



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
UNIVERSITY OF PIRAEUS

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»

**«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΠΟ ΔΙΑΘΕΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΕΡΩΝ ΑΓ ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΕΡΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥΣ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΣΗΜΕΝΙΑ ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: **ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΔΕΛΟΥΣΗΣ**

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2021

ΔΗΛΩΣΗ

Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου.

Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού ΜΔΕ ανήκουν στο μεταπτυχιακό φοιτητή και το επιβλέπον μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς τη συναίνεση άλλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του πρωτότυπου μέρους ΜΔΕ ανήκουν στον μεταπτυχιακό φοιτητή και τον επιβλέποντα από κοινού, δηλαδή δεν μπορεί ο ένας από τους δύο να κάνει χρήση αυτού χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον ένα εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο (ή των τριών σε περίπτωση συνεπιβλέποντα) ως συν-συγγραφέων. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του μη συμμετέχοντα στη συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο.

Μεταπτυχιακή φοιτήτρια

Επιβλέπων καθηγητής

Ασημένια Γιαννοπούλου

Βασίλειος Δεδούσης

.....

.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αιολική ενέργεια αναπτύσσεται ραγδαία τις δύο τελευταίες δεκαετίες στην Ευρώπη, καθιστώντας τις ανεμογεννήτριες (Α/Γ) μία από τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ανταποκρινόμενη στην ανησυχία χρήσης συμβατικών καυσίμων και στην αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια. Η πρώτη γενιά των Α/Γ φτάνει στο τέλος της λειτουργικής ζωής και θα αντικατασταθεί από καινούριες Α/Γ, ενώ η συνεχής αύξηση χρόνο με το χρόνο των αιολικών πάρκων και επομένως των Α/Γ, οδηγεί σε ολοένα και μεγαλύτερη χρήση πόρων. Ωστόσο, η ανησυχία επικεντρώνεται στα απόβλητα που προκύπτουν μετά το τέλος ζωής των Α/Γ και στο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από τη διάθεση αυτών των αποβλήτων. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η σωστή διαχείριση των αποβλήτων. Το μέγεθος των αποβλήτων από μία Α/Γ προκύπτει και από την κατασκευή και παραγωγή της, έτσι ώστε μετά το τέλος του κύκλου ζωής τα μέρη μίας Α/Γ να μην απορρίπτονται, αλλά να επαναχρησιμοποιούνται ή να ανακυκλώνονται στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό, μειώνοντας την ποσότητα των αποβλήτων, αλλά και την ανάγκη για χρήση εκ νέου παρθένων υλικών. Σκοπός της εργασίας είναι η καταγραφή των τρεχόντων πρακτικών διάθεσης των μερών των Α/Γ στο τελευταίο στάδιο του κύκλου ζωής τους (παροπλισμός και διάθεση απορριμμάτων εξοπλισμού μερών Α/Γ), εστιάζοντας στα πτερύγια των Α/Γ όπου εντοπίζονται οι μεγαλύτερες δυσκολίες, και η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο στάδιο αυτό μέσω της ανασκόπησης μελετών στη βιβλιογραφία, καθώς και η καταγραφή εναλλακτικών τεχνολογιών ανακύκλωσης που είναι υπό ανάπτυξη για τη βελτίωση της κυκλικότητας.

Λέξεις κλειδιά: Ανεμογεννήτρια (Α/Γ), Διάθεση Απορριμμάτων Μερών Α/Γ, Περιβαλλοντικό Αντίκτυπο, Σύνθετα Υλικά Πτερυγίων, Ανακύκλωση

ABSTRACT

Wind energy has been growing rapidly over the last two decades in Europe, making wind turbines one of the most environmentally friendly renewable energy technologies. responding to the concern of fossil fuels and the growing demand for electricity. The first generation of wind turbines reaches their end of operational life and they will be replaced by newer, while the continuous increase of wind farms, and therefore of wind turbines, leads to a greater use of resources. However, the concern is focused on the waste arising after the end of life of wind turbines and on the environmental impact of the waste disposal. For this reason, proper waste management is necessary. The amount of waste from a wind turbine results also from the construction and production, so after their end of life cycle, the parts of a wind turbine not to be disposed of, but to be reused or recycled to the greatest extent, reducing not only the amount of waste, but also the need for reusing virgin materials. The purpose of this paper is the recording of the current wind turbine waste disposal practices at the last stage of wind turbine life cycle (decommissioning and waste disposal), focusing on the blades where the most difficulties are identified, and the environmental impact assessment at this life cycle stage through the review of studies from the literature, as well as the recording of alternative recycling technologies that are under development for the improvement of circularity.

Key words: Wind turbine, Wind turbine Waste Disposal, Environmental Impact, Composite blade material, Recycling

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1 Πρόλογος.....	6
1.2 Ανεμογεννήτριες	8
1.2.1 Τεχνική περιγραφή	8
1.2.2 Υλικά	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΔΙΑΘΕΣΗ ΜΕΡΩΝ Α/Γ ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΕΡΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥΣ.....	14
2.1 Παροπλισμός.....	14
2.2 Ιεραρχία διαχείρισης αποβλήτων-κυκλική οικονομία	15
2.3 Διαχείριση μερών Α/Γ.....	17
2.4 Διαχείριση πτερυγίων.....	19
2.4.1 Εισαγωγικά.....	19
2.4.2 Ισχύουσα νομοθεσία στην Ευρώπη.....	22
2.4.3 Υφιστάμενες πρακτικές διάθεσης.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΛΕΤΩΝ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΜΕΡΩΝ Α/Γ ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΕΡΑΣ ΖΩΗΣ	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ Α/Γ- ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ.....	48
4.1 Σύνθετες τεχνολογίες ανακύκλωσης.....	48
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

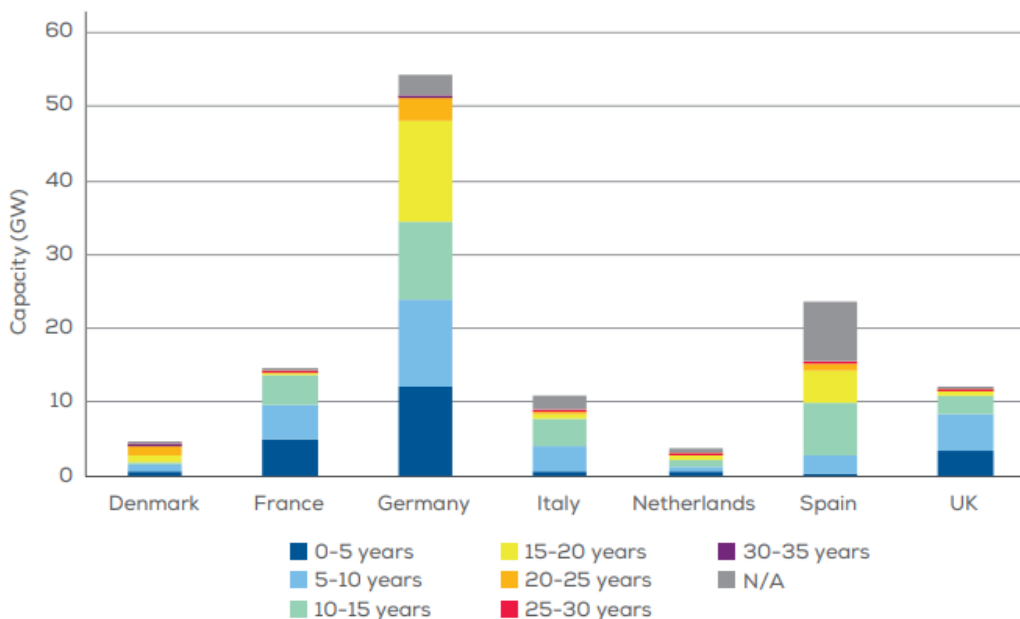
1.1 Πρόλογος

Η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μία πρόκληση απέναντι στην αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια και στη μείωση χρήσης συμβατικών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αιολική ενέργεια είναι μία πηγή ενέργειας που αποτελεί λύση στο πρόβλημα της έλλειψης πόρων, ενώ παράλληλα είναι καθαρή ενέργεια χωρίς να προκαλεί εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Σε παγκόσμιο επίπεδο η εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας παρουσιάζει πολύ υψηλό ποσοστό αύξησης με επακόλουθο την αύξηση των Α/Γ, αλλά και του μεγέθους τους. Το μέγεθος των Α/Γ είναι 100 φορές μεγαλύτερο από ότι ήταν το 1980 με τη διάμετρο του ρότορα να έχει αυξηθεί κατά οκτώ φορές και τα πτερύγια να ξεπερνούν σε μήκος τα 60m. Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) έχουν κατά μέσο όρο διάρκεια ζωής 20-25 χρόνια. Όμως μεγάλη ανησυχία δημιουργεί το που και πως θα διατεθούν μετά το πέρας ζωής τους, καθώς όσο μεγαλώνει ο αριθμός των Α/Γ μεγαλώνει και το μέγεθος τους ταυτόχρονα, εντείνοντας το πρόβλημα της ποσότητας των αποβλήτων (Larsen, 2009).

Σήμερα υπάρχουν 34,000 Α/Γ που έχουν εγκατασταθεί στην Ευρώπη για πάνω από 15 χρόνια και αναπαριστούν 36GW της χερσαίας εγκατεστημένης ισχύος. Από τα 36GW, τα 9 GW είναι 20-24 χρόνων και γύρω στο 1 GW από 25 χρόνων και πάνω. Το γεγονός αυτό δημιουργεί μία μεγάλη αγορά παροπλισμένων Α/Γ μέσα στην επόμενη δεκαετία.

Σχήμα 1: Ηλικία χερσαίων Α/Γ στην Ευρώπη



Πηγή: WindEurope, Cefic & EuCIA (2020)

Οι πιο ώριμες αγορές χειρσαίας αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη είναι η Δανία, η Γερμανία, η Ισπανία και η Ολλανδία. Οι χώρες αυτές διαθέτουν Α/Γ που λειτουργούν πάνω από 15 χρόνια. Συγκεκριμένα, η Γερμανία έχει ποσοστό Α/Γ με διάρκεια ζωής πάνω από 15 χρόνια σε ποσοστό 33% που αντιστοιχεί σε 17GW, η Ισπανία 33% (5GW), η Δανία 57% (2.74GW) και η Ολλανδία με 21% (0.6 GW) (WindEurope, Cefic, EuCIA 2020)

Η συνεχής αύξηση χρόνο με το χρόνο των αιολικών πάρκων και επομένως των Α/Γ οδηγεί σε ολοένα και μεγαλύτερη χρήση πόρων και για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η σωστή διαχείριση των αποβλήτων. Το μέγεθος των αποβλήτων από μία Α/Γ προκύπτει και από την κατασκευή και παραγωγή της, έτσι ώστε μετά το τέλος του κύκλου ζωής τα μέρη μίας Α/Γ να μην απορρίπτονται, αλλά να επαναχρησιμοποιούνται ή να ανακυκλώνονται στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό, μειώνοντας την ποσότητα των αποβλήτων, αλλά και την ανάγκη για χρήση εκ νέου παρθένων υλικών (Karavida, 2015) .

Τα πτερύγια των Α/Γ είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά, τα οποία ενισχύουν την απόδοση της αιολικής ενέργειας επιτρέποντας πιο ελαφριά και πιο μακριά πτερύγια με βελτιστοποιημένο αεροδυναμικό σχήμα. Σήμερα ο αριθμός των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται για την αιολική ενέργεια φτάνει τα 2.5 εκατομμύρια τόνους παγκοσμίως. Η WindEurope εκτιμά ότι στην Ευρώπη περίπου 2GW θα οδηγηθούν σε repowering και 2GW θα παροπλιστούν πλήρως μέχρι το 2023. Αυτό σημαίνει ότι 4,700 Α/Γ αναμένεται να παροπλιστούν μέχρι το 2023, δηλαδή 14,000 πτερύγια Α/Γ, που ισοδυναμεί με 40,000-60,000 τόνους.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις του EuCIA, τα απόβλητα των πτερυγίων των Α/Γ θα αποτελούν το 10% του συνολικού μεγέθους των αποβλήτων από θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά μέχρι το 2025 (περίπου 5% των εκτιμώμενων σύνθετων αποβλήτων που συνδυάζουν θερμοσκληρυνόμενα και θερμοπλαστικά), που αντιστοιχεί σε 66,000 τόνους θερμοσκληρυνόμενων σύνθετων υλικών. Το γεγονός αυτό καθιστά προτεραιότητα της βιομηχανίας Α/Γ την ανακύκλωση των σύνθετων υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένα τα πτερύγια. Αυτό απαιτεί υλικοτεχνικές και τεχνολογικές λύσεις για αποσυναρμολόγηση, συλλογή, μεταφορά και διαχείριση των αποβλήτων.

Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι η πρακτική εμπειρία στην ανακύκλωση των Α/Γ, ειδικά των υπεράκτιων, είναι περιορισμένη και αναμένεται σημαντικός χρόνος μέχρι την απόκτηση πρακτικής εμπειρίας στην αποσυναρμολόγηση, στο διαχωρισμό, τη διάθεση και την ανακύκλωση των ενεργειακών αυτών συστημάτων (Larsen, 2009).

1.2 Ανεμογεννήτριες

1.2.1 Τεχνική περιγραφή

Η αιολική ενέργεια παράγεται με τη χρήση των Α/Γ που είναι εξοπλισμένες με τα πτερύγια, τα οποία κινούνται από τον άνεμο. Οι Α/Γ μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της γεννήτριας.

Μία τυπική Α/Γ Οριζόντιου Άξονα αποτελείται από τέσσερα βασικά υποσυστήματα:

Δρομέας

Ο δρομέας (ρότορας) συνήθως αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια και την πλήμη. Τα πτερύγια συνδέονται με τον κινητήριο άξονα χαμηλής ταχύτητας μέσω της πλήμνης.

Άτρακτος

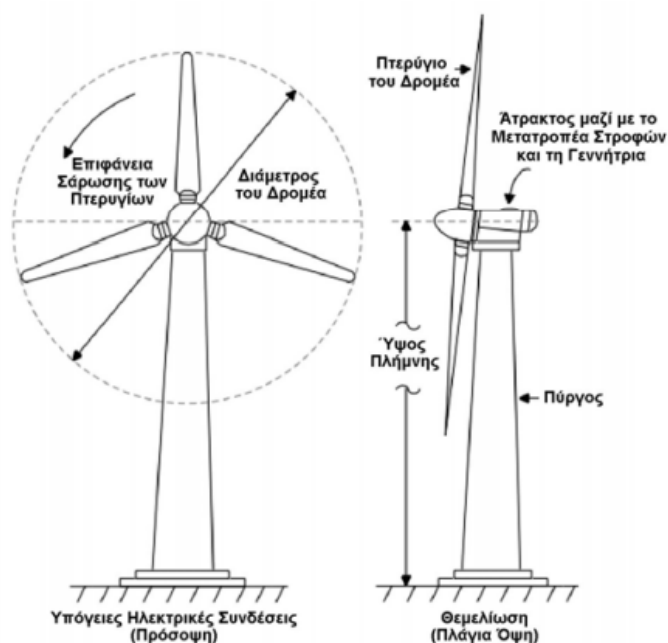
Η άτρακτος (σύστημα μετάδοσης της κίνησης) αποτελείται από ένα μετατροπέα στροφών, τη γεννήτρια, κάλυμμα ολόκληρης της άτρακτου, άξονες και συνδέσμους. Συνήθως στην άτρακτο περιλαμβάνονται και δισκόφρενο και σύστημα εκτροπής.

Πύργος και θεμελίωση

Η θεμελίωση στηρίζει την άτρακτο και το δρομέα.

Ηλεκτρικοί ελεγκτές, καλωδιώσεις, εξοπλισμός εποπτείας και ελέγχου

Σχήμα 2: Α/Γ οριζόντιου άξονα



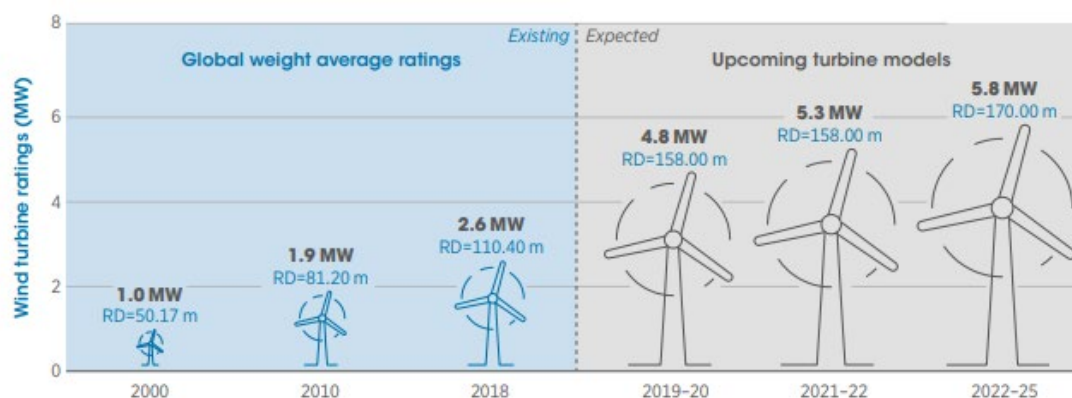
Πηγή: ΚΑΠΕ (2001)

Μία χερσαία Α/Γ έχει μία διάμετρο ρότορα μεταξύ 17m και 100m για ονομαστική ισχύ 0.75-3MW, ενώ μία υπεράκτια Α/Γ έχει μία διάμετρο ρότορα από 100m έως 150m για ονομαστική ισχύ 3-10MW (Lefeuvre, 2019). Το μέγεθος των Α/Γ συνεχώς αυξάνεται από το 1980, φτάνοντας ονομαστική ισχύ τα 10MW και το μέγεθος των Α/Γ θα συνεχίσει να αυξάνεται φτάνοντας ονομαστική ισχύ των 20MW με διάμετρο ρότορα που θα φτάνει τα 250m. Οι πρώτες Α/Γ ήταν μικρές και είχαν πτερυγία κατασκευασμένα από ξύλο, μέταλλο ή ύφασμα. Έπειτα ενισχυμένα πολυμερή με ίνες γυαλιού (Glass Fibre Reinforced Polymer GFRP) χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή πτερυγίων μεγαλύτερων των 30m. Τα σύνθετα υλικά έχουν χαμηλότερη μάζα, καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση και αντοχή στην κόπωση σε σύγκριση με το μέταλλο και το ξύλο, ενώ επιτυγχάνεται το ακριβές σχήμα για τη βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης (Lefeuvre, 2019).

Το μέγεθος και ο τύπος των Α/Γ που έχουν εγκατασταθεί στην Ευρώπη διαφέρουν σημαντικά από χώρα σε χώρα, Κατά μέσο όρο οι χερσαίες Α/Γ με τη μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ έχουν εγκατασταθεί στη Φιλανδία με κατά μέσο όρο 4.3MW, ενώ η Ελλάδα έχει το μικρότερο μέσο όρο ονομαστικής ισχύος 2.3 MW. Η μέση τιμή ονομαστικής ισχύος στην Ευρώπη είναι 3.1MW. Το 2019 εγκαταστάθηκαν υπεράκτιες Α/Γ με ονομαστική ισχύ 7.2MW. Η Πορτογαλία και το Βέλγιο έχει Α/Γ με την υψηλότερη μέση ονομαστική ισχύ 8.4MW. Υπεράκτια Α/Γ Vestas V164-8.4 MW με διάμετρο ρότορα 164m εγκαταστάθηκε στη Γερμανία και στο Βέλγιο. Η μεγαλύτερη Α/Γ στον κόσμο GE's Haliade-X έχει ονομαστική ισχύ 12MW, εγκαταστάθηκε δοκιμαστικά στο Ρότερνταμ το 2019 και η εμπορευματοποίηση της αναμένεται μέσα στο 2021.

Οι κύριες παράμετροι που υποδηλώνουν τη βελτίωση της τεχνολογίας των Α/Γ είναι η διάμετρος του ρότορα και το ύψος της πλήμνης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αναμενόμενη εξέλιξη της τεχνολογίας των Α/Γ με μεγαλύτερες Α/Γ μεγαλύτερης ονομαστικής ισχύος.

Σχήμα 3: Σύγκριση τωρινών μοντέλων χερσαίων Α/Γ με μελλοντικών



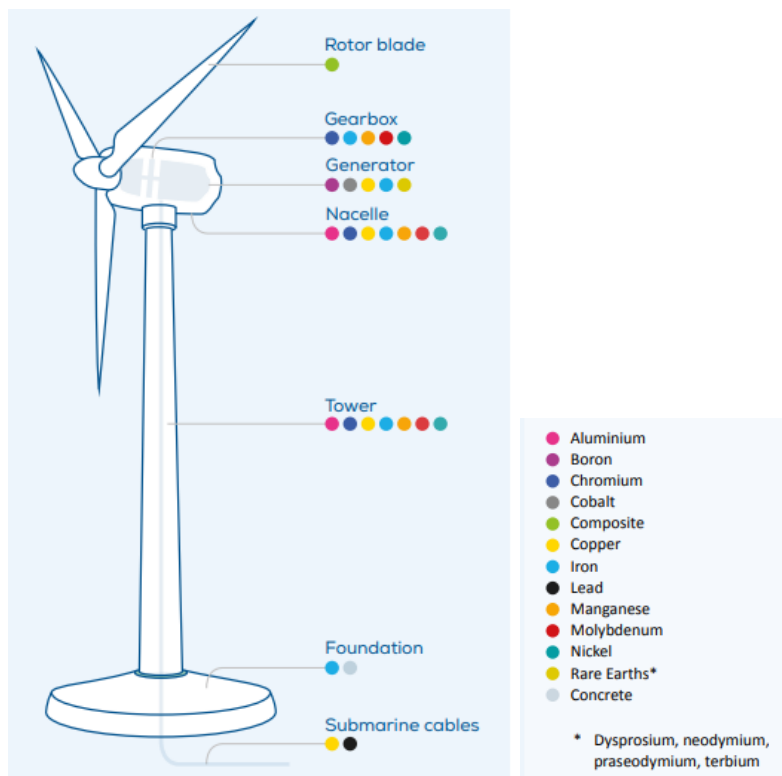
Πηγή: IRENA (2019)

1.2.2 Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε μία Α/Γ εξαρτώνται από τα διαφορετικά μοντέλα και τον κατασκευαστή, όπως επίσης και από τις απαιτήσεις του πελάτη. Σε μία Α/Γ ENERCON E-115 βάρους εξαρτημάτων 365 τόνων (χωρίς τον πύργο), το 60% του βάρους αναπαριστά χάλυβα και σίδηρο, ενώ πολυμερή υλικά (πτερύγια ρότορα, αφρός PET, αγωγοί καλωδίων) αναπαριστούν το 27% του βάρους.

Η θεμελίωση κατασκευάζεται συνήθως από σκυρόδεμα και χάλυβα αντιπροσωπεύοντας περίπου το 80% της συνολικής δομής της Α/Γ. Το αμέσως μεγαλύτερο μέρος σε σχέση με το βάρος είναι ο πύργος, ο οποίος κατασκευάζεται κυρίως από χάλυβα ή σκυρόδεμα. Η άτρακτος αποτελείται κυρίως από χάλυβα και χαλκό. Ο πύργος κατασκευάζεται από χάλυβα ή σκυρόδεμα και τα πτερύγια από σύνθετα υλικά (Liu & Barlow, 2017).

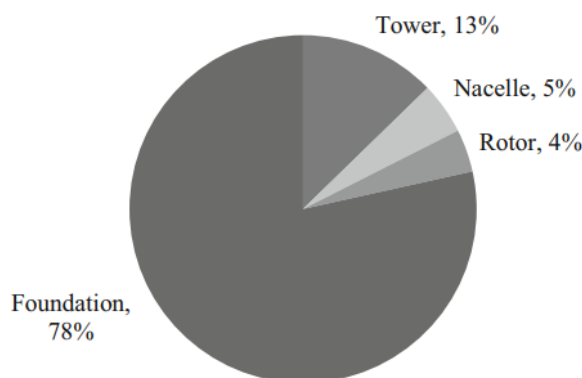
Σχήμα 4: Πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται σε μία Α/Γ



Πηγή: Wind Europe (2020)

Μέταλλα όπως ο χάλυβας, το αλουμίνιο και ο χαλκός αποτελούν το 94% του συνολικού βάρους χωρίς τη θεμελίωση. Το υπόλοιπο 6% αφορά υλικά όπως το πλαστικό, το καουτσούκ και σύνθετα υλικά (πολυμερή ενισχυμένα με ίνες), τα οποία βρίσκονται κυρίως στα πτερύγια. Ενδεικτικά, στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το ποσοστό βάρους κάθε μέρους μίας χερσαίας Α/Γ Vestas V82 σε σχέση με το συνολικό της βάρος.

Σχήμα 5: Ποσοστό βάρους μερών μίας χερσαίας A/Γ Vestas V82



Πηγή: **Beauson & Brøndsted (2016)**

Ενδεικτικά η συνολική μάζα μίας ανεμογεννήτριας Vestas μοντέλου V126 με ονομαστική ισχύ 3.3MW διαμορφώνεται ως εξής:

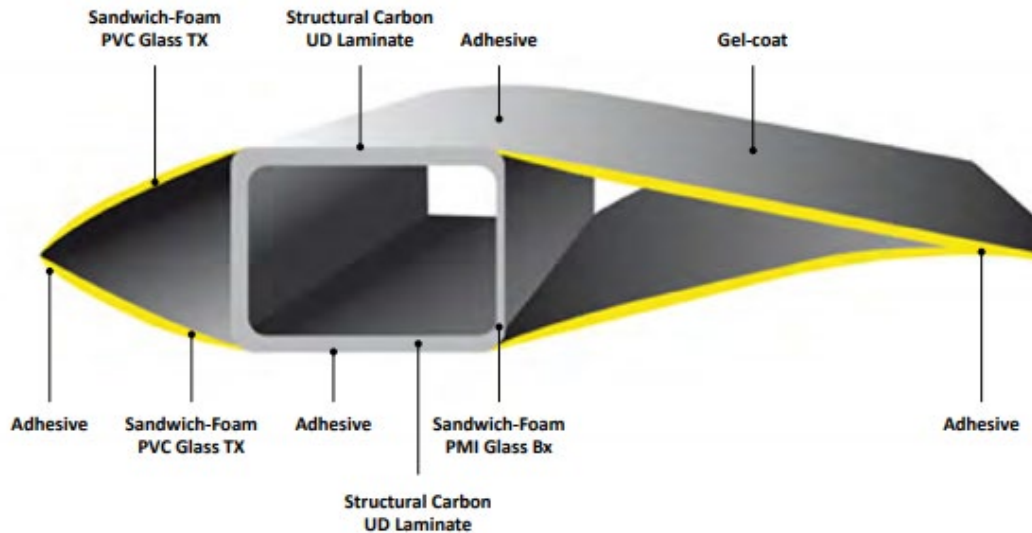
- Υλικά χάλυβα και σιδήρου 88%
- Αλουμίνιο και κράματα 1%
- Χαλκός και κράματα 1%
- Πολυμερή υλικά 4%
- Σύνθετα υλικά γυαλιού/άνθρακα 5%
- Ηλεκτρονικά/ηλεκτρικά <1%
- Καύσιμα και υγρά <1%
- Δεν προσδιορίζονται 0.2% (CWPRenewables, 2016)

Τα πτερύγια αποτελούν μία σύνθετη δομή από διάφορα υλικά με διαφορετικές ιδιότητες. Ένα πτερύγιο μήκους 40m ζυγίζει περίπου 8,4t (Beauson, et al., 2014). Υπάρχει μια διακύμανση στη σύνθεση των υλικών που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια ανάλογα με τον τύπο του πτερυγίου και τον κατασκευαστή. Σε γενικές γραμμές, όμως, τα πτερύγια κατασκευάζονται από (ETIPWind, 2020):

- Ίνες ενίσχυσης (γυαλί, άνθρακας, αραμίδιο ή βασάλτης)
- Μία πολυμερική μήτρα πχ θερμοσκληρυνόμενα (εποξειδικά, πολυεστέρες, βινυλεστέρες, πολυουρεθάνη) ή θερμοπλαστικά
- Μία δομή sandwich πχ ξύλο balsa ή αφρώδη υλικά όπως πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET)

- Επιστρώσεις πχ πολυεστέρας (PE), πολυουρεθάνη (PUR)
- Δομικά συγκολλητικά (adhesives) όπως εποξικά, πολυουρεθάνη(PUR)
- Μέταλλα πχ χαλκός ή αλουμίνιο, χάλυβας

Σχήμα 6: Γενική σύνθεση ενός πτερυγίου Α/Γ



Πηγή: ETIPWind (2020)

Η Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα Τεχνολογίας για τη Βιώσιμη Χημεία (SusChem) αναφέρει ότι η παραγωγή ενισχυμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού (Glass Fibre Reinforced Polymer GFRP) και ινών άνθρακα (Carbon Fibre Reinforced Polymer CFRP) στην Ευρώπη έχει αυξηθεί την τελευταία δεκαετία σε ποσοστό 2.5 %, ενώ και παγκοσμίως σημειώνεται μία σταθερή αύξηση στην αγορά. Η παγκόσμια αγορά των σύνθετων υλικών εστιάζει κατά 85% στο GFRP και συγκεκριμένα η ευρωπαϊκή αγορά αποτελεί την τρίτη μεγαλύτερη αγορά σε GFRP παγκοσμίως με ποσοστό 15%. Ο τομέας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ο πιο ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας που χρησιμοποιεί σύνθετα υλικά. Η χρήση των σύνθετων αυτών υλικών αναμένεται να αυξηθεί, καθώς η ανάπτυξη Α/Γ συνεχίζει να εξελίσσεται με Α/Γ ακόμα μεγαλύτερου μεγέθους. Το GFRP αποτελεί το κύριο ενισχυτικό υλικό των πτερυγίων μίας Α/Γ, ενώ το CFRP επίσης χρησιμοποιείται, αλλά σε μικρότερο βαθμό.

Τα σύνθετα πολυμερή είναι υλικά τα οποία ορίζονται από το συνδυασμό μίας πολυμερικής μήτρας (θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη ή θερμοπλαστική ρητίνη) και ενός ενισχυτικού παράγοντα που συνήθως είναι ίνες γυαλιού, ίνες άνθρακα ή φυσικές ίνες και αναφέρονται ως σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες (FRP). Τα ελαφριά αυτά υλικά βοηθούν στον ευλύγιστο σχεδιασμό μεγάλων εξαρτημάτων, όπως τα πτερυγία των Α/Γ (SUSCHEM, 2018). Τα FRP χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πτερυγίων των Α/Γ λόγω της υψηλής αναλογίας αντοχή-βάρους και της μεγάλης ανθεκτικότητας (SUSCHEM, 2018). Το υλικό αυτό επιλέγεται για ευκολία κατασκευής αεροδυναμικού σχήματος και υψηλής μηχανικής απόδοσης (HAO, et al.,

2019; Liu & Barlow, 2017). Τα σύνθετα αυτά υλικά αποτελούν πάνω από το 90% του βάρους του πτερυγίου (Liu & Barlow, 2017). Η αναλογία κατά βάρος είναι 60-70% ενισχυτικές ίνες και 30-40% πολυμερική μήτρα (WindEurope, Cefic, EuCIA, 2020). Η διαχείριση των υλικών αυτών καθίσταται δύσκολη, διότι δεν υπάρχουν ακόμα ώριμες τεχνολογίες ανακύκλωσης.

Το υλικό GFRP ως τελική χρήση χρησιμοποιείται κατά κόρον στην κατασκευή των πτερυγίων Α/Γ. Τα παλαιότερα πτερύγια είναι κατασκευασμένα συνήθως από ενισχυμένο πολυμερές με ίνες γυαλιού (GFRP) (HAO, et al., 2019). Μέχρι στιγμής το CFRP έχει αντικαταστήσει μερικώς το GFRP σε κάποια δομικά στοιχεία κατασκευής, (πχ spar caps) για πτερύγια μεγαλύτερα των 45m. Το CFRP αποτελεί επίσης κύρια τελική χρήση, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Εάν χρησιμοποιηθούν οι ίνες άνθρακα εξ ολοκλήρου για την κατασκευή των πτερυγίων αντικαθιστώντας τις ίνες γυαλιού θα μειωθεί κατά πολύ η συνολική μάζα του πτερυγίου (HAO, et al., 2019). Η συμμετοχή του CFRP θα συνεχίσει να αυξάνεται τα επόμενα χρόνια, το οποίο μπορεί να έχει περιβαλλοντικά οφέλη εάν το CFRP χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση ινών άνθρακα (HAO, et al., 2019).

Αυτή τη στιγμή τα περισσότερα πτερύγια είναι κατασκευασμένα από ενισχυμένα πολυμερή με ίνες γυαλιού. Οι κύριες ρητίνες που χρησιμοποιούνται είναι υψηλής ποιότητας εποξική ρητίνη ή πολυεστερική (Liu & Barlow, 2017).

Η βιομηχανία αιολικής ενέργειας αναμένεται να παράγει ακόμα μεγαλύτερες Α/Γ μέχρι και 10MW με πρωταρχικό στόχο τη μείωση του βάρους, καθώς η μάζα του πτερυγίου αυξάνεται εις τον κύβο της ακτίνας του ρότορα (Igwemezie, et al., 2019). Αυτό κάνει το CFRP ένα ιδανικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί περισσότερο μελλοντικά έχοντας τα πλεονεκτήματα της υψηλής ειδικής ακαμψίας και της μειωμένης ευαισθησίας στην κόπωση (HAO, et al., 2019). Από την άλλη, η αύξηση της συμμετοχής του υλικού στην κατασκευή των πτερυγίων των Α/Γ προβλέπεται να έχει σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Μειονέκτημα του CFRP είναι και το υψηλό κόστος (Liu & Barlow, 2017).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΔΙΑΘΕΣΗ ΜΕΡΩΝ Α/Γ ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΕΡΑΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥΣ

2.1 Παροπλισμός

Οι Α/Γ αποτελούν μία τεχνολογία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο (Ortegon, et al., 2013) και οι εκτιμήσεις του κύκλου ζωής δείχνουν ότι οι Α/Γ επιστρέφουν την ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής 23 με 57 φορές (Jensen, 2018). Η διάρκεια ζωής μίας Α/Γ κυμαίνεται από 20 μέχρι 30 χρόνια και παρότι η διάρκεια ζωής είναι μεγάλη, κάποια στιγμή θα φτάσει στο τέλος ζωής της. (Ortegon, et al., 2013). Κατά τη διάρκεια ζωής μέρη της Α/Γ μπορεί να επισκευαστούν ή να αντικατασταθούν μετά από έλεγχο, κάτι το οποίο μπορεί να συμβεί πολλές φορές μέσα στον κύκλο ζωής. Για παράδειγμα, τα πτερύγια μπορεί να υποστούν βλάβες που προκαλούνται από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλοι λόγοι που μπορεί να οδηγήσουν σε παροπλισμό πέραν της ηλικίας ή των βλαβών. Ένα αιολικό πάρκο μπορεί να ενισχυθεί εκ νέου με καινούριες και μεγαλύτερες Α/Γ (repowering) (Beauson & Brøndsted, 2016). Όταν μία Α/Γ φτάσει στο τέλος ζωής της οι εναλλακτικές είναι δύο: repowering ή παροπλισμός. Στην περίπτωση του repowering, το αιολικό πάρκο συνεχίζει να λειτουργεί, οι ανεμογεννήτριες αφαιρούνται και ο παλιός εξοπλισμός αντικαθίσταται από καινούρια τεχνολογία. (Ortegon, et al., 2013)

Στην περίπτωση του παροπλισμού ο αιολικός σταθμός παύει να λειτουργεί, αφαιρείται ολοκληρωτικά και γίνεται αποκατάσταση του χώρου στην πρότερη μορφή του (WindEurope, 2020). Η θεμελίωση μπορεί να παραμείνει στην τοποθεσία ως έχει ή να καταστραφεί για την αποκατάσταση του χώρου. Σε κάποιες περιπτώσεις ο περιβαλλοντικός κίνδυνος του να μείνει η θεμελίωση στο έδαφος μπορεί να είναι μικρότερος από ότι το περιβαλλοντικό αντίκτυπο στην περίπτωση της αφαίρεσης της, καθώς απαιτούνται η εκσκαφή, η διάλυση, η επεξεργασία και η μεταφορά (Beauson & Brøndsted, 2016).

Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει παγκόσμιο πρότυπο για τον παροπλισμό των χερσαίων Α/Γ. Ωστόσο ο οργανισμός Wind Europe εξέδωσε το 2020 έναν Οδηγό για την αποσυναρμολόγηση και τον παροπλισμό των αιολικών πάρκων. Οι κατευθυντήριες έχουν στόχο το βιώσιμο παροπλισμό των Α/Γ. Ωστόσο, το έγγραφο δεν έχει δεσμευτικό χαρακτήρα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γενικές κατευθύνσεις, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή και Εθνική νομοθεσία (ευρωπαϊκών χωρών-κλειδιά) για τη διαχείριση των αποβλήτων και την αποκατάσταση της τοποθεσίας. Το σχέδιο παροπλισμού αποτελεί ένα απαραίτητο εργαλείο για τον σωστό παροπλισμό ενός αιολικού πάρκου και αντανάκλα εθνική, και σε κάποιες περιπτώσεις, περιφερειακή ή τοπική νομοθεσία. Η διάλυση (αποσυναρμολόγηση) εξαρτάται από διάφορες εθνικές κατευθυντήριες για κατεδάφιση. Στο Σχέδιο περιλαμβάνονται μέθοδοι κοπής και διαχωρισμού, φόρτωση και μεταφορά με απαιτήσεις πάνω στην υγεία και την ασφάλεια για βιώσιμο παροπλισμό. Επίσης στο Σχέδιο περιλαμβάνονται η διαχείριση των πόρων (μέταλλα, έλαια, σπάνιες γαίες, σύνθετα υλικά, σκυρόδεμα) και μέθοδοι ανακύκλωσης των πόρων. Τέλος στο Σχέδιο περιλαμβάνεται και η αποκατάσταση της τοποθεσίας. Κατά τη διάρκεια των προπαρασκευαστικών διεργασιών για την

αφαίρεση όλων των ρευστών λειτουργίας χωρίς υπολείμματα, εκπομπές στα υπόγεια ύδατα και στο έδαφος δεν αναμένονται, ή σε πολύ μικρό επίπεδο. Η υγεία και η ασφάλεια αποτελεί προαπαιτούμενο κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας παροπλισμού.

Το 2018 παροπλίστηκαν 451MW αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη, ενώ το 2019 υπήρξε μία σημαντική πτώση φτάνοντας 178MW (174 στην ξηρά και 4 στη θάλασσα). Συγκεκριμένα, στη Γερμανία παροπλίστηκαν 97MW, στην Αυστρία 32 MW, στη Δανία 32 MW, στο Ηνωμένο Βασίλειο 17 MW και στη Γαλλία 0.2 MW.

Η νέα εγκατεστημένη ισχύς των χερσαίων αιολικών πάρκων στην Ευρώπη για το 2019 ήταν 11.7GW, εκ των οποίων μόνο 185MW προέρχονται από repowering. Η πλήρης ανακατασκευή (repowering) αφορά κυρίως στη Γερμανία και ακολουθούν Ελλάδα, Ηνωμένο Βασίλειο και Αυστρία. Οι κύριοι λόγοι στους οποίους αποδίδεται το μικρό ποσοστό παροπλισμού και repowering οφείλεται σε σημαντικούς παράγοντες, όπως το νομοθετικό πλαίσιο και η υψηλή αξία χονδρικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η πρώτη γενιά των Α/Γ φτάνει στο τέλος του κύκλου ζωής τους συνιστώντας ένα σημαντικό πρόβλημα που αφορά στη διάθεση των μερών των Α/Γ και συγκεκριμένα των πτερυγίων. Ένα μεγάλο μέρος των εξαρτημάτων αυτών αποτελείται από σύνθετα υλικά και η βιομηχανία ανακύκλωσης αναμένεται να ασχοληθεί με την εκτίμηση των επιπτώσεων των αποβλήτων αυτών. Το ενδιαφέρον στρέφεται όλο και περισσότερο στο που θα καταλήξουν τα απόβλητα των πτερυγίων όταν οι Α/Γ θα παροπλιστούν. Προς το παρόν το μεγαλύτερο μέρος των πτερυγίων στέλνονται σε ΧΥΤΑ, αυξάνοντας κατά πολύ το περιβαλλοντικό αντίκτυπο, καθώς η ταφή των πτερυγίων δεν αποτελεί μία ιδανική περιβαλλοντική λύση (Liu & Barlow, 2016).

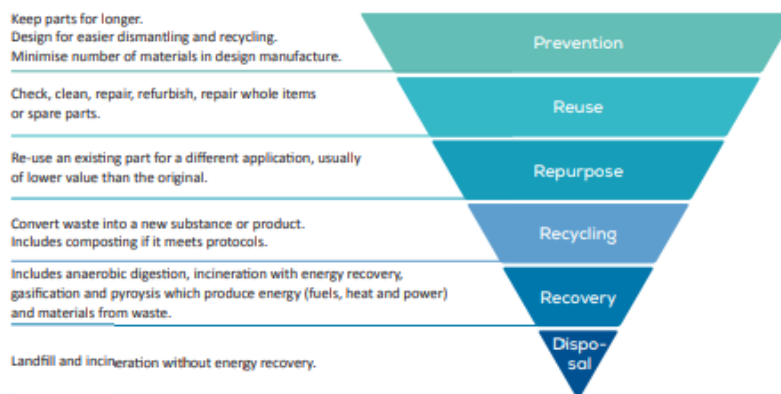
Σε ερευνητικό επίπεδο, η αξιολόγηση του κύκλου ζωής των Α/Γ έχει εστιαστεί κυρίως στις φάσεις εξόρυξης των πρώτων υλών, κατασκευής και διατήρησης/λειτουργίας, αφήνοντας το τελευταίο στάδιο παροπλισμού και διάθεσης των μερών μίας Α/Γ εκτός της εκτίμησης του περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Ο σχεδιασμός της διαχείρισης των Α/Γ που ολοκληρώνουν τον κύκλο ζωής τους είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τη μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου (Ortegon, et al., 2013) Ακόμα δεν υπάρχει η πρακτική εμπειρία παροπλισμού και ανακύκλωσης των Α/Γ, ειδικά των υπεράκτιων, και αναμένεται περίπου μία 20ετία για την απόκτηση πρακτικής εμπειρίας σε αυτό το κομμάτι. Η κατανόηση εις βάθος των εφαρμόσιμων μεθόδων ανακύκλωσης και η βελτίωση των μεθόδων ανακύκλωσης συγκεκριμένων μερών των Α/Γ κρίνονται απαραίτητα για την καλύτερη αξιολόγηση του σταδίου διαχείρισης των Α/Γ μετά το πέρας ζωής τους.

2.2 Ιεραρχία διαχείρισης αποβλήτων-κυκλική οικονομία

Η Ευρωπαϊκής Οδηγία 2008/98/EC θέτει τις βασικές έννοιες και ορισμούς που σχετίζονται με τη διαχείριση των αποβλήτων και καθορίζεται η ιεραρχία στη διαχείριση αποβλήτων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ιεραρχία της διαχείρισης των

αποβλήτων. Στην κορυφή της πυραμίδας βρίσκεται το ιδανικότερο και κατεβαίνοντας μειώνεται. Για παράδειγμα η αποτροπή ενός προϊόντος να φτάσει στο τέλος ζωής του είναι προτιμότερο από την ανακύκλωση, η οποία με τη σειρά της είναι πιο επιθυμητή από τη διάθεση.

Σχήμα 7: Ιεραρχία Διαχείρισης Αποβλήτων



Πηγή: ETIPWind (2020)

Πρόληψη (Prevention)

Η πρόληψη βρίσκεται υψηλότερα στην ιεραρχία, καθώς ο αρχικός σχεδιασμός ενός προϊόντος είναι αυτός που μπορεί να καθορίσει το βαθμό της κυκλικότητας του. Πρωταρχικός στόχος είναι η δυνατότητα επέκτασης ζωής του προϊόντος. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί είτε συνδυάζοντας το με τις απαιτήσεις εφαρμογής είτε με προκαθορισμό πιθανής εφαρμογής δεύτερης ζωής μέσω καθορισμού επαναχρησιμοποίησης στο μέλλον ή εφαρμογές επαναπροσδιορισμού. Επόμενος στόχος κατά τη φάση σχεδιασμού είναι ο έλεγχος της φάσης του προϊόντος μετά τα το τέλος ζωής του, όπως για παράδειγμα η διασφάλιση της ανακύκλωσης, κάτι το οποίο μπορεί να καθοριστεί εξαρχής από την επιλογή των υλικών του προϊόντος, το συνδυασμό των υλικών, το σχεδιασμό του προϊόντος λαμβάνοντας υπόψη την αποσυναρμολόγηση του και τις ιδιότητες διαχωρισμού των υλικών. (SUSCHEM, 2018)

Επαναχρησιμοποίηση (Reuse) και Επαναπροσδιορισμός (Repurpose)

Ο σχεδιασμός θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ενσωμάτωση ανταλλακτικών μερών ή προϊόντα δεύτερης ζωής σε νέα προϊόντα.

Ανακύκλωση

Όταν δεν είναι εφικτός ο επαναπροσδιορισμός (repurposing), η αμέσως επόμενη καλύτερη μέθοδος είναι η ανακύκλωση. Τα απόβλητα μετατρέπονται σε μία νέα ουσία ή προϊόν.

Ανάκτηση

Στην περίπτωση της ανάκτησης τα απόβλητα μετατρέπονται σε καύσιμο ή θερμική ενέργεια, αφού αφαιρεθούν όλα τα μεμονωμένα εξαρτήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά.

Υγειονομική ταφή

Η υγειονομική ταφή είναι μία διαδικασία η οποία οδηγεί σε πλήρη απώλεια των πόρων και καλό είναι να μην αποτελεί εναλλακτική λύση της διαχείρισης των αποβλήτων.

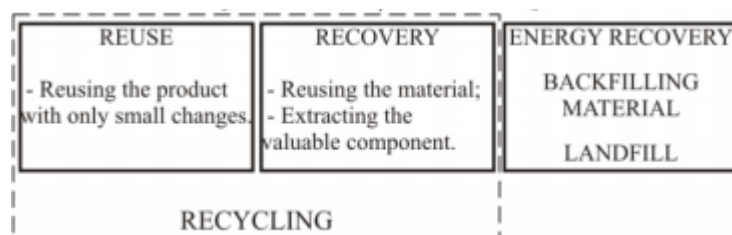
Αποτέφρωση

Η καύση χρησιμοποιείται για την ανάκτηση ενέργειας και αποτελεί μία μέθοδο που δεν προτιμάται, καθώς οδηγεί σε σημαντική απώλεια του υλικού.

2.3 Διαχείριση μερών Α/Γ

Οι Α/Γ έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν κατά μέσο όρο 20 χρόνια και κατά τη διάρκεια ζωής τους τα πτερύγια μπορεί να ελεγχθούν και να επισκευαστούν λόγω διάβρωσης των άκρων, πρόσκρουσης ή άλλων βλαβών. Κάποιες Α/Γ μπορεί να καταστραφούν ή και κάποιες μπορεί να αντικατασταθούν από καινούριες Α/Γ. Ανάλογα με το λόγο παροπλισμού μίας Α/Γ υπάρχουν τρεις βασικές πρακτικές διαχείρισης. Οι πρώτες δύο επιλογές (επαναχρησιμοποίηση και ανάκτηση) συγκαταλέγονται στην ανακύκλωση και η τρίτη επιλογή περιλαμβάνει όλες τις λύσεις που δεν γίνεται ανακύκλωση (ανάκτηση ενέργειας, ταφή). Στην τρίτη επιλογή η ενέργεια ανακτάται από τα απόβλητα των πτερυγίων ή αλλιώς στέλνονται σε ΧΥΤΑ.

Σχήμα 8: Λύσεις στο τέλος του κύκλου ζωής των σύνθετων υλικών



Πηγή: **Beauson, et al. (2014)**

Βάσει του Ευρωπαϊκού πλαισίου αποβλήτων ανακύκλωση ορίζεται ως κάθε λειτουργία ανάκτησης με την οποία τα απόβλητα επεξεργάζονται εκ νέου σε προϊόντα, υλικά ή ουσίες για τον ίδιο σκοπό ή για άλλο. Αυτό περιλαμβάνει την επεξεργασία του οργανικού υλικού, αλλά όχι την ανάκτηση ενέργειας και την επανεπεξεργασία σε υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως καύσιμα ή για συμπλήρωση λειτουργιών (Beauson, et al., 2014).

Το τέλος ζωής ενός υλικού είναι σημαντικό να διαχωριστεί από το τέλος ζωής ενός μέρους ενός προϊόντος ή ενός προϊόντος. Το τέλος ζωής ενός μέρους ή ενός προϊόντος φτάνει όταν πια δεν μπορεί να εξυπηρετήσει τον αρχικό σκοπό του, ενώ το τέλος ζωής ενός υλικού φτάνει όταν πια καμία αξία δεν μπορεί να εξαχθεί από αυτό (SUSCHEM, 2018).

Η καλύτερη στρατηγική είναι ο συνδυασμός του σχεδιασμού, της συντήρησης, της επισκευής και της κατάλληλης τεχνολογίας διασφαλίζοντας τη διάρκεια ζωής στο μέγιστο, ενώ η μέγιστη αξία των υλικών ανακτάται κατά τη διάρκεια των διαφορετικών εφαρμογών με την επαναχρησιμοποίηση, τον επαναπροσδιορισμό, την ανακύκλωση και την ανάκτηση, ενώ συστηματικά επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση των υλικών για τον ίδιο ή παρόμοιο σκοπό.

Αυτή τη στιγμή υπάρχουν τρεις εναλλακτικές για την διάθεση των μερών μίας Α/Γ, οι οποίες είναι η υγειονομική ταφή, η αποτέφρωση και η ανακύκλωση. Στην Ευρώπη η νομοθεσία για τη διάθεση των σύνθετων υλικών ορίζεται από το Πλαίσιο των Αποβλήτων και την Οδηγία για την ταφή. (Beauson & Brøndsted, 2016)

Μετά την αποσυναρμολόγηση τα περισσότερα υλικά μίας Α/Γ μπορούν να ανακυκλωθούν (Beauson & Brøndsted, 2016). Τα μέρη μίας Α/Γ όπως τα θεμέλια, ο πύργος, μέρη του κιβωτίου ταχυτήτων και η γεννήτρια, είναι ανακυκλώσιμα, φτάνοντας το συνολικό ποσοστό ανακύκλωσης μίας Α/Γ προς το παρόν μεταξύ 85% και 90% (Wind Europe, 2020). Όλα τα μεγάλα μεταλλικά εξαρτήματα της Α/Γ που είναι κυρίως μεμονωμένα υλικά, όπως η άτρακτος ανακυκλώνονται κατά 98% και ένα 2% καταλήγει σε ταφή (CWPRenewables, 2016). Άλλα κύρια εξαρτήματα, όπως η γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων, καλώδια και μέρη συστημάτων εκτροπής, επίσης ανακυκλώνονται κατά 95%, ενώ ένα 5% καταλήγει σε ταφή. Ο χάλυβας, ο χαλκός και το αλουμίνιο πωλούνται ως σκραπ για ανακύκλωση. Τα νέα προϊόντα μετά την ανακύκλωση είναι τόσο καλά όσο και τα παλιά, καθώς δεν υποβαθμίζονται μέσω της ανακύκλωσης. (Andersen, 2015)

Για τα περισσότερα μέρη μίας Α/Γ, όπως η θεμελίωση, ο πύργος και μέρη της άτρακτου υπάρχουν καθιερωμένες πρακτικές ανακύκλωσης, ενώ οι πρώτες ύλες αυτών των εξαρτημάτων έχουν υψηλή αξία για δευτερογενείς αγορές. Για παράδειγμα, ο χάλυβας που είναι βασικό υλικό του πύργου είναι 100% ανακυκλώσιμος και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί χωρίς καμία απώλεια στην ποιότητα του. Το σκραπ χάλυβα αποτελεί πολύτιμη πρώτη ύλη για την παραγωγή χάλυβα και υπάρχει καλά καθιερωμένη αγορά για σκραπ χάλυβα.

Στη διαχείριση της θεμελίωσης κατά τη διάρκεια του παροπλισμού υπάρχουν διαφορές από χώρα σε χώρα. Η ολική αφαίρεση της θεμελίωσης είναι απαραίτητη σε κάποιες χώρες και σε αυτή την περίπτωση το σκυρόδεμα από τη θεμελίωση που αφαιρείται μπορεί να ανακυκλωθεί σε αδρανές για υλικά κτιρίων ή κατασκευή δρόμων. Σε άλλες χώρες η θεμελίωση μπορεί να παραμείνει ολικώς ή μερικώς στο έδαφος, λόγω υψηλότερου περιβαλλοντικού αντίκτυπου από την αφαίρεση ή σε

κάποια περίπτωση έχει καθοριστεί εξ αρχής από τον ιδιοκτήτη της γης (WindEurop, Cefic, EuCIA, 2020).

Το υλικό μίας Α/Γ τα οποία αποτελούν πρόκληση είναι τα πτερυγία, τα οποία κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά, καθιστώντας τα δύσκολα στη διαχείριση τους, καθώς δεν υπάρχουν ακόμα ώριμες τεχνολογίες ανακύκλωσης. Τα σύνθετα υλικά αποτελούν πάνω από το 90% του βάρους του πτερυγίου (Liu & Barlow, 2017). Τα πτερυγία αποτελούν μία σύνθετη δομή από διαφορετικά μέρη και υλικά. Η δομή τους μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον κατασκευαστή και το έτος κατασκευής. Όταν τα πτερυγία παροπλιστούν θα βρίσκονται σε διαφορετικές συνθήκες ανάλογα με το σχεδιασμό και το λόγο που γίνεται ο παροπλισμός (Beauson & Brøndsted, 2016).

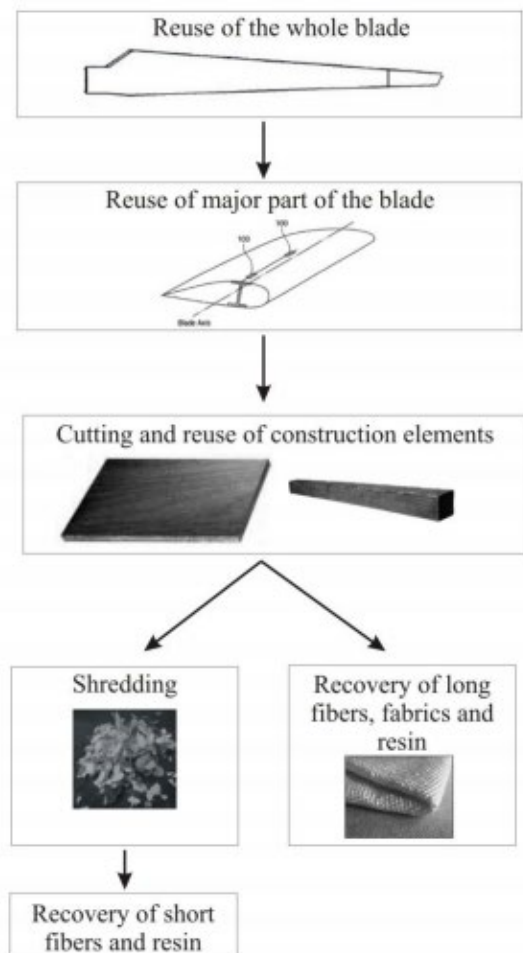
2.4 Διαχείριση πτερυγίων

2.4.1 Εισαγωγικά

Τα πτερυγία αποτελούν μία σύνθετη δομή διαφορετικών μερών και υλικών και η δομή τους μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον κατασκευαστή και το έτος παραγωγής. Όταν τα πτερυγία παροπλίζονται μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές συνθήκες, το οποίο εξαρτάται από το σχεδιασμό τους και το λόγο παροπλισμού. Όλα αυτά μαζί αποτελούν την ανακύκλωση των πτερυγίων πρόκληση. Η παγκόσμια ζήτηση για σύνθετα υλικά, συμπεριλαμβανομένης της βιομηχανίας Α/Γ, αυξάνεται συνεχώς οδηγώντας αναπόφευκτα στην παραγωγή και συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων. Για το λόγο αυτό καθίσταται αναγκαία η ανάπτυξη επιλογών που περιλαμβάνουν την επισκευή, την επαναχρησιμοποίηση, τον επαναπροσδιορισμό (αλλαγή χρήσης) και την ανακύκλωση, εξετάζοντας και την απόδοση του κόστους τρεχόντων τεχνικών ανακύκλωσης και πρακτικών, έτσι ώστε να αυξηθεί η διάρκεια ζωής και του προϊόντος και των πρώτων υλών.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι λύσεις διαχείρισης του πτερυγίου μίας Α/Γ ανάλογα με το βαθμό επεξεργασίας. Στην κορυφή του σχήματος είναι η λύση με την μικρότερη εκ νέου επεξεργασία και στη βάση οι λύσεις με την μεγαλύτερη επεξεργασία. Η καλύτερη λύση που βρίσκεται στην κορυφή είναι η επαναχρησιμοποίηση ολόκληρου του πτερυγίου σαν πτερύγιο ξανά. Η επόμενη καλύτερη εναλλακτική είναι η επαναχρησιμοποίηση σημαντικών μερών του πτερυγίου σε νέες εφαρμογές. Η αμέσως επόμενη επιλογή είναι να χρησιμοποιηθούν μεγάλα δομικά στοιχεία του πτερυγίου αφού κοπούν, όπως σανίδες, δοκάρια και καμπύλα στοιχεία. Η γεωμετρία αυτών των στοιχείων περιορίζονται από το σχεδιασμό του πτερυγίου και τη γεωμετρία. Όσον αφορά στην πυκνότητα και την ακαμψία των GFRP κυμαίνεται μεταξύ ξύλου και μετάλλου. Αυτά τα κομμάτια θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε δομικές ή ημι-δομικές εφαρμογές, όπως έπιπλα. Από αυτά τα μεγάλα κομμάτια η επόμενη λύση είναι η εξαγωγή υφασμάτων ινών γυαλιού που είναι ενσωματωμένα στο σύνθετο υλικό ή η μείωση του μεγέθους τεμαχίζοντας (shredding) το σύνθετο υλικό. Το υλικό που έχει κοπεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υλικό πλήρωσης στην κατασκευή νέου σύνθετου υλικού ή ως ηχομονωτικό και θερμομονωτικό υλικό (Beauson, et al., 2014).

Σχήμα 9: Πιθανές λύσεις ανακύκλωσης πτερυγίων Α/Γ



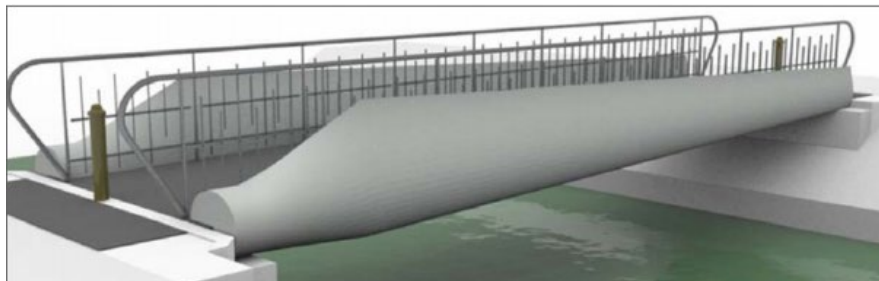
Πηγή: **Beauson, et al. (2014)**

Αλλαγή χρήσης

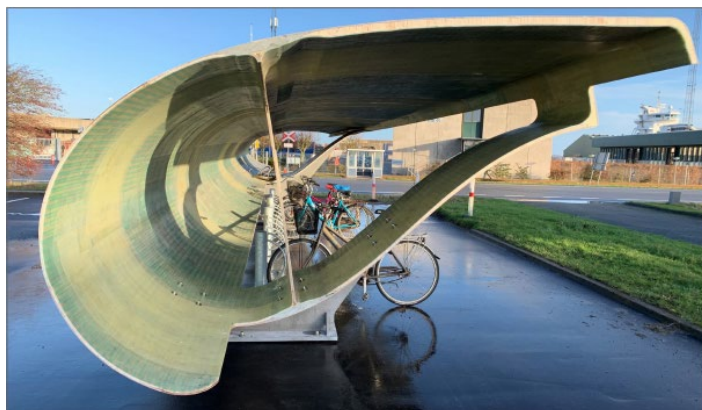
Ο επαναπροσδιορισμός του υλικού (αλλαγή χρήσης) αποτελεί μία λύση που θα μπορούσε να διερευνηθεί περισσότερο, καθώς είναι υψηλότερα στην Ιεραρχία Αποβλήτων από την ανακύκλωση και την ανάκτηση. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ένα μέρος του πτερυγίου σε μία διαφορετική εφαρμογή, συχνά χαμηλότερης αξίας σε σχέση με την αρχική. Η επιλογή αυτή θα οδηγούσε σε καλύτερη περιβαλλοντικά διαχείριση των σύνθετων υλικών με ίνες γυαλιού. Τα πτερύγια θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για παιδικές χαρές ή έπιπλα δρόμου. Μέρη των πτερυγίων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για οροφή σε προσωρινή ή φθηνή στέγαση, για γραφεία και για έπιπλα σπιτιού, Επιπλέον, ένα πρότζεκτ επίπλων ολοκληρώθηκε στο Ρότερνταμ καθώς και μία πεζογέφυρα (Nagle, et al., 2020).

Επίσης συγκεκριμένα δομικά μέρη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δομές κτιρίων, όπως υπόστεγο για ποδήλατα, γέφυρες όπως κατασκευάζεται στη Δανία, διαβάσεις πεζών και για αρχιτεκτονικούς σκοπούς. Ωστόσο τα παραπάνω παραδείγματα δεν μπορούν να αποτελέσουν λύσεις σε μεγάλη κλίμακα για μελλοντικό όγκο αποβλήτων.

Σχήμα 10: Σχεδιασμός πεζογέφυρας, Re-Wind research project



Σχήμα 11: Υπόστεγο για ποδήλατα, Re-Wind and Port of Aalborg, Denmark



Επαναχρησιμοποίηση (Refurbishment)

Η πιο απλή λύση για τα πτερύγια μετά τον παροπλισμό είναι να ξαναχρησιμοποιηθούν, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής τους, καθώς είναι τεχνικά δυνατό (Beauson & Brøndsted, 2016). Τα πτερύγια θα πρέπει να χρησιμοποιούνται και να επαναχρησιμοποιούνται για όσο το δυνατόν περισσότερο μέχρι να υποστούν οποιαδήποτε επεξεργασία. Για να επιτευχθεί η διάρκεια ζωής του προϊόντος, όπως έχει καθοριστεί από το σχεδιασμό του, θα πρέπει να γίνεται τακτικά συντήρηση και επισκευή. Για την επέκταση ζωής θα πρέπει να διεξαχθεί μία αξιολόγηση της υπολειπόμενης χρήσης κατά τη διάρκεια ζωής, σε συνδυασμό με επιτόπου επιθεωρήσεις και εξέτασης των δράσεων συντήρησης από τότε που άρχισε το πτερύγιο να λειτουργεί (WindEurope, 2020). Αυτή η διαδικασία είναι τεχνικά εφικτή σε μικρού μεγέθους Α/Γ (10kW- 1MW) και κατά τη διαδικασία αυτή μπορούν να επισκευαστούν. Η λύση αυτή είναι δύσκολη για πτερύγια με μήκος πάνω από 50m, που συνήθως παράγονται σήμερα, κυρίως λόγω δυσκολιών στη μεταφορά. Μετά το

τέλος της προβλεπόμενης διάρκειας ζωής των 20 ετών περίπου, τα πτερύγια μπορεί να εξακολουθούν να έχουν υψηλή υπολειπόμενη χωρητικότητα. Μελέτη πραγματοποιήθηκε στη Γερμανία, στην οποία διερευνήθηκε η επίδραση της διάρκειας ζωής στα πτερύγια σε σύγκριση με την απόδοση των πτερυγίων μετά από 20 χρόνια χρήσης και το αποτέλεσμα δεν έδειξε καμία σημαντική βλάβη και καμία σημαντική απώλεια στην ακαμψία του πτερυγίου. Στην Ευρώπη και στην Αμερική υπάρχουν εταιρίες, όπως Green-Ener-Tech, Repowering Solutions, Enerpower Windturbines κ.ά, οι οποίες ασχολούνται με την πώληση επισκευασμένων Α/Γ. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την πώληση αυτών είναι η πρόσβαση σε ένα μεγάλο εύρος μικρών και μεσαίων Α/Γ και χαμηλό κόστος, περίπου η μισή τιμή ανά MW (Beauson & Brøndsted, 2016).

2.4.2 Ισχύουσα νομοθεσία στην Ευρώπη

Η ισχύουσα νομοθεσία σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων από σύνθετα υλικά, και επομένως και με τα απόβλητα των πτερυγίων από Α/Γ, είναι περιορισμένη τόσο σε ευρωπαϊκό, όσο και σε εθνικό επίπεδο και αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν κοινές κατευθυντήριες ούτε σε διεθνές επίπεδο. Αυτό συμβαίνει διότι οι αγορές Α/Γ έχουν αναπτυχθεί σε διαφορετικά επίπεδα και η πρακτική εμπειρία έχει αρχίσει να αποκτάται και να αυξάνεται κυρίως στις χώρες με πιο ώριμη αγορά. Κάθε χώρα υιοθετεί διαφορετικούς κανονισμούς για την ενθάρρυνση της ανακύκλωσης, όπως για παράδειγμα δεσμευτικούς στόχους, απαγόρευση ή φόρους για την υγειονομική ταφή και απαιτήσεις για την εκτεταμένη ευθύνη του παραγωγού (Extended Producer Responsibility (EPR)). Η εναρμόνιση των κατευθυντήριων και της νομοθεσίας σε ευρωπαϊκό επίπεδο θα βοηθήσει στη δημιουργία μίας πανευρωπαϊκής αγοράς για την ανακύκλωση των σύνθετων υλικών των πτερυγίων. Αυτή τη στιγμή η βιομηχανία ανέμου εργάζεται πάνω σε διεθνείς κατευθυντήριες για την αποσυναρμολόγηση και τον παροπλισμό των Α/Γ.

Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή κατάταξη των αποβλήτων, τα απόβλητα των σύνθετων υλικών των πτερυγίων συνήθως κατατάσσονται στα απόβλητα από πλαστικά για την κατασκευή και την κατεδάφιση με τον κωδικό 17 02 03. Σε εθνικό επίπεδο θα πρέπει να διασφαλιστεί ο πιο κατάλληλος κωδικός, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η συλλογή των αποβλήτων ξεχωριστά και η διαλογή, βοηθώντας στον καθορισμό των κατάλληλων μεθόδων επεξεργασίας. Επειδή βάσει της κατηγοριοποίησης των αποβλήτων τα σύνθετα υλικά κατατάσσονται στα πλαστικά, μπορεί τα απόβλητα από σύνθετα υλικά να αναμειγνύονται με άλλους τύπους πλαστικών περιορίζοντας τη δυνατότητα μιας πανευρωπαϊκής αγοράς ανακυκλωμένων σύνθετων υλικών.

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία (2020) προωθείται η κυκλικότητα σε ευρωπαϊκό επίπεδο γενικότερα, παρότι οι κανονισμοί που σχετίζονται με τον τομέα των αποβλήτων από σύνθετα υλικά είναι περιορισμένοι, χωρίς να έχουν καθοριστεί ειδικές απαιτήσεις. Στην Ευρωπαϊκή Στρατηγική για τα Πλαστικά σε μία Κυκλική Οικονομία (2018) τονίζεται το χαμηλό ποσοστό επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των πλαστικών στο τέλος ζωής τους, που δεν ξεπερνά το 30% και επομένως η αύξηση του ποσοστού αποτελεί μία

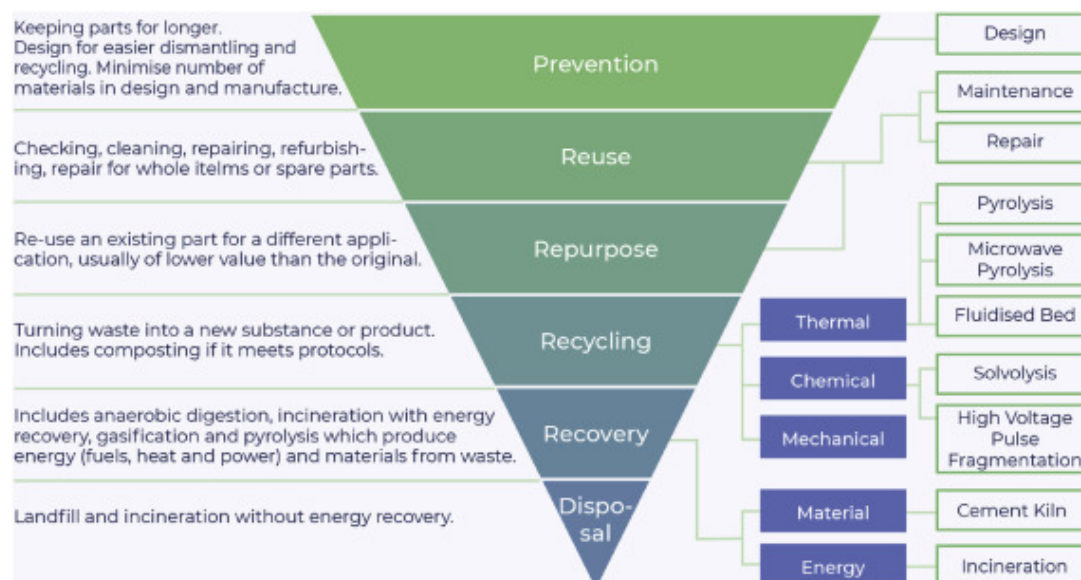
πρόκληση σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Μέχρι στιγμής στο επίκεντρο είναι τα πλαστικά μίας χρήσης, τα μικροπλαστικά και οι συσκευασίες πλαστικών.

Σε εθνικό επίπεδο οι χώρες που έχουν κάνει σαφή αναφορά στα απόβλητα σύνθετων υλικών είναι η Γερμανία, η Ολλανδία, η Φιλανδία και η Αυστρία με απαγορεύσεις σε υγειονομική ταφή και σε αποτέφρωση. Η απαγόρευση της υγειονομικής ταφής και οι φόροι, στα πλαίσια του σωστού σχεδιασμού και εφαρμογής, θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως ένας οδηγός για την αλλαγή των βιομηχανικών πρακτικών, αποτρέποντας την απόθεση και πηγαίνοντας σε πιο κυκλικές λύσεις. Σε πολλές χώρες το κόστος ανακύκλωσης των σύνθετων αποβλήτων είναι πολύ υψηλότερο από τους φόρους στην υγειονομική ταφή των αποβλήτων των σύνθετων υλικών των πετυγίων με αποτέλεσμα να μην αποτελούν τελικά οι φόροι κίνητρο για περισσότερη ανακύκλωση.

2.4.3 Υφιστάμενες πρακτικές διάθεσης

Η διαθεσιμότητα και η υιοθέτηση τεχνολογιών που επιτρέπουν την εξαγωγή υψηλότερης αξίας από τα σύνθετα υλικά (ρητίνες και ίνες) είναι περιορισμένη. Τέτοιες τεχνολογίες περιλαμβάνουν τη χημική και θερμική ανακύκλωση. Προς το παρόν υιοθετούνται τεχνολογίες με υποβαθμισμένες διαδικασίες, όπως η μηχανική επεξεργασία και η ανάκτηση ενέργειας, ενώ ακόμα υπάρχει σαν εναλλακτική και η υγειονομική ταφή σε υψηλό ποσοστό. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η ιεράρχηση των κατηγοριών διαχείρισης των αποβλήτων σύνθετων υλικών.

Σχήμα 13: Διαχείριση σύνθετων υλικών των πετυγίων Α/Γ στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ιεραρχίας Αποβλήτων



Πηγή: SUSCHEM (2018)

Υγειονομική ταφή

Όταν τα πτερύγια με ενισχυμένα πολυμερή κυρίως με ίνες γυαλιού φτάνουν στο τέλος ζωής δύσκολα ανακυκλώνονται, αυξάνοντας την ποσότητα των αποβλήτων από σύνθετα υλικά που καταλήγουν σε υγειονομική ταφή (Beauson, et al., 2014). Η υγειονομική ταφή τείνει να αποφεύγεται σιγά σιγά, καθώς αποτελεί την λιγότερο επιθυμητή εναλλακτική σύμφωνα με την Ιεραρχία Διαχείρισης των Αποβλήτων (Larsen, 2009). Για το λόγο αυτό, οι χώρες προσπαθούν να μειώσουν τα απόβλητα που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ. Οι οδηγίες αυτές έχουν οδηγήσει τις Ευρωπαϊκές χώρες και σε υψηλότερους φόρους όσων αφορά την υγειονομική ταφή (Beauson & Brøndsted, 2016) Συγκεκριμένα, η Γερμανία έχει απαγορεύσει τη διάθεση ενισχυμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού (GFRP) από το 2005, λόγω του υψηλού οργανικού περιεχομένου(30%) των GFRP, όπως οι ρητίνες και το ξύλο. (Larsen, 2009).

Αποτέφρωση

Η πιο συνηθισμένη πρακτική είναι η αποτέφρωση. Τα υλικά των πτερυγίων μπορούν να καούν για ανάκτηση ενέργειας. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι και ότι το 60% μένει πίσω ως τέφρα, η οποία μπορεί να είναι ρύπος εξαιτίας της παρουσίας ανόργανου φορτίου στα σύνθετα υλικά και εξαρτάται από τη μετέπειτα διαχείριση της (Larsen, 2009). Η τέφρα απορρίπτεται σε ΧΥΤΑ ή εναλλακτικά μπορεί να υποκαταστήσει υλικά κατασκευής κτιρίων. Αυτό μπορεί να επηρεαστεί από τοπικούς παράγοντες που απαγορεύουν τη χρήση των αποβλήτων ως πληρωτικό υλικό (Jensen, 2018). Η σύνθετη δομή του υλικού περιλαμβάνει 70% ίνες γυαλιού. Οι ίνες γυαλιού δεν είναι εύφλεκτες και αυτό δυσκολεύει την αποτέφρωση. Επίσης, η παρουσία των ινών γυαλιού στο καυσαέριο μπορεί να διαταράξει το σύστημα καθαρισμού του αερίου και η μεγάλη ποσότητα των ινών που δεν έχει καεί παραμένοντας στο τέλος της διαδικασίας καύσης είναι προβληματική (Liu, et al., 2019). Τα ανόργανα φορτία οδηγούν σε εκπομπές επικίνδυνων καυσαερίων στα οποία τα μικρά υπολείμματα ινών γυαλιού μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στα στάδια καθαρισμού του καυσαερίου, ειδικότερα στις συσκευές φίλτρου σκόνης. Τα πτερύγια των Α/Γ όταν αποσυναρμολογούνται και συνθλίβονται πριν από τη μεταφορά τους στους σταθμούς αποτέφρωσης επιβαρύνουν περισσότερο το περιβάλλον λόγω της χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Τέλος υπάρχουν και ανησυχίες σχετικά με την υγεία και την ασφάλεια όσων συμμετέχουν στη διαδικασία της αποτέφρωσης (Larsen, 2009).

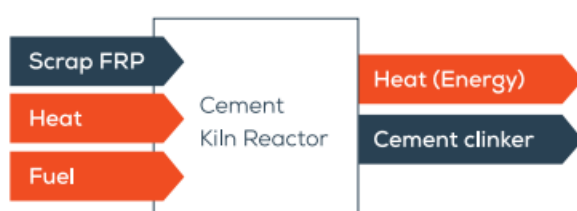
Ανακύκλωση

Το γεγονός ότι τα περισσότερα πτερύγια είναι κατασκευασμένα από GFRP λόγω του χαμηλού κόστους του υλικού, αλλά και της κατασκευής αποτελεί έναν ανασταλτικό παράγοντα για την ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών ανακύκλωσης,

καθώς περιορίζονται οι επιλογές ανακύκλωσης και το κόστος των νέων τεχνολογιών ανακύκλωσης θα πρέπει να ελέγχεται αυστηρά καθιστώντας τις βιώσιμες (HAO, et al., 2019). Η βιομηχανία ανακύκλωσης αναμένεται να αναπτυχθεί τα επόμενα χρόνια και στις απαιτήσεις περιλαμβάνεται το περιβαλλοντικό αντίκτυπο από τα απόβλητα των περυγίων (Liu & Barlow, 2016). Προγράμματα όπως το GenVind στη Δανία ψάχνουν λύσεις ανακύκλωσης των Α/Γ και άλλων προϊόντων που κατασκευάζονται από GFRP. Για την υλοποίηση του έργου συνεργάζονται η βιομηχανία με τα Πανεπιστήμια με σκοπό την ανάπτυξη κατάλληλων τεχνολογιών και μελλοντικών βιομηχανικών εφαρμογών (Beauson & Brøndsted, 2016).

Συν-επεξεργασία στη βιομηχανία τσιμέντου

Σχήμα 14: Διαδικασία Συν-επεξεργασίας στη βιομηχανία τσιμέντου



Πηγή: **WindEurope, 2020**

Η κύρια τεχνολογία ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών των περυγίων είναι μέσω της συν-επεξεργασίας στη βιομηχανία τσιμέντου, καθώς αποτελεί μία εμπορική μέθοδο επεξεργασίας μεγάλου όγκου αποβλήτων. Η μέθοδος αυτή μπορεί να θεωρηθεί και ανάκτηση ενέργειας και ανακύκλωση. Μέχρι στιγμής είναι η μόνη μέθοδος ανακύκλωσης που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των σύνθετων υλικών των περυγίων. Κατά τη διαδικασία αυτή τα ενισχυμένα πολυμερή τεμαχίζονται και καταναλώνονται σε κλίβανο τσιμέντου. Κατά τη διαδικασία της συν-επεξεργασίας απαιτείται τα περύγια να κοπούν σε μικρότερα κομμάτια και μετά ενσωματώνονται με άλλα απόβλητα πριν σταλούν σε κλίβανο τσιμέντου για χρήση ως καύσιμο και υποκατάστατο πρώτων υλών (Nagle, et al., 2020). Οι πρώτες ύλες τσιμέντου αντικαθίστανται εν μέρει από ίνες γυαλιού και πληρωτικά στο σύνθετο υλικό και το οργανικό κλάσμα αντικαθιστά τον άνθρακα ως καύσιμο. Μέσω αυτής της διαδικασίας μπορεί να μειωθεί σημαντικά η παραγωγή CO₂ κατά τη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου σε ποσοστό μέχρι 16% εάν τα σύνθετα υλικά αποτελούν το 75% των πρώτων υλών τσιμέντου (WindEurope, 2020). Η συν-επεξεργασία GFRP σε κλίβανο τσιμέντου είναι βιώσιμη και ήδη εφαρμόζεται. Το κόστος δεν είναι ακόμα γνωστό, αλλά εκτιμάται να είναι υψηλότερο από αυτό της υγειονομικής ταφής (Nagle, et al., 2020).

Κατά τη συν-επεξεργασία σε κλίβανο τσιμέντου το υλικό των περυγίων κόβεται σε μικρότερα κομμάτια και αναμειγνύεται με στερεό ανακτηθέν καύσιμο (SRF), το οποίο αποτελεί ένα εναλλακτικό καύσιμο. Το SRF χρησιμοποιείται στην Ευρώπη ως υποκατάστατο ορυκτών καυσίμων σε βιομηχανίες τσιμέντου και ηλεκτρικής

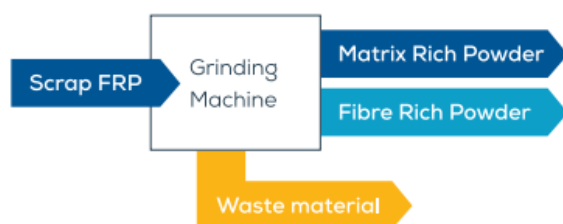
ενέργειας. Το SRF φτιάχνεται από μείγμα ξηρών ανακυκλωμένων υλικών τα οποία είναι πολύ δύσκολο να διαχωριστούν και διαφορετικά θα κατέληγαν σε υγειονομική ταφή. Το πολυμερές τμήμα του περυγίου δρα ως καύσιμο για να φέρει τον κλίβανο τσιμέντου σε θερμοκρασία πάνω από τους 850°C, αντικαθιστώντας ένα μέρος ορυκτού καυσίμου. Η θερμοκρασία θα πρέπει μετά να φτάσει τους 1450°C, οπότε το μέρος των ινών γυαλιού μετατρέπεται στα απαιτούμενα συστατικά του τσιμέντου. Με αυτό τον τρόπο όλα τα απόβλητα χρησιμοποιούνται στη διαδικασία και δεν καταλήγει τίποτα σε υγειονομική ταφή.

Παρόλο που η συν-επεξεργασία σε κλίβανο τσιμέντου βασίζεται σε καύση, όπως και η αποτέφρωση, η συν-επεξεργασία επιτρέπει την ανάκτηση υλικού εκτός από την ανάκτηση ενέργειας. Η συν-επεξεργασία είναι λιγότερο περιβαλλοντικά επιβλαβής από ότι η αποτέφρωση με ή χωρίς ανάκτηση θερμότητας (DONG, et al., 2015). Η EuCIA κατατάσσει τη συν-επεξεργασία στην ανακύκλωση λόγω του E-glass, το οποίο αποτελεί μέχρι το 50% των αποβλήτων του περυγίου και ανακυκλώνεται πλήρως σε συστατικά τσιμέντου. Αυτό καθιστά την πρακτική αυτή υψηλότερα στην Ιεραρχία των Αποβλήτων από την αποτέφρωση με ή χωρίς ανάκτηση θερμότητας (Association European Composites Industry, 2011).

Εκτός από την ανακύκλωση των σύνθετων υλικών των περυγίων μέσω συν-επεξεργασίας στη βιομηχανία τσιμέντου, πραγματοποιείται εκτεταμένη έρευνα στην ανάπτυξη και άλλων τεχνολογιών για τη διαχείριση των περυγίων μετά το τέλος ζωής τους, όπως η solvolysis και η πυρόλυση παρέχοντας στη βιομηχανία πρόσθετες λύσεις.

Μηχανική ανακύκλωση (Mechanical grinding)

Σχήμα 14: Μηχανική επεξεργασία



Πηγή: WindEurope, 2020

Η μηχανική άλεση (grinding) αποτελεί την πιο συνηθισμένη τεχνολογία λόγω της αποτελεσματικότητάς της, του χαμηλού κόστους και της χαμηλής απαίτησης σε ενέργεια. Παρόλα αυτά η μέθοδος αυτή αποτελεί την λιγότερη επιθυμητή τεχνολογία ανακύκλωσης, καθώς μειώνει σημαντικά την αξία των ανακυκλωμένων υλικών.

Μέσω της διαδικασίας αυτής τα σύνθετα υλικά μειώνονται σε κομμάτια λίγων εκατοστών ή και λιγότερο και το μείγμα που προκύπτει (shredded composite) χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές (Beauson & Brøndsted, 2016). Το ανακυκλωμένο προϊόν, μικρές ίνες και αλεσμένη μήτρα (σκόνη), μπορούν να

χρησιμοποιηθούν ως πληρωτικά υλικά ή ενισχυτικά. Λόγω της υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων το επίπεδο ενσωμάτωσης του πληρωτικού υλικού είναι αρκετά περιορισμένο σε εφαρμογές θερμοσκληρυνόμενων σύνθετων υλικών, λιγότερο από 10%. Το ανακυκλωμένο υλικό χρησιμοποιείται ως πληρωτικό για τσιμέντο ή για ανάκτηση ενέργειας στους κλίβανους τσιμέντου, μειώνοντας σημαντικά την αξία του. (SUSCHEM, 2018) Επίσης, σημαντικό είναι να αναφερθεί πως κατά τη διαδικασία αυτή απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις σε κλειστό χώρο για τον περιορισμό των εκπομπών σκόνης. Η μηχανική επεξεργασία, όπως και η πυρόλυση, δεν είναι βιώσιμη λόγω του χαμηλού κόστους των παρθένων πρώτων υλών.

Υπήρξαν εταιρίες που ασχολήθηκαν με αυτή τη μέθοδο μαζεύοντας σύνθετα υλικά και επεξεργάζοντας τα, καθιστώντας τη μέθοδο αυτή εφαρμόσιμη σε εμπορικό επίπεδο, καμία όμως δεν λειτουργεί μέχρι σήμερα. Τέτοιες εταιρίες ήταν η Phoenix Fibreglass Inc στον Καναδά, η οποία δραστηριοποιήθηκε από το 1990 έως το 1996 και η ERCOM GmbH στη Γερμανία, η οποία λειτούργησε από το 1990 έως το 2004. Πιο πρόσφατα και μέχρι το 2014 η εταιρία Zagonis στη Γερμανία μαζεύει τα υλικά των περυγίων και τα αλέθει για να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή τσιμέντου. Συγκεκριμένα τα περύγια κόβονται επιτόπου σε κομμάτια των 10-12m και στο εργοστάσιο μειώνονται σε κομμάτια μήκους 1m. Στην πορεία συνθλίβονται (shredded composite) Το υλικό που προκύπτει έχει μέγεθος 5cm και αναμειγνύεται με άλλα υγρά απόβλητα. Το τελικό μείγμα στέλνεται στο εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου Holcim, όπου χρησιμοποιείται σαν υποκατάστατο καυσίμου για τη μείωση της τέφρας από άνθρακα και ως πρώτη ύλη για να αντικαταστήσει την πλυμένη άμμο. Από το 2012 η χρήση των σύνθετων υλικών στην παραγωγή τσιμέντου θεωρείται βιώσιμη μέθοδος ανακύκλωσης από την ΕΕ. Η εταιρία αυτή ήταν το μόνο εργοστάσιο εμπορικής κλίμακας που επεξεργαζόταν τα περύγια των Α/Γ για παραγωγή τσιμέντου παγκοσμίως. Η κυριότερη πρόκληση αυτής της τεχνολογίας είναι η εύρεση εφαρμογών του ανακυκλωμένου υλικού (Beauson & Brøndsted, 2016). Εκτός από την παραγωγή τσιμέντου έχει ερευνηθεί και για να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό υλικό σε σύνθετα πολυμερή και σκυρόδεμα. Σχετικά με την ενίσχυση του σκυροδέματος με ανακυκλωμένο σύνθετο υλικό απαιτείται σταθερή ποιότητα του ανακυκλωμένου υλικού, ενώ στην περίπτωση της ενίσχυσης του σύνθετου πολυμερούς επειδή το υλικό που προκύπτει (shredded composite) είναι ένα αρκετά ξηρό υλικό, χρειάζεται πολλή ρητίνη για να εμποτιστεί σωστά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΛΕΤΩΝ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΜΕΡΩΝ Α/Γ ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΕΡΑΣ ΖΩΗΣ

Στο Κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται ανασκόπηση στη βιβλιογραφία μελετών που ασχολούνται με τις μεθόδους διάθεσης απορριμμάτων μερών Α/Γ μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους και την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

1 Ο **Ghenai** κάνει μία Ανάλυση Κύκλου Ζωής μίας Α/Γ σε όλα τα στάδια (εξόρυξη υλικών, κατασκευή, χρήση, μεταφορά, διάθεση) για τον καθορισμό του σταδίου με το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο με βάση την κατανάλωση ενέργειας και την παραγωγή εκπομπών CO₂ (Ghenai, 2012). Παρακάτω θα αναλυθεί το τελευταίο στάδιο: διάθεση των μερών της Α/Γ μετά το πέρας ζωής για τους σκοπούς της εργασίας.

Μεθοδολογία

Η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) και στην ανάλυση περιλαμβάνονται όλα τα μέρη: πύργος, ρότορας, θεμελίωση, άτρακτος. Η Α/Γ που επιλέχθηκε έχει ονομαστική ισχύ 2MW και η διάρκεια ζωής της ανέρχεται στα 25 έτη. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα υλικά και η μάζα των μερών της Α/Γ.

Υλικά για την Α/Γ των 2MW

Component	Material	Total Mass (kg)
Tower structure	Low carbon steel	164000.000
Tower, Cathodic Protection	Zinc alloys	203.000
Nacelle, gears	Stainless steel	19000.000
Nacelle, generator core	Cast iron, gray	9000.000
Nacelle, generator conductors	Copper	1000.000
Nacelle, transformer core	Cast iron, gray	6000.000
Nacelle, transformer conductors	Copper	2000.000
Nacelle, transformer conductors	Aluminum alloys	1700.000
Nacelle, cover	GFRP, epoxy matrix (isotropic)	4000.000
Nacelle, main shaft	Cast iron, ductile (nodular)	12000.000
Nacelle, other forged components	Stainless steel	3000.000
Nacelle, other cast components	Cast iron, ductile (nodular)	4000.000
Rotor, blades	CFRP, epoxy matrix (isotropic)	24500.000
Rotor, iron components	Cast iron, ductile (nodular)	2000.000
Rotor, spinner	GFRP, epoxy matrix (isotropic)	3000.000
Rotor, spinner	Cast iron, ductile (nodular)	2200.000
Foundations, pile & platform	Concrete	805000.000
Foundations, steel	Low carbon steel	27000.000
Transmission, conductors	Copper	254.000
Transmission, conductors	Aluminum alloys	72.000
Transmission, insulation	Polyethylene (PE)	1380.000
Total		1.091E+006

Για τελευταίο στάδιο διάθεσης των μερών της Α/Γ, η ΑΚΖ πραγματοποιήθηκε σε δύο εκδοχές: στην πρώτη περίπτωση τα υλικά της Α/Γ δεν ανακυκλώνονται και καταλήγουν σε υγειονομική ταφή, ενώ στη δεύτερη περίπτωση γίνεται ανακύκλωση των υλικών της Α/Γ.

Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Στην περίπτωση που όλα τα υλικά στο τέλος ζωής καταλήγουν σε υγειονομική ταφή $2.18 \text{ E}+011 \text{ J}$ ενέργειας χρειάστηκαν για τη διαδικασία, δηλαδή το 1.1% της συνολικής ενέργειας και 13095.71 kg CO_2 απελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα. Στην περίπτωση της ανακύκλωσης των υλικών, η συνολική ενέργεια $6.85\text{E}+012 \text{ J}$, που αναπαριστά το 54.8% της συνολικής ενέργειας, ανακτάται στο τέλος ζωής. Οι εκπομπές CO_2 μειώνονται κατά 495917.28 kg , δηλαδή το 54.8% των συνολικών εκπομπών, λόγω της ανακύκλωσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν τα οφέλη από την ανακύκλωση των υλικών στο τέλος ζωής. Η επιλογή των υλικών κατασκευής της Α/Γ επηρεάζει τη δυνατότητα ανακύκλωσης ή την ανάκτηση ενέργειας στο τέλος του κύκλου ζωής της Α/Γ.

2 Ο Jensen J.P. κάνει μία εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο στάδιο παροπλισμού ενός αιολικού πάρκου 60MW με ένα θεωρητικό σενάριο 100% ανακύκλωσης των Α/Γ. Σκοπός της μελέτης είναι η εκτίμηση του δυναμικού ανακύκλωσης των Α/Γ και τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την ανακύκλωση (εξοικονόμηση ενέργειας, ισοδύναμες εκπομπές CO_2) (Jensen, 2018).

Μεθοδολογία

Η μελέτη εστιάζει στην βελτιστοποίηση του περιβαλλοντικού οφέλους στη φάση παροπλισμού ενός έργου. Οι Α/Γ παροπλίζονται όταν φτάσουν στο τέλος του κύκλου ζωής και δεν υπάρχει δυνατότητα επέκτασης της διάρκειας ζωής τους ή η επέκταση διάρκειας ζωής δεν είναι πια οικονομικά ή τεχνικά βιώσιμη. Η διάρκεια ζωής εκτιμάται σε 20-25 χρόνια. Συγκεκριμένα, στη μελέτη αυτή οι Α/Γ αποσυναρμολογούνται σε μικρότερα μέρη για ανακύκλωση σχεδόν όλων των υλικών. Μελέτες εκτιμούν το ποσοστό ανακύκλωσης των Α/Γ, που υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει ένας απόλυτος αριθμός, αλλά το ποσοστό ανακύκλωσης κυμαίνεται μεταξύ 80%-90%. Μέρη των Α/Γ, όπως ο πυλώνας, τα υδραυλικά, η γεννήτρια και τα γρανάζια (gears) είναι εύκολο να ανακυκλωθούν, σε αντίθεση με τους μαγνήτες (NdFeb), το κάλυμμα της ατράκτου και τα πτερύγια των οποίων η ανακύκλωση αποτελεί μεγαλύτερη πρόκληση. Αυτό οφείλεται στο μέγεθος και στη σύνθετη δομή.

Απογραφή κύκλου ζωής μίας Α/Γ (LCI)

Στον πίνακα φαίνονται τα τυπικά μέρη μίας Α/Γ με ονομαστική ισχύ 3MW, τα υλικά από τα οποία αποτελούνται και η πιθανή διαχείριση τους στο τέλος του κύκλου ζωής.

Μέρη ανεμογεννήτρια, κύρια υλικά, ενδεχόμενοι μέθοδοι διάθεσης

Part of turbine	Main material(s)	End of Life handling
Hub	- Iron	Recycling (Foundry)
Canopy	- Glass Fibre/Epoxy or Steel	Recycling, Incineration or landfill
Nacelle*	- Steel, permanent magnets, PCB, batteries	Recycling (as filler), Incineration or landfill
Platforms and ladders	- Aluminium	Recycling (Foundry)
Blades	- Glass Fibre, Epoxy and Balsa Wood	Recycling (as filler), Incineration or landfill
Cables and busbars	- Plastic, copper & aluminium	Recycling (Foundry)
Tower	- Steel	Recycling (Foundry)
Miscellaneous	- Lubricants, grease, paint, rubber, plastic	Recycling, Incineration or landfill

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται το βάρος των υλικών των Α/Γ ενός αιολικού πάρκου των 60MW για το οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση.

Συνολικό δυναμικό ανακυκλώσιμων υλικών 60MW Α/Γ

Materials used in the Wind Turbine	Approximate Material (kg)
1. Ferrous metal	6 560 000
2. Aluminium	104 000
3. Composite materials	660 000
4. Lubricating oil	30 000
5. Electronics	124 000
6. Batteries	36 000
7. Fluorescent lamps	3800
8. NdFeB magnet	40 000
9. Copper	292 000
10. Balsa wood	29 000
11. Polyethylene	32 000
12. Polypropylene	6600
13. Polyvinylchloride	6000
14. Miscellaneous (less than 1% of total weight)	
Total	7 923 400

Τα σιδηρούχα μέταλλα είναι το πιο συνηθισμένο υλικό των Α/Γ. Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή σιδηρούχων μετάλλων ποικίλει ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής 14 MJ kg^{-1} , 19.2 MJ kg^{-1} , 11.7 MJ kg^{-1} . Η ενέργεια που εξοικονομείται από την ανακύκλωσή τους εξαρτάται από την παραγωγή τους και τη μέθοδο ανακύκλωσης. Ο χάλυβας μπορεί να ανακυκλωθεί πολλές φορές και αποτελεί το πιο συνηθισμένο ανακυκλώσιμο μέταλλο.

Το αλουμίνιο μπορεί να ανακυκλώνεται επαναλαμβανόμενα χωρίς να χάνει το μεγαλύτερο μέρος των ιδιοτήτων του. Το περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει από την ανακύκλωσή του αλουμινίου είναι μεγάλο συγκριτικά με την πρωτογενή παραγωγή του, καθώς η ενέργεια που απαιτείται για την πρωτογενή παραγωγή εκτιμάται σε 47 MJ kg^{-1} . Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του ανακυκλωμένου αλουμινίου εκτιμάται σε 2.4 MJ kg^{-1} , εξοικονομώντας περίπου 95%.

Το λιπαντικό έλαιο μπορεί να ανακυκλωθεί επ' αόριστων, καθώς δεν φθείρεται, και διατηρεί την ποιότητα του. Η πρωτογενής ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του ελαίου εκτιμάται σε 10 MJ kg^{-1} , ενώ η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του ανακυκλωμένου 3.4 MJ/kg^{-1} .

Ο χαλκός, επίσης, μπορεί να ανακυκλωθεί χωρίς να χάσει τις ιδιότητες του. Η εξοικονόμηση ενέργειας από την ανακύκλωση του χαλκού ποικίλει ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής, αλλά κυμαίνεται μεταξύ 10.6 MJ kg^{-1} και 19.2 MJ kg^{-1} . Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή ανακυκλωμένου υλικού είναι 6.3 MJ/kg .

Οι πιθανές μέθοδοι ανακύκλωσης των NdFeb μαγνητών μετά το τέλος του κύκλου ζωής είναι υπό ανάπτυξη για τη βελτίωση της οικονομικής σκοπιμότητας και του περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Η ενέργεια για την παραγωγή τους εκτιμάται σε 330 MJ/kg , ενώ η ενέργεια που απαιτείται για την ανακύκλωση τους είναι 191.4 MJ/kg .

Τα προϊόντα ξύλου μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν. Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή τους είναι μεταξύ 8.97 MJ/kg και 7.57 MJ/kg . Με την ανακύκλωση του εξοικονομείται 6.4 MJ/kg .

Τα πλαστικά (PE, PP, PVC) ανακυκλώνονται μηχανικά. Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή PE είναι 76.7 MJ kg^{-1} , για την παραγωγή PP είναι 73.4 MJ kg^{-1} και για την παραγωγή PVC είναι 56.7 MJ kg^{-1} . Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή των ανακυκλωμένων κυμαίνεται μεταξύ $8 - 55 \text{ MJ kg}^{-1}$ αναλόγως της διαδικασίας ανακύκλωσης. Στην ανάλυση τέθηκε 55 MJ kg^{-1} ως σημείο αναφοράς για τα PE και PP, 40 MJ kg^{-1} για το PVC.

Τα υλικά των μπαταριών διαφέρουν, όπως και τα βήματα παραγωγής, αλλά γενικά οι εκπομπές από την παραγωγή είναι υψηλές και επομένως η ανακύκλωση τους μειώνει σημαντικά τις εκπομπές. Τα ηλεκτρονικά και οι λάμπες δεν υπολογίζονται στη μελέτη.

Η πολυπλοκότητα και η αβεβαιότητα των μεθόδων διαχείρισης των μερών των Α/Γ διαφέρουν, αλλά η συνήθης δυσκολία έγκειται στην ανακύκλωση των σύνθετων υλικών των πτερυγίων. Τα σύνθετα υλικά είναι το κύριο υλικό των πτερυγίων και συχνά της ατράκτου. Τα πτερύγια αποτελούνται από ίνες γυαλιού, εποξικά ως μήτρα πολυμερούς, ξύλο balsa ως υλικό πυρήνα και επίστρωση πολυουρεθάνης. Οι μέθοδοι ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών GFRP αντιμετωπίζουν μεγαλύτερες προκλήσεις λόγω της πολύπλοκης δομής τους. Οι καθιερωμένες μέθοδοι ανακύκλωσης των πτερυγίων είναι λίγες. Οι μέθοδοι αυτές είναι η μηχανική ανακύκλωση, η πυρόλυση και η χημική ανακύκλωση. Σημαντικά εμπόδια της ανακύκλωσης αυτή τη στιγμή είναι το κόστος των εργασιών ανακύκλωσης και η έλλειψη αγοράς των ανακυκλωμένων προϊόντων. Άλλες εναλλακτικές πέραν της ανακύκλωσης θα ήταν η υγειονομική ταφή ή η αποτέφρωση με την αποτέφρωση να είναι η πιο συνήθης μέθοδος. Η απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή ενός kg σύνθετου υλικού εκτιμάται σε 111.88 MJ συμπεριλαμβανομένων της παραγωγής ινών, ρητίνης κλπ.

Το ανακυκλωμένο σύνθετο υλικό δεν έχει την ίδια ποιότητα, αλλά εκτιμάται ότι το υλικό πλήρωσης εξοικονομεί 19 MJ/kg των υλικών που αντικαθιστά.

Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει την απογραφή του κύκλου ζωής που πραγματοποιήθηκε στη μελέτη.

Θεωρητική εξοικονόμηση ενέργειας και CO₂ από 100% ανακύκλωση ανεμογεννητριών

Materials used in the Wind Turbine	Amount of Material (kg)	Energy Saved (MJ kg ⁻¹)	Total Energy Savings (GJ)	CO ₂ Saved (kg)	Total CO ₂ Savings (ton)
1. Ferrous metal (steel and iron)	6 560 000	7.5	49 200	0.84	5510
2. Aluminum	104 000	44.6	4638	3.54	368
3. Composite material	660 000	19	12 540	N/A	N/A
4. Lubricating oil	30 000	6.6	198	N/A	N/A
5. Electronics	124 000	N/A	N/A	N/A	N/A
6. Batteries	36 000	140	5040	13.62	490
7. Fluorescent lamps	3800	N/A	N/A	N/A	N/A
8. NdFeB magnet	40 000	138.6	5544	17	680
9. Copper	292 000	10.6	3095	0.88	257
10. Balsa wood	29 000	6.53	189	0.77	22
11. Polyethylene	32 000	21.7	694	0.5	16
12. Polypropylene	6600	18.4	121	0.6	4
13. Polyvinylchloride	6000	16.7	100	0.5	3
Total			81 361		7351

Οι απαιτήσεις σε ενέργεια για τα δευτερογενή υλικά είναι γενικά χαμηλότερες από των παρθένων υλικών, κάτι που ήταν και αναμενόμενο. Επιπλέον, από την ανάλυση παρατηρείται ότι κάποια υλικά ή δομές, όπως τα πτερύγια έχουν μία απώλεια στην ποιότητα μετά την ανακύκλωσή τους. Η εξοικονόμηση ενέργειας από την ανακύκλωση του αιολικού πάρκου των 60MW υπολογίζεται στα 81TJ, το οποίο ισοδυναμεί με την ενεργειακή κατανάλωση περίπου 14400 ατόμων στη Δανία το χρόνο, δηλαδή 1568 kW /h το άτομο. Η μείωση των εκπομπών από την ανακύκλωση των υλικών φτάνει συνολικά τους 7351ton CO₂ που ισοδυναμεί περίπου με 52.5 εκ. km οδήγησης αυτοκινήτου με μέσες εκπομπές 0.17 kg CO₂/km. Οι συγκρίσεις αυτές δείχνουν πόσο μεγάλο όφελος μπορεί να αποκτηθεί από την ανακύκλωση των Α/Γ διατηρώντας τους πόρους για τις επόμενες γενιές.

Στην ανάλυση γίνεται η υπόθεση ότι το ποσοστό ανακύκλωσης είναι 100%, ακόμα και για υλικά που μπορεί να αμφισβητηθεί, όπως το ξύλο balsa, το οποίο περιέχει ίνες και εποξικά. Επομένως η ανάλυση της φάσης παροπλισμού και της διαδικασίας ανακύκλωσης αποτελούν ένα θεωρητικό σενάριο 100% ανακύκλωσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχουν μέθοδοι ανακύκλωσης αυτή τη στιγμή για τα περισσότερα υλικά και τα περιβαλλοντικά οφέλη από την ανακύκλωση των μερών των Α/Γ ενός πάρκου 60MW στο τέλος του κύκλου ζωής είναι σημαντικά. Συγκεκριμένα, μειώνεται η χρήση των φυσικών πόρων εξασφαλίζοντας τη χρήση τους μελλοντικά. Παρόλα αυτά, για τη μεγιστοποίηση του περιβαλλοντικού οφέλους από την ανακύκλωση των Α/Γ κρίνεται σκόπιμη η εκτενέστερη ανάλυση και βελτίωση διάφορων συνθηκών. Μερικά μέρη των Α/Γ, όπως τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά έχουν μία πολύπλοκη και άγνωστη σύνθεση υλικών που μπορεί να εμποδίσει την αποτελεσματική δυνατότητα ανακύκλωσης.

Σημαντικοί παράγοντες για την επίτευξη της ανακύκλωσης είναι τα logistics και οι τεχνικές απαιτήσεις, τα οποία συνδέονται και με οικονομικούς παράγοντες. Πολλές από τις υποδομές και τον εξοπλισμό θα μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν για τον παροπλισμό αλλά απαιτείται η ανάπτυξη πρακτικών διαχείρισης της ανακύκλωσης εξασφαλίζοντας τη βιώσιμη διαχείριση των Α/Γ στο τέλος του κύκλου ζωής. Επιπλέον, σημαντική είναι και η επαναχρησιμοποίηση των εξαρτημάτων. Θα πρέπει να υπάρξει σωστή παρακολούθηση, έτσι ώστε εξαρτήματα να επαναχρησιμοποιούνται αυξάνοντας το ποσοστό ανακύκλωσης και επομένως το περιβαλλοντικό όφελος. Για παράδειγμα, κάποια μέρη της Α/Γ μπορεί να αλλάξουν ακόμα και κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής και τα μέρη αυτά θα μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν αντί να σταλούν σε τεμαχιστή (shredder), μειώνοντας την ποιότητα και το περιβαλλοντικό όφελος. Περαιτέρω πρακτικές και έρευνα σε σχέση με το οικονομικό μέρος της ανακύκλωσης θα βοηθούσε τη βελτίωση της διαδικασίας ανακύκλωσης.

Εκ του αποτελέσματος, η διαδικασία παροπλισμού είναι μία αρκετά πολύπλοκη διαδικασία που ενέχει κινδύνους και αβεβαιότητα. Η μελέτη αυτή εστίασε στην εκτίμηση των ενδεχόμενων οφελών της ανακύκλωσης των μερών των Α/Γ βασιζόμενη στη βιβλιογραφία, σε ειδικούς και κατασκευαστές. Σημαντική θα ήταν και η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των κατασκευαστών και των διαχειριστών των μερών των Α/Γ, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ανακύκλωση των υλικών που ανακυκλώνονται εύκολα, αυξάνοντας το συνολικό ποσοστό ανακύκλωσης μίας Α/Γ. Η πρακτική εμπειρία πάνω στον παροπλισμό και την ανακύκλωση των Α/Γ θα βελτιώσει την ακρίβεια και την εκτίμηση των πραγματικών περιβαλλοντικών οφελών και του αντίκτυπου. Σε αυτό θα βοηθούσε και η εκτίμηση του οικονομικού αντίκτυπου.

3 Οι Pu Liu et al κάνουν ανάλυση και σύγκριση των διαφορετικών εναλλακτικών διάθεσης των πτερυγίων των Α/Γ μετά το τέλος του κύκλου ζωής στα πλαίσια των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, εστιάζοντας στην κατανάλωση ενέργειας, στα οφέλη της ανακύκλωσης και στην επίδραση των τάσεων ανάπτυξης των πτερυγίων, για τον καθορισμό της βέλτιστης λύσης με το μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο (Liu, et al., 2019). Στη μελέτη γίνεται ανάλυση και σύγκριση διάφορων σεναρίων για να δείξουν πως οι βέλτιστες λύσεις επηρεάζονται από τη σύνθεση των πτερυγίων και τη διαδικασία διαχείρισης τους στο τέλος του κύκλου ζωής. Η πιο ευνοϊκή περιβαλλοντική διαδικασία εξαρτάται από το υλικό κατασκευής των πτερυγίων, εάν δηλαδή είναι από ενισχυμένα πολυμερή με ίνες γυαλιού (GFRP) ή με ίνες άνθρακα (CFRP). Ο βαθμός στον οποίο η βελτίωση της τεχνολογίας μπορεί να επηρεάσει τη βιωσιμότητα των εναλλακτικών διαδικασιών στο τέλος του κύκλου ζωής αξιολογείται συγκριτικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι εναλλακτικές επιλογές διάθεσης των πτερυγίων είναι η υγειονομική ταφή, η αποτέφρωση, η μηχανική ανακύκλωση, η διαδικασία ρευστοποιημένης κλίνης (fluidised-bed) και η πυρόλυση.

Τα απόβλητα των πτερυγίων έχουν ειδικά χαρακτηριστικά, όπως η πολύπλοκη και μικτή σύνθεση των υλικών συμπεριλαμβανομένων των ινών, της ρητίνης, των δομικών υλικών και του υποστηρικτικού υλικού. Επιπλέον υπάρχει μία διαφοροποίηση μεταξύ των πτερυγίων στα πλαίσια του σχεδιασμού της δομής, του μεγέθους και της σύνθεσης των υλικών. Το μεγάλο μέγεθος των πτερυγίων ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα στην αποσυναρμολόγηση, τη μεταφορά και τη μείωση του μεγέθους. Οι ίνες γυαλιού που αποτελούν το κύριο υλικό κατασκευής έχουν χαμηλή αξία και η θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη δεν μπορεί να επαναδιαμορφωθεί.

Μεθοδολογία

Στη μελέτη πραγματοποιείται μία σύγκριση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου από τις διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης των πτερυγίων μέσω απλοποιημένης εκτίμησης του κύκλου ζωής (eco-audit). Ως μέτρο περιβαλλοντικού αντίκτυπου καθορίστηκε η κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με τη μεθοδολογία eco-audit.

Το περιβαλλοντικό αντίκτυπο του πτερυγίου κατά τη διάρκεια ζωής του προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους αντίκτυπων της κατασκευής, της μεταφοράς, της λειτουργίας και συντήρησης. Το συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο περιλαμβάνει και το αντίκτυπο μετά το τέλος ζωής. Το περιβαλλοντικό όφελος ανακύκλωσης από την κάθε μέθοδο στο τέλος ζωής EoL (End of Life) καθορίζεται ως το ισοδύναμο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από την κατασκευή του ανακυκλωμένου υλικού ή της ενέργειας που ανακτάται μέσω των EoL διαδικασιών. Ένα αντίκτυπο από την ανακύκλωση με αρνητικό πρόσημο είναι επιθυμητό, καθώς σημαίνει ότι η ενέργεια ανακτάται από τη διαδικασία. Το καθαρό αντίκτυπο κάθε μεθόδου EoL υπολογίζεται από το άθροισμα του οφέλους από την ανακύκλωση κάθε μεθόδου EoL και του αντίκτυπου κατά τη διάρκεια ζωής. Το καθαρό αντίκτυπο κάθε εναλλακτικής επιλογής EoL συγκρίνεται με το αντίκτυπο από τη υγειονομική ταφή σαν σημείο αναφοράς και στη συνέχεια εξετάζεται η βέλτιστη επιλογή διαχείρισης των πτερυγίων βάσει του περιβαλλοντικού οφέλους. Η κύρια υπόθεση είναι ότι το όφελος από την ανακύκλωση είναι ανάλογο της αντοχής εφεκλυσμού, από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των πτερυγίων. Η κατανάλωση ενέργειας (MJ/kg) είναι η κύρια μέτρηση που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Για τους σκοπούς της μελέτης επιλέγονται τρία μοντέλα πτερυγίων ίδιου μεγέθους: ένα κατασκευασμένο πλήρως από ίνες γυαλιού, ένα πλήρως από ίνες άνθρακα και ένα υβριδικό (ίνες γυαλιού και άνθρακα). Το μοντέλο από ίνες άνθρακα είναι υποθετικό, καθώς ολόκληρα πτερύγια από αυτό το υλικό είναι εξαιρετικά σπάνια. Τα μοντέλα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Μοντέλα πτερυγίων

Model	GF blade (Manufacturer A)	Hybrid blade (Manufacturer A)	CF blade (Hypothetical)
Material	GF	CF spar cap GF for the rest	CF
Length/m	45.2	45.3	45.3
Rated Power/MW	1.5	2.0	2.0
Weight/tonne	7.58	7.50	6.24

Για τους σκοπούς της μελέτης γίνεται μία εκτίμηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου στα στάδια κατασκευής, μεταφοράς, λειτουργίας-συντήρησης (GJ). Στις διαδικασίες EoL περιλαμβάνονται τεχνολογίες ανακύκλωσης που εφαρμόζονται ή είναι κοντά στο να εφαρμοστούν (μηχανική ανακύκλωση, ρευστοποιημένη κλίνη, πυρόλυση) και οι τεχνολογίες ανακύκλωσης που βρίσκονται σε εργαστηριακή κλίμακα (πυρόλυση με μικροκύματα MAP, χημική ανακύκλωση hydrolysis και solvolysis, high voltage fragmentation HVF). Η επέκταση ζωής χρησιμοποιείται στην ανάλυση ως εναλλακτική λύση: για 2 χρόνια, 5 χρόνια και 10 χρόνια. Επιπλέον, στις εναλλακτικές διαχείρισης των πτερυγίων περιλαμβάνονται και η αποτέφρωση και η υγειονομική ταφή. Οι ενεργειακές απαιτήσεις (MJ/kg) κάθε διαδικασίας φαίνονται παρακάτω:

Απαιτούμενη ενέργεια (MJ/kg) κάθε επιλογής EoL

MJ/kg waste	Full GF	Hybrid	Full CF	Source
Landfill	0.26	0.26	0.26	(Li et al., 2016)
Incineration	-4.16	-4.16	-4.16	By author
Mechanical	0.27	0.27	0.27	(Howarth et al., 2014)
Fluidised-Bed Process	22.22	22.22 for GFRP waste 9.00 for CFRP waste	9.00	(Meng et al., 2017b; Pickering et al., 2015, 2000)
Pyrolysis	21.21	21.21	21.21	(Barnes, 2015; Cunliffe et al., 2003; Witik et al., 2013)
Microwave Assisted Pyrolysis	10.00	10.00	10.00	(Suzuki and Takahashi, 2005)
Chemical	19.20	19.20	19.20	(Keith et al., 2016)
High Voltage Fragmentation	16.20	16.20	16.20	(Weh, 2012b)
Life extension 2 years	0.55	0.70	1.40	By author
Life extension 5 years	1.37	1.75	3.49	By author
Life extension 10 years	2.73	3.50	6.99	By author

Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Για τα πτερύγια από ίνες γυαλιού το μεγαλύτερο αντίκτυπο προκύπτει από τις διαδικασίες της ρευστοποιημένης κλίνης και της πυρόλυσης, το οποίο αποδίδεται στην υψηλή κατανάλωση ενέργειας και τη χαμηλή αξία του ανακυκλωμένου υλικού. Οι υπόλοιπες διαδικασίες έχουν λίγο χαμηλότερο αντίκτυπο από την υγειονομική ταφή, προσδίδοντας οριακή μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι εναλλακτικές επέκτασης ζωής οδηγούν σε μεγαλύτερες μειώσεις του συνολικού αντίκτυπου. Το ρίσκο αστοχίας του πτερυγίου αυξάνεται όσο πιο μακρύ είναι το πτερύγιο, αλλά η επέκταση ζωής αξιολογείται ενεργά εμπορικά.

Για τα υβριδικά πτερύγια, τα περιβαλλοντικά οφέλη για τις περισσότερες EoI λύσεις αυξάνονται σε σύγκριση με τα πτερύγια από ίνες γυαλιού. Το συνολικό αντίκτυπο είναι υψηλότερο και πάλι στις διαδικασίες της ρευστοποιημένης κλίνης και της πυρόλυσης, ενώ το αντίκτυπο από την αποτέφρωση μειώνεται. Η πιο υποσχόμενη επιλογή EoI είναι η χημική ανακύκλωση.

Για τα πτερύγια από ίνες άνθρακα, η ρευστοποιημένη κλίνη και η πυρόλυση οδηγούν σε μείωση του αντίκτυπου συγκρινόμενο με αυτό της υγειονομικής ταφής, ενώ ακόμα μεγαλύτερη μείωση προκύπτει από την HFV. Τη μεγαλύτερη μείωση του αντίκτυπου, όμως, έχει η χημική ανακύκλωση μειώνοντας το ποσοστό αντίκτυπου σε σχέση με την υγειονομική ταφή σχεδόν στο μισό.

Συνοπτικά, η βέλτιστη διαχείριση των πτερυγίων από ίνες γυαλιού στο τέλος του κύκλου ζωής με κριτήριο το χαμηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο είναι η μηχανική ανακύκλωση για το παρόν, ενώ για το μέλλον η χημική ανακύκλωση. Αντίστοιχα, για τη διαχείριση των υβριδικών πτερυγίων η λύση με το μικρότερο αντίκτυπο για το παρόν είναι η μηχανική ανακύκλωση, ενώ για το μέλλον η χημική ανακύκλωση. Για τη διαχείριση των πτερυγίων με ίνες άνθρακα από τη μελέτη προκύπτει ότι η καλύτερη λύση είναι η μέθοδος ρευστοποιημένης κλίνης για ανακύκλωση αυτή τη στιγμή, ενώ στο μέλλον η χημική ανακύκλωση.

Στη μελέτη αυτή γίνεται μία σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων για τα πτερύγια των Α/Γ που φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής χρησιμοποιώντας ως μέτρο περιβαλλοντικού αντίκτυπου την ενεργειακή κατανάλωση. Το αποτέλεσμα επηρεάζεται από το υλικό των πτερυγίων. Η μελέτη υποδεικνύει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από τη βελτίωση των μεθόδων επεξεργασίας των πτερυγίων. Στην πραγματική επεξεργασία των αποβλήτων από πτερύγια θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες, όπως το κόστος ανακύκλωσης, οι διαφορές μεταξύ των χωρών, τα επίπεδα ετοιμότητας της τεχνολογίας, η κατάσταση της αγοράς και η πολιτική. Η μελέτη αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στην αναγνώριση των κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης των αποβλήτων στα πλαίσια ελαχιστοποίησης του περιβαλλοντικού αντίκτυπου και στη διατύπωση κατευθυντήριων γραμμών στη βιομηχανία και στους πολιτικούς για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

4 Οι Nagle et al. πραγματοποιούν μία μελέτη για τον καθορισμό της πιο βιώσιμης διαχείρισης των αποβλήτων από πτερύγια Α/Γ στην Ιρλανδία για τα επόμενα δέκα χρόνια συγκρίνοντας τρία εναλλακτικά σενάρια. Η AKZ χρησιμοποιείται ως εργαλείο για τη συγκριτική ανάλυση των μεθόδων διαχείρισης των παροπλισμένων πτερυγίων μετά το τέλος ζωής τους, καθορίζοντας ποιο Σενάριο έχει το μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. (Nagle, et al., 2020)

Τα σενάρια που επιλέχθηκαν είναι τα εξής:

Σενάριο 1: Συν-επεξεργασία (co-processing) στο εξωτερικό (Γερμανία)

Σενάριο 2: Συν-επεξεργασία (co-processing) στην Ιρλανδία

Σενάριο 3: Υγειονομική ταφή στην Ιρλανδία

Η υγειονομική ταφή επιτρέπεται στην Ιρλανδία σε αντίθεση με άλλες χώρες της Ευρώπης, όπως η Γερμανία. Το κόστος ταφής, όμως, στην Ιρλανδία είναι ιδιαίτερα υψηλό 113 €/tn, από τα πιο υψηλά στην Ευρώπη. Μέχρι στιγμής η συν-επεξεργασία δεν χρησιμοποιείται ως μέθοδος διαχείρισης των αποβλήτων στην Ιρλανδία, αλλά λόγω της συνεχούς αύξησης των παροπλισμένων πτερυγίων υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες να καταστεί αυτή η μέθοδος βιώσιμη. Στη συν-επεξεργασία τα πτερύγια τεμαχίζονται και χρησιμοποιούνται αντί καυσίμων και άλλων υλικών για την παραγωγή κλίνκερ, προσδίδοντας περιβαλλοντικά οφέλη συγκριτικά. Ο βασικός ανασταλτικός παράγοντας για την συν-επεξεργασία των πτερυγίων είναι το υψηλό κόστος τεμαχισμού των πτερυγίων στην Ιρλανδία.

Μέθοδοι

Στόχος της ΑΚΖ στη μελέτη αυτή είναι η σύγκριση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των τρεχόντων και ενδεχόμενων μεθόδων διαχείρισης των παροπλισμένων πτερυγίων Α/Γ κατασκευασμένων από ενισχυμένο πολυμερές ινών γυαλιού (Glass Fibre Reinforced Polymer) .

Το μοντέλο της Α/Γ που επιλέγεται είναι VestasV52 850 kW με τρία πτερύγια των 25m το καθένα, καθώς αποτελεί ένα συνηθισμένο μοντέλο για παροπλισμό στην Ιρλανδία. Το βάρος του κάθε πτερυγίου ανέρχεται στα 1900kg, φτάνοντας συνολικά τους 5.7 tn. Η λειτουργική μονάδα βασίζεται στη συνολική μάζα των τριών πτερυγίων μίας Α/Γ VestasV52 που βρίσκεται στην Ιρλανδία και καθορίζεται ως “Διάθεση 5.7 tn πτερυγίων μίας Α/Γ που παροπλίστηκαν στην Ιρλανδία”.

Υπολογισμός μάζας για υλικά ενός πτερυγίου μοντέλου VestasV52

Component	% Total Weight	Total Mass in 5700 kg Blade Waste (kg)
E-Glass	56%	3192
Epoxy	30%	1710
Foam & Adhesive	9%	513
Metal	5%	285

Τα όρια του συστήματος ξεκινούν αφού αφαιρεθούν τα πτερύγια από την πλήμνη και τα οποία κόβονται σε κομμάτια 1.5 m². Το μέγεθος του 1.5 m² είναι ένα σύνηθες μέγεθος για τον παροπλισμό των πτερυγίων στην Ιρλανδία, χωρίς να αποκλείεται η διαφοροποίηση του μεγέθους σε κάποιες περιπτώσεις. Επίσης αναφέρονται τα εξής:

- Δεν συμπεριλαμβάνονται οι επιπτώσεις από την παραγωγή ή τη χρήση των πτερυγίων κατά τη διάρκεια ζωής τους.
- Το μέγεθος κοπής των πτερυγίων σε 1.5 m² ισχύει για όλα τα Σενάρια

- Οι επιπτώσεις από τη μεταφορά και την επεξεργασία των περυγίων μέχρι την τελική τους διάθεση είτε στο χώρο υγειονομικής ταφής, είτε γίνεται ανακύκλωση μετάλλων είτε χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο και πρώτη ύλη για την συν-επεξεργασία σε κλίβανο τσιμέντου λαμβάνονται υπόψη.

Σενάριο 1: Συν-επεξεργασία (co-processing) στο εξωτερικό (Γερμανία)

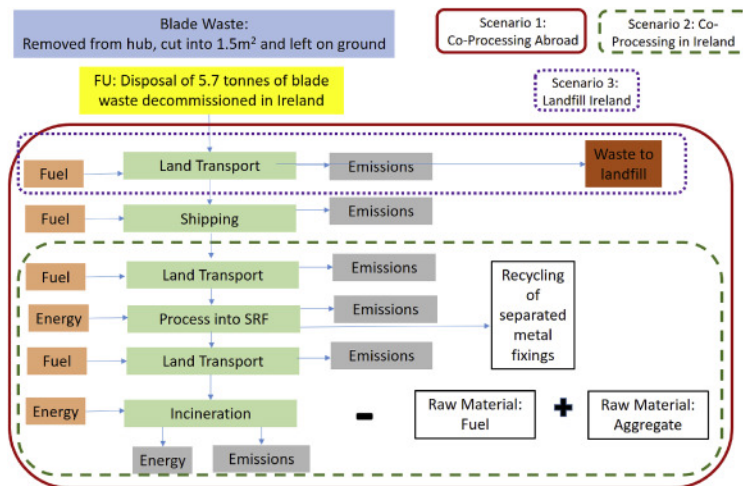
Τα περύγια μεταφέρονται και επεξεργάζονται σε εταιρία διάθεσης στη Βρέμη της Γερμανίας. Εκεί το ενισχυμένο πολυμερές (GFRP) συνδυάζεται με άλλα υλικά για να σχηματιστεί στερεό ανακτηθέν καύσιμο (SRF), το οποίο στέλνεται σε εργοστάσιο βιομηχανίας τσιμέντου στο Lägerdorf της Γερμανίας για να χρησιμοποιηθεί σε κλίβανο τσιμέντου. Τα όρια του συστήματος περιλαμβάνουν τη μεταφορά με πλοίο στην Ευρώπη, τη μεταφορά οδικώς από το λιμάνι στον τόπο προ-επεξεργασίας (σχηματισμός SRF), μεταφορά στον κλίβανο τσιμέντου και επεξεργασία στον κλίβανο τσιμέντου.

Σενάριο 2: Συν-επεξεργασία (co-processing) στην Ιρλανδία

Το Σενάριο αυτό αποτελεί ένα υποθετικό Σενάριο, καθώς όπως προαναφέρθηκε η συν-επεξεργασία δεν χρησιμοποιείται ως μέθοδος διαχείρισης των αποβλήτων στην Ιρλανδία. Τα όρια του συστήματος περιλαμβάνουν τη χερσαία μεταφορά των περυγίων σε μέρος προ-επεξεργασίας στην Ιρλανδία, την επεξεργασία σε SRF, τη χερσαία μεταφορά σε κλίβανο τσιμέντου στην Ιρλανδία και τέλος την επεξεργασία στον κλίβανο τσιμέντου. Στα όρια του συστήματος περιλαμβάνονται όλα τα καύσιμα και οι εκπομπές που παράγονται, όπως επίσης και τα καύσιμα που αντικαθίστανται από τα υλικά των περυγίων, όπως και η ανακύκλωση των μετάλλων. Τα περύγια μεταφέρονται σε ποσότητες των 6-8 tn και κόβονται σε κομμάτια <40mm. Τα μέταλλα αφαιρούνται για ανακύκλωση και το υλικό που απομένει συνδυάζεται με άλλα υλικά για τη δημιουργία SRF , που θα χρησιμοποιηθεί σε εργοστάσιο τσιμέντου.

Σενάριο 3: Υγειονομική ταφή στην Ιρλανδία

Τα όρια του συστήματος περιλαμβάνουν τη μεταφορά των περυγίων στο XYTA και τις επιπτώσεις που προκλήθηκαν από τη διάθεση των περυγίων στο XYTA. Για τους σκοπούς της μελέτης τα απόβλητα μεταφέρονται απευθείας στο XYTA.



Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Στη μελέτη αυτή γίνεται ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη διάθεση παροπλισμένων Α/Γ στην Ιρλανδία μέσω AKZ συγκρίνοντας τρία εναλλακτικά σενάρια. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το Σενάριο 1(συν-επεξεργασία στην Ιρλανδία) έχει τις λιγότερο δυσμενείς επιπτώσεις σε σύγκριση με τα άλλα δύο Σενάρια. Οι διαφορές μεταξύ του Σεναρίου 2 και του Σεναρίου 1 είναι η μείωση των μεταφορών στο Σενάριο 2 και κάποιες διαφοροποιήσεις στα τοπικά ενεργειακά μείγματα (Ιρλανδία-Γερμανία). Τα Σενάριο 2 είναι 1007% πιο ωφέλιμο από το Σενάριο 3 (Ταφή). Όλα τα οφέλη του Σεναρίου 2 προκύπτουν από την υποκατάσταση των υλικών, ενώ τα αρνητικά από τις μεταφορές και την κοπή των περυγίων.

Το ποσοστό της υποκατάστασης (διακύμανση 10%-50%) καυσίμων και πρώτων υλών με τεμαχισμένα περυγία από E-glass προκάλεσε θετικό αντίκτυπο στις κατηγορίες Human health, Climate change και Resources, συνολικά 415% βελτίωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Οι αλλαγές που προέκυψαν στην ποιότητα του οικοσυστήματος (Ecosystem Quality) είναι αμελητέες. Η συν-επεξεργασία στην Ιρλανδία, που απαιτεί μικρότερες αποστάσεις μεταφοράς σε σύγκριση με τη Γερμανία, είχε θετικό αντίκτυπο στις κατηγορίες Human Health (-69%), Climate Change (-20%) και Resources (-33%) με μέσο όρο 41%. Τα περιβαλλοντικά οφέλη μεγαλώνουν όταν το ποσοστό υποκατάστασης καυσίμων και πρώτων υλών αυξάνεται από 10% σε 50%, παρά μειώνοντας τις αποστάσεις για τη μεταφορά. Πραγματοποιήθηκε και ανάλυση ευαισθησίας για τις μεταβλητές: μεταφορά, τύπο φόρτωσης για θαλάσσια μεταφορά και ενεργειακό μείγμα, όμως το θετικό αντίκτυπο ήταν πολύ μικρό και το Σενάριο 2 παρέμεινε το σενάριο με το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό όφελος συνολικά.

Η μελέτη αυτή είναι μία πρόωμη μελέτη παροπλισμένων περυγίων που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή τσιμέντου και δείχνει μέσω μίας πλήρους AKZ ότι το αποτύπωμα άνθρακα λόγω της μεταφοράς έχει πολύ μικρότερη επιρροή εάν συγκριθεί με το περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει από την αντικατάσταση πρώτων υλών. Η μελέτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως baseline για μελλοντική

σύγκριση άλλων μεθόδων επαναπροσδιορισμού (repurposing) των παροπλισμένων πτερυγίων, εάν μία μέθοδος που είναι υψηλότερα στην ιεραρχία διαχείρισης των αποβλήτων (Waste Management Hierarchy) έχει μεγαλύτερο περιβαλλοντικό όφελος από τη μέθοδο διάθεσης που χρησιμοποιείται εδώ. Παρόλα αυτά δημιουργείται μία ανησυχία ότι η ευκολία διάθεσης των αποβλήτων από πτερύγια με αυτό τον τρόπο αυτό θα μπορούσε να αποτρέψει τον επαναπροσδιορισμό (repurposing) των αποβλήτων, που είναι υψηλότερα στην Ιεραρχία Αποβλήτων. Η ανάπτυξη λύσεων πιο περιβαλλοντικά, αλλά και οικονομικά ωφέλιμων, θα ήταν μία πρόκληση, έτσι ώστε από την συν-επεξεργασία να περάσουμε σε πιο βιώσιμες εναλλακτικές. Αυτή τη στιγμή άλλες μέθοδοι ανακύκλωσης του GFRP, όπως η πυρόλυση ή μηχανική άλεση (Mechanical grinding) για πληρωτικά τσιμέντου ή επανένωση συνθετικών δεν είναι ακόμα οικονομικά βιώσιμες, ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικές. Φορολογικές ελαφρύνσεις και κυρώσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως κίνητρο για τη χρήση μεθόδων διάθεσης που βρίσκονται πιο υψηλά στην ιεραρχία. Για παράδειγμα μία αύξηση του κόστους για διάθεση σε ΧΥΤΑ και καύση των GFRP αντισταθμίζοντας το κόστος της συν-επεξεργασίας θα μπορούσε να είναι μία λύση. Επιπλέον θα μπορούσε να εφαρμοστεί μία Οδηγία, όπως αυτή των οχημάτων που φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους (End of Life Vehicle directive), καθορίζοντας το ποσοστό ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των σύνθετων υλικών στο 95%. Στη μελέτη υπάρχει η αβεβαιότητα σχετικά με το πραγματικό ποσοστό υποκατάστασης των πρώτων υλών με τα απόβλητα GFRP στο εργοστάσιο τσιμέντου Lägerdorf και πόσο θα ήταν το ποσοστό υποκατάστασης σε ένα κλίβανο τσιμέντου στην Ιρλανδία. Αυτό έχει μεγάλη σημασία, καθώς το περιβαλλοντικό αντίκτυπο επηρεάζεται σημαντικά από το ποσοστό υποκατάστασης των πρώτων υλών.

5 Οι Martínez, et al πραγματοποίησαν ΑΚΖ μίας Α/Γ χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Eco-indicator99 LCA και έκαναν ανάλυση ευαισθησίας εξετάζοντας τέσσερα εναλλακτικά σενάρια για την εκτίμηση των επιπτώσεων μίας Α/Γ (Martínez, et al., 2010). Τα τέσσερα σενάρια αφορούν στα στάδια του κύκλου ζωής μίας Α/Γ: συντήρηση (AS1), κατασκευή (AS2), αποσυναρμολόγηση (AS3) και ανακύκλωση (AS4). Παρακάτω θα αναλυθούν τα σενάρια AS3 και AS4 που αφορούν στο τελευταίο στάδιο ζωής της Α/Γ. Σκοπός της ανάλυσης ευαισθησίας είναι η αξιολόγηση των διαφορετικών επιλογών που έγιναν κατά την ανάπτυξη της ΑΚΖ.

Μία Ανάλυση του Κύκλου Ζωής πραγματοποιήθηκε για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μίας Α/Γ. Το μοντέλο της χερσαίας Α/Γ είναι Gamesa G8X με ονομαστική ισχύ 2MW, διάμετρο ρότορα 80m και ύψος 75m. Η διάρκεια ζωής της Α/Γ ανέρχεται στα 20 έτη. Στην ΑΚΖ περιλαμβάνονται όλα τα στάδια από την παραγωγή έως και τον παροπλισμό, με την επακόλουθη διάθεση των αποβλήτων. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Sima Pro 7.0. Για τη μελέτη λήφθηκε υπόψη το 95% της θεμελίωσης, το 95% του πύργου και το 85% της ατράκτου και του

ρότορα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μέθοδοι διάθεσης των αποβλήτων ανά υλικό.

Μέθοδοι διάθεσης βασικού Σεναρίου

Material	Disposal method
Iron	Recycled with a loss of 10%
Fibreglass	Landfill 100%
Oil	Incinerated 100%
Plastic – PVC	Landfill 100%
Other plastics	Incinerated 100%
Rubber	Incinerated 100%
Steel	Recycled with a loss of 10%
Copper	Recycled with a loss of 5%

Σενάριο AS3- Μείωση ποσοστού ανακύκλωσης

Μία ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται για τη σύγκριση μεταξύ του βασικού Σεναρίου και του Σεναρίου AS3 ανά περιβαλλοντικό δείκτη (impact category). Το τρίτο Σενάριο συνιστά μία αλλαγή στο ποσοστό των υλικών που θα ανακυκλωθούν κατά το στάδιο διάθεσης και διαχείρισης των αποβλήτων της Α/Γ. Η ανακύκλωση των αποβλήτων μετά την αποσυναρμολόγηση της Α/Γ αποτελεί μία σημαντική πτυχή για την εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής, καθώς μειώνει σημαντικά το περιβαλλοντικό αντίκτυπο της Α/Γ σε διαφορετικές κατηγορίες. (Στην περίπτωση του πύργου το περιβαλλοντικό όφελος από την ανακύκλωση αναπαριστά μία μείωση 52% του συνολικού αντίκτυπου, ενώ στην περίπτωση της ατράκτου αναπαριστά μείωση 31%). Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές σχετικά με τη μέθοδο διάθεσης των υλικών, όπου μειώνεται κατά πολύ το ποσοστό της ανακύκλωσης.

Μέθοδοι διάθεσης Σεναρίου AS3

Material	Disposal method
Iron	Recycled with a loss of 55%
Fibreglass	Landfill 100%
Oil	Incinerated 100%
Plastic – PVC	Landfill 100%
Other plastics	Incinerated 100%
Rubber	Incinerated 100%
Steel	Recycled with a loss of 55%
Copper	Recycled with a loss of 52.5%

Το εναλλακτικό Σενάριο AS3 δείχνει μία αύξηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου της Α/Γ σε όλο τον κύκλο ζωής, λόγω της μείωσης του ποσοστού των υλικών που ανακυκλώνονται μετά το τέλος ζωής. Στην περίπτωση του πύργου λόγω της σημαντικής μείωσης ανακύκλωσης του χάλυβα (κύριο υλικό του πύργου), το περιβαλλοντικό αντίκτυπο αυξάνεται σημαντικά με συνολική αύξηση 95.42% και ομοίως αυξήσεις της τάξεως του 56.58% και 40.61% στην περίπτωση της θεμελίωσης και της ατράκτου αντίστοιχα. Αυτές οι αυξήσεις στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις οδηγούν σε αύξηση του συνολικού αντίκτυπου της Α/Γ συνολικά. Οι σημαντικότερες αυξήσεις των επιπτώσεων είναι στις κατηγορίες “respiratory inorganics” και “fossil fuels” με τιμές 5000 και 6000 ecopoints, ενώ σημαντικές αυξήσεις των επιπτώσεων έχουν και οι κατηγορίες “carcinogens” και “minerals”.

Σενάριο AS4-Ανακύκλωση πτερυγίων

Το τέταρτο Σενάριο συνιστά μία αλλαγή στη διαχείριση των σύνθετων αποβλήτων από τα πτερύγια της Α/Γ στο στάδιο διάθεσης των αποβλήτων, από την υγειονομική ταφή στην ανακύκλωση. Το Σενάριο αυτό διερευνά τις πρακτικές δυνατότητες ανακύκλωσης στο κοντινό μέλλον, λαμβάνοντας υπόψη κανονισμούς που στοχεύουν στη μείωση της οργανικής ύλης που καταλήγει σε ΧΥΤΑ. Αυτό θα οδηγούσε σε σημαντική μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου της Α/Γ μετά την αποσυναρμολόγηση και τη διάθεση των μερών της Α/Γ στο τέλος του κύκλου ζωής. Για παράδειγμα, η Οδηγία 99/31/EC θέτει ως στόχο τη μείωση της ποσότητας της οργανικής ύλης που καταλήγει σε ΧΥΤΑ. Βάσει της Ιεραρχίας των Αποβλήτων η διαχείριση των σύνθετων υλικών των πτερυγίων θα προχωρούσε ένα βήμα παρακάτω εάν αυτά τα υλικά ανακυκλώνονταν. Σε πολλές χώρες της ΕΕ η διάθεση των σύνθετων υλικών σε ΧΥΤΑ απαγορεύεται.

Το Σενάριο AS4 συνιστά ανακύκλωση των σύνθετων υλικών των πτερυγίων σε ποσοστό 80%, ενώ η διάθεση των υπόλοιπων υλικών παραμένει όπως στο βασικό Σενάριο. Το εναλλακτικό αυτό Σενάριο οδηγεί σε μείωση των επιπτώσεων στην περίπτωση του ρότορα, ο οποίος περιλαμβάνει τα σύνθετα υλικά. Οι επιπτώσεις από τα υπόλοιπα μέρη της Α/Γ παραμένουν όπως έχουν, καθώς δεν υφίστανται καμία αλλαγή (Βασικό Σενάριο).

Οι κατηγορίες που έχουν τις μεγαλύτερες μειώσεις του περιβαλλοντικού αντίκτυπου είναι “Fossil fuel” και “respiratory inorganics”. Σημαντικές είναι οι μειώσεις και στις κατηγορίες “acidification/eutrophication” και “climate change”. Η μείωση στο συνολικό αντίκτυπο της Α/Γ σε όλη τη διάρκεια ζωής φτάνει το 6%. Τα ποσοστά αυτό δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό συγκριτικά με το συνολικό αντίκτυπο της Α/Γ καθ’ όλη τη διάρκεια ζωής, όμως επισημαίνεται η σημαντικότητα βελτίωσης των μεθόδων διάθεσης για κάθε ένα μέρος της Α/Γ, επιλέγοντας εκείνες τις μεθόδους που οδηγούν στο χαμηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

Συμπεράσματα

Στο τέλος πραγματοποιείται μία ανάλυση ευαισθησίας ανά περιβαλλοντικό δείκτη όπου παρατηρείται ιδιαίτερη ευαισθησία στις κατηγορίες “fossil fuel consumption” και “respiratory inorganics”. Οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν στα δύο Σενάρια ήταν μέτριες, όμως υποδεικνύουν τη σημαντικότητα ανάλυσης ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά σενάρια που στόχο έχουν να δώσουν διαφορετικές και επιλογές κατά την ανάπτυξη της ΑΚΖ.

Τα τελικά αποτελέσματα της ΑΚΖ επηρεάζονται σημαντικά από τις εκτιμήσεις σχετικά με την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των μερών και των υλικών της Α/Γ. Ξεκάθαρο αποτελεί το περιβαλλοντικό αντίκτυπο υλικών, όπως οι ίνες γυαλιού των πτερυγίων, όταν δεν ανακυκλώνονται αλλά στέλνονται για υγειονομική ταφή. Οι διακυμάνσεις μεταξύ 14% και 20% στις κατηγορίες “fossil fuel consumption” και “respiratory inorganics” που εντοπίστηκαν στην ανάλυση ευαισθησίας υποδηλώνουν

την ανάγκη για ανακύκλωση των μερών των Α/Γ στο μέλλον μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

6 Ο Andersen et al κάνει μία ανάλυση για την ανακύκλωση των Α/Γ και κάνει κάποιες προτάσεις για έρευνα, για τη βιομηχανία αλλά και για την πολιτική. Αρχικά τονίζεται το γεγονός πως δεν υπάρχουν ακριβή δεδομένα για τους υπολογισμούς της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) που σχετίζονται με την ανακύκλωση των μερών και των υλικών Α/Γ, ειδικότερα για τα πτερύγια. Δεδομένου ότι τα υλικά κατασκευής μίας Α/Γ είναι υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών όλου του κύκλου ζωής, η αβεβαιότητα στα δεδομένα για την ανακύκλωση επηρεάζει σημαντικά την ΑΚΖ των Α/Γ συνολικά (Andersen, P.D et al, 2014).

Επιπλέον, ο σχεδιασμός για την ανακύκλωση των Α/Γ αποτελεί προτεραιότητα για τη βιομηχανία αιολικής ενέργειας και υπάρχει η ανάγκη για καλύτερη γνώση των ενδεχόμενων υποκατάστατων υλικών για το μελλοντικό σχεδιασμό των Α/Γ. Σημαντική κρίνεται και η ανάγκη για γνώση πάνω στην αποσυναρμολόγηση, καθώς και η διάλυση πολύπλοκων εξαρτημάτων σε ανακυκλώσιμα υλικά.

Καθώς οι Α/Γ αναπτύσσονται περισσότερο τεχνολογικά, αυξάνεται και η χρήση των σπάνιων γαιών, ειδικά στους μαγνήτες και υπάρχει η ανάγκη γνώσης για την ανακύκλωση ή την ανάκτηση των μαγνητών και των σπάνιων γαιών. Πολιτικές για να παρακινήσουν τους κατασκευαστές να σχεδιάζουν με κριτήριο τη δυνατότητα ανακύκλωσης των Α/Γ μετά το τέλος ζωής τους θα ήταν σκόπιμο για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, όπως για παράδειγμα μέσω της εκτεταμένης ευθύνης του παραγωγού μέσα σε ένα πλαίσιο συστήματος διαχείρισης του προϊόντος. Θα μπορούσε να φανεί χρήσιμη και η εμπειρία από άλλες βιομηχανίες.

Με την μεγάλη αύξηση των αιολικών έργων μακροπρόθεσμα προκύπτει η ανάγκη δημιουργίας νέων επιχειρηματικών ευκαιριών για δευτερογενείς αγορές μεταχειρισμένων Α/Γ, επισκευασμένων μερών Α/Γ, υπηρεσιών αποσυναρμολόγησης και ανακύκλωσης υλικών. Όλα αυτά θα μπορούσαν να στηριχτούν από πολιτικές, οι οποίες θα τονώσουν τέτοιες αγορές και επιχειρηματικές δραστηριότητες.

Άλλο σημαντικό θέμα έχει να κάνει με την ανάγκη για γνώση των ενδεχόμενων αγορών για προϊόντα που κατασκευάζονται από ανακυκλωμένα υλικά. Ενώ υπάρχουν καθιερωμένες αγορές για σκραπ χάλυβα και κράματος, δεν υπάρχουν αγορές για δευτερογενή προϊόντα από την ανακύκλωση των Α/Γ, όπως τα σύνθετα υλικά από τα πτερύγια των Α/Γ. Η ανάπτυξη θεμάτων που σχετίζονται με τον παροπλισμό αποκτά όλο και υψηλότερη θέση στις προτεραιότητες των πολιτικών, των ερευνητών και της βιομηχανίας, καθώς η εγκατεστημένη ισχύς Α/Γ αυξάνεται σημαντικά παγκοσμίως.

7 Οι Beauson και Brøndsted κάνουν μία ανασκόπηση των εναλλακτικών λύσεων ανακύκλωσης που χρησιμοποιούνται σήμερα, αλλά και μελλοντικών λύσεων

(Beauson & Brøndsted, 2016). Τα πτερύγια των Α/Γ αποτελούν μία πολύπλοκη δομή από διαφορετικά σύνθετα υλικά, καθώς τα πτερύγια μπορεί να έχουν διαφορετικό σχεδιασμό μεταξύ τους, αλλά και διαφορετικό μήκος. Επιπλέον, αναφέρεται ότι τα αιολικά πάρκα μπορεί να παροπλιστούν σε διαφορετικό χρόνο και για διαφορετικούς λόγους. Ως εκ τούτου τα υλικά των πτερυγίων είναι μία ασυνεχής και ανομοιογενής πηγή υλικού. Όλα αυτά μαζί καθιστούν την ανακύκλωση των πτερυγίων πρόκληση.

Η επιλογή και το δυναμικό κάθε εναλλακτικής λύσης ανακύκλωσης εξαρτάται από το μέγεθος της επανεπεξεργασίας, την αξία του παραγόμενου υλικού και τον αριθμό των πιθανών εφαρμογών. Η ιδανική μέθοδος ανακύκλωσης περιλαμβάνει την μικρότερη δυνατή εκ νέου επεξεργασία για την παραγωγή ενός φθηνού υλικού, που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Η εναλλακτική με τη μικρότερη επεξεργασία είναι η επισκευή των πτερυγίων, συγκρινόμενη με τη μηχανική (grinding) ή χημική ανακύκλωση (supercritical fluids). Λαμβάνοντας υπόψη την αξία του υλικού που παράγεται και πάλι η καλύτερη λύση είναι η επισκευή του πτερυγίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μερικά χρόνια ακόμα διατηρώντας την υψηλότερη αξία του υλικού, παρά η ακριβή ανάκτηση των ινών γυαλιού με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, οι λύσεις που απαιτούν πιο βαριά επανεπεξεργασία μπορεί είναι πιο ενδιαφέροντες, εάν ληφθεί υπόψη ο αριθμός των πιθανών εφαρμογών του παραγόμενου υλικού. Όλες οι λύσεις έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία μπορούν να μετριάστούν συνδυάζοντας τα.

ΣΥΝΟΨΗ

Οι Α/Γ αποτελούν μία από τις τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με πολύ χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Προηγούμενες αναλύσεις του κύκλου ζωής μίας Α/Γ έχουν εστιάσει περισσότερο στη φάση κατασκευής (manufacturing), εγκατάστασης και λειτουργίας. Το στάδιο της ανάλυσης του κύκλου ζωής μίας Α/Γ κατά το οποίο φαίνεται να μην έχουν αποσαφηνιστεί οι περιβαλλοντικές του επιπτώσεις είναι το στάδιο του παροπλισμού και διάθεσης των μερών των Α/Γ (Larsen & Sønderberg Petersen, 2014 ; Ortegon, et al., 2013). Η διαχείριση των Α/Γ που φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους δεν ήταν προτεραιότητα παλαιότερα, καθώς είναι μία σχετικά καινούρια τεχνολογία, και για αυτό το λόγο η έρευνα που έχει γίνει στη φάση παροπλισμού της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής των Α/Γ είναι περιορισμένη. Ο σχεδιασμός της διαχείρισης των Α/Γ που ολοκληρώνουν τον κύκλο ζωής τους είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τη μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου. (Ortegon, et al., 2013)

Η πρακτική εμπειρία στην αφαίρεση και στην ανακύκλωση των Α/Γ, είναι περιορισμένη, καθώς η βιομηχανία αιολικής ενέργειας είναι σχετικά καινούρια, ειδικότερα σε ότι αφορά τις υπεράκτιες Α/Γ (Larsen, 2009 ; Larsen & Sønderberg Petersen, 2014 ; Jensen, 2018) και αναμένεται περίπου μία 20ετία για την απόκτηση πρακτικής εμπειρίας σε αυτό το κομμάτι (Jensen, 2018). Για το λόγο αυτό, οι πολιτικοί, οι ερευνητές και οι βιομηχανίες ασχολούνται όλο και περισσότερο με το θέμα της ανακύκλωσης των Α/Γ. Ολοένα και περισσότερες μελέτες ασχολούνται με την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ανάπτυξη τεχνολογιών ανακύκλωσης των Α/Γ, ενώ και οι κατασκευαστές στοχεύουν στην ανάπτυξη Α/Γ που να μπορούν να ανακυκλωθούν (Larsen & Sønderberg Petersen, 2014). Η κατανόηση εις βάθος των εφαρμόσιμων μεθόδων ανακύκλωσης και η βελτίωση των μεθόδων ανακύκλωσης συγκεκριμένων μερών των Α/Γ κρίνονται απαραίτητα για την καλύτερη αξιολόγηση του σταδίου διαχείρισης των Α/Γ μετά το πέρας ζωής τους. Η πρακτική εμπειρία πάνω στον παροπλισμό και την ανακύκλωση των Α/Γ θα βελτιώσει την ακρίβεια και την εκτίμηση των πραγματικών περιβαλλοντικών οφελών και του αντίκτυπου. Σε αυτό θα βοηθούσε και η εκτίμηση του οικονομικού αντίκτυπου (Jensen, 2018).

ΑΚΖ όλου του κύκλου ζωής των Α/Γ έχουν πραγματοποιηθεί, αλλά σε σχέση με το τελευταίο στάδιο διάθεσης των μερών των Α/Γ οι περισσότερες αναφέρονται σε υγειονομική ταφή (Martínez et al., 2010 ; Ghenai, 2012), άλλες αναφέρονται σε μεθόδους ανακύκλωσης που δεν είναι ακόμα βιώσιμες ή περιλαμβάνουν διαδικασία αποτέφρωσης που δεν υπάρχει πια. Όσων αφορά στο τέλος του κύκλου ζωής των πτερυγίων, οι πιθανές διαδικασίες στο τέλος ζωής των πτερυγίων έχουν συνοψιστεί και συζητηθεί σε μερικές μελέτες (Andersen et al., 2014; Beauson et al., 2014; Beauson and Brøndsted, 2016; Larsen, 2009 ; Liu & Barlow, 2017 ; Ortegon, et al., 2013). Ωστόσο, οι μελέτες αυτές δεν χρησιμοποιούν ΑΚΖ, αλλά κάνουν ανάλυση σε ποιοτικό επίπεδο. Μελέτη που κάνει ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη διάθεση των πτερυγίων μίας Α/Γ μέσω ΑΚΖ και κάνει συγκριτική

ανάλυση μεταξύ υγειονομικής ταφής και συν-επεξεργασίας στη βιομηχανία τσιμέντου, συμπεριλαμβάνοντας και τις επιπτώσεις της μεταφοράς, έχει πραγματοποιηθεί (Nagle, et al., 2020). Άλλη μελέτη εστιάζει στο περιβαλλοντικό αντίκτυπο εναλλακτικών τεχνολογιών ανακύκλωσης των πτερυγίων εστιάζοντας βάσει της κατανάλωσης ενέργειας, αλλά χρησιμοποιεί και μεθόδους ανακύκλωσης που είναι ακόμα σε εργαστηριακό επίπεδο (χημική, θερμική, ηλεκτρομηχανική) (Liu, et al., 2019).

Τα απόβλητα των πτερυγίων έχουν ειδικά χαρακτηριστικά, όπως η πολύπλοκη και μικτή σύνθεση των υλικών συμπεριλαμβανομένων των ινών, της ρητίνης, των δομικών υλικών και του υποστηρικτικού υλικού. Επιπλέον υπάρχει μία διαφοροποίηση μεταξύ των πτερυγίων στα πλαίσια του σχεδιασμού της δομής, του μεγέθους και της σύνθεσης των υλικών, ανάλογα με τον κατασκευαστή και το έτος παραγωγής. Το μεγάλο μέγεθος των πτερυγίων ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα στην αποσυναρμολόγηση, τη μεταφορά και τη μείωση του μεγέθους. Οι ίνες γυαλιού που αποτελούν το κύριο υλικό κατασκευής έχουν χαμηλή αξία και η θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη δεν μπορεί να ξαναδιαμορφωθεί. Λόγω των παραπάνω ειδικών χαρακτηριστικών καθιστούν την επεξεργασία τους πιο δύσκολη από ότι γενικά τα σύνθετα απόβλητα. Όλα αυτά μαζί αποτελούν την ανακύκλωση των πτερυγίων πρόκληση.

Προς το παρόν το μεγαλύτερο μέρος των πτερυγίων στέλνονται σε ΧΥΤΑ, αυξάνοντας κατά πολύ το περιβαλλοντικό αντίκτυπο, καθώς η ταφή των πτερυγίων δεν αποτελεί μία ιδανική περιβαλλοντική λύση. (Liu & Barlow, 2016) Από τις μεθόδους ανακύκλωσης αυτή που εφαρμόζεται είναι η συν-επεξεργασία στην τσιμεντοβιομηχανία, όπου πραγματοποιείται και ανάκτηση ενέργειας και ανακύκλωση. Η ανάπτυξη λύσεων πιο περιβαλλοντικά, αλλά και οικονομικά ωφέλιμων, θα ήταν μία πρόκληση, έτσι ώστε από την συν-επεξεργασία να περάσουμε σε πιο βιώσιμες εναλλακτικές. Αυτή τη στιγμή άλλες μέθοδοι ανακύκλωσης του GFRP, όπως η πυρόλυση ή μηχανική άλεση (Mechanical grinding) για πληρωτικά τσιμέντου ή επανένωση συνθετικών δεν είναι ακόμα οικονομικά βιώσιμες, ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικές. Φορολογικές ελαφρύνσεις και κυρώσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως κίνητρο για τη χρήση μεθόδων διάθεσης που βρίσκονται πιο υψηλά στην ιεραρχία.

Έρευνες έχουν εστιάσει στο πρόβλημα από την αρχή ψάχνοντας για πρώτες ύλες ή από το τέλος εξετάζοντας τις εναλλακτικές μεθόδους επεξεργασίας. Οι φυσικές ίνες, όπως το λινάρι και το μπαμπού έχουν προταθεί να αντικαταστήσουν τις ίνες γυαλιού, λόγω του χαμηλότερου περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Άλλες προσεγγίσεις εστιάζουν στην έρευνα χρήσης των θερμοπλαστικών ρητινών για τη σύνθετη μήτρας, επιτρέποντας την ανακατασκευή. Τα θερμοπλαστικά λόγω υψηλού ιξώδους (viscosity) και υψηλού κόστους δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ακόμα στην παραγωγή εμπορικών πτερυγίων Α/Γ.

Οι εναλλακτικές επιλογές διαχείρισης των αποβλήτων (απόθεση, ανακύκλωση, ανάκτηση, επαναπροσδιορισμός) θα μπορούσαν να συγκριθούν διεξοδικά χρησιμοποιώντας την Ανάλυση του Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), που αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέσω του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας. Η ΑΚΖ ποσοτικοποιεί τις επιπτώσεις ενός προϊόντος λαμβάνοντας υπόψη όλες τις επιπτώσεις στο φυσικό κόσμο (ανθρώπινη υγεία, ποιότητα οικοσυστήματος, κλιματική αλλαγή και πόροι). Η ΑΚΖ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση πρακτικών διαχείρισης των αποβλήτων, για συγκριτικές περιβαλλοντικές αναλύσεις, για περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για αξιολόγηση παραγωγής και ανακύκλωσης. Για τι λόγο αυτό, η ΑΚΖ αποτελεί ένα κατάλληλο εργαλείο για την ανάλυση μεθόδων διάθεσης των αποβλήτων, όπως τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων Α/Γ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ Α/Γ- ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Σημαντικό πλεονέκτημα της βιομηχανίας αιολικής ενέργειας είναι ότι παράγει πολύ λιγότερα απόβλητα σε σχέση με άλλες βιομηχανίες που σχετίζονται με τον κατασκευαστικό τομέα, τον τομέα της ναυτιλίας, τον τομέα των μεταφορών και τον τομέα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών, ενώ παράλληλα παράγει καθαρή ενέργεια (WindEurope, 2020).

Τα περισσότερα μέρη μίας Α/Γ (θεμέλια, πύργος, μέρη του κιβωτίου ταχυτήτων, γεννήτρια) είναι ανακυκλώσιμα, φτάνοντας το συνολικό ποσοστό ανακύκλωσης μίας Α/Γ προς το παρόν μεταξύ 85% και 90%. Στα πλαίσια των στόχων της ΕΕ για κυκλική οικονομία, σημαντική προτεραιότητα για τη βιομηχανία αιολικής ενέργειας αποτελεί η ανακύκλωση των πτερυγίων των Α/Γ, καθιστώντας τις Α/Γ 100% ανακυκλώσιμες. Οι Α/Γ της πρώτης γενιάς φτάνουν στο τέλος λειτουργίας τους και αναμένεται να αντικατασταθούν με νέες, οδηγώντας στον παροπλισμό 14000 πτερυγίων Α/Γ στην Ευρώπη μέχρι το 2025. Η ανακύκλωση των πτερυγίων Α/Γ αποτελεί πρόκληση, διότι τα πτερύγια κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά, έτσι ώστε να είναι πιο ελαφριά και μακριά αυξάνοντας την απόδοση της αιολικής ενέργειας. Η πολυπλοκότητα, όμως, των υλικών αυτών δημιουργεί δυσκολίες στην ανακύκλωσή τους, καθώς απαιτούνται ειδικές διαδικασίες. Μέχρι σήμερα, η κύρια τεχνολογία ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών των πτερυγίων είναι η συνεπεξεργασία στη βιομηχανία τσιμέντου και ακολουθεί η μηχανική επεξεργασία.

Τα πτερύγια των Α/Γ είναι μία σύνθετη δομή, καθώς αποτελείται από διάφορα υλικά, τα οποία έχουν και διαφορετικές ιδιότητες. Μεταξύ των διαφόρων πτερυγίων υπάρχουν κάποιες διαφορές στα υλικά κατασκευής, αλλά γενικά αποτελούνται από ενισχυτικές ίνες (γυαλί, άνθρακας, αραμίδιο ή βασάλτης), ένα πολυμερές πλέγμα (θερμοσκληρυνόμενα όπως εποξικά, πολυεστέρες, εστέρες βινυλίου, πολυουρεθάνη ή θερμοπλαστικά), δομικά υλικά (ξύλο balsa ή αφροί όπως PVC, PET, επιστρώσεις (PE, PUR) και μέταλλα (χαλκό ή αλουμίνιο, χάλυβα.) (ETIPWind, 2020).

4.1 Σύνθετες τεχνολογίες ανακύκλωσης

Η αύξηση και η βελτίωση της ανακύκλωσης των αποβλήτων από σύνθετα υλικά κρίνεται απαραίτητη για την ανάπτυξη εναλλακτικών τεχνολογιών ανακύκλωσης, οι οποίες παράγουν ανακυκλώσιμα υλικά υψηλότερης αξίας και επιτρέπουν την παραγωγή νέων συνθετικών υλικών (WindEurope, et al., 2020). Η έρευνα στις τεχνικές ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών είναι σε εξέλιξη για πάνω από 20 χρόνια. Οι τεχνικές ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών οι οποίες βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο και απαιτούν μία βαρύτερη εκ νέου επεξεργασία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: θερμική ανακύκλωση και χημική ανακύκλωση. Επίσης αναπτύσσεται και ηλεκτρομηχανική ανακύκλωση (high voltage pulse fragmentation).

Οι τεχνικές αυτές δεν υφίστανται ή δεν έχουν δοκιμαστεί σε εμπορική κλίμακα (Beauson & Brøndsted, 2016). Η ανάπτυξη και η βιομηχανοποίηση, όμως, αυτών των τεχνολογιών θα δώσουν στη βιομηχανία ανέμου εναλλακτικές λύσεις διαχείρισης των σύνθετων αυτών υλικών (WindEurope, et al., 2020). Οι μέθοδοι επεξεργασίας

διαφέρουν όσον αφορά στην επίδραση πάνω στην ποιότητα των ινών (μήκος, αντοχή, ακαμψία, ιδιότητες), επηρεάζοντας τον τρόπο με τον οποίο οι ανακυκλωμένες ίνες μπορούν να εφαρμοστούν.

Στη θερμική ανακύκλωση περιλαμβάνονται τεχνικές όπως η πυρόλυση ή η ρευστοποιημένη κλίνη, οι οποίες επιτρέπουν κυρίως την ανάκτηση ινών. Η πυρόλυση είναι η αποσύνθεση των οργανικών μορίων σε μικρότερα σε αδρανή ατμόσφαιρα με θερμοκρασία που κυμαίνεται από 300°C μέχρι 700°C ανάλογα με το σύστημα θέρμανσης που χρησιμοποιείται και την παρουσία καταλύτη. Η πυρόλυση χρησιμοποιούνταν σε εμπορική κλίμακα από μία εταιρία στη Δανία, τη ReFiber, η οποία ανακύκλωνε πετρώγια A/Γ σε μονωτικό υλικό από ίνες γυαλιού και η οποία σταμάτησε τις δραστηριότητες της το 2007 (Beauson & Brøndsted, 2016). Κατά τη διαδικασία αυτή επιτρέπεται η ανάκτηση ινών με τη μορφή τέφρας και της πολυμερικής μήτρας με τη μορφή προϊόντων υδρογονανθράκων. Παρότι έχει τη μικρότερη απώλεια αξίας από όλες τις τεχνολογίες βιομηχανικής κλίμακας, εξακολουθεί να υπάρχει μία απώλεια αξίας. Οι μήτρες μετατρέπονται σε σκόνη ή έλαιο και δυνητικά χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα και πληρωτικά. Η επιφάνεια των ινών συχνά καταστρέφεται εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων (μείωση αντοχής). Το κόστος επένδυσης και λειτουργίας της πυρόλυσης είναι υψηλό. Μέχρι σήμερα αυτή η τεχνολογία είναι οικονομικά βιώσιμη μόνο για τις ίνες άνθρακα. Προς το παρόν όμως δεν έχει εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα, καθώς ο όγκος των σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα είναι μικρός. Στην επόμενη γενιά μεγαλύτερων A/Γ αναμένεται να προτιμάται η χρήση ινών άνθρακα λόγω μείωσης του βάρους και βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων. Επομένως, αναμένεται να αυξηθεί ο όγκος της αγοράς ινών άνθρακα. Η πυρόλυση με μικροκύματα προκαλεί χαμηλότερη βλάβη στις ίνες.

Η solvolysis αποτελεί μία χημική επεξεργασία κατά την οποία χρησιμοποιούνται διαλύτες, όπως νερό, αλκοόλ και/ή οξύ για τη διάσπαση των δεσμών της μήτρας σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση. Η μέθοδος αυτή έχει πολλές δυνατότητες λόγω ενός μεγάλου εύρους επιλογών διαλύτη, θερμοκρασίας και πίεσης. Με τη μέθοδο αυτή γίνεται ανάκτηση καθαρών ινών σε ολόκληρο το μήκος τους. Συγκριτικά με τεχνολογίες θερμικής ανακύκλωσης, η μέθοδος αυτή απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες για να υποβαθμίσει τις ρητίνες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη αποδόμηση (υποβάθμιση) των ινών. Η solvolysis με υπερκρίσιμο νερό (super-critical water) φαίνεται να είναι η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, καθώς τόσο οι ίνες όσο και οι ρητίνες μπορούν να ανακτηθούν χωρίς σημαντικές επιπτώσεις στις μηχανικές τους ιδιότητες. Προς το παρόν το επενδυτικό και λειτουργικό κόστος είναι υψηλό και το επίπεδο ετοιμότητας της τεχνολογίας (Technology Readiness Level) είναι χαμηλό. Μέχρι σήμερα, μόνο οι ίνες άνθρακα μπορούν να ανακυκλωθούν μέσω αυτής της διαδικασίας. Ωστόσο μόνο μικρές ίνες μπορούν να ανακτηθούν από αυτή τη διαδικασία. Η απόκτηση ποιοτικών ινών απαιτεί υψηλά επίπεδα ενέργειας, ενώ η ποιότητα των ανακτημένων ινών γυαλιού είναι χαμηλότερη.

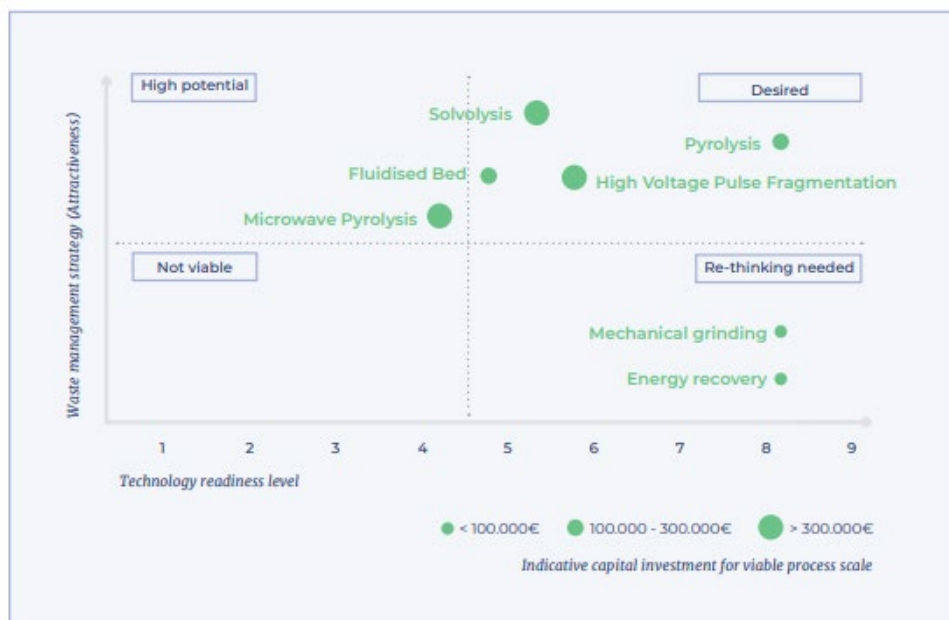
Σε σχέση με τη μηχανική επεξεργασία η ποιότητα των ινών είναι υψηλότερη, καθώς οι ίνες είναι πιο καθαρές και μακριές.

Η ρευστοποιημένη κλίνη είναι μία οξειδωτική διαδικασία σε θερμοκρασία περίπου 450°C. Το κύριο μειονέκτημα της είναι η μείωση κατά ένα παράγοντα ή περισσότερους της αντοχής εφεκλυσμού των ινών γυαλιού. (Beauson & Brøndsted, 2016) Η υποβάθμιση των ινών είναι μεγαλύτερη από τις μεθόδους της πυρόλυσης και της solvolysis. Η μέθοδος High voltage pulse fragmentation είναι μία ηλεκτρομηχανική διαδικασία που διαχωρίζει αποτελεσματικά τις μήτρες από τις ίνες με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.

Η πυρόλυση και η solvolysis αποτελούν από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών, καθώς επιτρέπουν την ανάκτηση και της πολυμερικής μήτρας, αλλά και των ινών, ενώ έχουν και τη χαμηλότερη απώλεια αξίας (SUSCHEM, 2018). Ειδικότερα στην περίπτωση των CFRP, η ανάκτηση των ινών γίνεται και στις δύο τεχνολογίες χωρίς σημαντικές απώλειες της ενισχυτικής τους ικανότητας. Οι ίνες που ανακτώνται από την solvolysis είναι πιο καθαρές από αυτές που ανακτώνται από την πυρόλυση. Η ποιότητα του ανακτηθέντος υλικού βασίζεται στη θερμοκρασία της διαδικασίας, στην οξύτητα των διαλυτών και στη διάταξη (disposition) των ινών.

Οι τεχνολογίες βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα ωριμότητας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ωρίμανση των τεχνολογιών, αλλά και το πόσο ελκυστικές είναι (SUSCHEM, 2018).

Σχήμα 15: Ελκυστικότητα και ωρίμανση κάθε τεχνολογίας



Πηγή: SUSCHEM (2018)

Σχήμα 16: Σύγκριση τεχνολογιών

	RECYCLING TECHNOLOGY	TYPE	MATURITY LEVEL (TECHNOLOGY READINESS LEVEL)	COST
GLASS FIBRE	Cement co-processing	Thermal	9	Low
	Mechanical grinding	Mechanical	9	Low
	High Voltage Pulse Fragmentation	Electro-mechanical	6	High investment and running costs
CARBON FIBRE	Pyrolysis & Microwave Pyrolysis	Thermal	Pyrolysis: 9 Microwave pyrolysis: 4/5	High investment and running costs
	Solvolytic	Chemical	5/6	High investment and running costs
	Fluidised Bed	Thermal	5/6	High investment and running costs

Πηγή: **WindEurope (2020)**

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αιολική ενέργεια αναπτύσσεται ραγδαίως τις δύο τελευταίες δεκαετίες, καθώς αποτελεί μία από τις πιο υποσχόμενες οικονομικές και πράσινες ανανεώσιμες πηγές ενέργειες δίνοντας λύση στην αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια και χρήση συμβατικών καυσίμων. Η πρώτη γενιά των εμπορικών Α/Γ φτάνει στο τέλος του κύκλου ζωής τους και η προσοχή επικεντρώνεται στο πως θα διατεθούν τα απόβλητα που προκύπτουν από τον παροπλισμό των γεννητριών. Η συνεχής αύξηση της ποσότητας και του μεγέθους των Α/Γ, καθιστά ιδιαίτερα σημαντική τη διαχείριση των αποβλήτων μετά το τέλος ζωής. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι σημαντικές, αλλά προς το παρόν οι εκτιμήσεις όσον αφορά στο μέγεθος του προβλήματος είναι περιορισμένες.

Τα παραγόμενα απόβλητα από τις Α/Γ είναι κυρίως από υλικά όπως χάλυβας, σίδηρος, αλουμίνιο, ηλεκτρονικά εξαρτήματα και σύνθετα υλικά των πτερυγίων. Τα μέταλλα ήδη ανακυκλώνονται σε ένα μεγάλο βαθμό. Παρόλα αυτά, η ανησυχία στρέφεται κυρίως στη διαχείριση των πτερυγίων των Α/Γ. Ένα μεγάλο μέρος των εξαρτημάτων αυτών υψηλής αξίας είναι τα σύνθετα υλικά. Το σύνθετο υλικό από το οποίο κατασκευάζονται τα πτερύγια είναι πολυμερές ενισχυμένο κυρίως με ίνες γυαλιού (GFRP), ενώ ίνες άνθρακα μπορεί να χρησιμοποιούνται σε κάποια δομικά στοιχεία. Το υλικό αυτό επιλέγεται για ευκολία κατασκευής αεροδυναμικού σχήματος και υψηλής μηχανικής απόδοσης.

Η αφαίρεση και η ανακύκλωση των πτερυγίων αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα, καθώς υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα για τη διαχείριση τους σωστά και με ασφάλεια, καθώς η πρακτική εμπειρία είναι περιορισμένη. Οι υφιστάμενες πρακτικές διαχείρισης των Α/Γ μετά το τέλος της λειτουργικής τους ζωής είναι η αποτέφρωση με ανάκτηση ενέργειας, η υγειονομική ταφή και η ανακύκλωση. Οι δύο πρώτες επιλογές δεν αποτελούν ιδανικές περιβαλλοντικές λύσεις, καθώς είναι χαμηλά στην Ιεραρχία Διαχείρισης των Αποβλήτων. Η μεγάλη αύξηση των παροπλισμένων πτερυγίων που αναμένεται τα επόμενα χρόνια θα πρέπει να είναι διαχειρίσιμη, έτσι ώστε τα υλικά να μην καταλήγουν σε ΧΥΤΑ αυξάνοντας το αρνητικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο του κύκλου ζωής των Α/Γ.

Οι τεχνολογίες ανακύκλωσης που χρησιμοποιούνται μέχρι στιγμής είναι η συν-επεξεργασία στην τσιμεντοβιομηχανία και η μηχανική ανακύκλωση. Η ανακύκλωση, όμως, των πτερυγίων συνεχίζει να έχει αρκετές αδυναμίες. Τα υλικά των πτερυγίων αναμένεται να δημιουργήσουν πρόβλημα εάν δεν αναπτυχθεί η βιομηχανία ανακύκλωσης αυτών των σύνθετων υλικών, ώστε να γίνεται βιώσιμη διαχείριση των υλικών αυτών. Όμως έχει επιτευχθεί κάποια πρόοδος στις μεθόδους ανακύκλωσης των ενισχυμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού, καθώς και στις πιθανές εφαρμογές των ανακυκλωμένων υλικών.

Μία από τις προτεραιότητες της βιομηχανίας ανακύκλωσης για τα επόμενα χρόνια θα είναι η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την ανακύκλωση και τα περιβαλλοντικά οφέλη που μπορεί να προκύπτουν μέσω της ανακύκλωσης. Οι περισσότερες αναλύσεις του κύκλου ζωής και οι μελέτες ανακύκλωσης εστιάζουν στα πτερύγια, αλλά φαίνεται να υπάρχει ανάγκη για περισσότερη γνώση και στην ανακύκλωση των ηλεκτρονικών, αλλά και άλλων μερών των Α/Γ, όπως τα καλώδια και οι υδραυλικές καλωδιώσεις. Η διαχείριση του ηλεκτρονικού εξοπλισμού θα έπρεπε ίσως να διερευνηθεί περισσότερο, το οποίο επίσης αποτελεί πρόβλημα, αφού το 50% καταλήγει σε υγειονομική ταφή.

Οι θεσμικές και λειτουργικές δομές που σχετίζονται με την αποσυναρμολόγηση και την ανακύκλωση των Α/Γ είναι ακόμα αβέβαιες και για το λόγο αυτό επισημαίνεται η ανάπτυξη πολιτικών που να ενθαρρύνουν τη δυνατότητα ανακύκλωσης και τη στήριξη της αγοράς μεταχειρισμένων μερών Α/Γ. Η αγορά second hand θα μπορούσε να είναι μία αποτελεσματική προσωρινή λύση μείωσης των αποβλήτων.

Η Ευρώπη θα πρέπει να επενδύσει ακόμα περισσότερο στην έρευνα και στην τεχνολογία αναβαθμισμένων τεχνολογιών ανακύκλωσης στοχεύοντας στην ανάπτυξη νέων υλικών υψηλότερης απόδοσης βελτιώνοντας την κυκλικότητα και στο σχεδιασμό μεθοδολογιών της βελτίωσης της κυκλικότητας και της δυνατότητας ανακύκλωσης των πτερυγίων των Α/Γ. Μέθοδοι πέραν της η συν-επεξεργασίας στην βιομηχανία τσιμέντου θα πρέπει να αναπτυχθούν ευρέως για την αντιμετώπιση των τρεχόντων ροών αποβλήτων, όπως η πυρόλυση και η solvolysis.. Σημαντική κρίνεται η βελτίωση της επιστημονικής κατανόησης του περιβαλλοντικού αντίκτυπου που σχετίζεται με τις εναλλακτικές μεθόδους διάθεσης των αποβλήτων, αλλά και με την επιλογή των υλικών κατασκευής μέσω της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής.

Επιπλέον, ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται η πρόκληση για την έρευνα νέων υλικών πέραν της πρόκλησης με την ανακύκλωση. Η μετάβαση σε χρήση υλικών κατασκευής των πτερυγίων, τα οποία μπορεί να είναι ποιο εύκολα ανακυκλώσιμα θα μπορούσε να αποτελέσει μία μακροπρόθεσμη λύση στο πρόβλημα. Σημαντική για την επίτευξη όλων των παραπάνω κρίνεται η συνεργασία μεταξύ των ερευνητών, της βιομηχανίας και της πολιτικής.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andersen, N., (2015) *Wind turbine end-of-life: Characterisation of waste material. Student thesis*, Master degree, University of Gävle .
- Andersen, P.D., Bonou, A., Beauson, J., Brønsted, P., (2014) *Recycling of wind turbines*, DTU 603 International Energy Report 2014.
- Andersen, P. D., Borup, M. & Krogh, T., (2007) Managing long-term environmental aspects of wind turbines: A prospective case study.. *Int. J. Technol. Policy Manag*, Volume 7, pp. 339-354
- Beauson, J., Bech, J. I. & Brøndsted, P., (2014) *Composite recycling: Characterizing end of life wind turbine blade material*. s.l., Proceedings of 19th International Conference on Composite Materials.
- Beauson, J. & Brøndsted, P., (2016) Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective. *MARE-WINT. New Materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Technology*. s.l.:s.n., pp. 421-432
- DONG, P. A. V. et al., (2015) Modelling of Environmental Impacts and Economic. *12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*.
- Ghenai, C., (2012) Life Cycle Analysis of Wind Turbine . *Sustainable Development - Energy, Engineering and Technologies - Manufacturing and Environment*.
- HAO, S., KUAH, A. T. H. & RUDD, C. D., (2019) A circular economy approach to green energy: Wind turbine, waste, and material recovery. *Science of The Total Environment*, November.
- Igwemezie, V., Mehmanparast, A. & Kolios, A., (2019) *Current trend in offshore wind energy sector and material requirements for fatigue resistance improvement in large wind turbine support structures – A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 101, pp. 181-196.
- Jensen, J. P., (2018) Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines. *Wind Energy*.
- Larsen, H. H. & Sønderberg Petersen, L., (2014) *DTU International Energy Report 2014: Wind energy — drivers and barriers for higher shares of wind in the global power generation*, Technical University of Denmark.
- Larsen, K., (2009) Recycling wind turbine blades. *Renewable Energy Focus*, 9(7), pp. 70-73.

Lefeuvre, A., Garnier, S., Jacquemin, L., Pillain, B., & Sonnemann, G. (2019). *Anticipating in-use stocks of carbon fibre reinforced polymers and related waste* Resources Conservation and Recycling, Volume 141(2019) Pages 30-39

Liu, P. & Barlow, C. Y., (2016) *The environmental impact of wind turbine blades*. Volume 139.

Liu, P. & Barlow, C. Y., (2017) *Wind turbine blade waste in 2050*. *Waste Management*, Volume 62, pp. 229-240.

Liu, P., Meng, F. & Y.Barlow, C., (2019) *Wind Turbine Blade End-of-life Options: An Eco-audit Comparison*. *Journal of Cleaner Production*, March, Volume 212, pp. 1268-1281.

Martínez, E., Jiménez, E., Blanco, J. & Sanz, F., (2010) LCA sensitivity analysis of a multi-megawatt wind turbine. *Applied Energy*, July, 87(7), pp. 2293-2303.

Nagle, A. J., Delaney, E. L., Bank, L. C. & Leahy, P. G., (2020) *A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and CoProcessing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades*. *Journal of Cleaner Production*, December. Volume 277.

Ortegon, K., F.Niesb, L. & W.Sutherlandc, J., (2013) *Preparing for end of service life of wind turbines*. *Journal of Cleaner Production*, January, Volume 39, pp. 191-199.

Spyridoula Karavida, Reet NõmmikWaste (2015), *Management of End of-Service Wind Turbines*, Thesis, Aalborg University

EuPC, EuCIA, ECRC (2011) *Glass Fibre Reinforced Thermosets: Recyclable and Compliant with the EU Legislation* Διαθέσιμο στο <http://csmres.co.uk/cs.public.upd/article-downloads/EuCIA-position-paper-52816.pdf> [Ανάκτηση 7/01/21]

CWPRenewables, (2016) *Sapphire Wind Farm Decommissioning and Rehabilitation Plan* Διαθέσιμο στο <https://www.sapphirewindfarm.com.au/> [Ανάκτηση 7/01/21]

European Commission (2020) *Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Διαθέσιμο στο <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>[Ανάκτηση 7/01/21]

European Commission (2018) *A European Strategy for Plastics in a Circular Economy* Διαθέσιμο στο <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>[Ανάκτηση 7/01/21]

European Composites Industry Association, (2011) *Glass Fibre Reinforced Thermosets: Recyclable and Compliant with the EU Legislation*. European

Composites Industry Association, Brussels. Διαθέσιμο στο <https://eucia.eu/publications/> [Ανάκτηση 7/01/21]

SUSCHEM, (2018) *Polymer Composites Circularity White paper*, SusChem Materials Working Group. Διαθέσιμο στο <http://www.suschem.org/publications> [Ανάκτηση 7/01/21]

WindEurope, Cefic & EuCIA (2020) *Accelerating Wind Turbine Blade Circularity*, WindEurope ; Cefic ; EuCIA. Διαθέσιμο στο <https://windeurope.org/> [Ανάκτηση 7/01/21]

WindEurope, (2020) *Circular Economy: Blade recycling is a top priority for the wind industry* Διαθέσιμο στο <https://windeurope.org/> [Ανάκτηση 7/01/21]

WindEurope (2020) *Decommissioning of Onshore Wind Turbines, Industry Guidance Document* Διαθέσιμο στο <https://windeurope.org/> [Ανάκτηση 7/01/21]

WindEurope (2020) *Wind energy in Europe in 2019 Trends and statistics* Διαθέσιμο στο <https://windeurope.org/> [Ανάκτηση 7/01/21]

ETIPWind (2019) *How wind is going circular: blade recycling*. Διαθέσιμο στο <https://etipwind.eu/publications/> [Ανάκτηση 7/01/21]

ΚΑΠΕ (2001) *Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής* Διαθέσιμο στο <http://www.cres.gr/cres/index.html> [Ανάκτηση 7/01/21]