

ΒΑΣΙΛΗΣ ΤΖΟΥΝΑΚΟΣ

Ανάλυση κύκλου ζωής  
τεχνολογιών αιολικής ενέργειας  
στην Ελλάδα με έμφαση στη  
διαχείριση του τέλους ζωής

Τομέας: Θερμότητας

Επιβλέπων: Μαρία Φούντη, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα 2021



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

VASILIS TZOUNAKOS

Life Cycle Assessment of wind  
energy technologies in Greece -  
focus on end of life management



SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

Section: Thermal Engineering

Supervisor: Maria Founti, Professor NTUA

Athens 2021

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

**Βασίλης Τζουνάκος**

Contents	
1	Περίληψη ..... 3
2	Abstract ..... 4
3	Εισαγωγή..... 1
3.1	Η ανάγκη για καθαρότερες πρωτογενείς πηγές ενέργειας..... 1
3.2	Σκοπός εργασίας ..... 4
4	Αιολική ενέργεια - επισκόπηση ..... 5
4.1	Παγκόσμια και Ευρωπαϊκή προοπτική ..... 5
4.2	Αύξηση αιολικής ενέργειας -οδηγοί και εμπόδια ..... 6
5	Τεχνολογίες αιολικής ενέργειας ..... 12
5.1	Τύποι ανεμογεννητριών – γενικά στοιχεία..... 12
5.2	Μέρη ανεμογεννήτριας ..... 14
5.2.1	Βάση ανεμογεννήτριας..... 15
5.2.2	Πύργος ανεμογεννήτριας..... 18
5.2.3	Κουβούκλιο ..... 18
5.2.4	Ρότορας..... 20
6	Υλικά κατασκευής -έμφαση στα πτερυγία ..... 22
6.1	Σύνθετα υλικά πτερυγίων ..... 23
6.1.1	Ίνες..... 25
6.1.2	Μήτρες ..... 27
6.1.3	Επιφανειακή επεξεργασία ..... 29
7	Διαχείριση τέλους ζωής ανεμογεννητριών..... 32
7.1	Διαχείριση πτερυγίων στο τέλος ζωής..... 33
7.1.1	Λύσεις σε βιομηχανική κλίμακα ..... 37
7.1.2	Περιστασιακές Λύσεις..... 39
7.1.3	Λύσεις σε ερευνητικό στάδιο ..... 40
7.2	Αποκατάσταση (Repowering) ..... 44
7.3	Θεσμικό πλαίσιο για την αφαίρεση και διαχείριση ..... 44
8	Κύκλος ζωής και η αξιολόγησή του ..... 46
8.1	Κύκλος ζωής ..... 46
8.1.1	Πεδίο ..... 46
8.1.2	Ανάντη ..... 48
8.1.3	Κατάντη ..... 49
8.2	Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής ..... 50
8.2.1	Ορισμός ορίων συστήματος ..... 50
8.2.2	Δεδομένα προς ανάλυση ..... 51
8.2.3	Αποτελέσματα..... 52
9	Τρέχουσα κατάσταση στην Ελλάδα..... 55
9.1	Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα ..... 56
9.1.1	Εγκαταστάσεις..... 57
9.2	Ποσότητα πτερυγίων προς διαχείριση ..... 58
10	Επίλογος..... 59
11	Βιβλιογραφία ..... 60

## 1 Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει πρόθεση να δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα του κύκλου ζωής των τεχνολογιών αιολικής ενέργειας μέσα από ανασκόπηση σχετικής βιβλιογραφίας. Συγκεκριμένα

- 1) Γίνεται αναφορά στην ανάγκη για καθαρότερες μορφές ενέργειας, στην παγκόσμια κι ευρωπαϊκή προοπτική για την αιολική ενέργεια με έμφαση στα κίνητρα και τα εμπόδια για την ανάπτυξή της.
- 2) Καταγράφονται οι τεχνολογίες αιολικής ενέργειας, τόσο ως προς τους τύπους των ανεμογεννητριών όσο και προς τα επιμέρους μέρη της ανεμογεννήτριας
- 3) Αναλύονται περαιτέρω τα υλικά κατασκευής και πιο εκτεταμένα τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα πτερύγια σήμερα καθώς και οι μελλοντικές τάσεις αυτών. Η ιδιαίτερη αναφορά οφείλεται στο ότι τα πτερύγια είναι το μέρος της ανεμογεννήτριας με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα όσον αφορά την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση.
- 4) Παρουσιάζονται οι εναλλακτικές για τη διαχείριση του τέλους ζωής των ανεμογεννητριών και πάλι με έμφαση στα πτερύγια και με αναφορά στις σχετικές λύσεις σε βιομηχανικό, περιστασιακό και ερευνητικό επίπεδο.
- 5) Παρουσιάζεται ο κύκλος ζωής και η αξιολόγηση του για όλες τις διεργασίες από την εξόρυξη των υλικών μέχρι και την τελική τους απόρριψη. Ο Κύκλος ζωής αφορά τόσο χερσαία όσο και υπεράκτια αιολικά πάρκα.
- 6) Γίνεται αναφορά στο Ευρωπαϊκό και το Ελληνικό πλαίσιο για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, καθώς και μια σύντομη αποτίμηση της τρέχουσας κατάστασης στην Ελλάδα.

Συμπερασματικά η ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας, ρίχνει φως στην πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, της παραγωγής και της διαχείρισης των τεχνολογιών αιολικής ενέργειας. Αναδεικνύει ως εκ τούτου την ανάγκη για ολιστικές προσεγγίσεις ως προς την περαιτέρω ανάπτυξή τους

**Λέξεις Κλειδιά:** <<Αιολική Ενέργεια, Ανεμογεννήτριες, Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής, Βιβλιογραφική Ανασκόπηση>>

## 2 Abstract

The present dissertation intends to give a robust picture of the life cycle of wind energy technologies through a review of relevant scientific literature. Specifically

- 1) Reference is made to the need for cleaner forms of energy and to the global and European perspective for wind energy with emphasis on the incentives and obstacles to its development.
- 2) The wind energy technologies are recorded, both in terms of the types of wind turbines and in terms of the individual components of the wind turbine.
- 3) The raw materials used for the production of the wind turbine components are presented. Special attention is put on the blades since they are the part of the wind turbine with the greatest uncertainty regarding the end of life treatment.
- 4) The alternatives for end-of-life management of wind turbines are presented. Again emphasis is put on the blades and with reference to the relevant solutions at the industrial, occasional and research level.
- 5) The life cycle of wind power plants and its assessment is presented. The assessment includes all processes from raw material extraction to their final disposal at the end of life. The Life Cycle concerns both onshore and offshore wind farms.
- 6) Reference is made to the European and Greek framework for the development of wind energy.

In conclusion, the analysis of the relevant literature sheds light on the complexity of the design, production and management of wind energy technologies, which highlights the need for holistic approaches for the further development of wind energy

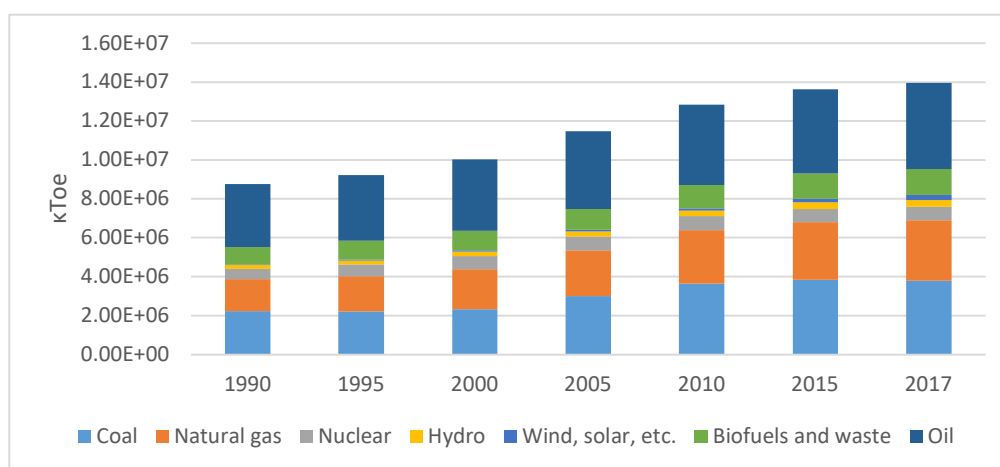
**Keywords:** << Wind Energy, Wind Turbines, Life Cycle Assessment, Literature Review >>

## 3 Εισαγωγή

### 3.1 Η ανάγκη για καθαρότερες πρωτογενείς πηγές ενέργειας

Η αξιοποίηση φυσικών πόρων για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της εξέλιξης των ανθρώπινων κοινωνιών. Αυτές οι ανάγκες δε, είναι συνεχώς αυξανόμενες με επιταχυνόμενο ρυθμό. Ενδεικτικά, συγκρίνοντας με την προβιομηχανική εποχή, ο ανθρώπινος πληθυσμός έχει σχεδόν τετραπλασιαστεί (από 1.6 σε 7 δισεκατομμύρια) ενώ και η κατανάλωση ενέργειας κατά άτομο έχει προσεγγιστικά πενταπλασιαστεί (από 0.4 toe σε 1.8 toe) (Belyaev et al. 2002; EIA 2011).

Ως προς τις πηγές πρωτογενούς ενέργειας, έχουν επίσης εξελιχθεί με το χρόνο χάρη στην επιστήμη της μηχανικής. Στην αξιοποίηση της βιομάζας, (κυρίως το ξύλο) που χρησιμοποιούνταν για καύση 4-500.000 χρόνια πριν, προστέθηκε η αξιοποίηση της δύναμης του νερού (νερόμυλος) και του ανέμου (ανεμόμυλος). Τα τεχνολογικά άλματα της βιομηχανικής εποχής άνοιξαν το δρόμο για περαιτέρω μετατροπή και συλλογή ενέργειας. Με την ανακάλυψη της ατμομηχανής (1700), ο άνθρακας άρχισε να αντικαθιστά τη βιομάζα, ενώ η μηχανή εσωτερικής καύσης (τέλη 1800), οδήγησε στην ευρεία χρήση του πετρελαίου και του φυσικού αερίου (Bithas & Kalimeris, 2016). Η Εικόνα 1 δίνει την εξέλιξη της χρήσης πρωτογενών πηγών ενέργειας στο χρόνο για την περίοδο 1997-2017. Η Εικόνα 2 και η Εικόνα 3 παρουσιάζουν το παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο και την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα.



Εικόνα 1 Εξέλιξη στο χρόνο της χρήσης πρωτογενών πηγών ενέργειας για την περίοδο 1997-2017

Για το 2017, τα ορυκτά καύσιμα, παραμένουν η κύρια πηγή ενέργειας μέχρι και σήμερα. Ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο καλύπτουν κατά 81% την παγκόσμια ζήτηση σε πρωτογενή ενέργεια (IEA, 2017). Ο άνθρακας αξιοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή (Το 1/3 της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στον άνθρακα) καθώς και από βιομηχανίες (σίδηρος, χάλυβας, τσιμεντοβιομηχανία). Το πετρέλαιο κυριαρχεί στον τομέα των μεταφορών (>90%). Το φυσικό αέριο είναι το ταχύτερα αναπτυσσόμενο ορυκτό καύσιμο, αντιπροσωπεύοντας σήμερα το 23% της παγκόσμιας ζήτησης πρωτογενούς ενέργειας και σχεδόν το ένα τέταρτο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ακολουθεί η ενέργεια από βιοκαύσιμα τα οποία προκύπτουν από την ενεργειακή αξιοποίηση οργανικής ύλης (βιομάζας). Η εξέλιξή τους είναι συνεχής (Alalwan, Alminshid, & Aljaafari, 2019). Τα λεγόμενα πρώτης γενιάς βιοκαύσιμα που αξιοποιούν βρώσιμη μάζα και άρα είναι σε άμεσο ανταγωνισμό με την κάλυψη της ανάγκης σε τρόφιμα, διαδέχθηκαν τα δεύτερης γενιάς που χρησιμοποιούν μη εδώδιμη βιομάζα (π.χ οργανικά απορρίμματα), και τα τρίτης γενιάς που χρησιμοποιούν μικροοργανισμούς. Η τέταρτη γενιά βιοκαυσίμων επικεντρώνεται στη γενετική τροποποίηση αυτών των μικροοργανισμών για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσής τους. Οι λεγόμενες και 'waste to energy' WtE (Beyene, Werkneh, & Ambaye, 2018) τεχνολογίες αξιοποιούν οργανικά απόβλητα (ξύλο, απορρίμματα ξύλου, οργανικά στερεά απόβλητα, αστικά ή και βιομηχανικά, απορριμμάτων παραγωγής τροφίμων, ιλύος, λυμάτων, ζωικών αποβλήτων κτλ), προς παραγωγή ενέργειας με ταυτόχρονη μείωση των απορριμμάτων και αποβλήτων που χρήζουν διαχείρισης και τελικής διάθεσης στο περιβάλλον.

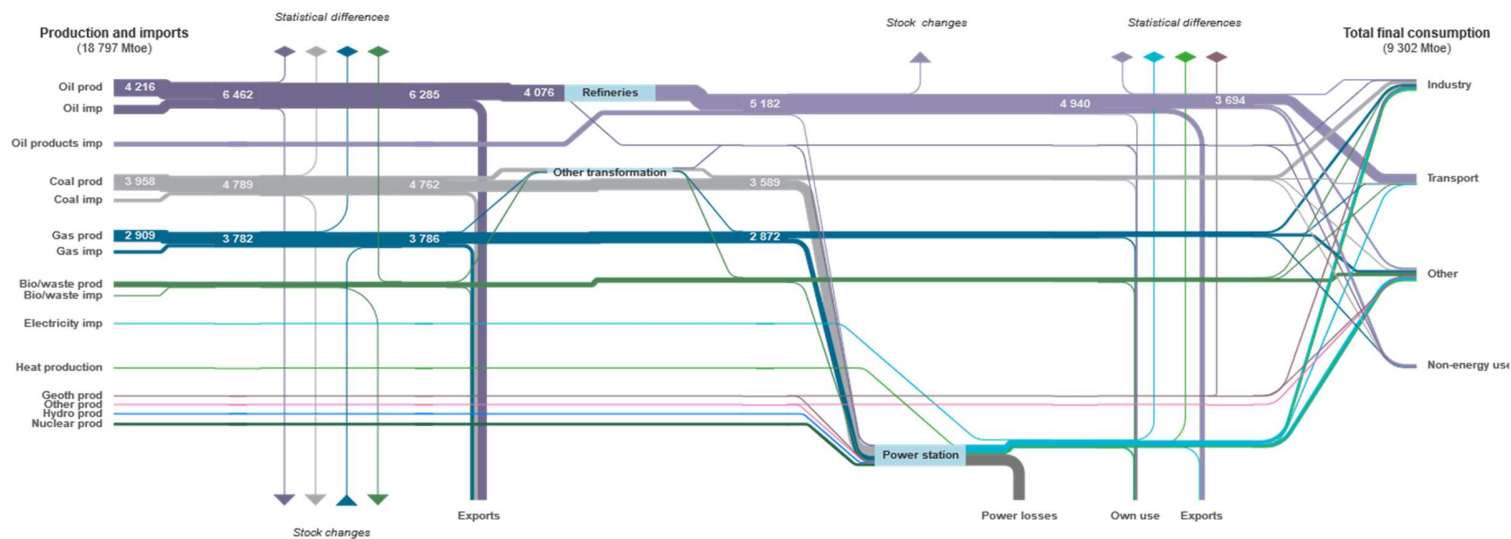
Η πυρηνική ενέργεια παρέχει σχεδόν το 11% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας. Αν και αποτελεί μια λύση χαμηλών εκπομπών άνθρακα (η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή ενέργειας χαμηλού άνθρακα στον κόσμο, μετά την υδροηλεκτρική ενέργεια, εκτοπίζει περίπου 2 gigaton CO<sub>2</sub> ανά έτος), σχετίζεται με μεγάλη επικινδυνότητα. Στο τέλος του 2018 λειτουργούσαν 450 ενεργοί πυρηνικοί σταθμοί παγκοσμίως (IAEA, 2019). Η παγκόσμια πυρηνική βιομηχανία στοχεύει σε μερίδιο της τάξης του 25% του παγκόσμιου ενεργειακού μείγματος για το 2050 (World Nuclear News, 2018)

Ως προς την τελική ενεργειακή χρήση το 31% της συνολικής πρωτογενούς ενέργειας καταναλώνεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εξετάζοντας συγκεκριμένες πηγές, η ηλεκτρική ενέργεια βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα: άνθρακα (47%) και φυσικό αέριο (23%). Η ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται ως μερίδιο των τελικών χρήσεων ενέργειας ταχύτερα από όλες τις άλλες χρήσεις (Sims et al., 2007). Η ζήτησή της διπλασιάστηκε από το 1990 και αναμένεται να αυξηθεί κατά 80% έως το 2040. Ο τομέας θα αντιπροσωπεύει πάνω από το ήμισυ της προαναφερθείσας αύξησης της παγκόσμιας χρήσης ενέργειας (IEA, 2014a).

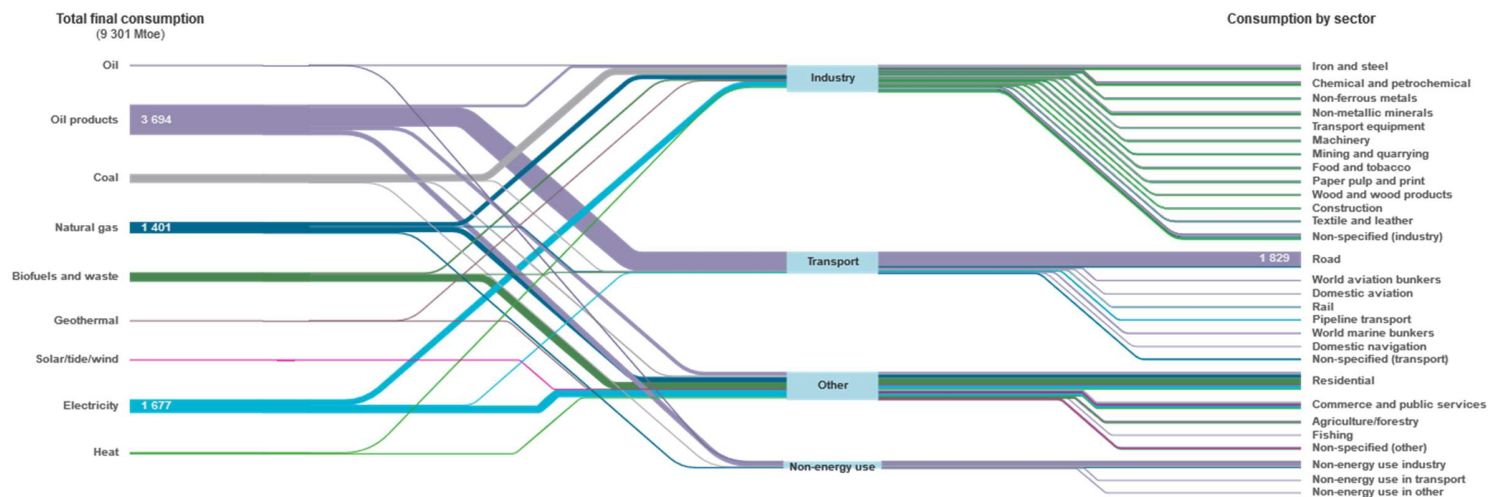
Αυτή η αυξημένη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και η αντίστοιχη χρήση ενέργειας και ηλεκτρικής ενέργειας έχει δύο ιδιαίτερα δυσμενείς επιπτώσεις που κυριαρχούν επί του παρόντος σε επιστημονικές και πολιτικές ατζέντες: τις δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον λόγω της εξάντλησης των ενεργειακών αποθεμάτων και της εκπομπής αερίων θερμοκηπίου (GHG) καθώς και την ενεργειακή ανασφάλεια.

Μια λύση σε αυτά τα ζητήματα φαίνεται να είναι η χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ΑΠΕ είναι ανεξάντλητες μορφές ενέργειας που ανανεώνονται μέσω του κύκλου της φύσης και βασίζονται σε δυνάμεις όπως ο άνεμος, η ηλιακή ακτινοβολία, η γεωθερμία κ.α. Για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση (εξόρυξη, άντληση ή καύση), απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Επιπλέον, πρόκειται για "καθαρές" μορφές ενέργειας, "φιλικές" στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα (Μπούντρη, 2016).





Εικόνα 2 IEA Παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο για το 2013 (IEA, 2014b).



Εικόνα 3 IEA Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα για το 2013 (IEA, 2014)

Σήμερα οι ΑΠΕ λαμβάνονται υπόψη στους επίσημους σχεδιασμούς των ανεπτυγμένων κρατών για την ενέργεια και, αν και αποτελούν μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής, γίνονται βήματα για την παραπέρα αξιοποίησή τους. Το κόστος δε των εφαρμογών ήπιων μορφών ενέργειας μειώνεται συνέχεια τα τελευταία είκοσι χρόνια και ειδικά η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά και η βιομάζα, μπορούν πλέον να ανταγωνίζονται παραδοσιακές πηγές ενέργειας όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια (Μπούντρη, 2016). Από τα μέσα της δεκαετίας του ενενήντα, οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης άρχισαν την εφαρμογή πολιτικών για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με στόχο την αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στη μικτή κατανάλωση ενέργειας εντός της ΕΕ. Έτσι, από 9% που ήταν το μερίδιο των ΑΠΕ το 2005 έφτασε το 17,4%, το 2017. Οι νέοι στόχοι που έχουν τεθεί μιλούν για 32% μερίδιο των ΑΠΕ στη μικτή κατανάλωση ενέργειας έως το 2030 (Das et al., 2018). Ενώ, όσον αφορά τη συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας, το 2016 το μερίδιο των ΑΠΕ ήταν 10,4% (REN21, 2018).

Στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ανήκει και η αιολική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Η πρώτη ανεμογεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάστηκε το 1887 στη Σκωτία ενώ σημαντική ήταν η εξέλιξη τους το 19ο αιώνα σε Αμερική και Ευρώπη. (Ryan Wiser et al., 2011) (Kaldellis & Zafirakis, 2011). Η αιολική ενέργεια αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του ενεργειακού τομέα παγκοσμίως. Σε ευρωπαϊκό πλαίσιο, η αιολική ενέργεια είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (EWEA) αναμένει ότι έως το 2030 το δυναμικό της θα έχει αυξηθεί σε 320 GW σε σύγκριση με 129 GW το 2014. Μέχρι τότε, η αιολική ενέργεια αναμένεται να καλύψει περισσότερο από το 24% της προβλεπόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ (Corbetta, Ho, & Pineda, 2015; EWEA, 2014).

### 3.2 Σκοπός εργασίας

---

Ελάχιστες είναι οι έρευνες που έχουν ασχοληθεί με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τον κύκλο ζωής των τεχνολογιών αιολικής ενέργειας. Οι περισσότεροι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με το στάδιο της λειτουργίας δηλαδή εξετάζουν μόνο τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τη χρήση ενέργειας, με αποτέλεσμα τα συμπεράσματα που προκύπτουν να μην κρίνονται πλήρως αξιόπιστα (Martínez, Latorre-Biel, Jiménez, Sanz, & Blanco, 2018).

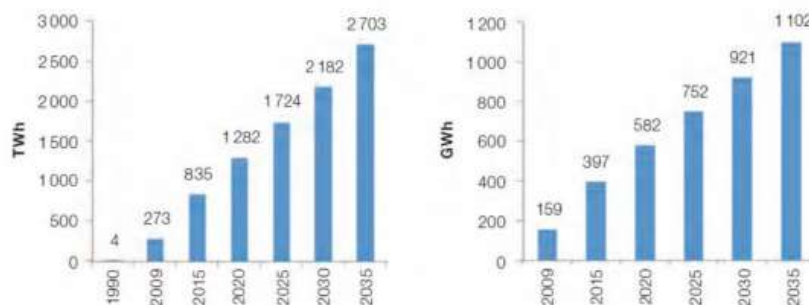
Σπάνια εξετάζονται τα στάδια παραγωγής των τεχνολογιών, εγκατάστασης και τελικής τους απόρριψης. Ειδικά το στάδιο του τέλους ζωής των ανεμογεννητριών, έχει μελετηθεί λιγότερο και υπάρχει η μεγαλύτερη αβεβαιότητα. Αυτό οφείλεται εν μέρη στο ότι η βιομηχανία είναι σχετικά νέα και υπάρχει περιορισμένη πρακτική εμπειρία στην απομάκρυνση και την ανακύκλωση (Martínez et al., 2018).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να συγκεντρώσει και να παρουσιάσει σχετική βιβλιογραφία για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των τεχνολογιών αιολικής ενέργειας και τη. Ιδιαίτερη αναφορά θα γίνει στο ζήτημα της διαχείρισης των ανεμογεννητριών μετά το τέλος ζωής και κυρίως της διαχείρισης των υλικών των πτερυγίων, που διαφαίνεται και το μεγαλύτερο πρόβλημα. Η εργασία θα παρουσιάσει επίσης βιβλιογραφία σχετική με την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τεχνολογίες αιολικής ενέργειας αξιολογώντας όλα τα στάδια του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής, AKZ).

## 4 Αιολική ενέργεια - επισκόπηση

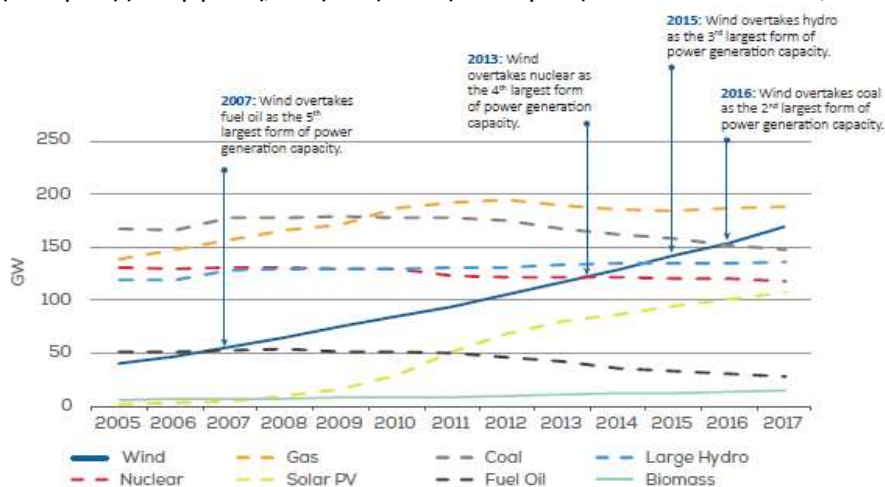
### 4.1 Παγκόσμια και Ευρωπαϊκή προοπτική

Σήμερα η παγκόσμια ετήσια παραγωγή αιολικής ενέργειας έχει φτάσει να αντιστοιχεί σχεδόν στο 4% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και το ποσοστό αυτό αυξάνεται συνεχώς (*Wind energy*, 2018). Ενδεικτικά η παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς, αντιστοιχούσε σε 48 GW το 2004 και έφτασε τα 320 GW στα τέλη του 2013, που αντιστοιχεί σε αύξηση 20% ανά έτος, κατά μέσο όρο (Hvidtfeldt & Petersen, 2014). Η τάση αυτή αναμένεται να συνεχιστεί αφού τα σενάρια για το μέλλον μιλούν για αύξηση της χερσαίας αιολικής ισχύς κατά 323 GW μέχρι το 2023, που αντιστοιχεί σε αύξηση 65% μέσα σε 5 χρόνια (*Wind energy*, 2018). Επιπλέον το GWEC προβλέπει ότι η αιολική ενέργεια θα μπορούσε να καλύπτει το 20% των παγκοσμίων αναγκών για ενέργεια μέχρι το 2030, που αντιστοιχεί σε 2.110 GW εγκατεστημένης αιολικής ισχύος (GLOBAL WIND ENERGY OUTLOOK 2016, 2016).



Εικόνα 4 Προβλεπόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική και εκτιμώμενη εγκατάσταση ισχύος αιολικών πάρκων (*Μπούντρη, 2016*).

Όσον αφορά την Ευρώπη το 2017 εγκαταστάθηκαν 16,8 GW αιολικής ισχύος, σημειώνοντας νέο ρεκόρ σε χερσαίες (12,484 MW) και παράκτιες (3,154 MW) εγκαταστάσεις μέσα σε ένα έτος και πλέον η συνολική καθαρή εγκατεστημένη ισχύς έχει φτάσει τα 168,7 GW. Έτσι, η αιολική ενέργεια έχει φτάσει να αντιπροσωπεύει το 18% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος για την παραγωγή ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση και παραμένει η δεύτερη μεγαλύτερη μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πλησιάζοντας το αέριο (Fraile & Mbistrova, 2018).



Εικόνα 5 Συνολική ικανότητα παραγωγής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση 2005-2017 (*Fraile & Mbistrova, 2018*)

Σύμφωνα με τα κεντρικά σενάρια του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας (EWEA), από τη συνολική κατανάλωση ενέργειας της Ευρώπης αναμένεται να καλύπτεται από την αιολική ενέργεια το 16.5% μέχρι το 2020 και το 30%, μέχρι το 2030 (Nghiem, Fraile, Mbistrova, Remy, & Arkins, 2017)(Nghiem & Pineda, 2017).

Είναι λοιπόν ξεκάθαρο ότι η Ευρώπη αλλά και ο υπόλοιπος κόσμος βλέπουν με πολύ καλό μάτι την αιολική ενέργεια και έχουν επενδύσει σημαντικά σε αυτή. Το ερώτημα που προκύπτει εδώ είναι το κατά πόσον η τεχνολογία της αιολικής ενέργειας μπορεί να είναι βιώσιμη και ποιες είναι οι επιπτώσεις που μπορεί να υπάρξουν για το περιβάλλον, ειδικότερα αν χρησιμοποιηθεί σε τόσο μεγάλη κλίμακα.

## **4.2 Αύξηση αιολικής ενέργειας -οδηγοί και εμπόδια**

---

Μια πλήρης και πολύπλευρη επιστημονική ανάλυση για τους οδηγούς και τα εμπόδια για υψηλότερα μερίδια αιολικής ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα παραγωγής δίνεται στη διεθνή έκθεση ενέργειας του Πολυτεχνείου της Δανίας (Hvidtfeldt & Petersen, 2014), απόσπασμα του οποίου ακολουθεί σε ελεύθερη μετάφραση στην παρούσα υποενοότητα. Αν και το υλικό της έκθεσης είναι του 2014 και έχουν υπάρξει τεχνολογικές εξελίξεις πχ ως προς τη μέγιστη ισχύ ανά ανεμογεννήτρια, το κείμενο παραμένει σχετικό:

### **Εξελίξεις της αιολικής ενέργειας →**

Παρά την επιβράδυνση στις παγκόσμιες αγορές, τα τελευταία χρόνια σημειώθηκαν νέες προσπάθειες στην τεχνολογική ανάπτυξη της τεχνολογίας της ανεμογεννήτριας. Αυτή η προσπάθεια καθοδηγείται από τον ισχυρότερο παγκόσμιο ανταγωνισμό στον τομέα της αιολικής ενέργειας καθώς και από τις ανταγωνιστικές ενεργειακές τεχνολογίες. Αυτός ο ανταγωνισμός προσφέρει μια κατεύθυνση προς χαμηλότερο κόστος ενέργειας (Cost of Energy CoE), μεγαλύτερες και πιο αξιόπιστες ανεμογεννήτριες για υπεράκτιες εφαρμογές και αυξημένο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη τοποθεσιών με χαμηλά ή μέτρια αιολικά καθεστώτα. Έτσι, η κύρια τάση ανάπτυξης της τεχνολογίας στροβίλων χαρακτηρίζεται από κλιμάκωση έως και στροβίλων μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος τόσο για χερσαίες όσο και για υπεράκτιες εφαρμογές, μεγαλύτερους ρότορες και νέες λύσεις κίνησης, συμπεριλαμβανομένων στροβίλων άμεσης μετάδοσης κίνησης (Direct drive) χωρίς κιβώτια ταχυτήτων. Οι τεχνολογικές λύσεις επηρεάζονται έντονα από την ανάπτυξη της διεθνούς αιολικής βιομηχανίας, με την παγκόσμια αγορά εξαρτημάτων.

Σε αντίθεση με αυτό που αναμενόταν πριν από λίγα χρόνια, η αγορά δεν έχει ενοποιηθεί σε λίγους μεγάλους προμηθευτές. Οι δέκα κορυφαίες εταιρείες προμηθεύουν το 69,5% της αγοράς και οι επόμενοι πέντε μεγαλύτεροι προμηθευτές, όλοι από την Κίνα, παρέχουν επιπλέον 13,4%.

Η αιολική ενέργεια στην ξηρά γίνεται όλο και πιο ανταγωνιστική με τη συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τα ορυκτά. Τα μερίδια του κόστους τουρμπίνας, του κόστους εγκατάστασης, του κόστους υποδομής και του λειτουργικού κόστους στο ομαλοποιημένο κόστος ενέργειας (LCoE), (η τιμή στην οποία πρέπει να παραχθεί ηλεκτρισμός από μια συγκεκριμένη πηγή για να ξεπεράσει τη διάρκεια ζωής του έργου) εξαρτάται από τον τύπο

έργου: το κόστος του στροβίλου είναι συνήθως περισσότερο από το ήμισυ του συνόλου για χερσαία έργα, αλλά λιγότερο από το ήμισυ για υπεράκτια έργα. Η τυπική ισχύς των χερσαίων στροβίλων είναι 2–3 MW, ενώ οι μεγαλύτερες υπεράκτιες τουρμπίνες κυμαίνονται έως 8 MW και έχουν διάμετρο ρότορα έως 171 m. Το ίδιο μέγεθος ρότορα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανεμογεννήτριες με πολύ διαφορετική ισχύ, εάν αυτές στοχεύουν σε διαφορετικές συνθήκες ανέμου. Είναι προτιμότερο να υπάρχει στροβίλος που παράγει χαμηλότερη ονομαστική ισχύ, για περισσότερες ημέρες σε ένα χρόνο, παρά να έχει υψηλή παραγωγή ισχύος για λίγες μόνο ημέρες το χρόνο.

### **Εξελίξεις στην υπεράκτια αιολική ενέργεια →**

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια εξακολουθεί να είναι πολύ πιο ακριβή από τη χερσαία. Οι λόγοι είναι πολλοί, αλλά κυρίως σχετίζονται με υψηλότερους αιολικούς πόρους, λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και περισσότερο διαθέσιμο χώρο. Τα μειονεκτήματα είναι τα αυξημένα κόστη λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και οι πρόσθετες κεφαλαιουχικές δαπάνες, για παράδειγμα για δομές καλωδίωσης και υποστήριξης. Ο πιο σημαντικός βραχυπρόθεσμος έως μεσοπρόθεσμος στόχος για την υπεράκτια αιολική βιομηχανία είναι η μείωση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας (Levelised cost of energy). Το υπεράκτιο κόστος ενέργειας μπορεί να μειωθεί μέσω της αναβάθμισης των στροβίλων και της ευρείας βιομηχανικής παραγωγής άλλων μερών του αιολικού μάρκου. Η βιομηχανία βρίσκεται σε καλό δρόμο για την επίτευξη του στόχου της μείωσης του κόστους κατά περίπου 40% έως το 2020.

Η αξιολόγηση του κόστους υπεράκτιας αιολικής ενέργειας πρέπει να περιλαμβάνει κόστος θελεμίσωσης, το οποίο θα κλιμακωθεί με το βάθος νερού μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας εγκατάστασης. Επιπλέον, θα κλιμακωθεί με το μέγεθος του ρότορα, καθώς ο μεγαλύτερος ρότορας δημιουργεί μεγαλύτερα φορτία και ως εκ τούτου χρειάζεται ένα θεμέλιο που είναι τόσο ευρύτερο όσο και παχύτερο. Αν και το θεμέλιο είναι συχνά πιο ακριβό από τον ίδιο τον στροβίλο, το κόστος του αυξάνεται πιο αργά καθώς αυξάνεται το μέγεθος του στροβίλου. Ως αποτέλεσμα, αποδεικνύεται ότι οι στροβίλοι που είναι πολύ μεγαλύτεροι (> 5 MW) από το τρέχον μέγεθος στην ξηρά 2–3 MW είναι πιο οικονομικοί για υπεράκτιες εφαρμογές λόγω του κόστους θεμελίωσης.

### **Αναβάθμιση καλωδιακού δικτύου για υπεράκτιες εφαρμογές**

Οι καλωδιακές συνδέσεις των υπεράκτιων πάρκων αναμένεται να εξελιχθούν από τα καλώδια AC 33 kV που χρησιμοποιούνται σήμερα. Τα μελλοντικά συστήματα είναι πιθανό να λειτουργούν με 66 kV AC και άνω. Μια άλλη πιθανότητα είναι να καθιερωθούν δίκτυα συλλογής DC που συνδέονται με την ακτή μέσω καλωδίων εξαγωγής HVAC (εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης) ή HVDC (συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης), ειδικά καθώς αυξάνεται η υπεράκτια απόσταση. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπών HVDC μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη της απόδοσης του δικτύου. Οι μετατροπείς μπορούν επίσης να συμβάλουν στη βραχυπρόθεσμη σταθεροποίηση εάν συνδυάζονται με κατάλληλες πηγές ενέργειας.

### **Μείωση του κόστους των υπεράκτιων αιολικών υπηρεσιών**

Οι υπεράκτιες αιολικές υπηρεσίες (offshore wind services OWS) είναι οι υπηρεσίες που απαιτούνται για την εγκατάσταση, τη λειτουργία, τη συντήρηση και τον παροπλισμό ή την

αποκατάσταση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, το πραγματικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (operation & maintenance O&M) εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 25-28% του συνολικού σταθμισμένου κόστους ενέργειας. Οι ευκαιρίες για μείωση του κόστους εδώ περιλαμβάνουν τυποποίηση τεχνολογιών και διεπαφών, βελτίωση της επικοινωνίας και της ανταλλαγής γνώσεων εντός της αξιακής αλυσίδας και εξασφάλιση των δεξιοτήτων και των προσόντων που απαιτούνται για την παροχή υπηρεσιών με ασφάλεια, αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα.

#### **Τα πρότυπα και η πιστοποίηση εξαλείφουν τα εμπόδια →**

Μεγάλο μέρος της τεχνολογικής ανάπτυξης και της παγκοσμιοποίησης που έχουμε δει στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας έχει ενισχυθεί από την ανάπτυξη διεθνών προτύπων. Τα πρότυπα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανταλλαγή νέων τεχνικών γνώσεων και βέλτιστων πρακτικών και για τη διευκόλυνση της τεχνικής ανάπτυξης δημιουργώντας και διατηρώντας μια διεθνή αγορά χωρίς τεχνικά εμπόδια. Ωστόσο, τα ολοένα και πιο ολοκληρωμένα τεχνικά πρότυπα μπορούν επίσης να αποτελέσουν εμπόδιο στην τεχνική ανάπτυξη.

#### **Αναδυόμενες τεχνολογίες αιολικής ενέργειας →**

Από τότε που η αιολική βιομηχανία ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980, η τεχνολογία ανεμογεννητριών έχει σημειώσει ταχεία ανάπτυξη. Αυτό οδήγησε σε εντυπωσιακές αυξήσεις του μεγέθους των στρόβιλων τις τελευταίες τρεις δεκαετίες - η παραγωγή ισχύος αυξήθηκε κατά έναν παράγοντα περίπου 100 - συνοδευόμενη από σημαντικές μειώσεις κόστους χάρη στα βελτιστοποιημένα και σχετικά ελαφριά σχέδια. Εάν ένας στρόβιλος 55 kW από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 αυξήθηκε άμεσα, για παράδειγμα, οι νεότεροι στρόβιλοι 6-8 MW θα ζύγιζαν περίπου 10 φορές περισσότερο από ό,τι στην πραγματικότητα. Οι περισσότερες αναδυόμενες τεχνολογίες του αιολικού τομέα αντιμετωπίζουν τεχνικές προκλήσεις, οι οποίες περιορίζουν τη μείωση του κόστους της ενέργειας. Οι στρατηγικές για τη μείωση του κόστους της ενέργειας επικεντρώνονται στην κατασκευή φθηνότερου υλικού που διαρκεί για όλη τη διάρκεια της εγκατάστασης με όσο το δυνατόν μικρότερη συντήρηση και ταυτόχρονα συλλέγει όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια. Για να μειώσουν το κόστος της ενέργειας, οι σχεδιαστές έχουν προσαρμόσει τις τουρμπίνες ακόμη πιο προσεκτικά στις συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργούν. Τα προηγμένα σχέδια που χρησιμοποιούν λιγότερα υλικά και η υψηλότερη αξιοπιστία παραμένουν οι κύριοι τρόποι μείωσης του κόστους της ενέργειας για μελλοντικά σχέδια στρόβιλων.

#### **Αναβάθμιση για περισσότερη ισχύ και υψηλότερο εισόδημα →**

Η ισχύς, και συνεπώς το εισόδημα, από μια τουρμπίνα αυξάνεται με την αύξηση επιφάνειας του ρότορα. Καθώς οι πτερύγια γίνονται μακρύτερες, η μάζα τους μεγαλώνει ταχύτερα από την περιοχή του ρότορα. Αυτή η σχέση, που συχνά ονομάζεται «κύβος στο τετράγωνο», δείχνει ότι το κόστος ενέργειας πρέπει να αυξηθεί με το μήκος της λεπίδας. Στην πραγματικότητα, αυτό δεν συνέβη για αρκετές δεκαετίες λόγω των εξελίξεων στα υλικά λεπίδων και στην ικανότητα των σχεδιαστών να βελτιστοποιήσουν τις αεροδυναμικές και δομικές τους ιδιότητες. Η τυπική ισχύς των χερσαίων στρόβιλων είναι τώρα 2-3 MW, ενώ οι μεγαλύτερες υπεράκτιες τουρμπίνες κυμαίνονται έως και 8 MW.

#### **Ελαφρύτερα πτερύγια με μη συμβατικά σχήματα**

Πολλοί παράγοντες έχουν βοηθήσει τη μετάβαση σε ελαφρύτερα πτερυγία, εκ των οποίων ο πιο σημαντικός ήταν η ανάπτυξη πτερυγίων που είναι πολύ πιο λεπτά και εύκαμπτα από τους προκατόχους τους. Αυτή η εξέλιξη οδηγεί σε πτερυγία με νέα γεωμετρία με παθητικό έλεγχο, προηγμένη αεροτομή και νέες διαδικασίες και υλικά.

#### Ρότορες με άμεση μετάδοση κίνησης χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων

Αρκετοί κατασκευαστές έχουν πλέον εισαγάγει γεννήτριες άμεσης κίνησης, οι οποίες δεν απαιτούν κιβώτιο ταχυτήτων σε αντίθεση με τις συμβατικές ανεμογεννήτριες. Το πλεονέκτημα είναι μια απλούστερη μηχανή με λιγότερα κινούμενα μέρη και ως εκ τούτου βελτιωμένη αξιοπιστία.

#### Πυλώνες

Καθώς αυξάνεται η διάμετρος του ρότορα, έτσι ο πύλώνας πρέπει να γίνει όχι μόνο ψηλότερος αλλά και ευρύτερος και παχύτερος για να μετριάσει το φορτίο από το ρότορα στο θεμέλιο. Σήμερα οι περισσότεροι πύλώνες είναι κατασκευασμένοι από χαλύβδινες πλάκες. Τα τμήματα ανυψώνονται το ένα πάνω στο άλλο και βιδώνονται μαζί για να σχηματίσουν τον τελικό πύλώνα. Ο χειρισμός αυτών των τμημάτων αποτελεί μια αυξανόμενη πρόκληση και πολλές νέες ιδέες εξετάζουν άλλα υλικά. Οι νέες ιδέες για τους πύλώνες περιλαμβάνουν την κατασκευή τους από σειριακά παραγόμενα τμήματα σκυροδέματος.

#### **Προκλήσεις και λύσεις για ενεργειακά συστήματα με υψηλά μερίδια αιολικής ενέργειας**

Η ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στα ενεργειακά συστήματα έχει αλληλοσυνδεόμενες αλλά διακριτές πτυχές. Μία από αυτές είναι η ενοποίηση δικτύου. Οι εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας βρίσκονται συνήθως όπου βρίσκονται οι καλύτεροι αιολικοί πόροι, αλλά αυτές οι τοποθεσίες σπάνια συμπίπτουν με τη θέση των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας και τις μεγάλες υπάρχουσες δυνατότητες δικτύου. Με τα συνεχώς αυξανόμενα μερίδια αιολικής ενέργειας στο σύστημα, η υπάρχουσα υποδομή δικτύου δέχεται προκλήσεις σε ορισμένες περιοχές, τόσο σε μεσαίες όσο και σε υψηλές τάσεις

Μια άλλη πτυχή σχετίζεται με τη μακροπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη ενσωμάτωση. Η παραγωγή από αιολικούς σταθμούς μπορεί να είναι πολύ μεταβλητή, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του αιολικού πόρου. Η εγγενής αβεβαιότητα της παραγωγής αιολικής ενέργειας οδηγεί σε αποκλίσεις μεταξύ της πρόβλεψης και της πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας, και ως εκ τούτου σε απροσδόκητες διακυμάνσεις της τροφοδοσίας. Για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση αυτών των διακυμάνσεων, ο διαχειριστής συστήματος χρειάζεται πρόσβαση σε επαρκή αποθέματα. Ένα υψηλό μερίδιο της αιολικής ενέργειας σημαίνει επίσης ότι η αιολική ενέργεια πρέπει να αναλάβει μεγαλύτερη ευθύνη για τη σταθερή λειτουργία του ενεργειακού συστήματος. Για να εξισορροπηθούν τα ενεργειακά συστήματα με πολύ υψηλά μερίδια αιολικής ενέργειας, είναι απαραίτητο να υπάρχουν καλά ενσωματωμένα δίκτυα με καλές διασυνδέσεις για τη μείωση των αναγκών εξισορρόπησης.

#### **Η βελτιωμένη πρόβλεψη μειώνει την αβεβαιότητα →**

Για τη μείωση της αβεβαιότητας στην παραγωγή αιολικής ενέργειας, θα χρειαστεί να αντιμετωπιστούν ζητήματα όπως η προβλεψιμότητα του ανέμου, των στροβιλισμών και των φορτίων στις ανεμογεννήτριες, ο παγετός και άλλες επιδράσεις που σχετίζονται με τον καιρό στην εγκατάσταση ή με το λειτουργικό κόστος εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας. Οι

προβλέψεις αιολικής ενέργειας έχουν ιστορικά επικεντρωθεί σε μεθοδολογίες για την πρόβλεψη της παραγωγής σε ωριαία διαστήματα, επειδή αυτό είναι το συντομότερο χρονικό διάστημα στο οποίο η ηλεκτρική ενέργεια είναι εμπορεύσιμη στις υπάρχουσες αγορές. Ωστόσο, οι ειδικοί στη διαχείριση ενέργειας υποστήριξαν ότι η μείωση του χρόνου προγραμματισμού για παραγωγή και παράδοση από ώρες σε λεπτά θα διευκόλυνε σημαντικά την εξισορρόπηση της παραγωγής και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει μια μακρά παράδοση της χρήσης «σημείων πρόβλεψης» της παραγωγής αιολικής ενέργειας για αποστολή και εμπορία. Ωστόσο, τέτοιες απλές προβλέψεις είναι γνωστό ότι δεν είναι βέλτιστες. Σήμερα το επίκεντρο κινείται προς νέους ερευνητικούς τομείς, όπως τη χρήση πιθανολογικών προβλέψεων για την ενίσχυση αποφάσεων σχετικά με τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Με τη χρήση σεναρίων ερευνάται για παράδειγμα, πώς η ισχύς ενός συγκεκριμένου αιολικού πάρκου είναι πιθανό να μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Τα σενάρια έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από ερευνητές και επαγγελματίες για τη μοντελοποίηση της αιολικής ενέργειας και για την κατασκευή προηγμένων εργαλείων για τη λειτουργία και τον σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων.

### **Νέες προσεγγίσεις στην αιολική οικονομία →**

Για την αιολική ενέργεια, ορισμένες χώρες της ΕΕ παύουν τα κλασικά τιμολόγια τροφοδοσίας που άνοιξαν το δρόμο για τη μείωση του κόστους που έχουμε δει μέχρι σήμερα. Ένας από τους κύριους λόγους είναι το αυξανόμενο μερίδιο αγοράς της αιολικής ενέργειας: η αιολική ενέργεια πρέπει τώρα να αλληλεπιδρά καλύτερα με το υπόλοιπο σύστημα ισχύος και να αντιδρά στα σήματα της αγοράς. Τα ισχύοντα νομοθετικά σχέδια της ΕΕ δείχνουν μεγαλύτερη έμφαση στη μείωση του κόστους και στον ανταγωνισμό. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την ευρύτερη χρήση του διαγωνισμού ως εργαλείου υποστήριξης. Ο διαγωνισμός χρησιμοποιείται επί του παρόντος για τον προσδιορισμό των ποσοστών υποστήριξης υπεράκτιων στη Γαλλία, για παράδειγμα. Επιπλέον, αναμένεται διασυνοριακή συνεργασία, όπως καθιερώθηκε από μια οδηγία της ΕΕ. Το κόστος κεφαλαίου των έργων αιολικής ενέργειας κυριαρχείται από το κόστος των ίδιων των στροβίλων. Από τα άλλα στοιχεία κόστους, τα κυρίαρχα είναι η σύνδεση δικτύου, η ηλεκτρική εγκατάσταση και τα θεμέλια. Αυτά τα βοηθητικά κόστη ποικίλλουν σημαντικά, από 20% έως 30% του συνολικού κόστους τουρμπίνας. Για μια τυπική εγκατάσταση στην ξηρά με κόστος επένδυσης 1.750 \$ / kW, το κόστος κυμαίνεται από περίπου 7-9 σεντ / kWh σε τοποθεσίες με χαμηλές έως μέσες μέσες ταχύτητες ανέμου, έως περίπου 6-7 σεντ / kWh σε καλές παράκτιες θέσεις. Η ενέργεια από υπεράκτιους στροβίλους είναι πολύ πιο ακριβή από εκείνη των χερσαίων στροβίλων. Σε υπεράκτια θέση υψηλού ανέμου με συντελεστή χωρητικότητας 50%, που αντιστοιχεί στις συνθήκες ανέμου στο αιολικό πάρκο πάρκο της Δανίας Danish Horns Reef 1, το υπολογισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας είναι κοντά στα 12 σεντ / kWh για μια τυπική εγκατάσταση υπεράκτιων με επενδυτικό κόστος 3.900 \$ / kW. Το κόστος των O&M προσελκύει όλο και περισσότερο την προσοχή. Οι κατασκευαστές προσπαθούν να τα μειώσουν σημαντικά αναπτύσσοντας νέα σχέδια στροβίλων που απαιτούν λιγότερες τακτικές επισκέψεις σέρβις και λιγότερο προγραμματισμένο χρόνο διακοπής για συντήρηση.

### **Η αιολική ενέργεια δημιουργεί θέσεις εργασίας →**

Οι περισσότερες προβλέψεις συμφωνούν ότι η αγορά αιολικής ενέργειας θα αναπτυχθεί σε σχέση με την εγκατεστημένη νέα ισχύ, την αποκατάσταση και τη λειτουργία και συντήρηση. Η Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (EWEA) εκτιμά ότι έως το 2020 θα υπάρχουν 520.000



θέσεις εργασίας στον ευρωπαϊκό τομέα αιολικής ενέργειας και σχεδόν 800.000 θέσεις εργασίας έως το 2030. Η βιομηχανία αιολικής ενέργειας αποτελεί συνεπώς μοχλό στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Σε παγκόσμιο επίπεδο, 834.000 άτομα απασχολούνταν στην αιολική βιομηχανία στο τέλος του 2013 - αύξηση 11% σε σύγκριση με το 2012. Η υψηλότερη αύξηση παρατηρείται σε αναδυόμενες χώρες όπως η Κίνα, όπου 365.000 άτομα εργάστηκαν στην αιολική βιομηχανία μέχρι το τέλος του 2013 - Αύξηση 37% σε σύγκριση με το 2012. Υπήρξε μια μετάβαση από τις θέσεις εργασίας που απαιτούν ανειδίκευτη εργασία σε εκείνες που διαθέτουν υψηλή ειδίκευση (θέσεις εργασίας σε επίπεδο μεταπτυχιακού και διδακτορικού). Το υψηλά εκπαιδευμένο προσωπικό είναι σπάνιο, ωστόσο, και η αύξηση της προσφοράς ειδικευμένου εργατικού δυναμικού θα απαιτήσει αποφασιστική προσπάθεια στην εκπαίδευση και την έρευνα. Η ευρωπαϊκή βιομηχανία αιολικής ενέργειας δυσκολεύεται ήδη να προσλάβει κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό.

### **Περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις της αιολικής ενέργειας →**

Η συμμόρφωση των αιολικών πάρκων με τις τοπικές και περιφερειακές περιβαλλοντικές απαιτήσεις και η κοινωνική αποδοχή, αποτελούν προϋποθέσεις για την επίτευξη των φιλόδοξων στόχων της ΕΕ για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας. Μέχρι σήμερα, έχει πραγματοποιηθεί περιορισμένη μόνο έρευνα σχετικά με την αισθητική επίδραση των ανεμογεννητριών στα τοπία. Ο θόρυβος, ένα άλλο πιθανό πρόβλημα, είναι εν μέρει υποκειμενικός στον τρόπο που επηρεάζει την αντιληπτή ποιότητα ζωής των ανθρώπων. Τέλος, το ζήτημα του σκιάδους τρεμοπαίγματος απαιτεί καθαρό ουρανό, χαμηλό ήλιο, άνεμο και συγκεκριμένη κατεύθυνση ανέμου σε σχέση με τη θέση του ήλιου και του παρατηρητή.

### *Κοινωνική αποδοχή των ανεμογεννητριών*

Για χερσαίες εφαρμογές, οι κυβερνήσεις τείνουν να εστιάζουν την προσοχή τους στην υπερνίκηση των αρχικών και προφανών προκλήσεων του σχεδιασμού ενός κατάλληλου συστήματος υποστήριξης, την εξασφάλιση πρόσβασης στο δίκτυο, την απλοποίηση περίπλοκων διαδικασιών σχεδιασμού και την αντιμετώπιση τεχνικών κινδύνων. Αλλά σε πολλές χώρες γίνεται πλέον σαφές ότι ο βαθμός κοινωνικής αποδοχής θα καθορίσει την τελική κλίμακα της χερσαίας αιολικής βιομηχανίας. Πρόσφατες έρευνες αναζητούν νέες ευκαιρίες κατανόησης και βελτίωσης των δημοκρατικών διαδικασιών που συνδέονται με την κατασκευή μεγάλων αιολικών πάρκων και άλλων μονάδων ΑΠΕ βιομηχανικής κλίμακας.

## 5 Τεχνολογίες αιολικής ενέργειας

### 5.1 Τύποι ανεμογεννητριών – γενικά στοιχεία

Η τάση στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών χαρακτηρίζεται από την αύξηση της ικανότητας παραγωγής ισχύος, τα μεγαλύτερα πτερύγια και νέες λύσεις για το σύστημα μετάδοσης κίνησης (Hvidtfeldt & Petersen, 2014).

#### Χερσαίες και Παράκτιες

Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σήμερα για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις χερσαίες και τις παράκτιες. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2 η παράκτια αιολική ενέργεια βέβαια παραμένει ακόμα αρκετά ακριβότερη από τη χερσαία. Αυτό οφείλεται στα αυξημένα κόστη λειτουργίας και συντήρησης που έχουν τα θαλάσσια αιολικά, αλλά και στην μεγαλύτερη αρχική επένδυση που προϋποθέτουν κυρίως λόγω της θεμελίωσης αλλά και των αυξημένων κοστών για καλωδίωση, μεταφορά και εγκατάσταση. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των χερσαίων και των παράκτιων ανεμογεννητριών, η οποία συνδέεται και με το αυξημένο κόστος της επένδυσης, είναι το μέγεθος. Ενδεικτικά, οι νέες ανεμογεννήτριες που εγκαταστάθηκαν το 2013 στη στεριά παγκόσμια, είχαν μια μέση ονομαστική ισχύ περί τα 2 MW, ενώ αυτές που εγκαταστάθηκαν στη θάλασσα είχαν ονομαστική ισχύ που ξεπερνά τα 3,6 MW κατά μέσο όρο. Παρόλα αυτά βλέπουμε ότι συνεχώς πραγματοποιούνται νέες παράκτιες εγκαταστάσεις και μάλιστα αναμένεται να αυξηθούν λόγω των καλύτερων συνθήκες ανέμων, περισσότερος διαθέσιμος χώρος και λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Hvidtfeldt & Petersen, 2014).



Εικόνα 6 Παράκτιο και χερσαίο αιολικό πάρκο

#### Μικρές ανεμογεννήτριες

Πέρα από τις μεγάλες μοντέρνες ανεμογεννήτριες υπάρχουν και η μικρότερης κλίμακας ανεμογεννήτριες, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές. Οι μικρότερης κλίμακας ανεμογεννήτριες αν και δε μπορούν να επωφεληθούν από τις μεγάλες μειώσεις στα κόστη που συμβαίνουν στις μεγάλες ανεμογεννήτριες, μπορούν να είναι αρκετά ανταγωνιστικές σε σχέση με τις άλλες εναλλακτικές που υπάρχουν για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές που δεν έχουν πρόσβαση στο κεντρικό δίκτυο, δίνοντας τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες της περιοχής. Έτσι μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να καλύψουν μόνες τους, φορτίζοντας μπαταρίες, ή σε συνδυασμό με άλλες επιλογές παραγωγής

ηλεκτρικού ρεύματος (π.χ., ηλιακά, γεννήτριες πετρελαίου) τις ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια σε απομονωμένες περιοχές (Ryan Wiser et al., 2011).



Εικόνα 7 Μικρής κλίμακας ανεμογεννήτριες

### Κάθετου και οριζόντιου άξονα

Εκτός των μεγάλων και των μικρών ανεμογεννητριών μια άλλη κατηγοριοποίηση που μπορεί να γίνει αφορά τον άξονα της ανεμογεννήτριας. Έτσι, εκτός από τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα οι οποίες έχουν κυριαρχήσει στην αγορά σήμερα, υπάρχουν και οι κάθετου άξονα. Είναι ανεμογεννήτριες οι οποίες περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα κάθετο ως προς το επίπεδο του εδάφους και ως προς τη ροή του ανέμου.

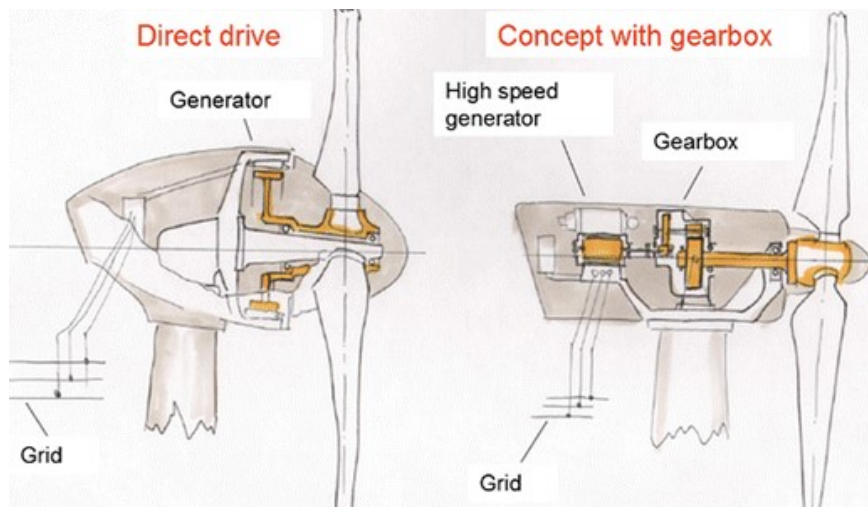
Παρόλο που οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα δε μπορούν να ανταγωνιστούν την απόδοση των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα (περίπου μισή), έχουν αρκετά πλεονεκτήματα και εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα η κατασκευή και η συντήρησή τους είναι πιο απλή και πιο οικονομική, παράγουν λιγότερο θόρυβο και μπορούν να εκμεταλλευτούν τον άνεμο από όλες τις διευθύνσεις. Επιπλέον μπορούν να τοποθετηθούν σε περισσότερα μέρη λόγω μεγέθους. Όλα τα παραπάνω τις καθιστούν καταλληλότερες σε τοποθεσίες όπου ο αέρας δεν είναι σταθερός ή που περιβάλλονται από κάποια μικρά εμπόδια, καθώς και πολύ κοντά ή ακόμα και μέσα σε κατοικημένες περιοχές (Aslam Bhutta et al., 2012).



Εικόνα 8 Κάθετου και οριζόντιου άξονα ανεμογεννήτριες

## Συστήματα μετάδοσης κίνησης

Η τελευταία κατηγοριοποίηση αφορά το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Με τη βασική διαφορά τη χρήση ή όχι κιβωτίου ταχυτήτων. Έτσι, έχουμε το σύστημα μετάδοσης κίνησης με κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο χρησιμοποιούν οι περισσότερες ανεμογεννήτριες σήμερα και το σύστημα άμεσης μετάδοσης κίνησης, που δεν απαιτεί τη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων και χρησιμοποιεί γεννήτρια μόνιμων μαγνητών για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το τελευταίο αναμένεται να χρησιμοποιηθεί αρκετά στις παράκτιες εφαρμογές λόγω της χαμηλής ανάγκης για συντήρηση και της υψηλής αξιοπιστίας του.



Εικόνα 9 Ρότορες με άμεση μετάδοση κίνησης και με κιβώτιο ταχυτήτων

Τέλος, πέρα των σημαντικών διαφορών που συναντάμε στους διάφορους τύπους ανεμογεννητριών, υπάρχουν αρκετές διαφοροποιήσεις στο σχεδιασμό των ανεμογεννητριών ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής (π.χ., περιοχές με χαμηλούς ανέμους, ψυχρά κλίματα, υψηλά υψόμετρα και άλλα) (Hvidtfeldt & Petersen, 2014).

## 5.2 Μέρη ανεμογεννήτριας

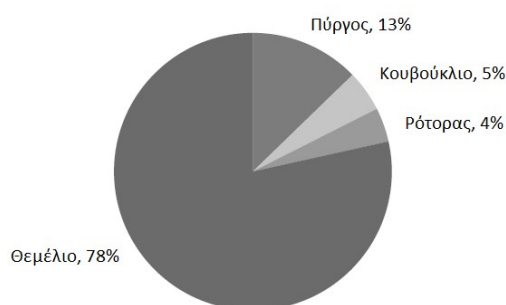
Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια είναι: ο ρότορας, ο πύργος, το κουβούκλιο και η βάση (θεμέλιο).

Η βάση, είναι φτιαγμένη από μπετό και χάλυβα και αντιπροσωπεύει το 80% περίπου του συνολικού βάρους της ανεμογεννήτριας. Μετά το τέλος ζωής της ανεμογεννήτριας η βάση είτε θα παραμείνει στο πάρκο ή θα καταστραφεί και θα απομακρυνθεί. Από περιβαλλοντική σκοπιά, το ρίσκο που σχετίζεται με το να αφήσεις τη βάση στο πάρκο, στις περισσότερες περιπτώσεις, θεωρείται χαμηλότερο σε σχέση με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα έχει η εκσκαφή, οι διαδικασίες σπασίματος και οι μεταφορικές δραστηριότητες που χρειάζονται για την αφαίρεση της.

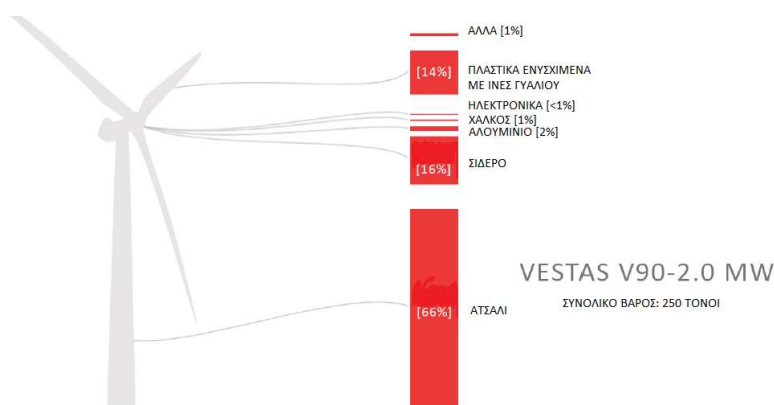
Το επόμενο μεγαλύτερο τμήμα, όσων αφορά το βάρος, είναι ο πύργος ο οποίος είναι φτιαγμένος κυρίως από χάλυβα. Μέταλλα όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο και ο χαλκός αντιπροσωπεύουν το 94% του συνολικού βάρους της ανεμογεννήτριας, πλην της βάσης, και γενικά θεωρούνται υλικά που μπορούν να ανακυκλωθούν. Το υπόλοιπο 6% αντιστοιχεί σε

πλαστικό, καουτσούκ, σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες και άλλα. Αυτά τα υλικά βρίσκονται κυρίως στα πτερύγια και δεν έχουν καθιερωθεί ανακυκλώσιμες λύσεις (Beauson, Bech, & Brøndsted, 2014)(Schleisner, 2000).

Οι εικόνες 4 και 5 δείχνουν το βάρος του καθενός από τα κύρια μέρη μιας ανεμογεννήτριας και τα βασικά υλικά από τα οποία αποτελείται. Η εικόνα 5 δείχνει επίσης τις ποσότητες των υλικών, κατά βάρος, καθώς και σε ποιο μέρος της ανεμογεννήτριας συναντώνται περισσότερο.



Εικόνα 10. Διάγραμμα που αντιπροσωπεύει το βάρος του κάθε μέρους και το αντίστοιχο ποσοστό σε μια Vestas V82 χερσαία τουρμπίνα (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).



Εικόνα 11. Υλικά που βρέθηκαν στην πιο συνηθισμένη ανεμογεννήτρια στη Σουηδία, Vestas V90 2.0 MW (Andersen, 2015).

### 5.2.1 Βάση ανεμογεννήτριας

Το σχέδιο θεμελίωσης εξαρτάται από την τοποθεσία και τις επικρατούσες συνθήκες. Για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες, εκτός αν το έδαφος είναι συμπαγής βράχος οπότε ο πύργος μπορεί να αγκυρωθεί απευθείας σε αυτό, χρειάζεται ένα θεμέλιο αρκετά σταθερό ώστε να αντέχει την ισχυρή ορμή που προκαλείται από τις δυνάμεις του ανέμου και της περιστροφής των πτερυγίων. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα θεμέλιο με τη μορφή ενός μεγάλου δίσκου σκυροδέματος που θάβεται στο έδαφος, με μια χαλύβδινη κατασκευή στο κέντρο για την αγκύρωση του πύργου.

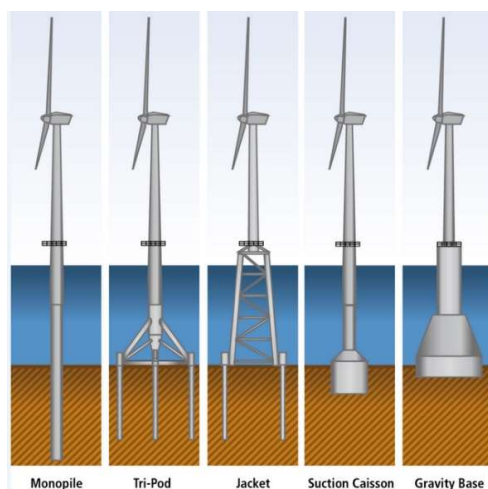
Δεδομένου ότι ο εγγενής σκοπός αυτής της κατασκευής είναι η χρησιμοποίηση βαρυτικών δυνάμεων για την εξισορρόπηση της ορμής που προέρχεται από το στρόβιλο είναι πάντα το βαρύτερο μέρος, μεταξύ 60-90% του συνολικού βάρους. Ωστόσο, το μέγεθος και το σχήμα του θεμελίου ποικίλλει και εξαρτάται από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και τις ιδιότητες του εδάφους. Τα υλικά που αποτελούν τη βάση είναι συνήθως χάλυβας 3-6% κατά βάρος και το υπόλοιπο είναι σκυρόδεμα (Andersen, 2015), (Vestas, 2006).



Εικόνα 12. Ενδεικτική θεμελίωση χερσαίας ανεμογεννήτριας

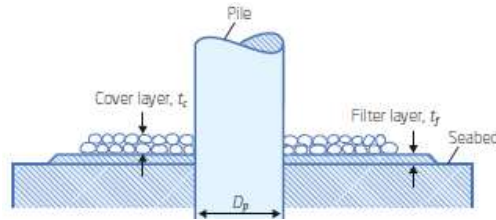
Το θεμέλιο, για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες, είναι ένα πολύπλοκο ζήτημα. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά σχέδια θεμελίωσης και η επιλογή είναι κομβική καθώς μεγάλο μέρος του αυξημένου κόστους που έχουν οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες οφείλεται στο θεμέλιο. Είναι τυπικά πάνω από 2,5 φορές πιο ακριβό συγκριτικά με τις χερσαίες κατασκευές και αντιστοιχεί στο ένα τρίτο περίπου του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος της θεμελίωσης για τις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες είναι αρκετοί. Μερικοί από αυτούς είναι: τα παλιρροϊκά ρεύματα, τα κύματα της θάλασσας, το έδαφος στον πυθμένα, οι ανεμολογικές συνθήκες και το βάθος. Ενδεικτικά, για θαλάσσιες ανεμογεννήτριες ισχύος 1 με 1,5 MW το κόστος θεμελίωσης εκτιμάται ότι αυξάνεται από 317.000 € για 7 μέτρα βάθος, στα 352.000 € για βάθος 16 μέτρα που σημαίνει αύξηση του κόστους κατά 11%. Ενώ τα έξοδα θεμελίωσης, με χρήση μονοπυλώνων (monopiles) μπορεί να διαφέρουν από 300.000 €/MW στα 15 μέτρα, σε 1.000.000 €/MW στα 40 μέτρα βάθος (Hvidtfeldt & Petersen, 2014), (Bilgili, Yasar, & Simsek, 2011), (Bilgili et al., 2011).

Το είδος του θεμελίου που χρησιμοποιείται στις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες, επίσης εξαρτάται από το βάθος του νερού. Έτσι, για βάθη έως και 30 μέτρα συνήθως χρησιμοποιούνται μονοπυλώνες monopiles, που είναι ουσιαστικά μια επέκταση του πύργου, ή βαρυτικές βάσεις. Για μεγαλύτερα βάθη, έως 60 μέτρα ή και περισσότερο συστήνονται σκληρότερες κατασκευές με πολλαπλούς πυλώνες και διευρυμένες βάσεις συμπεριλαμβανομένων tripods, jackets, και suction bucket support structures (Bilgili et al., 2011).



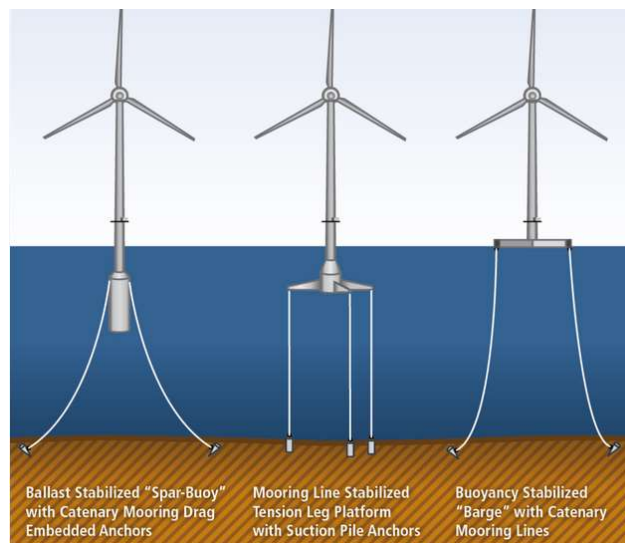
Εικόνα 13. Σχέδια θεμελίωσης θαλάσσιων ανεμογεννητριών (Ryan Wiser et al., 2011)

Ένας άλλος πολύπλοκος παράγοντας που επηρεάζει τη θεμελίωση είναι το έδαφος στον πυθμένα, το οποίο πολλές φορές δεν αποτελείται από στερεά υλικά. Έτσι, αρκετές φορές παρατηρείται το φαινόμενο μεγάλα κύματα άμμου να κινούνται κατά μήκος του βυθού υπό την επίδραση κυμάτων ή ρευμάτων. Αυτά μπορεί να έχουν μήκη κύματος της τάξης των 10-100 μέτρων και ύψη 0,5-5 μέτρα. Επομένως, για όλους τους τύπους θεμελίωσης υπάρχει σοβαρός κίνδυνος έκπλυσης. Η λύση που εφαρμόζεται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι η τοποθέτηση ενός στρώματος βράχων το οποίο περιβάλλει το θεμέλιο ώστε να αποτρέπει την κίνηση των υλικών του πυθμένα (Hvidtfeldt & Petersen, 2014).



Εικόνα 14. Προστασία κατά της έκπλυσης σε ένα monopile (Hvidtfeldt & Petersen, 2014)

Τέλος, παρόλο που οι βάσεις με πολλαπλούς πυλώνες επιτρέπουν τη θεμελίωση των ανεμογεννητριών σε βάθη 60 m ή και περισσότερο, δεν ενδείκνυνται για πολύ μεγαλύτερα βάθη. Η λύση που προτείνεται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι οι πλωτές ανεμογεννήτριες. Αυτές επιπλέουν στην επιφάνεια της θάλασσας και είναι αγκυρωμένες στον πυθμένα μέσω συρματοσχοινων (catenary guy wires, mooring lines, or taut tension legs). Οι πλωτές ανεμογεννήτριες περιπλέκουν ακόμα περισσότερο το σχεδιασμό των θαλάσσιων ανεμογεννητριών, λόγω της επιπλέον κίνησης της βάσης, αλλά αν καταφέρουν να γίνουν ανταγωνιστικές θα δώσουν πρόσβαση για εκμετάλλευση τεράστιας ποσότητας επιπλέον αιολικών πόρων, θα καταστήσουν τις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες σχεδόν ανεξάρτητες από τα βάθη και από τις συνθήκες του πυθμένα της θάλασσας και θα απλοποιήσουν τις διαδικασίες εγκατάστασης και απεγκατάστασης, συμβάλλοντας σημαντικά στη μείωση του κόστους αλλά και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με αυτά τα στάδια του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών (Ryan Wiser et al., 2011)(Bilgili et al., 2011).



Εικόνα 15 Σχέδια θεμελίωσης για πλωτές θαλάσσιες ανεμογεννήτριες (Ryan Wiser et al., 2011)

### 5.2.2 Πύργος ανεμογεννήτριας

Για την αύξηση του ύψους της πλήμνης, δηλαδή της απόστασης από το έδαφος μέχρι τον άξονα του ρότορα (το πιο συνηθισμένο μέτρο ύψους μιας ανεμογεννήτριας), από το έδαφος ώστε να φτάσει σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου και να επιτρέψει μεγαλύτερη διάμετρο ρότορα, χρησιμοποιείται μια κατασκευή πύργου (Andersen, 2015).

Οι περισσότεροι πύργοι σήμερα αποτελούνται από κυλινδρικούς κωνικούς χαλυβδοσωλήνες ή ατσάλωτες (έλασμα πάχους έως 150 mm, το οποίο τυλίγεται σε τμήματα σωλήνων που συγκολλούνται μεταξύ τους). Στη συνέχεια οι σωλήνες μεταφέρονται σε τμήματα και βιδώνονται στο εργοτάξιο. Η κάμψη και η συγκόλληση τέτοιων παχιών ελασμάτων είναι δύσκολη, έτσι οι σχεδιαστές εξετάζουν τώρα άλλα υλικά όπως το σκυρόδεμα ή ακόμη και το ξύλο (Vestas, 2006)(Hvidtfeldt & Petersen, 2014).

Εξαιρουμένης της θεμελίωσης, ο πύργος είναι το βαρύτερο τμήμα του στροβίλου και αντιστοιχεί στο 60% με 70% περίπου του συνολικού βάρους. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι χάλυβας (95-100%), αλουμίνιο (0-2%), χαλκός (0-1%) και πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (0-4%) (Andersen, 2015).

Οι πύργοι για τις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες δε διαφέρουν πολύ. Οι τροποποιήσεις περιλαμβάνουν: κατασκευαστικές αναβαθμίσεις ώστε να μπορεί ο πύργος να αντιμετωπίσει την επιπλέον φόρτιση των κυμάτων, ειδική επιφανειακή επεξεργασία κατά της διάβρωσης και πλατφόρμες πρόσβασης προσωπικού. Επιπλέον τα ύψη των πύργων είναι κάποιες φορές χαμηλότερα από αυτά που χρησιμοποιούνται στην ξηρά (αναλογικά με το μέγεθος του ρότορα), λόγω μειωμένων διατμητικών τάσεων του ανέμου (wind shear) στη θάλασσα σε σχέση με την ξηρά (Ryan Wisser et al., 2011).

Καθώς η τάση στις ανεμογεννήτριες πηγαίνει προς όλο και μεγαλύτερα πτερύγια, ο πύργος πρέπει να γίνει ψηλότερος αλλά και ευρύτερος, κατασκευασμένος από παχύτερα υλικά ώστε να μπορεί να αντέξει τις αυξημένες δυνάμεις που θα δέχεται. Ένας άλλος λόγος για ψηλότερους πύργους είναι ότι επιτρέπουν στο ρότορα να έχει πρόσβαση σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου (για δεδομένη τοποθεσία). Ο βασικότερος παράγοντας που καθορίζει το όριο στο ύψος του πύργου είναι το κόστος των υλικών, των μεγάλων γερανών που χρειάζονται για την τοποθέτηση και της μεταφοράς. Έρευνες γίνονται σε πολλά νέα σχέδια πύργου με στόχο να εξαλείψουν την ανάγκη των γερανών για μεγάλα ύψη και βάρη. Άλλες έρευνες εξετάζουν τη χρήση διαφορετικών υλικών όπως το σκυρόδεμα και ο υαλοβάμβακας, ή διαφορετικών σχεδίων όπως space-frame construction ή panel sections (Hvidtfeldt & Petersen, 2014)(Ryan Wisser et al., 2011).

### 5.2.3 Κουβούκλιο

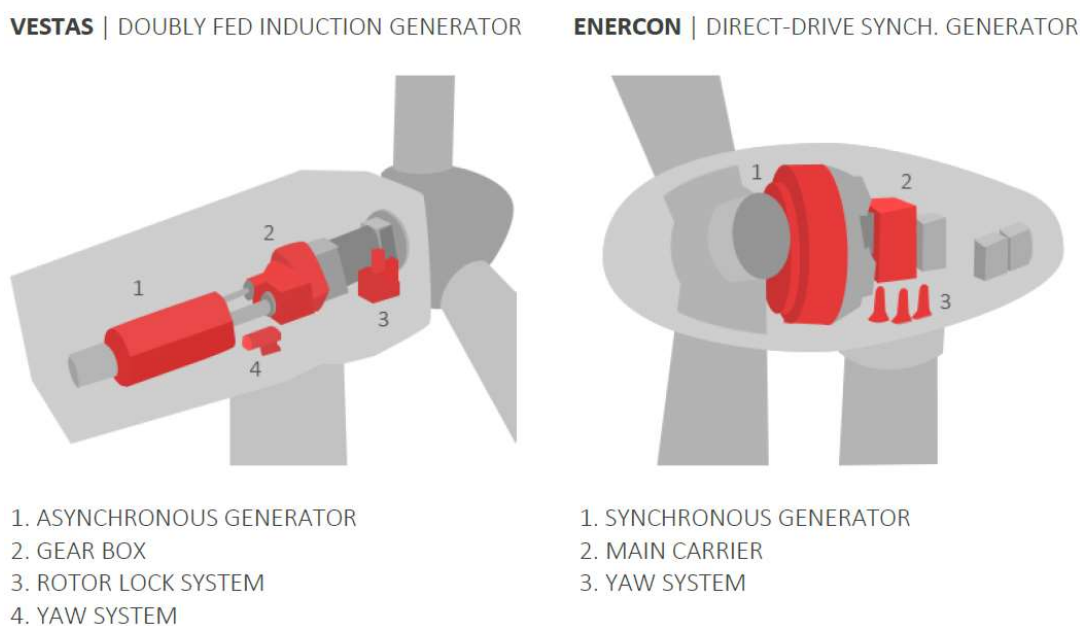
Το κουβούκλιο είναι τοποθετημένο στην κορυφή του πύργου και είναι το τμήμα που περιέχει τα απαιτούμενα μηχανικά μέρη τα οποία μετατρέπουν την ενέργεια περιστροφής των πτερυγίων του ρότορα σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα βασικά εξαρτήματα που συναντώνται είναι: η γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων (αν υπάρχει) και το σύστημα προσανατολισμού. Ωστόσο, τα ακριβή εξαρτήματα που βρίσκονται στο εσωτερικό του κουβουκλίου εξαρτώνται από τον κατασκευαστή και το σχεδιασμό. Ο εξοπλισμός είναι τοποθετημένος σε ένα χυτό πλαίσιο, που ονομάζεται κύριος φορέας, για να εξασφαλιστεί η σταθερή μηχανική συμπεριφορά. Το κάλυμμα γενικά είναι κατασκευασμένο από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού και η δομή



του υποστηρίζεται από μεταλλικό πλαίσιο. Τέλος, στα βορειότερα μέρη του κόσμου και γενικότερα στα μέρη με κρύα κλίματα, ο εξοπλισμός του κουβουκλίου είναι προφυλαγμένος από το κρύο και μπορεί ακόμη και να θερμαίνεται με ηλεκτρικά θερμαντικά στοιχεία (Andersen, 2015), (Vestas, 2006).

Η γεννήτρια συνήθως είναι είτε μια γεννήτρια επαγωγής η οποία λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα και κιβώτιο ταχυτήτων (για τη μετατροπή της αργής περιστροφής των πτερυγίων σε υψηλότερες ταχύτητες κατάλληλες για τη λειτουργία της γεννήτριας), ή μια γεννήτρια άμεσης κίνησης η οποία δε χρησιμοποιεί κιβώτιο ταχυτήτων, λειτουργεί με μεταβλητή ταχύτητα και συνδέεται άμεσα με την περιστροφή από τα πτερύγια (Polinder, Van Der Pijl, De Vilder, & Tavner, 2006)(Morris, 2011).

Στην εικόνα 16 φαίνονται οι διατομές δύο διαφορετικών απλοποιημένων σχεδίων κουβουκλίου. Η γεννήτρια του πρώτου σχεδίου (DFIG) είναι σταθερών στροφών και χρειάζεται κιβώτιο ταχυτήτων για τη λειτουργία της, ενώ η γεννήτρια του δεύτερου σχεδίου (DDSG) είναι άμεσης κίνησης και δεν υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων αλλά το μέγεθός της είναι αρκετά μεγαλύτερο. Γενικότερα η γεννήτρια άμεσης κίνησης είναι βαρύτερη και περιέχει μεγαλύτερες ποσότητες χαλκού. Τέλος και τα δύο σχέδια χρησιμοποιούν ένα σύστημα προσανατολισμού που διατηρεί το στροφέιο προσανατολισμένο προς την κατεύθυνση του ανέμου (Andersen, 2015)(Polinder et al., 2006).



**Εικόνα 16 Διατομή δύο διαφορετικών σχεδίων κουβουκλίου (Andersen, 2015).**

Η χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων επιτρέπει το μέγεθος της γεννήτριας που χρησιμοποιείται να είναι σχετικά μικρό και επιπλέον επιτρέπει την άμεση σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο. Ωστόσο, το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελείται από πολλά κινούμενα μέρη, τα οποία δέχονται ισχυρές δυνάμεις στις απότομες εναλλαγές του ανέμου με αποτέλεσμα να χρειάζεται συχνή συντήρηση, πολλές φορές ακόμα και αντικατάσταση (ιστορικά, αρκετές φορές κιβώτια ταχυτήτων έχουν αντικατασταθεί πριν να συμπληρώσουν τη διάρκεια ζωής για την οποία είχαν σχεδιαστεί) (Hvidtfeldt & Petersen, 2014).

Μια λύση στα παραπάνω προβλήματα, ιδιαίτερα σημαντικά για τις θαλάσσιες ανεμογεννήτριες όπου η συντήρηση και η αλλαγή του εξοπλισμού είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί, είναι οι γεννήτριες άμεσης κίνησης. οι οποίες χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες αντί για πηνία. Αυτές έχουν λιγότερα κινούμενα μέρη αφού δε χρησιμοποιούν κιβώτιο ταχυτήτων. Έτσι έχουμε ένα πολύ απλούστερο σύστημα κίνησης που απαιτεί λιγότερη συντήρηση και αναμένεται να είναι πιο αξιόπιστο. Ωστόσο υπάρχει η ανάγκη χρήσης μεγαλύτερου μεγέθους γεννήτριας για να πετύχουμε την ίδια ισχύ εξόδου και επιπλέον η συχνότητα του ρεύματος που παράγεται δεν ταιριάζει με τη συχνότητα του δικτύου, οπότε υπάρχει η ανάγκη χρήσης ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ώστε να γίνει η σύνδεση. Αυτό αυξάνει μεν το κόστος, αλλά ταυτόχρονα αποσυνδέει τη γεννήτρια από το δίκτυο και έτσι αποτρέπει την εισροή σφαλμάτων του δικτύου. Τέλος, οι γεννήτριες μόνιμων μαγνητών χρησιμοποιούν για μαγνήτες σπάνιες γαίες για τις οποίες εκφράζονται ανησυχίες ως προς το αν η προσφορά μπορεί να καλύψει τη ζήτηση για τις ανεμογεννήτριες, κάτι που αναμένεται να επηρεάσει τις τεχνολογικές εξελίξεις. Μια λύση που έχει προταθεί είναι η χρήση υπεραγωγίων πηνίων, καθώς πιστεύεται ότι μπορούν να παρέχουν μαγνητικά πεδία ακόμη δυνατότερα από αυτά των μόνιμων μαγνητών, ωστόσο η πρόκληση εδώ είναι η ενσωμάτωση του συστήματος ψύξης που απαιτείται (Goudarzi & Zhu, 2013), (Polinder et al., 2006), (Hvidtfeldt & Petersen, 2014).

Άλλα σχέδια που εξετάζονται είναι τα υβριδικά συστήματα κίνησης. Η βασική ιδέα είναι η μείωση όσο το δυνατόν περισσότερο των ταχυτήτων του κιβωτίου (1-2 ταχύτητες) και η χρήση γεννήτριας μόνιμων μαγνητών (χαμηλής ή μέσης ταχύτητας). Αυτό επιτρέπει τη χρήση μιας γεννήτριας που είναι σημαντικά μικρότερη και ελαφρύτερη και ταυτόχρονα μειώνει την εξάρτηση από το κιβώτιο ταχυτήτων. Μια άλλη ιδέα είναι η υδραυλική κίνηση, όπου υδραυλικές αντλίες, συσσωρευτές και κινητήρες αντικαθιστούν το κιβώτιο ταχυτήτων και τον ηλεκτρονικό μετατροπέα (Hvidtfeldt & Petersen, 2014)(Ryan Wisser et al., 2011).

Συνοψίζοντας, τα κυριότερα υλικά που συναντώνται στο κουβούκλιο είναι ο χάλυβας, ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο σίδηρος, GRP (για το κάλυμμα) και σε μικρότερες ποσότητες ηλεκτρονικά και λιπαντικά. Τα τελευταία χρόνια, έχει γίνει σύνηθες στο σχεδιασμό των γεννητριών να χρησιμοποιούνται μόνιμοι μαγνήτες αντί για ηλεκτρομαγνήτες, για τη μείωση του βάρους, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχουν μέταλλα σπάνιων γαιών (Andersen, 2015).

#### 5.2.4 Ρότορας

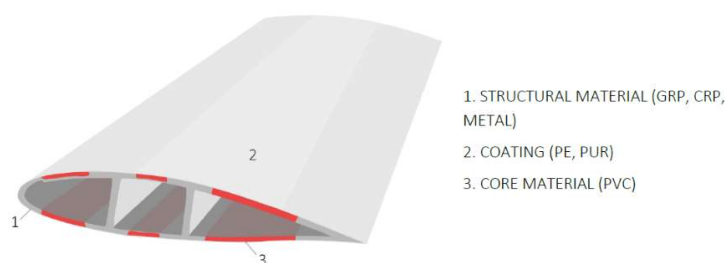
Ο ρότορας είναι το μέρος του στροβίλου που έχει σχεδιαστεί για να μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε περιστροφική ενέργεια για την κίνηση της γεννήτριας. Στις περισσότερες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται δύο ή τρία πτερύγια. Ανάλογα με τη γωνία προσβολής του ανέμου στο προφίλ του πτερυγίου, αυξάνει ή μειώνει η δύναμη της άνωσης και η περιστροφή του ρότορα αντίστοιχα. Έτσι, για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης οι περισσότερες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται με ρυθμιζόμενα πτερύγια ρότορα. Βέβαια εκτός από τη γωνία προσβολής, το πόση ενέργεια μπορεί να αντληθεί από τον άνεμο καθορίζεται και από την επιφάνεια σκουπίσματος των πτερυγίων. Η επιφάνεια σκουπίσματος είναι η επιφάνεια που σαρώνουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή του ρότορα. Έτσι, όσο μακρύτερα είναι τα πτερύγια τόσο μεγαλύτερη είναι και η δυνατότητά τους να αντλήσουν ενέργεια από τον άνεμο. Ο πιο αποτελεσματικός αεροδυναμικός σχεδιασμός επιτυγχάνεται σε συγκεκριμένο πάχος κατά μήκος του πτερυγίου. Ταυτόχρονα όμως τα πτερύγια πρέπει να είναι ανθεκτικά και να διατηρούν το σχήμα τους καθώς δέχονται τις ισχυρές δυνάμεις του ανέμου.

Πράγμα που σημαίνει ότι το χρησιμοποιούμενο υλικό πρέπει να είναι ανθεκτικό, σκληρό και ελαφρύ (Andersen, 2015)(Vestas, 2006).

Το πιο συνηθισμένο υλικό για πτερύγια ανεμογεννητριών είναι το GFRP (glass fiber reinforced plastic, πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού), καθώς έχει όλες τις ιδιότητες που αναφέρονται παραπάνω και είναι σχετικά φθηνό. Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (Carbon fiber reinforced plastic CFRP) είναι μια εναλλακτική λύση για το GFRP το οποίο είναι ακόμα ισχυρότερο, επομένως μπορούν να κατασκευαστούν ελαφρύτερα πτερύγια, αλλά είναι ακριβότερο. Επειδή η τάση στις ανεμογεννήτριες είναι η αύξηση του μήκους των πτερυγίων του ρότορα, το CFRP αναμένεται να χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στο μέλλον, αφού το μικρότερο βάρος σημαίνει λιγότερη πίεση στην υπόλοιπη κατασκευή (Andersen, 2015)(Wood, 2012).

Τα πτερύγια των θαλάσσιων ανεμογεννητριών δε διαφέρουν κατασκευαστικά από τα πτερύγια των χερσαίων. Οι κύριες διαφορές τους έχουν να κάνουν με το μέγεθος (οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες είναι συνήθως μεγαλύτερες από τις χερσαίες, άρα και τα πτερύγια) και με την επιφανειακή επεξεργασία, καθώς τα πτερύγια των θαλάσσιων ανεμογεννητριών υπόκεινται σε διπλάσια διάβρωση, σε σχέση με τις χερσαίες, λόγω των αερολυμάτων θαλάσσιου αλατιού στον αέρα. Μια άλλη διαφορά που συναντάται είναι οι μεγαλύτερες ταχύτητες ακροπτερυγίου, αφού ο θόρυβος δεν αποτελεί πρόβλημα στη θάλασσα (Hvidtfeldt & Petersen, 2014)(Ryan Wisser et al., 2011).

Τα περισσότερο διαδεδομένα υλικά πτερυγίων σήμερα είναι GFRP (80-95%), CFRP (0-10%), πλαστικά (0-15%), χάλυβας (2-9%) και αλουμίνιο (0-1%) (Andersen, 2015).



Εικόνα 17. Διατομή τυπικού πτερυγίου ανεμογεννήτριας (Andersen, 2015).

## 6 Υλικά κατασκευής -έμφαση στα πτερυγία

Καθώς στοχεύουμε σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα, η συμμετοχή της αιολικής ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά. Ωστόσο, οι πόροι που απαιτούνται για την κατασκευή καθώς και το στάδιο του τέλους ζωής των ανεμογεννητριών είναι κάτι που χρειάζεται προσοχή. Εξάλλου, στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας, τα υλικά που ενσωματώνονται στις ανεμογεννήτριες αποτελούν τους πόρους του μέλλοντος. Για το ατσάλι, το αλουμίνιο και το χαλκό, οι τεχνολογίες ανακύκλωσης είναι ήδη διαθέσιμες. Δεν ισχύει το ίδιο όμως για τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων και της βάσης, όπου δεν υπάρχουν ακόμα οικονομικά αποδοτικές λύσεις και δευτερογενής αγορά. Για τις σπάνιες γαίες οι τεχνολογίες ανακύκλωσης βρίσκονται ακόμα υπό εξέλιξη, ενώ τα στοιχεία που βρίσκονται στο έδαφος είτε στον πυθμένα της θάλασσας (καλώδια, μονοριπές), αν και περιέχουν μέταλλα για τα οποία υπάρχει ζήτηση στην αγορά, δεν συλλέγονται. Τα κύρια υλικά που συναντάει κάποιος σε μια ανεμογεννήτρια αναφέρθηκαν ήδη στο προηγούμενο κεφάλαιο και αναλύονται περεταίρω στο παρόν. Η ανάλυση βασίζεται σε ελεύθερη μετάφραση από σχετική βιβλιογραφία (Βοπου, 2016).

### Σίδηρος

Ο σίδηρος είναι το μέταλλο που χρησιμοποιείται περισσότερο στον κόσμο σήμερα (3 φορές περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο μέταλλο). Ενώ το 98% των σιδηρομεταλλευμάτων που εξορύσσονται χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ατσαλιού. Όσον αφορά την ανακύκλωση, το ποσοστό συλλογής και ανάκτησης για το ατσάλι παγκόσμια είναι 83%, ενώ για τον τομέα των κατασκευών είναι περίπου 90%. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη το εύρος των σημερινών εφαρμογών, η ζήτηση για ατσάλι είναι μεγαλύτερη από την προσφορά

### Χαλκός

Ο χαλκός είναι ο καλύτερος ηλεκτρικός και θερμικός αγωγός, μετά το ασήμι. Αλλά το πρόβλημα που υπάρχει εδώ, όπως και με το χάλυβα, είναι ότι η ζήτηση ξεπερνάει την προσφορά. Το ίδιο ισχύει και για τη ζήτηση ανακυκλωμένου χαλκού. Το 2016 η συλλογή χαλκού για ανακύκλωση έχει ποσοστό 45% κατά μέσο όρο.

### Αλουμίνιο

Το μέταλλευμα με την περισσότερη περιεκτικότητα σε αλουμίνιο ( $Al_2O_3$ ) είναι ο βωξίτης (31-52%). Η απελευθέρωση του αλουμινίου από το μέταλλευμα απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια. Σε κάποιες εφαρμογές το αλουμίνιο μπορεί να αντικαταστήσει το χαλκό, ανάλογα με την κατάσταση της αγοράς. Η ανακύκλωση αλουμινίου από τα απόβλητα κατεδάφισης κυμαίνεται αρκετά, δηλαδή από 15% στη Βόρεια Αμερική έως 90% στην Ευρώπη, ανάλογα με το πόσο εύκολο είναι να διαχωριστεί. Η διαθέσιμη ποσότητα αλουμινίου προς ανακύκλωση καλύπτει περίπου το 30-40% της ζήτησης, ενώ και σε αυτή την περίπτωση η προσφορά υστερεί από τη ζήτηση.

### Σπάνιες γαίες

Οι σπάνιες γαίες χρησιμοποιούνται στα συστήματα άμεση κίνησης για γεννήτριες μόνιμων μαγνητών. Το ποσοστό συλλογής σπάνιων γαιών για ανακύκλωση είναι μόλις 1% και το ποσοστό ανάκτησης έχει μεγάλη διακύμανση, αναλόγως τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία.

Μελέτες δηλώνουν ότι η αποδοτικότητα ανακύκλωσης για τους μόνιμους μαγνήτες θα μπορούσε να φτάσει το 55% ως το 2020.

### Σύνθετα πολυμερή

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι φτιαγμένα κυρίως από ρητίνες ενισχυμένες με ίνες γυαλιού και ξύλο. Σε αντίθεση με τα μέταλλα δεν υπάρχουν αυτή τη στιγμή οικονομικά βιώσιμες τεχνολογίες ανακύκλωσης ούτε δευτερογενής αγορά. Οι τεχνολογίες που ερευνώνται είναι κυρίως η μηχανική, η θερμική και η χημική επεξεργασία, ενώ το βασικό πρόβλημα που υπάρχει είναι η αδυναμία των ινών που προκύπτουν από τη διαδικασία της ανακύκλωσης να διατηρήσουν τις αρχικές τους μηχανικές ιδιότητες.

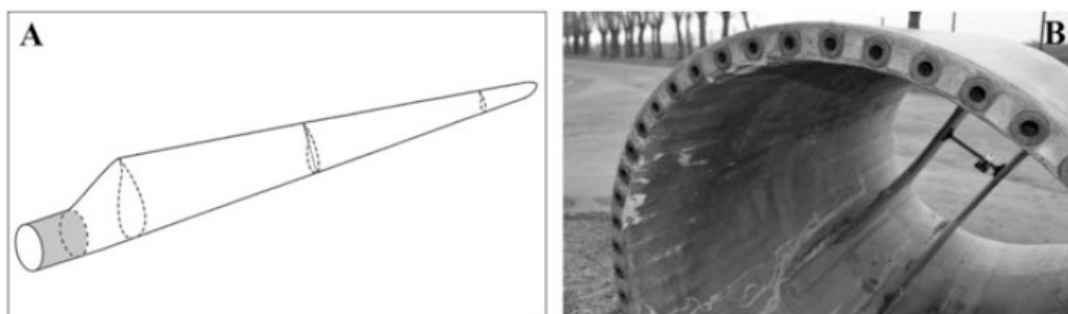
### Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα, το οποίο χρησιμοποιείται για τη θεμελίωση, είναι και αυτό σύνθετο υλικό με κύριο συστατικό το τσιμέντο. Σχεδόν 95% του τσιμέντου χρησιμοποιείται για την παραγωγή σκυροδέματος. Όπως και ο χάλυβας χρησιμοποιείται κυρίως στον κατασκευαστικό τομέα. Το ανακτηθέν υλικό από την ανακύκλωση σκυροδέματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές υλικό στον κατασκευαστικό τομέα, συνήθως στην οδοποιία και στη βιομηχανία τσιμέντου. Το περιεχόμενο ανακυκλωμένου σκυροδέματος ως αδρανές υλικό είναι περίπου 7% στην Ευρώπη.

## 6.1 Σύνθετα υλικά πτερυγίων

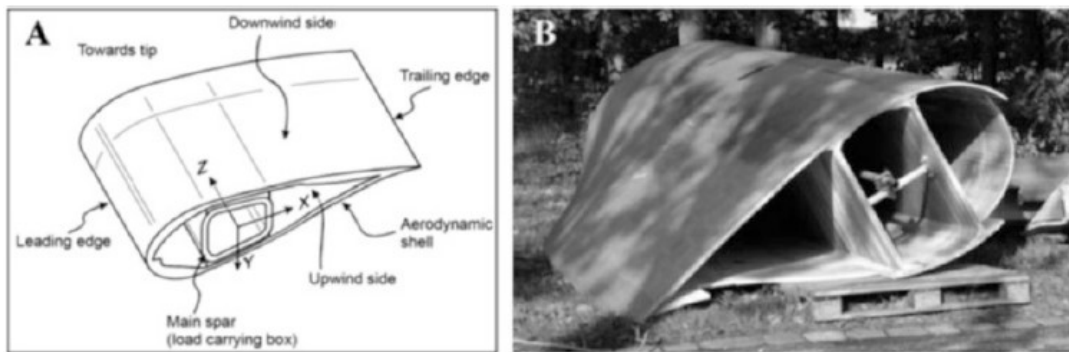
Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι μια σύνθετη κατασκευή, η οποία αποτελείται από διάφορα υλικά με διαφορετικές ιδιότητες (WindEurope, 2017a).

Ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας χωρίζεται σε δύο τμήματα: τη ρίζα, που είναι το τμήμα του πτερυγίου που συνδέεται με το στρόβιλο και το αεροδυναμικό μέρος. Η ρίζα είναι ένα σωληνοειδές με κυκλικό σχήμα και το σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται για αυτό το τμήμα είναι ένα παχύ πολυστρωματικό φύλλο από ίνες γυαλιού. Στην εικόνα 17 φαίνεται το τμήμα της ρίζας από ένα πτερύγιο 25,8 m. Έχει διάμετρο 1675 mm και πάχος 80 mm (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).



Εικόνα 18. Το τμήμα της ρίζας ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

Το αεροδυναμικό τμήμα συνήθως αποτελείται από δύο αεροδυναμικά κελύφη τα οποία είναι συγκολλημένα στις άκρες και πάνω σε μια κατασκευή η οποία είναι υπεύθυνη για την απορρόφηση των τάσεων και την στήριξη των κελυφών (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).



Εικόνα 19. Τομή πτερυγίου (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών κατασκευάζονται συνήθως από συνεχή πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP). Οι ίνες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως από E-glass, οι οποίες είναι σχετικά φθηνές και συνδυάζουν μεγάλη αντοχή (1500-2500 MPa) και ακαμψία (72-76 GPa). Η διάμετρος των ινών κυμαίνεται μεταξύ 8 και 30  $\mu\text{m}$ . Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται είναι θερμοσκληρυνόμενες όπως εποξικές, πολυεστερικές ή βινυλεστερικές. Για τα στηρίγματα του πτερυγίου χρησιμοποιούνται κατασκευές τύπου σάντουιτς, οι οποίες αποτελούνται από μονοαξονικά ή πολυαξονικά σύνθετα ελάσματα από ίνες γυαλιού, μαζί με ξύλο balsa ή αφρό χλωριούχου πολυβινυλίου (PVC). Οι επιφάνειες προστατεύονται από στρώματα γέλης και πολυουρεθάνες. Θερμοπλαστικά φύλλα ή ειδικές μπογιές χρησιμοποιούνται στα χείλη προσβολής. Αναλογικά, το GFRP αποτελεί τα δύο τρίτα του συνολικού βάρους του πτερυγίου. Ενδεικτικά ένα πτερύγιο μήκους 40 μέτρων, ζυγίζει περίπου 8,4 τόνους (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016)(Beauson et al., 2014).

Η κύρια τάση στην ανάπτυξη των ανεμογεννητριών είναι η αύξηση του μεγέθους, με κίνητρο τη μείωση του κόστους της ενέργειας. Έτσι πηγαίνουμε προς όλο και περισσότερο βελτιστοποιημένα σχέδια που το χαμηλό βάρος είναι το κύριο μέλημα. Τα μακρύτερα πτερύγια εκτρέπονται περισσότερο, οπότε η ακαμψία της κατασκευής έχει καθοριστική σημασία. Επιπλέον, επειδή οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται για διάρκεια ζωής 20 με 25 χρόνια, που σημαίνει πάνω από 100 εκατομμύρια κύκλους φόρτισης, η αντοχή σε κόπωση των υλικών είναι μείζονος σημασίας. Ενίσχυση με ίνες άνθρακα βοηθάει στο να κρατηθεί χαμηλά το βάρος κυρίως στα μακρύτερα πτερύγια, αλλά επίσης υβριδικά σύνθετα με μίξη από ίνες γυαλιού και ίνες άνθρακα θα είναι πιο σύνηθες στο μέλλον (Beauson et al., 2014)(Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017).

Γενικότερα τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται λόγω του ότι συνδυάζουν υψηλή αντοχή στον εφελκυσμό με χαμηλή πυκνότητα (υψηλή αναλογία αντοχής σε σχέση με το βάρος), έχουν υψηλή αντοχή σε κόπωση και αντίσταση στη διάβρωση και στην ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα ενώ ταυτόχρονα μπορούν εύκολα να συνδυαστούν με άλλα εξαρτήματα για τη βελτίωση της απόδοσης της κατασκευής (προστατευτικά κεραυνών, προστασία πρόσθιων άκρων, συστήματα θέρμανσης). Τέλος, η επιλογή των υλικών καθορίζεται από τις γενικότερες αλλαγές στο σχεδιασμό και τις ιδιαίτερες ανάγκες γεωγραφικών τοποθεσιών με πιο εχθρικές περιβαλλοντικές συνθήκες (WindEurope, 2017a).

Οι ενεργές περιοχές στην έρευνα των υλικών περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση του σχηματισμού χημικών δεσμών μέσω της διαδικασίας σκλήρυνσης, την ενσωμάτωση αυτοματοποιημένων διαδικασιών παραγωγής για την εξασφάλιση σταθερών ποιοτικών

ιδιοτήτων, την εισαγωγή ναο-εξαρτημάτων ως ενισχυτικών παραγόντων στο πλέγμα των ινών, τη διερεύνηση υβριδικών σύνθετων συνδυάζοντας ίνες γυαλιού υψηλής απόδοσης, ίνες άνθρακα και άλλες ίνες, τη διερεύνηση ανθεκτικών υλικών επικάλυψης για την εξασφάλιση αντοχής στη διάβρωση (π.χ. ζελατίνες, συστήματα βαφής και ταινίες), την προώθηση εναλλακτικών μεθόδων κατασκευής για ίνες άνθρακα για τη μείωση του κόστους (δεδομένου ότι παρέχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και είναι οικονομικά ελκυστικότερες για να ανακυκλωθούν σε σύγκριση με τις ίνες γυαλιού) και τη γενικότερη έρευνα εναλλακτικών υλικών τα οποία είναι ανακυκλώσιμα (π.χ. θερμοπλαστικά, κυτταρινικές ίνες και βιορευσίνες) (WindEurope, 2017a).

Τα σύνθετα υλικά που υπάρχουν σε ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας είναι ένας συνδυασμός από ίνες και πολυμερή, γνωστά και ως σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες (FRP). Το 60-70% κατά βάρος είναι η περιεκτικότητα σε ίνες και το 30-40% η περιεκτικότητα σε ρητίνες (WindEurope, 2017a).

### 6.1.1 Ίνες

#### Ίνες γυαλιού και ίνες άνθρακα

Η ακαμψία των σύνθετων υλικών προσδιορίζεται από την ακαμψία των ινών που χρησιμοποιούνται και την περιεκτικότητά τους σε όγκο. Τυπικά, οι ίνες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πτερυγίων είναι ίνες από E-glass (ηλεκτρικό γυαλί), λόγω της υψηλής του αντίστασης στον ηλεκτρισμό. Αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε όγκο των ινών στα μονής κατεύθυνσης σύνθετα υλικά, η ακαμψία, η αντοχή σε εφελκυσμό και η αντοχή σε θλίψη αυξάνονται αναλογικά. Ωστόσο σε πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε ίνες, πάνω από 65%, μπορεί να υπάρχουν ξηρές περιοχές χωρίς ρητίνη μεταξύ των ινών με αποτέλεσμα η αντοχή σε κόπωση του σύνθετου υλικού να μειώνεται. Τυπικά, τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια ανεμογεννητριών περιέχουν μέχρι και 75% κατά βάρος γυαλί (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017).

Έχουν γίνει πολλές έρευνες για την ανάπτυξη ινών, οι οποίες είναι πιο δυνατές από τις ίνες E-glass. Αυτές περιλαμβάνουν ίνες γυαλιού με τροποποιημένες συνθέσεις (S-glass, R-glass, κλπ), ίνες άνθρακα, βασάλτη και αραμιδικές ίνες. Παρόλο που οι ίνες αυτές σπάνια χρησιμοποιούνται στην πράξη, αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη πηγή σύνθετων υλικών.

Οι ίνες άνθρακα συγκεκριμένα θεωρούνται μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λόγω της πολύ μεγαλύτερης ακαμψίας και της χαμηλής πυκνότητας, επιτρέποντας την κατασκευή λεπτότερων πιο σκληρών και ελαφρύτερων πτερυγίων σε σχέση με τις ίνες από γυαλί. Ωστόσο, έχουν σχετικά χαμηλή αντοχή σε βλάβες, χαμηλή αντοχή σε θλίψη και κόπωση και είναι αρκετά ακριβότερες. Επιπλέον τα σύνθετα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα είναι ευαίσθητα στην κακή ευθυγράμμιση και στον κυματισμό των ινών, ακόμη και οι μικρές μετατοπίσεις οδηγούν στην ισχυρή μείωση της αντοχής σε θλίψη και κόπωση. Ίνες άνθρακα ήδη χρησιμοποιούνται από κάποιες εταιρίες για την κατασκευή πτερυγίων και αναμένεται να χρησιμοποιηθούν περισσότερο στο μέλλον (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017).

#### Αραμιδικές ίνες και ίνες βασάλτη

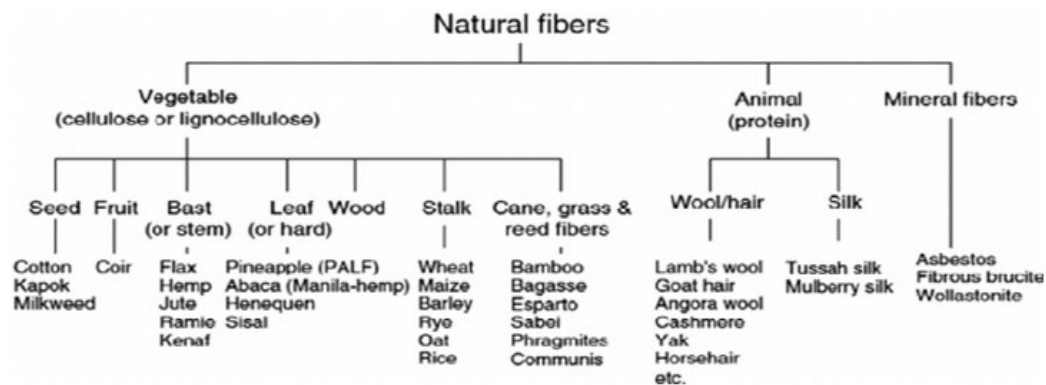
Μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση είναι η χρήση ινών από αραμίδιο ή βασάλτη. Οι ίνες αραμιδίου (αρωματικό πολυαμίδιο) παρουσιάζουν υψηλή μηχανική αντοχή και ακαμψία και

είναι ανθεκτικές σε καταστροφές. Ωστόσο έχουν χαμηλή αντοχή σε θλίψη, χαμηλή προσκόλληση στις πολυμερείς ρυτίνες, απορροφούν υγρασία και αποικοδομούνται από την υπεριώδη ακτινοβολία (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017).

Οι ίνες από βασάλτη παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες, είναι 30% ισχυρότερες, 15-20% σκληρότερες και 8-10% ελαφρύτερες από τις ίνες E-glass. Επιπλέον είναι φθηνότερες από τις ίνες άνθρακα (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017).

### Φυσικές ίνες

Οι φυσικές ίνες έχουν γίνει μια δημοφιλής ενίσχυση για τα σύνθετα υλικά, λόγω των επιθυμητών ιδιοτήτων τους. Τα πλεονεκτήματα των φυσικών ινών είναι το χαμηλό κόστος, οι αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες, η υψηλή ειδική δύναμη, η μη διαβρωσιμότητα και η διαθεσιμότητα. Επιπλέον, οι φυσικές ίνες είναι βιοδιασπώμενες και φιλικές προς το περιβάλλον. Τα μειονεκτήματα είναι οι μεταβολές της ποιότητας, η υψηλή πρόσληψη υγρασίας και η χαμηλή θερμική σταθερότητα των ακατέργαστων ινών. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φυσικών ινών που εξάγονται από φυτά, ζώα και ορυκτά. Μερικές από τις φυσικές ίνες είναι το σιζάλ, το λινάρι ή κάνναβη, το μπαμπού, ο κοκοφοίνικας και η γιούτα. (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017)(Thomas & Ramachandra, 2018).



Εικόνα 20. Ταξινόμηση των φυσικών ινών (Thomas & Ramachandra, 2018).

Το μπαμπού είναι ένα υλικό με υψηλές προοπτικές ως ενισχυτής στα σύνθετα πολυμερή. Έχει 60% κυτταρίνη στην οποία οφείλονται οι καλές του μηχανικές ιδιότητες και υψηλή περιεκτικότητα σε λιγνίνη. Έρευνες έχουν δείξει ότι η ενίσχυση με μπαμπού έχει ισοδύναμα χαρακτηριστικά με τις ίνες από γυαλί. Οι βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες έχουν παρατηρηθεί σε περιεκτικότητα 30% μπαμπού στο σύνθετο υλικό. Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ότι το σύνθετο υλικό με μπαμπού έχει μικρότερη απορρόφηση νερού από αυτό χωρίς την προσθήκη μπαμπού (Thomas & Ramachandra, 2018)(Zakikhani, Zahari, Sultan, & Majid, 2014).

Για τα σύνθετα από ίνες κοκοφοίνικα, τα αποτελέσματα καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι ιδιότητές τους (εφελκυσμός, κρούση, διάτμηση, κάμψη και αντοχή σε συμπίεση) είναι παρόμοιες με τις ιδιότητες του ξύλου, αλλά κατώτερες από αυτές των σύνθετων με ίνες γυαλιού. Επιπλέον υπάρχει περιβαλλοντική επίδραση στα σύνθετα ινών κοκοφοίνικα, όπου παρατηρείται μείωση στις μηχανικές ιδιότητες και αυξανόμενο χρόνο διάβρωσης (Thomas & Ramachandra, 2018).



Οι ίνες λίνου έχουν υψηλή ειδική αντοχή (σε σχέση με το βάρος) σε σύγκριση με άλλες φυσικές ίνες και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες όταν συνδυάζονται με πολυμερή. Ωστόσο στις ίνες λίνου παρατηρείται αποκόλληση που οφείλεται σε ρωγμές των ινών, το οποίο αποτελεί μειονέκτημα για τη χρήση τους στα σύνθετα υλικά για πτερύγια ανεμογεννητριών (Thomas & Ramachandra, 2018).

Τέλος επειδή η απορρόφηση υγρασίας αποτελεί μείζον μειονέκτημα για τις φυσικές ίνες συνήθως απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία των ινών, όπως είναι η επιφανειακή επεξεργασία. Η επιφανειακή επεξεργασία βελτιώνει τη διαβρεξιμότητα της επιφάνειας των ινών έτσι ώστε να επιτευχθεί καλύτερη σύνδεση με το πολυμερές και επομένως να υπάρχει αποτελεσματική μεταφορά των τάσεων μεταξύ των ινών και της ρητίνης (Thomas & Ramachandra, 2018).

### **Υβριδικά σύνθετα υλικά**

Η ενίσχυση των σύνθετων υλικών εκτός από καθαρό γυαλί ή άνθρακα μπορεί να γίνει εναλλακτικά με μίξη ινών (π.χ E-glass με άνθρακα, E-glass με αραμίδιο κτλ). Λόγω της ανάγκης για όλο και ελαφρύτερα πτερύγια η έρευνα σε υβριδικά σύνθετα υλικά είναι επικρατέστερη. Αναλύσεις στο πεδίο εφαρμογής των υβριδικών σύνθετων από γυαλί και άνθρακα σε πτερύγια ανεμογεννητριών καταλήγουν ότι το υβριδικό υλικό παρουσιάζει θετικότερη συμπεριφορά υπό στατικά φορτία εφελκυσμού και κόπωσης σε σχέση με το έλασμα από καθαρό άνθρακα ή γυαλί. Επιπλέον, η ενσωμάτωση ινών γυαλιού σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα επιτρέπει τη βελτίωση των ιδιοτήτων πρόσκρουσης και της εφελκυστικής τάσης σε αποτυχία των ινών άνθρακα. Αυτή τη στιγμή το μεγαλύτερο πτερύγιο ανεμογεννήτριας (88.4 m), κατασκευάζεται από υβριδικές ίνες γυαλιού και άνθρακα (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017)(Thomas & Ramachandra, 2018).

Ωστόσο, η αντοχή των υβριδικών σύνθετων υλικών μπορεί κάτω από κάποιες συνθήκες να είναι μικρότερη από την αντοχή σύνθετων από καθαρό άνθρακα ή γυαλί. Το μειονέκτημα αυτού του υβριδικού σύνθετου είναι η δυσκολία στη μετατροπή των υψηλών ιδιοτήτων των ινών από άνθρακα όπως η ακαμψία, η αντοχή και η συμπεριφορά σε κόπωση στις ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Έτσι, ενώ τα υβριδικά σύνθετα φαίνεται να είναι μια πολύ υποσχόμενη ομάδα σύνθετων υλικών για την αιολική ενέργεια, απαιτούνται επιπρόσθετες έρευνες για τη βέλτιστη σύνθεση των υλικών (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017)(Thomas & Ramachandra, 2018).

Τέλος, υβριδικά σύνθετα ενισχυμένα με φυσικές ίνες παρουσιάζουν ιδιότητες που είναι κατάλληλες για εφαρμογές μικρού βάρους και χαμηλών φορτίων. Ωστόσο απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία ώστε να αυξηθεί η πρόσφυση μεταξύ των ινών και της μήτρας (Thomas & Ramachandra, 2018).

### **6.1.2 Μήτρες**

Οι μήτρες για τα σύνθετα υλικά των ανεμογεννητριών είναι συνήθως θερμοσκληραινόμενα (εποξικά, πολυεστέρες, βινυλεστέρες κ.α), ή πιο σπάνια θερμοπλαστικά υλικά.

### **Θερμοσκληρυντές**

Το 80% περίπου των σύνθετων υλικών στην αγορά βασίζονται σε θερμοσκληρυντές. Τα πλεονεκτήματα των θερμοσκληρυντών είναι η υψηλή αντοχή, η ακαμψία και η ευκολία της κατεργασίας. Δυνατότητα χαμηλής θερμοκρασίας κατεργασίας και ύπαρξης χαμηλότερου

ιξώδους το οποίο διευκολύνει την έγχυση, επιτρέποντας υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας. Τα μειονεκτήματα των θερμοσκληρυντών είναι οι εκπομπές στυρενίου κατά την επεξεργασία και η μη ανακυκλωσιμότητά τους μετά το τέλος ζωής. Αρχικά οι ρητίνες που χρησιμοποιήθηκαν για τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων ήταν πολυεστερικές όμως με την ανάπτυξη όλο και μεγαλύτερων ανεμογεννητριών, οι εποξειδικές ρητίνες αντικατέστησαν τον πολυεστέρα και τώρα χρησιμοποιούνται συχνότερα ως μήτρες για τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων ανεμογεννητριών. Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες υποστηρίζουν επιχειρήματα για την επιστροφή σε ακόρεστες πολυεστερικές ρητίνες, μεταξύ των οποίων είναι οι ταχύτεροι χρόνοι κύκλου παραγωγής και η βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση κατά την παραγωγή, δηλώνοντας ότι οι νέοι πολυεστέρες πληρούν όλες τις απαιτήσεις αντοχής και ανθεκτικότητας για μεγάλες ανεμογεννήτριες. Γενικότερα, η ανάπτυξη υλικών μήτρας που σκληραίνουν ταχύτερα και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες είναι ένας σημαντικός ερευνητικός χώρος (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017)(Thomas & Ramachandra, 2018).

### **Θερμοπλαστικά**

Μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική για τις θερμοσκληρυνόμενες μήτρες είναι τα θερμοπλαστικά. Με κύριο πλεονέκτημά να είναι η ανακυκλωσιμότητά τους. Άλλα πλεονεκτήματα των θερμοπλαστικών περιλαμβάνουν την μεγαλύτερη επιμήκυνση κατά τη θραύση, την δυνατότητα αυτόματης επεξεργασίας και την απεριόριστη διάρκεια ζωής των πρώτων υλών. Τα μειονεκτήματα των θερμοπλαστικών είναι η ανάγκη υψηλών θερμοκρασιών επεξεργασίας (προκαλώντας την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και ενδεχομένως επηρεάζοντας τις ιδιότητες των ινών) και οι δυσκολίες στην κατασκευή μεγάλων (πάνω από 2 m) και παχιών (πάνω από 5 mm) εξαρτημάτων, λόγω του πολύ υψηλότερου ιξώδους. Ενδεικτικά το ιξώδες τήγματος των θερμοπλαστικών μητρών είναι της τάξης των 102-103 Pa s, ενώ εκείνο για τη θερμοσκληρυνόμενη μήτρα είναι περίπου 0,1-10 Pa s. Επιπλέον παρόλο που η αντοχή σε θραύση των θερμοπλαστικών είναι μεγαλύτερη από αυτή των θερμοσκληρυντών, η συμπεριφορά κόπωσης των θερμοπλαστικών δεν είναι γενικά τόσο καλή όσο τα θερμοσκληρυνόμενα τόσο με ίνες άνθρακα όσο και με ίνες γυαλιού. Σε έρευνες που έγινε σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων πολυπροπυλενίου ενισχυμένο με ίνες και εποξικής ρυτίνης ενυσχιμένης με ίνες κατέληξαν ότι το θερμοπλαστικό έχει 7 με 8 φορές λιγότερη αντοχή. Ωστόσο, χρήση εναλλακτικών θερμοπλαστικών όπως το πολυαιθεριμίδιο (PEI), η πολυαιθεροθερκετόνη (PEEK) και το πολυφαινυλενοσουλφίδιο (PPS) παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017)(Thomas & Ramachandra, 2018).

### **Πολυμερή και νανοσύνθετα υλικά**

Έχουν γίνει αρκετές έρευνες οι οποίες δείχνουν ότι με την προσθήκη νανοτεχνολογίας στη μήτρα μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Οι προσθήκες μικρής ποσότητας (σε ποσοστό 0,5% κατά βάρος) νανομηχανικών υλικών (νανοσωλήνες άνθρακα ή νανοπηλός) στο πολυμερές πλέγμα των σύνθετων υλικών, στην επιφανειακή επεξεργασία των ινών ή μεταξύ των στρώσεων του σύνθετου υλικού μπορούν να επιτρέψουν την αύξηση της αντοχής σε κόπωση και σε θραύση των σύνθετων υλικών κατά 30-80% (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017).

Οι νανοσωλήνες άνθρακα που διασκορπίζονται ομοιόμορφα στη ρητίνη, προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως υψηλή ακαμψία και ανθεκτικότητα, σε σύγκριση για την αρχική ρητίνη.

Ωστόσο, οι ιδιότητές τους και οι επιδόσεις τους σχετίζονται άμεσα με το μέγεθος, τη δομή και τις διεπιφανειακές αλληλεπιδράσεις. Το CNT τείνει να συσσωρεύεται λόγω των ισχυρών δεσμών μεταξύ των στρωμάτων, πράγμα που οδηγεί σε κακή διασπορά και αστάθεια στη μήτρα του πολυμερούς. Μέθοδοι όπως η επεξεργασία με υπερήχους, η επιφανειακή τροποποίηση, η ομοιοπολική λειτουργικοποίηση και μη ομοιοπολική τροποποίηση χρησιμοποιώντας μικρά μόρια και πολυμερή διασκορπιστικά χρησιμοποιούνται για να ξεπεράσουν την κακή διασπορά και την αστάθεια. Πτερύγια ανεμογεννήτριας από ενισχυμένη πολυουρεθάνη με CNT που έχουν κατασκευαστεί και δοκιμαστεί, δείχνουν καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα συμβατικά πτερύγια ανεμογεννητριών (Thomas & Ramachandra, 2018).

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταφορά των βελτιωμένων ιδιοτήτων που έχουν τα πολυμερή-νανοσύνθετα (χωρίς οπλισμό με ίνες) ως υλικά μήτρας σε ελάσματα ενισχυμένα με ίνες παραμένει ένα ζήτημα καθώς, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι βελτιώσεις από τη χρήση νανο-τροποποιημένων πολυμερών ως μήτρες (π.χ. για βελτιωμένη αντοχή ή ανθεκτικότητα) έρχονται με εγγενώς χαμηλότερες τιμές ιδιοτήτων σε άλλες περιοχές (π.χ. θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου) που περιορίζουν τη δυνατότητα επεξεργασίας ή την εφαρμογή των νανο-τροποποιημένων πολυμερών. Έχει αποδειχθεί σε αριθμητικές μελέτες ότι τα κέρδη κατά τη διάρκεια ζωής των σύνθετων υλικών δικαιολογούν πρόσθετες επενδύσεις για την παραγωγή πτερυγίων ανεμογεννητριών από υβριδικά και νανοανθεκτικά σύνθετα υλικά. Ακόμα όμως, παραμένουν πολλές πρακτικές και οικονομικές προκλήσεις πριν να χρησιμοποιηθεί η νανοτεχνολογία στις ανεμογεννήτριες (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017).

### 6.1.3 Επιφανειακή επεξεργασία

Οι ίνες για σύνθετα υλικά εφαρμόζονται με μια επιφανειακή επεξεργασία η οποία είναι ένα μίγμα διαφόρων χημικών ουσιών συνήθως, αλλά όχι απαραίτητα, αραιωμένων σε νερό, με το οποίο καλύπτονται οι ίνες. Η επιφανειακή επεξεργασία έχει πολλές λειτουργίες και αυτό εξηγεί γιατί συχνά είναι ένα πολύ σύνθετο μίγμα συστατικών. Τυπικά αποτελείται από ένα ή περισσότερα πολυμερικά συστατικά, ένα παράγοντα σύζευξης, ένα λιπαντικό και μια σειρά πρόσθετων (τασιενεργά, πλαστικοποιητές, αντιστατικοί παράγοντες, ενισχυτές προσκόλλησης, αντι-αφροί, τροποποιητές ρεολογίας, κλπ). Αυτό το μίγμα εφαρμόζεται συνήθως στην ίνα σε μια μάλλον αραιή υδατική μορφή (τα στερεά είναι μεταξύ 5 και 15%) και η εφαρμογή συμβαίνει κατά τη διάρκεια ή αμέσως μετά την κατασκευή (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017)[66].

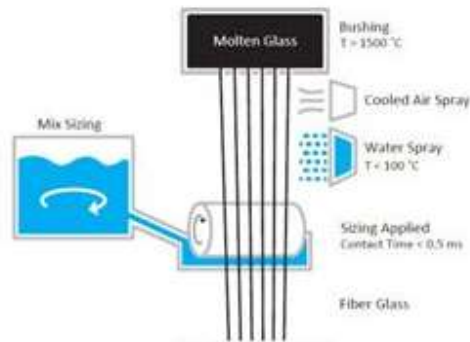
Η ιδανική επιφανειακή επεξεργασία όχι μόνο προστατεύει τις κατά τα άλλα εύθραυστες ίνες αλλά μειώνει επίσης την ασαφή συμπεριφορά, καθώς διασκορπίζεται πάνω στην επιφάνεια των ινών μετατρέποντάς τες σε ένα ομοιογενές προϊόν. Έτσι εξασφαλίζει καλή διαβροχή κατά τη διάρκεια της κατασκευής του σύνθετου υλικού που δίνει χαμηλή περιεκτικότητα σε κενά-πόρους μέσα στο χυτό και μεγιστοποιεί την αλληλεπίδραση μεταξύ μήτρας και ινών για βέλτιστη μεταφορά των τάσεων. Οι μελέτες που έχουν γίνει αποκαλύπτουν ότι η επιφανειακή επεξεργασία για τις ίνες γυαλιού αποτελείται στο ελάχιστο από ένα παράγοντα σχηματισμού φιλμ και ένα παράγοντα σύζευξης, αλλά συνήθως συμπεριλαμβάνονται περισσότερα συστατικά. Μια μεγάλη μελέτη έδειξε ότι ο σχηματιστής φιλμ αποτελεί περίπου 80% κατά βάρος της ξηρής επιφανειακής επεξεργασίας και ο παράγοντα σύζευξης περίπου 10% κατά βάρος. Ο σκοπός του παράγοντα σχηματισμού φιλμ είναι να προστατεύει τις ίνες από βλάβες

μεταξύ τους και να προστατεύει το φυτίλι κατά την περιέλιξη και την ύφανση. Συχνά είναι ένα πολυμερές παρόμοιο με τη μήτρα στην οποία στοχεύει το τελικό προϊόν, π.χ., πολυεστέρες, πολυουρεθάνες και εποξειδία που αποδίδουν καλή διαβροχή κατά την κατασκευή του σύνθετου. Ενώ η μείωση των ρωγμών λόγω διάβρωσης, η οποία προκαλείται από το νερό, επιτυγχάνεται με την προσθήκη ενός παράγοντα σύζευξης (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017).

Ο παράγοντας σύζευξης συχνά επιλέγεται να είναι οργανοσιλάνιο και σε ορισμένες περιπτώσεις οξειδία χρωμίου ή τιτανίου. Τα οργανοσιλάνια έχουν τη δυνατότητα να αντιδρούν με την επιφάνεια των ινών γυαλιού μέσω μιας αντίδρασης sol-gel, η οποία συνδέει ομοιοπολικά το οργανοσιλάνιο ή μια πολυμερική μορφή του οργανοσιλανίου στην επιφάνεια των ινών. Μια ιδιότητα του οργανοσιλανίου είναι να μπορεί να αντιδρά με τη μήτρα σχηματίζοντας έτσι μια σύνδεση μεταξύ της ίνας και της μήτρας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ο παράγοντας σύζευξης θεωρείται κρίσιμη παράμετρος όσον αφορά την πρόσφυση μεταξύ της ίνας και της μήτρας. Τα πλέον χρησιμοποιούμενα σιλάνια έχουν λειτουργίες αμίνης ή εποξειδίου. Οι αντιστατικοί παράγοντες μειώνουν την ασαφή κατάσταση των ινών και κατ'αυτόν τον τρόπο βοηθούν στο σχηματισμό του φυτιλιού. Οι παράγοντες γαλακτωματοποίησης σταθεροποιούν τα αδιάλυτα συστατικά που προστίθενται στο εναιώρημα της επιφανειακής επεξεργασίας, μειώνουν τον σχηματισμό αφρού και ρυθμίζουν το ιξώδες. Τα λιπαντικά βελτιώνουν τη διασπορά στις ίνες γυαλιού και βοηθούν στην προστασία της επιφάνειας. Επιπλέον, μπορούν να προστεθούν οξέα ή αλκάλια για να ρυθμιστεί το pH σε περίπου 4, για να διευκολυνθεί η υδρόλυση των σιλανίων, καθώς και παράγοντες διαβροχής και αντιοξειδωτικά (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017).

Συγκεκριμένα για τις ίνες γυαλιού η επιφανειακή επεξεργασία εφαρμόζεται ως μέρος της διαδικασίας κατασκευής. Μετά την ανάμιξη και την τήξη των συστατικών του γυαλιού το τήγμα οδηγείται σε ένα τριβέα άξονος, με μεγάλη ποσότητα οπών, από τις οποίες οι ίνες έλκονται συνεχώς με ταχύτητα 2500 m/min. Μόλις το τήγμα εγκαταλείψει τον τριβέα, ψύχεται ταχέως με ψεκασμό νερού και αέρα. Η ψύξη εξασφαλίζει την άμορφη δομή του δικτύου μέσα στο γυαλί, η οποία αποδίδει την ευκαμψία. Στη συνέχεια οι ίνες περνούν από ένα ρολό που το μισό είναι βυθισμένο στο υγρό το οποίο θα επικαλύψει τις ίνες. Στη συνέχεια οι ίνες συλλέγονται σε τούφες που συχνά αναφέρεται ως φυτίλι που περιέχει 50-4000 μονές ίνες. Τα φυτίλια ξηραίνονται σε μεγάλους κλιβάνους στους πάνω από 100 ° C για ώρες, προκειμένου να εξατμιστεί το πλεόνασμα νερού και για τη σκλήρυνση της επιφανειακής επεξεργασίας. Μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα μετά την εφαρμογή, η επίδραση της επιφανειακής επεξεργασίας τίθεται σε λειτουργία όσον αφορά την προστασία της επιφάνειας των ινών από ζημιές μεταξύ τους στο φυτίλι και στη μεταγενέστερη ύφανση (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017)

Παρά το γεγονός ότι οι ίνες άνθρακα είναι οργανικές και συνεπώς δεν έχουν τα ίδια προβλήματα συμβατότητας με τις ίνες γυαλιού, χρειάζονται και αυτές επιφανειακή επεξεργασία για να πετύχουν την ομαλή και συχνά αδρανή επιφάνεια που χρειάζεται.



Εικόνα 21. Διάγραμμα που δείχνει την εφαρμογή επιφανειακής επεξεργασίας στις ίνες γυαλιού

Οι ίνες άνθρακα λαμβάνουν τόσο επιφανειακή επεξεργασία όσο και διαστασιολόγηση που και οι δύο διεξάγονται μετά την κατασκευή των ινών. Γενικότερα η κατασκευή ινών άνθρακα είναι πολύ διαφορετική από τις ίνες γυαλιού. Τα βήματα περιλαμβάνουν τον πολυμερισμό από έναν πρόδρομο, τη σταθεροποίηση και την ενανθράκωση, ακολουθούμενη από την επεξεργασία επιφάνειας και τη διαστασιολόγηση. Η επιφανειακή κατεργασία χαράζει ή τραχύνει την επιφάνεια χρησιμοποιώντας ένα ανοδικό ή μη ιονικό ηλεκτρολυτικό πολυμερές (π.χ., εποξικό, πολυαμιδίου, πολυπροπυλενίου ή πολυουρεθάνης). Το αποτέλεσμα είναι μια αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας, η οποία στη συνέχεια αυξάνει τη σύνδεση μεταξύ των ινών και της μήτρας. Η αύξηση στην τραχύτητα των ινών αναμένεται επίσης να αυξήσει την τριβή ολίσθησης μεταξύ των επιφανειών των ινών και της μήτρας μετά την αποκόλληση. Η ποσότητα της επιφανειακής επεξεργασίας κυμαίνεται από 0,5-5% κατά βάρος. Όπως συμβαίνει και με τις ίνες γυαλιού, η επιφανειακή επεξεργασία δεν προστατεύει μόνο τις ίνες, αλλά διευκολύνει επίσης το σχηματισμό των φυτιλιών, μειώνει το χνούδι, βελτιώνει τη δυνατότητα επεξεργασίας και αυξάνει τη σύνδεση μεταξύ των ινών και της μήτρας (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017).

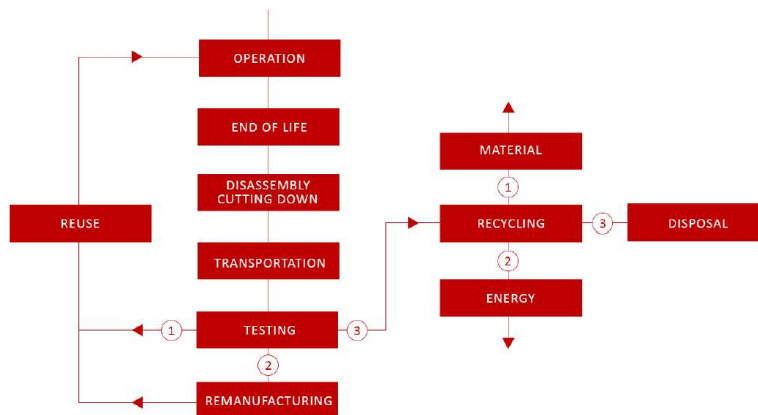
Οι φυσικές ίνες είναι υδρόφιλες και συνδέονται ελάχιστα τόσο με θερμοπλαστικά όσο και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή. Έχει γίνει πολύ λίγη δουλειά στον τομέα της επιφανειακής επεξεργασίας για φυσικές ίνες, ενώ η χρήση επιφανειακής επεξεργασίας για ίνες γυαλιού δεν είναι η καλύτερη λύση. Ως παράγοντας σύζευξης κυρίως επιλέγονται σιλανικά και ισοκυανικά. Επίσης, φυσικές κατεργασίες όπως το πλάσμα ή η θέρμανση χρησιμοποιούνται για να μεταβάλλουν την επιφάνεια των ινών για καλύτερη σύνδεση με τη ρητίνη. Η κατεργασία πραγματοποιείται ως μέρος της επεξεργασίας πριν αυτές υφανθούν. Μερικές φορές ο παράγοντας σύζευξης είναι ένα πρόσθετο στη ρητίνη της μήτρας αντί για μια επιφανειακή επεξεργασία των ινών, καθιστώντας το λιγότερο αποτελεσματικό στα σύνθετα υλικά με χαμηλή περιεκτικότητα σε ίνες καθώς τα τροποποιημένα πολυμερή μπορούν να 'κρύβονται' μέσα σε περιοχές πλούσιες σε ρητίνη με μικρή επαφή με τις ίνες (Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, 2017).

Κλείνοντας, οι καινοτομίες στα υλικά αναμένεται να έχουν αναπόφευκτα θετικά αποτελέσματα στην παραγωγή, τη συντήρηση και το χρόνο ζωής των πτερυγίων. Επιπλέον οι ευρωπαϊκές τεχνολογικές πλατφόρμες υποδεικνύουν ότι η έρευνα των υλικών για τα πτερύγια αποτελεί σημαντική περιοχή έρευνας και θεωρούν ότι η βιωσιμότητα αποτελεί στρατηγικό ζήτημα. Επομένως οι διαδικασίες σχεδιασμού και επιλογής των υλικών θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τη συνολική βιωσιμότητα των επιλεγμένων υλικών, συμπεριλαμβανομένων τωρινών αλλά και των μελλοντικών μεθόδων ανακύκλωσης (WindEurope, 2017a).

## 7 Διαχείριση τέλους ζωής ανεμογεννητριών

Όταν μια ανεμογεννήτρια έχει φτάσει στο τέλος της παραγωγικής διάρκειας ζωής της, πρέπει να αποσυναρμολογηθεί και να απομακρυνθεί από την περιοχή. Είτε για να δημιουργηθεί χώρος για νέες ανεμογεννήτριες, είτε απλώς για να επανέλθει η περιοχή στην προηγούμενη κατάστασή της. Ωστόσο, ο βαθμός της αποκατάστασης (π.χ. το πόσα από τα θεμέλια πρέπει να αφαιρεθούν), δεν είναι ξεκάθαρο και εξαρτάται από τη νομοθεσία της εκάστοτε χώρας (Andersen, 2015).

Ολόκληρη η τουρμπίνα ή μέρη της θα πρέπει να επαναχρησιμοποιηθούν αν είναι δυνατόν (Andersen, 2015). Τα αχρησιμοποίητα εξαρτήματα πρέπει να διατίθενται σύμφωνα με το πρότυπο ιεράρχησης των αποβλήτων, δηλαδή να ανακυκλώνονται ή να ανακτηθεί η ενέργεια των υλικών. Η τελευταία λύση είναι η απόρριψη του υλικού σε χώρους υγειονομικής ταφής



Εικόνα 22. Διάγραμμα ροής - κατάλληλη διαδικασία για τον παροπλισμό της ανεμογεννήτριας. (Andersen, 2015).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες επιλογές που υπάρχουν σήμερα για τις ανεμογεννήτριες μετά την αποξήλωση τους, με σειρά από την περισσότερο (επαναχρησιμοποίηση) προς τη λιγότερο επιθυμητή (απόρριψη) επιλογή.

### Επαναχρησιμοποίηση

Η καλύτερη λύση είναι είτε ολόκληρη η ανεμογεννήτρια, είτε τμήματα αυτής, αφού γίνουν οι απαραίτητες επισκευές να επαναχρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, έρευνες έχουν δείξει ότι αυτή τη στιγμή δεν υπάρχει μια τακτική αγορά για μεταχειρισμένες ανεμογεννήτριες και ότι είναι δύσκολο να υπάρξει αφού οι τεχνικές και τεχνολογικές εξελίξεις είναι τόσο γρήγορες, που είναι δύσκολο να γίνει χρήση των παλιών εξαρτημάτων στα νέα έργα (Andersen, 2015).

### Ανακύκλωση, Ανάκτηση, Διάθεση

Τα εξαρτήματα που δεν επαναχρησιμοποιούνται για πρακτικούς ή οικονομικούς λόγους θα πρέπει, αν είναι δυνατόν, να ανακυκλώνονται. Η μέση ανακυκλωσιμότητα για ολόκληρη την ανεμογεννήτρια (εξαιρουμένης της θεμελίωσης) υπολογίζεται ότι είναι γύρω στο 80%, όπου το μεγαλύτερο μέρος του μη ανακυκλωμένου υλικού βρίσκεται στα πτερύγια του ρότορα (Andersen, 2015).

### Μέταλλα

Ο χάλυβας, ο χαλκός και το αλουμίνιο πωλούνται ως scrap για ανακύκλωση. Η ανακυκλωσιμότητα για το χάλυβα και το σίδηρο είναι περίπου 90% και το ανακυκλωμένο προϊόν είναι τόσο καλό όσο το καινούριο. Παρόμοια με το χάλυβα και το σίδηρο έτσι και στο αλουμίνιο και το χαλκό, η ανακύκλωση δεν υποβαθμίζει ουσιαστικά το υλικό και η ανακυκλωσιμότητα είναι υψηλή (95% για το αλουμίνιο από τον τομέα των κατασκευών και των μεταφορών και παρόμοια επίπεδα για τον χαλκό) (Andersen, 2015).

#### Ηλεκτρονικά στοιχεία

Τα καλώδια και ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός παραδίδονται συνήθως σε μια εταιρεία ανακύκλωσης η οποία τα χωρίζει σε μέταλλα (για ανακύκλωση), πλαστικά (για ανάκτηση ενέργειας) και τοξικά υλικά (απόρριψη) (Andersen, 2015).

#### Υλικά πτερυγίων

Τα πλαστικά και τα οργανικά υλικά από τα πτερύγια μπορούν να αποτεφρώνονται σε μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ) ή παρόμοιες, για ανάκτηση της ενέργειας. Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά έχουν αποδειχτεί δύσκολο να ανακυκλωθούν (Andersen, 2015).

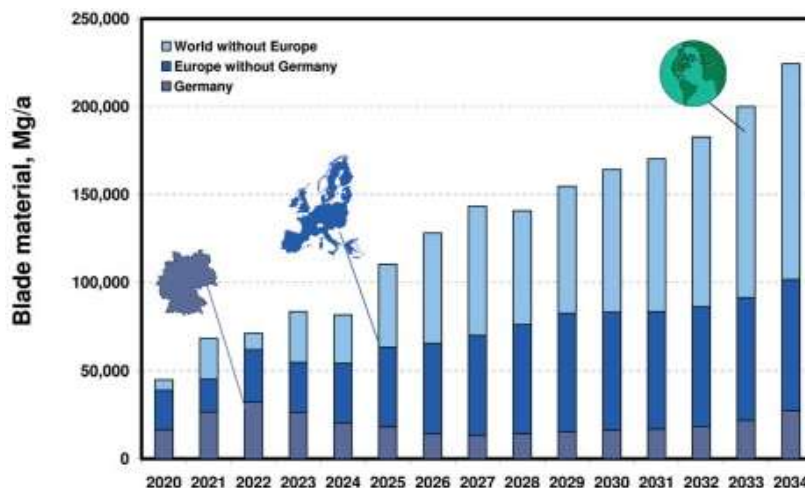
### **7.1 Διαχείριση πτερυγίων στο τέλος ζωής**

Τα πτερύγια παραμένουν μια πρόκληση ως προς το τι θα απογίνουν μετά το τέλος ζωής της ανεμογεννήτριας, καθώς η επιλογή της επαναχρησιμοποίησης είναι σχετικά δύσκολη λόγω της επικείμενης φθοράς που θα έχουν υποστεί, αλλά και λόγω της τάσης της τεχνολογίας της αιολικής ενέργειας να πηγαίνει σε όλο και μεγαλύτερα μήκη πτερυγίων για τις νέες ανεμογεννήτριες. Ενώ, όσον αφορά την ανακύκλωση, παραμένει δύσκολη λόγω των σύνθετων υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένα τα πτερύγια. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι μια σύνθετη κατασκευή από διάφορα μέρη και υλικά, τα οποία έχουν διαφορετική δομή ανάλογα με τον κατασκευαστή και το έτος παραγωγής. Επιπλέον, μετά το τέλος ζωής τους τα πτερύγια βρίσκονται σε διαφορετικές συνθήκες ανάλογα με το σχεδιασμό τους και τον λόγο παροπλισμού. Ως εκ τούτου, τα υλικά από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους είναι μια ασυνεχής και ανομοιογενής πηγή υλικού που κάνει την ανακύκλωση των πτερυγίων ακόμα πιο δύσκολη. Έτσι, η διάθεση των σύνθετων αποβλήτων που προέρχονται κυρίως από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών στο τέλος του κύκλου ζωής τους είναι ένα ζήτημα που απαιτεί προνοητικότητα και σχεδιασμό (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).



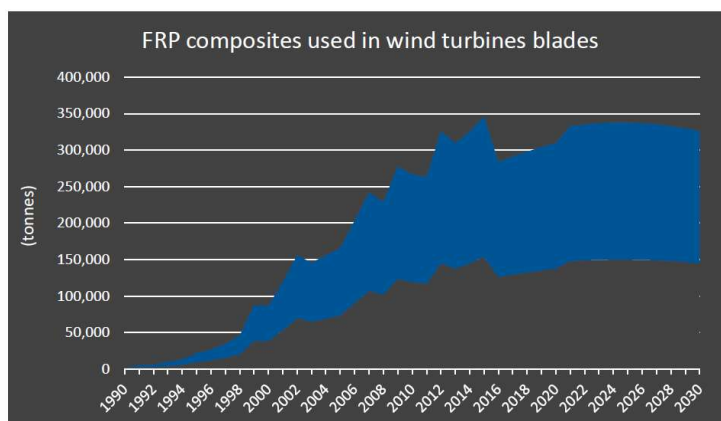
Εικόνα 23. Πτερύγιο στο τέλος ζωής του

Υπολογίζεται ότι για κάθε 1 kilowatt (kW) εγκατεστημένης αιολικής ισχύς, χρειάζονται 10 κιλά υλικά πτερυγίων. Έτσι, προβλέπεται ότι μέχρι το 2034, περίπου 225.000 τόνοι από υλικά πτερυγίων θα πρέπει να ανακυκλώνονται ετησίως, παγκόσμια (Larsen, 2009).



Εικόνα 24. Αναμενόμενη ποσότητα υλικού πτερυγίων για ανακύκλωση (Larsen, 2009)

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες και μελλοντικές εξελίξεις στην αιολική ενέργεια τα ποσά σύνθετων αποβλήτων FRP αναμένεται να αυξηθούν. Υποθέτοντας ότι η ποσότητα σύνθετου υλικού που χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες είναι μεταξύ 12-15 τόνων ανά MW, στην εικόνα 4 φαίνεται η ετήσια χρήση σύνθετων υλικών FRP στις ανεμογεννήτριες μέχρι το 2030 (WindEurope, 2017a).



Εικόνα 25. Ετήσια χρήση σύνθετων υλικών FRP σε πτερύγια ανεμογεννητριών μέχρι το 2030 (WindEurope, 2017a).

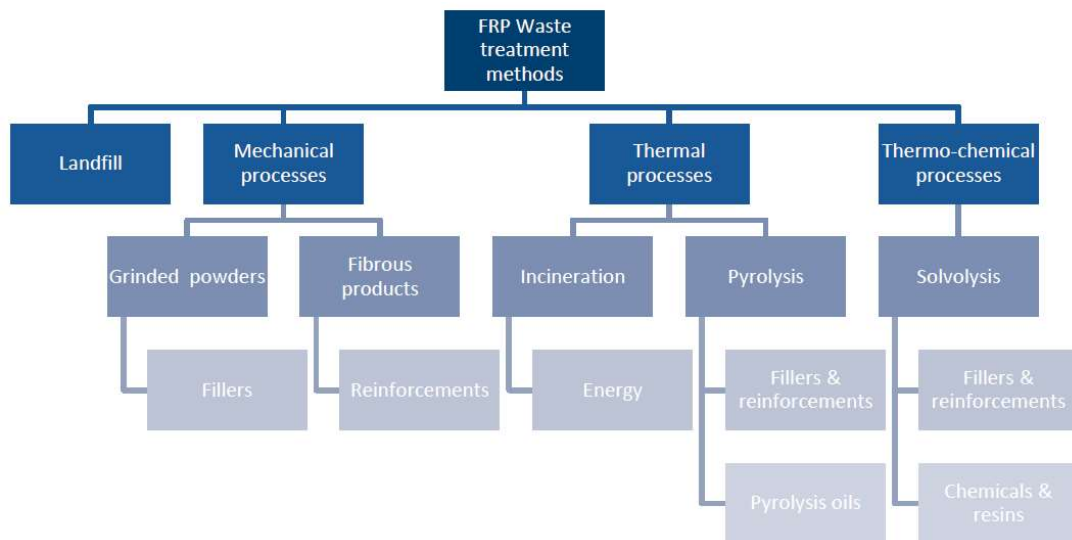
Λόγω της σχετικά νέας εφαρμογής των σύνθετων υλικών, υπάρχει περιορισμένη πρακτική εμπειρία στην ανακύκλωση, ειδικά στα πτερύγια των ανεμογεννητριών.

Ως πρώτο βήμα για τον παροπλισμό των πτερυγίων, τα πτερύγια αποσυναρμολογούνται από την ανεμογεννήτρια και κόβονται σε μικρότερα τμήματα πριν μεταφερθούν για επεξεργασία αποβλήτων. Η κοπή των πτερυγίων μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους ανάλογα με το σκοπό ή τη χρήση, τις τοπικές και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις και το μέγεθος. Στη συνέχεια, τα πτερύγια μεταφέρονται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων (WindEurope, 2017a).

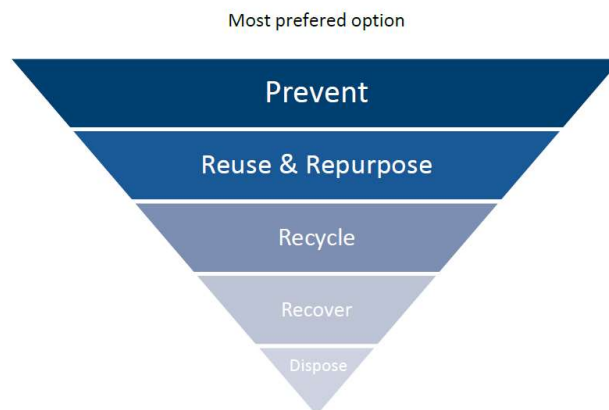


Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αντιμετώπισης των αποβλήτων FRP, ανάλογα με την προβλεπόμενη εφαρμογή ή την τελική χρήση του σύνθετου υλικού.

Η ευρωπαϊκή οδηγία για τα απόβλητα (2008/98/ΕΚ) ορίζει τις βασικές έννοιες που σχετίζονται με τη διαχείριση αποβλήτων. Τονίζει την ανάγκη διευρυμένης ευθύνης του παραγωγού, αυξημένης ανακύκλωσης και μειωμένης χρήσης των χώρων υγειονομικής ταφής. Καθορίζει επίσης την ιεράρχηση των αποβλήτων, η οποία χωρίζει τις μεθόδους διαχείρισης των αποβλήτων σε πέντε κατηγορίες: πρόληψη, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση και διάθεση (WindEurope, 2017a).



Εικόνα 26. Μέθοδοι αντιμετώπισης FRP αποβλήτων (WindEurope, 2017a)



Εικόνα 27. Η ιεραρχία των αποβλήτων για τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων πετυγίων ανεμογεννητριών (WindEurope, 2017a)

Η πρόληψη αφορά όλες τις ενέργειες που μπορούν να γίνουν για να αποτρέψουν τα απόβλητα από τα πετυγία των ανεμογεννητριών και να αυξήσουν το χρόνο ζωής τους. Οι ενέργειες αυτές ξεκινούν από το σχεδιασμό των πετυγίων και συνεχίζουν με τις διαδικασίες συντήρησης και επισκευής (WindEurope, 2017a).

Η ανακύκλωση αφορά τις διαδικασίες όπου το πετυγίο γίνεται νέο προϊόν ή υλικό με διαφορετική λειτουργική χρήση (WindEurope, 2017a).

Η ανάκτηση της ενέργειας είναι η επόμενη λύση. Αυτή γίνεται με αποτέφρωση σε μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ), κατά την οποία τα υλικά από τα πτερύγια καίγονται και η θερμότητα που παράγεται χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Η λύση αυτή χρησιμοποιείται αυτή έχει αρκετά μειονεκτήματα. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια των ανεμογεννητριών περιέχουν μέχρι και 70% κατά βάρος ίνες γυαλιού. Αυτό κάνει δύσκολη την ανάκτηση ενέργειας, αφού οι ίνες γυαλιού δεν είναι εύφλεκτες και καθυστερούν την καύση. Επιπλέον, μετά τη διαδικασία της αποτέφρωσης το 60% του υλικού παραμένει με τη μορφή τέφρας. Λόγω της παρουσίας ανόργανων στα σύνθετα η τέφρα αυτή μπορεί να είναι επιβλαβής και ανάλογα τις επιλογές που υπάρχουν, είτε καταλήγει στη χωματερή είτε ανακυκλώνεται σαν υποκατάστατο κατασκευαστικό υλικό. Επίσης, έχει αναφερθεί ότι η παρουσία μικρών ινών γυαλιού στους αεραγωγούς μπορεί να διαταράξει την διαδικασία καθαρισμού των καυσαερίων, με αποτέλεσμα επικίνδυνα καυσαέρια να καταλήγουν στο περιβάλλον. Επιπρόσθετα, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών πριν τη μεταφορά τους στα εργοστάσια αποτέφρωσης πρέπει να αποσυναρμολογηθούν και να κοπούν, προκαλώντας επιπλέον επιβάρυνση στο περιβάλλον από άποψη χρήσης ενέργειας και εκπομπών. Τέλος, γενικότερες ανησυχίες έχουν εκφραστεί για την υγεία και την ασφάλεια των εργατών που σχετίζονται με τη διαδικασία της αποτέφρωσης (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016)(Larsen, 2009).

Η τελευταία επιλογή εφόσον έχουν εξαντληθεί όλες οι παραπάνω είναι η διάθεση των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής ή αποτέφρωση χωρίς ανάκτηση της ενέργειας (WindEurope, 2017a). Η διάθεση των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής γίνεται προσπάθεια να εξαλειφθεί με τις χώρες γενικά να προσπαθούν να μειώσουν τα απορρίμματα που καταλήγουν στις χωματερές, στη Γερμανία για παράδειγμα, από τον Ιούνιο του 2005 απαγορεύτηκε η διάθεση των σύνθετων αποβλήτων (GFRP) σε χώρους υγειονομικής ταφής, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας (30%) σε οργανικά όπως ρητίνες και ξύλο (Larsen, 2009).

Σήμερα το 98% των σύνθετων αποβλήτων καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής ή καίγεται σε εργοστάσια αποτέφρωσης, ενώ μόλις το 2% επαναχρησιμοποιείται ή ανακυκλώνεται (Halliwell, 2006).

Ως προς το νομοθετικό και ρυθμιστικό πλαίσιο, η νομοθεσία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα και για την ανακύκλωση των σύνθετων υλικών. Οι χώροι υγειονομικής ταφής είναι μια σχετικά φθηνή επιλογή διάθεσης, αλλά είναι η λιγότερο προτιμώμενη επιλογή σύμφωνα από την οδηγία πλαίσιο για τα απόβλητα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Ωστόσο η νομοθεσία σχετικά με τα απόβλητα και την ανακύκλωση διαφέρει μεταξύ περιφερειών. Ορισμένα κράτη μέλη έχουν επιβάλει φόρους για την αποθάρρυνση της διάθεσης των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ άλλα έχουν απαγορεύσει τα σύνθετα υλικά σε χώρους υγειονομικής ταφής εντελώς, π.χ. Γερμανία. Γενικότερα όμως οι απόψεις διίστανται. Κάποιοι πιστεύουν ότι οι τάσεις στη νομοθεσία πρέπει να στοχεύουν στο να αυξάνουν την ευθύνη του παραγωγού, να αυξάνουν τα ποσοστά ανακύκλωσης και να μειώνουν τη διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ άλλοι δηλώνουν το αντίθετο, υποστηρίζοντας ότι τέτοιες ρυθμίσεις μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα σε μικρές και μεσαίες καινοτόμες επιχειρήσεις (WindEurope, 2017a).

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται βιομηχανικές και περιστασιακές λύσεις διαχείρισης του τέλους ζωής των πτερυγίων

### **7.1.1 Λύσεις σε βιομηχανική κλίμακα**

#### **Επαναχρησιμοποίηση**

Η καλύτερη λύση για τα πτερύγια των ανεμογεννητριών μετά το τέλος ζωής είναι να επαναχρησιμοποιηθούν αφότου τεθούν εκτός λειτουργίας και έτσι να παραταθεί η διάρκεια ζωής τους. Αυτό θεωρητικά είναι εφικτό αφού τα περισσότερα πτερύγια μετά τα 20 χρόνια λειτουργίας παραμένουν σε αρκετά καλή κατάσταση. Στην πράξη βέβαια δε συμβαίνει αυτό, ειδικά όταν μιλάμε για τις μεγάλες ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση του δικτύου (πτερύγια πάνω από 50 m), λόγω των ταχύτατων εξελίξεων στον τομέα της αιολικής ενέργειας που καθιστούν τα παλιά πτερύγια ξεπερασμένα για τις νέες εφαρμογές, αλλά και λόγω των δυσκολιών μεταφοράς. Ωστόσο η επαναχρησιμοποίηση μοιάζει να είναι τεχνικά προσιτή για σχετικά μικρού μεγέθους πτερύγια. Έτσι, στην Ευρώπη και τη βόρεια Αμερική υπάρχουν αρκετές επιχειρήσεις οι οποίες πουλούν επαναχρησιμοποιημένα πτερύγια. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι ότι υπάρχει πρόσβαση σε μεγάλο εύρος μικρού και μεσαίου μεγέθους δοκιμασμένων πτερυγίων, μικροί χρόνοι παράδοσης και μικρό σχετικά κόστος (περίπου μισή τιμή ανά MW) (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

Οι πρότυπες διαδικασίες για την επαναχρησιμοποίηση των πτερυγίων μπορεί να περιλαμβάνουν οπτικό έλεγχο, υπερηχητικό έλεγχο, και μετρήσεις της φυσικής συχνότητας των πτερυγίων. Επίσης τα πτερύγια μπορεί να επισκευαστούν, να ξαναβαφτούν, να ζυγιστούν και να ζυγοσταθμιστούν (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

#### **Μηχανική άλεση**

Η μηχανική άλεση των σύνθετων υλικών περιλαμβάνει τον τεμαχισμό και τη μείωση του μεγέθους των σύνθετων αποβλήτων σε κομμάτια μερικών εκατοστών ή και μικρότερα. Το προκύπτον μείγμα, που ονομάζεται επίσης τεμαχισμένο σύνθετο, στη συνέχεια χρησιμοποιείται σε νέες εφαρμογές (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά γίνεται ελάττωση του μεγέθους των σύνθετων απορριμμάτων, συνήθως σε αργής ταχύτητας μύλο κοπής ή άλεσης, σε τμήματα των 50 – 100 mm. Αυτό γίνεται ώστε να αφαιρεθούν τα μέταλλα και αν γίνει σε αρχικό στάδιο, διευκολύνει και στη μεταφορά. Στη συνέχεια γίνεται η κύρια μείωση μεγέθους (10mm – 50μm) σε σφυρόμυλο ή άλλου υψηλής ταχύτητας μύλο. Τέλος, γίνεται ένας διαχωρισμός, ο οποίος περιλαμβάνει κυκλώνες και κόσκινα, για την ταξινόμηση του προκύπτοντος ανακυκλώματος σε παρτίδες διαφορετικού μεγέθους (Pickering, 2006).

Κατά τη διαδικασία της μηχανικής άλεσης σύνθετων υλικών όλα τα συστατικά του αρχικού υλικού επιδέχονται μείωση μεγέθους και εμφανίζονται στα προϊόντα της ανακύκλωσης, τα οποία είναι μια μίξη από πολυμερή, ίνες και πληρωτικό υλικό. Τυπικά τα καλύτερης ποιότητας κομμάτια είναι οι πούδρες και περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό πληρωτικού υλικού και πολυμερών από το αρχικό υλικό. Τα πιο τραχιά κομμάτια συνηθίζεται να είναι αυτά με ινώδη φύση όπου τα σωματίδια έχουν υψηλό λόγο διατομής και περιεχόμενο σε ίνες (Pickering, 2006).

Αρκετές εταιρείες έχουν εμπλακεί στην ανάπτυξη της δραστηριότητας της ανακύκλωσης σε βιομηχανική κλίμακα, μεταξύ των οποίων η ERCOM στη Γερμανία και η Phoenix Fiberglass στον Καναδά. Ωστόσο και οι δύο αυτές εταιρείες έχουν κλείσει (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

Από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για τις εφαρμογές που μπορεί να έχουν τα ανακυκλωθέντα προϊόντα προκύπτει ότι αυτά με τη μορφή λεπτόκοκκων πουδρών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο πλήρωσης ανθρακικού ασβεστίου σε νέα SMC ή BMC. Έχει παρατηρηθεί ότι σε επίπεδα πλήρωσης περίπου 10%, οι μειώσεις στις μηχανικές ιδιότητες είναι ανεκτές. Ωστόσο, σε υψηλότερο ποσοστό δημιουργούνται προβλήματα επεξεργασίας, καθώς το ανακυκλωμένο προϊόν απορροφά περισσότερη ρητίνη, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το ιξώδες του χυτού και να παρατηρούνται πιο σημαντικές μειώσεις στις μηχανικές ιδιότητες. Ένα πλεονέκτημα του ανακυκλωμένου προϊόντος είναι ότι έχει χαμηλότερη πυκνότητα από το ανθρακικό ασβέστιο, καθώς περιέχει σημαντικό ποσοστό πολυμερούς χαμηλής πυκνότητας. Επομένως το SMC που περιέχει 10% ανακυκλωμένο προϊόν ως υποκατάστατο πλήρωσης μπορεί να είναι 5% ελαφρύτερο από το SMC που χρησιμοποιεί μόνο ανθρακικό ασβέστιο.

Τα πιο χονδροειδή κομμάτια τα οποία περιέχουν σημαντικές ποσότητες άθικτων ινών γενικά αναφέρεται ότι είναι πιο δύσκολο να χρησιμοποιηθούν. Η χρήση τους ως πληρωτικά οδηγούν σε μείωση της αντοχής και της ανθεκτικότητας. Αυτό οφείλεται σε έλλειψη σύνδεσης μεταξύ του κομματιού προς διαχείριση και του πολυμερούς. Ωστόσο, πιο πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η επεξεργασία για την αύξηση της συγκόλλησης μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες (Pickering, 2006). Ενώ σε άλλη μελέτη που εξετάστηκε η επίδραση του μήκους των ινών βρέθηκε ότι, το ινώδες υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε BMC για να αντικαταστήσει εν μέρει τις κοντές ίνες γυαλιού, υπό την προϋπόθεση ότι οι υπόλοιπες ίνες από παρθένο υλικό θα αντικατασταθούν με μακρύτερες ίνες, ώστε να εξισορροπηθούν οι μειωμένες ιδιότητες του δευτερογενούς υλικού (Pickering, 2006).

Έρευνες έχουν γίνει επίσης για τη χρήση του σύνθετου υλικού προς διαχείριση σε θερμοπλαστικά και άλλα θερμοσκληρυντικά. Γενικά, έχει βρεθεί ότι το σύνθετο αυτό υλικό προϊόν έχει κατώτερες ιδιότητες ενίσχυσης, αλλά με τη χρήση παραγόντων εμβολιασμού και σύζευξης οι ενισχυτικές του ιδιότητες μπορεί να αυξηθούν από 45 έως 65%, με σημαντικότερη επίδραση στη βελτίωση της αντοχής σε εφελκυσμό και στην ανθεκτικότητα (Pickering, 2006).

Επιπλέον η αξία του απορριπτέου σύνθετου προϊόντος μπορεί να ενισχυθεί εάν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τρόπο που να εκμεταλλεύεται μερικές από τις μοναδικές ιδιότητές του. Στο SICOMP στη Σουηδία έχει παραχθεί το RECYCORE, μια ενίσχυση με ίνες γυαλιού, που αποτελείται από έναν πυρήνα που περιέχει ένα τραχύ προϊόν ανακύκλωσης. Ο ανακυκλωμένος πυρήνας έχει μέγεθος σωματιδίων από 1 έως 25 mm και μπορεί να περιλαμβάνει μέχρι και 70% του βάρους του σπλισμού. Το όφελος είναι ότι το ανακυκλωμένο προϊόν δίνει στον πυρήνα υψηλή διαπερατότητα, η οποία του επιτρέπει να λειτουργεί ως στρώμα ροής κατά μήκος του οποίου μπορεί να ρέει η ρητίνη κατά τη διάρκεια του εμποτισμού. Το τεμαχισμένο σύνθετο υλικό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ηχομόνωσης και θερμομόνωσης. Αυτό βρίσκεται σε εξέλιξη από μια δανέζικη εταιρεία που ονομάζεται Miljøskærm (Pickering, 2006)(Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

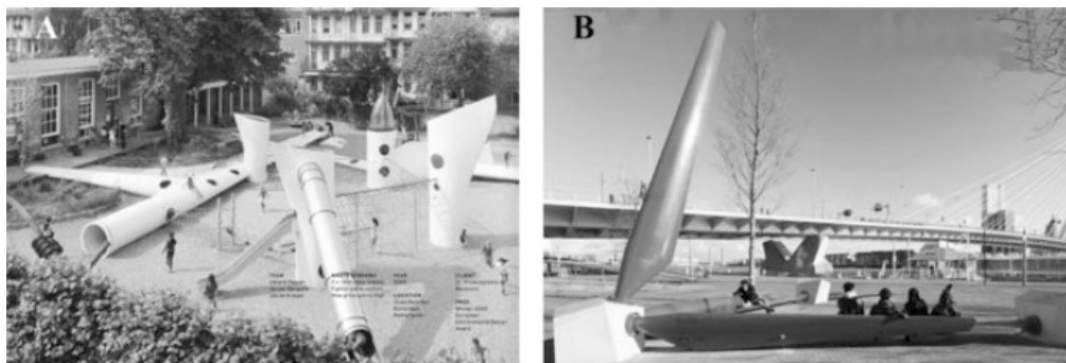
Τέλος, έχουν γίνει αρκετές έρευνες για την χρήση ανακυκλωμένων θερμοσκληρυνόμενων σύνθετων υλικών στη βιομηχανία των κατασκευών, όπως την κατασκευή πλαστικού ξύλου από ανακυκλωμένα θερμοπλαστικά, όπου το ανακυκλωμένο προϊόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως

εναλλακτική λύση για τις ίνες ξύλου. Όσον αφορά το χονδρόκοκκο υλικό προς ανακύκλωση έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ασφάλτου και τσιμέντου και από το 2012, η χρήση σύνθετων αποβλήτων για την παραγωγή τσιμέντου λαμβάνεται υπόψη ως βιώσιμη λύση ανακύκλωσης από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016)(Pickering, 2006).

Συνοψίζοντας, οι διαδικασίες μηχανικής ανακύκλωσης είναι κατάλληλες για σύνθετα απορρίματα τα οποία είναι σχετικά καθαρά, μη μολυσμένα και από γνωστή προέλευση. Η κύρια πρόκληση αυτής της λύσης ανακύκλωσης είναι το να βρεθούν εφαρμογές για το τεμαχισμένο σύνθετο υλικό, καθώς τα ανακυκλωμένα προϊόντα έχουν περιορισμένη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης και οι ιδιότητές τους είναι χειρότερες από τα αντίστοιχα καινούρια προϊόντα (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016)(Pickering, 2006).

### 7.1.2 Περιστασιακές Λύσεις

Μεγάλα τμήματα από πτερύγια ανεμογεννητριών μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για αρχιτεκτονικούς ή άλλους κατασκευαστικούς σκοπούς, προσφέροντας τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η καλή ποιότητα και η δομική ικανότητα του υλικού των πτερυγίων. Ενώ ταυτόχρονα επεκτείνει τη διάρκεια ζωής του υλικού με μικρή επανεπεξεργασία. Από την άλλη πλευρά, ο αριθμός των πιθανών εφαρμογών περιορίζεται από την πολυπλοκότητα της δομής του πτερυγίου και η μαζική παραγωγή είναι σχεδόν αδύνατη. Για την εκβιομηχάνιση μιας τέτοιας λύσης χρειάζεται μια αξιόπιστη πηγή υλικού που να μπορεί να διαθέσει δεδομένη διάσταση, κάτι το οποίο είναι δύσκολο με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Παραδείγματα περιστασιακών τέτοιων εφαρμογών έχουν προταθεί από το στούντιο SuperUse στην Ολλανδία (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).



Εικόνα 28. Παραδείγματα εφαρμογών για μεγάλα τμήματα πτερυγίων ανεμογεννητριών από το στούντιο SuperUse, (α) παιδική χαρά Wikado στο Ρότερνταμ, (β) πάγκοι στο Willemsplein στο Ρότερνταμ (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016)

Από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών, μπορούν επίσης να κοπούν κατασκευαστικά στοιχεία όπως δοκάρια, πλάκες και κυρτά στοιχεία. Αυτό απαιτεί βαρύτερη επανεπεξεργασία, ενώ οι γεωμετρίες αυτών των στοιχείων περιορίζονται από την κατασκευή του πτερυγίου. Ωστόσο, η παραγωγή τέτοιων τυποποιημένων στοιχείων θα μπορούσε να διαφοροποιήσει τις πιθανές εφαρμογές (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).



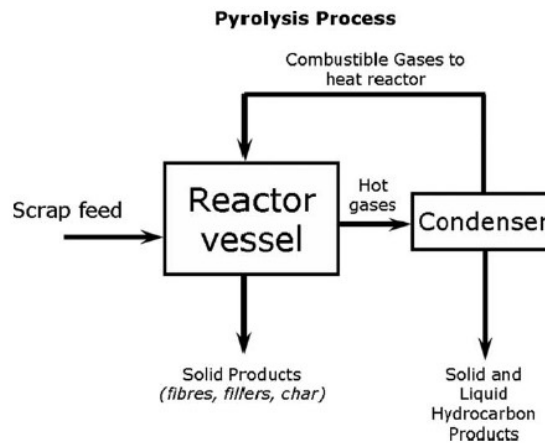
Εικόνα 29. Έπιπλα κατασκευασμένα από περύγια ανεμογεννητριών μετά το τέλος ζωής τους από την Wigh Design, (α) Πίνακας και longboard, (β) Πρωτότυπο επίπλων (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016)

### 7.1.3 Λύσεις σε ερευνητικό στάδιο

Οι τελευταίες λύσεις που παρουσιάζονται είναι αυτές που απαιτούν την πιο βαριά επανεπεξεργασία. Οι περισσότερες από αυτές βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο και δεν έχουν δοκιμαστεί ακόμα σε βιομηχανική κλίμακα. Χωρίζονται κυρίως σε δύο κατηγορίες: τις θερμικές και τις χημικές διαδικασίες ανακύκλωσης (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

Οι θερμικές διαδικασίες ανακύκλωσης περιλαμβάνουν την πυρόλυση και την καύση σε ρευστοποιημένη κλίση, οι οποίες επιτρέπουν κυρίως ανάκτηση των ιών (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

Κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης, τα σύνθετα απόβλητα αρχικά θερμαίνονται υπό την παρουσία περιορισμένου ή καθόλου οξυγόνου. Η θερμοκρασία επεξεργασίας μπορεί να κυμαίνεται από 300 μέχρι 1000 °C ανάλογα με το σύστημα θέρμανσης που χρησιμοποιείται. Υπό αυτές τις συνθήκες, γίνεται αποσύνθεση των οργανικών μορίων των σύνθετων αποβλήτων σε χαμηλότερου μοριακού βάρους οργανικές ουσίες (υγρά και αέρια) και υπάρχει επίσης ένα στερεό προϊόν άνθρακα. Η πυρόλυση είναι μια μέθοδος που προσφέρει την ανάκτηση θρυμματισμένου σύνθετου υλικού από το πολυμερές, το οποίο έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για περαιτέρω χημική επεξεργασία. Στην εικόνα 29 δίνεται ένα διάγραμμα μιας τυπικής διαδικασίας πυρόλυσης, στην οποία τα αέρια που εξελίσσονται χρησιμοποιούνται ως καύσιμο για την παροχή θερμότητας για τη διαδικασία (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016)(Pickering, 2006)(Stella Job, 2010).



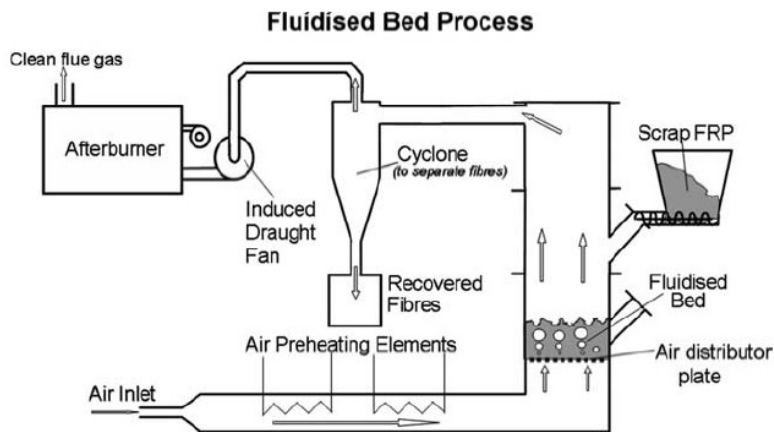
Εικόνα 30. Διαδικασία πυρόλυσης (Pickering, 2006)

Έχουν γίνει αρκετές έρευνες που αφορούν την επεξεργασία σύνθετων αποβλήτων γυαλιού με τη διαδικασία της πυρόλυσης, κατά τις οποίες προκύπτουν διάφορες χρήσεις για το ανακυκλωθέν προϊόν όπως η χρήση του ως πληρωτικό για νέο SMC ή την κατασκευή πολυεστερικών ρητινών. Γενικότερα, οι ίνες που ανακτώνται με τη διαδικασία της πυρόλυσης είναι σε καλύτερη κατάσταση όταν η διαδικασία τελείται υπό χαμηλή θερμοκρασία. Ωστόσο παρατηρήθηκε ότι είναι απαραίτητη μια θερμοκρασία πυρόλυσης 400 °C για την αποσύνθεση του πολυμερούς. Τα προϊόντα πυρόλυσης που σχηματίζονται στην περιοχή θερμοκρασιών 400-700 οC είναι εξαιρετικά συνεπή και παρουσιάζουν υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων της τάξης του 50% (Pickering, 2006).

Η πυρόλυση έχει χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανική κλίμακα από τη ReFiber, μια Δανέζικη εταιρία η οποία ανακύκλωνε πτερύγια ανεμογεννητριών για την παραγωγή υλικών μόνωσης από υαλοβάμβακα. Ωστόσο, η εταιρία σταμάτησε τις δραστηριότητες της το 2007 (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

Όσον αφορά τις ίνες άνθρακα που προκύπτουν από τη διαδικασία της πυρόλυσης, διατηρούν το 90% ή και περισσότερο των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Η ανάκτηση ινών άνθρακα με αυτή τη διαδικασία έχει χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανική κλίμακα από τη Recycled Carbon Fibre (Stella Job, 2010).

Κατά τη διαδικασία της ρευστοποιημένης κλίνης τα σύνθετα απόβλητα αρχικά μειώνονται σε μέγεθος περίπου 25 mm και τροφοδοτούνται στη ρευστοποιημένη κλίνη. Η ρευστοποιημένη κλίνη είναι ένα κρεβάτι πυριτικής άμμου με μέγεθος σωματιδίων περίπου 0,85 mm. Η άμμος ρευστοποιείται με ένα ρεύμα θερμού αέρα και τυπικές ταχύτητες ρευστοποίησης 0,4-1,0 m/s σε θερμοκρασίες μεταξύ 450-550 ° C. Στη ρευστοποιημένη κλίνη, το πολυμερές εξατμίζεται από το σύνθετο υλικό και απελευθερώνει τις ίνες και τα πληρωτικά τα οποία μεταφέρονται έξω από το κρεβάτι ως μεμονωμένα σωματίδια αιωρούμενα στον ατμό αερίου. Οι ίνες και τα πληρωτικά διαχωρίζονται από το ρεύμα αερίου, το οποίο μπορεί μετά να περάσει από υψηλής θερμοκρασίας δευτερεύον θάλαμο καύσης, όπου το πολυμερές είναι πλήρως οξειδωμένο. Στη συνέχεια μπορεί να ανακτηθεί η ενέργεια από αυτά τα θερμά προϊόντα καύσης. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής ανακύκλωσης είναι η μείωση με παράγοντα 2 ή περισσότερο της αντοχής σε εφελκυσμό των ινών γυαλιού (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016)(Pickering, 2006).



Εικόνα 31. Διαδικασία ανακύκλωσης ρευστοποιημένης κλίνης (Pickering, 2006)

Η διαδικασία έχει αναπτυχθεί για την ανάκτηση και των ινών γυαλιού και των ινών άνθρακα. Το ανακυκλωθέν προϊόν ίνας έχει χνουδωτή μορφή που περιλαμβάνει μεμονωμένα νήματα από ίνες, μέσου μήκους από 6 έως 10 mm. Οι ίνες είναι καθαρές και παρουσιάζουν πολύ μικρή επιφανειακή μόλυνση. Ένα σύνθετο πολυεστέρα ενισχυμένο με γυαλί μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία στους 450 °C, όπου το πολυμερές εξατμίζεται και απελευθερώνει τις ίνες μέσα στο ρεύμα του αερίου. Οι εποξειδικές ρητίνες απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες έως και 550 °C για τη γρήγορη πτητικοποίηση του πολυμερούς (Pickering, 2006).

Οι μετρήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων δείχνουν ότι οι ίνες γυαλιού κατά κανόνα υποφέρουν από μείωση κατά 50% της αντοχής σε εφελκυσμό αλλά διατηρούν την ίδια ακαμψία με τις καινούργιες ίνες, όταν επεξεργάζονται σε θερμοκρασία 450 °C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες υπάρχει σημαντικά μεγαλύτερη μείωση της μηχανικής αντοχής, όπου σε θερμοκρασία 650 °C η μείωση της αντοχής είναι 90%. Οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν χαμηλότερη υποβάθμιση της αντοχής τους συνήθως 20%, με διατήρηση της αρχικής ακαμψίας όταν επεξεργασία σε θερμοκρασία 550 °C. Παρόλο που οι ίνες άνθρακα επεξεργάζονται στον αέρα, δεν παρουσιάζουν καμία μετρήσιμη οξείδωση. Επιπλέον, ανάλυση της επιφάνειας των ανακυκλωμένων ινών άνθρακα δείχνει ότι υπάρχει μόνο μια μικρή μείωση του επιφανειακού περιεχομένου σε οξυγόνο, υποδεικνύοντας ότι οι ίνες έχουν καλές δυνατότητες σύνδεσης σε μια πολυμερή μήτρα εάν επαναχρησιμοποιηθούν σε σύνθετο υλικό (Pickering, 2006).

Ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα της διαδικασίας της ρευστοποιημένης κλίνης είναι ότι είναι πολύ ανεκτική σε μικτά και μολυσμένα υλικά. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μίγματα σύνθετων υλικών οποιουδήποτε τύπου πολυμερούς και η διαδικασία είναι ανεκτική σε βαμμένες επιφάνειες ή την παρουσία πυρήνων αφρού σε σύνθετα τύπου σάντουιτς. Επίσης, μεταλλικά ένθετα που βρίσκονται στο σύνθετο υλικό δεν χρειάζεται να αφαιρεθούν πριν τροφοδοτηθούν στη ρευστοποιημένη κλίνη, καθώς όλα τα μέταλλα παραμένουν στο κρεβάτι και μπορούν να αφαιρεθούν. Οι πιο ελπιδοφόρες εφαρμογές για τις ανακτημένες ίνες είναι αυτές που απαιτούν κοντές ίνες με διασκορπισμένη μορφή, όπως σε BMC και άλλα (Pickering, 2006).

Γενικά, οι διαδικασίες πυρόλυσης είναι πιο σύνθετες από τις διαδικασίες ρευστοποιημένης κλίνης, αλλά παράγουν χρήσιμα οργανικά προϊόντα από το πολυμερές. Ωστόσο, αυτά θα χρειαστούν περαιτέρω επεξεργασία για να διαχωριστούν από το μείγμα των προϊόντων και αυτό φαίνεται ότι θα ήταν οικονομικά βιώσιμο μόνο σε μεγάλη κλίμακα (Pickering, 2006).



Όσον αφορά τις χημικές τεχνικές ανακύκλωσης, η πιο προχωρημένη και υποσχόμενη είναι μάλλον τα υπερκρίσιμα υγρά, η οποία χρησιμοποιεί και θερμότητα και χημικά. Τα υπερκρίσιμα υγρά είναι υγρά σε θερμοκρασία και πίεση ακριβώς πάνω από το κρίσιμο σημείο, όπου το ρευστό παρουσιάζεται σε μια μόνο υπερκρίσιμη κατάσταση, έχοντας συνδυασμένα χαρακτηριστικά: πυκνότητα, διαλυτική ισχύ και διάχυση σαν υγρό, και ιξώδες σαν αέριο. Με αυτή την τεχνική μπορούν να ανακτηθούν και οι ρητίνες και οι ίνες. Τα υπερκρίσιμα υγρά ερευνήθηκαν από το πρόγραμμα GenVind και φάνηκε ότι οι ίνες γυαλιού μπορούν να ανακτηθούν διατηρώντας το μεγαλύτερο μέρος της αρχικής τους αντοχής σε εφελκυσμό (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

Αυτές οι τεχνικές ανακύκλωσης προορίζονται να επιτρέψουν την επαναχρησιμοποίηση των ανακυκλωμένων ινών γυαλιού σε νέα σύνθετα πολυμερή, ωστόσο η μειωμένη αντοχή σε εφελκυσμό των ινών, οι υποβαθμισμένες ιδιότητες επιφάνειας (απώλεια του παράγοντα σύζευξης σιλανίου) και το κόστος αυτών των ινών (ακριβότερες από τις καινούργιες ίνες), το κάνουν δύσκολο (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016).

Συνοψίζοντας, παρόλο που έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες σε διάφορες μεθόδους ανακύκλωσης θερμοσκληρυνόμενων σύνθετων υλικών, ακόμη δεν υπάρχει βιώσιμη δραστηριότητα ανακύκλωσης. Ένα βασικό πρόβλημα έγκειται στη χρήση του ανακυκλωμένου υλικού σε άλλες, δευτερεύουσες εφαρμογές και διεργασίες. Αυτό οφείλεται στο ότι οι εφαρμογές και η ανάπτυξη της αγοράς για τα σύνθετα υλικά βρίσκονται ακόμα σε αρχικά στάδια. Σήμερα, δεν υπάρχουν οι απαραίτητοι παραλήπτες, οι οποίοι θα μπορούν να φιλοξενήσουν τις προβλεπόμενες ποσότητες ανακυκλωμένων ινών σε άλλες εφαρμογές. Οι μέθοδοι επεξεργασίας ποικίλλουν ανάλογα με τις επιπτώσεις που έχουν στην ποιότητα των ινών (μήκος, αντοχή, ακαμψία), επηρεάζοντας έτσι τη δευτερεύουσα εφαρμογή. Οι ανακυκλωμένες ίνες πρέπει πρώτα να δοκιμαστούν και να χαρακτηριστούν, και στη συνέχεια οι ιδιότητες των ινών πρέπει να είναι αυτές που θα αντιστοιχούν σε πιθανές εφαρμογές. Μέχρι σήμερα πολύ λίγες πιθανές εφαρμογές εμπορικής κλίμακας που χρησιμοποιούν ανακυκλωμένα σύνθετα υλικά έχουν διερευνηθεί (Beauson, Justine; Brøndsted, 2016)(WindEurope, 2017a).

Ένα άλλο βασικό πρόβλημα είναι το κόστος. Καθώς, τα υλικά που προκύπτουν από την ανακύκλωση δεν μπορούν να ανταγωνιστούν την τιμή των καινούργιων υλικών. Οπότε, χρειάζεται περαιτέρω έρευνα ώστε είτε να αναπτυχθούν καλύτερης ποιότητας ανακυκλωμένα προϊόντα είτε το κόστος παραγωγής των ανακυκλωμένων προϊόντων να χαμηλώσει (Pickering, 2006).

Ένα άλλο πρόβλημα που υπάρχει για τις μονάδες εμπορικής επεξεργασίας και ανακύκλωσης σύνθετων υλικών, είναι αυτό της διανομής των σύνθετων αποβλήτων από τα αιολικά πάρκα. Υπάρχει η ανάγκη ανάπτυξης εφοδιαστικών αλυσίδων, οι οποίες θα μαζεύουν και θα προμηθεύουν τα απόβλητα μετά το τέλος ζωής και κατά την κατασκευή των σύνθετων υλικών. Κατά την ανακύκλωση, οι επιπτώσεις που σχετίζονται με την κοπή και τη μεταφορά των πτερυγίων πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη. Επιπλέον υπάρχουν δυσκολίες στην εξασφάλιση σταθερής ροής τροφοδοσίας των σύνθετων αποβλήτων, καθώς αυτό εξαρτάται από τις αποφάσεις παροπλισμού από τους ιδιοκτήτες των αιολικών πάρκων. Ενώ ταυτόχρονα πρέπει να διατηρείται καλά πλήρης τεκμηρίωση του προϊόντος (προδιαγραφές των υλικών), εάν τα απόβλητα πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως πόροι μετά από μεγάλη διάρκεια ζωής

λειτουργίας της τουρμπίνας, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των εταιριών στα συστατικά που συνθέτουν ένα υλικό (Stella Job, 2010)(WindEurope, 2017a).

Τέλος, υπάρχει έλλειψη πληροφοριών όσον αφορά τον κύκλο ζωής και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αλλά και οφέλη των διαφορετικών διαδικασιών ανακύκλωσης. Περαιτέρω έρευνα πάνω σε αυτό θα βοηθούσε στην αξιολόγηση των καλύτερων επιλογών ανακύκλωσης για τους διαφορετικούς τύπους σύνθετων υλικών (Stella Job, 2010).

## **7.2 Αποκατάσταση (Repowering)**

---

Η επιλογή μεταξύ πλήρους αποκατάστασης ή επέκτασης της διάρκειας ζωής εξαρτάται από την ύπαρξη επιχειρηματικής περίπτωσης (τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, πολιτικές στήριξης και σχεδιασμού) και είναι αυστηρά συγκεκριμένη ως προς τον τόπο, το έργο και τη χώρα. Οι διαχειριστές αιολικών πάρκων σταθμίζουν προσεκτικά το κόστος παροπλισμού έναντι του κόστους διαφορετικών επιλογών repowering (WindEurope, 2017b).

Επί του παρόντος, η Ιταλία είναι το μόνο κράτος μέλος της ΕΕ που προσφέρει ένα συγκεκριμένο κίνητρο για την επέκταση της διάρκειας ζωής στα έργα. Σύμφωνα με το εθνικό ρυθμιστικό πλαίσιο της Ιταλίας, τέσσερις τύποι παρεμβάσεων θεωρούνται ως repowering και μπορούν να ανταγωνιστούν για ένα οικονομικό κίνητρο που ανατίθεται μέσω διαγωνισμού. Αυτές είναι η μερική ανακατασκευή, η ολική ανακατασκευή, οι βελτιώσεις, και η επανενεργοποίηση. Το καθεστώς στήριξης για κάθε μια από αυτές τις επιλογές έχει ανώτατο όριο ένα ορισμένο ποσοστό του πλήρους ποσού (π.χ. 0,9% για συνολική ανακατασκευή, 0,5% για ανακαίνιση) (WindEurope, 2017b).

Τα κράτη μέλη θα πρέπει να διατηρήσουν την ευελιξία τους καθορίζοντας έναν μηχανισμό υποστήριξης για τα έργα επέκτασης της διάρκειας ζωής των αιολικών πάρκων ο οποίος θα ταιριάζει με τις εκάστοτε εθνικές περιστάσεις. Έτσι, οι επιλογές υποστήριξης των έργων επέκτασης της διάρκειας ζωής των αιολικών πάρκων θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν, αλλά όχι να περιορίζονται, σε ένα διοικητικά καθορισμένο ασφάλιστρο ή συμμετοχή σε ανταγωνιστικό σύστημα υποβολής προσφορών. Επιπλέον, ο ορισμός ενός κατάλληλου πλαισίου στήριξης θα πρέπει να αναπτυχθεί σε στενή συνεργασία με την εθνική βιομηχανία αιολικής ενέργειας (WindEurope, 2017b).

## **7.3 Θεσμικό πλαίσιο για την αφαίρεση και διαχείριση**

---

Η θεσμική και οργανωτική δομή της αφαίρεσης και της ανακύκλωσης των ανεμογεννητριών εξακολουθεί να είναι αβέβαιη. Προς το παρόν έχουν εντοπισθεί τρία πιθανά μοντέλα.

Στο πρώτο, οι υπάρχουσες εταιρείες που ασχολούνται με την απομάκρυνση και την ανάκτηση θα φροντίσουν για την αποσυναρμολόγηση και την ανακύκλωση των ανεμογεννητριών.

Στο δεύτερο, το κύριο έργο της αφαίρεσης των ανεμογεννητριών θα πραγματοποιηθεί από εταιρείες που θα ειδικεύονται αποκλειστικά στις ανεμογεννήτριες και την αποσυναρμολόγηση και ανακύκλωση τους, ενώ η ανακύκλωση των πτερυγίων θα πραγματοποιείται από ανεξάρτητες εταιρείες που θα έχουν δημιουργηθεί ειδικά για αυτό το λόγο. Ήδη έχουν εμφανιστεί νεοφυής επιχειρήσεις που ειδικεύονται στην ανακύκλωση πτερυγίων και από

ορισμένους θεωρείται ότι αυτό το μοντέλο θα ενσωματωθεί με τη λειτουργία και τη συντήρηση των ανεμογεννητριών.

Το τρίτο μοντέλο περιλαμβάνει τη συνεργασία μεταξύ των παραγωγών ανεμογεννητριών και της βιομηχανίας απομάκρυνσης και ανάκτησης, όπου μέσω στενής και επίσημης συνεργασίας θα συμβαίνει εκτεταμένη ανταλλαγή πληροφοριών και σχηματισμός νέων γνώσεων και διαδικασιών. Το μοντέλο αυτό μελετάται υπό το πρίσμα των αναμενόμενων ρυθμιστικών αλλαγών προς τη γενικότερη κατεύθυνση της επέκτασης της ευθύνης για τα προϊόντα και της αυξημένης ευθύνης του παραγωγού (Hvidtfeldt & Petersen, 2014).

Προς το παρόν παραμένει άγνωστο ποιο από αυτά τα μοντέλα θα γίνει το κυρίαρχο ή ο κανόνας. Το πιθανότερο είναι ότι θα υπάρχει ένας συνδυασμός των διαφόρων οργανωτικών μορφών για κάποια χρονική περίοδο. Επιπλέον θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτά τα οργανωτικά ζητήματα περιλαμβάνουν πτυχές των υλικών μεγάλης σημασίας για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών. Οι οργανωτικές λύσεις για την απομάκρυνση και την ανακύκλωση αντανακλώνται στην κατανάλωση των πόρων και των υλικών και στη δυνατότητα να γίνουν βελτιώσεις σε αυτά. Το τρίτο μοντέλο είναι αυτό που διευκολύνει άμεσα και υποστηρίζει τη σύνδεση της φάσης του σχεδιασμού με τη φάση της απομάκρυνσης και της ανακύκλωσης, αφού η συνεργασία μεταξύ των φορέων του σχεδιασμού και των φορέων της ανακύκλωσης θα υποστηρίξει την ενσωμάτωση της γνώσης από τις διάφορες φάσεις του κύκλου ζωής και θα συμβάλλει στην ολοκληρωμένη ανάπτυξη των τεχνολογιών αιολικής ενέργειας. Ωστόσο, οι φάσεις του σχεδιασμού και της αφαίρεσης μπορούν επίσης να συνδεθούν με τα μοντέλα 1 και 2 (Hvidtfeldt & Petersen, 2014).

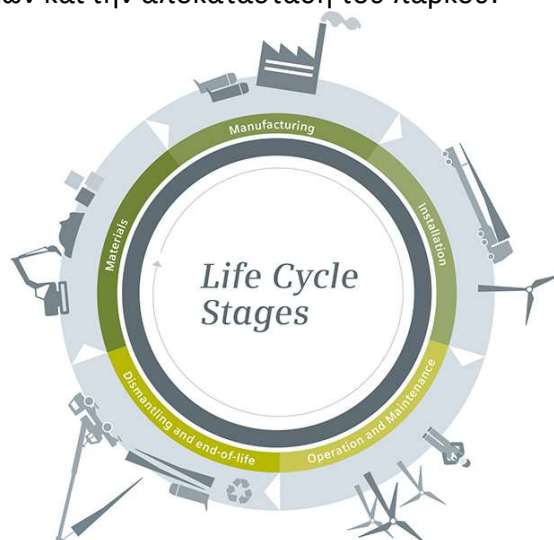
## 8 Κύκλος ζωής και η αξιολόγησή του

Η αιολική ενέργεια είναι αναγνωρισμένη ως μια καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Παρόλο που αυτό ισχύει, όσον αφορά τις εκπομπές και τη χρήση της ενέργειας για το στάδιο της λειτουργίας των ανεμογεννητριών, τα πράγματα δεν είναι τόσο ξεκάθαρα για τα στάδια της δημιουργίας και του τέλους ζωής. Έτσι είναι σημαντικό να εξετάσουμε τις ανεμογεννήτριες μέσα σε ένα γενικότερο πλαίσιο διαχείρισης του κύκλου ζωής, δηλαδή από την αρχή (εξόρυξη υλικών) ως το τέλος (τελική απόρριψη) για να μπορέσουμε να αποφανθούμε για το ποια είναι πραγματικά τα οφέλη των ανεμογεννητριών σαν τεχνολογία παραγωγής ενέργειας (τεχνολογικά, οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντολογικά).

### 8.1 Κύκλος ζωής

Ο κύκλος ζωής των ανεμογεννητριών μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- στο πεδίο, που αφορά το στάδιο της λειτουργίας.
- ανάπτυξη, που αφορά τα στάδια της εξόρυξης των πρώτων υλών και της κατασκευής και
- κατάντη, που αφορά τα στάδια της αποξήλωσης των ανεμογεννητριών, την τελική διάθεση των υλικών και την αποκατάσταση του πάρκου.



Εικόνα 32. Στάδια Κύκλου Ζωής ανεμογεννητριών (Braad, 2015).

#### 8.1.1 Πεδίο

Ο αντίκτυπος των ανεμογεννητριών στο περιβάλλον, όσον αφορά το στάδιο της λειτουργίας περιορίζεται στο άμεσο περιβάλλον τους, καθώς οι εκπομπές των ανεμογεννητριών είναι ελάχιστες. Έτσι τα περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με το στάδιο της λειτουργίας έχουν να κάνουν με την επίδραση που έχουν στα πουλιά και στα ζώα ή στο μικροκλίμα της περιοχής. Άλλα ζητήματα αφορούν το θόρυβο, την οπτική επίδραση των ανεμογεννητριών και γενικότερα ζητήματα κοινωνικής αποδοχής (Leung & Yang, 2012).

#### Οικοσύστημα

##### Θόρυβος

Ο θόρυβος που προκαλείται κατά τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, καθώς και η οπτική επίδραση που έχουν στο τοπίο, είναι σημαντικά θέματα για τους κατοίκους των περιοχών

κοντά σε αιολικά πάρκα. Οι ανεμογεννήτριες προκαλούν θόρυβο με δύο κυρίως τρόπους, μηχανικά και αεροδυναμικά. Ο αεροδυναμικός θόρυβος συγκεκριμένα, θεωρείται κρίσιμο ζήτημα καθώς η χαμηλής συχνότητας θορύβου που παράγεται μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στους κατοίκους των πέριξ όπως συμπτώματα άγχους, πονοκέφαλοι, διαταραχές του ύπνου, απώλεια ακοής και διαταραχές του αιθουσαίου συστήματος (ισορροπία, χωρικός προσανατολισμός). Κάποιες από τις λύσεις που έχουν προταθεί είναι η τοποθέτηση ανεμογεννητριών σε απόσταση τουλάχιστον 2 χιλιομέτρων μακριά από κατοικημένες περιοχές, κατάλληλη διαμόρφωση των κατοικιών ώστε να αποτρέπεται η εισχώρηση του θορύβου και βελτιστοποίηση των πτερυγίων με σκοπό τη μείωση της έντασης. Όσο για το οπτικό ζήτημα μοιάζει να είναι υποκειμενικό και ως εκ τούτου είναι δύσκολο να αποφανθεί κανείς για αυτό (Leung & Yang, 2012).

### Πουλιά

Μελέτες έχουν δείξει ότι τα πουλιά προσαρμόζονται γρήγορα στο να αποφεύγουν τις ανεμογεννήτριες και παρόλο που κάποια πουλιά εξακολουθούν να σκοτώνονται από πτερυγία ανεμογεννητριών ο αριθμός είναι πολύ μικρός σε σύγκριση με άλλες δραστηριότητες του ανθρώπου όπως είναι η αποψίλωση και η αστικοποίηση. Μια λύση που εφαρμόζεται αυτή τη στιγμή σε ένα αιολικό πάρκο στο Τέξας είναι η χρήση ραντάρ (όπως αυτά που χρησιμοποιούν στα αεροδρόμια) τα οποία θέτουν τις ανεμογεννήτριες εκτός λειτουργίας όταν ανιχνευτεί πιθανός κίνδυνος για τα πουλιά. Ενώ μια άλλη λύση που προτείνεται είναι η εκπόνηση κατάλληλης μελέτης πριν την κατασκευή αιολικού πάρκου, ώστε να γίνουν κατανοητές οι συμπεριφορές αναπαραγωγής και διατροφής των τοπικών πτηνών, καθώς και οι δρόμοι μετανάστευσης των αποδημητικών πουλιών (Leung & Yang, 2012).

### Αλλαγή μικροκλίματος

Καθώς τα αιολικά πάρκα γίνονται όλο και περισσότερα και μεγαλύτερα, εκφράζονται ανησυχίες για το κατά πόσο μπορεί να επηρεάσουν τα τοπικά μικροκλίματα. Μέχρι σήμερα έχουν αναφερθεί δύο περιπτώσεις που αφορούν αυτό το ζήτημα.

Στην πρώτη περίπτωση, στην περιφέρεια του Ξίλινγκολ (Εσωτερική Μογγολία), από τα στοιχεία βροχόπτωσης που παρείχε το Γραφείο Στατιστικών Υδάτων, προέκυψε ότι υπήρξε πρωτοφανής ξηρασία από το 2005 και ότι η ξηρασία αυτή αναπτύχθηκε πολύ γρηγορότερα στις περιοχές με ανεμογεννήτριες. Στη δεύτερη περίπτωση, στο Σαν Γκοργκόνιο των Ηνωμένων Πολιτειών αναφέρθηκε ότι μετά από ανάλυση των αρχείων θερμοκρασίας του αιολικού πάρκου Roy and Justin, διαπιστώθηκε ότι οι ανεμογεννήτριες επηρέαζαν τις τοπικές επιφανειακές θερμοκρασίες, κάτι που παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του Ξίλινγκολ. Παρόλο που δεν μπορούμε να συνδέσουμε άμεσα τα παραπάνω φαινόμενα με τις ανεμογεννήτριες, είναι απαραίτητο να συνεχίσουμε να μελετάμε τέτοιου είδους γεγονότα αφού όλο και περισσότερα αιολικά πάρκα αναμένεται να κατασκευαστούν τις επόμενες δεκαετίες, καθιστώντας πολλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που τώρα φαίνονται μικρές μείζονος σημασίας στο μέλλον (Leung & Yang, 2012) (Bithas & Kalimeris, 2016).

### **Κοινωνική αποδοχή**

Παρόλο που η κοινή γνώμη φαίνεται να είναι θετικά προσκείμενη προς την αιολική ενέργεια, πολλές φορές εμφανίζονται δυσκολίες στην κατασκευή νέων αιολικών πάρκων με τις περισσότερες αντιδράσεις να αφορούν την οπτική επίδραση που έχουν οι ανεμογεννήτριες στο

τοπίο. Αυτό το φαινόμενο προσπάθησαν πολλοί να ερμηνεύσουν με τον όρο σύνδρομο ΟΣΑΜ (Όχι Στην Αυλή Μου). Ωστόσο, άλλες μελέτες αμφισβητούν το κατά πόσο αυτός ο όρος εξηγεί τις κοινωνικές αντιδράσεις και ότι άλλοι παράγοντες είναι ίσης ή και μεγαλύτερης σημασίας. Αναφέρεται επίσης, ότι μπορεί να ισχύει το ακριβώς αντίθετο, ΠΣΑΜ (Παρακαλώ Στην Αυλή Μου), όταν οι ανεμογεννήτριες παρουσιάζονται ως μια πηγή εισοδήματος για τους κατοίκους των περιοχών (Jobert, Laborgne, & Mimler, 2007).

Γενικότερα, η ερμηνεία των κοινωνικών αντιδράσεων είναι ένα πολύπλοκο ζήτημα. Ωστόσο, μελέτες έχουν δείξει ότι μικρότερα πάρκα με λίγες μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι περισσότερο αποδεκτά από μεγάλα πάρκα με πολλές μικρές ανεμογεννήτριες. Επιπλέον σημειώνεται ότι η κίνηση των πτερυγίων έχει θετικό αντίκτυπο στην κοινωνική αποδοχή, διότι εμπνέει ένα αίσθημα οφέλους. Παρ' όλ' αυτά, ο τύπος του τοπίου θεωρείται πιο σημαντικός από τον σχεδιασμό ή ακόμα και το μέγεθος του πάρκου (Jobert et al., 2007).

Η έννοια του οικονομικού οφέλους, δηλαδή η δυνατότητα συμμετοχής της τοπικής κοινωνίας στο έργο, είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την κοινωνική αποδοχή των αιολικών. Εκτός της οικονομικής συμμετοχής, η συμμετοχή του κοινού στη διαδικασία σχεδιασμού των αιολικών πάρκων είναι επίσης σημαντική, καθώς προσδίδει ένα αίσθημα "διαδικαστικής δικαιοσύνης" το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στις συγκρούσεις (Jobert et al., 2007).

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την κοινωνική αποδοχή των αιολικών είναι η καλή ενημέρωση των ντόπιων σχετικά με την αιολική ενέργεια, οι προηγούμενες χρήσεις του χώρου που θα κατασκευαστεί το πάρκο και πως θα επηρεάσει τις χρήσεις αυτές, η ιδιοκτησία του χώρου, οι επιπτώσεις που μπορεί να έχει στον τουρισμό και γενικότερα στην οικονομία της τοπικής κοινωνίας και άλλα (Jobert et al., 2007).

### **8.1.2 Ανάντη**

Τα ενεργειακά συστήματα χαμηλών εκπομπών άνθρακα, όπως οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν μέταλλα, όπως σπάνιες γαίες, πολύ περισσότερο από τα παραδοσιακά ενεργειακά συστήματα και εκφράζονται ανησυχίες ότι αυτό μπορεί να είναι ένα πρόβλημα για τη μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Επιπλέον, όταν η ζήτηση ενός συγκεκριμένου μετάλλου αυξάνεται, συνεπάγεται αύξηση της ποσότητας των μηχανημάτων που απαιτούνται για την εξόρυξη του συγκεκριμένου μετάλλου, καθώς και στη σχετική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (και επομένως στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου) για την κατασκευή και τη λειτουργία των μηχανημάτων αυτών (de Koning et al., 2018).

Βέβαια η μελλοντική προσφορά και ζήτηση για τα μέταλλα είναι εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθεί. Αυτό αρχικά γιατί υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο θα αναπτυχθούν οι ενεργειακές τεχνολογίες στο μέλλον και με το ποιες θα είναι οι μεταλλικές απαιτήσεις τους. Δεύτερον, μπορούν να προβλεφθούν διάφορα σενάρια με διαφορετικές υποθέσεις σχετικά με τη διεύθυνση των τεχνολογιών ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Τρίτον, δεν είναι γνωστό εάν και κατά πόσο θα καταστούν διαθέσιμες νέες εναλλακτικές λύσεις υποκατάστασης μεταξύ μετάλλων και άλλων υλικών. Τέλος, το πως είναι δυνατόν να αναπτυχθεί η προσφορά για τα μέταλλα είναι επίσης άγνωστο και αυτό γιατί ο κύριος περιορισμός της προσφοράς είναι ότι ένα μέταλλο πρέπει να εξορύσσεται οικονομικά. Έτσι, η πραγματική μακροπρόθεσμη προσφορά μετάλλων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη νέα

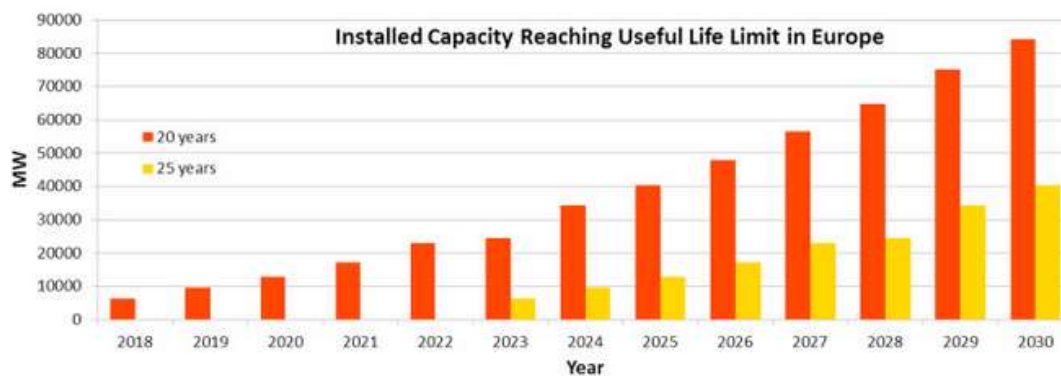
τεχνολογία (εξόρυξη), από τις καμπύλες αθροιστικής διαθεσιμότητας και τις αναμενόμενες και πραγματικές τιμές (de Koning et al., 2018).

Πρόσφατη μελέτη που πραγματοποιήθηκε, επιβεβαιώνει τη σημαντική αύξηση που θα υπάρξει στις μεταλλικές απαιτήσεις κατά τη μετάβαση σε μια οικονομία με χαμηλές εκπομπές άνθρακα στους τομείς των μεταφορών (στεριά) και της ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, φαίνεται ότι επειδή οι υπάρχουσες χρήσεις μετάλλων σε άλλους τομείς δεν απαιτούν δραστική μετάβαση, η συνολική ετήσια αύξηση της προσφοράς δεν θα είναι ακραία (de Koning et al., 2018).

### 8.1.3 Κατάντη

Καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών, η φάση του παροπλισμού αποτελεί το κομμάτι με την περισσότερη αβεβαιότητα όσον αφορά την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αιολικής ενέργειας. Οι περισσότερες μελέτες μέχρι σήμερα εστιάζουν κυρίως στη φάση της λειτουργίας των ανεμογεννητριών (στο πεδίο) και σε κάποιες περιπτώσεις στη φάση της κατασκευής και της εγκατάστασης (ανάντι). Ένας βασικός λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι επειδή η βιομηχανία των ανεμογεννητριών είναι σχετικά νέα, υπάρχει περιορισμένη ποσότητα πρακτικής εμπειρίας στην αφαίρεση και την ανακύκλωση των ανεμογεννητριών. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στην περίπτωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών, οι οποίες είναι ένα αρκετά πρόσφατο φαινόμενο (Hvidtfeldt & Petersen, 2014).

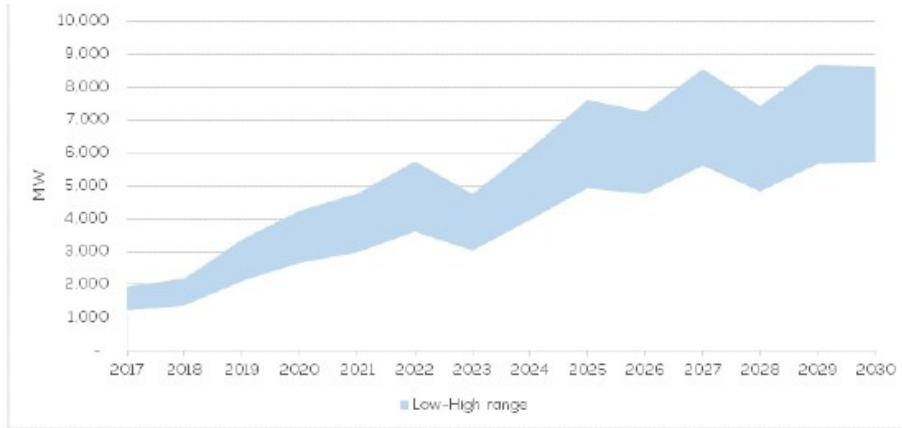
Οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν ικανοποιητικά για 20 με 25 χρόνια. Μετά το πέρας της ωφέλιμης διάρκειας ζωής τους θα πρέπει να απομακρυνθούν και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα μεγάλο όγκο υλικών από ανεμογεννήτριες που θα πρέπει να αντιμετωπιστεί (Hvidtfeldt & Petersen, 2014). Στην Ευρώπη πιο συγκεκριμένα, ένα μεγάλο μέρος των ανεμογεννητριών που είναι εγκατεστημένες φτάνουν στο τέλος ζωής τους από το 2020 μέχρι το 2030 (WindEurope, 2017b).



Εικόνα 33. Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ευρώπη που φτάνει στο τέλος της ωφέλιμης ζωής της (Martínez et al., 2018).

Πέρα όμως από τις όποιες ενέργειες αποκατάστασης μπορούν να γίνουν στο τέλος της διάρκειας ζωής ενός αιολικού πάρκου, η ταχύτερη ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα της αιολικής ενέργειας μπορεί να σημαίνει ότι ένα αιολικό πάρκο γίνεται τεχνολογικά ξεπερασμένο σε λιγότερο από το μισό της ωφέλιμης διάρκειας ζωής του. Έτσι, ένα αιολικό πάρκο μπορεί να αντικατασταθεί μερικώς ή ολικώς (repower) π.χ. στα 8 χρόνια λειτουργίας του, δηλαδή πολύ νωρίτερα από το τέλος της διάρκειας ζωής του, προσθέτοντας επιπλέον όγκο υλικών από ανεμογεννήτριες (Martínez et al., 2018). Ενδεικτικά, εκτιμάται ότι ο ετήσιος όγκος

αποκατάστασης θα αυξηθεί από 1-2 GW το 2017 στα 5.5-8.5 GW έως το 2027 (WindEurope, 2017b).



Εικόνα 34. Όγκος repowering μέχρι το 2030 (WindEurope, 2017b)

## 8.2 Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής

Το παρόν υποκεφάλαιο αποτελεί ελεύθερη μετάφραση της σχετικής βιβλιογραφίας για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων

### 8.2.1 Ορισμός ορίων συστήματος

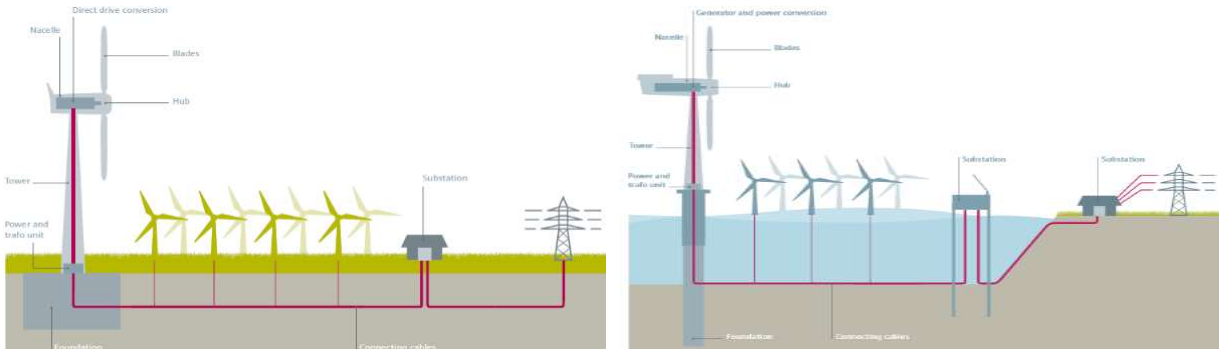
Χρησιμοποιήθηκε μεθοδολογία Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής (AKZ) για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις σύγχρονες τεχνολογίες αιολικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε ευρωπαϊκό πλαίσιο. Οι AKZ διεξήχθησαν σύμφωνα με την κατευθυντήρια γραμμή του Διεθνούς Συστήματος Δεδομένων Κύκλου Ζωής Αναφοράς (ILCD) (EC-JRC, 2010). Η λειτουργική μονάδα (FU) στην οποία αξιολογήθηκαν τα συστήματα (ISO, 2006) ορίστηκε ως «η τροφοδοσία 1kWh που παραδόθηκε στο δίκτυο» και αντανακλά την κύρια λειτουργία των συστημάτων. Για να διασφαλιστεί η τεχνολογική και αντιπροσωπευτικότητα της αγοράς, μηχανικοί της βιομηχανίας αιολικής ενέργειας παρείχαν στοιχεία για τον καθορισμό των τεχνικών προδιαγραφών και του μεγέθους των εγκαταστάσεων με βάση τα στοιχεία του 2013 και τις μελλοντικές πωλήσεις. Τα αιολικά πάρκα που παρουσιάζονται στον πίνακα 1 περιλαμβάνουν τις χερσαίες και τις υπεράκτιες αγορές και τις δύο κύριες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας με άμεση κίνηση και με κιβώτιο ταχυτήτων

Πίνακας 1 Τεχνική προδιαγραφή αιολικών πάρκων. Τα ονόματα αντιστοιχούν σε άμεση μετάδοση κίνησης (D) και με κιβώτιο ταχυτήτων (G)

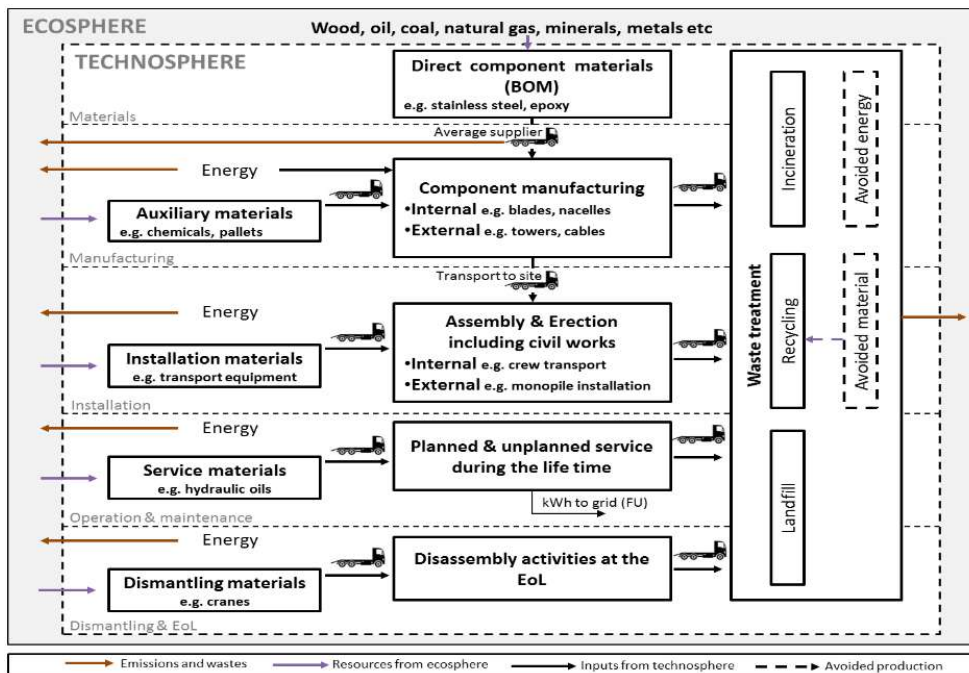
Market	Plant name	Turbine (MW-rotor diameter in m)	Hub height (m)	Wind speed (m/s)	Losses* (%)	Energy to grid /turbine/year (MWh)	Lifetime (y)	Turbines /park (nr)	Cable distance /turbine (km)
onshore	G2	2.3-108	99.5	8.5	10	11169	20	20	13
	D3	3.2-113	92.5	8.5	10	14403	20	20	13
offshore	G4	4.0-130	68.25	9.5	15	20528	20	80	30/22**
	D6	6.0-154	87.72	10	15	31045	25	80	50/22**



Τα συστήματα περιλαμβάνουν όλα τα στοιχεία από την ανεμογεννήτρια ως το δίκτυο διανομής (δηλαδή το δίκτυο) αλλά χωρίς να υπολογίζονται συστήματα εφεδρικής αποθήκευσης ή αποθήκευσης ενέργειας. Τα όρια του συστήματος περιλαμβάνουν τον κύκλο ζωής των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας από την εξαγωγή πρώτων υλών μέχρι το τέλος ζωής.



Εικόνα 35. Όρια συστήματος για χερσαία και παράκτια πάρκα (Siemens AG, 2014)



Εικόνα 36. Όρια συστήματος της AKZ για την αξιολόγηση της παροχής 1 kWh στο δίκτυο από εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας

### 8.2.2 Δεδομένα προς ανάλυση

Τα πρωτογενή δεδομένα συλλέχθηκαν από τη βιομηχανίας. Η διαφορά μεταξύ των δύο αγορών οφείλεται κυρίως στην εγκατάσταση και τη λειτουργία, δηλαδή οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις απαιτούν 190 φορές περισσότερη ενέργεια κατά την εγκατάσταση ανά εγκατεστημένο MW σε σύγκριση με την ξηρά, ενώ η χερσαία εγκατάσταση απαιτεί περισσότερα από 3000 m<sup>2</sup> οδοποιίας ανά μονάδα, επιπλέον χώρους στάθμευσης κ.λπ. Όσον αφορά την υποδομή, οι διαφορές σχετίζονται με τύπους υλικών π.χ. Τα χερσαία θεμέλια είναι κατασκευασμένα από ατσάλινο οπλισμένο σκυρόδεμα ενώ τα χαλύβδινοι μονοπυλώνες χρησιμοποιούνται υπεράκτια. Επίσης, υπάρχει διαφορά στις ποσότητες των απαιτούμενων υλικών κατασκευής

π.χ. Τα υπεράκτια πάρκα απαιτούν 20 φορές περισσότερα υλικά για καλωδίωση σε σύγκριση με την ξηρά λόγω θωράκισης καλωδίων αλλά και απόστασης από την ακτή. Στον παρακάτω πίνακα δίνεται το βάρος και η σύνθεση της υποδομής, δηλαδή στρόβιλους, θεμέλια, υποσταθμούς, καλωδιώσεις. Για τα χερσαία πάρκα το μεγαλύτερο μέρος του βάρους οφείλεται στο σκυρόδεμα (στα θεμέλια), ενώ για τα υπεράκτια οφείλεται σε μέταλλα (κυρίως χάλυβα).

Πίνακας 2 Συγκεντρωτική ποσότητα υλικών που απαιτείται για την υποδομή

Onshore plants (average G2&D3)		Offshore plants (average G4&D6)	
Infrastructure (t)	3.57E+03	Infrastructure (t)	1.42E+04
Infrastructure materials	wt%	Infrastructure materials	wt%
Concrete	72.8%	Steel	73%
Steel	20.5%	Iron	6.4%
Iron	1.8%	Concrete	4.7%
Epoxy	1.2%	Plastics	3.6%
Glass fibre	1%	Epoxy	2.4%
Plastics	0.8%	Glass fibre	2.3%
Aluminium	0.7%	Aluminium	2%
Copper	0.7%	Copper	1.4%

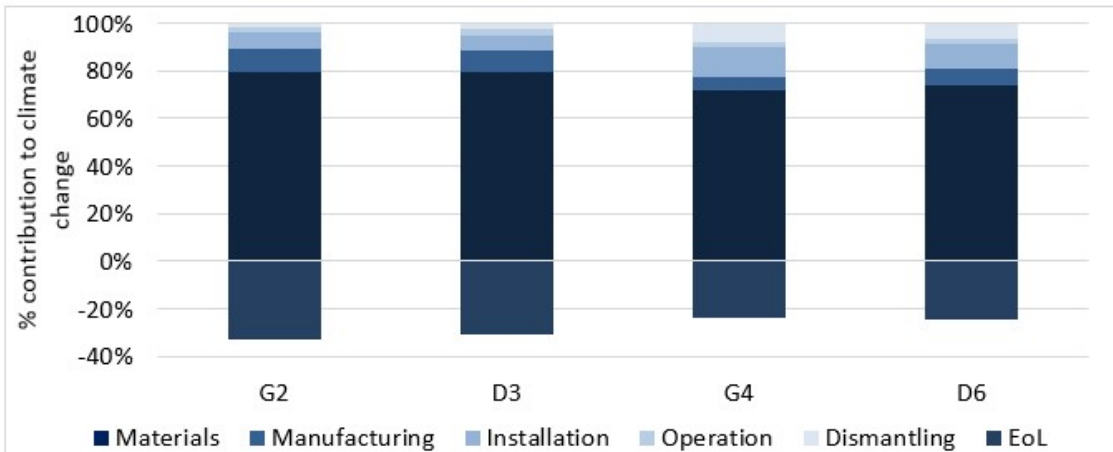
Οι κύριες παραδοχές για το τέλος ζωής των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας δίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3 Βασικές παραδοχές για την διαχείριση του τέλους ζωής των αιολικών πάρκων

Waste type	% collected	Treatment method	Avoided product
Metals	50% from foundations and offshore cables/ 90% from all others	Recycling (energy requirements based on (Grimes et al. 2008)	Average material in the market; substitution rate 90wt%
Plastics	100%	Incineration (based on ecoinvent v3.1)	Electricity and heat based on the lower heating values from ecoinvent v3.1
Blades	100%	Shredding (28kWh/t) and incineration in cement production	Epoxy substitutes heavy fuel; rate based on the calorific values of epoxy 32 MJ/kg (Walters et al. 2000) and heavy fuel oil 43MJ/kg Glass fibre substitutes sand (40wt%) and clay (60wt%)
Concrete	50%	Recycling (crushing based on ecoinvent v3.1)	Crushed gravel; substitution rate 90wt%
Gravel	75%	Reuse	Crushed gravel; substitution rate 90wt%

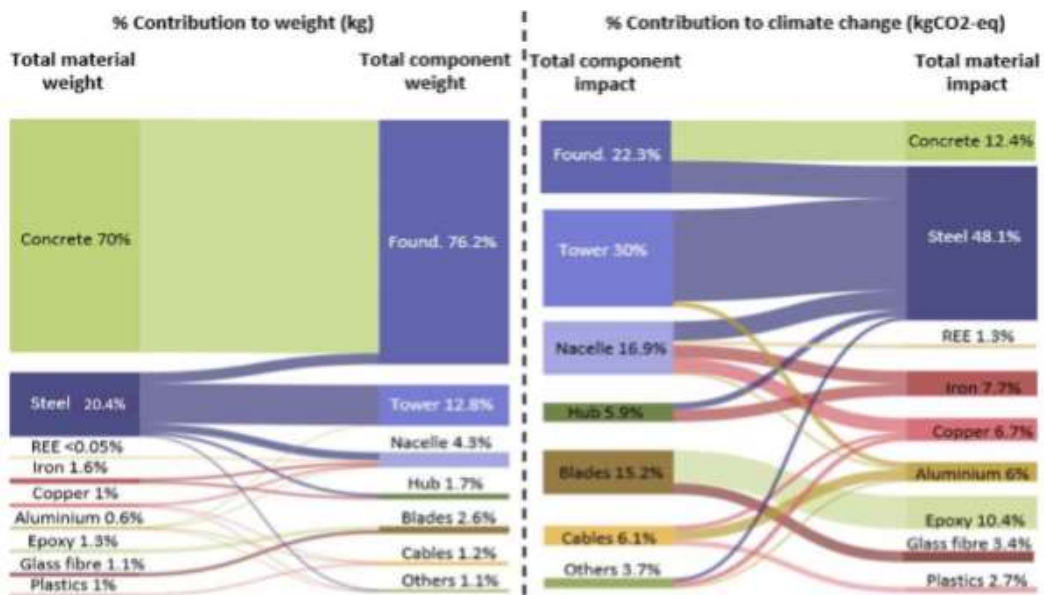
### 8.2.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της ΑΚΖ για την κλιματική αλλαγή κυμαίνονταν για χερσαία και υπεράκτια από κάτω από 7 έως 11g-CO<sub>2</sub>eq / kWh. Οι τιμές είναι συνεπείς με τα ευρήματα της IPCC (R. Wiser et al., 2011) και άλλων μελετητών που αξιολογούν παρόμοιες τεχνολογίες (Garrett & Rønne, 2013; Haapala & Prempreeda, 2014; Martínez, Sanz, Pellegrini, Jiménez, & Blanco, 2009; Nugent & Sovacool, 2014; Owens & Chapman, 2013). Και στις δύο αγορές, οι οδηγοί για καλύτερη απόδοση είναι: (1) η προηγμένη τεχνολογία, δηλαδή οι γεννήτριες άμεσης κίνησης και η βελτιστοποιημένη σχεδίαση λεπίδων και (2) το μέγεθος, δηλαδή οι μεγαλύτερες τουρμπίνες αποδίδουν καλύτερα που αντικατοπτρίζουν τις οικονομίες κλίμακας (Lenzen & Munksgaard, 2002; Treméac & Meunier, 2009). Όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα για την κλιματική αλλαγή, οι περισσότερες από τις επιπτώσεις οφείλονται στην εξόρυξη και την παραγωγή υλικών.



Εικόνα 37. % Συμμετοχή των σταδίων του κύκλου ζωής των αιολικών πάρκων στην κλιματική αλλαγή

Στην εικόνα 37 φαίνονται τα βασικά υλικά που αποτελούν μια χερσαία ανεμογεννήτρια, σε ποια μέρη της ανεμογεννήτριας και σε τι ποσότητες (κατά βάρος) συναντώνται, καθώς και η συνεισφορά τους στην κλιματική αλλαγή, βάση του αποτυπώματος άνθρακα



Εικόνα 38 Βασικά υλικά σε χερσαία ανεμογεννήτρια (% wt) και αντίστοιχες επιπτώσεις (% συνεισφορά στην αλλαγή του κλίματος) (Βοπου, 2016).

Οι παράγοντες που συμβάλλουν περισσότερο από 1% στην κλιματική αλλαγή δίδονται στον Πίνακα 4. Συνολικά, αυτά συμβάλλουν περισσότερο από 90% στη συνολική επίδραση της κλιματικής αλλαγής. Γίνεται επίσης αντιληπτή η κοινή ευθύνη (και επαγωγικά υπευθυνότητα) καθόλη την αξιακή αλυσίδα.

Πίνακας 4 συνεισφορά (%) στην κλιματική αλλαγή (CC). Το τέλος ζωής εκφράζεται ως %των άλλων σταδίων

LC Stage	Inventory items	% contribution to CC	
		Onshore G2-D3	Offshore G4-D6
Materials	Tower	26-24%	9-11%
	Foundation	18%	29%
	Nacelle	11%-13%	9-10%
	Blades	11%-12%	7%
	On/re cables	5%	2-1%
	Off/re cables	-	10-13%
	Hub	4%-5%	3-5%
	Transformer unit	1%	<1%
Power unit	Power unit	1%	<1%
Manufacturing	Tower	2-1%	<1%
	Nacelle & hub	2%	1%
	Cables	<1%	2%
	Waste mgmt.	<1%	1%-2%
Installation	Gravel road	4%-3%	-
	Cable laying	1%	3%
	Vessel use	-	4%
	Foundation setting	<1%	4%-3%
Operation	Service	<1%	1%
Dismantling	Vessel use	-	3%
	Foundation removal	<1%	3%-2%
	Cable removal	<1%	1%
End of Life	Tower recycling	-(19-18%)	-(6%-8%)
	Foundation recycling	-4%	-(11-10%)
	Nacelle recycling	-(6% -5%)	-4%

## 9 Τρέχουσα κατάσταση στην Ελλάδα

Η οδηγία 2009/28/EK για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θέσπισε ένα ευρωπαϊκό πλαίσιο για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και καθόρισε υποχρεωτικούς εθνικούς στόχους προκειμένου να επιτευχθεί μερίδιο ανανεώσιμης ενέργειας τουλάχιστον 20% στην τελική κατανάλωση ενέργειας έως το 2020. Κάθε κράτος μέλος, ήταν υποχρεωμένο να καθορίσει στόχους μέσω των εθνικών σχεδίων δράσης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (NREAP). Επιπλέον, κάθε μεμονωμένο σχέδιο έπρεπε να καθορίσει το σενάριο συνδυασμού τεχνολογίας, την τροχιά που πρέπει να ακολουθηθεί και τα μέτρα και τις μεταρρυθμίσεις για την υπέρβαση των φραγμών και την εξασφάλιση της ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Δεδομένου ότι κάθε κράτος μέλος έχει διαφορετικούς στόχους και ανεξάρτητη επιλογή πολιτικής στήριξης, κάθε κυβέρνηση έθεσε ένα ειδικό ρυθμιστικό πλαίσιο, ιδίως όσον αφορά τις στρατηγικές στήριξης, αλλά και τις διοικητικές διαδικασίες και την πρόσβαση στο δίκτυο (Serrano González & Lacal Arántegui, 2015).

Ο ενεργειακός τομέας στην Ελλάδα σήμερα εξαρτάται σημαντικά από τα ορυκτά καύσιμα, από τα οποία τα περισσότερα είναι εισαγόμενα. Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το μεγαλύτερο ποσοστό προέρχεται από το λιγνίτη, τα παράγωγα του πετρελαίου και το φυσικό αέριο. Ο λιγνίτης είναι το μόνο ορυκτό καύσιμο που παράγεται στη χώρα, όμως το Εθνικό σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) έχει αποφανθεί για απολιγνιτοποίηση της χώρας ως το 2028. Οι αξορύξεις λιγνίτη έχουν ήδη περιοριστεί και τα νέα δεδομένα μιλούν κλείσιμο των λιγνιτικών μονάδων ως το 2023 (ΥΠΕΝ, n.d.). Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω εξάρτηση της Ελλάδας από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον στα μη διασυνδεδεμένα Ελληνικά νησιά, η ηλεκτροδότηση γίνεται από αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά κύριο λόγο από τοπικούς θερμικούς σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι λειτουργούν με καύσιμο το πετρέλαιο· βαρύ (μαζούτ) ή και ελαφρύ (ντίζελ). Αυτό έχει σημαντικό αντίκτυπο στο πόσα ξοδεύει η χώρα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της. Η λύση σε αυτά τα πρόβλημα φαίνεται να είναι η μεγαλύτερη συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ΡΑΕ, n.d.).

Ο κοινός Ευρωπαϊκός στόχος που έχει τεθεί, μιλάει για 32% συνεισφορά των Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σε επίπεδο ΕΕ και για οριστική απεξάρτηση από όλα τα ορυκτά καύσιμα το αργότερο ως το 2050 (ΕΛΕΤΑΕΝ, n.d.). Αντίστοιχα ο εθνικός στόχος για το 2030 είναι το 35% της ακαθάριστης τελικής ενέργειας να προέρχεται από ΑΠΕ (37% από ΑΣΠΗΕ) και προϋποθέτει ένα συνδυασμό μέτρων που αφορούν την ενεργειακή απόδοση και τη μαζική διεύθυνση των τεχνολογιών ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στην παροχή θερμότητας και στον τομέα των μεταφορών (GR Law 3851, 2010)

Πέραν των Ευρωπαϊκών στόχων και της ενεργειακής ανεξαρτησίας της χώρας, ένας άλλος σημαντικός λόγος για την ανάπτυξη των ΑΠΕ είναι η συμμόρφωση της Ελλάδας με τις δεσμεύσεις του πρωτόκολλου του Κιότο, για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Μεταξύ των διαθέσιμων τεχνολογιών ΑΠΕ, η αιολική ενέργεια αναμένεται να συνεισφέρει το περισσότερο (Kabouris & Hatziargyriou, 2008).

## 9.1 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι μια χώρα με πλούσιο αιολικό δυναμικό, ένα από τα ελκυστικότερα στην Ευρώπη. Αυτό οφείλεται ως επί το πλείστον στο ότι είναι μια χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και τεράστιο πλήθος νησιών. Έτσι, ο ρόλος της αιολικής ενέργειας είναι πολύ σημαντικός για τη χώρα, αφού η αξιοποίηση αυτού του αιολικού δυναμικού θα μπορούσε να καλύψει σε σημαντικό βαθμό την ελληνική ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια και να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών. Οι περιοχές με τις καλύτερες συνθήκες ανέμου εντοπίζονται στα νησιά του Αιγαίου, την Κρήτη και στα ανατολικά της ενδοχώρας (Εύβοια, νοτιοανατολική Πελοπόννησο και Θράκη) (Μπούντρη, 2016)(Kabouris & Hatziaargyriou, 2008).

Στην Ελλάδα οι πρώτες προσπάθειες για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού ξεκίνησαν από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού στις αρχές της δεκαετίας του 1980 με την εγκατάσταση του πρώτου αιολικού πάρκου (έτος 1982). Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα ουσιαστικά ξεκινάει το 1999. Έτσι, η Ελλάδα κατάφερε να φτάσει σχεδόν τα 2.690 MW εγκατεστημένης ισχύος το 2016 και να καλύπτει ένα σημαντικό μέρος των ετήσιων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια (Μπούντρη, 2016).

Όμως παρόλο που η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων στην Ελλάδα έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια είναι γεγονός ότι η αύξηση αυτή είναι πολύ μικρή, αν λάβουμε υπόψη τις μεγάλες ποσότητες αιολικού δυναμικού που υπάρχουν στην ελληνική επικράτεια αλλά και τους στόχους που έχουν τεθεί (Μπούντρη, 2016).

Επειδή η ΑΠΕ παλαιότερα δεν ήταν ακόμα οικονομικά ανταγωνιστικές σε σχέση με τις συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας, προωθούνταν από διάφορα κίνητρα, όπως ευνοϊκά σταθερά τιμολόγια τροφοδότησης, εγγυημένη πρόσβαση στο δίκτυο, συμβόλαια μακράς διάρκειας (10 έτη), επιδοτήσεις (μέχρι και 50%), φορολογικές απαλλαγές κ.α. (Kabouris & Hatziaargyriou, 2008). Πολλά από αυτά τα μέτρα εξακολουθούν να ισχύουν και σήμερα αλλά ταυτόχρονα οι ΑΠΕ και πιο συγκεκριμένα οι ανεμογεννήτριες έχουν γίνει αρκετά ανταγωνιστικές.

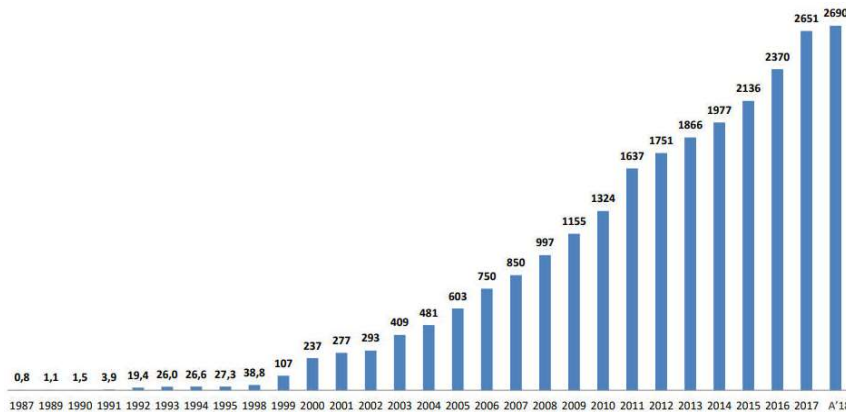
Αυτές οι πολιτικές έχουν βοηθήσει σημαντικά στην ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα και έχουν προσελκύσει αρκετούς επενδυτές. Ωστόσο, παρόλο το μεγάλο ενδιαφέρον που υπάρχει για την αιολική ενέργεια, μόνο ένα μικρό ποσοστό των αιτήσεων που έχουν καταβληθεί στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) έχει υλοποιηθεί. Οι κύριοι λόγοι που η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας δεν είναι η επιθυμητή είναι: η ισχυρή στάση της κοινής γνώμης ενάντια στις ανεμογεννήτριες, οι πολύπλοκες διαδικασίες αδειοδότησης, αλλά και η ανυπαρξία διασυνδεδεμένου δικτύου μεταξύ των νησιωτικών περιοχών, όπου επικρατούν οι υψηλότερες μέσες ταχύτητες ανέμου (Kabouris & Hatziaargyriou, 2008).

Η στάση της κοινής γνώμης όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες είναι ένα πολύπλοκο και πολυδιάστατο ζήτημα. Ο βασικότερος παράγοντας όμως φαίνεται να είναι η έλλειψη ενός εθνικού σχεδιασμού ο οποίος να λαμβάνει υπόψιν τις ανησυχίες των πολιτών και να αξιοποιεί τα πραγματικά οφέλη των ανεμογεννητριών (οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά). Η άναρχη ανάπτυξη των ΑΠΕ μοιάζει να είναι το μεγαλύτερο πρόβλημα. Ενδεικτικά η Ελλάδα βρίσκεται στις πρώτες θέσεις αύξησης του δείκτη κατάτμησης του τοπίου (κατακερματισμός οικοσυστημάτων σε μικρότερα τμήματα, λόγω δρόμων και λοιπών τεχνικών επιφανειών). Οι δρόμοι σχετίζονται άμεσα με την εγκατάσταση ανεμογεννητριών και αποτελούν το έναυσμα για την περεταίρω αλλοίωση των φυσικών οικοσυστημάτων. Η Ελλάδα λόγω του υψηλού

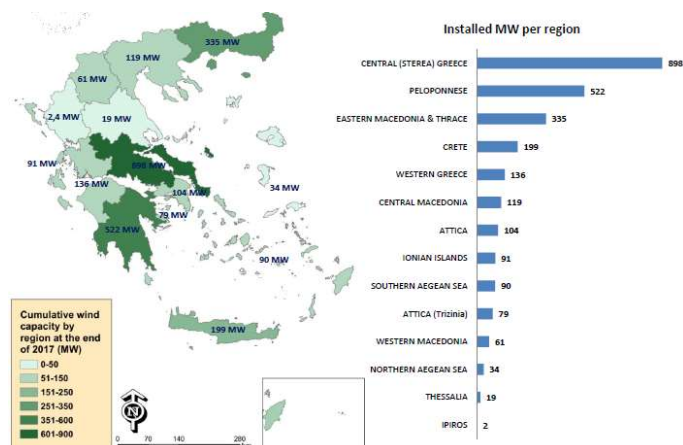
αιολικού δυναμικού που διαθέτει, έχει τη δυνατότητα να πετύχει τους στόχους που έχει θέσει και ταυτόχρονα να προστατέψει τα φυσικά της οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα, της οποίας νούμερο ένα απειλή είναι η αλλαγή χρήσης γης. Ταυτόχρονα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αλλαγή του τοπίου, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου αυτό είναι στενά συνδεδεμένο με τις οικονομικές δραστηριότητες των ντόπιων. Τέλος θα πρέπει να δίνονται οικονομικά κίνητρα στους ντόπιους (θέσεις εργασίας, πηγή εισοδήματος κ.α.) (Κατή Β., Κασσάρα Χ.) (Jobert et al., 2007).

### 9.1.1 Εγκαταστάσεις

Σύμφωνα με την Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), το 2017 έγιναν οι περισσότερες εγκαταστάσεις αιολικών στην Ελλάδα, μετά το 2011. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έφτασε τα 2.651 MW, αυξημένη κατά 12% ή 281 MW σε σχέση με το τέλος του 2016. Ενώ, το πρώτο εξάμηνο 2018, η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς που βρίσκεται σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία έφτασε τα 2.690 MW, αυξημένη κατά 1,5% ή 39 MW σε σχέση με το τέλος του 2017 (HWEA, 2018).



Εικόνα 39 Συνολική εγκατεστημένη ισχύς που βρίσκεται σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία ανά έτος στην Ελλάδα (HWEA, 2018).



Εικόνα 40. Η Αιολική Ενέργεια στην Ελλάδα, ανά περιοχή, το πρώτο εξάμηνο 2018 (HWEA, 2018)

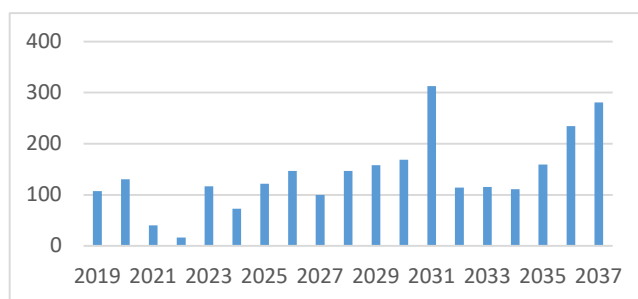
Από τη συνολική εικόνα, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ο εθνικός στόχος της συμμετοχής των Α.Π.Ε. στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας το 2020 φαίνεται αδύνατο να

επιτευχθεί, αφού για την τριετία 2018-2020 χρειάζονται πάνω από 3.700 MW νέων Α.Π.Ε., μέγεθος που φαίνεται ότι δεν είναι πλέον εφικτό (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2018).

Έτσι, για να μη χαθεί και ο στόχος του 2030 απαιτείται σημαντική προσπάθεια για έγκαιρο και αποτελεσματικό σχεδιασμό σε όλα τα επίπεδα, με έμφαση στις μεγάλες επενδύσεις παράλληλα με την προώθηση μικρότερων – τοπικών πρωτοβουλιών (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2018).

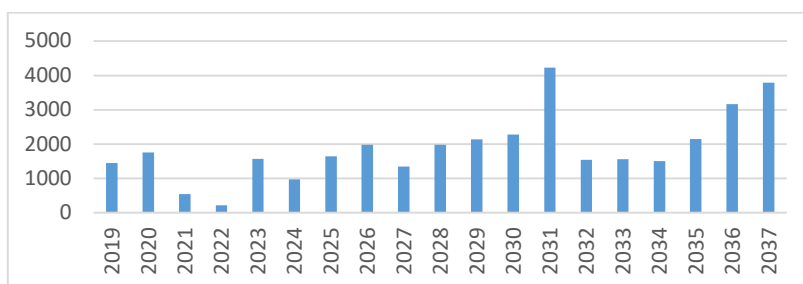
## 9.2 Ποσότητα πτερυγίων προς διαχείριση

Όπως και στην υπόλοιπη Ευρώπη έτσι και στην Ελλάδα, από το 2020 και μετά πολλές από τις ανεμογεννήτριες που έχουν εγκατασταθεί αναμένεται να φτάσουν στο τέλος της ωφέλιμης διάρκειας ζωής τους. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται μια πρόβλεψη για την ποσότητα σε MW που θα φτάσει το τέλος ζωής από το 2019 μέχρι το 2037. Η πρόβλεψη αυτή έχει προκύψει από το παραπάνω διάγραμμα υποθέτοντας ότι οι ανεμογεννήτριες έχουν διάρκεια ζωής 20 χρόνια, κατά μέσο όρο.



Εικόνα 41. πρόβλεψη για την ποσότητα σε MW που θα φτάσει το τέλος ζωής από το 2019 μέχρι το 2037

Η απόσυρση και η αποσυναρμολόγηση των ανεμογεννητριών είναι σχετικά πολύπλοκες εργασίες και στοιχίζουν ακριβά. Πέραν όμως του κόστους της απόσυρσης και της αποσυναρμολόγησης, υπάρχει το ζήτημα του τι θα γίνει με το μεγάλο όγκο των υλικών από τα οποία είναι φτιαγμένες οι ανεμογεννήτριες. Καθώς πλην της βάσης, η οποία συνήθως παραμένει στο πάρκο και των μεταλλικών τμημάτων των ανεμογεννητριών, τα οποία οδηγούνται για ανακύκλωση, τα υπόλοιπα υλικά καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και κυρίως τα σύνθετα οργανικά υλικά από τα οποία αποτελούνται τα πτερύγια (Ηλιάνα, Κ. 2016). Υποθέτοντας ότι η ποσότητα σύνθετων υλικών που χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες είναι μεταξύ 12-15 τόνων ανά MW και σύμφωνα με την παραπάνω πρόβλεψη, στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η ποσότητα σύνθετων υλικών, σε τόνους, που αναμένεται να προκύψει από τις ανεμογεννήτριες που θα φτάνουν στο τέλος ζωής τους από το 2019 μέχρι το 2037.



Εικόνα 42. πρόβλεψη για την ποσότητα σύνθετων υλικών, σε τόνους, που αναμένεται να προκύψει από τις ανεμογεννήτριες που θα φτάνουν στο τέλος ζωής τους από το 2019 μέχρι το 2037



## 10 Επίλογος

Συνοψίζοντας, η παρούσα διπλωματική εργασία είχε πρόθεση να δώσει μια ολοκληρωμένη εικόνα του κύκλου ζωής των τεχνολογιών αιολικής ενέργειας μέσα από ανασκόπηση σχετικής βιβλιογραφίας. Συγκεκριμένα:

Έγινε αναφορά στην ανάγκη για καθαρότερες μορφές ενέργειας, στην παγκόσμια κι ευρωπαϊκή προοπτική για την αιολική ενέργεια με έμφαση στα κίνητρα και τα εμπόδια για την αύξηση της Έγινε μια καταγραφή των τεχνολογιών αιολικής ενέργειας, τόσο ως προς τους τύπους των ανεμογεννητριών όσο και προς τα επι μέρους μέρη της ανεμογεννήτριας

Αναλύθηκαν περεταίρω τα υλικά κατασκευής και πιο εκτεταμένα τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα πτερύγια σήμερα καθώς και οι μελλοντικές τάσεις αυτών. Η ιδιαίτερη αναφορά οφείλεται στο ότι τα πτερύγια είναι το μέρος της ανεμογεννήτριας με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα όσον αφορά την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση.

Παρουσιάστηκαν οι εναλλακτικές για τη διαχείριση του τέλους ζωής των ανεμογεννητριών και πάλι με έμφαση στα πτερύγια και με αναφορά στις σχετικές λύσεις σε βιομηχανικό, περιστασιακό και ερευνητικό επίπεδο.

Παρουσιάστηκε ο Κύκλος ζωής και η αξιολόγηση του για όλες τις διεργασίες από την εξόρυξη των υλικών μέχρι και την τελική τους απόρριψη. Παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της ανάλυσης του κύκλου ζωής αιολικών πάρκων τόσο χερσαίων όσο και υπεράκτιων και έγινε αναφορά σε ζητήματα όπως η κοινωνική αποδοχή

Έγινε αναφορά στο Ευρωπαϊκό και το Ελληνικό πλαίσιο για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, καθώς και μια σύντομη αποτίμηση της τρέχουσας κατάστασης στην Ελλάδα.

Συμπερασματικά η ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας, ρίχνει φως στην πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, της παραγωγής και της διαχείρισης των τεχνολογιών αιολικής ενέργειας. Αναδεικνύει ως εκ τούτου την ανάγκη για ολιστικές προσεγγίσεις ως προς την περεταίρω ανάπτυξή τους

## 11 Βιβλιογραφία

- Alalwan, H. A., Alminshid, A. H., & Aljaafari, H. A. S. (2019, March 1). Promising evolution of biofuel generations. Subject review. *Renewable Energy Focus*. Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/j.ref.2018.12.006>
- Andersen, N. (2015). Wind turbine: characterisation of waste material, 44.
- Aslam Bhutta, M. M., Hayat, N., Farooq, A. U., Ali, Z., Jamil, S. R., & Hussain, Z. (2012). Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 1926–1939. <http://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.12.004>
- Beauson, J., Bech, J. I., & Brøndsted, P. (2014). Composite recycling : Characterizing end of life wind turbine blade material. *Proceedings of 19th International Conference on Composite Materials*, 8.
- Beauson, Justine; Brøndsted, P. (2016). Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective. *MARE-WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology*, 1–432. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-39095-6>
- Beyene, H. D., Werkneh, A. A., & Ambaye, T. G. (2018, March 1). Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. *Renewable Energy Focus*. Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/j.ref.2017.11.001>
- Bilgili, M., Yasar, A., & Simsek, E. (2011). Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 905–915. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.006>
- Bithas, K., & Kalimeris, P. (2016). Revisiting the Energy-Development Link, (Ruddiman 2001), 5–11. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-20732-2>
- Bonou, A. (2016). *On the shoulders of giants - Life cycle based ecodesign applied in wind energy technologies*. DTU. Technical University of Denmark.
- Braad, S. G. (2015). Life cycle assessments map wind turbine lifespan.
- Corbetta, G., Ho, A., & Pineda, I. (2015). *Wind energy scenarios for 2030*. Retrieved from <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWEA-Wind-energy-scenarios-2030.pdf>
- Das, A., Emele, L., Meinke-Hubeny, F., Moorkens, I., Nissen, C., & Tomescu, M. (2018). *Renewable energy in Europe - 2018*.
- de Koning, A., Kleijn, R., Huppes, G., Sprecher, B., van Engelen, G., & Tukker, A. (2018). Metal supply constraints for a low-carbon economy? *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 202–208. <http://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2017.10.040>
- EC-JRC. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. (E. C. J. R. C. I. for E. and Sustainability, Ed.) (1st ed.). Luxembourg: Publications Office of the European Union. <http://doi.org/10.2788/38479>
- EWEA. (2014). *Wind energy scenarios for 2020*. Retrieved from <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWEA-Wind-energy-scenarios-2030.pdf>
- Fraille, D., & Mbistrova, A. (2018). Wind in power 2017 Wind in power 2017, 25.
- Garrett, P., & Rønne, K. (2013). Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 37–48. <http://doi.org/10.1007/s11367-012-0445-4>

- GLOBAL WIND ENERGY OUTLOOK 2016. (2016).
- Goudarzi, N., & Zhu, W. D. (2013). A review on the development of wind turbine generators across the world. *International Journal of Dynamics and Control*, 1(2), 192–202. <http://doi.org/10.1007/s40435-013-0016-y>
- GR Law 3851. (2010). Law L3851/2010 on Accelerating the development of Renewable Energy Sources to deal with Climate Change and other regulations in topics under the authority of Ministry of Environment, Energy and Climate Change. *Official Gazzette*, 85/4–6–2010.
- Haapala, K. R., & Prempreeda, P. (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 3(2), 170. <http://doi.org/10.1504/IJSM.2014.062496>
- Halliwell, S. (2006). End of Life Options for Composite Waste—Recycle, Re-use or Dispose. *National Composites Network Report*.
- Hvidtfeldt, H., & Petersen, S. (2014). *DTU International Energy Report 2014 Wind energy — drivers and barriers for higher*.
- HWEA. (2018). HWEA Wind Energy Statistics - June 2018.
- IAEA. (2019). *Nuclear Technology Review 2019*. Retrieved from <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc63-inf2.pdf>
- IEA. (2014). *Key World Energy Statistics*. Paris. Retrieved from <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>
- IEA. (2017). *Key world energy statistics*. Retrieved from <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>
- ISO. (2006). ISO 14040:2006. Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization (ISO).
- Jobert, A., Laborgne, P., & Mimler, S. (2007). Local acceptance of wind energy: Factors of success identified in French and German case studies. *Energy Policy*, 35(5), 2751–2760. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.005>
- Kabouris, J., & Hatziaargyriou, N. (2008). Wind power in Greece - current situation future developments and prospects, (January), 8 pp. <http://doi.org/10.1109/pes.2006.1709641>
- Kaldellis, J. K., & Zafirakis, D. (2011). The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy*, 36(7), 1887–1901. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.002>
- Larsen, K. (2009). Recycling wind. *Reinforced Plastics*, 53(1), 20–25. [http://doi.org/10.1016/S0034-3617\(09\)70043-8](http://doi.org/10.1016/S0034-3617(09)70043-8)
- Lenzen, M., & Munksgaard, J. (2002). Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines—review and applications. *Renewable Energy*, 26(3), 339–362. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00145-8](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00145-8)
- Leon Mishnaevsky, Kim Branner, Helga Nørgaard Petersen, Justine Beauson, M. M. and B. F. S. (2017). Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Mdpi*.
- Leung, D. Y. C., & Yang, Y. (2012). Wind energy development and its environmental impact: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 1031–1039. <http://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.09.024>
- MacArthur, E., Zumwinkel, K., & Stuchtey, M. R. (2015). Growth within: a circular economy vision for a competitive europe. *Ellen MacArthur Foundation*, 1–91. <http://doi.org/Article>
- Martínez, E., Latorre-Biel, J. I., Jiménez, E., Sanz, F., & Blanco, J. (2018). Life cycle assessment of a wind farm repowering process. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 260–271. <http://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.05.044>

- Martínez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jiménez, E., & Blanco, J. (2009). Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable Energy*, 34(3), 667–673. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.020>
- Morris, L. (2011). Direct Drive vs. Gearbox: Progress on Both Fronts.
- Nghiem, A., Fraile, D., Mbistrova, A., Remy, T., & Arkins, K. (2017). Wind energy in Europe: Outlook to 2020 JQ&ROS Visual Communications, (September 2017).
- Nghiem, A., & Pineda, I. (2017). *Wind energy in Europe, Scenarios for 2030*.
- Nugent, D., & Sovacool, B. K. (2014). Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar {PV} and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy*, 65, 229–244. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.048>
- Owens, E., & Chapman, S. (2013). Valuing the Greenhouse Gas Emissions from Wind Power. *International Journal of Energy Engineering*, 3(2), 41–54. <http://doi.org/10.5963/IJEE0302006>
- Pickering, S. J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials-current status. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(8), 1206–1215. <http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.030>
- Polinder, H., Van Der Pijl, F. F. A., De Vilder, G. J., & Tavner, P. J. (2006). Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(3), 725–733. <http://doi.org/10.1109/TEC.2006.875476>
- REN21. (2018). *Renewables 2018 Global Status Report*.
- Schleisner, L. (2000). Life cycle assessment of a wind farm and related externalities. *Renewable Energy*, 20(3), 279–288. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00123-8](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00123-8)
- Serrano González, J., & Lacal Arántegui, R. (2015). *The regulatory framework for wind energy in EU Member States. JRC Scientific and policy reports*. <http://doi.org/10.2790/282003>
- Siemens AG. (2014). Environmental Performance- Assessing the environmental impact of Siemens wind turbines. Retrieved June 1, 2015, from <http://www.energy.siemens.com/hq/en/renewable-energy/wind-power/epd.htm>
- Stella Job. (2010). Composite Recycling. *Materials KTN Report*, (September 2010).
- Thomas, L., & Ramachandra, M. (2018). Advanced materials for wind turbine blade- A Review. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 2635–2640. <http://doi.org/10.1016/J.MATPR.2018.01.043>
- Tremeac, B., & Meunier, F. (2009). Life cycle analysis of 4.5MW and 250W wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2104–2110. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.001>
- Vestas. (2006). Vestas A/S Publication: Life cycle assessment of electricity produced from onshore sited wind power plants based on Vestas V82-1.65 MW turbines, 1–77. *Wind energy*. (2018).
- WindEurope. (2017a). Discussion paper on managing composite blade waste.
- WindEurope. (2017b). Repowering and lifetime extension: making the most of Europe’s wind energy resource.
- Wiser, R., Yang, Z., Hand, M., Hohmeyer, O., Eld, D. I., Jensen, P. H., ... Zervos, A. (2011). Wind Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, ... C. von Stecho (Eds.), . Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. Retrieved from [http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC\\_SRREN\\_Ch07.pdf](http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Ch07.pdf)

- Wiser, R., Yang, Z., Kjaer, C., Rahimzadeh, F., Wiser, R., Yang, Z., ... Sinden, G. (2011). 7 Wind Energy Coordinating Lead Authors: Review Editors.
- Wood, K. (2012). Wind turbine blades: Glass vs. carbon fiber.
- World Nuclear News. (2018). Conference: Nuclear growth relies on good policies. Retrieved from <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Conference-Nuclear-growth-relies-on-good-policies>
- Zakikhani, P., Zahari, R., Sultan, M. T. H., & Majid, D. L. (2014). Bamboo Fibre Extraction and Its Reinforced Polymer Composite Material. *International Journal of Chemical, Biomolecular, Metallurgical, Materials Science and Engineering*, 8(4), 271–274.
- ΕΛΕΤΑΕΝ. (n.d.). Οι Α.Π.Ε. στον Εθνικό Ενεργειακό Σχεδιασμό.
- ΕΛΕΤΑΕΝ. (2018). Δελτίο Τύπου: Η Στατιστική της Αιολικής Ενέργειας.
- Κλειάσου, Η. (2016). Περιβάλλον και Ανάπτυξη.
- Μπούντρη, Π. (2016). Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ.
- ΡΑΕ. (n.d.). Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά.
- ΥΠΕΝ. (n.d.). ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ.

--- Τέλος εγγράφου ---