



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**« Ανακύκλωση ανεμογεννητριών »
« Wind turbine recycling »**

Υπό

Μήτρου Χρήστος

Κανάνι Μάριος

Πτυχιακή Εργασία

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

Λάρισα, 2023

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

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

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νταφόπουλος Βασίλειος
Καθηγητής, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή
Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Παπαγεωργίου Ελπινίκη
Καθηγήτρια, Τμήμα Συστημάτων Ενέργειας, Σχολή
Τεχνολογίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

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

ΕΠΩΝΥΜΟ	ΜΗΤΡΟΥ, ΚΑΝΑΝΙ
ΟΝΟΜΑ	ΧΡΗΣΤΟΣ, ΜΑΡΙΟΣ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ	2919031, 2919142
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	14/6/2023
ΥΠΟΓΡΑΦΗ	

© 2023. ΜΗΤΡΟΥ ΧΡΗΣΤΟΣ, ΚΑΝΑΝΙ ΜΑΡΙΟΣ

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

Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος Εικόνων	6
Κατάλογος Πινάκων	6
Κατάλογος συντομογραφιών.....	7
Περίληψη.....	8
Abstract.....	9
1 Εισαγωγή	10
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)	11
1.2 Κύριες πηγές ΑΠΕ	14
1.3 Ανεμογεννήτριες	17
1.3.1 Ιστορική Αναδρομή.....	18
1.3.2 Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας	20
1.3.3 Βαθμός απόδοσης ανεμογεννήτριας.....	20
2. Υλικά κατασκευής ανεμογεννητριών	28
2.1 Υλικά βάσεων Α/Γ	30
2.2 Υλικά πύργου Α/Γ	33
2.3 Υλικά ατράκτου	34
2.4 Υλικά ρότορα	34
2.5 Υλικά πτερυγίων	34
2.6 Κύκλος ζωής των υλικών	38
2.6.1 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών.....	39
3. Ανακύκλωση ανεμογεννητριών	40
3.1 Εισαγωγή.....	40
3.2 Ανάλυση κύκλου ζωής ανεμογεννητριών	41
3.3 Κατάσταση ανακύκλωσης στην Ελλάδα και τον κόσμο	44
3.4 Κανονισμοί της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα απόβλητα της αιολικής βιομηχανίας	47
3.5.1 Πρόληψη	48
3.5.2 Επαναχρησιμοποίηση	49
3.5.3 Αλλαγή χρήσης	50
3.7 Αποτέφρωση	61
3.8 Απόθεση.....	61
3.9 Τεχνολογίες ανακύκλωσης υπόλοιπων μερών ανεμογεννητριών	62
3.9.1 Εισαγωγή	62
3.9.2 Σκυρόδεμα.....	63
3.9.3 Μέταλλα.....	69
3.9.4 Χάλυβας	71

3.9.5 Ανοξείδωτος χάλυβας (ατσάλι)	74
3.9.6 Χυτοσίδηρος.....	76
3.9.7 Χαλκός.....	77
3.9.8 Αλουμίνιο	78
4. Ερευνητικές μέθοδοι ανακύκλωσης σύνθετων υλικών.....	79
5.Κοστολόγηση μεθόδων ανακύκλωσης.....	83
5.1 Κόστος υγειονομικής ταφής.....	86
5.2 Μηχανική Ανακύκλωση	87
5.3 Αποτέφρωση - Συν-επεξεργασία στη βιομηχανία τσιμέντου	87
5.4 Θερμικές μέθοδοι ανακύκλωσης	88
5.5 Χημική Ανακύκλωση	89
5.6 Κατακερματισμός υψηλής τάσης (HVF).....	89
5.7 Σύνοψη κόστους.....	90
6 Συμπεράσματα.....	93
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	95
Ελληνική Βιβλιογραφία	101
Ιστοσελίδες	103

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ποσοστό των ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας σε ευρωπαϊκές χώρες (Eurostat 2019).....	16
Εικόνα 2: Κατανομή του ποσοστού χρήσης της κάθε πηγής ενέργειας στην Ευρώπη (Eurostat 2020).....	17
Εικόνα 3 : ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (αριστερά) και καθέτου άξονα (δεξιά) (Global-Energy.EU 2012).....	18
Εικόνα 4: Μέρη ανεμογεννήτριας (Slideplayer.gr)	22
Εικόνα 5: Ρότορας (nawindpower.com 2018)	24
Εικόνα 6: Φρένο (quora.com).....	24
Εικόνα 7: Κιβώτιο ταχυτήτων (konic-gearbox.com 2023)	25
Εικόνα 8: Γεννήτρια (empoweringpumps.com 2021)	25
Εικόνα 9: Μηχανισμός περιστροφής (pspa.eu).....	26
Εικόνα 10: Θεμέλια ανεμογεννήτριας	31
Εικόνα 11: Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες (theconversation.com 2022)	32
Εικόνα 12: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας (Ultrasound-based identification of damage in wind turbine blades using novelty 2020).	35
Εικόνα 13: Προβλεπόμενη ποσότητα απορριμμάτων CFRP (τόνοι) (Sage Journals 2022).....	53
Εικόνα 14: Η διαδικασία προετοιμασίας των απορριμμάτων ινών γυαλιού (MDPI 2022).....	59
Εικόνα 15: Παράγωγα της παρόλυσης και οι χημικοί τους τύποι (ScienceDirect 2023)	61
Εικόνα 16: Τομή ανεμογεννήτριας (repository.library.teiwest.gr).....	63
Εικόνα 17: Ανακυκλωμένο υλικό (bellona.org 2022)	65
Εικόνα 18: Σύνθλιψη σκυροδέματος (egolys.gr).....	66
Εικόνα 19: Εργοστάσιο σύνθλιψης και παραγωγής (machineryline.info 2023)	67
Εικόνα 20: Χώρος υγειονομικής ταφής (capital.gr 2021)	69
Εικόνα 21: Ανακύκλωση σιδήρου (kitsametal.business.site 2017)	71
Εικόνα 22: Διάγραμμα παραγωγικής διαδικασίας παραγωγής χάλυβα (el.m.wikipedia.org)	72
Εικόνα 23: Ακαθάριστες ετήσιες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών στην Ευρώπη (WindEurope, 2020).	81
Εικόνα 24: Πρόβλεψη υλικών αποβλήτων πτερυγίων από ανεμογεννήτριες στην Ευρώπη έως το 2050 (Lichtenegger et al., 2020).	82
Εικόνα 25: Αποτελέσματα πρόγνωσης των αποβλήτων των ανεμογεννητριών σε τόνους για τα έτη 2022 – 2050 (Τζόκας 2023)	84

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κατηγορίες υλικών (Πηγή: Martínez gallery et al., 2009, Andersen et al., 2014).....	38
Πίνακας 2: Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση σύνθετων υλικών για πτερύγια ανεμογεννητριών (Sage Journals 2019).....	58
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά ειδικού χάλυβα – χάλυβα	75
Πίνακας 4: Κοστολόγηση της μηχανικής ανακύκλωσης των πτερυγίων (Rentizelas et al., 2021)	87
Πίνακας 5: Κοστολόγηση διαδικασίας ρευστοποιημένης κλίνης για συνολική δυναμικότητα 6000 τόνων (Pickering et al., 2000)	88

Πίνακας 6: Κοστολόγηση μεθόδου HVF και αναθεώρηση των κοστών στα δεδομένα της Ελλάδας (Final Report Summary - SELFrag CFRP, n.d.).	90
Πίνακας 7: Σύνοψη κοστολόγησης παραγωγικής διαδικασίας μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων. (Τζόκας 2023).	91
Πίνακας 8: Σύνοψη κοστολόγησης επένδυσης μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων. (Τζόκας 2023)	92
Πίνακας 9: Σύνοψη κοστολόγησης λειτουργικών κοστών μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων. (Τζόκας 2023).	92
Πίνακας 10: Συγκεντρωτικά δεδομένα των μεθόδων ανακύκλωσης των πτερυγίων (Τζόκας 2023)	94
Πίνακας 11: Σύνοψη υλικών για κάθε μέρος της Α/Γ.	95

Κατάλογος συντομογραφιών

GFRP:	Glass Fiber Reinforced Polymer/Plastic (Πολυμερές/Πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού)
LCA:	Life Cycle Assessment (Εκτίμηση κύκλου ζωής)
Α/Γ:	Ανεμογεννήτρια
Α.Η.Η.Ε.:	Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού
Α.Π.Ε.:	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Χ.Υ.Τ.Α.:	Χώρος Υγειονομικής Ταφής

Περίληψη

Η ανακύκλωση των ανεμογεννητριών αποτελεί μία σημαντική πρόκληση αφού χρησιμοποιούνται πλέον μαζικά για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Οι ανεμογεννήτριες θεωρούνται φιλικές προς το περιβάλλον γιατί παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση του ανέμου. Αυτό ισχύει μέχρι ενός βαθμού. Παύει να ισχύει όταν φτάσουν στο τέλος της ζωής τους. Μέχρι στιγμής ένα πολύ μεγάλο μέρος των ανεμογεννητριών που παύουν να λειτουργούν αποσύρονται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Εξαιτίας αυτής της κατάστασης πολλές εταιρείες και φορείς ανέπτυξαν τεχνικές ανακύκλωσης για όλα τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας.

Ο τομέας της ανακύκλωσης των ανεμογεννητριών αποτελεί το αντικείμενο αυτής της εργασίας. Αρχικά γίνεται παρουσίαση των μερών μιας ανεμογεννήτριας καθώς και αναφορά στα υλικά από τα οποία αποτελείται το καθένα. Έπειτα γίνεται εκτενής ανάλυση για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί το κάθε υλικό να ανακυκλωθεί. Για τα πτερύγια, τα οποία αποτελούν το δυσκολότερο κομμάτι στην ανακύκλωση μίας ανεμογεννήτριας, έχει γίνει εκτενής ανάλυση συγκριτικά με τα υπόλοιπα μέρη. Στη συνέχεια εξηγούνται οι τρόποι ανακύκλωσης των υπολοίπων υλικών με παραδείγματα από την αγορά και περιγράφονται οι ερευνητικές και εμπορικές μέθοδοι ανακύκλωσης. Ακόμη αναφέρονται οι σχετικοί κανονισμοί και οι νομοθεσίες που ισχύουν στην Ελλάδα και στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω έρευνα για την ανακύκλωση των ανεμογεννητριών.

Abstract

The recycling of wind turbines is a big challenge, since they are used in large numbers to meet energy needs. Wind turbines are considered environmentally friendly because they generate electricity using the wind. This is true to an extent. It ceases to apply when they reach the end of their service life. So far, a very large part of wind turbines that stop working are retired to landfills. Due to this situation many companies and agencies have developed recycling techniques for all parts of a wind turbine.

The field of wind turbine recycling is the subject of this work. Initially, the parts of a wind turbine are presented, as well as the materials of which each is made up. Then there is an extensive analysis of how each material can be recycled. Has been extensively analyzed compared to the rest of the parties. In this chapter, all possible ways of managing them are noted. Then the ways of recycling the remaining materials are explained with examples from the market. Research and commercial methods being developed and used for recycling are also discussed. The regulations and legislations in force in Greece and the European Union are also mentioned. Finally, the conclusions obtained from the above research on the recycling of wind turbines are presented.

1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της αυξημένης ρύπανσης της ατμόσφαιρας και του περιβάλλοντος καθώς και της κλιματικής αλλαγής, έχουν γίνει τεράστιες προσπάθειες από διάφορους φορείς για να παράγουν ενέργεια με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο. Για την διαδικασία αυτή στράφηκαν στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.). Μία από τις σημαντικότερες Α.Π.Ε. είναι η αιολική ενέργεια. Για να εκμεταλλευτούν οι ειδικοί τις δυνατότητες της αιολικής ενέργειας κατασκεύασαν ανεμογεννήτριες.

Η ανάγκη για καθαρότερη και περισσότερη ενέργεια έχει ωθήσει τον τομέα κατασκευής ανεμογεννητριών σε ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, αφού η ζήτηση για ανεμογεννήτριες κάθε χρόνο ολοένα και αυξάνεται. Για τον λόγο αυτό έχουν κατασκευαστεί πάρα πολλές ανεμογεννήτριες προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες της αγοράς για φθηνή και πράσινη ενέργεια.

Αρχικά η κατάσταση αυτή ήταν πολύ θετική αφού οι ανεμογεννήτριες παρήγαγαν ενέργεια χωρίς να εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα ή άλλα βλαβερά αέρια του θερμοκηπίου. Όμως αυτό δεν σημαίνει πως είναι κατά απόλυτη τιμή εντελώς φιλικές προς το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα οι ανεμογεννήτριες ρυπαίνουν, όχι κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους όπως οι συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας, αλλά μετά το τέλος της ζωής τους. Τα πρώτα χρόνια που έγινε η χρήση τους το φαινόμενο αυτό δεν είχε εμφανιστεί ακόμα διότι δεν υπήρχαν ανεμογεννήτριες προς αντικατάσταση ή παροπλισμό. Το φαινόμενο όμως δεν άργησε να εμφανιστεί. Πρώτα οι εταιρίες που διέθεταν ανεμογεννήτριες, μετά το πέρας της ζωής τους τις παρόπλιζαν σε χώρους υγειονομικής ταφής (Χ.Υ.ΤΑ.). Όταν η κατάσταση αυτή διογκώθηκε πάρα πολύ, πολλά κράτη αποφάσισαν να βάλουν περιορισμούς στον παροπλισμό τους σε Χ.Υ.ΤΑ. Εξαιτίας αυτής της κατάστασης έγιναν και γίνονται προσπάθειες για επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση των ανεμογεννητριών.

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία γίνεται προσπάθεια για την παρουσίαση των λύσεων για τα απόβλητα των ανεμογεννητριών μετά το λήξη της ζωής τους. Πιο συγκεκριμένα οι λύσεις που προτείνονται έχουν κύριο γνώμονα τη φιλικότητα προς το περιβάλλον, γι' αυτό γίνεται εκτενής ανάλυση στον τρόπο με τον οποίο μπορούν να ανακυκλωθούν τα υλικά που διαθέτουν οι ανεμογεννήτριες.

Αρχικά, προτού παρουσιαστούν οι μέθοδοι διαχείρισης των αποβλήτων επεξηγείται η λειτουργία του κάθε μέλους της ανεμογεννήτριας. Πέρα όμως από τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν τα μέλη παρουσιάζονται αναλυτικά τα υλικά από τα οποία αποτελούνται.

Στη συνέχεια γίνεται εκτενής ανάλυση για τον τρόπο διαχείρισης των πτερυγίων των ανεμογεννητριών, αφού αυτά αποτελούν το δυσκολότερο κομμάτι στην ανακύκλωση. Δηλαδή παρουσιάζονται όλοι οι δυνατοί τρόποι με τους οποίους επαναχρησιμοποιούνται ή ανακυκλώνονται τα πτερύγια με παραδείγματα από την Ελλάδα και τον υπόλοιπο κόσμο. Επιπλέον αναφέρονται και τρόποι οι οποίοι θα καταστήσουν τις παραπάνω ενέργειες ευκολότερες, γίνεται αναφορά στην πρόληψη. Πρόληψη σημαίνει πως χρησιμοποιούνται υλικά με γνώμονα την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση της ανεμογεννήτριας. Έπειτα γίνεται ανάλυση για τους τρόπους ανακύκλωσης των υπόλοιπων υλικών των ανεμογεννητριών.

Έπειτα παρουσιάζονται εμπορικοί και ερευνητικοί μέθοδοι για τους παραπάνω τρόπους ανακύκλωσης. Η παρουσίαση των εμπορικών μεθόδων στοχεύει στην προβολή της υπάρχουσας κατάστασης, δηλαδή όταν μία μέθοδος ανακύκλωσης χρησιμοποιείται εμπορικά σημαίνει πως λειτουργεί πραγματικά σε βιομηχανική κλίμακα και έχει οικονομικό κέρδος. Από την άλλη με την προβολή των ερευνητικών μεθόδων εξηγούνται οι πιθανοί νέοι τρόποι διαχείρισης των αποβλήτων, οι οποίοι είναι πιο αποδοτικοί. Αυτοί οι τρόποι προς το παρόν δεν έχουν εκβιομηχανοποιηθεί, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν πραγματικά οικονομικά στοιχεία. Τέλος παρατίθενται οι κανονισμοί και οι νομοθεσίες που ισχύουν στην Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση για τα απόβλητα των ανεμογεννητριών.

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)

Οι Α.Π.Ε. αποτελούν πιο οικολογική επιλογή σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα. Ο όρος "ανανεώσιμες" χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει ότι αυτές οι πηγές ενέργειας δεν εξαντλούνται ποτέ πρακτικά, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που, σε κάποιο σημείο, θα εξαντληθούν. Πολλοί μπορεί να νομίζουν ότι η χρήση αυτών των πηγών ενέργειας άρχισε μόνο τα τελευταία χρόνια.

Ωστόσο, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ήταν οι πρώτες μορφές ενέργειας που αξιοποίησε ο άνθρωπος για να καλύψει τις ανάγκες του για εύκολα προσβάσιμη και φθηνή ενέργεια σχεδόν καθ' όλη την ιστορία μέχρι τα πρώτα χρόνια του 19ου αιώνα. Από το πέρας του σημείου αυτού, παρατηρήθηκε μια μετάβαση στην ευρεία χρήση του άνθρακα και των παραγώγων του, μια πρακτική που επηρέασε σημαντικά την παρούσα κατάσταση του περιβάλλοντος. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (από το 2001), οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναφέρονται στις μη ορυκτές πηγές ενέργειας που μπορούν να ανανεωθούν. Αυτές περιλαμβάνουν την ηλιακή ενέργεια, την αιολική ενέργεια, την υδροηλεκτρική ενέργεια, τη γεωθερμική ενέργεια, την ενέργεια των κυμάτων, την ενέργεια των παλιρροϊκών ρευμάτων και τα αέρια που παράγονται από χώρους απορριμμάτων και βιολογικούς επεξεργαστές.

Όπως έχουν ορίσει κάποιοι ερευνητές, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναφέρονται στις εναλλακτικές πηγές ενέργειας που αντικαθιστούν τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Αυτές οι πηγές διακρίνονται από τη φυσική τους ικανότητα για ανανέωση και τη συνεχή διαθεσιμότητά τους. Ωστόσο, ο όρος "ανανεώσιμες" που χρησιμοποιείται για να τις περιγράψει μπορεί να θεωρηθεί υπερβολικός, καθώς ορισμένες από αυτές τις πηγές, όπως για παράδειγμα η γεωθερμική ενέργεια, απαιτούν πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα για να ανανεωθούν πλήρως, ακόμη και αιώνες (Γιαννακούρας κ.ά. 2008).

Παρά το γεγονός ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνταν από την αρχαιότητα, μόνο από τη δεκαετία του '70 άρχισαν να αποκτούν ευρύτερη αναγνώριση και να γίνονται το επίκεντρο των συζητήσεων στα κέντρα λήψης αποφάσεων. Η αφορμή για αυτή την αλλαγή προήλθε από την ενεργειακή κρίση που τότε επικρατούσε και προκάλεσε την αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων και την ανεξαρτησία των χωρών από τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Ωστόσο, ο αρχικός ενθουσιασμός εξασθένησε με τη ελάττωση της τιμής του πετρελαίου και ο ρυθμός ανάπτυξης της "πράσινης ενέργειας" επιβραδύνθηκε. Από τη δεκαετία του '90, το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανακαινίστηκε, κυρίως λόγω των αρνητικών επιπτώσεων της χρήσης των συμβατικών πηγών ενέργειας στο περιβάλλον (Βρης 2013).

Ο όρος "ΑΠΕ" αναφέρεται σε πηγές ενέργειας που παράγονται από φυσικά φαινόμενα και ανανεώνονται συνεχώς, καθώς μπορούν να εξάγονται ηλεκτρική ενέργεια. Αυτές οι πηγές περιλαμβάνουν τον ήλιο, τον άνεμο, το νερό και τη βιομάζα (Cleveland and Morris 2006). Το σημαντικό είναι ότι για να αξιοποιηθούν αυτές οι πηγές ενέργειας δεν απαιτείται ενεργητική παρέμβαση όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση. Αντιθέτως, μπορούμε απλώς να εκμεταλλευτούμε τη φυσική ροή ενέργειας που ήδη υπάρχει στο περιβάλλον (Κυριτσάκη 2009).

Επίσης, εναλλακτικοί όροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναφερθούν στην ανανεώσιμη ενέργεια είναι η βιώσιμη ενέργεια και η εναλλακτική ενέργεια (Bilgen et.al. 2008). Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η σταδιακή μείωση της εξάρτησης από τα συμβατικά καύσιμα είναι πλέον επιτακτική ανάγκη στην εποχή μας. Αυτή η ανάγκη οφείλεται όχι μόνο στη σοβαρή μείωση των αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων, την αύξηση των τιμών τους και την περιβαλλοντική ρύπανση, αλλά και στην ανάγκη ενεργειακής ασφάλειας και ανεξαρτησίας των χωρών (Κουτελιδάκης 2010). Η παγκόσμια προβληματική φύση του ενεργειακού ζητήματος φαίνεται από το γεγονός ότι πολλές φορές αποτέλεσε αίτιο μεγάλων πολιτικών, οικονομικών και στρατιωτικών αναταραχών σε παγκόσμιο επίπεδο. Σήμερα, καθώς ορισμένοι φυσικοί πόροι εξαντλούνται (όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο), ο ανταγωνισμός για τον έλεγχο της ενεργειακής αγοράς γίνεται σκληρότερος (Πολυχρονίδου 2014). Επομένως, για να ολοκληρώσουν τις δεσμεύσεις τους για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, τα κράτη πρέπει να επιδείξουν επιτάχυνση στην προώθηση της ανάπτυξης των ΑΠΕ (Παπαϊωάννου 2017).

Όμως, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι υπάρχουν πολλά εμπόδια πριν επιτευχθεί η πλήρης αναγνώριση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως κύριες πηγές ενέργειας. Αυτό συμβαίνει επειδή η συνεισφορά τους στην ενεργειακή παραγωγή μπορεί να είναι ακόμα περιορισμένη. Παράλληλα, το κόστος εγκατάστασης και ενσωμάτωσής τους στο συνολικό πλαίσιο της ενεργειακής παραγωγής μειώνεται σταδιακά, ειδικά τα τελευταία 20 χρόνια, όπως παρατηρούν οι έρευνες των Γιαννακούρα και συνεργατών (2008). Αυτή η μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές τους

παρέχει τη δυνατότητα να ανταγωνιστούν τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα και η πυρηνική ενέργεια (Γιαννακούρας κ.ά. 2008).

Τέλος, είναι εμφανές ότι η έννοια των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας συνδέεται άρρηκτα με το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, οι ΑΠΕ αποτελούν "καθαρές" μορφές ενέργειας, καθώς η παραγωγή τους εξαρτάται αποκλειστικά από τις φυσικές διαδικασίες που συμβαίνουν συνεχώς στο περιβάλλον. Επιπλέον, είναι εξαιρετικά φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς δεν απελευθερώνουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα κατά την παραγωγή ενέργειας, κάτι που συμβαίνει με τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Ουσιαστικά, πρόκειται για απεριόριστες πηγές ενέργειας που εκμεταλλεύονται φυσικές διαδικασίες όπως ο ήλιος ή ο άνεμος, χωρίς να απαιτείται ενεργητική παρέμβαση από τον άνθρωπο για την αξιοποίησή τους (Χρυσόχοου 2020).

1.2 Κύριες πηγές ΑΠΕ

Υδροηλεκτρική ενέργεια: Αντιπροσωπεύει μια πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας από αρχαιοτάτων χρόνων, ενώ από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα χρησιμοποιείται και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από την αρχαιότητα, οι άνθρωποι αξιοποίησαν την ροή του νερού προκειμένου να κινήσουν υδρόμυλους και υδροτροχούς, που χρησιμοποιούνταν για το άλεσμα των σιτηρών και τη κοπή του ξύλου. Η εκμετάλλευση της υδροηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια. Αρχικά, αυτή η μεταβολή πραγματοποιείται με την περιστροφή του άξονα του υδροκινητήρα, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική ενέργεια. Έπειτα, αυτή η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γεννήτριας (Arabatzis and Myronidis, 2011).

Ηλιακή ενέργεια: Με τον όρο ηλιακή ενέργεια περιγράφονται όλες οι μορφές ενέργειας που πηγάζουν από τον ήλιο, μέσω θερμότητας, ακτινοβολίας και φωτός. Τις τελευταίες δεκαετίες όταν γίνεται λόγος για εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας συνήθως εννοείται με τη χρήση φωτοβολταϊκών. Πέρα όμως από τα φωτοβολταϊκά υπάρχουν και τα ηλιοθερμικά και τα παθητικά ηλιακά

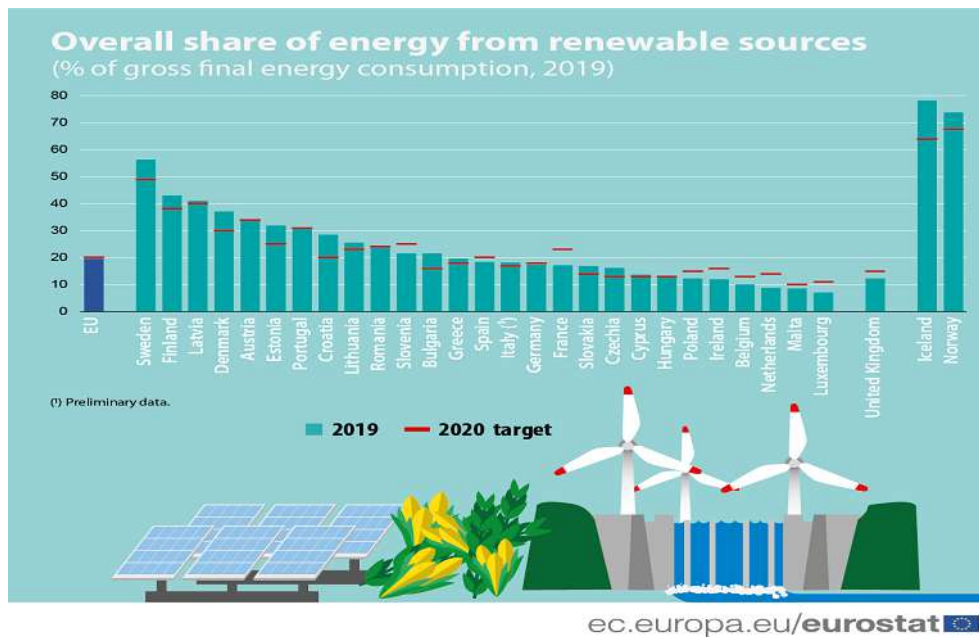
συστήματα. Οι λειτουργία αυτών των συστημάτων βασίζεται στην εκμετάλλευση της θερμότητας, ενώ τα φωτοβολταϊκά στηρίζονται στην εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, την οποία μετατρέπουν σε ηλεκτρικό ρεύμα (Κρητικός, 2010).

Βιομάζα: Είναι μια σημαντική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας που προέρχεται από οργανική ύλη, όπως το ξύλο, τα απόβλητα από καλλιέργειες και ακόμη και από σκουπίδια, ζωικά και ανθρώπινα απόβλητα. Αναγνωρίζεται ως μία από τις κύριες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας, καθώς η ενέργεια που αποθηκεύεται δημιουργείται μέσω της φωτοσύνθεσης και προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η χρήση της βιομάζας έχει θετικές επιπτώσεις στην κοινωνία, την οικονομία και το περιβάλλον. Για παράδειγμα, βελτιώνεται η υγεία των δασών, μειώνεται ο κίνδυνος πυρκαγιών, μειώνονται οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, προστατεύεται ο ορυκτός πλούτος και δημιουργούνται θέσεις εργασίας για τους αγρότες και τους κατοίκους των αγροτικών περιοχών (Solino et al. 2009).

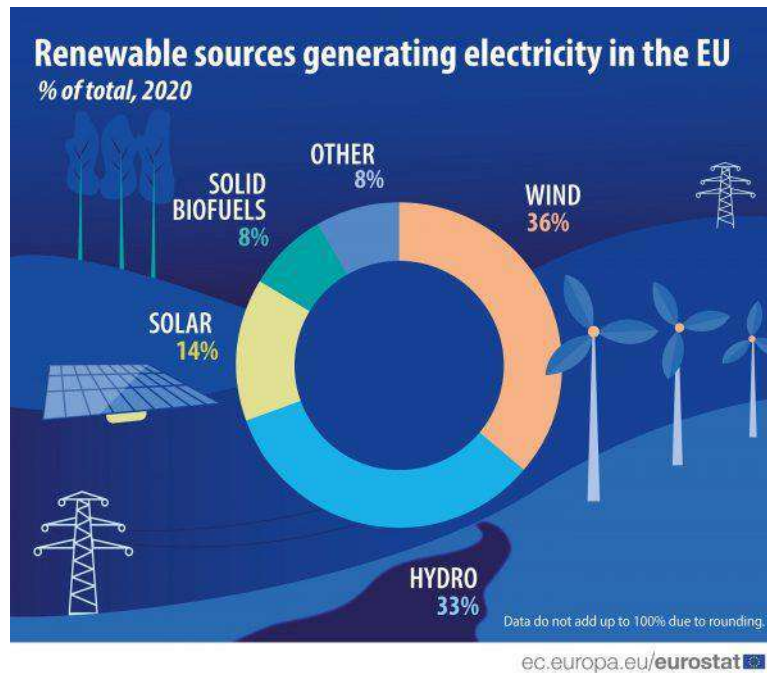
Γεωθερμία: Από αρχαιοτάτων χρόνων, η γεωθερμική ενέργεια έχει αξιοποιηθεί με ποικίλους τρόπους για να καλύψει τις ανάγκες των ανθρώπων, ειδικά στους τομείς της θέρμανσης και της υγιεινής. Ήδη από τον 3^ο αιώνα π.Χ., κατασκευάστηκε η πρώτη γνωστή πισίνα με ιαματικές πηγές στην Κίνα, μολονότι τον 1^ο αιώνα μ.Χ., οι αρχαίοι Ρωμαίοι άρχισαν να κάνουν χρήση ζεστού νερού από πηγές για να τροφοδοτούν δημόσια λουτρά. Στον 14^ο αιώνα, η κοινότητα ChaudesAigues στη Γαλλία, γνωστή και ως "λουτρόπολη", ξεκίνησε να αξιοποιεί ζεστό νερό από πηγές για να θερμαίνει τα ιαματικά λουτρά και τα σπίτια των κατοίκων. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, οι άνθρωποι πειραματίστηκαν με την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η γεωθερμική ενέργεια αναφέρεται στη φυσική, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης και είναι τεχνικά εκμεταλλεύσιμη και οικονομικά προσιτή κυρίως με τη μορφή θερμών ατμών και νερών (Φυτίκας & Ανδρίτσος 2004).

Αιολική ενέργεια: Από την αρχαιότητα, οι άνθρωποι έχουν εκμεταλλευτεί την αιολική ενέργεια για δεκάδες αιώνες. Ήδη από το 5.000 π.Χ., χρησιμοποίησαν την ισχύ του αέρα για να κινήσουν πλοία κατά μήκος του ποταμού Νείλου.

Επίσης, στην αρχαία Κίνα, από το 200 π.Χ., αξιοποίησαν απλές αντλίες νερού που λειτουργούσαν με την δύναμη του ανέμου. Στη σύγχρονη εποχή, η κύρια εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται με γνώμονα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Μαλεβίτη 2013).



Εικόνα 1: Ποσοστό των ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας σε ευρωπαϊκές χώρες (Eurostat 2019)



Εικόνα 2: Κατανομή του ποσοστού χρήσης της κάθε πηγής ενέργειας στην Ευρώπη (Eurostat 2020)

1.3 Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του αέρα σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνήθως συνδέονται στο δίκτυο για να τροφοδοτήσουν με ηλεκτρική ενέργεια κατοικημένες και βιομηχανικές περιοχές, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν και αυτόνομα σε απομακρυσμένες περιοχές αποθηκεύοντας την ενέργεια σε μπαταρίες για την κάλυψη των αναγκών μιας οικίας. Η κατασκευή τους αποτελείται από έναν πύργο στήριξης και μια τουρμπίνα στην κορυφή τους. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ανεμογεννητριών:

- 1) Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, οι οποίες έχουν πτερύγια που περιστρέφονται κατακόρυφα και εκμεταλλεύονται τη διαθέσιμη ροή αέρα που προκύπτει από την κατεύθυνση του ανέμου, με τον δρομέα (ο ρότορας του κινητήρα) τους να παραμένει ακίνητος και κάθετος στην επιφάνεια του εδάφους.
- 2) Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, όπου ο άξονας της κίνησης είναι οριζόντιος και εκμεταλλεύονται τη ροή αέρα σε οριζόντια κατεύθυνση. Από την άλλη σε αυτή την περίπτωση ο δρομέας (ο ρότορας του

κινητήρα) έχει σχήμα έλικας και είναι τοποθετημένος παράλληλα με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους. (Wikipedia1)



Εικόνα 3 : ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (αριστερά) και καθέτου άξονα (δεξιά) (Global-Energy.EU 2012)

1.3.1 Ιστορική Αναδρομή

Μέχρι πρόσφατα, η ιστιοπλοΐα και οι ανεμόμυλοι είχαν σημαντικό ρόλο στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Ωστόσο, από τα μέσα του περασμένου αιώνα και μετά, οι ανεμόμυλοι έχουν μείνει στο παρελθόν, ενώ η ιστιοπλοΐα έχει εξελιχθεί σε άθλημα. Από τα μέσα του 20ού και μετά, οι άνθρωποι έχουν αρχίσει να εκμεταλλεύονται την αιολική ενέργεια μέσω των ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο την κάλυψη μεγάλου μέρους των ενεργειακών αναγκών τους.

Από πολύ νωρίς στην εξέλιξη των τεχνών, ο άνθρωπος αναγνώρισε τη σημασία της αιολικής ενέργειας και ανέπτυξε μηχανισμούς για να αξιοποιήσει τις φυσικές δυνατότητες που προσφέρει. Ένα παράδειγμα που αναφέρεται στην Οδύσσεια του Όμηρου είναι η ιστορία του Αγαμέμνονα, ο οποίος θυσιάσε την κόρη του για να ευνοήσει την θεά Άρτεμη και να φέρει τον ούριο άνεμο που θα οδηγούσε τα πλοία του στην Τροία. Ένα άλλο παράδειγμα πιο σύγχρονης χρήσης της αιολικής ενέργειας είναι οι ανεμόμυλοι, οι οποίοι σήμερα

διακοσμούν πολλά νησιά. Οι ανεμόμυλοι μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε μηχανική, επιτρέποντας στους ανθρώπους να αλέθουν το σιτάρι τους ή να ανεβάζουν νερό από τα πηγάδια για την άρδευση των καλλιεργειών τους.

Οι ανεμόμυλοι του παρελθόντος δεν μπορούσαν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καθώς δεν είχαν εφευρεθεί ακόμα οι ηλεκτρικές μηχανές. Οι γεννήτριες απαιτούν υψηλής ταχύτητας τουρμπίνες για να μετατρέψουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Το πρόβλημα αυτό κατά τον 20ο αιώνα ξεκίνησε να λύνεται, αφού η αεροδυναμική τεχνολογία εξελίχθηκε με την πρόοδο της αεροπορίας. Οι μηχανικοί εκμεταλλεύτηκαν αυτήν την τεχνολογία και κατασκεύασαν τις ανεμογεννήτριες με ένα νέο αεροδυναμικό προφίλ στα πτερύγια τους, καθιστώντας αποτελεσματικές να μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ειδικότερα, από τα μέσα του 20ού αιώνα και μετά κατά τη διάρκεια της πετρελαϊκής κρίσης, οι ανεμογεννήτριες ξεκίνησαν να αναπτύσσονται δυναμικά και μετατράπηκαν σε ένα εργαλείο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αναμένεται να καλύψει σημαντικό ποσοστό των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας στο μέλλον. Οι ανεμογεννήτριες παράγονται σε διάφορα σχέδια, είτε με ένα είτε με περισσότερα πτερύγια, ενώ μπορεί να έχουν είτε οριζόντιο άξονα περιστροφής των πτερυγίων, είτε κάθετο άξονα. Οι ανεμογεννήτριες με κάθετο άξονα περιστροφής λειτουργούν χωρίς να απαιτούν αλλαγή θέσης κατά την αλλαγή κατεύθυνσης του αέρα, εξαλείφοντας την ανάγκη για πηδάλιο. Οι ανεμογεννήτριες έχουν εφαρμογές σε ποικίλα έργα, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτροδότησης οικισμών. Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα, υπήρχε η άποψη ότι όσο λιγότερα φτερά είχαν, τόσο υψηλότερη ήταν η ταχύτητα περιστροφής των τουρμπινών τους. Παράλληλα, η χρήση λιγότερων πτερυγίων σε ανεμογεννήτριες σήμαινε ότι απαιτείτο λιγότερο υλικό για την κατασκευή τους, μειώνοντας έτσι το κόστος παραγωγής. Τη δεκαετία του '80, η εταιρία MBB ανέπτυξε την ανεμογεννήτρια Μονόπτερο με ισχύ 5 MW. Ωστόσο, αυτός ο τύπος ανεμογεννήτριας παρουσίαζε έντονες δονήσεις λόγω της ασυμμετρίας της, και έτσι είχε περιορισμένη εφαρμογή. Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες με δύο ή τρία πτερύγια κατάφεραν να κατακτήσουν την αγορά των ανεμογεννητριών (Κρητικός 2010).

1.3.2 Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας

Με την πάροδο των ετών, αναπτύχθηκαν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών με διαφορετικό αριθμό πτερυγίων, προσανατολισμό άξονα και ταχύτητα περιστροφής. Παρά το μέγεθός τους, όλες οι ανεμογεννήτριες έχουν κοινά βασικά χαρακτηριστικά, όπως ο ρότορας, η γεννήτρια, το σύστημα ελέγχου ταχύτητας και ο πύργος.

Συνήθως, υπάρχουν πέντε βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό μιας ανεμογεννήτριας:

- 1) Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου: ο λόγος της ταχύτητας στο άκρο του πτερυγίου της ανεμογεννήτριας προς την ταχύτητα του ανέμου που την κινεί.
- 2) Ύψος ρότορα: η απόσταση από το κέντρο περιστροφής του πτερυγίου μέχρι την επιφάνεια του εδάφους.
- 3) Εκτιμώμενη ισχύς εξόδου: η μέγιστη συνεχής ισχύς που μπορεί να παραχθεί από την ανεμογεννήτρια στο σημείο που συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο.
- 4) Περιοχή σάρωσης: η περιοχή του κύκλου που καλύπτεται από τα περιστρεφόμενα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, η οποία επηρεάζεται από τον άνεμο που την κινεί.
- 5) στερεότητα: ο λόγος της συνολικής επιφάνειας των πτερυγίων προς την περιοχή του κύκλου που καλύπτεται από τα περιστρεφόμενα πτερύγια της ανεμογεννήτριας.

1.3.3 Βαθμός απόδοσης ανεμογεννήτριας

Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής και τις κλιματικές συνθήκες. Κατά γενικό κανόνα, όσο σταθερότερες είναι οι καιρικές συνθήκες και ιδίως η ταχύτητα του ανέμου, τόσο υψηλότερη είναι η απόδοση. Ωστόσο, η μέγιστη δυνατή ενέργεια που είναι δυνατόν να μας δώσει μια ανεμογεννήτρια καθορίζεται από τον νόμο του Betz και είναι 16/27 ή 59,26% της συνολικής ενέργειας του αέρα.

Οι απώλειες ενέργειας σε μια ανεμογεννήτρια συνήθως οφείλονται στην ανικανότητα των πτερυγίων να αξιοποιήσουν πλήρως την ενέργεια του αέρα

και στην τριβή που προκαλείται στα μηχανικά εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας, όπως τα γρανάζια και οι άξονες. Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 40% και 50%, λόγω αυτών των απωλειών ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση αυτή ισχύει κυρίως για τα πρώτα χρόνια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και με το βάθος του χρόνου μπορεί να υπάρξει μείωση λόγω φθοράς και αλλαγής του αεροδυναμικού προφίλ των λεπίδων.

Η απόδοση των ανεμογεννητριών έχει σημειώσει μεγάλη βελτίωση με την πάροδο του χρόνου λόγω της προόδου στην τεχνολογία και το σχεδιασμό. Οι πρώιμες ανεμογεννήτριες είχαν σχετικά χαμηλά ποσοστά απόδοσης, συχνά λιγότερο από 20%. Ένας σημαντικός παράγοντας στη βελτιωμένη απόδοση των σύγχρονων ανεμογεννητριών είναι η χρήση μεγαλύτερων πτερυγίων και ψηλότερων πύργων. Αυτά τα μεγαλύτερα πτερύγια μπορούν να συλλάβουν περισσότερη αιολική ενέργεια και να τη μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ οι ψηλότεροι πύργοι επιτρέπουν στις Α/Γ να έχουν πρόσβαση σε ισχυρότερους, πιο σταθερούς ανέμους σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Επιπλέον, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν πιο προηγμένα συστήματα ελέγχου και υλικά, επιτρέποντάς τους να λειτουργούν πιο αποτελεσματικά και με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Συνολικά, η απόδοση των ανεμογεννητριών έχει βελτιωθεί σημαντικά από το παρελθόν μέχρι σήμερα. Αυτό έχει καταστήσει την αιολική ενέργεια πιο βιώσιμη και ανταγωνιστική πηγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δίνοντάς μας την δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών μας αναγκών με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών άνθρακα.

Τα βασικά μέρη των ανεμογεννητριών περιγράφονται παρακάτω.



Εικόνα 4: Μέρη ανεμογεννήτριας (Slideplayer.gr)

Βάση στήριξης (θεμελίωση): Η βάση μια ανεμογεννήτριας είναι ένα σημαντικό κομμάτι της κατασκευής καθώς χρησιμεύει ως στήριγμα για τον πύργο και την περιστρεφόμενη κεφαλή της τουρμπίνας. Η βάση πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή και σταθερή ώστε να αντέχει το βάρος του πύργου και της κεφαλής, καθώς και τις δυνάμεις που προκύπτουν από τις διακυμάνσεις του ανέμου. Η στερέωση-θεμελίωση της ανεμογεννήτριας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, την τοποθεσία και τις συνθήκες που επικρατούν σε αυτήν έτσι ώστε να ανταποκρίνεται στις συγκεκριμένες απαιτήσεις του κάθε έργου. Η θεμελίωση της κατασκευής κατασκευάζεται με τη χρήση ενός μεγάλου δίσκου. (ΣΙΜΙΔΑΛΑΣ ΣΤΑΜΟΠΟΥΛΟΣ, 2018).



Εικόνα 5: Βάση (newcivilengineer.com 2022)

Πύργος: Είναι ο κορμός ολόκληρης της εγκατάστασης αφού στηρίζει στην κορυφή του τα κινούμενα μέρη και το κουβούκλιο. Το σχήμα του είναι κωνικό για εξοικονόμηση υλικών και αύξηση της αντοχής του. Στο κάτω μέρος όπου είναι και το φαρδύτερο σημείο του βρίσκεται η βάση. Οι σύνδεση του με τη βάση γίνεται με κοχλίες.



Εικόνα 6: Πύργος

Άτρακτος (ή θάλαμος ανεμογεννήτριας ή νασέλα): Είναι το κουτί μέσα στο οποίο βρίσκεται η γεννήτρια, το φρένο, το κιβώτιο ταχυτήτων όπως και πολλά ακόμη εξαρτήματα δηλαδή τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Είναι τοποθετημένη στην κορυφή του πύργου.

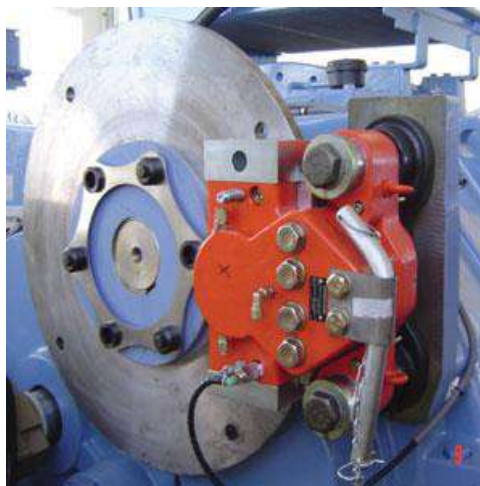
Ρότορας: Είναι το μέρος της μηχανής το οποίο στρέφεται. Σε αυτόν εδράζονται τα πτερύγια της Α/Γ (συνήθως τρία, σπανιότερα δύο σε μηχανές οριζόντιου άξονα). Οι δυνάμεις στα πτερύγια αναγκάζουν τον ρότορα να περιστραφεί, ο οποίος κινεί τον δρομέα της γεννήτριας που παράγει ηλεκτρισμό. Για να

βελτιστοποιηθεί η απόδοση αυτής της δύναμης, απαιτείται η σχεδίαση των πτερυγίων με τρόπο που θα επιτρέπει την αποτελεσματική αξιοποίηση της. Αυτό συμπεριλαμβάνει την κατάλληλη κλίση τους ως προς τον άξονα στήριξής τους και το βήμα τους.



Εικόνα 5: Ρότορας (nawindpower.com 2018)

Φρένο: Χρησιμοποιείται για την προστασία της ανεμογεννήτριας όταν υπάρχουν υψηλές ταχύτητες ή όταν πραγματοποιούνται εργασίες πάνω στην ανεμογεννήτρια. Είναι εγκατεστημένο στον κύριο άξονα της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 6: Φρένο ([quora.com](https://www.quora.com))

Κιβώτιο ταχυτήτων: Αποτελείται από το διαφορικό χαμηλών στροφών και το διαφορικό υψηλών στροφών. Η κίνηση του διαφορικού χαμηλών στροφών μεταφέρεται στο διαφορικό υψηλών στροφών κάνοντάς το να περιστρέφεται με ταχύτητες πενήντα στροφών και άνω. Το διαφορικό χαμηλών στροφών κινείται με την ταχύτητα του ρότορα, η οποία για λόγους ασφαλείας είναι χαμηλή. Ενώ

το διαφορετικό υψηλών ταχυτήτων είναι συνδεδεμένο με την γεννήτρια, η ταχύτητα του οποίου πολλαπλασιάζεται σε τόσο μεγάλο βαθμό προκειμένου να κάνει την γεννήτρια να αποδώσει τα μέγιστα.



Εικόνα 7: Κιβώτιο ταχυτήτων (konic-gearbox.com 2023)

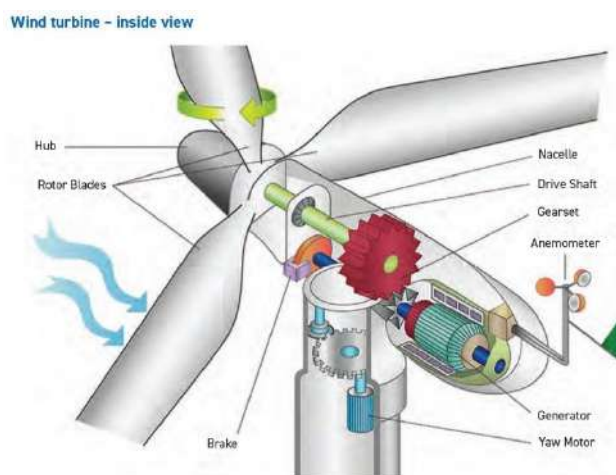
Γεννήτρια: Είναι ένας σύγχρονος εναλλακτήρας, δηλαδή μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) η οποία αποτελείται συνήθως από τέσσερις ή έξι πόλους. Συνδέεται με το κιβώτιο ταχυτήτων και συγκεκριμένα με το διαφορετικό υψηλών ταχυτήτων μέσω υβριδικού ή ελαστικού συνδέσμου. Σε μερικές περιπτώσεις η γεννήτρια είναι συνεχούς ρεύματος (DC). Τέτοιου είδους συναντιούνται σε μικρές ανεμογεννήτριες οι οποίες χρησιμοποιούνται σε μικρές οικίες και σκάφη. Όταν η ανεμογεννήτρια είναι μεγάλη και συνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο η γεννήτρια είναι εναλλασσόμενου ρεύματος (AC).



Εικόνα 8: Γεννήτρια (empoweringpumps.com 2021)

Μηχανισμός περιστροφής ατράκτου (yaw control): Με τη βοήθεια του κινητήρα περιστροφής στρέφει την άτρακτο απέναντι στον άνεμο. Για την

επίτευξη του σωστού προσανατολισμού, ο μηχανισμός περιστροφής ελέγχεται από ηλεκτρονικό ελεγκτή ο οποίος αντιλαμβάνεται τη διεύθυνση του ανέμου με τη χρήση ανεμοδείκτη. Αυτό συμβαίνει διότι με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η αποδοτικότητα της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 9: Μηχανισμός περιστροφής (psra.eu)

Πτερύγια: Τα πτερύγια των μεγάλων ανεμογεννητριών περιστρέφονται κατά μήκος του άξονα τους. Καθώς το πτερύγιο εκτίθεται στις δυνάμεις του αέρα, δέχεται δυνάμεις από διαφορετικές γωνίες κατά μήκος του. Η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου αυξάνεται όταν κινείται προς τη βάση του πτερυγίου, όμως στη περίπτωση που παρουσιάζονται μεγάλες γωνίες δεν είναι επιθυμητό. Γι' αυτό το λόγο το πτερύγιο έχει περιστροφική μορφή για να υπάρχει ενιαία γωνία.

Η διαδικασία υπολογισμού των κατάλληλων πτερυγίων χωρίζεται σε δύο μέρη:

α) Αξιολόγηση και υπολογισμός υλικού και τρόπου κατασκευής

Με τη χρήση της δύναμης και της ταχύτητας περιστροφής, υπολογίζεται κατά προσέγγιση η κατανομή δύναμης κατά μήκος του πτερυγίου. Έπειτα πραγματοποιείται ανάλυση με τη χρήση κατάλληλων λογισμικών προκειμένου να αντληθούν τα τελικά αποτελέσματα τα οποία και θα καθορίσουν εάν τελικά το πτερύγιο είναι κατάλληλο.

β) Αεροδυναμική αξιολόγηση

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω έτσι και σε αυτό το σημείο γίνεται χρήση ειδικών λογισμικών πραγματοποιείται ανάλυση της αεροδυναμικής επίδοσης του με βάση τα χαρακτηριστικά του.



Εικόνα 12: Πτερύγιο (azocleantech.com 2021)

Pitch (στροφέας πτερυγίων): Είναι απαραίτητο εξάρτημα για όλες τις σύγχρονες μεγάλες ανεμογεννήτριες διότι αυξάνει σημαντικά τον βαθμό απόδοσης και το εύρος λειτουργίας τους. Αυτό που κάνει είναι να ρυθμίζει το βήμα περιστροφής του πτερυγίου το οποίο συμβάλει στη διατήρηση της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα εντός του ορίου λειτουργίας του, ανεξαρτήτως των συνεχόμενων αλλαγών της ταχύτητας του ανέμου.



ΕΙΚΟΝΑ 13: Pitch ανεμογεννήτριας (industry.com 2012)

2. Υλικά κατασκευής ανεμογεννητριών

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναφερθούν τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των διαφόρων μερών των Α/Γ. Θα γίνει αναφορά στα υλικά των βάσεων, υλικά πύργου Α/Γ και υλικά ατράκτου. Μερικά από αυτά τα συνηθέστερα υλικά είναι το ατσάλι, το αλουμίνιο και ο χαλκός, για τα οποία υπάρχουν ώριμες τεχνολογίες ανακύκλωσης. Αντιθέτως, για τα περίπλοκα σύνθετα υλικά των πτερυγίων, δεν υπάρχει ακόμη δυνατότητα πλήρους ανακύκλωσης. Επιπλέον, όσον αφορά τις σπάνιες γαίες, οι τεχνολογίες ανακύκλωσης δεν έχουν λάβει ακόμα την τελική τους μορφή. Στην συνέχεια θα υπάρξει μια ανάλυση του κάθε υλικού που χρησιμοποιείται στην κατασκευή ανεμογεννητριών (Βοπου, Α. 2016).

1. **Σίδηρος:** Ο σίδηρος προορίζεται κυρίως για την κατασκευή χαλύβδινων προϊόντων, για τα οποία η ζήτηση παραμένει υψηλή. Παρ' όλα αυτά, η ποσότητα του χάλυβα που χρησιμοποιείται στις κατασκευές ανακυκλώνεται σε ποσοστό σχεδόν 90%, δείχνοντας έτσι την αξία της ανακύκλωσης στη διατήρηση των πόρων του φυσικού περιβάλλοντος.
2. **Χάλυβας:** Ο χάλυβας (κοινώς ατσάλι) είναι κράμα σιδήρου–άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,14% κ.β. (κατά βάρος) άνθρακα, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Οι κραματωμένοι χάλυβες, όπως π.χ. οι ανοξείδωτοι χάλυβες, οι εργαλειοχάλυβες, κ.λπ., αποτελούν ειδική κατηγορία χαλύβων που περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άλλων μετάλλων. Η ανάμειξη σιδήρου (Fe) σε κράμα μαζί με άνθρακα (C) βελτιώνει πάρα πολύ την αντοχή σε θραύση και σε κρούση, σε σύγκριση με τον καθαρό σίδηρο. Επίσης, υπάρχει και ο ανοξείδωτος χάλυβας (Stainless steel), ο οποίος έχει εξαιρετική αντοχή στην οξείδωση και την διάβρωση, και ο οποίος περιέχει περίπου 11% χρώμιο (Cr) (Wikipedia 4).
3. **Χαλκός:** Είναι ένα μεταλλικό στοιχείο με εξαιρετικές ιδιότητες θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας, που τον καθιστούν αναπόσπαστο κομμάτι της βιομηχανίας. Ωστόσο, η ζήτηση για χαλκό υπερβαίνει την προσφορά, ακόμα και όταν λαμβάνουμε υπόψη και την ανακύκλωση του μετάλλου. Η ανακύκλωση του χαλκού καλύπτει περίπου το 45% της συνολικής ποσότητας που χρησιμοποιείται, καθιστώντας σαφές ότι πρέπει να γίνουν

περαιτέρω προσπάθειες για τη διατήρηση και αύξηση της ανακύκλωσης του χαλκού.

4. **Αλουμίνιο:** Δεν βρίσκεται στη φύση σε μορφή που να το αναγνωρίζουμε, αλλά βρίσκεται σε μεγάλες ποσότητες στο βωξίτη. Μέσω ηλεκτρόλυσης, εξάγεται και μετατρέπεται στο αλουμίνιο που γνωρίζουμε. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το αλουμίνιο αντικαθιστά τον χαλκό. Το ποσοστό ανακύκλωσης του αλουμινίου κυμαίνεται από 15% έως 90%, αναλόγως με την ευκολία διαχωρισμού του από άλλα υλικά. Άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει τα ποσοστά αυτά είναι η προέλευσή του, ειδικά στην περίπτωση αποβλήτων κατεδάφισης. Όπως και με τον χαλκό, η ζήτηση για αλουμίνιο υπερτερεί της προσφοράς, αφού το ανακυκλωμένο αλουμίνιο αποτελεί το 30-40% της ζήτησης.
5. **Οι σπάνιες γαίες:** Είναι μέταλλα με οξείδια γαιώδους μορφής και σπανίζουν στη φύση. Ωστόσο, η ζήτησή τους αυξάνεται συνεχώς, καθώς χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς, όπως στα συστήματα άμεσης κίνησης που χρησιμοποιούν μόνιμους μαγνήτες. Παρ' όλο που οι σπάνιες γαίες ανακυκλώνονται σε ποσοστό μόνο 1%, το ποσοστό που ανακτάται από αυτές, προκύπτει από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, η διαδικασία της εξόρυξης και της επεξεργασίας είναι αρκετά πολυδάπανη, καθώς πρέπει να διαχειριστούμε τα ραδιενεργά στοιχεία που προκύπτουν από αυτήν και συνδέονται με τις υψηλές συγκεντρώσεις ουρανίου (U) και θορίου (Th) και άλλων ραδιενεργών στοιχείων, εκ των οποίων η διαχείριση απαιτεί συγκεκριμένες αδειοδοτήσεις.
6. **Σύνθετα πολυμερή:** Τα συνθετικά πολυμερή είναι υλικά που παράγονται με τη βοήθεια της χημείας, και περιλαμβάνουν: πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο, πολυστυρόλιο, πολυβινυλοχλωρίδιο, συνθετικό καουτσούκ, ρητίνη φαινόλης-φορμαλδεΰδης, νεοπρένιο, νάιλον, πολυακρυλονιτρίλιο, σιλικόνη και πολλά άλλα. Περισσότεροι από 330 εκατομμύρια τόνοι αυτών των πολυμερών παράγονται κάθε χρόνο (Roiter, Y., Minko, S., 2005).
7. **Το σκυρόδεμα:** Αποτελεί ένα σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή των θεμελίων των ανεμογεννητριών. Το σκυρόδεμα

περιέχει μεγάλες ποσότητες τσιμέντου, το οποίο αποτελεί τον βασικό του συστατικό. Παρόλο που το τσιμέντο αποτελεί το 95% του συνόλου της παραγωγής, η χρήση του σκυροδέματος παραμένει η κύρια εφαρμογή του. Η ανακύκλωση του σκυροδέματος μπορεί να παράγει μια μικρή ποσότητα αδρανούς ύλης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην τσιμεντοβιομηχανία, την οδοποιία και στον τομέα των κατασκευών γενικότερα, αλλά αποτελεί μόνο το 7% της ανακυκλωμένης ποσότητας.

2.1 Υλικά βάσεων Α/Γ

Οι βάσεις των χερσαίων ανεμογεννητριών μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά, όπως:

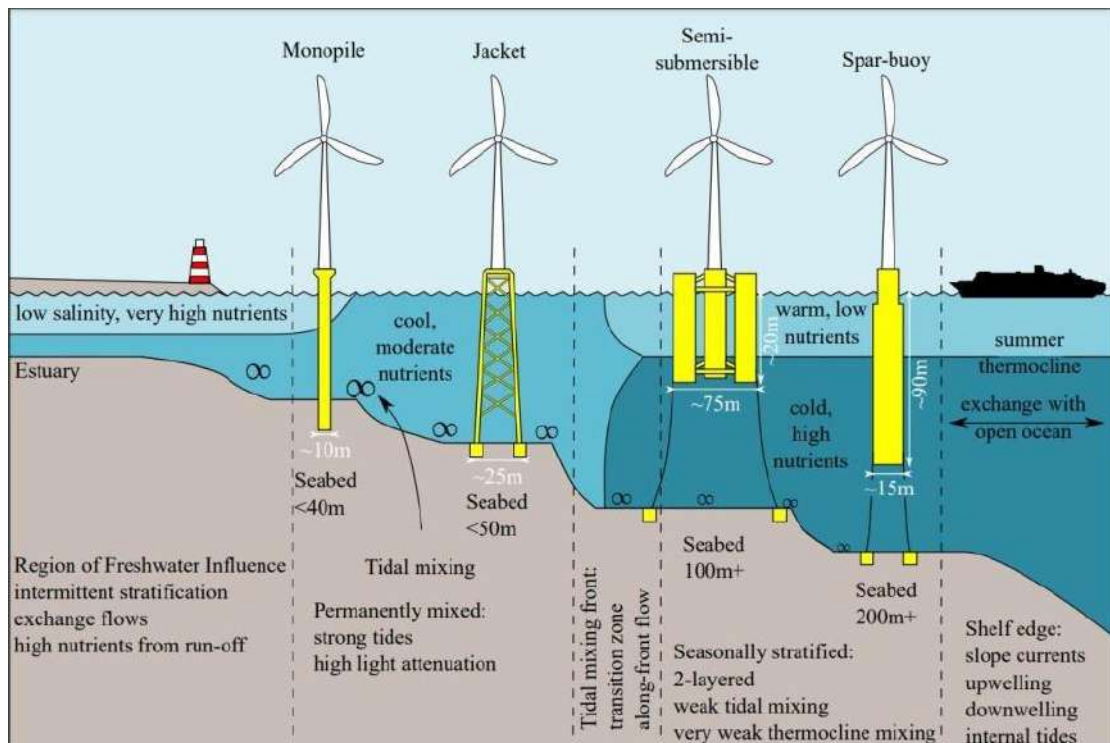
1. **Σκυρόδεμα:** Το σκυρόδεμα είναι ένα δημοφιλές υλικό για βάσεις ανεμογεννητριών, καθώς είναι ανθεκτικό και αντέχει τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό. Η στρογγυλοποίηση της βάσης της Α/Γ μας ωφελεί στην εξοικονόμηση χώρου και υλικών αφού όπως είναι γνωστόν τα κυλινδρικά σχήματα καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο για την ίδια ποσότητα ύλης συγκριτικά με οποιοδήποτε άλλο σχήμα, είναι μια κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται σε ορισμένα μοντέλα Α/Γ.
2. **Χάλυβας:** Ο χάλυβας είναι ένα ανθεκτικό υλικό που χρησιμοποιείται σε πιο εξειδικευμένες βάσεις. Μπορεί να είναι είτε άκαμπτos είτε ελαστικός χάλυβας και μπορεί να κατασκευαστεί με διάφορους τρόπους, όπως πλέγμα ή μονόπολο (monopile).

Η επιλογή του υλικού για μια βάση ανεμογεννήτριας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος της ανεμογεννήτριας, τις συνθήκες της τοποθεσίας και το κόστος. Η σχεδίαση και η κατασκευή της βάσης πρέπει να συμμορφώνεται με τους τοπικούς κανονισμούς και τα πρότυπα μηχανικής για να διασφαλίζεται η σωστή και ασφαλής λειτουργία της ανεμογεννήτριας. (Andersen, N., 2015)



Εικόνα 10: Θεμέλια ανεμογεννήτριας

Όσον αφορά τις παράκτιες ανεμογεννήτριες υπάρχουν διάφοροι τύποι θεμελίωσης στα οποία χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά. Κάθε σχέδιο έχει τα δικά του θετικά και αρνητικά στοιχεία.



Εικόνα 11: Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες (theconversation.com 2022)

1. Μονόπηλα θεμέλια (monopile): Αυτά τα θεμέλια είναι κατασκευασμένα από μια χαλύβδινη στήλη που οδηγείται στον βυθό της θάλασσας. Αυτό σημαίνει ότι η κατασκευή δεν χρειάζεται πολλαπλά θεμέλια, αλλά μόνο ένα μεγάλο χαλύβδινο σωρό που βυθίζεται στον πυθμένα της θάλασσας για να στηρίξει την κατασκευή στο πυθμένα. Είναι ο πιο κοινός τύπος θεμελίωσης για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, καθώς είναι σχετικά οικονομική κατασκευή και η εγκατάσταση είναι σχετικά εύκολη. Ωστόσο, δεν είναι κατάλληλη για όλους τους τύπους εδάφους και τα βάθη του νερού.
2. Τζάκετ θεμέλια (jacket): Τα θεμέλια τζάκετ είναι κατασκευασμένα από χαλύβδινη δικτυωτή δομή που παρέχει πρόσθετη σταθερότητα σε βαθύτερα νερά. Είναι πιο ακριβά από τα μονόπηλα θεμέλια αλλά είναι κατάλληλα για ένα ευρύτερο φάσμα τύπων εδάφους και βάθους νερού.

3. Θεμέλια με βάση τη βαρύτητα (semi-submersible): Αυτά τα θεμέλια χρησιμοποιούν μια μεγάλη κατασκευή από σκυρόδεμα ή χάλυβα που βυθίζεται στον πυθμένα της θάλασσας για να παρέχει σταθερότητα. Είναι κατάλληλα για μαλακές συνθήκες βυθού και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα βάθη νερού. Ωστόσο, είναι πιο δαπανηρή η κατασκευή τους από άλλους τύπους θεμελίωσης.
4. Πλωτά θεμέλια (spar-buoy): Αυτά τα θεμέλια έχουν σχεδιαστεί για χρήση σε βαθιά νερά όπου η σταθερή θεμελίωση δεν είναι εφικτή. Είναι αγκυρωμένα στον βυθό της θάλασσας χρησιμοποιώντας γραμμές πρόσδεσης και μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά, όπως σκυρόδεμα ή χάλυβα. Είναι πιο δαπανηρή η κατασκευή τους από τα σταθερά θεμέλια, αλλά προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά τη θέση και το βάθος του νερού.

Για την επιλογή της βάσης για μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια υπάρχουν κάποιοι σημαντικοί παράμετροι, όπως το βάθος του νερού, οι συνθήκες του βυθού, τα φορτία ανέμου και κυμάτων και ο προϋπολογισμός του έργου. Το θεμέλιο πρέπει να σχεδιαστεί και να εγκατασταθεί ώστε να αντέχει στις ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες υπεράκτιων περιοχών και να διασφαλίζει την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

2.2 Υλικά πύργου Α/Γ

Οι πύργοι των Α/Γ συνήθως κατασκευάζονται από χάλυβα (95%-100%), αλουμίνιο (0%-2%), χαλκό (0%-1%) και πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (0%-4%)(Μαυροκοστίδου Κ., 2019). Ο πύργος στις περισσότερες περιπτώσεις είναι κατασκευασμένος από κυλινδρικούς κωνικούς χαλύβδινους σωλήνες ή ατσαλοσωλήνες, κατασκευάζονται από ατσάλινα ελάσματα πάχους έως 150mm, τα οποία τυλίγονται σε τμήματα σωλήνων και στην συνέχεια συγκολλούνται. Ο χάλυβας έχει την ιδιότητα να είναι πιο ανθεκτικός, επομένως να αντέχει δυνατούς ανέμους και ακραίες καιρικές συνθήκες. Ο πύργος είναι το πιο βαρύ τμήμα της Α/Γ καθώς καλύπτει ένα μεγάλο ποσοστό της τάξης 60% με 70% περίπου του συνολικού του βάρους χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η βάση (Andersen, N., 2015).

Οι πύργοι στις παράκτιες ανεμογεννήτριες πρέπει να είναι σχεδιασμένοι για να αντέχουν τις αυξημένες δυνάμεις των ανέμων και των κυμάτων. Για αυτό το λόγο είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα. Απαιτείται μια εξειδικευμένη επεξεργασία της επιφάνειας κατά της διάβρωσης, καθώς και μηχανική ενίσχυση για την αντιμετώπιση της υπερβολικής φόρτισης από τα κύματα των πλατφορμών πρόσβασης από το προσωπικό.

2.3 Υλικά ατράκτου

Η εξωτερική επένδυση της ατράκτου είναι φτιαγμένη από συνθετικό υλικό, το οποίο είναι πλαστικό και ενισχυμένο με ίνες γυαλιού ή άνθρακα, ενώ ο εσωτερικός σκελετός της ατράκτου είναι κατασκευασμένος από μεταλλικό πλαίσιο. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της ατράκτου περιλαμβάνουν χάλυβα, χαλκό, αλουμίνιο, σίδηρο, GFPR (πλαστικό ενισχυμένο με γυαλί) και μικρές ποσότητες ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και λιπαντικών (Andersen, N., 2015).

2.4 Υλικά ρότορα

Ο ρότορας των ανεμογεννητριών κατασκευάζεται συνήθως από ελαφρά κράματα μετάλλων, όπως αλουμίνιο ή γαλβανισμένο χάλυβα. Αυτά τα υλικά επιλέγονται λόγω των εξαιρετικά ανθεκτικών χαρακτηριστικών τους και της ικανότητάς τους να αντέχουν σε υψηλές φορτίσεις και στοιχεία του περιβάλλοντος (Andersen, N., 2015).

2.5 Υλικά πτερυγίων

Τα πτερύγια για να έχουν καλύτερο αεροδυναμικό σχεδιασμό είναι απαραίτητο να είναι ελαφριά και ανθεκτικά. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών διαθέτουν δύο τμήματα, το τμήμα χαμηλής πίεσης και το τμήμα υψηλής πίεσης, τα οποία μαζί αποτελούν το κέλυφος των πτερυγίων. Το κέλυφος του πτερυγίου κατασκευάζεται από συνθετικά υλικά, ενώ ο σκελετός της κατασκευάζεται από μέταλλα.

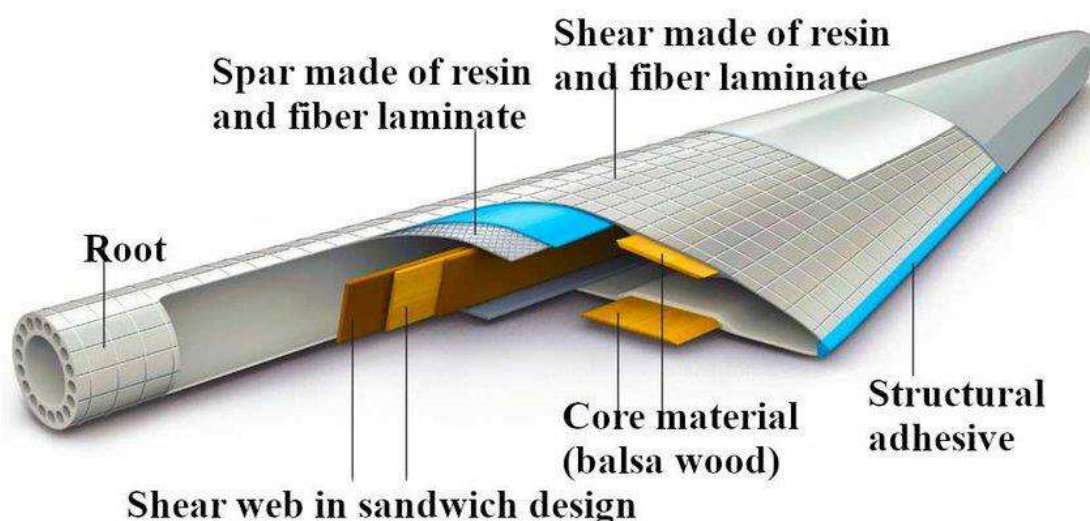
Αρχικά για την κατασκευή πτερυγίων χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία τοποθέτησης ινών γυαλιού σε ανοιχτά καλούπια με τη χρήση πινέλων και ρολών. Στη συνέχεια μόλις κατασκευαστούν τα κελύφη συγκολλούνται μεταξύ τους με τα δοκάρια. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή πτερυγίων μικρού και μεσαίου μεγέθους (35 με 55 μέτρα). Για την κατασκευή μεγαλύτερων πτερυγίων χρησιμοποιήθηκε η ίδια διαδικασία όμως έγινε χρήση

μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε ρητίνη αλλά και ο ιστός διάτμησης εισήχθη και συγκολλήθηκε μεταξύ δύο πλευρών.

Με την εισαγωγή της τεχνολογίας προεμποτισμού και έγχυσης κενού επιτράπηκε η βελτίωση της ποιότητας παραγωγής. Αυτή η τεχνολογία βασίζεται στη χρήση προεμποτισμένων σύνθετων ινών, οι οποίες περιέχουν ήδη μια ποσότητα υλικού μήτρας που τις συνδέει μεταξύ τους (Mishnaevsky et al., 2017).

Το κέλυφος των πτερυγίων των Α/Γ εμπεριέχει τρία συστατικά,

- 1) τις ίνες, που είναι συστατικό ενίσχυσης
- 2) τη μήτρα
- 3) τον πυρήνα



Εικόνα 12: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας (Ultrasound-based identification of damage in wind turbine blades using novelty 2020).

Οι γνωστότεροι τύποι ινών είναι:

- Ίνες γυαλιού (GFPR, Glass Fiber Reinforced Polymer) και άνθρακα (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer)
- Αραμίδια και ίνες βασάλτη
- Υβριδικά σύνθετα υλικά
- Φυσικές ίνες

Οι μήτρες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των πτερυγίων διαφέρουν. Οι πιο γνωστές είναι :

- Θερμοπλαστικές
- Νανομηχανικά πολυμερή και σύνθετα υλικά
- Εποξικές
- Πολυεστέρες
- Βινυλεστέρες
- Πολυουρεθανικοί

Ο πυρήνας του πτερυγίου αποτελείται από διάφορα υλικά όπως:

- Ξύλο
- Αφρός πολυβινυλοχλωριδίου (PVC , Polyvinyl chloride)
- Αφρός πολυτερεφθαλικού αιθυλενίου

Το τελευταίο στάδιο της κατασκευής του κελύφους και απαραίτητο για την προστασία του, είναι η επίστρωσή του με πολυαιθυλένιο ή πολυουρεθάνη.

Επομένως, τα συνηθέστερα υλικά των πτερυγίων είναι GFRP (80%-95%), CFRP (0%-10%), πλαστικό (0%-15%), χάλυβας (2%-9%) και αλουμίνιο (0%-1%).

Η ανεμογεννήτρια αποτελείται από τρία πτερύγια τα οποία περιλαμβάνουν δύο διαφορετικά μέρη, τη ρίζα και το αεροδυναμικό μέρος. Η ρίζα είναι ένα σωληνοειδές τμήμα που συνδέει το πτερύγιο με το ρότορα. Το αεροδυναμικό μέρος κατασκευάζεται από ένα πολυστρωματικό φύλλο ινών γυαλιού και συνήθως αποτελείται από GFRP (συνεχή πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού), το οποίο είναι φτηνό, ανθεκτικό (1500-2500 MPa) και άκαμπτο (72-76 GPa). Τα στηρίγματα των πτερυγίων κατασκευάζονται σε τύπο «σάντουιτς» με ινσανίδες και ξύλο balsa ή PVC. Τέλος, η κάλυψη των εξωτερικών επιφανειών για την προστασία τους γίνεται από στρώματα γέλης και πολυουρεθάνης. Συνολικά, μια ανεμογεννήτρια έχει περίπου βάρος 8,4 τόνων,

με το GFRP να αποτελεί τα δύο τρίτα του συνολικού βάρους του πτερυγίου. (Beauson et al., 2014)

Ο στόχος είναι να μειωθεί το κόστος ενέργειας, και για αυτό αυξήθηκε το μέγεθος των ανεμογεννητριών και μειώθηκε το βάρος τους στο ελάχιστο. Οι μακρύτερες όμως πτέρυγες απαιτούν μεγαλύτερη ακαμψία και αντοχή στην κόπωση κατά τη διάρκεια ζωής τους, καθώς υφίστανται πάνω από 100 εκατομμύρια κύκλους περιστροφής. Για αυτόν τον λόγο, η ενίσχυση των πτερυγίων με ίνες άνθρακα ή υβριδικά σύνθετα με μίξη από ίνες γυαλιού και άνθρακα χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο.

Αυτά τα σύνθετα υλικά έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως:

1. Υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος.
2. Αντοχή στην κόπωση.
3. Αντίσταση στη διάβρωση.
4. Δυνατότητα συνδυασμού με άλλα εξαρτήματα για βελτίωση της απόδοσης.

Η επιλογή των κατάλληλων υλικών για την κατασκευή εξαρτημάτων γίνεται με βάση τις συγκεκριμένες ανάγκες της γεωγραφικής τοποθεσίας. Η έρευνα στον τομέα των υλικών δίνει την περισσότερη βάση: (WindEurope, 2017a)

1. Στην βελτίωση του σχήματος των χημικών δεσμών μέσω της σκλήρυνσης.
2. Στην ενσωμάτωση αυτοματοποιημένων διαδικασιών παραγωγής για τη διατήρηση της σταθερότητας των ποιοτικών χαρακτηριστικών.
3. Στην ενίσχυση του πλέγματος των ινών μέσω της εισαγωγής νάνο-εξαρτημάτων.
4. Στη μελέτη υβριδικών συνθετικών υλικών που συνδυάζουν διαφορετικούς τύπους ίνες.
5. Στη δημιουργία ανθεκτικών υλικών επικάλυψης για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στη διάβρωση.

6. Στην ανάπτυξη νέων μεθόδων κατασκευής ινών άνθρακα με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και ευκολία ανακύκλωσης.
7. Στην έρευνα κατάλληλων ανακυκλώσιμων υλικών, όπως θερμοπλαστικά, κυτταρινικές ίνες και βιορευσίνες.

Στο παρακάτω πίνακα αναφέρονται διάφορα υλικά με την μέθοδο διαχείρισης τους μετά το τέλος της ζωής τους και το ποσοστό διαχείρισης τους.

Πίνακας 1: Κατηγορίες υλικών (Πηγή: Martínez gallery et al., 2009, Andersen et al., 2014)

Υλικό	Ποσοστό διαχείρισης	Μέθοδος διαχείρισης
Υψηλής ποιότητας κράμα σιδήρου	98%	Ανακύκλωση
Σιδηρούχα μέταλλα	95%	Ανακύκλωση
Ατσάλι	90%	Ανακύκλωση
Αλουμίνιο και κράματα αλουμινίου	95%	Ανακύκλωση
Χαλκός, μαγνήσιο, νικέλιο, ψευδάργυρος και κράματα τους	98%	Ανακύκλωση
Πολύτιμα μέταλλα και άλλα μη σιδηρούχα μέταλλα και κράματα	98%	Ανακύκλωση
Ηλεκτρονικά είδη	50%	Αποτέφρωση για ανάκτηση ενέργειας
Μπαταρίες	100%	Ανακύκλωση
Σκυρόδεμα, τούβλα κλπ.	64%	ΧΥΤΑ
Λεπίδες	95%	ΧΥΤΑ ή ανακύκλωση
Πλαστικό pvc και άλλα πλαστικά	100%	Αποτέφρωση για ανάκτηση ενέργειας
Λάδια	100%	Αποτέφρωση για ανάκτηση ενέργειας

2.6 Κύκλος ζωής των υλικών

Τα υλικά έχουν βασικό ρόλο στην κατασκευή μίας Α/Γ, αφού έχουν οικονομικό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Τα υλικά αυτά περνούν διάφορα στάδια για να χρησιμοποιηθούν στις Α/Γ. Όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 22 τα στάδια αυτά είναι συνήθως έξι. Το πρώτο στάδιο, δηλαδή οι πρώτες ύλες εξάγονται από τη γη μέσω διάτρησης, εξόρυξης κλπ. Στη συνέχεια στο δεύτερο στάδιο γίνεται η επεξεργασία τους και η μετατροπή τους σε ακατέργαστες μορφές υλικών (σκυρόδεμα, μέταλλα, καουτσούκ, ίνες κλπ.). Κατά το τρίτο στάδιο τα υλικά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των διάφορων τμημάτων

των ανεμογεννητριών. Έπειτα στο τέταρτο στάδιο το εκάστοτε τμήμα ή κομμάτι μεταφέρεται στο μέρος όπου θα στηθεί η ανεμογεννήτρια. Στο πέμπτο στάδιο αφού συγκεντρωθούν όλα τα κομμάτια γίνεται η συναρμολόγηση τους και ξεκινάει η λειτουργία της. Τέλος κατά το έκτο στάδιο, έπειτα από το τέλος της ζωής της ανεμογεννήτριας γίνεται η διαχείριση των παραγόμενων αποβλήτων της. Το έκτο στάδιο είναι και το στάδιο το οποίο θα αναλυθεί στη παρούσα εργασία με έμφαση στην ανακύκλωση (William D., Callister JR., 2004).



Εικόνα 17: Κύκλος ζωής υλικών (Ioparnakis.gr 2018)

2.6.1 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται με δύο τρόπους. Είτε ως προς τις ιδιότητες του κλύσματος είτε ως προς τις ιδιότητες της μήτρας (Σουλιντζής Α., 2008).

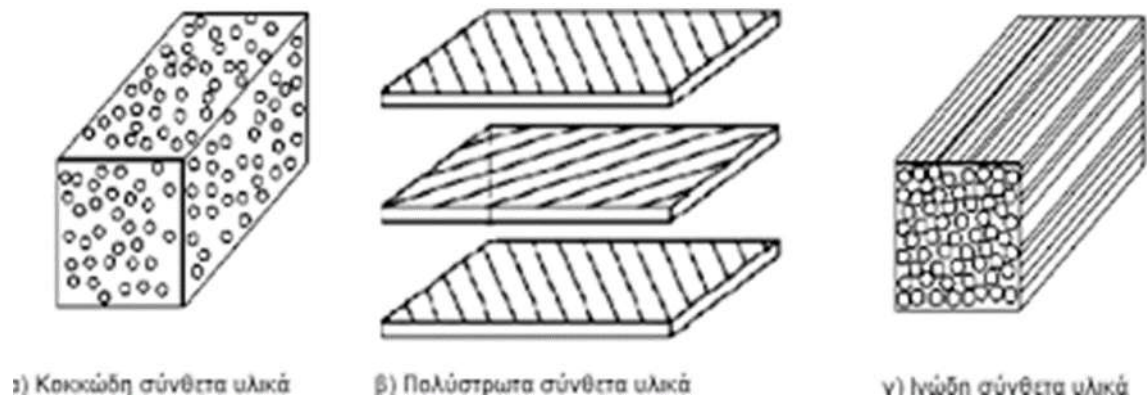
Με βάση τη μήτρα, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε:

- Σύνθετα με κεραμική μήτρα
- Σύνθετα με μεταλλική μήτρα
- Σύνθετα με πολυμερική μήτρα

Με βάση το έγκλεισμα διακρίνονται σε :

- Σύνθετα με εγκλεισμό σε μορφή ρινισμάτων
- Σύνθετα με εγκλεισμό σε μορφή κόκκων
- Σύνθετα με εγκλεισμό σε μορφή ινών

- Σύνθετα με εγκλεισμό σε μορφή επίπεδων φύλλων ή λεπτών στρωμάτων



Εικόνα 18: Τύποι σύνθετων υλικών (teiwest.gr)

3. Ανακύκλωση ανεμογεννητριών

3.1 Εισαγωγή

Τα προϊόντα του 21ου αιώνα παράγονται με διαδικασίες και τεχνολογίες που έχουν αντίκτυπο στην κοινωνία με διάφορους τρόπους, είτε είναι αρνητικοί είτε θετικοί. Κυρίως αφορούν τους τομείς του περιβάλλοντος και της οικονομίας. Η ανακύκλωση με τη σειρά της καθορίζει πόσο θετικό ή αρνητικό είναι το αντίκτυπο στους παραπάνω τομείς. Πιο συγκεκριμένα εάν ένα προϊόν ανακυκλώνεται εύκολα και χωρίς να μειώνονται σημαντικά οι αρχικές του ιδιότητες τότε έχει θετικό αντίκτυπο. Τα απλά υλικά όπως ο χάλυβας, ο χαλκός, το αλουμίνιο και το σκυρόδεμα ανακυκλώνονται εδώ και αρκετά χρόνια με πολλές μεθόδους και μεγάλη επιτυχία. Από την άλλη όμως τα σύγχρονα, σύνθετα, πολυμερικά υλικά των πτερυγίων είναι δυσκολότερα στην διαχείριση τους μετά το τέλος του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών. Δηλαδή δεν υπάρχουν ακόμη τόσο πετυχημένες μέθοδοι ανακύκλωσης τους όπως στα υπόλοιπα υλικά των ανεμογεννητριών. Παρόλα αυτά με το πέρασ του χρόνου και την βελτίωση της τεχνολογίας έχουν γίνει σημαντικά βήματα στον τομέα αυτόν.

Μέχρι στιγμής το 85 με 90% του βάρους μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να ανακυκλωθεί (WindEurope, 2020). Εδώ και αρκετά χρόνια υπάρχουν αξιόπιστες τεχνικές ανακύκλωσης για τα περισσότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια ωστόσο παραμένουν τα πιο δύσκολα στην ανακύκλωση λόγω των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή τους. Σύμφωνα με εκτίμηση της WindEurope για το 2023, θα παροπλιστούν στην Ευρώπη Α/Γ εγκατεστημένης ισχύος 2 GWp. Αυτό θα απαιτούσε την ανακύκλωση περίπου 4700 ανεμογεννητριών ή 14000 πτερυγίων συνολικού βάρους υλικού 40.000 – 60.000 τόνους (Paulsen & Enevoldsen, 2021). Εξαιτίας της τεράστιας ποσότητας η ανακύκλωση αποτελεί κύρια προτεραιότητα για την αιολική βιομηχανία και απαιτείται συγκεκριμένη τεχνολογία και διαχείριση για την αποσυναρμολόγηση, τη συλλογή, τη μεταφορά και τη διαχείριση των απορριμμάτων.

Παρακάτω θα γίνει ανάλυση για τον τρόπο με τον οποίο ανακυκλώνεται κάθε μέρος μιας ανεμογεννήτριας καθώς και για τις ερευνητικές και εμπορικές μέθοδοι οι οποίες ισχύουν.

3.2 Ανάλυση κύκλου ζωής ανεμογεννητριών

Η μέθοδος ανάλυσης του κύκλου ζωής των υλικών αναπτύχθηκε με σκοπό να αυξηθεί η αντίληψη γύρω από τις περιβαλλοντικές συνέπειες που οφείλονται στην παραγωγή και στην κατανάλωση προϊόντων. Αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψη εξ ολοκλήρου τις πτυχές που έχουν σχέση με τις περιβαλλοντικές συνέπειες, όπως η χρήση υλικών και ενέργειας, καθώς και οι επιπτώσεις σε διάφορα μέρη του οικοσυστήματος, κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, μιας υπηρεσίας ή μιας διαδικασίας - από την εξόρυξη των πρώτων υλών, την παραγωγή και τη χρήση, έως τη διαχείριση μετά το τέλος του κύκλου ζωής.

Στόχοι Αξιοποίησης μεθόδου ανάλυσης κύκλου ζωής :

- την βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των προϊόντων και να δοθεί πληροφόρηση στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων στη βιομηχανία, στο δημόσιο και στην κοινωνία για τον καλύτερο σχεδιασμό και τη διαχείριση των προϊόντων

- τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των προϊόντων σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής τους, από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι τη διαχείρισή τους μετά τη χρήση τους
- να βοηθήσει στην επιλογή κατάλληλων δεικτών μέτρησης της περιβαλλοντικής επίδοσης και στην προώθηση των προϊόντων μέσω της χρήσης περιβαλλοντικών σημάνσεων και ετικετών

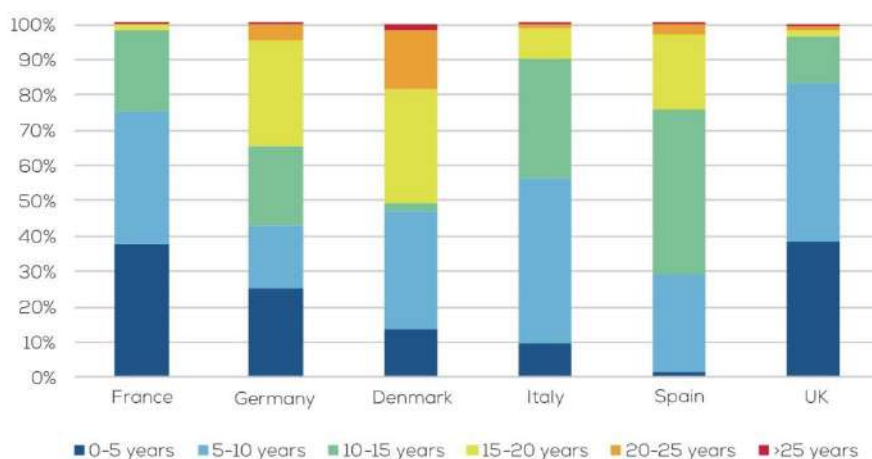
Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) υλοποιείται σύμφωνα με τις κατευθύνσεις που καθορίζονται στο πρότυπο ISO 14044 (ISO, 2006), μέσω του οποίου περιγράφονται οι τέσσερις φάσεις της μεθόδου. Αρχικά, ορίζεται ο σκοπός και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης, οι αναγκαία βασικές αποδοχές, τα επίπεδα ανάλυσης, η λειτουργική μονάδα, ο στόχος και τα όρια εφαρμογής της μεθόδου. Στη συνέχεια, συλλέγονται αναλυτικά τα δεδομένα εισόδου και εξόδου που αφορούν το υπό μελέτη σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη τα όρια του συστήματος. Στο επόμενο στάδιο, αναλύονται οι επιπτώσεις κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Analysis - LCIA), προσδιορίζοντας τη βαρύτητα κάθε φάσης στην επίδραση στο περιβάλλον. Κατά το τελικό στάδιο γίνεται ερμηνεία των αποτελεσμάτων, ενώ παρέχονται απαντήσεις και συμβουλές για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης του συστήματος (Γεννίτσαρης, Σ. 2022).

Στο συνέδριο της WindEurope, End-of-Life Issues and Strategies Seminar (EoLIS 2020), έγινε λόγος για το ζήτημα της απόσυρσης των ανεμογεννητριών που έχουν φτάσει στο τέλος της διάρκειας ζωής τους. Οι ειδικοί όλων των τομέων της βιομηχανίας παρουσίασαν τις τελευταίες τάσεις και εξελίξεις, όπως η αναβάθμιση (repowering) των αιολικών πάρκων με νεότερες ανεμογεννήτριες που έχουν μεγαλύτερη ισχύ ή απόδοση, η παράταση της διάρκειας ζωής τους, και η αποσυναρμολόγηση και ανακύκλωση τους. Επιπλέον η WindEurope παρουσίασε ένα βιβλίο με βιομηχανικές οδηγίες για το πως θα διαχειρίζονται οι ανεμογεννήτριες μετά το τέλος της ζωής τους. Δηλαδή εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο θα παροπλίζονται και θα αποσυναρμολογούνται. Πιο συγκεκριμένα στο βιβλίο σημειώνεται πως υπάρχουν περισσότερες από 34.000 ανεμογεννήτριες με ηλικία άνω των 15 ετών (μία μέση ανεμογεννήτρια έχει διάρκεια ζωής 20-25

χρόνια), με συνολική ισχύ 36 GW. Η πλειοψηφία αυτών των ανεμογεννητριών βρίσκεται στη Γερμανία, με μεγάλο ποσοστό να διαθέτουν και οι Γαλλία, Ισπανία και Ιταλία. Τέλος να σημειωθεί πως περίπου το 25% της προαναφερθείσας ισχύς (δηλαδή τα 9 από 36 GW) παράγεται από ανεμογεννήτριες που έχουν ηλικία 20-24 έτη, έχουν φτάσει σχεδόν στο τέλος της ζωής τους. Αυτό σημαίνει πως το ζήτημα της διαχείρισης των ανεμογεννητριών είναι πολύ επίκαιρο αφού μία στις τέσσερις κοντεύει στο τέλος της ζωής της.

Σε μερικά αιολικά πάρκα στην Ευρώπη γίνεται ανατροφοδότηση με νέες ανεμογεννήτριες. Όπως υπολογίζει η WindEurope οι ρυθμοί ανανέωσης θα αυξηθούν τα επόμενα χρόνια, κάνοντας λόγο πως η διαδικασία αυτή θα εφαρμοστεί σε πάρκα με ισχύ άνω των 20 GW. Όμως εκτός από την καταστροφή ή την ανατροφοδότηση των αιολικών πάρκων, η παράταση της διάρκειας ζωής τους είναι μια πολύ ελκυστική προοπτική για τους υπεύθυνους φορείς, αφού θα συνεχίσει να παράγει ενέργεια χωρίς πολλά έξοδα. Σύμφωνα με την WindEurope, η έρευνα για τη μείωση του ρυθμού γήρανσης των αιολικών πάρκων, η οποία έχει ήδη ξεκινήσει, θα αποτελέσει ένα σημαντικό τομέα έρευνας τα επόμενα δέκα χρόνια. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, το 50% των αιολικών πάρκων στην Ευρώπη μπορεί να λειτουργήσει για 5-10 χρόνια περισσότερο από τον αρχικό σχεδιασμό τους. Αν η παράταση της διάρκειας ζωής δεν αποδειχθεί εφικτή, οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να αποσυρθούν. Επιπλέον, το Έγγραφο Οδηγιών περιέχει λεπτομερείς κανόνες και κανονισμούς για τον αποσυναρμολογημένο εξοπλισμό σε όλη την Ευρώπη (WindEurope, 2020).

Distribution of age of wind fleets, as of August 2018



Source: WindEurope

Εικόνα 19: Ποσοστό παραγωγής ενέργειας έξι (6) ηλικιακών ομάδων στις μεγαλύτερες ευρωπαϊκές χώρες παραγωγούς αιολικής ενέργειας (Reuters Events)

3.3 Κατάσταση ανακύκλωσης στην Ελλάδα και τον κόσμο

Η Ανακύκλωση του Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) έχει ιδιαίτερη σημασία, όχι μόνο για την επαναχρησιμοποίηση των υλικών τους, αλλά κυρίως για την ασφαλή διαχείριση των επικίνδυνων ουσιών που περιέχονται σε πολλές από αυτές. Στην Ευρώπη, απαιτείται από τη νομοθεσία η ανακύκλωση του ΑΗΗΕ σε ειδικά πιστοποιημένες μονάδες, όπου γίνεται ανάκτηση πολύτιμων υλικών όπως χαλκός, χρυσός, ασήμι και άλλα, ταυτόχρονα αποτρέποντας τη διαρροή επικίνδυνων βαρέων μετάλλων όπως μόλυβδος, υδράργυρος, κάδμιο, εξασθενές χρώμιο και άλλα στο περιβάλλον. Η αύξηση των παγκόσμιων τιμών των μετάλλων, σε συνδυασμό με την προώθηση της οργανωμένης συλλογής μέσω της Οδηγίας 2002/96/ΕΚ για τα απόβλητα ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών και την ακόλουθη Οδηγία 2012/19/ΕΕ, έχει οδηγήσει σε αύξηση των ποσοτήτων ανακυκλωμένων αποβλήτων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών που συλλέγεται ξεχωριστά από τα οικιακά απόβλητα.

Παρά την εισαγωγή νομοθετικών πλαισίων και την εφαρμογή κανονισμών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, μόνο το ένα τρίτο των ΑΗΗΕ ανακυκλώνεται μέσω εγκεκριμένων συστημάτων. Το υπόλοιπο ποσοστό είτε καταλήγει σε χώρους διάθεσης απορριμμάτων, είτε εξάγεται παράνομα σε αναπτυσσόμενες χώρες.

Ένα σημαντικό μέρος των μη δηλωμένων, αλλά συλλεγόμενων, ΑΗΗΕ υποβάλλεται είτε σε επεξεργασία εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης χωρίς την απαιτούμενη προσοχή στην περιβαλλοντική ασφάλεια, είτε αποστέλλεται παράνομα σε αναπτυσσόμενες χώρες. Σε αυτές τις χώρες, μέρη των πολύτιμων υλικών ανακυκλώνονται με επιβλαβή τρόπο για την υγεία και το περιβάλλον. Το πρόβλημα επιδεινώνεται από το γεγονός ότι τα απόβλητα ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών αυξάνονται ταχύτερα από οποιοδήποτε άλλο απόβλητο στην ΕΕ.

Σήμερα, οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές αντιπροσωπεύουν το 4% των αποβλήτων που παράγονται στις αστικές περιοχές της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στην Ελλάδα, η ετήσια δημιουργία αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού υπολογίζεται κατά προσέγγιση ότι ανέρχεται σε περίπου 80.000 έως 115.000 τόνους. Αυτά τα απόβλητα έχουν καταταχθεί ως προτεραιότητα από την ελληνική νομοθεσία, λόγω του επικίνδυνου χαρακτήρα τους, της ταχείας αύξησης του όγκου τους και των σοβαρών επιπτώσεων που έχει η παραγωγή τους στο περιβάλλον. Τα έσοδα από τη διαχείριση αυτών των αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση εκτιμώνται σε περίπου 2 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως. Δεδομένου ότι η διαχείριση των συγκεκριμένων αποβλήτων κυρίως λαμβάνει χώρα εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αυτή η δραστηριότητα δημιουργεί οικονομικά οφέλη και απασχόληση, καθώς ο κλάδος αυτός είναι υψηλής εργασιακής έντασης.

Ωστόσο, η ανεπαρκής κατεργασία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών αποβλήτων στην ΕΕ προκαλεί σοβαρές περιβαλλοντικές ζημιές, κυρίως εξαιτίας της απελευθέρωσης βαρέων μετάλλων, όπως ο υδράργυρος από συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού και επίπεδες οθόνες, ή ο μόλυβδος από τηλεοπτικές συσκευές. Σύμφωνα με υπολογισμούς της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την περίοδο 2011-2020, από εξοπλισμό ψύξης και κλιματισμού απελευθερώνονται κάθε χρόνο κατά μέσο όρο άνω των 6.700 τόνων αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία καταστρέφουν το όζον, έχοντας ως αποτέλεσμα κλιματικές ζημιές ύψους 1 δισεκατομμυρίου ευρώ ετησίως.

Η ανεπαρκής και μη ελεγχόμενη διαχείριση των αποβλήτων σε αναπτυσσόμενες χώρες αποτελεί ένα ζήτημα για τη δημόσια υγεία, καθώς ο

πληθυσμός εκτίθεται σε εξαιρετικά τοξικές ουσίες κατά την απομάκρυνση των πολυτίμων υλικών από τον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, χωρίς καμία μέθοδο που να προστατεύει την υγεία και το περιβάλλον. Όταν δεν χρησιμοποιούνται οι αποδοτικότερες πρακτικές, χάνονται ανακυκλώσιμα πολύτιμα μέταλλα και πλαστικά υλικά, προκαλώντας σοβαρή υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Με τη σωστή διαχείριση, μπορούν να μειωθούν οι διαρροές επικίνδυνων ουσιών στο περιβάλλον και να ανακτηθούν πολύτιμα μέταλλα και υλικά. Σύμφωνα με τα δεδομένα της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος, αυτά τα υλικά (σε ποσοστό του συνολικού βάρους του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού) περιλαμβάνουν: (Ευρωπαϊκός Οργανισμός Ανακύκλωσης και Αξιοποίησης Αποβλήτων - EOAN, 2020).

- Γυαλί 5,4%
- Σίδηρος – Ατσάλι 47,9%
- Χαλκός 7%
- Πίνακες κυκλωμάτων 3,1%
- Πλαστικό 20,6%
- Αλουμίνιο 4,7%
- Υπόλοιπα 11,3%

Με την ανακύκλωση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών αποβλήτων πραγματοποιείται η ανάκτηση σημαντικών υλικών, όπως πολύτιμα μέταλλα (π.χ., χρυσός και άργυρος), αλλά ταυτόχρονα αντιμετωπίζεται και η διαχείριση επικίνδυνων ουσιών, όπως μόλυβδος, υδράργυρος και άλλες. Οι ποσοτικοί στόχοι για την ανακύκλωση και προετοιμασία επαναχρησιμοποίησης του Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΗΗΕ) κυμαίνονται μεταξύ 50% και 80%, ανάλογα με την κατηγορία των συσκευών, ενώ τα ποσοστά ανάκτησης των υλικών κυμαίνονται μεταξύ 70% και 80% (Ευρωπαϊκός Οργανισμός Ανακύκλωσης και Αξιοποίησης Αποβλήτων - EOAN, 2020).

3.4 Κανονισμοί της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα απόβλητα της αιολικής βιομηχανίας

Τα τελευταία χρόνια, έχουν σημειωθεί ορισμένα σημαντικά γεγονότα που έχουν αυξήσει σημαντικά την πίεση στην ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων ανακύκλωσης σύνθετων υλικών. Αυτά τα γεγονότα περιλαμβάνουν:

1. Το 2009, στη Γερμανία επιβλήθηκε απαγόρευση στην υγειονομική ταφή σύνθετων υλικών (WindEurope, 2020). Αυτό οδήγησε σε ανάγκη αναζήτησης εναλλακτικών λύσεων ανακύκλωσης για αυτά τα υλικά.
2. Οι Α/Γ από το πρώτο μεγάλο κύμα αιολικής ενέργειας της δεκαετίας του 1990 φθάνουν τώρα στο τέλος του προσδόκιμου ζωής τους. Το 2019 και το 2020, ανακατασκευάστηκαν Α/Γ ισχύος περίπου δύο GW, και η φιλική προς το περιβάλλον απόρριψή τους αποτελεί ένα αυξανόμενο πρόβλημα (WindEurope, 2020). Η χρήση αυξημένης ποσότητας συνθετικών υλικών, όπως τα CFRPs και GFRPs, στη βιομηχανία, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς και τις απαγορεύσεις διάθεσης σε χώρους υγειονομικής ταφής οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικών τεχνολογιών ανακύκλωσης για σύνθετα υλικά (Y. Liu et al., 2017). Είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι η πίεση για την ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων ανακύκλωσης σύνθετων υλικών θα αυξηθεί τα επόμενα χρόνια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχεδιάζουν να ακολουθήσουν το παράδειγμα της Γερμανίας απαγορεύοντας τις επιλογές υγειονομικής ταφής (WindEurope, 2020). Αυτή η αύξηση της πίεσης προκύπτει από την ανάπτυξη των αγορών σύνθετων υλικών, την αυξημένη παραγωγή σύνθετων υλικών και την εγκατάσταση περισσότερων συνθετικών κατασκευών καθώς και από τον αυξανόμενο αριθμό παροπλισμένων Α/Γ που αναμένεται να υποστούν αποτέφρωση ή ανακύκλωση (WindEurope, 2020).

Συνεπώς, οι παράγοντες που συντελούν στην ανάπτυξη των πιο βιώσιμων τεχνολογιών ανακύκλωσης σύνθετων υλικών αποτελούν αναμφίβολα ζωτικής σημασίας για την επιβίωση και τη βιωσιμότητα της βιομηχανίας σύνθετων υλικών συνολικά. Προβλέπεται ότι αυτή η τάση θα γίνεται όλο και πιο εμφανής κατά τη διάρκεια της τρέχουσας δεκαετίας του 2020 (Krauklis et al., 2021). Αυτό επισημαίνει τη σημασία της συνεχούς έρευνας, ανάπτυξης και υιοθέτησης νέων

τεχνολογιών που θα επιτρέψουν την αποδοτική ανακύκλωση των σύνθετων υλικών. Από την ανάπτυξη πιο αποδοτικών διαδικασιών ανακύκλωσης μέχρι την υιοθέτηση προηγμένων υλικών που είναι ευκολότερο να ανακυκλωθούν, η βιομηχανία σύνθετων υλικών πρέπει να επενδύσει στην καινοτομία για να διασφαλίσει τη μελλοντική της επιτυχία.

Κατά την ευρωπαϊκή οδηγία για τα απόβλητα (2008/98/ΕΚ) ορίζονται οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με τη διαχείριση των αποβλήτων. Μέσω αυτής της οδηγίας τονίζεται η ανάγκη για αυξημένη επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση των υλικών των ανεμογεννητριών. Επιπλέον καθιερώνεται η ιεραρχία της ορθής διαχείρισης των αποβλήτων (Τζόκας 2023).



Εικόνα 20: Πυραμίδα ιεραρχίας αποβλήτων ανεμογεννητριών (Τζόκας 2023)

3.5.1 Πρόληψη

Η αιολική βιομηχανία είναι υποχρεωμένη να δεσμευθεί για την βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων της και πρέπει να συμβάλει κατά τον σχεδιασμό στη μείωση υλικών που θα αποτελέσουν απόβλητα στο τέλος της ζωής των Α/Γ. Οι μειώσεις αυτές γίνονται σε τρία στάδια (WindEurope, 2020):

- α) Μείωση των συνθετικών υλικών και αντικατάστασή τους από άλλα ανακυκλώσιμα υλικά κατά τον αρχικό σχεδιασμό τους
- β) Μείωση της μάζας της κατασκευής, συνεπώς χρήση λιγότερων υλικών

γ) Αύξηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής, μειώνοντας τα ποσοστά αστοχίας

3.5.2 Επαναχρησιμοποίηση

Είναι ο πρώτος και απλούστερος τρόπος για το τέλος του κύκλου ζωής των πτερυγίων. Αυτή η ενέργεια συνδράμει στην παράταση διάρκειας ζωής τους. Μετά το πέρας των είκοσι ετών τα πτερύγια συνεχίζουν να έχουν μεγάλη αντοχή στην χρήση τους. Γι' αυτό τον λόγο απαιτείται τακτική συντήρηση και επισκευή των πτερυγίων για να παραταθεί η διάρκεια ζωής τους. Για την παράταση της διάρκειας ζωής, πρέπει να διενεργείται μια "αξιολόγηση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής που απομένει" (δηλαδή μια ανάλυση του φορτίου κόπωσης με τη χρήση δεδομένων SCADA ή άλλων τύπων δεδομένων), σε συνδυασμό με τακτικές επιθεωρήσεις στον τόπο και επανεξέταση των ενεργειών συντήρησης που έχουν πραγματοποιηθεί. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε δράσεις επισκευής και ενίσχυσης σε συγκεκριμένα σημεία των Α/Γ. Αναλυτικότερα η DNV-GL έχει αναπτύξει πρότυπα για την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής των Α/Γ. Ενώ η International Electrotechnical Commission (IEC) αναπτύσσει πρότυπο για την διαχείριση κατά τη διάρκεια της ζωής των ανεμογεννητριών, το οποίο θα συμβάλει στην παράταση της διάρκειας ζωής των αιολικών εγκαταστάσεων (IEC TS 61400-28) (WindEurope, 2020). Ταυτόχρονα ο Sayer ερεύνησε τον βαθμό απόδοσης πτερυγίων που χρησιμοποιούνταν για 20 χρόνια και κατέληξε στο συμπέρασμα πως δεν υπήρχαν σοβαρές φθορές που να εντοπίζονται με το "μάτι" και πως δεν υπήρξε σημαντική μείωση στην ακαμψία των πτερυγίων. Για το λόγο αυτό υπάρχουν αρκετές εταιρίες οι οποίες ασχολούνται με την επαναχρησιμοποίηση των ανεμογεννητριών και ειδικότερα των πτερυγίων τους. Οι πιο γνωστές του κλάδου είναι οι: η Blue Planet Wind, η Green Ener Tech, η Windturbines, η Enerpower και η Repowering Solutions.

Οι κύριες τυποποιημένες διαδικασίες που ακολουθούνται από τις παραπάνω εταιρίες για την ανανέωση των πτερυγίων αφορούν σε μετρήσεις της φυσικής τους συχνότητας όπως και σε οπτικές επιθεωρήσεις μαζί με επιθεωρήσεις υπερήχων. Έπειτα από αυτούς τους ελέγχους τα πτερύγια ζυγίζονται, ζυγοσταθμίζονται, βάφονται και επισκευάζονται όταν αυτό κριθεί αναγκαίο. Οι παραπάνω ανανεώσεις είναι οικονομικά και τεχνικά βιώσιμες κυρίως για

πτερύγια μικρού μεγέθους, δηλαδή για πτερύγια ανεμογεννητριών 10 kW έως 1 MW. Οι παραπάνω διαδικασίες είναι αμφίβολες για πτερύγια μεγαλύτερων Α/Γ εξαιτίας του μεγέθους τους. (Justine Beaumont & Brøndsted, 2016).

3.5.3 Αλλαγή χρήσης

Το στάδιο αυτό είναι το αμέσως επόμενο στην διαχείριση των αποβλήτων μετά την επαναχρησιμοποίηση, διότι είναι η δεύτερη ευκολότερη και οικονομικότερη λύση. Στα μεγάλα τμήματα των πτερυγίων, δίνεται η ευκαιρία να επαναχρησιμοποιηθούν για διάφορους αρχιτεκτονικούς και δομικούς σκοπούς. Αυτή η επιλογή έχει σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς εκμεταλλεύεται τα υψηλής ποιότητας και δομικής ικανότητας υλικά των πτερυγίων, με το αποτέλεσμα να παρατείνει τη διάρκεια ζωής τους χωρίς σημαντική επεξεργασία και διαμόρφωση μετά την απόσυρσή τους. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτή εμποδίζεται από την πολυπλοκότητα της δομής των συνθετικών υλικών των πτερυγίων, η οποία καθιστά δύσκολη τη συστηματική τους χρήση σε άλλες εφαρμογές. Υπάρχουν διάφορα παραδείγματα αλλαγής χρήσης. Τα πιο δημοφιλή είναι:

Γέφυρα: Στο Aalborg της Δανίας κατασκεύασαν πεζογέφυρα από δύο παρατημένα πτερύγια. Η κίνηση αυτή αποτελεί πηγή έμπνευσης για πολλές εταιρίες που ειδικεύονται στην κατασκευή γεφυρών και στην διαχείριση ανεμογεννητριών. Οι γέφυρες αυτής της κατηγορίας είναι σχετικά μικρές σε μέγεθος και το φορτίο που πρέπει να αντέχουν είναι μηδαμινό σε σχέση με τις κοινές γέφυρες. Επιπλέον μία γέφυρα που είναι κατασκευασμένη από πτερύγια είναι και πολύ ελαφριά. Δηλαδή δεν απαιτούνται ενισχυμένα θεμέλια όπως σε μία που είναι κατασκευασμένη από χάλυβα και σκυρόδεμα. Αυτό σημαίνει πως είναι ιδανική για μέρη που δεν έχουν σταθερό έδαφος και υπέδαφος (βαλτώδη, αμμώδη κλπ.) επειδή δεν είναι βαριές, με αποτέλεσμα να υπάρχει έντονος κίνδυνος καθίζησης του εδάφους. Πέρα από τα κατασκευαστικά πλεονεκτήματα, μία τέτοια κατασκευή είναι αρκετά οικονομική σε χώρες όπως η Ελλάδα, αφού υπάρχει πλήθος ανεμογεννητριών (André et al., 2020).



Εικόνα 21: Γέφυρα κατασκευασμένη από πτερύγιο (Queen's University Belfast 2023)

Υπόστεγο: Στην Ολλανδία η εταιρεία Superuse Studios παρουσίασε υπόστεγα για οχήματα, παιδικές χαρές και παγκάκια κατασκευασμένα από πτερύγια.

Παιδική χαρά: Ένα ακόμη παράδειγμα επαναχρησιμοποίησης των πτερυγίων ανεμογεννητριών αποτελεί η παιδική χαρά στο Ρότερνταμ, σχεδιασμένη από το ολλανδικό αρχιτεκτονικό γραφείο Superuse, χρησιμοποιώντας πέντε πτερύγια αποσυνηρημένων ανεμογεννητριών (Blade Made | RE-USE.EU).



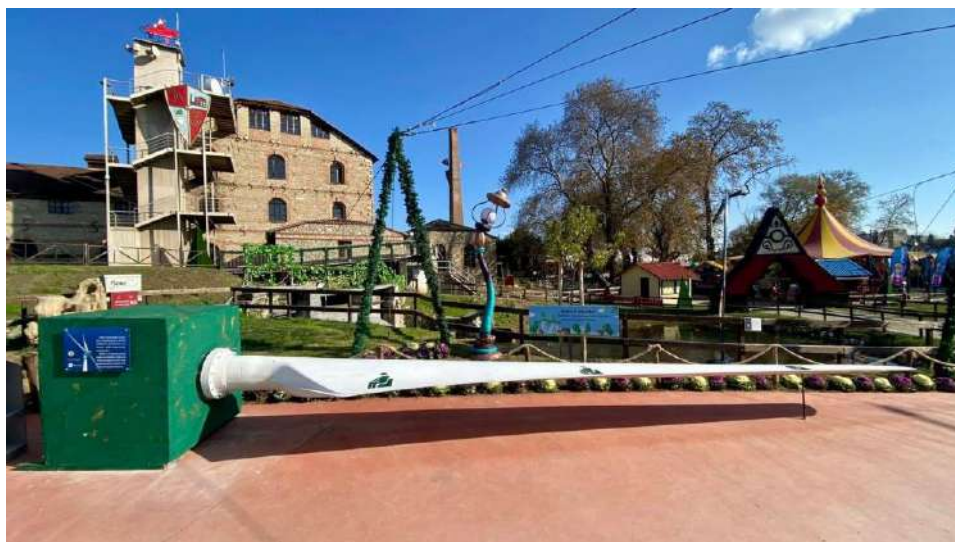
(a)



(b)

Εικόνα 22: Υπόστεγο και παιδική χαρά κατασκευασμένα από πτερύγια ανεμογεννητριών (MDPI 2021)

Δημόσιος χώρος για καθήμενους: Σε αυτή την εφαρμογή τα πτερύγια των ανεμογεννητριών αποτελούν δημόσιο χώρο για καθήμενους με το όνομα ReWind στην πλατεία Willemsplein στο Ρότερνταμ της Ολλανδίας. Όμως εκτός από την Ολλανδία, κάτι αντίστοιχο έχει γίνει και στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στον Μύλο των Ξωτικών στα Τρίκαλα.



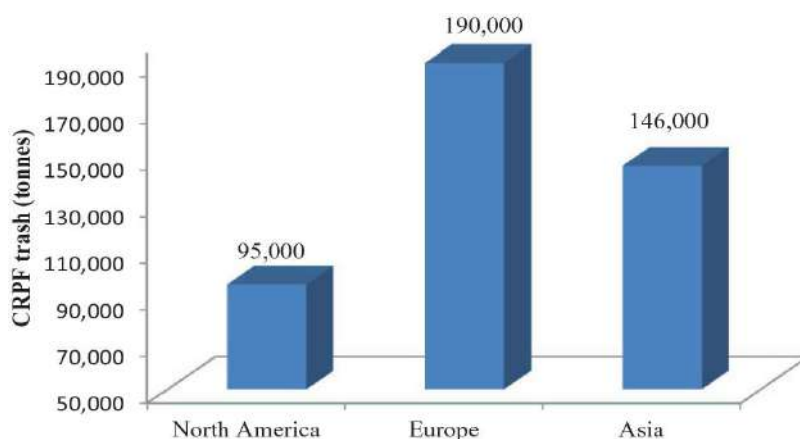
Εικόνα 23: Παγκάκι κατασκευασμένο από πτερύγιο ανεμογεννήτριας (greenagenda.gr 2021)

3.7 Ανακύκλωση σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα πολυμερικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις Α/Γ γνώρισαν αλματώδη ανάπτυξη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι σύγχρονες Α/Γ απαιτούν χαμηλό βάρος και κόστος για την κατασκευή τους, αλλά ταυτόχρονα να είναι και μεγαλύτερες για να παράγουν περισσότερη ενέργεια. Επιπλέον αυτά τα υλικά έχουν και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Όμως τα σύνθετα πολυμερικά υλικά είναι δύσκολα στη διαχείριση τους μετά το πέρας της ζωής τους. Επομένως οι έρευνες που γίνονται διεθνώς ασχολούνται σε μεγάλο βαθμό με τη βελτίωση των υλικών και την αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης τους (Πουλάκης, 1998).

Η ανακύκλωση έπεται των παραπάνω διαδικασιών, όταν τα πτερύγια είναι αρκετά ταλαιπωρημένα με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η απευθείας ή η επεξεργασμένη χρήση τους. Κατά την ανακύκλωση το πτερύγιο μετατρέπεται σε νέο υλικό ή προϊόν με την ίδια ή διαφορετική χρήση. Η αδυναμία χρήσης προηγμένων τεχνολογιών για την αξιοποίηση των σύνθετων υλικών όπως

ρητίνες και ίνες αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την ανακύκλωσή τους. Οι διαθέσιμες τεχνολογίες, όπως η χημική και θερμική ανακύκλωση, είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο και λιγότερο αποτελεσματικές από τις απαιτούμενες. Συνεπώς, οι μηχανικές μέθοδοι ανακύκλωσης και η ανάκτηση ενέργειας χρησιμοποιούνται περισσότερο, ενώ η υγειονομική ταφή παραμένει η κυρίαρχη επιλογή για τα απορρίμματα. Η ανακύκλωση δεν είναι η πρώτη επιλογή διότι για να γίνει χρειάζονται αρκετοί πόροι, ενέργεια και το βασικότερο τεχνογνωσία. Η τεχνογνωσία αποτελεί τον βασικότερο παράγοντα όταν γίνεται συζήτηση για την ανακύκλωση πτερυγίων. Αυτό οφείλεται στην χρήση πολυμερών και σύνθετων υλικών κατά την κατασκευή τους. Τα υλικά τέτοιου είδους είναι δύσκολο να ανακυκλωθούν αφού αποτελούνται κυρίως από άνθρακα και ίνες γυαλιού. Παρόλα αυτά υπάρχουν εταιρίες που μπορούν να ανακυκλώσουν πτερύγια. (Beauson and Brøndsted, 2016; Kalkanis et al., 2019).



Εικόνα 13: Προβλεπόμενη ποσότητα απορριμμάτων CFRP (τόνοι) (Sage Journals 2022)

Χημική ανακύκλωση

Κατά τη διαδικασία αυτή πραγματοποιείται χημικός αποπολυμερισμός και αφαίρεση της μήτρας του σύνθετου υλικού χρησιμοποιώντας χημικά αντιδραστήρια διαχωρισμού για να γίνει ανάκτηση των ενισχυτικών ινών. Βασικό πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η ανάκτηση των μητρών των συνθετικών υλικών και των ενισχυτικών ινών, καθώς η διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά είδη ινών. Η μέθοδος

της χημικής ανακύκλωσης στην οποία γίνεται χρήση υπερκρίσιμων ρευστών είναι η πιο σύγχρονη. Αυτά τα ρευστά βρίσκονται σε πίεση και θερμοκρασία λίγο πάνω από το κρίσιμο σημείο τους, δηλαδή είναι σε κατάσταση αερίου με κύριο χαρακτηριστικό την διαχυτικότητα και σε κατάσταση υγρού με χαρακτηριστικά όπως η ισχύς διάσπασης και η πυκνότητα. Η χημική ανακύκλωση έχει κύριο πλεονέκτημα τη χαμηλή απώλεια των αρχικών μηχανικών ιδιοτήτων των ενισχυτικών ινών που ανακτώνται (Beauson and Brøndsted, 2016; Kalkanis et al., 2019).

Ο Sokoli και η ομάδα του εφάρμοσαν τη διαδικασία της χημικής ανακύκλωσης και δοκίμασαν την ανακύκλωση του διαλύτη (ακετόνης) που χρησιμοποιήθηκε, με σκοπό τη μείωση του κόστους της διαδικασίας. Παρατηρήθηκε ότι ήταν δυνατή η χρήση του ίδιου διαλύτη για οκτώ (8) συνεχόμενες (διαφορετικές παρτίδες υλικού προς ανακύκλωση) και παρατηρήθηκε επίσης ότι κάθε φορά που ο διαλύτης χρησιμοποιούταν ξανά, η ρητίνη αποδομούταν ακόμα καλύτερα. Αυτό οδήγησε σε μείωση της κατανάλωσης του διαλύτη κατά 88%, με αποτέλεσμα την οικονομική και περιβαλλοντική βελτίωση της χημικής ανακύκλωσης (Sokoli et al., 2017).

Από την άλλη οι σφιχτά συνδεδεμένες μορφές του πλέγματος αποτελούν εμπόδιο για την διάχυση των μορίων του διαλύτη και, ως εκ τούτου, δυσχεραίνουν τη χημική ανακύκλωση. Εξαιτίας αυτής της κατάστασης ο Wang και η ερευνητική του ομάδα προέβησαν σε μια προεπεξεργασία χρησιμοποιώντας ένα διαλύτη (οξικό οξύ/υπεροξειδίο του υδρογόνου), προκειμένου να μειώσουν το χρόνο αντίδρασης μέσω της ενίσχυσης της διάχυσης του διαλύτη στην πολύπλοκη δομή του υλικού. Επιπλέον, ο χρόνος επεξεργασίας εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος, με αποτέλεσμα ένα δείγμα που έχει αλεστεί να απαιτεί λιγότερο χρόνο σε σύγκριση με μεγαλύτερα κομμάτια (Wang et al., 2015; Y. Ma et al., 2017; Y. Ma & Nutt, 2018).

Ανακύκλωση με μηχανική λείανση

Η μηχανική λείανση των σύνθετων υλικών αποτελεί μια διαδικασία κατά την οποία τα υλικά αυτά υπόκεινται σε συνεχή κατεργασία, με αποτέλεσμα να μειώνεται διαδοχικά ο όγκος τους σε επίπεδα μερικών εκατοστών. Τα υλικά αυτά στη συνέχεια γίνεται να χρησιμοποιηθούν για πληθώρα εφαρμογές, όπως για

την ενίσχυση σκυροδέματος ή ως πληρωτικά υλικά σε ρητίνες, ανακυκλωμένα ελαστικά, πλαστικά προϊόντα ξύλου, ασφαλτο και θερμομονωτικά πάνελ. Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν λαμβάνονται υπόψη οι αρχικές μηχανικές ιδιότητες των συνθετικών υλικών, με αποτέλεσμα τα υλικά που παράγονται να έχουν χαμηλότερη ποιότητα και αξία και να παρουσιάζουν μειωμένες ιδιότητες (Beauson and Brøndsted, 2016).

Σολβόλυση (Solvolysis)

Η σολβόλυση είναι μια χημική διαδικασία που χρησιμοποιεί διαλύτες για να διασπάσει τους δεσμούς σε ένα υλικό, υπό ορισμένη πίεση και θερμοκρασία. Αυτή η διαδικασία προσφέρει ευελιξία λόγω της ποικιλίας των διαλυτών (όπως το νερό, οι αλκοόλες και τα οξέα) καθώς και των θερμοκρασιών και των πιέσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Συνήθως απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, που μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλη κατανάλωση ενέργειας σε βιομηχανική κλίμακα. Επιπλέον, αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες των ανακτηθέντων ινών. Μέχρι στιγμής, μόνο οι ίνες άνθρακα μπορούν να ανακυκλωθούν με αυτήν τη διαδικασία. Σε αντίθεση με τη μηχανική επεξεργασία, η επεξεργασία των ινών εμφανίζει υψηλότερη ποιότητα, καθώς οι ίνες παρουσιάζουν αυξημένη καθαρότητα και μεγαλύτερο μήκος. Ωστόσο, παρόλο που οι ίνες είναι μακριές συγκριτικά με τη μηχανική επεξεργασία δεν σημαίνει πως δεν είναι κοντές για την επαναχρησιμοποίησή τους σε κάποιες εφαρμογές (Chen et al., 2019; Cunliffe & Williams, 2003).

Σολβόλυση σε κρίσιμες πιέσεις και θερμοκρασίες

Για να επιτευχθεί η σολβόλυση με αυτές τις συνθήκες (δηλαδή θερμοκρασία κάτω από 100 °C και/ή πίεση κάτω από 1 bar), χρησιμοποιούνται αντιδραστικοί διαλύτες όπως νιτρικό οξύ, αμμωνία ή γλυκόλη, προκειμένου να προκαλέσουν τη χημική αποσύνθεση του πολυμερούς υλικού. Αποτέλεσμα αυτής της χημικής διαδικασίας είναι η απόκτηση καθαρών ινών χωρίς ρητίνη, ένα ανόργανο υπόλοιπο και το οργανικό υλικό αποσύνθεσης, το οποίο εξαρτάται από τον ειδικό διαλύτη (όπως οι δεσμοί που προκύπτουν από αντιδράσεις με τα μονομερή της ρητίνης) (J. P. Jensen & Skelton, 2018).

Σολβόλυση σε σχεδόν κρίσιμες πιέσεις και θερμοκρασίες

Όταν η θερμοκρασία και η πίεση φτάνουν σε κρίσιμα επίπεδα, οι ιδιότητες των διαλυτών μεταβάλλονται, προκαλώντας βελτιωμένη δυνατότητα διάλυσης και, ως εκ τούτου, καλύτερη αποσύνθεση των ινοειδών ενισχυμένων πλαστικών (GFRP). Σε θερμοκρασία και πίεση αμέσως πάνω από το κρίσιμο σημείο, το ρευστό βρίσκεται σε μια υπερκρίσιμη κατάσταση, εκφράζοντας συγχρόνως χαρακτηριστικά πυκνότητας, διαλυτότητας και διάχυσης όπως σε υγρό μέσο, καθώς και ιξώδες όπως σε αέριο. Κοντά στις κρίσιμες συνθήκες, οι διαλύτες όπως το νερό ή η αιθανόλη είναι οι πιο συνηθισμένοι. Η κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση εξαρτώνται από το συγκεκριμένο διαλύτη. Αυτή η κατάσταση οδηγεί σε μη επιθυμητές χημικές αντιδράσεις μεταξύ των ινών γυαλιού και του νερού λόγω της υψηλής τους κρίσιμης θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής τους. Ωστόσο, με τη χρήση οργανικών διαλυτών όπως αλκοόλες και ακετόνη, οι ανακτώμενες ίνες γυαλιού παρουσιάζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Αυτό συμβαίνει επειδή οι οργανικοί διαλύτες έχουν χαμηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση από το νερό, επιτρέποντας την αύξηση της διάχυσής τους στο σύνθετο υλικό λόγω της αλλαγής της υδροφοβικότητας των υπό-υπερκρίσιμων υγρών. Όμως για να επιτευχθεί η υπερκρίσιμη κατάσταση είναι αναγκαίες πιο αυστηρές απαιτήσεις και η πλειοψηφία των υπερκρίσιμων ρευστών απαιτεί υψηλή: πίεση, θερμοκρασία, ποιότητα για τον εξοπλισμό αντίδρασης καθώς και υψηλό κόστος και χαμηλό συντελεστή ασφαλείας. Η διαδικασία αυτή βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο (J. P. Jensen & Skelton, 2018; Karuppannan Gopalraj & Kärki, 2020; Piñero-Hernanz et al., 2008; Sokoli et al., 2017; Yang et al., 2014; Cunliffe & Williams, 2003).

Υδρόλυση

Ο Oliveux και η ομάδα του εφάρμοσαν τη διαδικασία της υδρόλυσης για την ανακύκλωση σύνθετων υλικών που περιέχουν ίνες γυαλιού. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων τους, παρατηρήθηκε ότι η θερμοκρασία είναι ο κυρίαρχος παράγοντας για τη μείωση της αντοχής των ινών, και όχι ο χρόνος που αναμένουν στη διαδικασία. Αυτό αποδείχθηκε όταν μια επεξεργασία διάρκειας δύο ωρών στους 275°C οδήγησε σε μείωση της αντοχής κατά 35%, ενώ μόλις πέντε λεπτά στους 350°C προκάλεσαν μείωση της αντοχής κατά 65%.

Επιπλέον, οι ανακτηθείσες ίνες απομονώθηκαν πλήρως από τη ρητίνη, όμως ήταν μολυσμένες με υπολειμματική οργανική ουσία. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό, δοκιμάστηκε μια δεύτερη υδρόλυση για τον καθαρισμό των ινών, αλλά δεν ήταν αποτελεσματική. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απαιτείται ψύξη του συστήματος, κάτι που αυξάνει το κόστος της διαδικασίας (Oliveux et al., 2012).

Θερμόλυση ή Θερμική διάσπαση

Κατά αυτό τον τρόπο, τα πολυμερή υλικά υποβάλλονται σε υψηλές θερμοκρασίες υπό ελεγχόμενη ατμόσφαιρα, όπως ατμός αζώτου, απουσία οξυγόνου ή άλλων αερίων. Η θερμική διάσπαση περιλαμβάνει διάφορες διεργασίες, όπως η θερμική αποσύνθεση, η καταλυτική αποσύνθεση και η υδρογόνωση. Κατά τη θερμική αποσύνθεση, τα πλαστικά απόβλητα υπόκεινται σε υψηλές θερμοκρασίες (300-900 °C) και απουσία οξυγόνου, ενώ στην καταλυτική αποσύνθεση χρησιμοποιούνται καταλύτες για να επιταχύνουν τη διαδικασία. Κατά τη θερμική αποσύνθεση, τα πλαστικά απόβλητα μετατρέπονται σε υγρά προϊόντα (γνωστά ως πυρολυτικό έλαιο), αέρια και στερεά υπολείμματα (Sahin and Kirim, 2018; Vinu et al., 2016; Miandad et al., 2016).

Αεριοποίηση

Η διαδικασία αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως τμηματική οξείδωση ή έμμεση καύση, και συμβαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες, φτάνοντας έως και τους 1600°C. Κατά την διαδικασία αυτή, χρησιμοποιείται οξυγόνο ή αέρας, και τα κύρια προϊόντα που προκύπτουν είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το υδρογόνο (H₂), τα οποία συνθέτουν το αέριο σύνθεσης (synthesis gas ή αλλιώς "syngas"). Το αέριο σύνθεσης που παράγεται κατά την αεριοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση κινητήρων ή μπορεί να μετατραπεί σε καύσιμα, όπως υδρογονάνθρακες, μέσω της διεργασίας Fischer-Tropsch. Ωστόσο, επειδή συχνά είναι επιθυμητή η παραγωγή υγρών προϊόντων ή πετροχημικών ενώσεων, συνήθως προτιμάται η πυρόλυση αντί της αεριοποίησης. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την αεριοποίηση απαιτούνται επιπλέον στάδια για να

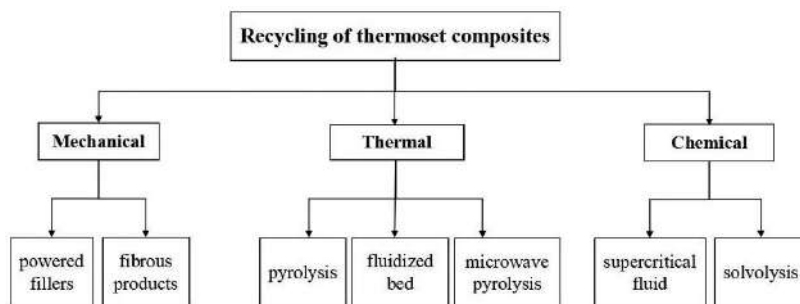
παραχθούν υγρά προϊόντα ή πετροχημικά ενώσεις (Sahin and Kirim, 2018; Sasse and Emig, 1998; Vinu et al., 2016).

Υδρογόνωση

Η διαδικασία της θέρμανσης λαμβάνει χώρα σε μια ατμόσφαιρα αποτελούμενη από υδρογόνο, με υψηλή πίεση περίπου 100 ατμόσφαιρες, και σε πιο χαμηλές θερμοκρασίες ανάμεσα στους 150 - 400 °C. Ωστόσο, όταν τα πολυμερή υλικά περιέχουν ετεροάτομα όπως χλώριο ή άζωτο, απαιτείται ειδική προσοχή. Κατά την διαδικασία της υδρογόνωσης, αυτά τα ετεροάτομα μπορεί να προκαλέσουν την δημιουργία υδροχλωρικού οξέος (HCl) και αμμωνίας (NH₃) (Sasse and Emig, 1998).

Συχνά, η πυρόλυση είναι η βέλτιστη επιλογή ανάμεσα στις παραπάνω μεθόδους, αφού επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων προϊόντων και ενέργειας από τα απορρίμματα πλαστικών. Μόλις το 10% της ενεργειακής περιεκτικότητας των πλαστικών απορριμμάτων χρησιμοποιείται κατάλληλα κατά τη μετατροπή τους σε πολύτιμα προϊόντα. Η κατανομή των προϊόντων που προκύπτουν από την πυρόλυση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία πυρόλυσης, ο ρυθμός θέρμανσης, ο χρόνος παραμονής, ο τύπος αντιδραστήρα, η παρουσία ή έλλειψη καταλυτών, και άλλοι. Από αυτούς τους παράγοντες, η θερμοκρασία πυρόλυσης έχει την κύρια επίδραση στην κατανομή των προϊόντων. Υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 500 °C) προάγουν την παραγωγή αερίων και στερεών υπολειμμάτων, ενώ χαμηλότερες θερμοκρασίες (300-500 °C) ευνοούν την παραγωγή υγρού υπολειμμάτων. (Brebu et al., 2004; Nnorom and Osibanjo, 2008; Liu et al., 2016; Yang et al., 2013; Anuar Sharuddin et al., 2016).

Πίνακας 2: Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση σύνθετων υλικών για πτερύγια ανεμογεννητριών (Sage Journals 2019)





Εικόνα 14: Η διαδικασία προετοιμασίας των απορριμμάτων ινών γυαλιού (MDPI 2022)

Ανακύκλωση ρευστοποιημένης κλίνης

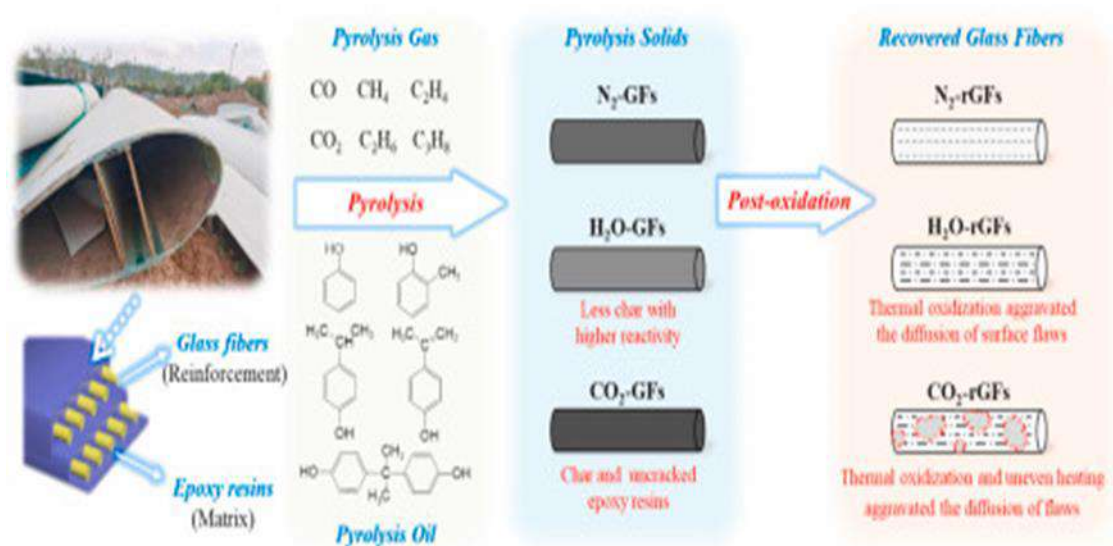
Η ανακύκλωση ρευστοποιημένης κλίνης χρησιμοποιείται για να γίνει καύση της μήτρας της ρητίνης με στόχο την ανάκτηση των ενισχυτικών ινών των σύνθετων υλικών. Μέσω αυτής της διαδικασίας γίνεται διάσπαση του συνθετικού υλικού σε σφαιρίδια μικρού μεγέθους (2-3 cm) και έπειτα τοποθετείται μέσα στον αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης, με θερμοκρασία λειτουργίας του 450-550 °C αναλόγος με το συνθετικό υλικό που ανακυκλώνεται. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι πως γίνεται μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων ινών κατά δύο με τρεις φορές συγκριτικά με τις ίνες από “καθαρή” πρώτη ύλη. Τέλος έχει γίνει υπολογισμός για την βιωσιμότητα μίας μονάδας ανακύκλωσης ρευστοποιημένης κλίνης για σύνθετα υλικά τα οποία περιέχουν ίνες γυαλιού, είναι αναγκαίο να έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας μεγαλύτερης των 10.000.000 κιλών ετησίως. Το όριο αυτό μπορεί να μειωθεί όταν γίνεται ανακύκλωση σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς στην αξία του προϊόντος (Beauson and Brøndsted, 2016; Kalkanis et al., 2019).

Ανακύκλωση με παλμούς υψηλής τάσης

Η διαδικασία κατακερματισμού σύνθετων υλικών με ίνες γυαλιού με τη χρήση παλμών υψηλής τάσης είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των μητρικών υλικών από τις ίνες με τη χρήση ηλεκτρισμού. Σε αυτήν τη μέθοδο, μηχανήματα παράγουν ηλεκτρικούς παλμούς υψηλής τάσης σε ένα διηλεκτρικό υγρό, συνήθως νερό, με πολύ υψηλή συχνότητα. Παρόλο που η μέθοδος αυτή έχει τα μειονεκτήματά της, όπως τη δυσκολία ανάκτησης ινών μεγάλου μήκους και τις υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια για να διασφαλιστεί η υψηλή ποιότητα των ανακτηθέντων ινών, η ποιότητα των ινών που ανακτώνται είναι υψηλότερη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους ανακύκλωσης, ενώ οι ίνες είναι μεγαλύτερου μήκους και πιο αγνές (WindEurope, 2020).

Ανακύκλωση με πυρόλυση

Σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 300-1000 °C, ανάλογα με τη μέθοδο θέρμανσης και τυχόν εμπλεκόμενους καταλύτες, η αποσύνθεση των οργανικών μορίων λαμβάνει χώρα σε μια ατμόσφαιρα χωρίς οξυγόνο, αλλιώς γνωστή ως πυρόλυση. Κατά τη διάρκεια αυτής της αποσύνθεσης, παραμένει ένα στερεό υπόλειμμα, ενώ το πολυμερές υλικό μετατρέπεται μέσω της διάσπασης του σε προϊόν άνθρακα, αέριο και λάδι. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου, η ανάκτηση ινών επιτυγχάνεται, αν και η θερμοκρασία θα επηρεάσει την ποιότητα της ίνας. Λόγω του αυξημένου κόστους του προϊόντος, η οικονομική βιωσιμότητα της ανακύκλωσης πυρόλυσης σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα ξεπερνά αυτή των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού. Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα χρήσης όλων των υποπροϊόντων. (Kalkanis et al., 2019).



Εικόνα 15: Παράγωγα της παρόλωσης και οι χημικοί τους τύποι (ScienceDirect 2023)

3.7 Αποτέφρωση

Η αποτέφρωση των υλικών των πτερυγίων είναι η δεύτερη χειρότερη λύση διαχείρισής τους αφού φτάσουν στο τέλος της ζωής τους μετά την απόθεση τους, καθώς η διαδικασία αυτή έχει σημαντικά μειονεκτήματα σε σχέση με τις παραπάνω. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών, τα οποία αποτελούνται από σύνθετα υλικά και κυρίως ίνες γυαλιού (σε ποσοστό άνω του 70%), δυσχεραίνουν την διαδικασία αποτέφρωσης, καθώς δεν είναι εύφλεκτες (Beauson, J. and Brøndsted, P. 2016). Επιπλέον, η θερμογόνο δύναμη των πτερυγίων είναι σχετικά χαμηλή (μόλις 11.000-14.000 KJ/kg) σε σύγκριση με άλλες πηγές θερμότητας (Rahnama, B. 2011). Η αποτέφρωση των συνθετικών υλικών παράγει μεγάλες ποσότητες στάχτης, η οποία πρέπει να απορριφθεί σε έναν ειδικά διαμορφωμένο χώρο απόθεσης ή να χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές (Andersen, 2015).

3.8 Απόθεση

Τέλος η χειρότερη κατάληξη των πτερυγίων είναι να παροπλιστούν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Σε κάποιες περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η χρήση των πτερυγίων μετά το πέρας της ζωής των ανεμογεννητριών στις οποίες ήταν σύμφωνα με τους προαναφερθέντες τρόπους, τα πτερύγια τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία. Αυτή τη στιγμή, τα πτερύγια των

ανεμογεννητριών καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ), με το κόστος της απόθεσης να διαφέρει ανάλογα με τη χώρα. Ορισμένες χώρες, όπως η Γερμανία, η Ολλανδία και η Φινλανδία, έχουν επιβάλει αυστηρότερους νόμους για τη διάθεση αυτών των αποβλήτων, που σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνουν μέχρι την απαγόρευση της υγειονομικής ταφής και της αποτέφρωσης πολύπλοκων υλικών, ενώ σε άλλες χώρες αυξάνουν συνεχώς τα τέλη ταφής ή απόθεσης, για να καταστεί αυτή η λύση οικονομικά ανώφελη (Rentizelas et al., 2021).

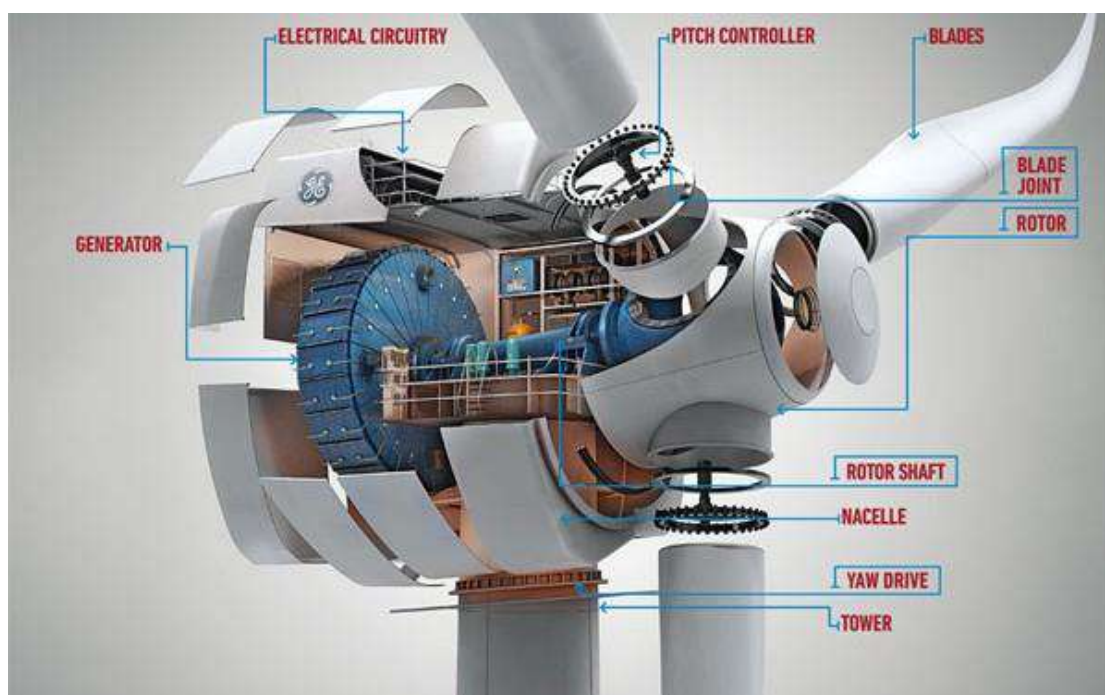
3.9 Τεχνολογίες ανακύκλωσης υπόλοιπων μερών ανεμογεννητριών

3.9.1 Εισαγωγή

Μετά την λήξη της ζωής μιας Α/Γ, οι κύριοι πόροι που πρέπει να διαχειριστούμε είναι το σκυρόδεμα της θεμελίωσης και τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της, όπως χάλυβα, χαλκός, και αλουμίνιο, καθώς και επίσης τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια της Α/Γ.

Αν μια Α/Γ φτάσει στο τέλος της ζωής της και η επισκευή της δεν είναι οικονομικά εφικτή, τότε πρέπει να αποσυναρμολογηθεί. Η διαδικασία αυτή ακολουθεί την ίδια δομή με τη διαδικασία κατασκευής της Α/Γ, αλλά σε αντίστροφη σειρά. Αρχικά, αφαιρούνται από τον ρότορα τα λιπαντικά του έλαια και οι επικίνδυνες ουσίες οι οποίες μπορεί να είναι επιβλαβές για το περιβάλλον. Έπειτα, αφαιρούνται τα καλώδια και αποσυνδέεται η γεννήτρια της Α/Γ. Στην συνέχεια, αφαιρούνται τα πτερύγια, ο διακλαδωτής, η άτρακτος και τέλος ο πύργος. Η αποσυναρμολόγηση με αυτόν τον τρόπο βοηθά στην εξαγωγή και την ανακύκλωση των υλικών της Α/Γ. Στη συνέχεια, τα κομμάτια της ανεμογεννήτριας μεταφέρονται σε διαφορετικούς χώρους ανακύκλωσής ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους. Η διαδικασία ανακύκλωσης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι παρόμοια με αυτή που αναφέρθηκε προηγουμένως, με την διαφορά ότι τα κομμάτια που απομακρύνονται πρέπει να μεταφερθούν στην στεριά. Τα κομμάτια της θεμελίωσης παραμένουν στον πυθμένα της θάλασσας ενώ τα καλώδια

απομακρύνονται από εκεί όπου ήταν θαμμένα. Γίνεται έρευνα για να βρεθούν εναλλακτικές μέθοδοι απομάκρυνσης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, η οποία είναι πιο δαπανηρή από τις χερσαίες Α/Γ. Μια μέθοδος που προτείνεται είναι η κοπή της ανεμογεννήτριας από τον πύργο και η μεταφορά στην ξηρά. Παρόλα αυτά η χρήση αυτής της μεθόδου προκαλεί ανησυχίες ασφάλειας και μπορεί να προκαλέσει ζημία στην κατάσταση της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 16: Τομή ανεμογεννήτριας (repository.library.teiwest.gr)

3.9.2 Σκυρόδεμα

Για το σκυρόδεμα της θεμελίωσης, μπορούμε να εξετάσουμε τη δυνατότητα ανακύκλωσης του υλικού αυτού, είτε μέσω επαναχρησιμοποίησης του σκυροδέματος για νέες κατασκευές είτε μέσω επεξεργασίας του υλικού για την παραγωγή άλλων υλικών.

Κατά την διαδικασία απόσυρσης μια ανεμογεννήτριας, το σκυρόδεμα αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής μάζας υλικών και χρειάζεται να διαχειριστούμε, καθώς αποτελεί περίπου το 75%. Υπάρχουν πολλές τεχνικές διαχείρισης, ωστόσο οι πιο κοινές και πιο εξελιγμένες είναι η απόρριψη σε χώρο υγειονομικής ταφής, η πλήρης ανακύκλωση και η ανακύκλωση μετά από

επεξεργασία σε χαλίκια που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν. Είναι σημαντικό να επιλέξουμε μια μέθοδο διαχείρισης που να είναι περιβαλλοντικά βιώσιμη και ταυτόχρονα οικονομικά αποδοτική.

Παραγωγή τσιμέντου από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα.

Στην πλήρη ανακύκλωση του σκυροδέματος, όλα τα απόβλητα αυτού του υλικού θα ανακυκλωθούν κατά τη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μείωση της εκπομπής CO_2 κατά την παραγωγή τσιμέντου, λόγω της παρουσίας μη ανθρακικού CaO από το τσιμέντο. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί πλήρως ανακυκλωμένο σκυρόδεμα ως πρώτη ύλη, αντί για παραδοσιακό ακατέργαστο τσιμέντο, αναμένεται μικρότερη εκπομπή CO_2 . Στο στάδιο της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου με πλήρως ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, παρατηρείται απώλεια βάρους περίπου 30%, και αυτή η απώλεια συνδέεται με την εκπομπή CO_2 . Στην πράξη, μέρος της πρώτης ύλης θα είναι ανθρακούχο, οπότε οι εκπομπές CO_2 θα είναι χαμηλότερες από την παραδοσιακή διαδικασία παραγωγής τσιμέντου κατά περίπου 15%. (De Schepper et al., 2014)

Ανακύκλωση σκυροδέματος και επαναχρησιμοποίηση ως αδρανές υλικό.

Αφού αφαιρεθεί το σκυρόδεμα από την θεμελίωση, συλλέγεται και δέχεται μηχανικό τεμαχισμό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ανακυκλωμένου σκυροδέματος, το οποίο έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σαν δομικό υλικό σε άλλες κατασκευές. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην δημιουργία χαλικιών δρόμου, επενδύσεων, τοίχων αντιστήριξης και χαλικιών εξωραϊσμού. Το σκυρόδεμα είναι ένα από τα πιο γνωστά υλικά παγκοσμίως με μεγάλη ζήτηση και χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες. Σύμφωνα με την έκθεση του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας του 2009, περίπου 25 δισεκατομμύρια τόνοι σκυροδέματος χρησιμοποιούνται κάθε χρόνο σε όλο το κόσμο, αντιστοιχώντας σε περίπου 3,8 τόνους ανά άτομο ετησίως. Ωστόσο, η κατεδάφιση για την δημιουργία χώρου για νέες κατασκευές δημιουργεί μεγάλους όγκους απορριμμάτων, με τα απόβλητα σκυροδέματος να ανέρχεται στο 50% της συνολικής παραγωγής απορριμμάτων κατασκευών και κατεδαφίσεων. (McNeil and Kang, 2013)

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους παράγονται τεράστιες ποσότητες απορριμμάτων σκυροδέματος. Παρακάτω αναφέρονται οι πιο συνηθισμένοι λόγοι.

1. Υπερβολική παραγγελία
2. Ζημιά κατά την μεταφορά
3. Απώλεια κατά την εγκατάσταση
4. Κακή κατασκευή
5. Αλλαγή σχεδίου

Ο συνηθέστερος τρόπος απόρριψης αυτών των απορριμμάτων είναι η ρίψη τους σε χώρο υγειονομικής ταφής, με αποτέλεσμα να μολυνθεί ο αέρας και το νερό λόγω του αλκαλικού χαρακτήρα τους.

Διαδικασία σύνθλιψης

Η ανακύκλωση των κατεδαφιζόμενων κτιρίων μπορεί να περιλαμβάνει δύο διαφορετικές διαδικασίες :



Εικόνα 17: Ανακυκλωμένο υλικό (bellona.org 2022)

1. **Στην επαναχρησιμοποίηση** τα διάφορα τμήματα του κτιρίου συλλέγονται και μεταφέρονται για να ξαναχρησιμοποιηθούν όπως πλάκες ή τούβλα και μπορούν να διαμορφωθούν με χρήση μιας σμίλης.

2. **Η θλίψη** περιλαμβάνει την αφαίρεση σκουπιδιών, ξύλου, το χαρτί τα μέταλλα και ο σπλισμός αφαιρούνται , στην συνέχεια ταξινομούνται και έπειτα ανακυκλώνονται ξεχωριστά. Η συνολική μάζα συνθλίβεται και επεξεργάζεται με διάφορους μεθόδους, όπως με μηχανή σύνθλιψης, συλλογή με το χέρι και με επίπλευση νερού, για να αφαιρεθούν άλλα σωματίδια.



Εικόνα 17: Σύνθλιψη σκυροδέματος (egolys.gr)

Με την χρήση φορητών θραυσμάτων στο εργοτάξιο, μπορεί να πραγματοποιηθεί η συντριβή του σκυροδέματος και της ασφάλτου με μεγάλη απόδοση, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο λιγότερο ρυπογόνο αποτύπωμα και οικονομικότερη λύση σε σύγκριση με την μεταφορά υλικών προς ένα λατομείο. Η εξοικονόμηση κόστους επιτυγχάνεται διότι αποφεύγεται η μεταφορά των υλικών σε άλλο σημείο, ενώ τα μεγάλα φορητά σημεία έχουν την δυνατότητα να παράγουν έως και 600 τόνους την ώρα.

Αυτά τα συστήματα συνήθως αποτελούνται από:

1. πλευρικούς μεταφορείς εκκένωσης
2. εγκαταστάσεις κοσκίνισης

3. μεταφορείς επιστροφής προς τον θραυστήρα

Αυτά τα συστήματα μας δίνουν την δυνατότητα να γίνει η επαναχρησιμοποίηση μεγάλων κομματιών υλικού μετά από συντριβή.



Εικόνα 18: Εργοστάσιο σύνθλιψης και παραγωγής (machineryline.info 2023)

Χρήσεις σκυροδέματος

Τα μεγάλα κομμάτια του σκυροδέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οικοδομικές πέτρες για τοίχους, ως πλάκες σε πεζοδρόμια και ως επένδυση για την προστασία των όχθων των ρεμάτων από την διάβρωση. Τα μικρότερα κομμάτια χρησιμοποιούνται ως χαλίκια για την κατασκευή δρόμων, ενώ το θρυμματισμένο σκυρόδεμα έχει την δυνατότητα να αποτελέσει την πρώτη ύλη για την κατασκευή νέου σκυροδέματος. Τέλος, τα συρματοπλέγματα μπορούν να γεμιστούν με θρυμματισμένο σκυρόδεμα και να χρησιμοποιηθούν ως τοίχοι αντιστήριξης.

Απόθεση σκυροδέματος σε χώρους υγειονομικής ταφής

Για πολλές δεκαετίες, η κύρια πρακτική για τη διάθεση του χρησιμοποιημένου σκυροδέματος ήταν η απόρριψή του σε ειδικούς χώρους υγειονομικής ταφής. Ωστόσο, λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνεπάγεται η ταφή, καθώς και της γρήγορης αύξησης του όγκου των δομικών υλικών που πρέπει να διαχειριστούμε ως απόβλητα, η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση έχουν γίνει προτιμότερες πρακτικές.

Οι χώροι απόθεσης αποβλήτων διαμορφώνονται έτσι ώστε τα τοξικά, οργανικά και άλλα απόβλητα να μην εκπέμπονται στο περιβάλλον ή στο υπόγειο νερό των κατοικημένων περιοχών κοντά σε αυτούς. Για να επιτευχθεί αυτό, τα απορρίμματα θα στεγανοποιηθούν με τσιμέντο, χώμα, πλαστικές μεμβράνες, και άλλα υλικά. Η απόθεση των απορριμμάτων μπορεί να διαρκέσει το πολύ 30 έτη. Έπειτα από αυτή την παρέλευση αυτού του χρονικού διαστήματος προβλέπεται το κλείσιμο των χώρων απόθεσης. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει στόχο να ανακτά το 70% των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων. Πολλές χώρες της Ε.Ε. επιβάλλουν υψηλά τέλη στην απόρριψη του χρησιμοποιημένου σκυροδέματος, προκειμένου να καταστήσουν την ανακύκλωση οικονομικά ανταγωνιστική.



Εικόνα 19: Χώρος υγειονομικής ταφής (capital.gr 2021)

3.9.3 Μέταλλα

Μέθοδοι ανακύκλωσης μπορούν να μετατρέψουν τα υπολείμματα που προκύπτουν από την επεξεργασία μετάλλων στην βιομηχανία, τα παλιά αυτοκίνητα και άλλα μεταλλικά εξαρτήματα από έχουν φθαρεί.

Τα μέταλλα είναι στοιχεία που εμφανίζουν κοινές ιδιότητες. Είναι συγκολλητά, ελαστικά, εύπλαστα και ελατά με υψηλές μηχανικές αντοχές. Τα υλικά τα οποία αποτελούν ενώσεις διαφόρων μετάλλων ονομάζονται κράματα. Κράματα είναι τα μεταλλικά υλικά που αποτελούνται από συνδυασμούς διαφορετικών μετάλλων. Διακρίνονται σε σιδηρούχα και μη σιδηρούχα. Τα κράματα σιδήρου περιλαμβάνουν το σίδηρο ως βασικό συστατικό σε συνδυασμό με άλλα μέταλλα (π.χ., μαγγάνιο, χαλκός, νικέλιο, βρώμιο) ή με αμέταλλα όπως (π.χ., άνθρακας, πυρίτιο, φώσφορος, θείο). Μέταλλα όπως το αργίλιο, ο χαλκός, ο μόλυβδος, ο ψευδάργυρος περιλαμβάνονται στα μη σιδηρούχα κράματα.

Η εκτίμηση της αποθεματικής βάσης του βωξίτη σήμερα είναι ότι έχει αποθέσεις για 180 – 200 χρόνια, ενώ άλλα μέταλλα όπως ο κασσίτερος και ο χαλκός έχουν αποθέματα για 40 – 60 χρόνια. Η προστασία των αποθεμάτων, η εξοικονόμηση ενέργειας και ο περιορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της πρωτογενούς παραγωγής απαιτούν την ανακύκλωση των μετάλλων. Ορισμένα

μέταλλα, όπως ο χαλκός και ο χρυσός μπορούν να ανακυκλωθούν πλήρως αλλά κατά την ανακύκλωση κραμάτων υπάρχουν απώλειες.

Για την διατήρηση των πόρων του πλανήτη μας, είναι ζωτικής σημασίας η ανακύκλωση του σιδηρού από τα απορρίμματα. Η δημιουργία ενός ολόκληρου βιομηχανικού κλάδου για την συλλογή, ταξινόμηση και επεξεργασία των παλιών σιδήρων οδήγησε στην δημιουργία του κλάδου σκραπ. Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται από την χαλυβουργία και τα χυτήρια για την παραγωγή νέων προϊόντων είναι το σκραπ. Όλες οι διαδικασίες συλλογής και επεξεργασίας των υλικών του σκραπ περιλαμβάνονται στην ανακύκλωση προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά στην παραγωγή νέων προϊόντων. Ορισμένα υλικά χρησιμοποιούνται επαναλαμβανόμενα για τον ίδιο σκοπό ενώ άλλα μετατρέπονται σε εντελώς διαφορετικά προϊόντα.

Η ανακύκλωση του σιδήρου είναι πια αναγκαίο κομμάτι για την σύγχρονη χαλυβουργία καθώς αυξάνει την οικονομική βιωσιμότητα και μειώνει την περιβαλλοντική ρύπανση. Η χρήση ανακυκλωμένου σιδήρου συμβάλλει στην μείωση του βάρους και του όγκου των απορριμμάτων, δημιουργεί απόθεμα στον χώρο και βελτιώνει σημαντικά τη μείωση στις εκπομπές CO² σε σχέση με την εξόρυξη μετάλλων. Επιπλέον, δαπανάει 95% λιγότερη ενέργεια από την παραγωγή αλουμινίου από βωξίτη και προκαλεί 97% λιγότερη ρύπανση νερού και 95% λιγότερη ατμοσφαιρική ρύπανση.



Εικόνα 20: Ανακύκλωση σιδήρου (kitsametal.business.site 2017)

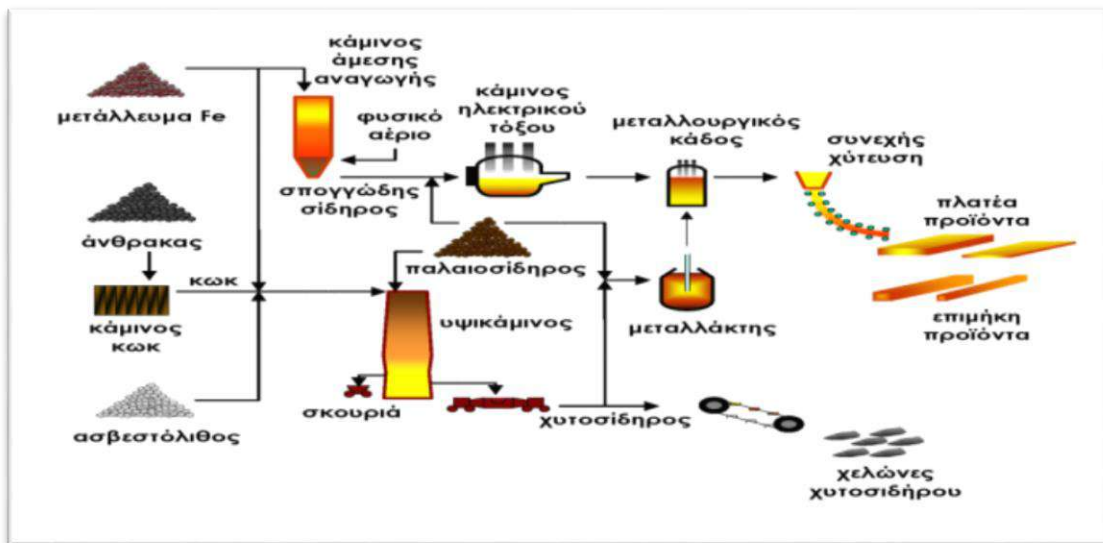
3.9.4 Χάλυβας

Στο κατασκευαστικό τομέα, ο χάλυβας θεωρείται ανεκτίμητος λόγω της ιδιαίτερα υψηλής αναλογίας φορτίου προς το βάρος. Η παραγωγή τμημάτων από χάλυβα οδηγεί σε μικρότερα, πιο ανθεκτικά και ποιοτικά τμήματα σε σχέση με αντίστοιχο τμήμα από ξύλο ή μπετόν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση λιγότερου χώρου και χρημάτων στην κατασκευή. Τα κτίρια από χάλυβα είναι πιο ανθεκτικά στους σεισμούς σε σχέση από αυτά από μπετόν και χρειάζονται λιγότερη δύναμη για την στήριξη τους.

Η παραγωγή του χάλυβα γίνεται με τρεις τρόπους.

- Χρήση υψηλής θερμοκρασίας για την μετατροπή των σιδηρομεταλλευμάτων σε χυτό σίδηρο, ο οποίος στην συνέχεια μετατρέπεται σε χάλυβα με την προσθήκη οξυγόνου.

- Άμεση αναγωγή των σιδηρομεταλλευμάτων σε σπογγώδη σίδηρο, ο οποίος στην συνέχεια μετατρέπεται σε χάλυβα μέσω μιας καμίνου ηλεκτρικού τόξου.
- Περιλαμβάνει την ανάπτυξη παλαιού σιδήρου σε μια κάμινο ηλεκτρικού τόξου.



Εικόνα 21: Διάγραμμα παραγωγικής διαδικασίας παραγωγής χάλυβα (el.m.wikipedia.org)

Στην Ελλάδα, η παραγωγή περίπου 2,5 εκατομμυρίων τόνων χάλυβα ετησίως γίνεται από την ανάκτηση παλαιοσιδήρου και καταλήγει κυρίως στην παραγωγή μπετόβεργας. Ο χάλυβας δεν είναι ένα μοναδικό προϊόν. Στις μέρες μας υπάρχουν περισσότερα από 3.500 διαφορετικά είδη χαλύβων, τα οποία διαθέτουν πολύ διαφορετικές φυσικές, χημικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες. Τα τελευταία 20 χρόνια δημιουργήθηκαν περίπου τα τρία τέταρτα των ειδών των χαλύβων. Οι σύγχρονοι χάλυβες είναι πολύ πιο ανθεκτικοί σε σύγκριση με τις παλαιότερες ποιότητες του χάλυβα.

Η διαδικασία της ανακύκλωσης έχει αρκετά οφέλη, καθώς αποτρέπει την υγειονομική ταφή και μειώνει την ανάγκη για εξόρυξη και παραγωγή πρώτων υλών. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η εκπομπή αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Ιδιαίτερα, η ανακύκλωση του σιδήρου συμβάλει στη διατήρηση

των ορυκτών πόρων του πλανήτη. Για παράδειγμα, μέσω της ανακύκλωσης 49 κιλών σιδήρου ή χάλυβα από κουτάκια αναψυκτικών, επιτυγχάνονται οι εξής εξοικονομήσεις: 144 κιλοβατώρες ηλεκτρικής ενέργειας, 20.630 κιλά γαιάνθρακα, 36.675 κιλά σιδήρου και 1.768 κιλά ασβεστόλιθου (Karavida, 2015). Επιπλέον, η ανακύκλωση του χάλυβα απαιτεί 75% λιγότερη ενέργεια σε σχέση με την παραγωγή χάλυβα από πρώτες ύλες, ενώ όλοι οι τύποι χάλυβα είναι 100% ανακυκλώσιμοι και μπορούν να ανακυκλωθούν επανειλημμένα. Πράγματι, ο χάλυβας αποτελεί το πιο ανακυκλώσιμο υλικό στον κόσμο.

Η ανακύκλωση του χάλυβα περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα.

1. Συλλογή

Η διαδικασία της συλλογής και της εμπορίας των παλαιών μετάλλων αποτελούν βασικά βήματα στην ανακύκλωσή τους. Στην διαδικασία αυτή, διαχωρίζονται τα υλικά που πρέπει να επεξεργαστούν και διασφαλίζεται η συνεχή τροφοδοσία των βιομηχανιών με πρώτες ύλες. Η συλλογή του σκραπ είναι το πρώτο βήμα στην ανακύκλωση του χάλυβα που στην συνέχεια μεταφέρεται σε μονάδες επεξεργασίας. Όταν γίνεται αυτό, τα απόβλητα συμπίεζονται προκειμένου να επιτευχθεί το μέγιστο επιτρεπόμενο ωφέλιμο φορτίο για την μεταφορά τους. Ελέγχεται η ραδιενεργότητα του φορτίου και αν ανιχνευθεί επεξεργάζεται ως επιβλαβές απόβλητο.

2. Διαχωρισμός και ταξινόμηση

Η διαδικασία της απομόνωσης του χάλυβα από τα υπόλοιπα απορρίμματα είναι αρκετά εύκολη, λόγω της μαγνητικής του ιδιότητας. Χάρη στην ιδιότητα των μαγνητών να προσελκύουν το χάλυβα, είναι δυνατό να χωριστεί εύκολα από υλικά που μπορούν να ανακυκλωθούν, όπως χαρτί και πλαστικό, χρησιμοποιώντας μαγνητικούς διαχωρισμούς. Στη συνέχεια το ασάλι μεταφέρεται σε μύλους και κόπτες που το τεμαχίζουν σε μικρά κομμάτια προτού προχωρήσουμε στο επόμενο στάδιο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως στα δοχεία χάλυβα με προστατευτικό στρώμα από κασσίτερο, απαιτείται αφαίρεση, έτσι ώστε να ανακυκλωθεί ξεχωριστά. Έπειτα, μετά τον διαχωρισμό των μετάλλων, ακολουθεί η ανακύκλωσή τους.

3. Ανακύκλωση

Όλα τα μέταλλα που έχουν περάσει από την αρχική διαδικασία διαχωρισμού πρέπει να υποβληθούν σε πλήρη διαχωρισμό. Σιδηρούχα μέταλλα όπως ο σίδηρος και ο χάλυβας μεταφέρονται σε εργοστάσια παραγωγής χάλυβα, όπου θα λειωθούν και θα δημιουργήσουν νέα προϊόντα από αυτά. Στα μη σιδηρούχα μέταλλα θα πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός τους και η αποστολή τους σε άλλες παραγωγικές μονάδες όπου θα γίνει η ανακύκλωσή τους και θα δημιουργηθούν νέα προϊόντα. Όσο τα μέταλλα διατηρούνται σε καθαρή μορφή, μπορούν να ανακυκλώνονται ξανά και ξανά και να δημιουργούν συνεχώς νέα προϊόντα.

Η ανεμογεννήτρια αποτελείται από τρία τμήματα που κατασκευάζονται από χάλυβα : τον πύργο, το κιβώτιο ταχυτήτων και σε ορισμένες περιπτώσεις την άτρακτο. Σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί να υπάρχει σε ποσοστό από 2% χαλκός και αλουμίνιο (Karavida, 2015). Οι δύο κύριοι τρόποι που αξιοποιούνται για την ανακύκλωση του χάλυβα είναι του καμίνου οξυγόνου και του κλίβανου ηλεκτρικού τόξου. Η διαδικασία ανακύκλωσης του χάλυβα είναι δύσκολη, καθώς υπάρχουν ποικίλες ποιότητες χάλυβα με πολλές ιδιότητες που καθιστούν δύσκολη την ταξινόμησή τους σε διαφορετικές κατηγορίες. Η μέθοδος του κλίβανου ηλεκτρικού τόξου μπορεί να απομακρύνει μερικά πρόσθετα στοιχεία κατά την διαδικασία της τήξης (European Commission, 2011). Παρόλα αυτά, η σύσταση του κράματος δεν είναι πάντα επιθυμητή για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται για συγκεκριμένες χρήσεις που απαιτούν λιγότερη καθαρότητα. Η μέθοδος της καμίνου οξυγόνου δεν μπορεί να αφαιρέσει τα ανεπιθύμητα στοιχεία με τον ίδιο τρόπο. Η αφαίρεση τους είναι δαπανηρή, για αυτό συνήθως προστίθεται σκραπ με χυτοσίδηρο για να μειωθεί η συγκέντρωσή τους και να βελτιωθεί η χημική σύσταση του τελικού προϊόντος (European Commission, 2011).

3.9.5 Ανοξειδωτος χάλυβας (ατσάλι)

Ο ανοξειδωτος χάλυβας (inox) αποτελείται από ένα κράμα σιδήρου, άνθρακα και χρωμίου, με το χρώμιο να έχει μια ελάχιστη περιεκτικότητα τουλάχιστον 10,5%. Το χρώμιο παράγει ένα λεπτό στρώμα τριοξειδίου χρωμίου (Cr₂O₃), το οποίο λειτουργεί ως προστατευτικό για το μεταλλικό υπόστρωμα του χάλυβα, προστατεύοντάς από τη διάβρωση και την οξείδωση. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες μπορεί επίσης να εμπεριέχουν άλλα κράματα όπως

νικέλιο, μολυβδαίνιο, μαγγάνιο και άλλα στοιχεία για να προσδώσουν επιπλέον ιδιότητες στο υλικό. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που έχουν απαίτηση στην αντοχή της διάβρωσης, για οικονομικούς και αισθητικούς λόγους. Συγκρίνοντάς τους με τους κοινούς χάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες έχουν υψηλότερη αντοχή στη διάβρωση και στη μηχανική, αλλά είναι πιο σκληροί και σχεδόν ακατέργαστοι.

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες ξεχωρίζονται ανάλογα με την κύρια δομή των κρυστάλλων τους σε τέσσερις κατηγορίες:

1. Διφασικούς ανοξείδωτους χάλυβες (duplex)
2. Φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες
3. Μαρτενσιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες
4. Ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά ειδικού χάλυβα – χάλυβα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΕΙΔΙΚΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ	ΧΑΛΥΒΑΣ
Σύνθεση	Σιδήρου, άνθρακα, χρωμίου και άλλα κράματα	Σιδήρου και άνθρακα
Περιεκτικότητα σε χρώμιο	Υψηλή, 10,5% κατά βάρος	Μηδαμινή περιεκτικότητα
Αντοχή στην διάβρωση	Πολύ υψηλή	Χαμηλή ή μέτρια
Μηχανική αντοχή	Υψηλή	Μέτρια
Σκληρότητα	Υψηλή	Χαμηλή έως μέτρια
Θερμική αγωγιμότητα	Χαμηλή	Υψηλή

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, το ατσάλι ήταν το κύριο υλικό που χρησιμοποιούνταν στην κατασκευή των ανεμογεννητριών. Αυτό οφειλόταν στην υψηλή αντοχή και στο σχετικά χαμηλό κόστος του ατσαλιού, καθώς και στην ικανότητα να αντέχει σε μεγάλους κύκλους φόρτισης. Ένα σημαντικό αναπόφευκτο μειονέκτημα των ανοξείδωτων χαλύβδινων υλικών είναι η δυσκολία που αντιμετωπίζεται στην παραμόρφωσή τους. Η διαδικασία της παραγωγής ελασμάτων ατσαλιού με πάχος 20mm σε περιστρεφόμενα πτερύγια, με την απαιτούμενη διατομή και μήκος, αποτελεί πρόκληση. Κατασκευές όπως ο αμερικανικός ρότορας MOD-2 και τα σουηδικά πτερύγια WTS-75 είναι παραδείγματα ανεμογεννητριών που κατασκευάστηκαν από ατσάλι, αντιμετωπίζοντας τις προκλήσεις της παραμόρφωσης (Ricardo Emanuel da Rocha Teixeira, 2014).

3.9.6 Χυτοσίδηρος

Ο χυτοσίδηρος είναι ένα μείγμα από σίδηρο και άλλα στοιχεία, όπως άνθρακα, πυρίτιο, μαγγάνιο, φώσφορο και θείο. Ως υλικό κατασκευής ο χυτοσίδηρος είναι αρκετά ανεκτικός στην συμπίεση, αλλά όχι στον εφελκυσμό με κάποιες εξαιρέσεις, δεν είναι υλικό όλκιμο και ελατό και δεν σφυρηλατείτε. Είναι εύτηκτο και μπορεί να κυλάει άνετα στα καλούπια, καθιστώντας το ιδανικό για τη χυτή κατασκευή. Συνήθως περιέχει 2,4% και 4,5% άνθρακα το οποίο βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του υλικού και μειώνει την θερμοκρασία τήξης. Ο χυτοσίδηρος με χαμηλή περιεκτικότητα άνθρακα ονομάζεται χαλυβδοειδής, γιατί οι ιδιότητές του είναι παρόμοιες με του χάλυβα.

Η ανεμογεννήτρια αποτελείται από πολλά μέρη, μεταξύ των οποίων οι άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, η γεννήτρια, το σύστημα περιστροφής, το κιβώτιο ταχυτήτων και ο διακλαδωτής, που είναι κατασκευασμένα από χυτοσίδηρο, το οποίο είναι ένα κράμα σιδήρου με περιεκτικότητα άνθρακα πάνω από 2%. Παρόλο που ο χυτοσίδηρος έχει χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης και είναι πιο εύθραυστος από τον χάλυβα, έχει ανοχή στη φθορά και την οξείδωση. Επιπλέον, ο χυτοσίδηρος μπορεί να ανακυκλωθεί πολλές φορές χωρίς να χάσει τα χαρακτηριστικά του.

3.9.7 Χαλκός

Στη σημερινή εποχή, η ανακύκλωση του χαλκού αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής προμήθειας πρώτης ύλης στις εγκαταστάσεις παραγωγής χαλκού. Οι πηγές υλικού για την ανακύκλωση του χαλκού είναι πολύ διαφορετικές μεταξύ τους και περιλαμβάνουν μια ευρεία γκάμα πρώτων υλών. Αυτές μπορούν να είναι από σκραπ χαλκού χαμηλής ποιότητας, που περιέχει μόνο μικρές ποσότητες χαλκού, μέχρι υλικό υψηλής ποιότητας ή καθαρό χαλκό, ο οποίος περιέχει σχεδόν 100% χαλκό. Παρά το γεγονός ότι τα ποσοστά ανακύκλωσης του χαλκού είναι υψηλά, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις που αντιμετωπίζονται στη διαδικασία. Μία από αυτές είναι η έλλειψη καθαρού και υψηλής ποιότητας σκραπ χαλκού, το οποίο είναι απαραίτητο για την αποτελεσματική ανακύκλωση. Επίσης, υπάρχει αύξηση στην ποσότητα προϊόντων που περιέχουν μείγμα υλικών με χαμηλές συγκεντρώσεις χαλκού, πράγμα που δυσχεραίνει τη διαδικασία ανακύκλωσης. (Samuelsson και Björkman, 2014)

Στις ανεμογεννήτριες, ο χαλκός χρησιμοποιείται κυρίως στα καλώδια, τα πηνία και σε μικρότερες ποσότητες στις γεννήτριες και τα κιβώτια ταχυτήτων. Ο χαλκός είναι ένα μαλακό, εύπλαστο και όλκιμο μέταλλο με εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η ανακύκλωση του χαλκού είναι εύκολη και μπορεί να επιτευχθεί με αποδοτικό τρόπο, επιτρέποντας την αξιοποίηση έως και του 90% της αρχικής τιμής του καθαρού χαλκού. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες σκραπ χαλκού, το παλιό σκραπ που προέρχεται από αντικείμενα όπως παλιές σωληνώσεις, βρύσες, ηλεκτρικά καλώδια κ.λπ., καθώς και τα υπολείμματα από τις βιομηχανίες που κατασκευάζουν προϊόντα από χαλκό.. Η διαδικασία ανακύκλωσης του χαλκού αποτελείται από δύο κύρια στάδια, ανάλογα με την ποιότητα του υλικού που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση του σκραπ υψηλής καθαρότητας, αυτό θερμαίνεται σε έναν κλίβανο ανόδου για να λιώσει και να καταλήξει σε πλίνθους. Στην περίπτωση του σκραπ χαμηλής καθαρότητας, πρώτα καθαρίζεται σε ένα λουτρό θειικού οξέος και στη συνέχεια λιώνει σε έναν κλίβανο τύπου Kaldor ή TSL (UNEP, 2013).

Ο χαλκός έχει τη δυνατότητα να ανακυκλώνεται ξανά και ξανά χωρίς να χάνει τις ιδιότητές του. Σε σύγκριση με την παραγωγή χαλκού από ορυκτά, η ανακύκλωση έχει πολλά πλεονεκτήματα:

1. Μειώνει την ελευθέρωση επικίνδυνων αερίων, σκόνης και άλλων επιβλαβών ουσιών
2. Εξοικονομεί περίπου 85% της απαιτούμενης ενέργειας
3. Εξοικονομεί περίπου το 75% των εκπομπών CO₂
4. Απαιτεί 3 φορές λιγότερη ενέργεια και 2,5 φορές λιγότερη θερμική ενέργεια

3.9.8 Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ, ασημί μέταλλο με μια χαρακτηριστική γυαλάδα. Έχει χαμηλή πυκνότητα και εξαιρετικά καλές ιδιότητες αντοχής. Μια από τις κύριες αιτίες για την δημιουργία του αλουμινίου είναι η υψηλή του αντοχή στη διάβρωση. Όταν εκτίθεται στον αέρα, το αλουμίνιο αντιδρά με το οξυγόνο για να δημιουργήσει μια λεπτή προστατευτική στρώση οξείδωσης. Αυτή η στρώση αποτρέπει την περαιτέρω διάβρωση του μετάλλου και το προστατεύει από διάφορες καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, το αλουμίνιο είναι ευέλικτο, ανθεκτικό σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία κατασκευών, αυτοκινήτων, αεροπορίας, συσκευασίας και πολλών άλλων τομέων.

Τα τμήματα μιας ανεμογεννήτριας που περιέχουν αλουμίνιο βρίσκονται τόσο στην άτρακτο όσο και στον πύργο. Η ανακύκλωση του αλουμινίου είναι μια εξαιρετικά αποδοτική διαδικασία από περιβαλλοντική άποψη. Σε σύγκριση με την παραγωγή αλουμινίου από πρώτες ύλες, η ανακύκλωση απαιτεί μόνο το 5% της ενέργειας. Αυτό καθιστά το αλουμίνιο ένα εξαιρετικά πολύτιμο υλικό ως απόβλητο.

Η ανακύκλωση του αλουμινίου είναι μια εύκολη και οικονομική διαδικασία. Υπάρχουν επίσης επτά διαφορετικές κατηγορίες κραμάτων αλουμινίου, με διαφορετικές ιδιότητες εξυπηρετούν στην παραγωγή διαφορετικών προϊόντων. Σε περιπτώσεις όπου το αλουμίνιο είναι καθαρό χωρίς προσμίξεις άλλων υλικών, μπορεί να ανακυκλωθεί επανειλημμένα χωρίς να επηρεαστούν οι ιδιότητές του. Σε αυτήν την περίπτωση, η ανακύκλωση λειτουργεί σαν ένας

κλειστός κύκλος. Η ανακύκλωση του αλουμινίου λειτουργεί ως ένας κλειστός κύκλος διαδικασιών. Όταν το ανακυκλώσιμο αλουμίνιο περιέχει υψηλά ποσοστά προσμίξεων από άλλα υλικά, απαιτείται η προσθήκη καθαρού αλουμινίου για να αυξηθεί η καθαρότητα του τελικού κράματος. Αυτή η προσθήκη καθαρού αλουμινίου συντελεί στη βελτίωση της ποιότητας του υλικού και επιτρέπει την παραγωγή ανακυκλωμένων κραμάτων αλουμινίου με επιθυμητές ιδιότητες. Μέσω αυτής της διαδικασίας, το αλουμίνιο παραμένει σε συνεχή κυκλοφορία, μειώνοντας την ανάγκη για την εξόρυξη νέων πρώτων υλών και επιφέροντας οικονομικά οφέλη. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη για να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα και απόδοση του αλουμινίου. Η προσθήκη καθαρού αλουμινίου συμβάλλει στη μείωση των προσμίξεων και τη βελτίωση της καθαρότητας του τελικού κράματος.

Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των υλικών και την εξασφάλιση υψηλής ποιότητας αλουμινίου ακόμη και όταν υπάρχουν προσμίξεις άλλων υλικών. Μέσω αυτής της διαδικασίας, επωφελούμαστε από τις ανανεώσιμες πηγές αλουμινίου και να μειώσουμε την εξάρτησή μας από τις πρώτες ύλες. Έτσι, διατηρούνται οι ιδιότητες και η αξία του αλουμινίου, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα και την οικονομική αποδοτικότητα της ανακύκλωσης (UNEP, 2013).

4. Ερευνητικές μέθοδοι ανακύκλωσης σύνθετων υλικών

Τα πολυμερικά υλικά έχουν γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη και έχουν αποκτήσει έναν σημαντικό ρόλο στη σύγχρονη κοινωνία. Έχουν αντικαταστήσει παραδοσιακά υλικά, όπως τα μέταλλα, με αποτέλεσμα η χρήση τους να διευρύνεται σε περισσότερους τομείς. Ως εκ τούτου, η έρευνα που αφορά τα συνθετικά υλικά προχωρά με γρήγορους ρυθμούς, με στόχο όχι μόνο τη βελτίωση των υπάρχοντων υλικών, αλλά και την ανάπτυξη νέων υλικών με άριστες ιδιότητες.

Με αυτά που προαναφέραμε, η βιομηχανία των συνθετικών υλικών επενδύει σημαντικά ποσά για την ανάπτυξη νέων τεχνικών παραγωγής συνθέτων, καθώς και την ανάπτυξη των "σύνθετων υλικών του μέλλοντος". Για παράδειγμα, το σύνθετο υλικό BMI/BIS (αλυλοφαινοξυφθαλμίδιο) έχει αναπτυχθεί με σκοπό να χρησιμοποιηθεί στους κινητήρες αεροπλάνων και

παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε θερμοκρασίες άνω των 250 βαθμών Κελσίου για μεγάλα χρονικά διαστήματα, διατηρώντας τις ιδιότητές του αναλλοίωτες. Οι επενδύσεις αυτές καταδεικνύουν την αποφασιστικότητα της βιομηχανίας να αναπτύξει υλικά που θα ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του μέλλοντος και θα παρέχουν εξαιρετική απόδοση (Rogers J.K., 1992).

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μια ιδιομορφία, καθώς αποτελούνται από δύο συστατικά: ένα ενισχυτικό μέσο και μία μήτρα. Αυτή η δομή τους παρέχει τη δυνατότητα να αξιοποιηθούν κατά την ανακύκλωσή τους, καθώς επιτρέπει τον διαχωρισμό και την ανάκτηση τόσο της μήτρας όσο και του ενισχυτικού μέσου. Η ιδιομορφία των συνθετικών υλικών παρέχει ένα αναμφισβήτητο οικονομικό κίνητρο, όχι μόνο λόγω του γεγονότος ότι μπορούμε να ανακτήσουμε και να αξιοποιήσουμε μεγάλο μέρος της μήτρας τους, αλλά και λόγω του ενισχυτικού μέσου που συνήθως έχει μεγάλο κόστος.

Μέσω της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης, τα υλικά που προέρχονται από τα απόβλητα των συνθετικών υλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά για τη δημιουργία νέων συνθετικών υλικών. Αυτή η πρακτική συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης πρώτων υλών και τη μείωση των αποβλήτων, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προστασία του περιβάλλοντος και στην αειφόρα.

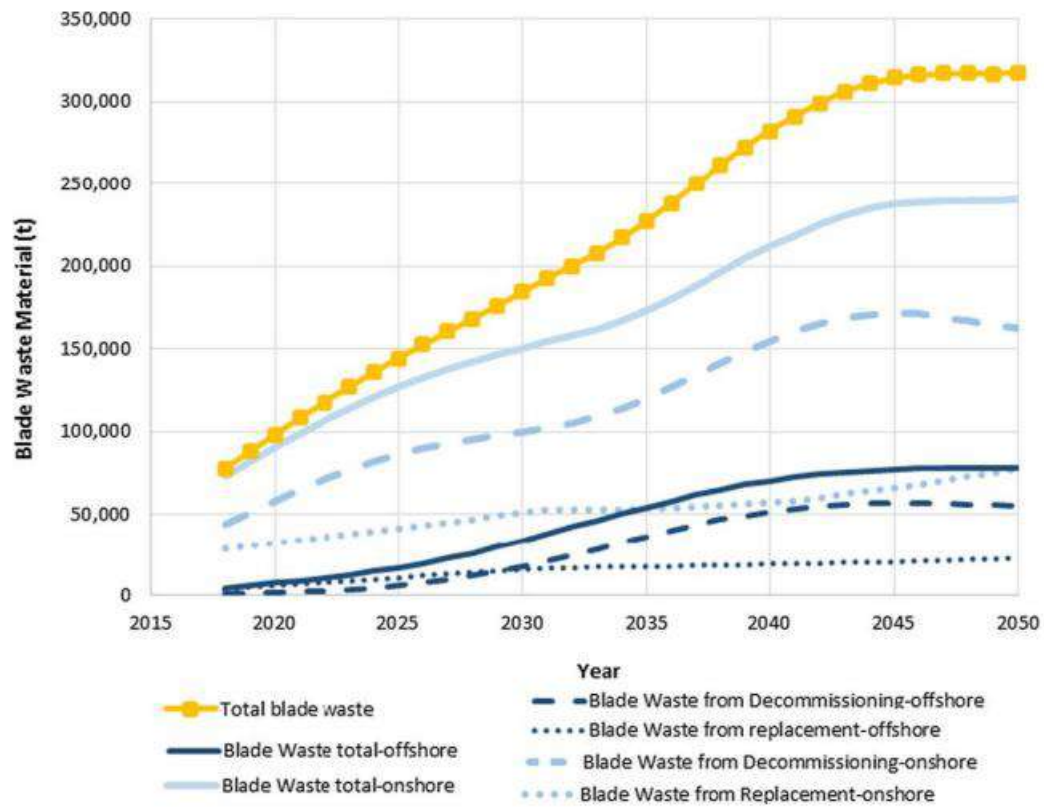
Οι ερευνητικές μέθοδοι ανακύκλωσης σύνθετων υλικών αποτελούν έναν σημαντικό τομέα της επιστήμης και της τεχνολογίας που ασχολείται με την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από διαφορετικά συστατικά που συνδυάζονται για να δημιουργήσουν υλικά με συγκεκριμένες ιδιότητες και λειτουργίες.

Η ανακύκλωση των σύνθετων υλικών αποτελεί μια αποτελεσματική διαδικασία που στοχεύει στη μείωση της περιβαλλοντικής επίπτωσης της απόρριψης αυτών των υλικών και στην επαναχρησιμοποίηση των συστατικών τους. Οι ερευνητικές μέθοδοι ανακύκλωσης σύνθετων υλικών ασχολούνται με την ανάπτυξη και τη βελτίωση τεχνολογιών και διαδικασιών που επιτρέπουν την αποδοτική ανακύκλωση αυτών των υλικών.



Εικόνα 22: Ακαθάριστες ετήσιες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών στην Ευρώπη (WindEurope, 2020).

Από την εικόνα 38 προκύπτει ότι μέχρι το 2050 αναμένεται ο συνολικός όγκος των αποβλήτων πτερυγίων να φθάσει τις 325.000 τόνους, με το 76% να προέρχεται από χερσαίες πηγές και το 24% από υπεράκτιες πηγές. Αν και τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αντιπροσωπεύουν μικρότερο ποσοστό σε σύγκριση με τα χερσαία, αυτό δεν σημαίνει ότι πρόκειται για αμελητέα ποσότητα υλικού και, συνεπώς, δεν πρέπει να αγνοηθεί σε καμία πρόβλεψη (Lichtenegger et al., 2020). Αυτή η πληροφορία υπογραμμίζει τη σημασία να ληφθούν υπόψη και οι υπεράκτιες πηγές αποβλήτων πτερυγίων κατά την ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών ανακύκλωσης και διάθεσης.



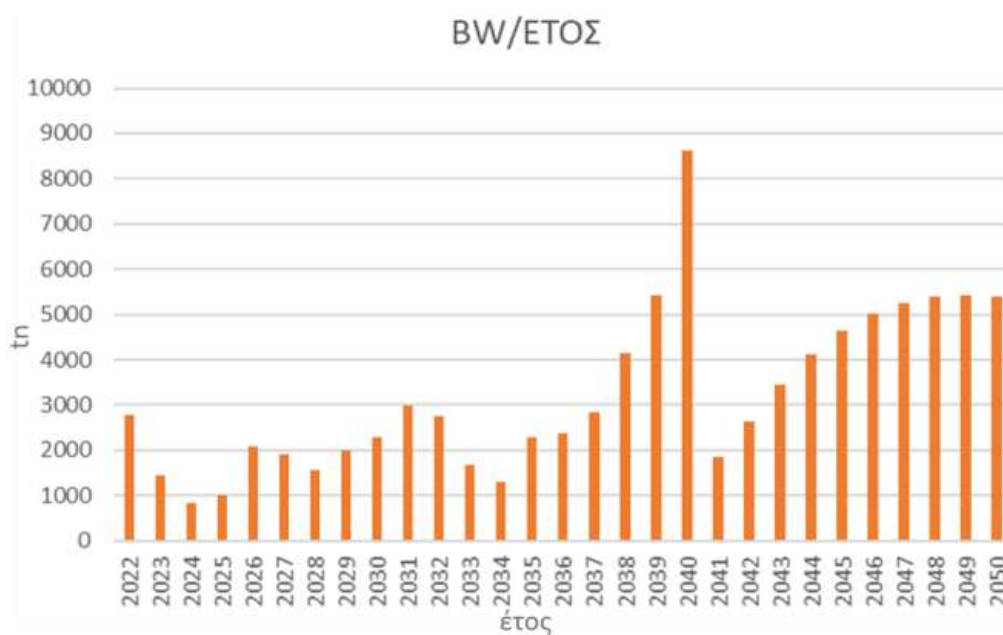
Εικόνα 23: Πρόβλεψη υλικών αποβλήτων πτερυγίων από ανεμογεννήτριες στην Ευρώπη έως το 2050 (Lichtenegger et al., 2020).

5.Κοστολόγηση μεθόδων ανακύκλωσης

Για να υπολογιστεί το κόστος των μεθόδων ανακύκλωσης, λαμβάνονται υπόψη οι εξής παράμετροι:

1. Ετήσιος ρυθμός αποβλήτων: Ορίζεται ότι ο ετήσιος ρυθμός αποβλήτων ανέρχεται σε 3000 τόνους. Αυτή η τιμή θεωρείται η πιο λογική, σύμφωνα με την εικόνα 39.
2. Μέση απόσταση μεταφοράς: Θεωρείται ότι η μέση απόσταση μεταφοράς των αποβλήτων είναι 200 χιλιόμετρα.
3. Απευθείας μεταφορά στη βιομηχανία ανακύκλωσης: Τα απόβλητα θα μεταφέρονται απευθείας στη βιομηχανία ανακύκλωσης, ανάλογα με την εξεταζόμενη μέθοδο για κάθε περίπτωση.

Τα δεδομένα που αντλούνται από επιστημονικά άρθρα αναθεωρούνται με τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα δεδομένα για την Ελλάδα. Για παράδειγμα, αναθεωρούνται τα εργατικά κόστη, το κόστος ενέργειας κ.λπ. Στις περιπτώσεις που δεν παρέχονται λεπτομέρειες για την πηγή των δεδομένων (όπως ένα σταθερό κόστος αναλωσίμων), τα δεδομένα μετατρέπονται χρησιμοποιώντας την ισοτιμία των νομισμάτων για το έτος για το οποίο υπάρχουν τα στοιχεία (Πίνακας 4) και το Producer prices in industry της Ευρώπης (Πίνακας 5).



Εικόνα 24: Αποτελέσματα πρόγνωσης των αποβλήτων των ανεμογεννητριών σε τόνους για τα έτη 2022 – 2050 (Τζόκας 2023)

Πίνακας 4: Ο μέσος όρος της παραγωγής στη βιομηχανία των Κρατών της Ευρώπης ανά έτος (Statistics | Eurostat, n.d.)

ΕΤΟΣ	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	82,25	76,56	75,52	72,35	73,81	73,67	75,30	78,90	83,37	87,55	90,13	95,19	91,94	95,82	102,03	104,75	104,50	102,86	100,00	97,78	101,05	104,55	105,25	102,18	113,08

Πίνακας 5: Κοστολόγηση πρώτων υλών (Τζόκας 2023)

Πρώτες ύλες	Κόστος	Μονάδες	Βιβλιογραφία
νερό	0,98	€/μ³	(Τιμολογιο & Χρηση, 2016)
ηλεκτρική ενέργεια (χωρίς φόρους)	0,081	€/kwh	(Electricity Price Statistics - Statistics Explained, n.d.)
ηλεκτρική ενέργεια	0,1064	€/kwh	
φυσικό αέριο	0,0213	(EUR per kWh)	(Natural Gas Price Statistics - Statistics Explained, n.d.)
Μέση τιμή πετρελαίου	1,18	€/l	(• Diesel Prices in Greece 2021 Statista, n.d.)

Πίνακας 6: Τεχνικά χαρακτηριστικά πρώτων υλών (Τζόκας 2023)

Πρώτες ύλες	Τιμή	Μονάδες	Βιβλιογραφία
Θερμογόνος δύναμη φυσικό αέριο	47200	kJ/kg	(ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΤΩΝ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΤΕΛΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ (Παράρτημα IV Της Οδηγίας 2012/27/ΕΕ) Υπουργείο Περιβάλλοντος Και Ενέργειας, n.d.) (Μεθάνιο - Βικιπαίδεια, n.d.)
Μοριακή μάζα μεθανίου	16,0425	amu	
Θερμότητα πλήρους καύσης μεθανίου	891	kJ/mole	

Πίνακας 7: Κοστολόγηση ανθρωπίνου δυναμικού (Τζόκας 2023)

Κόστος ανθρωπίνου δυναμικού & εξοπλισμού	Τιμή	Μονάδες	Βιβλιογραφία
Ωριαίο κόστος εργασίας στην Ελλάδα	16,4	€/h	(Hourly Labour Costs - Statistics Explained, n.d.)
Ωριαίο κόστος εργασίας στην Ευρώπη	27,7	€/h	

Αρχικά, παρουσιάζονται δύο πιθανά σενάρια για την κοπή και μεταφορά των πτερυγίων αιολικών πάρκων. Στο πρώτο σενάριο, τα πτερύγια κόβονται σε κομμάτια μήκους 6-7 μέτρων απευθείας στο αιολικό πάρκο, η οποία είναι η τρέχουσα πρακτική για τη μεταφορά των αποβλήτων πτερυγίων αιολικής ενέργειας στο τελικό σημείο απόρριψης. Στο δεύτερο σενάριο, τα πτερύγια κόβονται σε μέγεθος 1-2 μέτρων και στη συνέχεια διακόπτονται σε μικρότερα τμήματα μεγέθους 20-40 χιλιοστών χρησιμοποιώντας κινητούς τεμαχιστές (Rentizelas et al., 2021). Για τον υπολογισμό του κόστους σε αυτά τα δύο σενάρια, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 6 και 8.

Πίνακας 8: Σενάριο 1 (Rentizelas et al., 2021).

Σενάριο 1		
Κόστος προσωπικού	21,75	€/t
Λειτουργικό κόστος	10,00	€/t
Συνολικό κόστος κοπής	31,75	€/t
Κόστος μεταφοράς 0,223 €/t*km)	44,60	€/t
Συνολικό κόστος	76,35	€/t

Πίνακας 9: Σενάριο 2 (Rentizelas et al., 2021)

Σενάριο 2		
Κόστος προσωπικού	21,75	€/t
Λειτουργικό κόστος	10,00	€/t
κατανάλωση ντίζελ	6,02	€/t
κόστος υπηρεσίας	0,57	€/t
κόστος φθοράς εργαλείων	2,30	€/t
κόστος προσωπικού	3,26	€/t
Συνολικός κόστος κοπής και τεμαχισμού	43,90	€/t
Κόστος μεταφοράς 0,048 €/t*km)	9,6	€/t
Συνολικό κόστος	53,50	€/t

Επιλέγεται οπότε το δεύτερο σενάριο καθώς είναι πιο οικονομικό για τη μέση απόσταση 200 km, ενώ θα υπάρχει και χαμηλότερο κόστος τεμαχισμού στη βιομηχανία.

5.1 Κόστος υγειονομικής ταφής

Η τιμή του τέλους ταφής αρχίζει από 15 ευρώ ανά τόνο αποβλήτων και αυξάνεται κατά 5 ευρώ ετησίως μέχρι να φτάσει στα 35 ευρώ ανά τόνο, όπου παραμένει σταθερή για τα υπόλοιπα έτη. Συνεπώς, για την περίπτωση αυτή θα θεωρήσουμε την τιμή των 35 ευρώ. Για το Ηνωμένο Βασίλειο, οι τιμές κυμαίνονται περίπου από 20 λίρες έως 50 λίρες για τη διαδικασία της υγειονομικής ταφής, με 5 λίρες για λειτουργικά έξοδα και 10 λίρες ως κέρδος (P. Liu, 2017). Για το σενάριο της υγειονομικής ταφής, επιλέγεται μια απόσταση 50 χιλιομέτρων.

5.2 Μηχανική Ανακύκλωση

Τα δεδομένα του Πίνακα 8 αντλήθηκαν από το άρθρο (Rentizelas et al., 2021) και προσαρμόστηκαν σύμφωνα με τα δεδομένα κόστους που υπάρχουν στην Ελλάδα και για τη δυναμικότητα των 3000 τόνων αποβλήτων ανά έτος, που υιοθετήθηκε προηγουμένως.

Πίνακας 4: Κοστολόγηση της μηχανικής ανακύκλωσης των περυγίων (Rentizelas et al., 2021)

ΈΞΟΔΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ				
Ετήσια Δυναμικότητα	15000	t	3000	t
Κόστος επένδυσης εγκατάστασης	2.340.000	€	890.910	€/έτος
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας	102,96	kwh/t	32.865	€/έτος
Φθορά εργαλείων	10	€/t	30.000	€/έτος
Κόστος αποθήκευσης	14,4	€/t της δυναμικότητας των εγκαταστάσεων	43.200	€/έτος
Κόστος συντήρησης	4%	του κόστους επένδυσης/έτος	35.636	€/έτος
Κόστος ενοικίασης περονοφόρου ανυψωτικού μηχανήματος	4,55%	του κόστους επένδυσης της εγκατάστασης/έτος	40.536	€/έτος
κατανάλωση καυσίμου περονοφόρου ανυψωτικού οχήματος	3,54	λίτρα/έτος/τόνο	12.532	€/έτος
κόστος ασφάλισης περονοφόρου ανυψωτικού μηχανήματος	0,22%	του κόστους επένδυσης της εγκατάστασης	1.960	€/έτος
κόστος προσωπικού	21,20	€/έτος/τόνο	37.655	€/έτος
Συνολικό λειτουργικό κόστος Μηχανικής Ανακύκλωσης			234.384	€/έτος

5.3 Αποτέφρωση - Συν-επεξεργασία στη βιομηχανία τσιμέντου

Το κόστος διάθεσης για την αποτέφρωση στη βιομηχανία τσιμέντου αναφέρεται στα 155 €/t (Rentizelas et al., 2021).

5.4 Θερμικές μέθοδοι ανακύκλωσης

Πίνακας 5: Κοστολόγηση διαδικασίας ρευστοποιημένης κλίνης για συνολική δυναμικότητα 6000 τόνων (Pickering et al., 2000)

Συνολική δυναμικότητα κλίνης σε τόνους	6000	
Έξοδα παραγωγικής διαδικασίας	\$ / έτος	€/έτος
Μεθάνιο (\$0.12/kg)	103.704	21.660
Ανθρακικό ασβέστιο (\$0.03/kg)	5.581	9.302
Εργατικά έξοδα (3 βάρδιες ανά 3 άτομα)	135.000	295.200
Προϊστάμενοι (15% των εργατικών)	20.250	44.280
Ηλεκτρική ενέργεια (\$0.04/kWh)	350.045	931.120
Συντήρηση και επισκευές (6% του CFC)	200.210	138.168
Αναλώσιμα (10% της συντήρησης και των επισκευών)	20.021	13.817
Εργαστηριακές χρεώσεις (10% της λειτουργικής εργασίας)	13.500	29.520
Γενικά έξοδα (μισθοδοσία και εγκαταστάσεις), συσκευασία, αποθήκευση (60% της λειτουργικής εργασίας + επίβλεψη + συντήρηση)	213.276	177.120
Τοπικοί φόροι (1% του πάγιου κεφαλαίου)	33.368	23.028
Ασφάλιση (0,7% του πάγιου κεφαλαίου)	23.358	16.120
Διοικητικά έξοδα (25% των γενικών εξόδων)	53.319	44.280
Συνολικό λειτουργικό κόστος Ρευστοποιημένης Κλίνης		1.743.614

Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 12 αντλήθηκαν από το επιστημονικό άρθρο (Pickering et al., 2000) και προσαρμόστηκαν στα δεδομένα της Ελλάδας. Επιπλέον, η αναφορά στο μεθάνιο αντικαταστάθηκε με φυσικό αέριο στους υπολογισμούς, καθώς αυτή τη στιγμή το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται κυρίως στη βιομηχανία και είναι πιο οικονομικό. Όσον αφορά την Πυρόλυση και την Πυρόλυση Μικροκυμάτων, δεδομένου ότι δεν διαθέτουμε δεδομένα από επιστημονικά άρθρα για τον υπολογισμό του ετήσιου λειτουργικού τους κόστους, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες υποθέσεις :

- Καθώς οι διεργασίες πυρόλυσης και ρευστοποιημένης κλίνης περιλαμβάνουν θερμική επεξεργασία, έχουν παρόμοιες θερμοκρασίες λειτουργίας. Ωστόσο, ο εξοπλισμός που απαιτείται για την πυρόλυση είναι απλούστερος, γεγονός που υποδηλώνει ότι το κόστος ανακύκλωσης της πυρόλυσης είναι 10% χαμηλότερο από τη διαδικασία

της ρευστοποιημένης κλίνης (P. Liu, 2017). Επομένως, υπολογίζεται ότι το κόστος ανακύκλωσης της πυρόλυσης θα ανέρχεται στο ποσό των 1.569.253 €.

- Ένα κύριο πλεονέκτημα της πυρόλυσης με τη χρήση μικροκυμάτων (MAP) είναι η εξοικονόμηση ενέργειας. Οι διάφορες μέθοδοι θέρμανσης οδηγούν σε μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης για την πυρόλυση με MAP, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας για την πυρόλυση με MAP είναι περίπου το ένα τέταρτο της συμβατικής πυρόλυσης, και το ενεργειακό κόστος θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το πενήντα τοις εκατό του συνολικού κόστους ανακύκλωσης (P. Liu, 2017). Επομένως, το κόστος ανακύκλωσης υπολογίζεται ως $(50\% * 1/4 + 50\%) * 1.569.253 = 980.783 \text{ €}$.

5.5 Χημική Ανακύκλωση

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα στη βιβλιογραφία σχετικά με το κόστος ανακύκλωσης GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της χημικής ανακύκλωσης, έχουν γίνει εκτιμήσεις βασισμένες στα δεδομένα που παρέχει ο Knight και η ομάδα του. Συνεπώς, θα χρησιμοποιηθεί το ετήσιο κόστος λειτουργίας που αναφέρεται σε εκείνη την εργασία (2.270.000 δολάρια ανά έτος) για μια δυναμικότητα των 1315 τόνων ανά έτος (Knight, 2013). Μετά από τις απαραίτητες μετατροπές, υπολογίζεται ένα ετήσιο λειτουργικό κόστος περίπου 1.271 ευρώ ανά τόνο.

5.6 Κατακερματισμός υψηλής τάσης (HVF)

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες στη βιβλιογραφία για το κόστος παραγωγής GFRP με τη μέθοδο HVF, θα χρησιμοποιηθούν τα διαθέσιμα δεδομένα για το CFRP. Η πιο αποδοτική διάταξη επίδειξης επέτυχε μια απόδοση 5,65 kg/h χρησιμοποιώντας 1,2 kWh/kg. Μια μονάδα παραγωγής SELFRAG, που χρησιμοποιεί μια γεννήτρια στα 20 Hz, έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την απόδοση σε περίπου 22,56 kg/h, που αντιστοιχεί σε περίπου 198 τόνους ανά έτος. Αυτό θα επηρεάσει σημαντικά τα οικονομικά μειώνοντας τα λειτουργικά έξοδα (OPEX), αλλά θα αυξήσει το κόστος επένδυσης (CAPEX). Το CAPEX αναμένεται να αυξηθεί στα €2.045.000, ενώ το OPEX αναμένεται να

μειωθεί στα €6,12/kg (Final Report Summary - SELFRAG CFRP). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο Πίνακας 16 με την κοστολόγηση της μεθόδου HVF, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, και την προσαρμογή των τιμών στα δεδομένα της Ελλάδας.

Πίνακας 6: Κοστολόγηση μεθόδου HVF και αναθεώρηση των κοστών στα δεδομένα της Ελλάδας (Final Report Summary - SELFRAG CFRP, n.d.).

Λειτουργικές Δαπάνες OPEX			
Έξοδα	Τιμή βιβλιογραφίας	Μονάδες	Τιμή αναθεωρημένη για τα δεδομένα της Ελλάδας
Φθορά εξοπλισμού και αναλώσιμα (ηλεκτρόδια κ.λπ.)	3,11	€/kg	3,09
Συντήρηση εξοπλισμού (εργασίες κ.λπ.)	2	€/kg	1,99
Ανθρώπινο δυναμικό (τυπικός εργαζόμενος με 20€/ώρα)	0,89	€/kg	0,73
Ηλεκτρική ενέργεια (1,2 kWh/kg)	0,12	€/kg	0,02
Απώλειες νερού	0,12	€/kg	0,02
Total OPEX	6,12	€/kg	5,85

5.7 Σύνοψη κόστους

Για όλες τις μεθόδους ανακύκλωσης, εκτός από τη μηχανική ανακύκλωση που έχει ήδη υπολογιστεί, θα υπάρξει μια επιπλέον δαπάνη για την απόκτηση ενός τεμαχιστεί και ένα ετήσιο κόστος λόγω της λειτουργίας του εργοστασίου. Αυτό το κόστος προσδιορίζεται σε περίπου 1/4 του κόστους τεμαχισμού στο αιολικό πάρκο. Το κόστος επένδυσης για την απόκτηση του τεμαχιστεί, σύμφωνα με το άρθρο (Vo Dong et al., 2018), ανέρχεται σε 200.000,00 € για μια παραγωγή 4000 τόνων ετησίως. Αυτή η τιμή προσαρμόστηκε για τις δικές

μας ανάγκες, δηλαδή για μια παραγωγή 3000 τόνων ετησίως, και ορίστηκε σε 196.424,25 €. Το κόστος κοπής ανέρχεται σε 3,04 € ανά τόνο.

Ο Πίνακας 14 παρουσιάζει μια σύνοψη του εκτιμώμενου κόστους για τις διάφορες μεθόδους ανακύκλωσης πτερυγίων, με τη μονάδα μέτρησης να είναι το ευρώ. Το κόστος έχει αναθεωρηθεί για να αντικατοπτρίζει τις τρέχουσες τιμές, με σκοπό να διευκολυνθούν οι συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων.

Πίνακας 7: Σύνοψη κοστολόγησης παραγωγικής διαδικασίας μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων. (Τζόκας 2023)

Μέθοδος ανακύκλωσης	Κόστος Επένδυσης	Πηγή	Έτος	Δυναμικότητα	Κόστος Επένδυσης (€)
Μηχανική ανακύκλωση	2.340.000 €	(Rentizelas et al., 2021)	2020	15.000	2.340.000,00
Διαδικασία ρευστοποιημένης κλίνης	3.370.000 \$	(Pickering et al., 2000)	1997	6.000	3.663.931,18
Πυρόλυση	10.000.000 €	(Vo Dong et al., 2018)	2012	50.000	9.754.780,59
Υποβοηθούμενη από μικροκύματα πυρόλυση (MAP)	10.940.000 €	(Appleton et al., 2005)	2005	50.000	16.849.343,16
Χημική ανακύκλωση	5.830.000 \$	(Knight, 2013)	2013	1.315	4.248.096,42
Κατακερματισμός υψηλής τάσης (HVF)	2.045.000 €	(Final Report Summary - SELFRAG CFRP, n.d.)	2014	198	2.031.615,52

Για να εκτιμηθεί το κόστος της εγκατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα που αναφέρονται σε διαφορετικές δυναμικότητες από τη συγκεκριμένη περίπτωση που μελετάμε, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του κόστους προς τη δυναμικότητα. Σύμφωνα με αυτήν, υπολογίζεται ο λόγος του κόστους των δύο εγκαταστάσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες δυναμικότητές τους, υψωμένος σε ένα κατάλληλο εκθέτη. Αυτός ο εκθέτης είναι ο συντελεστής κλίμακας για την εξεταζόμενη τεχνολογία. (The Cost-to-Capacity Method and Scale Factors - EnvValuation, n.d.)

Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται το κόστος επένδυσης για κάθε μέθοδο, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 15.

Πίνακας 8: Σύνοψη κοστολόγησης επένδυσης μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων. (Τζόκας 2023)

Μέθοδος ανακύκλωσης	Δυναμικότητα	Εκθέτης	Πηγή	Κόστος Επένδυσης (€) για 3000 τόνους
Μηχανική ανακύκλωση	15.000	0,6	(Tribe & Alpine, 1986)	890.910,04
Διαδικασία ρευστοποιημένης κλίνης	6.000	0,67	(Sommer & Walther, 2021)	2.302.805,25
Πυρόλυση	50.000	0,67	(Sommer & Walther, 2021)	1.481.081,11
Υποβοηθούμενη από μικροκύματα πυρόλυση (MAP)	50.000	0,67	(Sommer & Walther, 2021)	2.558.257,84
Χημική ανακύκλωση	1.315	0,5	(Sommer & Walther, 2021)	6.416.654,13
Κατακερματισμός υψηλής τάσης (HVF)	198	0,5	(Sommer & Walther, 2021)	7.912.830,59

Στον Πίνακα 16 παρουσιάζεται μια σύνοψη της κοστολόγησης του λειτουργικού κόστους ανά τόνο για τις διάφορες μεθόδους ανακύκλωσης πτερυγίων. Αυτό επιτρέπει μια εύκολη σύγκριση μεταξύ των μεθόδων. Προτείνεται ότι τα λειτουργικά κόστη θα είναι τα ίδια για διάφορες δυναμικότητες.

Πίνακας 9: Σύνοψη κοστολόγησης λειτουργικών κοστών μεθόδων ανακύκλωσης πτερυγίων. (Τζόκας 2023)

Μέθοδος ανακύκλωσης	Λειτουργικά κόστη	Έτος	χωρητικότητα	€/τόνο
Μηχανική ανακύκλωση	234.384,12 €	2020	3.000	78,13
Διαδικασία ρευστοποιημένης κλίνης	1.743.614,16 €	2020	6.000	290,60
Πυρόλυση	1.569.252,74 €	2020	6.000	261,54
Υποβοηθούμενη από μικροκύματα πυρόλυση (MAP)	980.782,96 €	2020	6.000	163,46
Χημική ανακύκλωση	2.290.000,00 \$	2013	1.315	1.271,02
Κατακερματισμός υψηλής τάσης (HVF)	5,85 €/kg	2020	198	5.850,46

6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν όλοι οι πιθανοί τρόποι διαχείρισης αποβλήτων των ανεμογεννητριών με κύριο στόχο τη φιλικότητα προς το περιβάλλον. Η ανακύκλωση ενός υλικού για να είναι αποδοτική θα πρέπει το υλικό μετά την ανακύκλωση του να έχει όσο το δυνατόν παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά που είχε αρχικά στην πρωτογενή του μορφή. Τα υλικά από την ανακύκλωση των πτερυγίων παρουσιάζουν μειωμένη ομοιότητα με την αρχική τους μορφή. Αυτό σημαίνει πως σε αρκετές περιπτώσεις δεν συμφέρει οικονομικά η ανακύκλωση τους, αλλά είναι προτιμότερη η υγειονομική ταφή τους.

Πιο συγκεκριμένα όταν προκύπτει η ανάγκη για επεξεργασία των αποβλήτων των πτερυγίων, λόγω συμμόρφωσης προς την νομοθεσία ή άλλους λόγους, οι επιλογές αναλύονται με βάση το επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητάς τους. Για τις παραδοσιακές επιλογές, η καύση αποτεφρώνει τα απόβλητα και συνήθως θεωρείται προτιμότερη από την υγειονομική ταφή, καθώς παράγει ενέργεια. Αν και η ποσότητα της ανακτηθείσας ενέργειας είναι μικρή, η καύση επιτρέπει την αξιοποίηση κάποιας ενέργειας, καθιστώντας την προτιμότερη από την υγειονομική ταφή. Όσον αφορά στις ήδη διαθέσιμες ή σχεδόν έτοιμες επιλογές ανακύκλωσης, μόνο η μηχανική ανακύκλωση μπορεί να μειώσει τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να παράγει οικονομικά οφέλη. Οι υπόλοιπες τεχνικές επεξεργασίας, όπως η πυρόλυση, η σολβόλυση και η ρευστοποίηση, έχουν πιο μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με την απλή υγειονομική ταφή, και επομένως δε θεωρούνται επιλογές που βλάπτουν περισσότερο το περιβάλλον. Επιπλέον, οι τεχνικές επεξεργασίας σε εργαστηριακή κλίμακα μπορεί να έχουν λίγο καλύτερη απόδοση στο μέλλον σε σχέση με τις ώριμες τεχνολογίες. Ειδικότερα, η χημική ανακύκλωση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, ανακτώντας τόσο τις ίνες όσο και τη ρητίνη. Δεδομένου ότι η ρητίνη έχει σημαντικά υψηλότερη αξία από τις γυάλινες ίνες, η χημική ανακύκλωση είναι επίσης οικονομικά πιο βιώσιμη.

Πίνακας 10: Συγκεντρωτικά δεδομένα των μεθόδων ανακύκλωσης των πτερυγίων (Τζόκας 2023)

Μέθοδος	Κατάσταση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αποτέφρωση	Διαθέσιμη σε βιομηχανική κλίμακα	❖ Εξαιρετικά ταχεία και αποτελεσματική. ❖ Δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλων ποσοτήτων ❖ Ελαφρώς αυξανόμενη ενεργειακή απόδοση της τσιμεντοβιομηχανίας ❖ Δεν υπάρχουν κατάλυτα στάχτης ❖ Βελτιωμένες ιδιότητες του παραγόμενου υλικού	❖ Μειώνει την αξία των ινών σε εκείνη του ανθρακικού ασβεστίου ❖ Δεν αποτελεί ουσιαστικά μέθοδο ανακύκλωσης
Μηχανική	Διαθέσιμη σε βιομηχανική κλίμακα	❖ Αποτελεσματική ❖ Μικρό κόστος επένδυσης ❖ Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ❖ Άμεσα εφαρμόσιμη	❖ Περιορισμένες εφαρμογές λόγω του μήκους των ινών
Πυρόλυση	Διαθέσιμη σε βιομηχανική κλίμακα	❖ Διαθέσιμη σε εμπορική κλίμακα ❖ Αποδεκτό ποσοστό απόδοσης ανακυκλωμένων ινών	❖ Υψηλή κατανάλωση ενέργειας ❖ Υποβάθμιση της αντοχής των ινών
Ρευστοποιημένη Κλίνη	Για εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα	❖ Μπορεί να διαχειριστεί μικτά απόβλητα ❖ Διαθέσιμη τα επόμενα χρόνια	❖ Υψηλή κατανάλωση ενέργειας ❖ Υποβάθμιση της αντοχής των ινών
MAP	Εργαστηριακή κλίμακα	❖ Η βέλτιστη ενεργειακά θερμική επεξεργασία ❖ Αποδεκτό ποσοστό απόδοσης ανακυκλωμένων ινών	❖ Υποβάθμιση της αντοχής των ινών ❖ Δεν είναι εμπορικά εφαρμόσιμη προς το παρόν
HVF	Εργαστηριακή κλίμακα	❖ Πολύ καλή διατήρηση αντοχής των ανακυκλωμένων ινών	❖ Απαγορευτικό κόστος για τις ίνες γυαλιού ❖ Δεν είναι εμπορικά εφαρμόσιμη προς το παρόν
Χημική	Εργαστηριακή κλίμακα	❖ Υψηλό ποσοστό απόδοσης ανακυκλωμένων ινών ❖ Αποδεκτή διατήρηση αντοχής των ανακυκλωμένων ινών ❖ Ανάκτηση ρητίνης	❖ Υψηλό κόστος ❖ Δεν είναι εμπορικά εφαρμόσιμη προς το παρόν

Από την άλλη, τα υπόλοιπα υλικά της ανεμογεννήτριας, δηλαδή το αλουμίνιο, ο χαλκός, ο χάλυβας και το σκυρόδεμα είναι ευκολότερο να ανακυκλωθούν. Ήδη υπάρχουν πολλοί τρόποι ανακύκλωσης οι οποίοι είναι οικονομικά κερδοφόροι. Υπάρχουν πολλά σημεία που ανακυκλώνουν τα παραπάνω μέταλλα, πράμα που καθιστά αρκετά συμφέρουσα οικονομικά αυτή τη διαδικασία. Όμως για το σκυρόδεμα δεν υπάρχουν το ίδιο αρκετά μέρη που το ανακυκλώνουν. Σε ορισμένες απομακρυσμένες περιοχές το μεταφέρουν σε ΧΥΤΑ. Παρόλα αυτά όλα τα παραπάνω υλικά είναι πιο εύκολο να ανακυκλωθούν συγκριτικά με τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων.

Πίνακας 11: Σύνοψη υλικών για κάθε μέρος της Α/Γ

	ΒΑΣΗ	ΠΥΡΓΟΣ	ΑΤΡΑΚΤΟΣ	ΡΟΤΟΡΑΣ
ΣΙΔΗΡΟΣ			✓	✓
ΧΑΛΚΟΣ		✓	✓	
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ		✓	✓	
ΣΠΑΝΙΕΣ ΓΑΙΕΣ				
ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ				
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	✓			
ΧΑΛΥΒΑΣ	✓	✓	✓	✓**
GFRP*		✓	✓	
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ			✓	
ΛΙΠΑΝΤΙΚΑ			✓	

* : Πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού

** : Σε μερικές περιπτώσεις

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωση Βιβλιογραφία

1. Andersen, N. (2015) *Wind turbine end-of-life: Characterisation of waste material*. University of Gävle. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:873368/FULLTEXT01.pdf>
2. Akesson, D., Foltynowicz, Z., Christeen, J. and M. Skrifvars (2013). *Microwave*
3. André, A., Kullberg, J., Nygren, D., Mattsson, C., Nedev, G., & Haghani, R. (2020). *Re-use of wind turbine blade for construction and infrastructure applications*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 942(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012015>
4. Arabatzis, G., Myronidis, D. (2011). *Contribution of SHP Stations to the development of an area and their social acceptance*. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 8, pp. 3909-3917.
<https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v15y2011i8p3909-3917.html>
5. Beauson, J. and Brøndsted, P. (2016) 'Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective', in Wiesław Ostachowicz, Malcolm McGugan, Jens-Uwe Schröder-Hinrichs, M. L. (ed.) *MARE-WINT: New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology*, pp. 421–432. doi: 10.1007/978-3-319-39095-6.
<https://core.ac.uk/download/pdf/84003115.pdf>
 6. Beauson, Justine, Lilholt, H., & Brøndsted, P. (2014). *Recycling solid residues recovered from glass fibre-reinforced composites - A review applied to wind turbine blade materials*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(16), 1542–1556.
<https://doi.org/10.1177/0731684414537131>
 7. Bilgen, S., Keleş, S., Kaygusuz, A., Sari, A., Kaygusuz, K. (2008). *Global warming and renewable energy sources for sustainable development: a case study in Turkey*. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 12, No. 2, pp.372-396.
https://www.academia.edu/12917572/Global_warming_and_renewable_energy_sources_for_sustainable_development_A_case_study_in_Turkey
 8. Bonou, A. (2016). *On the shoulders of giants - Life cycle based eco design applied in wind*
 9. Brebu, M., Bhaskar, T., Murai, K., Muto, A., Sakata, Y., Uddin, M.D.A., 2004. *Thermal degradation of PE and PS mixed with ABS-Br and debromination of pyrolysis oil by Fe- and Ca-based catalysts*. *Polym. Degrad. Stab.* 84, 459–467.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.02.003>.
 10. Callister, W., Rethwisch, D., (2004). *Materials science and engineering 9th Edition*.
<https://anupturnedworld.files.wordpress.com/2016/06/callister-materials-science-and-engineering.pdf>
 11. Chen, J., Wang, J., & Ni, A. (2019). *Recycling and reuse of composite materials for wind turbine blades: An overview*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(12), 567–577.
<https://doi.org/10.1177/0731684419833470>
 12. Cleveland, C. J., Morris, C. G. (2006). *Building Envelope (HVAC). Dictionary of Energy*. [https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=J4w-PsZco2MC&oi=fnd&pg=PR1&dq=Cleveland,+C.+J.,+Morris,+C.+G.+\(2006\).+Building+Envelope+\(HVAC\).+Dictionary+of+Energy./&ots=NIqowicoqE&sig=5q9OUtkfMN93sf4hrwNX1tB2hnc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=J4w-PsZco2MC&oi=fnd&pg=PR1&dq=Cleveland,+C.+J.,+Morris,+C.+G.+(2006).+Building+Envelope+(HVAC).+Dictionary+of+Energy./&ots=NIqowicoqE&sig=5q9OUtkfMN93sf4hrwNX1tB2hnc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
 13. Cunliffe, A. M., & Williams, P. T. (2003). *Characterisation of products from the recycling of glass fibre reinforced polyester waste by pyrolysis*. *Fuel*, 82(18), 2223–2230. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00129-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00129-7)
- energy technologies. DTU. Technical University of Denmark.
https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/123457806/Bonou_et

- [al Ecodesign framework for developing windturbines J Clean Prod 2016.pdf](#)
14. European Commission DG ENV (2011). *Study on photovoltaic panels supplementing*
https://www.researchgate.net/publication/240162064_Microwave_pyrolysis_as_a_method_of_recycling_glass_fibre_from_used_blades_of_wind_turbines.
 15. Jensen, J. P., & Skelton, K. (2018). *Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. Renewable and Sustainable Energy*
 16. Kalkanis, K., Psomopoulos, C.S., Kaminaris, S., Ioannidis, G. and Pachos, P. (2019) 'Wind turbine blade composite materials - End of life treatment methods', *Energy Procedia*, 157(2018), pp. 1136–1143. doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.281.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218312542>
 17. Karavida S. (2015). *Waste Management of End-of-Service Wind Turbines*, Aalborg University
https://projekter.aau.dk/projekter/files/213319772/Waste_management_of_end_of_service_wind_turbines.pdf
 18. Krauklis, A. E., Karl, C. W., Gagani, A. I., & Jørgensen, J. K. (2021). *Composite material recycling technology—state-of-the-art and sustainable development for the 2020s. Journal of Composites Science*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/jcs5010028>
 19. Karuppannan Gopalraj, S., & Kärki, T. (2020). *A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. SN Applied Sciences*, 2(3), 1–21.
<https://doi.org/10.1007/s42452-020-2195-4>
 20. Liu, W.-J., Tian, K., Jiang, H., Yu, H.-Q., 2016. *Lab-scale thermal analysis of electronic waste plastics. J. Hazard. Mater.* 310, 217–225.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.044>
 21. Liu, Y., Farnsworth, M., & Tiwari, A. (2017). *A review of optimisation techniques used in the composite recycling area: State-of-the-art and steps towards a research agenda. Journal of Cleaner Production*, 140, 1775–1781.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.038>
 22. Lichtenegger, G., Rentizelas, A. A., Trivyza, N., & Siegl, S. (2020). *Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050. Waste Management*, 106, 120–131.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.018>

23. Liu, P. (2017). *REDUCING THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF WIND TURBINE BLADES*.

November

<https://www.researchgate.net/publication/307614361> The environmental impact of wind turbine blades

24. Ma, Y., & Nutt, S. (2018). *Chemical treatment for recycling of amine/epoxy composites at atmospheric pressure*. *Polymer Degradation and Stability*, 153, 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.05.011>
25. Ma, Y., Kim, D., & Nutt, S. R. (2017). *Chemical treatment for dissolution of amine-cured epoxies at atmospheric pressure*. *Polymer Degradation and Stability*, 146(April), 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.10.014>
26. Miandad, R., Barakat, M.A., Aburizaiza, A.S., Rehan, M., Nizami, A.S., 2016. *Catalytic pyrolysis of plastic waste: a review*. *Process Saf. Environ. Prot.* 102, 822–838. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>.
27. Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). *Materials for wind turbine blades: An overview*. *Materials*, 10(11), 1–24. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>
28. McNeil, K. and Kang, T. H. K. (2013) 'Recycled Concrete Aggregates: A Review', *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), pp. 61–69. do: 10.1007/s40069-013-0032-5. <https://ijcsm.springeropen.com/articles/10.1007/s40069-013-0032-5>
29. Mativenga, P.T., Shuaib, N.A., Howarth, J., Pestalozzi, F. and J. Woidasky (2016). *High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite*, *CIRP Ann - Manufacturing Technology*, 65(1), 45-48. <https://www.researchgate.net/publication/301832376> High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite
30. Nnorom, I.C., Osibanjo, O., 2008. *Sound management of brominated flame retarded (BFR) plastics from electronic wastes: state of the art and options in Nigeria*. *Resour. Conserv. Recycl.* 52, 1362–1372. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.08.001>.of Reinforced Plastics and Composites, 17, 1136-1142.
31. Oliveux, G., Bailleul, J. L., & Salle, E. L. G. La. (2012). *Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(11), 1809–1818. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.06.008>
- Paris
<https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/weee/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf>

32. Paulsen, E. B., & Enevoldsen, P. (2021). *A multidisciplinary review of recycling methods for end-of-life wind turbine blades*. *Energies*, 14(14), 1–13. <https://doi.org/10.3390/en14144247>
33. Piñero-Hernanz, R., García-Serna, J., Dodds, C., Hyde, J., Poliakov, M., Cocero, M. J., Kingman, S., Pickering, S., & Lester, E. (2008). *Chemical recycling of carbon fibre composites using alcohols under subcritical and supercritical conditions*. *Journal of Supercritical Fluids*, 46(1), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.02.008>
34. Pickering, S.J., Kelly, R.M., Kennerley, J.R., Rudd, C.D. and N.J. Fenwick (2000). *A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites*. *Composites Science and Technology*, 60(4), 509-523. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353899001542>
35. Rahnema, B. (2011) *Reduction of Environmental Impact Effect of Disposing Wind Turbine Blades*. Gotland University. <http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:691565/FULLTEXT01.pdf>.
36. Rentizelas, A., Trivyza, N., Oswald, S., & Siegl, S. (2021). *Reverse supply network design for circular economy pathways of wind turbine blades in Europe*. *International Journal of Production Research*, 0(0), 1–20. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1870016>
37. Reviews, 97(October 2017), 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041>
38. Reviews, 97(October 2017), 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041>
39. Rogers J.K.,(1992). *Modern Plastics International*, No.3, pp.28 https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/116481/PubsOffAculty_1949.pdf?sequence=1&isAllowed=y
40. Roiter, Y., Minko, S., (2005). *AFM Single Molecule Experiments at the Solid-Liquid Interface: In Situ Conformation of Adsorbed Flexible Polyelectrolyte Chains*. *Journal of the American Chemical Society* **127** (45): 15688–15689. [doi:10.1021/ja0558239](https://doi.org/10.1021/ja0558239). PMID 16277495.
41. Rebeiz K.S, Fowel D.W., Raul D.R., (1993). *Recycle 92 5th Annual International Forum and Exposition*, pp. 10/5.1-10/5.10, March
42. Sahin, O., Kirim, Y., 2018. *Material recycling*. In: Dincer, I. (ed) *Comprehensive energy systems*. Elsevier, pp 1018–1042.
43. Schepper, D. M., Van den Heede, P., Van Driessche, I. and Belie D.N. (2014) *'Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete'*, *Materials*, 7(8), pp. 6010–6027. doi: 10.3390/ma7086010 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28788174/>

44. Sasse, F., Emig, G., 1998. *Chemical recycling of polymer materials*. Chem. Eng. Technol. 21(10), 777–789. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4125\(199810\)21:103.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4125(199810)21:103.0.CO;2-L).
 45. Schleisner, L. (2000). *Life cycle assessment of a wind farm and related externalities*. Renewable Energy, 20(3), 279–288. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00123-8)
 46. Sokoli, H. U., Simonsen, M. E., & Søgaaard, E. G. (2017). *Investigation of degradation products produced by recycling the solvent during chemical degradation of fiber-reinforced composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 36(17), 1286–1296. <https://doi.org/10.1177/0731684417707060>
 47. Solino, M., Vazquez, M.X., Prada, A. (2009). *Social demand for electricity from forest biomass in Spain: Does payment periodicity affect the willingness to pay?* Energy Policy, Vol. 37 No. 2, pp.531-540. <https://ideas.repec.org/a/eee/enepol/v41y2012icp798-806.html>
the impact assessment for a recast of the WEEE directive. Bio Intelligence Service,
 48. Sun, H., Guo, G., Memon, S.A., Xu, W., Zhang, Q., Zhu, J. and Q. Xing (2015). *Recycling of carbon fibers from carbon fiber reinforced polymer using electrochemical method*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 78, 10-17
https://www.researchgate.net/publication/281198090_Recycling_of_carbon_fibers_from_carbon_fiber_reinforced_polymer_using_electrochemical_method
- UNEP (2013). *Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, Paris*.
ISBN: 978-92-807-3267-2
<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8423;jsessionid=C41F34F3FD979314B57EB3890C03D040>
49. Vinu, R., Ojha, D.K., Nair, V., 2016. *Polymer pyrolysis for resource recovery*. In: Reedijk, J. (ed) *Reference module in chemistry, molecular sciences and chemical engineering*. Elsevier Inc, Waltham. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.11641-5>.
 50. Vo Dong, P. A., Azzaro-Pantel, C., & Cadene, A. L. (2018). *Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management*. Resources, Conservation and Recycling, 133(August 2017), 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.024>
 51. Wang, Y., Cui, X., Yang, Q., Deng, T., Wang, Y., Yang, Y., Jia, S., Qin, Z., & Hou, X. (2015). *Chemical recycling of unsaturated polyester resin and*

- ## Ελληνική Βιβλιογραφία

- 101

9. Λύτρας, Γ.,. Ανακύκλωση σύνθετων πολυμερικών υλικών. Αθήνα : Πτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
<https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/5459/Litras.pdf?sequence=2>
10. Λιόλιου Γ. (2014). Ανακύκλωση μεταλλικών υλικών. : Πτυχιακή εργασία,
<https://apothesis.lib.hmu.gr/handle/20.500.12688/4185>
11. Μαλεβίτη, Ε. (2013). *Ενεργειακή Διαχείριση και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. Αθήνα. Εκδόσεις: Πεδίο.
12. Μαυροκωστίδου Κ. (2019). Ανακύκλωση Υλικών που Χρησιμοποιούνται σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας : Διπλωματική εργασία , Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
<http://ikee.lib.auth.gr/record/310200/files/GRI-2019-26419.pdf>
13. Νικολόπουλος Α. (2017). *Ανεμογεννήτριες : Δομικά Υλικά και Απαραίτητα Στοιχεία Λειτουργίας κατά τον κύκλο ζωής τους*: πτυχιακή εργασία,
<https://apothesis.eap.gr/archive/download/2d994b1c-a11b-4ae2-a319-c688b74167b0.pdf>
14. Παπαϊωάννου, Ε. Ι. (2017). *Η Επιτάχυνση της Ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την Αντιμετώπιση του Φαινομένου της Κλιματικής Αλλαγής. Θεσμικά Ζητήματα*. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ.
<http://ikee.lib.auth.gr/record/295650/files/GRI-2017-20893.pdf>
15. Πολυχρονίδου, Ε. (2014). *Αντιλήψεις και στάσεις νοικοκυριών σχετικά με τη χρήση ενέργειας και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις*. Μεταπτυχιακή διατριβή. Πειραιάς: Πανεπιστήμιο Πειραιώς
https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/9116/Polixronidou_Irini.pdf?sequence=1&isAllowed=y
16. Πουλάκης, Ι., (1998). *Ανάκτηση πλαστικών υλικών από στερεά απορρίμματα*. Αθήνα : διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
<https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/9968#page/1/mode/2up>
17. Σιμιδάλας, Γ., Σταμόπουλος, Κ. (2018). *Ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα*. Πάτρα: Πτυχιακή εργασία, Τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας.
<http://repository.library.teiwest.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/6395/%ce%91%ce%9d%ce%95%ce%9c%ce%9f%ce%93%ce%95%ce%9d%ce%9d%ce%97%ce%a4%ce%a1%ce%99%ce%95%ce%a3%20%ce%9a%ce%91%ce%99%20%ce%91%ce%99%ce%9f%ce%9b%ce%99%ce%9a%ce%91%20%ce%a0%ce%91%ce%a1%ce%9a%ce%91..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
18. Σουλιντζής Α., «Διηλεκτρική απόκριση σύνθετων υλικών εποξειδικής ρητίνης - ZnO », Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πάτρα, 2008
<https://nemertes.library.upatras.gr/server/api/core/bitstreams/dcc92b57-e0db-4ceb-bc87-e7726ef43d3a/content>

19. Σμυρνιώτης Ν. (2021) *Ανάλυση σύνθετης ενεματικής σύνδεσης σε παράκτιες κατασκευές* : Πτυχιακή εργασία, : https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/53263/Diploma_Thesis_Nikolaos_Smyrniotis.pdf?sequence=1
20. Τζόκας Ι. (2023) *Προσδιορισμός και αξιολόγηση λύσεων κυκλικής οικονομίας για τα περύγια ανεμογεννητριών στο τέλος του κύκλου ζωής τους στην Ελλάδα*. : Πτυχιακή εργασία. <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/5459/Litras.pdf?sequence=2>
21. Φυτίκας, Μ.Δ., Ανδρίτσος, Ν. (2004). *Γεωθερμία. Θεσσαλονίκη*: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
22. Χρυσόχου, Α. (2020). *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Μερικές Εφαρμογές Μοντέλων Βιωματικής Μάθησης για τη Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση. Ορεσιτιάδα: Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Περιβαλλοντική Πολιτική, Εκπαίδευση και Επικοινωνία», Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.* https://repo.lib.duth.gr/jspui/bitstream/123456789/14642/1/ChrysochoouA_2020.pdf

Ιστοσελίδες

1. Ανεμογεννήτριες (Wikipedia 1) <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/11/1285>
2. Ανακύκλωση σκυροδέματος (Wikipedia 2) <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B5%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CE%B5%CE%BD%CE%BD%CE%AE%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%B1>
3. Ανακύκλωση σκυροδέματος (Wikipedia 2) <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%BA%CF%8D%CE%BA%CE%BB%CF%89%CF%83%CE%B7%CF%83%CE%BA%CF%85%CF%81%CE%BF%CE%B4%CE%AD%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82>
4. Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Wikipedia 3) <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CF%8E%CF%81%CE%BF%CF%82%CE%A5%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%BF%CE%BD%CE%BF%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82%CE%A4%CE%B1%CF%86%CE%AE%CF%82%CE%91%CF%80%CE%BF%CF%81%CF%81%CE%B9%CE%BC%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD#:~:text=%CE%9F%CE%B9%20%CE%A7%CF%8E%CF%81%CE%BF%CE%B9%20%CE%A5%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%BF%CE%BD%CE%BF%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE>

[%CF%82%20%CE%A4%CE%B1%CF%86%CE%AE%CF%82%20%CE%91%CF%80%CE%BF%CF%81%CF%81%CE%B9%CE%BC%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD,%CF%84%CE%B1%CF%86%CE%AE%20%CF%84%CF%89%CE%BD%20%CE%B1%CF%80%CE%BF%CF%81%CF%81%CE%B9%CE%BC%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD%20%CF%84%CF%89%CE%BD%20%CF%80%CF%8C%CE%BB%CE%B5%CF%89%CE%BD.](#)

5. Χάλυβας (Wikipedia 4)
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%AC%CE%BB%CF%85%CE%B2%CE%B1%CF%82](#)
6. Απόβλητα ειδών ηλεκτρικού & ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΕΕ)
[https://www.eoan.gr/%CE%B5%CE%BD%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7/%CE%B1%CF%80%CF%8C%CE%B2%CE%BB%CE%B7%CF%84%CE%B1-%CE%B5%CE%B9%CE%B4%CF%8E%CE%BD-%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%8D-%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9/](#)