/προσφοράς για τις 4 σπάνιες γαίες σε όλους τους τομείς μέχρι το 2030.



Σχήμα 5.2 *Αναλογία ζήτησης/προσφοράς για τα μέταλλα νεοδυμίου, πρασεοδυμίου, δυσπροσίου και τερβίου, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους τομείς. (Πηγή: Bobba et al., 2020)*

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 5.2, αν και βραχυπρόθεσμα ο περιορισμός της ζήτησης είναι η ευκολότερη στρατηγική που μπορεί να εφαρμοστεί, μακροπρόθεσμα θα μπορούσε να είναι πολύτιμη η αύξηση της προσφοράς. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί τόσο με την προώθηση και παροχή κινήτρων για έργα γεωλογικής εξερεύνησης και εξόρυξης όσο και με την ανακύκλωση. Η τελευταία θεωρείται ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή για την Ευρώπη, η οποία διαθέτει λίγους πόρους στο έδαφός της και όπου οι νέες εξορυκτικές δραστηριότητες υπόκεινται συχνά σε σκληρή δημόσια συζήτηση.

Με δεδομένη και την αύξηση του κόστους των σπανίων γαιών, είναι εύλογη η αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων για τις γεννήτριες μονίμων μαγνητών. Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η μεταβολή του κόστους του τερβίου, του δυσπροσίου και του νεοδυμίου από το 2015 μέχρι το 2022.



Σχήμα 5.3 *Μεταβολή κόστους σπανίων γαιών από το 2015 μέχρι το 2022 σε €/kg. (Πηγή: Statista)*

Όπως διαφαίνεται στο Σχήμα 5.3, με την έξαρση του COVID-19, υπήρξε έξαρση και του κόστους των εν λόγω σπανίων γαιών, και ειδικά του τερβίου, του οποίου το κόστος τριπλασιάστηκε σε διάστημα μόλις 2 χρόνων.

Πιθανές εναλλακτικές λύσεις στις γεννήτριες μόνιμων μαγνητών είναι οι σύγχρονες γεννήτριες πολλαπλών πόλων, και οι επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού. Στο μέλλον, οι εναλλακτικές λύσεις μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν γεννήτριες που βασίζονται σε υπεραγωγούς, όπως αυτές που δοκιμάστηκαν με επιτυχία στο έργο EcoSwing (2019), το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την ΕΕ (Winkler & EcoSwing Consortium, 2019).

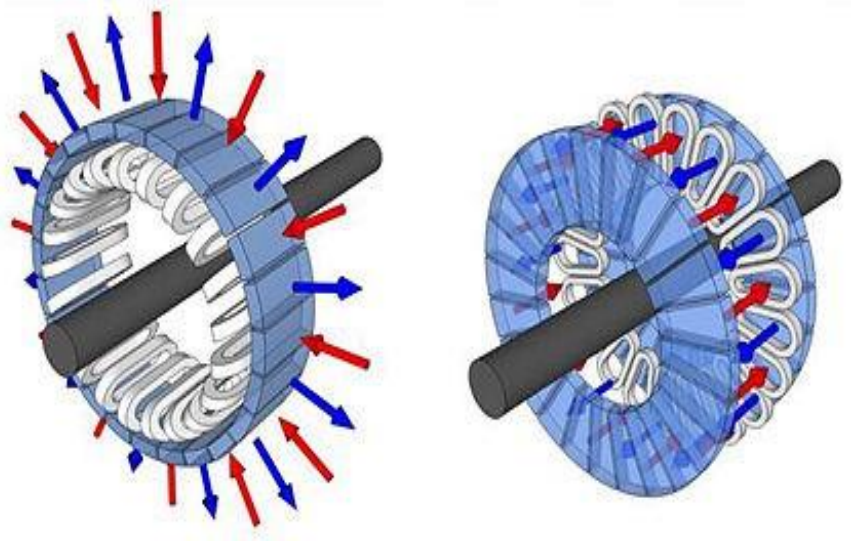
Μια άλλη επιλογή είναι η χρήση υβριδικών γεννητριών κίνησης, οι οποίες χρησιμοποιούν μικρότερο μόνιμο μαγνήτη από αυτόν που χρησιμοποιείται στα τυπικά συστήματα. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της χρήσης νεοδυμίου, πρασεοδυμίου και δυσπροσίου έως και κατά δύο τρίτα ανά ανεμογεννήτρια (Centre for Sustainable Energy, 2017).

Οι Pathak et al. (2015) ισχυρίζονται ότι ανέπτυξαν έναν νέο τρόπο για την πλήρη αντικατάσταση του δυσπροσίου και τη μερική αντικατάσταση του νεοδυμίου (κατά περίπου 20%) στον μαγνήτη NdFeB χρησιμοποιώντας κοβάλτιο και κέριο (μια πολύ φθηνότερη και πιο διαθέσιμη σπάνια γη). Ωστόσο, οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ταινιών που έχουν περιστραφεί σε τήγμα, και δεν αντιπροσωπεύουν πλήρως τους πυρο-συσσωματωμένους μόνιμους μαγνήτες NdDyFeB.

Οι ερευνητές του Ινστιτούτου Κρίσιμων Υλικών του Εργαστηρίου Ames εργάζονται για τη δημιουργία μαγνητών για ανεμογεννήτριες από πιο κοινά και άμεσα διαθέσιμα στοιχεία. Πειραματικά, ισχυρίζονται ότι μπορούμε να "αποκαταστήσουμε" συστήματα σχεδόν μαγνητικών υλικών, που ονομάζονται παραμαγνήτες, ξεκινώντας με κράματα ή ενώσεις που έχουν όλες τις σωστές ιδιότητες για να είναι σιδηρομαγνητικά σε θερμοκρασία δωματίου. Πολλές φορές, αυτά τα υλικά έχουν υψηλά ποσοστά σιδήρου ή κοβαλτίου. Οι παραμαγνήτες έλκονται ασθενώς από ένα μαγνητικό πεδίο και δεν είναι μόνιμα μαγνητισμένοι. Μπορούν όμως να μετατραπούν σε σιδηρομαγνήτες με την προσθήκη κραμάτων (Science Daily). Η ομάδα του Lograsso έχει εντοπίσει δύο υποσχόμενους υποψηφίους - και οι δύο είναι μορφές του κοβαλτίου και του κερίου (CeCo3 και CeCo5). Οι ερευνητές λένε ότι το CeCo5 θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη θέση των ισχυρότερων μαγνητών σπάνιων γαιών που περιέχουν νεοδύμιο (Nd) και δυσπρόσιο (Dy).

Η GreenSpur Wind με έδρα το Middlesborough και η Niron Magnetics με έδρα τη Minneaopolis δηλώνουν ότι μία γεννήτρια υψηλής απόδοσης χαμηλής μάζας θα παράγει ενέργεια χωρίς να χρειάζεται δαπανηρούς και περιβαλλοντικά επικίνδυνους μαγνήτες σπάνιων γαιών. Οι μαγνήτες νιτριδίου του σιδήρου της Niron βασίζονται σε χαμηλού κόστους, βιώσιμα υλικά και είναι θερμοκρασιακά σταθεροί χωρίς να χρειάζονται βαριές προσμίξεις σπάνιων γαιών. Βασίζονται σε νιτρίδια σιδήρου, έχουν παρόμοιες επιδόσεις με τους σπάνιους γαιάνθρακες, αλλά κοστίζουν λιγότερο και παρουσιάζουν καλύτερη σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες.

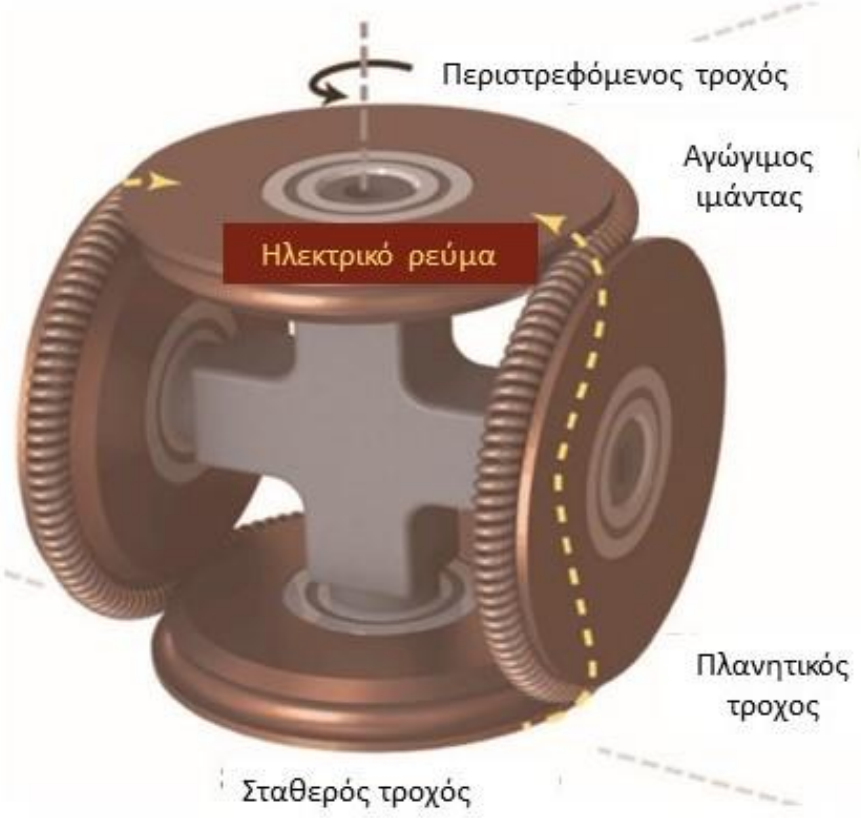
Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται η διάταξη των μαγνητών στις ακτινικές (αριστερά) και αξονικές (δεξιά) μηχανές με τις προκύπτουσες γραμμές ροής.



Σχήμα 5.4 *Διάταξη των μαγνητών της Niron στις ακτινικές (αριστερά) και αξονικές (δεξιά) μηχανές με τις προκύπτουσες γραμμές ροής. (Πηγή: https://drivesncontrols.com)*

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4, στον σχεδιασμό αξονικής ροής της GreenSpur, ο δρομέας και ο στάτης είναι διατεταγμένοι ως δίσκοι με μαγνητική ροή που ρέει παράλληλα με τον άξονα. Οι μηχανές σχηματίζονται από ενότητες, καθεμία από τις οποίες περιέχει έναν δρομέα με ενσωματωμένους μαγνήτες, που παρεμβάλλονται μεταξύ δύο πηνίων που περιέχουν στάτες, στους οποίους επάγονται ρεύματα. Τα σχέδια αξονικής ροής ψύχονται ευκολότερα και επιτρέπουν μεγαλύτερα διάκενα αέρα μεταξύ του δρομέα και του στάτη σε σχέση με τα ακτινικά σχέδια, απλοποιώντας την κατασκευή και επιτρέποντας μεγαλύτερη ανοχή στην κίνηση υπό φορτίο.

Οι ερευνητές των Εργαστηρίων Sandia στις ΗΠΑ ανέπτυξαν έναν νέο τύπο περιστροφικής ηλεκτρικής επαφής. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η τεχνολογία Twistact της Sandia η οποία υιοθετεί μια νέα προσέγγιση για τη μετάδοση ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ ενός σταθερού και ενός περιστρεφόμενου πλαισίου ή μεταξύ δύο περιστρεφόμενων συγκροτημάτων που έχουν διαφορετικές ταχύτητες και κατεύθυνση περιστροφής, ιδανική για εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες.



Σχήμα 5.5 *Τεχνολογία Twinstact της Sandia. (Πηγή: https://www.greencarcongress.com)*

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.5, η τεχνολογία Twistact περιλαμβάνει μια συσκευή επαφής καθαρού κυλίσματος που μεταδίδει ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ ενός σταθερού και ενός περιστρεφόμενου πλαισίου κατά μήκος μιας διαδρομής εξαιρετικά χαμηλής αντίστασης. Οι συσκευές Twistact επιτυγχάνουν αυτή τη γαλβανική σύνδεση καθαρής κύλισης - επαφής χρησιμοποιώντας έναν εύκαμπτο, ηλεκτρικά αγώγιμο ιμάντα και ένα αντίστοιχο σύνολο επικυκλικών κυλίνδρων. Η τεχνολογία αποδεικνύεται επωφελής για τη μείωση του κόστους, τη βελτίωση της βιωσιμότητας και τη μείωση της συντήρησης. Το Twistact έχει αποδειχθεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών ότι μπορεί να λειτουργήσει καθ' όλη τη διάρκεια των 30 ετών λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας πολλών MW χωρίς συντήρηση ή αντικατάσταση.

Η επαναχρησιμοποίηση είναι μια ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή, καθώς σε ιδανικές συνθήκες οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν διάρκεια ζωής έως και 300 χρόνια (Busch et al., 2014), αρκετά μεγαλύτερη από τη διάρκεια ζωής των κινητήρων έλξης και των ανεμογεννητριών. Πιθανές εναλλακτικές λύσεις στην ανακύκλωση μεμονωμένων στοιχείων είναι η επαναχρησιμοποίηση μόνιμων μαγνητών, η επανεπεξεργασία μόνιμων μαγνητών σε κράματα σπάνιων γαιών ή, γενικά, η ανακατασκευή κινητήρων και γεννητριών (Bobba et al., 2020).

Διάφορα έργα και νεοσύστατες επιχειρήσεις δημιουργούν πιλοτικές εφαρμογές για την κλιμάκωση των διαδικασιών ανακύκλωσης. Ωστόσο, τα έργα αυτά δεν είναι ακόμη αρκετά ώριμα ώστε να αναπτυχθούν ευρέως.

Στην ΕΕ, το πιο προηγμένο έργο στον τομέα αυτό φαίνεται να είναι το REE4EU. Το έργο χρηματοδοτήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος "Horizon 2020" με στόχο την ανάπτυξη μιας αποτελεσματικής και οικονομικά αποδοτικής μεθόδου για την ανακύκλωση σπάνιων γαιών για την παραγωγή μονίμων μαγνητών. Το έργο ολοκληρώθηκε με επιτυχία το φθινόπωρο του 2019 με μια επιτυχημένη πιλοτική εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα, φέρνοντας την τεχνολογία σε επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας 7 στα 9 (Ree4eu, 2019). Σε μια προσπάθεια να παρακάμψουν τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η SEM με έδρα το Aberdeenshire και ερευνητές από το Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου έχουν στραφεί στην εξόρυξη σπανίων γαιών από απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των παροπλισμένων ανεμογεννητριών. Εκτός της ΕΕ, οι μεγαλύτερες εξελίξεις παρατηρούνται στην Ιαπωνία, με τη Santoku να είναι η πιο δραστήρια εταιρεία στην ανακύκλωση νεοδυμίου και δυσπροσίου για χρήση σε μόνιμους μαγνήτες (Hitachi Metals, 2018). Ωστόσο, δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με την επιτυχή εφαρμογή της ανακύκλωσης.

Τέλος, τόσο στην ΕΕ όσο και αλλού δεν υπάρχει αποτελεσματικό σύστημα συλλογής και διαχωρισμού των προϊόντων που περιέχουν σπάνιες γαίες. Με εξαίρεση τους λαμπτήρες φθορισμού, οι σπάνιες γαίες από το τέλος του κύκλου ζωής τους είτε χρησιμοποιούνται ως χώροι υγειονομικής ταφής είτε ανακυκλώνονται μη λειτουργικά στη βιομηχανία χάλυβα και τσιμέντου (Bio Intelligence Service, 2015). Επομένως, είναι απίθανο η ανακύκλωση του

δυσπροσίου, του νεοδυμίου, του πρασεοδυμίου και του τερβίου από προϊόντα στο τέλος του κύκλου ζωής τους να συμβάλει σημαντικά στον εφοδιασμό τους κατά την επόμενη δεκαετία.

5.3. Εναέριες ανεμογεννήτριες

Η εναέρια ανεμογεννήτρια είναι μια σχεδιαστική ιδέα για μια ανεμογεννήτρια με δρομέα που στηρίζεται στον αέρα χωρίς πύργο, επωφελούμενη έτσι από την υψηλότερη ταχύτητα και διάρκεια του ανέμου σε μεγάλα υψόμετρα, αποφεύγοντας παράλληλα τα έξοδα κατασκευής πύργου. Για μια διπλάσια αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, αυτό σημαίνει οκταπλάσια ισχύ. Ένα εναέριο σύστημα μπορεί να φτάσει σε ύψος έως και 800 m, πολύ πάνω από την κορυφή των 200-300 m των ψηλότερων ανεμογεννητριών (Fagiano et al., 2022). Το θεωρητικό παγκόσμιο όριο της αιολικής ενέργειας σε μεγάλο υψόμετρο έχει υπολογιστεί ότι είναι περίπου 4,5 φορές μεγαλύτερο από αυτό που θα μπορούσε να συλλεχθεί στο επίπεδο του εδάφους. Επίσης, είναι σχετικά φθηνό και εύκολο να μεταφερθεί ένα πτερύγιο σε μια απομακρυσμένη τοποθεσία. Αυτά τα συστήματα έρχονται σε ένα εμπορευματοκιβώτιο και μπορούν να αποσταλούν οπουδήποτε υπάρχει δρόμος ή αποβάθρα. Το ύψος τους είναι προσαρμόσιμο, ώστε να μπορούν να μετακινηθούν προς τα πάνω ή προς τα κάτω, όπου φυσάει πιο δυνατά ο άνεμος, ο οποίος συχνά αλλάζει ανάλογα με τις εποχές (Fagiano et al., 2022).

Οι προκλήσεις περιλαμβάνουν την ασφαλή ανάρτηση και διατήρηση των ανεμογεννητριών σε ύψος εκατοντάδων m από το έδαφος σε ισχυρούς ανέμους και καταιγίδες, τη μεταφορά της συλλεγόμενης ή/και παραγόμενης ενέργειας πίσω στη γη και τις παρεμβολές με την αεροπορία.

Τα αεροδυναμικά συστήματα αιολικής ενέργειας αποτελούν αντικείμενο ερευνητικού ενδιαφέροντος τουλάχιστον από το 1980 (Fagiano et al., 2022). Έχουν υποβληθεί πολλές προτάσεις, αλλά δεν υπάρχουν εμπορικά προϊόντα. Μέχρι το 2022, έχουν βρεθεί σε τακτική λειτουργία λίγες εμπορικές εναέριες ανεμογεννήτριες.

Στην μια κατηγορία, η γεννήτρια βρίσκεται στον αέρα, και μια αεροδυναμική κατασκευή που μοιάζει με χαρταετό, προσδεμένη στο έδαφος, εξάγει αιολική ενέργεια στηρίζοντας την ανεμογεννήτρια. Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται μία εναέρια ανεμογεννήτρια της SkySails στο Klixbüll της Γερμανίας.

Σχήμα 5.6 *Μια εναέρια ανεμογεννήτρια Skysails στο Klixbüll της Γερμανίας. (Πηγή: https://e360.yale.edu/)*

Οι χαρταετοί παράγουν φθηνότερη ηλεκτρική ενέργεια από ό,τι πληρώνουν πολλές απομακρυσμένες περιοχές για γεννήτριες ντίζελ. Το σύστημά τους βασίζεται σε ένα πτερύγιο περίπου 150 m2, που μοιάζει με αλεξίπτωτο, που ταξιδεύει με τον άνεμο. Δεν υπάρχουν ανεμογεννήτριες στον αέρα, και το σχοινί δεν είναι ηλεκτρικό καλώδιο. Αντίθετα, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στο έδαφος, από το ρυμουλκό στο σχοινί μέσω του φρένου (Vermillion et al., 2021). Το λογισμικό πετάει τον χαρταετό αυτόνομα σε σχήμα οκτώ για να πετύχει την ισχυρότερη δυνατή έλξη για την παραγωγή ενέργειας. Στη συνέχεια, το σύστημα αλλάζει το μοτίβο πτήσης του φτερού, ώστε να μπορεί να τραβηχτεί με ελάχιστη αντίσταση, δαπανώντας λίγη ενέργεια για να τον τυλίξει πίσω. Αυτό το μοτίβο επαναλαμβάνεται, δημιουργώντας πολύ περισσότερη ενέργεια από όση καταναλώνει.

Τα πανιά είναι λιγότερο ενοχλητικά στον ορίζοντα από τις παραδοσιακές ανεμογεννήτριες, πιο αθόρυβα και πιο οικονομικά. Αλλά υπάρχουν προκλήσεις. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να σκοτώσουν ή να τραυματίσουν τα μεταναστευτικά πουλιά. Ο ιμάντας σε οποιοδήποτε τέτοιο σύστημα, θα μπορούσε θεωρητικά να συγκρουστεί με μη επανδρωμένα αεροσκάφη ή ακόμη και σε μικρά αεροσκάφη (Archer et al., 2014). Και αν σπάσει ο ιμάντας ή αποτύχει το σύστημα καθοδήγησης, μπορεί να συντριβεί στο έδαφος. Αυτό μπορεί να μην είναι μεγάλη υπόθεση για ένα μαλακό πτερύγιο, αλλά άλλες εταιρείες επιδιώκουν άκαμπτα πτερύγια που

μοιάζουν περισσότερο με ανεμόπτερο παρά με αλεξίπτωτο πλαγιάς. Αυτά μπορεί να είναι πιο αποδοτικά και να έχουν καλύτερο έλεγχο, αλλά οι συντριβές είναι ένα μεγαλύτερο ζήτημα (Archer et al., 2014).

Σε μια άλλη κατηγορία, οι γεννήτριες βρίσκονται στο έδαφος και μία ή περισσότερες αεροτομές ή αεροστάτες ασκούν δύναμη σε ένα σχοινί, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα σύστημα αιολικής ενέργειας τύπου αεροστάτη βασίζεται τουλάχιστον εν μέρει στην άνωση για τη στήριξη των στοιχείων συλλογής ανέμου. Οι αεροστάτες ποικίλλουν ως προς τα σχέδιά τους και την προκύπτουσα αναλογία ανύψωσης προς οπισθέλκουσα. Μπορούν να ενσωματωθούν για να διατηρούν τα συστήματα σε λειτουργία χωρίς αέρα, αλλά διαρρέουν αργά και πρέπει να εφοδιάζονται ξανά με αέριο ανύψωσης, ενδεχομένως και να επιδιορθώνονται. Τα πολύ μεγάλα, θερμαινόμενα από τον ήλιο αερόστατα μπορούν να λύσουν τα προβλήματα διαρροής ηλίου ή υδρογόνου.

Πολυάριθμες εταιρείες αναπτύσσουν τεχνολογίες, όπως μεγάλοι χαρταετοί, που μπορούν να συλλέγουν αιολική ενέργεια μέχρι και μισό μίλι πάνω από το έδαφος. Αν και βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο, η αιολική ενέργεια από αέρος θα μπορούσε δυνητικά να χρησιμοποιηθεί σε απομακρυσμένες τοποθεσίες ή να πετάξει από φορτηγίδες μακριά από την ακτή.

Μια εταιρεία με έδρα το Οντάριο που ονομάζεται Magenn, ανέπτυξε μια ανεμογεννήτρια που ονομαζόταν Magenn Air Rotor System (MARS). Το σύστημα MARS πλάτους 300 m θα χρησιμοποιούσε έναν οριζόντιο δρομέα σε μια αναρτημένη με ήλιο συσκευή, η οποία είναι συνδεδεμένη με έναν μετασχηματιστή στο έδαφος. Η Magenn ισχυρίζεται ότι η τεχνολογία της παρέχει υψηλή ροπή, χαμηλές ταχύτητες εκκίνησης και ανώτερη συνολική απόδοση χάρη στην ικανότητά της να αναπτύσσεται υψηλότερα σε σύγκριση με μη εναέριες λύσεις. Τα πρώτα πρωτότυπα κατασκευάστηκαν από την TCOM το 2008, αλλά δεν έχουν παραδοθεί μονάδες παραγωγής.

Με έδρα τη Βοστώνη, η Altaeros Energies χρησιμοποιεί ένα αερόστατο γεμάτο ήλιο για να σηκώσει μια ανεμογεννήτρια στον αέρα, μεταφέροντας την προκύπτουσα ενέργεια σε ένα σταθμό βάσης μέσω των ίδιων καλωδίων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του αερόστατου. Η κινητική ενέργεια μεταφέρεται σε μια γεννήτρια στο έδαφος μέσω σχοινιών σε κυκλική κίνηση.

Στον Μαυρίκιο, ξεκίνησε από τη γερμανική εταιρεία SkySails Power η κατασκευή εναέριας ανεμογεννήτριας, που αποτελεί το πρώτο πλήρως αυτόνομο εμπορικό σύστημα "εναέριας αιολικής ενέργειας" (AWE) στον κόσμο. Παρόλο που σε διάστημα 2 μηνών είχε αποδώσει λίγο κάτω από τον στόχο της των 100 kW, η SkySails ελπίζει ότι είναι ένα κομμάτι του μέλλοντος. Όμως ο Stephan Brabeck, ο επικεφαλής τεχνολογίας της SkySails, λέει ότι η ομάδα χρειάστηκε περίπου 7 χρόνια για να τελειοποιήσει το λογισμικό πτήσης, ιδίως για να

μπορεί το πτερύγιο να προσγειώνεται και να εκτοξεύεται με ασφάλεια αυτόνομα. Υπολογίζουν ότι το πτερύγιο θα πρέπει να προσγειώνεται περίπου 14 φορές το χρόνο λόγω έντονης βροχής, ακατάλληλων ανέμων ή καταιγίδων. Οι περιστασιακοί τυφώνες, τους οποίους ένα εναέριο σύστημα μπορεί να αντιμετωπίσει κρυμμένο στο έδαφος, είναι αυτό που καθιστά το νησί ακατάλληλο για τις παραδοσιακές ανεμογεννήτριες.

Δεκάδες εταιρείες και ακαδημαϊκά ιδρύματα διερευνούν τώρα μια πληθώρα αεροπορικών επιλογών. Αυτές κυμαίνονται από μαλακά φτερά που μετατρέπουν το τράβηγμα και την έλξη του σχοινιού του χαρταετού σε χρήσιμη ενέργεια, μέχρι πολύπλοκα άκαμπτα σκάφη που φέρουν ανεμογεννήτριες και γεννήτριες και μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια με ένα σχοινί (Fagiano & Schnez, 2017). Η τελευταία επιλογή θα παρήγαγε πιο σταθερή ενέργεια (χωρίς να χρειάζεται να γίνεται κύκλος μεταξύ παραγωγής ενέργειας και ενεργειακής δαπάνης), αλλά είναι δύσκολο να υλοποιηθεί. Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται τέτοιο έργο, με επικεφαλής την Makani Technologies, που ανέλαβε η Google το 2013 (Fagiano et al., 2022).

Σχήμα 5.7 *Ένα σκληρό φτερωτό drone Makani εξοπλισμένο με ανεμογεννήτριες.* (*Πηγή: https://e360.yale.edu/)*

Για το έργο στο Σχήμα 5.7 πραγματοποιήθηκαν κάποιες επιτυχημένες δοκιμές, αλλά τα οικονομικά αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά, και το 2020 εγκαταλείφτηκε. Πολλές άλλες εταιρείες έχουν ξεκινήσει τον αγώνα να συνεχίσουν από εκεί που σταμάτησε η Google ή να βρουν μια καλύτερη λύση. Αυτό περιλαμβάνει την εταιρεία με έδρα την Ολλανδία

Kitepower, η οποία έχει ένα έργο στην Καραϊβική, και η εταιρεία με έδρα τη Νορβηγία Kitemill, η οποία στοχεύει στην κατασκευή συστημάτων κλίμακας MW (Fagiano et al., 2022). Άλλοι σχεδιάζουν ακόμη και παρόμοια συστήματα που λειτουργούν με την ίδια αρχή, αλλά υποβρύχια αντί στον αέρα, χρησιμοποιώντας τα ωκεάνια ρεύματα αντί για τον άνεμο για να οδηγήσουν ένα υποβρύχιο ανεμόπτερο σε σχήμα οκτώ. Η SkySails σχεδιάζει να δοκιμάσει την ιδέα ενός εναέριου αιολικού πάρκου στις μεσοδυτικές πολιτείες της Αμερικής πριν μετακινηθεί προς την ανοικτή θάλασσα.

Καθώς η εμπορική δραστηριότητα αυξάνεται, ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια είναι το ρυθμιστικό. Οι κανόνες του εναέριου χώρου δεν έχουν σχεδιαστεί για να φιλοξενήσουν αυτά τα φτερά, καθιστώντας δύσκολο για τις εταιρείες να συγκεντρώσουν χρήματα. Αν τα εναέρια αιολικά συστήματα αρχίσουν να παράγονται μαζικά, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι θα παράγουν προσιτή ενέργεια (Fagiano et al., 2022).

Η αερομεταφερόμενη ενέργεια δεν πρόκειται να αντικαταστήσει τη συμβατική αιολική ενέργεια, αλλά οι υποστηρικτές της οραματίζονται αιολικά πάρκα που φιλοξενούν εκατοντάδες χαρταετούς που επιπλέουν σε φορτηγίδες σε βαθιά νερά πολύ μακριά από την ακτή, ενώ μεμονωμένα πτερύγια θα μπορούσαν να ξεδιπλωθούν για να βοηθήσουν στην τροφοδοσία απομακρυσμένων νησιών, προσωρινών στρατιωτικών εγκαταστάσεων ή επιχειρήσεων εξόρυξης στα βουνά.

5.4. Ξύλο αντί για χάλυβα

Η ιδέα είναι να βελτιωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ανεμογεννητριών με τη χρήση ξύλου ως ανανεώσιμου πόρου. Εξάλλου, οι ανεμογεννήτριες μπορεί να παράγουν πράσινη ηλεκτρική ενέργεια, αλλά η παραγωγή του χάλυβα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους εκπέμπει μεγάλες ποσότητες CO_2. Ανάλογα με την τεχνική παραγωγής, για κάθε μετρικό τόνο παραγόμενου χάλυβα εκπέμπονται έως και 1,8 t CO_2 (IG Metall). Το μακράν μεγαλύτερο ποσοστό του χάλυβα χρησιμοποιείται για τον πύργο, το μεγαλύτερο και βαρύτερο τμήμα κάθε ανεμογεννήτριας.

Παρ' όλα αυτά, η αιολική ενέργεια θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην πορεία προς τη δημιουργία ενός πιο βιώσιμου συστήματος ενεργειακού εφοδιασμού καθώς θα γίνει η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας στην ΕΕ ήδη από το 2027. Οι ξύλινοι πύργοι ανεμογεννητριών θα μπορούσαν έτσι να επιταχύνουν την ενεργειακή μετάβαση, καθώς θα εξαλείψουν τις σχετικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την παραγωγή χάλυβα και το CO_2 που δεσμεύεται στο ξύλο θα αποθηκεύεται στη δομή για πολλά χρόνια (Steen et al., 2019). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δέντρα απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα όταν είναι ζωντανά και, όταν κόβονται, ο άνθρακας αποθηκεύεται στο ξύλο. Όσο το ξύλο δεν καταλήγει να σαπίσει ή να καεί, ο άνθρακας δεν απελευθερώνεται.

Ο διευθύνων σύμβουλος της Modvion (χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές για την κατασκευή ανεμογεννητριών με έδρα τη Σουηδία), Otto Lundman εξηγεί ότι η ξυλεία, όταν χρησιμοποιείται ως οικοδομικό υλικό, προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα εκτός από το θετικό κλιματικό της αποτύπωμα. Ισχυρίζεται ότι το σύνθετο ξύλο είναι κατά 55% ισχυρότερο από τον χάλυβα και χάρη στην αρθρωτή δομή, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν ψηλότερα. Κάθε μεγάλος ξύλινος πύργος θα εξοικονομούσε περίπου 2.000 μετρικούς τόνους CO_2 σε σύγκριση με τον χάλυβα κατά την παραγωγή.

Η Modvion, κατασκεύασε το 2023 τον ψηλότερο ξύλινο πύργο ανεμογεννήτριας στον κόσμο, με ύψος 150 m μέχρι την άκρη του υψηλότερου πτερυγίου. Η γεννήτρια των 2 MW στην κορυφή έχει αρχίσει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στο σουηδικό δίκτυο, παρέχοντας ρεύμα για περίπου 400 σπίτια. Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η ανεμογεννήτρια αυτή.

Σχήμα 5.8 *Ξύλινη ανεμογεννήτρια της Modvion στη Σουηδία. (Πηγή:https://www.bbc.com/)*

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.8, εξωτερικά υπάρχει μικρή προφανής διαφορά μεταξύ της ξύλινης ανεμογεννήτριας της Modvion και των χαλύβδινων. Και οι δύο έχουν μια παχιά λευκή επίστρωση για την προστασία τους από τα στοιχεία της φύσης και πτερύγια κατασκευασμένα κυρίως από υαλοβάμβακα που συνδέονται με μια γεννήτρια, η οποία

παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν περιστρέφεται. Εσωτερικά του πύργου γίνεται σαφής η διαφορά, καθώς οι τοίχοι έχουν ένα καμπυλωτό φινίρισμα από ακατέργαστο ξύλο.

Η αντοχή του πύργου των 105 m προέρχεται από τα 144 στρώματα πλαστικοποιημένης ξυλείας καπλαμά (LVL) που αποτελούν τα παχιά τοιχώματά του. Μεταβάλλοντας τον κόκκο κάθε στρώματος ερυθρελάτης πάχους 3 mm, η Modvion ισχυρίζεται ότι κατάφερε να ελέγξει την αντοχή και την ευελιξία του τοιχώματος.

Στο εργοστάσιο του Γκέτεμπεργκ, τα λεπτά στρώματα ξύλου συγκολλούνται και συμπιέζονται μεταξύ τους για να κατασκευαστούν τα καμπύλα τμήματα. Αυτά τα κομμάτια μεταφέρονται στη συνέχεια στο χώρο, συγκολλούνται μεταξύ τους σε κυλίνδρους και στη συνέχεια στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο για να φτιάξουν τον πύργο. Οι Lundman και Olivegren ισχυρίζονται ότι το μεγάλο πλεονέκτημα της ανεμογεννήτριας τους είναι ότι, με τη χρήση ξύλου και κόλλας, οι πύργοι μπορούν να κατασκευαστούν σε μικρότερες, πιο εύκολα μεταφερόμενες μονάδες. Αυτό θα διευκολύνει πολύ την κατασκευή πραγματικά ψηλών πύργων και τη μεταφορά των κομματιών σε δύσκολες τοποθεσίες.

Ωστόσο, ο Δρ. Maximilian Schnippering, επικεφαλής του τμήματος βιωσιμότητας της Siemens Gamesa, αναφέρει ότι περισσότερα τμήματα είναι πιθανό να σημαίνουν περισσότερα φορτηγά, περισσότερους ανθρώπους και περισσότερο χρόνο για την ολοκλήρωση της εγκατάστασης. Θεωρεί το αρθρωτό σύστημα "πλεονέκτημα" και ότι οι ξύλινοι πύργοι μπορούν να "συμπληρώσουν όμορφα" τους χαλύβδινους πύργους.

Στο εσωτερικό του πύργου Modvion, οι ξύλινες μονάδες έχουν στοιβαχτεί η μία πάνω στην άλλη και συγκρατούνται από χαλύβδινα εξαρτήματα που στη συνέχεια συγκολλούνται στη θέση τους. Η βιομηχανία επιθυμεί να κατασκευάσει ανεμογεννήτριες με ύψος κορυφής πτερυγίων 300 m, πράγμα που σημαίνει πύργο ύψους 200 m ή και περισσότερο, κάτι που λόγω της αρθρότητας είναι εφικτό. Περίπου 200 δέντρα ερυθρελάτης μπήκαν στον πύργο της ανεμογεννήτριας της Modvion, το ίδιο είδος που χρησιμοποιείται για χριστουγεννιάτικα δέντρα, και η εταιρεία ισχυρίζεται ότι καλλιεργούνται με βιώσιμο τρόπο, δηλαδή όταν συγκομίζονται φυτεύονται περισσότερα.

Η Modvion ελπίζει να κατασκευάσει σύντομα άλλη μια ακόμη ψηλότερη ανεμογεννήτρια και, αν όλα πάνε καλά, θα ανοίξει μια εγκατάσταση που θα παράγει 100 ξύλινες σπονδυλωτές ανεμογεννήτριες ετησίως το 2027. Η φιλοδοξία της είναι σε 10 χρόνια το 10% των ανεμογεννητριών που ανεγείρονται να είναι ξύλινες.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση σε ενεργειακά αποθέματα οδηγεί αναπόφευκτα στην αύξηση μεγέθους των ανεμογεννητριών, την απαίτηση εύρεσης εναλλακτικών λύσεων, καθώς και στην ανάγκη μετρίασης του κόστους κατασκευής και λειτουργίας. Παρόλο που βρίσκεται σε καλό δρόμο, η αιολική ενέργεια θα πρέπει να προσαρμοστεί στις γιγάντιες απαιτήσεις που επέρχονται. Η μεγάλη πρόκληση έγκειται στην κατανόηση της διαδικασίας κατασκευής μίας ανεμογεννήτριας, από την διεξοδική μελέτη της περιοχής βέλτιστης τοποθέτησής της, μέχρι και την ανάλυση των επιμέρους υλικών που χρησιμοποιούνται σε κάθε στάδιο της κατασκευής, και της επίδρασής τους στο τελικό κόστος.

Αρχικά, είναι επιτακτική ανάγκη να συμβιβαστεί η παγκόσμια κοινότητα αιολικής ενέργειας με το γεγονός ότι η αύξηση της ονομαστικής ισχύος μίας ανεμογεννήτριας επιφέρει μείωση κόστους, οπότε θα πρέπει διαρκώς να επιδιώκεται. Αυτό ξεκινάει με την μέτρηση της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου στα μεγάλα υψόμετρα στα οποία προορίζεται η τοποθέτηση πλήμνης της ανεμογεννήτριας. Για αυτήν την μέτρηση θα πρέπει να διερευνηθούν οι κινητές μέθοδοι ανίχνευσης και εμβέλειας φωτός (LIDAR) και ηχητικής ανίχνευσης και εμβέλειας (SODAR) σε συνδυασμό με μοντέλα κατανομής ταχύτητας καθ' ύψος, έναντι των παραδοσιακών τρόπων μέτρησης. Ωστόσο, θα πρέπει να ανακαλυφτεί τρόπος να ανιχνεύεται αποτελεσματικότερα η ένταση των στροβιλισμών του ανέμου, πράγμα που επηρεάζει την εγκυρότητα των μετρήσεων σε μεγάλο βαθμό. Επιπλέον, θα πρέπει να αναβαθμιστούν οι διαδικασίες προληπτικής συντήρησης κατά την περίοδο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, ώστε να προβλέπονται και αντιμετωπίζονται οι εμφανιζόμενες βλάβες.

Όσον αφορά την δομή της ανεμογεννήτριας, είναι σίγουρα σημαντικό να βελτιωθεί η ανάλυση, ο σχεδιασμός και η οργάνωση της εφοδιαστικής αλυσίδας των βασικών υλικών των εξαρτημάτων της. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να βελτιωθεί η αεροδυναμική και οι μέθοδοι κατασκευής των πτερυγίων (3D printing), των γεννητριών και του συστήματος μετάδοσης κίνησης. Επίσης, η χρήση σκυροδέματος στην κατασκευή πύργων είναι πιο οικονομική από τον χάλυβα και επιτρέπει μεγαλύτερο ύψος, που συνεπάγεται αύξηση ονομαστικής ισχύος σε περιοχές με χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

Σχετικά με τις πιο αντισυμβατικές προτάσεις διασφάλισης ενός μακροχρόνιου μέλλοντος για τις ανεμογεννήτριες, επιβάλλεται να χρηματοδοτηθεί η περαιτέρω έρευνα για χρήση

ανακυκλωμένων υλικών στην παραγωγή ανεμογεννητριών, αφού αρκετά από τα υλικά όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός, οι σπάνιες γαίες, ο υαλοβάμβακας, το σκυρόδεμα έχουν τη δυνατότητα, να επαναχρησιμοποιηθούν. Περαιτέρω, οι σπάνιες γαίες που χρησιμοποιούνται ως μόνιμοι μαγνήτες στις γεννήτριες ίσως εμφανίσουν πρόβλημα εφοδιασμού στο κοντινό μέλλον, και είναι ανάγκη να βρεθούν εναλλακτικές τους, ή να παραχθούν κίνητρα για την ασφαλή, ευρύτερη εξόρυξή τους. Τέλος, η χρήση ξυλείας στον πύργο της ανεμογεννήτριας είναι μία ενδιαφέρουσα καινοτομία η οποία πρέπει να μελετηθεί και εφαρμοστεί περισσότερο, ενώ για μικρότερες ενεργειακές ανάγκες είναι ελκυστική η χρήση εναέριων ανεμογεννητριών που περιορίζουν κατά πολύ το κόστος.

Τέλος, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εάν υλοποιηθούν οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες προτάσεις, η αιολική ενέργεια να καταστεί, στο πλαίσιο της πράσινης μετάβασης του πλανήτη, μία από τις βασικές πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Δημοσιεύσεις - Μελέτες

Alves Dias, P., Bobba, S., Carrara, S., & Plazzotta, B., The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility. *European Commission: Luxembourg*, 2020.

Ancona, D., & McVeigh, J., Wind turbine-materials and manufacturing fact sheet. *Princeton Energy Resources International, LLC*, *19*, 2001.

Archer, C. L., Delle Monache, L., & Rife, D. L., Airborne wind energy: Optimal locations and variability. *Renewable Energy*, *64*, 180-186, (2014).

Arias, F., Assessment of present/future decommissioned wind blade fiber-reinforced composite material in the United States. *Independent Study, Dept. of Civil Engineering, City College of New York, United States*, 2016.

Ashuri, T., Zaaijer, M. B., Martins, J. R., & Zhang, J., Multidisciplinary design optimization of large wind turbines—Technical, economic, and design challenges. *Energy Conversion and Management*, *123*, 56-70, 2016.

Barakos, G., Mischo, H., & Gutzmer, J., How potential mines can connect to the global REE market. *Min Eng*, *70*(8), 30-37, 2018.

Blanco M. I., The economics of wind energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issues 6–7, Pages 1372-1382, ISSN 1364-0321, 2009. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.004.

BNEF, EU commission, GPG internal

Bošnjaković, M., Katinić, M., Santa, R., & Marić, D. Wind turbine technology trends. *Applied Sciences*, *12*(17), 8653, 2022.

Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E., *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, 2011.

Busch, J., Steinberger, J. K., Dawson, D. A., Purnell, P., & Roelich, K., Managing critical materials with a technology-specific stocks and flows model. *Environmental science & technology*, *48*(2), 1298-1305., 2014.

Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., & Pavel, C., Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, 2020. *doi*, *10*, 160859.

Cembalest, M., The ARC and the Covenants, 2.0: An Update on the Long-term Credit Risk of US States. *Eye on the Market*, 2016.

Champagnie, B., Altenor, G., & Simonis, A., Highway Wind Turbines. *A BS THESIS. florida: florida*

international university, 2013.

De la Fuente, A., Armengou, J., Pons, O., & Aguado, A., Multi-criteria decision-making model for assessing the sustainability index of wind-turbine support systems: Application to a new precast concrete alternative. *Journal of Civil Engineering and Management*, *23*(2), 194-203, 2017.

Fagiano, L., & Schnez, S., On the take-off of airborne wind energy systems based on rigid wings. *Renewable energy*, *107*, 473-488, 2017.

Fagiano, L., Quack, M., Bauer, F., Carnel, L., & Oland, E., Autonomous airborne wind energy systems: accomplishments and challenges. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, *5*, 603-631, 2022.

Gipe, P., & Möllerström, E., An overview of the history of wind turbine development: Part I—The early wind turbines until the 1960s. *Wind Engineering*, *46*(6), 1973-2004, 2022.

Gonzalez-Rodriguez, A. G., Review of offshore wind farm cost components. *Energy for Sustainable Development*, *37*, 10-19, 2017.

Harte, R., & Van Zijl, G. P., Structural stability of concrete wind turbines and solar chimney towers exposed to dynamic wind action. *Journal of Wind engineering and industrial aerodynamics*, *95*(9-11), 1079-1096, 2007.

Jin, Q., & Li, V. C., Structural and durability assessment of ECC/concrete dual-layer system for tall wind turbine towers. *Engineering Structures*, *196*, 109338, 2019.

Kaiser, M. J., & Snyder, B., Offshore wind energy installation and decommissioning cost estimation in the US outer continental shelf. *US Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement, Herndon, VA TA&R*, *648*, 2010.

Kelly, M., & Jørgensen, H. E. Statistical characterization of roughness uncertainty and impact on wind resource estimation. *Wind Energy Science*, *2*(1), 189-209, 2017.

Lantz, E., Roberts, O., & Dykes, K., Trends, Opportunities, and Challenges for Tall Wind Turbine and Tower Technologies, 2017.

Lemming, J., Morthorst, P. E., Hansen, L. H., Andersen, P. D., & Jensen, P. H., O&M costs and economical life-time of wind turbines. In *1999 European Wind Energy Conference* (pp. 387-390). Routledge, 2014.

Liu, J., Song, D., Li, Q., Yang, J., Hu, Y., Fang, F., Joo, Y. H., Life cycle cost modelling and economic analysis of wind power: A state of art review, *Energy Conversion and Management. 277. 116628*. 10.1016/j.enconman.2022.116628, 2023.

Lucas, J., Lucas, P., Le Mercier, T., Rollat, A., & Davenport, W. G., *Rare earths: science, technology, production and use*. Elsevier, 2014.

McKenna R., v.d Leye, P., O., Fichtner, W., Key challenges and prospects for large wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 53, pp. 1212-1221, ISSN 1364-0321, 2016. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.080.

Milan, P., Wächter, M., Barth, S., & Peinke, J., Power curves for wind turbines. *Wind. Power Gener. Wind. Turbine Des*, *44*, 595-612, 2010.

Mishnaevsky L, Branner K, Petersen HN, Beauson J, McGugan M, Sørensen BF. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials*; 10(11):1285, 2017. https://doi.org/10.3390/ma10111285

Olabi, A. G., Wilberforce, T., Elsaid, K., Sayed, E. T., Salameh, T., Abdelkareem, M. A., & Baroutaji, A. A review on failure modes of wind turbine components. *Energies*, *14*(17), 5241, 2021.

Ong, C. H., & Tsai, S. W. *The use of carbon fibers in wind turbine blade design: a SERI-8 blade example* (No. SAND2000-0478). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States); Sandia National Lab.(S NL-CA), Livermore, CA (United States), 2000.

Oxford Analytica, Energy transition will propel the'niche'boron market. *Emerald Expert Briefings*, (oxan-db), 2023.

Paredes, J. A., Barbat, A. H., & Oller, S., A compression–tension concrete damage model, applied to a wind turbine reinforced concrete tower. *Engineering Structures*, *33*(12), 3559-3569, 2011.

Pathak, A. K., Khan, M., Gschneidner Jr, K. A., McCallum, R. W., Zhou, L., Sun, K., & Pecharsky, V. K., Cerium: an unlikely replacement of dysprosium in high performance Nd–Fe–B permanent magnets. *Advanced Materials*, *27*(16), 2663-2667, 2015.

Pavel C.C., Lacal-Arántegui Roberto, Marmier A., Schüler D., Tzimas E., Buchert M., Jenseit W., Blagoeva D., Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines, *Resources Policy*, Volume 52, Pages 349-357, ISSN 0301-4207, 2017. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.04.010.

Rabe, W., Kostka, G., & Stegen, K. S., China's supply of critical raw materials: Risks for Europe's solar and wind industries?, *Energy Policy*, *101*, 692-699, 2017.

Reimer, M. V., Schenk-Mathes, H. Y., Hoffmann, M. F., & Elwert, T., Recycling decisions in 2020, 2030, and 2040—when can substantial NdFeB extraction be expected in the EU?. *Metals*, *8*(11), 867, 2018.

Saidur, R., Rahim, N. A., Islam, M. R., & Solangi, K. H., Environmental impact of wind energy. *Renewable and sustainable energy reviews*, *15*(5), 2423-2430, 2011.

Schreck, S., Simms, D., & Wright, A. Michael Robinson, Wind energy. *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability*, 396, 2011.

Seaman, J., Rare earths and China. *A review of changing criticality in the new economy*, 2019.

Shahan, Z., History of wind turbines. *Renewable energy world*, *21*, 2014.

Slengesol, I., De Miranda, W. P., Birch, N., Liebst, J., & van der Herm, A., Offshore wind experiences: a bottom-up review of 16 projects. *Tec Rep, OceanWind*, 2010.

Smil, V., What I see when I see a wind turbine [Numbers Don't Lie]. *IEEE Spectrum*, *53*(3), 27-27, 2016.

Sohoni V., S. C. Gupta, R. K. Nema, A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems, *Journal of Energy*, vol. 2016, Article ID 8519785, 18 pp., 2016. https://doi.org/10.1155/2016/8519785

Sritharan, S., Wind Turbine Towers: Precast concrete Hexcrete may help increase renewable energy capacity with taller hub height, 2015.

Steen, P., Landel, P., Dölerud, E., & Lundman, O., Structural design methods for tall timber towers with large wind turbine. *CompWood*, 27-27, 2019.

Teyabeen A. A., Akkari F. R. & Jwaid A. E., Power Curve Modelling for Wind Turbines, *2017 UKSim-AMSS 19th International Conference on Computer Modelling & Simulation (UKSim), Cambridge, UK*, pp. 179-184, 2017. doi: 10.1109/UKSim.2017.30.

The renewable energy books, ENEL Green Power, 2011.

Tong, W., Wind power generation and wind turbine design. *WIT press*, 2010.

Tormo Soler, E. *AEP based on rotor equivalent wind speed measured from a floating LiDAR* (Master's thesis, NTNU), 2017.

Veers, P., Bottasso, C. L., Manuel, L., Naughton, J., Pao, L., Paquette, J., Robertson, A., Robinson, M., Ananthan, S., Barlas, T., Bianchini, A., Bredmose, H., Horcas, S. G., Keller, J., Madsen, H. A., Manwell, J., Moriarty, P., Nolet, S., and Rinker, J., Grand challenges in the design, manufacture, and operation of future wind turbine systems, *Wind Energ. Sci.*, *8*, 1071–1131, 2023. https://doi.org/10.5194/wes-8-1071-2023

Veers, P., Dykes, K., Lantz, E., Barth, S., Bottasso, C. L., Carlson, O., & Wiser, R. Grand challenges in the science of wind energy. *Science*, *366*(6464), eaau2027, 2019.

Verma S, Paul AR, Haque N., Assessment of Materials and Rare Earth Metals Demand for Sustainable Wind Energy Growth in India. *Minerals*; 12(5):647, 2022. https://doi.org/10.3390/min12050647

Vermillion, C., Cobb, M., Fagiano, L., Leuthold, R., Diehl, M., Smith, R. S., & Demetriou, M., Electricity in the air: Insights from two decades of advanced control research and experimental flight testing of airborne wind energy systems. *Annual Reviews in Control*, *52*, 330-357, 2021.

von der Haar, C., & Marx, S., Design aspects of concrete towers for wind turbines. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, *57*(4), 30-37, 2015.

Wang, S., Wang, S., & Liu, J., Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, *210*, 804-810, 2019.

Werapun, W., Tirawanichakul, Y., & Waewsak, J., Wind shear coefficients and their effect on energy production. *Energy Procedia*, *138*, 1061-1066, 2017.

Westwood, D., Offshore wind assessment for Norway. *Oslo: The Research Council of Norway. North Sea Energy*, 2010.

Winkler, T., & EcoSwing Consortium, The ecoswing project. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 502, No. 1, p. 012004). IOP Publishing, 2019.

Zhang, L., Wind Energy Development: History and Current Status. In *Wind, Water and Fire: The Other Renewable Energy Resources* (pp. 1-6), 2021.

Zoumakis, N. M., The dependence of the power-law exponent on surface roughness and stability in a neutrally and stably stratified surface boundary layer. *Atmosfera*, *6*(1), 1993.

Κουτσογιάννης, Δ., & Ξανθόπουλος, Θ. Τεχνική Υδρολογία Έκδοση 3. *Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων*, 1999.

Μαμάσης, Ν. & Στεφανάκος, Ι., Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία. *Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ, Αθήνα*, 2010.

Ιστοσελίδες

https://www.trvst.world/renewable-energy/the-history-of-wind-energy/

https://www.renewableenergyworld.com/storage/grid-scale/history-of-wind-turbines/

https://windeurope.org/about-wind/history/

https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/china-s-increasingly-cheap-wind-turbines-could-open-new-markets-72152297

https://www.energy.gov/eere/wind/history-us-wind-energy

https://www.ge.com/

https://www.rjpotteigerinc.com/blog/using-concrete-for-wind-turbines/

https://ir.nordex-online.com/websites/Nordex/English/4500/news-details.html?newsID=2666151

https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/66861.pdf

https://www.globaldata.com/

https://www.energymonitor.ai/analysis/

http://www.lme.co.uk/

https://www.bgs.ac.uk/download/bgs-annual-report-2020-21/

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf

https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/

https://www.gordian.com/resources/structural-steel-costs/

https://jactio.com/en/the-cost-of-structural-steel-per-kg/

https://ec.europa.eu/eurostat

https://www.statista.com/statistics/270277/mining-of-rare-earths-by-country/

https://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Offshore_Report_2009.pdf

https://www.ukessays.com/essays/construction/concrete-wind-turbine-tower-construction.php

www.elektronikpraxis.vogel.de

https://renews.biz/87561/scottish-project-to-extract-rare-metals-from-wind-turbines/

https://ree4eu.eu/

https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data-providers-and-partners/bio-intelligence

https://cleantechnica.com/2019/04/08/scientists-propose-alternatives-to-rare-earth-elements-critical-for-wind-turbines/

https://drivesncontrols.com/news/fullstory.php/aid/7096/Rare-earth-free_15MW_generator__91eliminates_risks_92.html

https://grist.org/energy/offshore-wind-turbines-need-rare-earth-metals-will-there-be-enough-to-go-around/

https://www.en-former.com/en/wood-instead-of-steel-wind-turbine-tower-field-trial/

https://www.igmetall.de/ueber-uns/ig-metall--a-strong-community

https://www.bbc.com/news/science-environment-67718719

https://e360.yale.edu/features/after-a-shaky-start-airborne-wind-energy-is-slowly-taking-off

https://en.wikipedia.org/wiki/Airborne_wind_turbine

https://www.greencarcongress.com/2022/09/20220912-sandia.html

https://www.focus-economics.com/commodities/base-metals/steel-europe/

https://www.indexbox.io/blog/france-glass-fibre-and-article-price-per-ton-in-july-2022/

https://gwec.net/wp-content/uploads/2023/03/GWR-2023_interactive.pdf