



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Μ.Π.Σ.: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

ΣΥΜΒΟΥΛΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΟΥΣΤΑΚΑΣ

ΘΕΜΑ:

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΑΠΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΚΑΛΛΙΡΡΟΗ ΦΡΑΓΚΟΥΛΗ

A.M.: **160618**

email: std160618@ac.eap.gr

Ημερομηνία: 17 / 05 / 2025

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη διαχείριση των αποβλήτων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με έμφαση στις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Καθώς η ενεργειακή μετάβαση προς τις ΑΠΕ επιταχύνεται, ανακύπτουν σημαντικές προκλήσεις σχετικά με την απόσυρση και ανακύκλωση των υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις τεχνολογίες. Οι ανεμογεννήτριες περιέχουν σύνθετα πολυμερή και υλικά που είναι δύσκολο να ανακυκλωθούν, ενώ τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούνται από πολύτιμα αλλά και δυνητικά επικίνδυνα στοιχεία, τα οποία απαιτούν εξειδικευμένες μεθόδους ανάκτησης. Η εργασία συγκρίνει τις διαθέσιμες μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων, αναλύοντας τις τεχνικές ανακύκλωσης και τα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματά τους. Οι πιο κοινές πρακτικές, όπως η υγειονομική ταφή και η συν-επεξεργασία σε τσιμεντοβιομηχανίες, αν και ευρέως χρησιμοποιούμενες, δεν προωθούν τη βιώσιμη κυκλική οικονομία. Από την άλλη πλευρά, η μηχανική ανακύκλωση, η πυρόλυση και οι χημικές διεργασίες αποτελούν πιο ελπιδοφόρες λύσεις, αν και συνοδεύονται από υψηλό κόστος και τεχνικές προκλήσεις. Επιπλέον, η μελέτη υπογραμμίζει τη σημασία των πολιτικών και νομοθετικών πλαισίων στη διαμόρφωση βιώσιμων στρατηγικών ανακύκλωσης. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για τη διαχείριση αποβλήτων από ΑΠΕ, ωστόσο απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη υποδομών και κινήτρων για την αποτελεσματική εφαρμογή των προτεινόμενων τεχνολογιών. Η έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά συστήματα είναι κρίσιμη για τη μελλοντική ανάπτυξη του τομέα των ΑΠΕ. Η ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνικών ανακύκλωσης, σε συνδυασμό με στοχευμένες πολιτικές και οικονομικά κίνητρα, θα επιτρέψει τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης των ΑΠΕ και τη μετάβαση σε ένα πιο κυκλικό και βιώσιμο ενεργειακό σύστημα.

Λέξεις-κλειδιά: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Διαχείριση Αποβλήτων, Ανακύκλωση, Κυκλική Οικονομία

Abstract

This study examines the management of waste from renewable energy sources, with a focus on wind turbines and photovoltaic systems. As the energy transition to renewables accelerates, significant challenges arise regarding the decommissioning and recycling of materials used in these technologies. Wind turbines contain complex polymers and materials that are difficult to recycle, while photovoltaic panels consist of valuable but potentially hazardous components, which require specialised recovery methods. The paper compares the available waste management methods, analysing recycling techniques and their advantages or disadvantages. The most common practices, such as landfilling and co-processing in cement plants, although widely used, do not promote a sustainable circular economy. On the other hand, mechanical recycling, pyrolysis and chemical processes are more promising solutions, although they come with high costs and technical challenges. Furthermore, the study highlights the importance of policy and legislative frameworks in shaping sustainable recycling strategies. The European Union has set ambitious targets for the management of waste from renewable energy sources, but further development of infrastructure and incentives is needed for the effective implementation of the proposed technologies. The study concludes that sustainable management of waste from wind turbines and photovoltaic systems is crucial for the future development of the renewable energy sector. The integration of innovative recycling techniques, combined with targeted policies and economic incentives, will allow for the improvement of the environmental performance of RES and the transition to a more circular and sustainable energy system.

Keywords: Renewable energy sources, Waste management, Recycling, Circular economy

Περιεχόμενα:

Περίληψη	2
Abstract	3
1. Εισαγωγή	8
1.1. Παρουσίαση του Θέματος	8
1.2. Σκοπός Εργασίας	10
2. Γενική Επισκόπηση της Διαχείρισης Αποβλήτων στις ΑΠΕ	14
2.1. Τύποι Αποβλήτων από Ανεμογεννήτριες και Φωτοβολταϊκά	14
2.2. Προκλήσεις Ανακύκλωσης και Επαναχρησιμοποίησης	16
2.3. Οικονομικές και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις	19
3. Διαχείριση Αποβλήτων από Ανεμογεννήτριες	23
3.1. Εισαγωγή στη Διαχείριση Αποβλήτων Ανεμογεννητριών	23
3.2. Ποσοτικοποίηση και Πρόβλεψη Παραγωγής Αποβλήτων	25
3.3. Υφιστάμενες Μέθοδοι Διαχείρισης Αποβλήτων	31
3.4. Ανακύκλωση Πτερυγίων Ανεμογεννητριών	38
3.5. Κυκλική Οικονομία και Επαναχρησιμοποίηση Υλικών	46
3.6. Τεχνολογίες και Καινοτόμες Προσεγγίσεις στην Ανακύκλωση	52
3.7. Θερμική και Χημική Ανακύκλωση των Σύνθετων Υλικών	56
3.8. Προοπτικές και Κατευθύνσεις για τη Βιώσιμη Διαχείριση	59
4. Διαχείριση Αποβλήτων από Φωτοβολταϊκά Συστήματα	65
4.1. Εισαγωγή στη Διαχείριση Αποβλήτων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	65
4.2. Νομοθετικό και Κανονιστικό Πλαίσιο για την Ανακύκλωση των Φ/B Αποβλήτων	70
4.3. Φυσικές Μέθοδοι Ανακύκλωσης	78
4.4. Χημικές και Θερμικές Μέθοδοι Ανακύκλωσης	81
4.5. Καινοτόμες Μέθοδοι Ανακύκλωσης	87
4.6. Οικονομική και Περιβαλλοντική Ανάλυση Ανακύκλωσης	90

5. Συζήτηση - Σύγκριση Μεθόδων Διαχείρισης και Ανακύκλωσης.....	94
5.1. Σύγκριση Μεθόδων Διαχείρισης και Ανακύκλωσης Αποβλήτων από Ανεμογεννήτριες	94
5.2. Σύγκριση Μεθόδων Διαχείρισης και Ανακύκλωσης Αποβλήτων από Φωτοβολταϊκά.....	96
6. Συμπεράσματα	99
6.1. Περιορισμοί της Έρευνας	101
6.2. Κατευθύνσεις για Μελλοντική Έρευνα	101
Βιβλιογραφία	103

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Απόβλητα από πτερύγια ανεμογεννητριών ανά χώρα ως ποσοστό του συνόλου (α) στην ξηρά και (β) στην ανοικτή θάλασσα. Πηγή: (Lichtenegger et al., 2020)	26
Εικόνα 2. Η σύνθεση υλικών μιας ανεμογεννήτριας τύπου Vestas V90-2.0 MW. Πηγή: (Tota-Maharaj & McMahon, 2021)	29
Εικόνα 3. Σενάρια διάθεσης αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών στην Ιρλανδία, περιλαμβάνοντας υγειονομική ταφή, συν-επεξεργασία στο εξωτερικό και συν-επεξεργασία εντός της χώρας. Πηγή: (Nagle et al., 2020)	33
Εικόνα 4. Πρόβλεψη παραγωγής αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών και σωρευτική εγκατεστημένη ισχύς στις ΗΠΑ βάσει διαφορετικών σεναρίων. Πηγή: (Ramirez-Tejeda et al., 2017)	35
Εικόνα 5. Διαδικασία λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση πτερυγίων ανεμογεννητριών στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Πηγή: (Beauson et al., 2022)	37
Εικόνα 6. Επαναχρησιμοποίηση πτερυγίων ανεμογεννητριών σε αρχιτεκτονικές και αστικές εφαρμογές.. Πηγή: (Mishnaevsky et al., 2021)	41
Εικόνα 7. Δομή πτερυγίου ανεμογεννήτριας. Πηγή: (Fonte & Xydis, 2021).....	43
Εικόνα 8. Διεργασία συμπαραγωγής σε τσιμεντοκλίβανο. Πηγή: (Fonte & Xydis, 2021)	44
Εικόνα 9. Διαδικασία κυκλωνικής διαχωριστικής ανακύκλωσης. Πηγή: (Fonte & Xydis, 2021).....	45
Εικόνα 10. Πτερυγίου ανεμογεννήτριας πριν και μετά από πυρόλυση. Πηγή: (Grove-Nielsen, 2004)	45
Εικόνα 11. Επαναχρησιμοποίηση πτερυγίων ανεμογεννητριών για τη δημιουργία πεζογέφυρας. Πηγή: (Leahy et al., 2021)	47
Εικόνα 12. Στέγαστρο στάθμευσης ποδηλάτων από πτερύγιο ανεμογεννήτριας. Πηγή: (Krauklis et al., 2021).	48
Εικόνα 13. Πτερύγια ανεμογεννητριών ως φέρουσες κατασκευές πεζογεφυρών. Πηγή: (Karavida & Reponi, 2023)	49
Εικόνα 14. Διάγραμμα κύκλου ζωής μιας ανεμογεννήτριας, από την κατασκευή έως την απόσυρση. Πηγή: (Martínez et al., 2009).....	61
Εικόνα 15. Ιεραρχία διαχείρισης αποβλήτων πτερυγίων ανεμογεννητριών και στρατηγικές κυκλικής οικονομίας. Πηγή: (Martínez et al., 2009).....	63

Εικόνα 16. Παγκόσμια σωρευτική ανάπτυξη φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων και ετήσιο ποσοστό αύξησης (2009-2017). Πηγή: (Chowdhury et al., 2020).....	67
Εικόνα 17. Σωρευτική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη (2000-2012), με εντυπωσιακή αύξηση από το 2008 και μετά. Πηγή: (Paiano, 2015).....	68
Εικόνα 18. Δομή και βασικά εξαρτήματα ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Πηγή: (Włodarczyk., 2022)	69
Εικόνα 19. Διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ και ανάκτηση υλικών. Πηγή: (Włodarczyk, 2022)	70
Εικόνα 20. Εκτιμώμενοι σωρευτικοί όγκοι αποβλήτων φωτοβολταϊκών πάνελ έως το 2050 παγκοσμίως, ανά σενάριο και χώρα.....	71
Εικόνα 21. Διαδικασίες και επιλογές ανακύκλωσης απορριμμάτων και φωτοβολταϊκών μονάδων. Πηγή: (Fthenakis, 2000)	75
Εικόνα 22. Διάγραμμα ροής ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ σε αποκεντρωμένη εγκατάσταση. Πηγή: (Fthenakis, 2000)	76
Εικόνα 23. Διαβάθμιση των αποβλήτων φωτοβολταϊκών σε τρία επίπεδα διαχείρισης: μακροσκοπικό, μεσοσκοπικό και μικροσκοπικό. Πηγή: (Mahmoudi et al. 2021)	78
Εικόνα 24. Διαβάθμιση των αποβλήτων φωτοβολταϊκών σε τρία επίπεδα διαχείρισης: μακροσκοπικό, μεσοσκοπικό και μικροσκοπικό. Πηγή: (Azeumo et al. 2019)	80
Εικόνα 25. Ενδιάμεσα κλάσματα (0.4-1 mm) που ανακτήθηκαν μετά από τριπλή σύνθλιψη διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών πάνελ. Πηγή: (Pagnanelli et al., 2017)	84
Εικόνα 26. Πειραματική διάταξη για τη θερμική επεξεργασία των φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Πηγή: (Tammaro et al., 2015)	86
Εικόνα 27. Διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας θερμικής επεξεργασίας φωτοβολταϊκών πάνελ. Πηγή: (Tammaro et al., 2015)	86
Εικόνα 28. Διάγραμμα της διαδικασίας θραύσης L&HVP για την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πάνελ. Πηγή: (Ali et al. 2024).....	89
Εικόνα 29. Σύγκριση κόστους και εσόδων από την ανακύκλωση διαφόρων τύπων φωτοβολταϊκών πάνελ με διαφορετικές μεθόδους. Πηγή: (Deng et al. 2019)	92

1. Εισαγωγή

1.1. Παρουσίαση του Θέματος

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν έναν από τους βασικότερους πυλώνες της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης προς ένα πιο βιώσιμο και περιβαλλοντικά υπεύθυνο μοντέλο παραγωγής ενέργειας. Η αυξανόμενη ανησυχία για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, σε συνδυασμό με την ανάγκη μείωσης της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, έχει οδηγήσει στη ραγδαία ανάπτυξη και εγκατάσταση τεχνολογιών που αξιοποιούν φυσικούς και ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους. Οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα υδροηλεκτρικά έργα και η γεωθερμική ενέργεια αποτελούν τις κυριότερες μορφές ΑΠΕ που συμβάλλουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ελάχιστες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Eriksson et al., 2014).

Η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν αποτελεί απλώς μία τάση της παγκόσμιας ενεργειακής πολιτικής, αλλά μια επιτακτική ανάγκη που προκύπτει από την εξάντληση των φυσικών πόρων και την αποσταθεροποίηση των παγκόσμιων κλιματικών συνθηκών. Η καύση ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, έχει συμβάλει σημαντικά στην υπερθέρμανση του πλανήτη, αυξάνοντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων ρυπογόνων ουσιών. Οι ΑΠΕ, από την άλλη πλευρά, αξιοποιούν ανεξάντλητους φυσικούς πόρους, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό και η θερμότητα της γης, για την παραγωγή ενέργειας με τρόπο που δεν επιβαρύνει το περιβάλλον και δεν εξαρτάται από περιορισμένα αποθέματα πρώτων υλών (Brunner & Rechberger, 2015).

Η εγκατάσταση ανανεώσιμων συστημάτων παραγωγής ενέργειας έχει γνωρίσει σημαντική αύξηση τις τελευταίες δεκαετίες, με τις κυβερνήσεις και τους διεθνείς οργανισμούς να υιοθετούν πολιτικές που ευνοούν την ανάπτυξη του τομέα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω της Πράσινης Συμφωνίας και των δεσμεύσεων για μείωση των εκπομπών άνθρακα, έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για τη σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, ενισχύοντας τη χρήση ΑΠΕ σε όλους τους τομείς της οικονομίας. Παρόμοιες πολιτικές ακολουθούνται και σε άλλες ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες, καθώς η τεχνολογική πρόοδος καθιστά την αξιοποίηση των ΑΠΕ ολοένα και πιο αποδοτική και οικονομικά βιώσιμη (Kollmann et al., 2017).

Η αιολική ενέργεια έχει αναδειχθεί σε μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες μορφές ΑΠΕ, με την εγκατάσταση ανεμογεννητριών τόσο σε χερσαίες όσο και σε θαλάσσιες περιοχές. Οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των ανεμογεννητριών, καθιστώντας τις πιο αποδοτικές ακόμα και σε περιοχές με χαμηλή ένταση ανέμου (Demirbas, 2011). Η χρήση υπεράκτιων αιολικών πάρκων έχει επίσης αυξηθεί, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να επηρεάζουν το τοπίο ή να καταλαμβάνουν πολύτιμη γεωργική γη. Ωστόσο, η εγκατάσταση αιολικών πάρκων συνοδεύεται και από προκλήσεις, όπως η περιβαλλοντική επίδραση στους πληθυσμούς πουλιών και η ανάγκη διαχείρισης των αποβλήτων που προκύπτουν από την αντικατάσταση ή την απόσυρση των ανεμογεννητριών (Sadef et al., 2016).

Αντίστοιχα, η ηλιακή ενέργεια αποτελεί έναν από τους βασικότερους πυλώνες της ενεργειακής μετάβασης, με τη μαζική ανάπτυξη φωτοβολταϊκών συστημάτων τόσο σε επίπεδο μεγάλης κλίμακας όσο και σε οικιακές και εμπορικές εγκαταστάσεις. Η πτώση του κόστους κατασκευής των φωτοβολταϊκών πάνελ, σε συνδυασμό με την αύξηση της αποδοτικότητας των ηλιακών κυψελών, έχει επιτρέψει την ευρύτερη διάδοσή τους σε όλο τον κόσμο (Jasińska & Dutkiewicz, 2025). Οι ηλιακές φάρμες καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις γης και έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν ενέργεια σε δίκτυα υψηλής τάσης, ενώ η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε κτίρια συμβάλλει στην αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας και στη μείωση της εξάρτησης από το κεντρικό δίκτυο (Eriksson et al., 2014). Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί στον τομέα της ηλιακής ενέργειας, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις που σχετίζονται με την αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών πάνελ, τη διάρκεια ζωής τους και την ανάγκη διαχείρισης των αποβλήτων τους μετά την απόσυρση (Ceglia et al., 2022).

Η αυξανόμενη εγκατάσταση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν περιορίζεται μόνο στην αιολική και ηλιακή ενέργεια, αλλά περιλαμβάνει και άλλες τεχνολογίες, όπως τα υδροηλεκτρικά έργα, η γεωθερμική ενέργεια και η βιομάζα. Τα υδροηλεκτρικά έργα αποτελούν μία από τις παλαιότερες μορφές παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, αξιοποιώντας τη δυναμική ενέργεια του νερού για τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιεί τη θερμότητα του υπεδάφους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, προσφέροντας μια αξιόπιστη και

σταθερή πηγή ενέργειας. Η χρήση της βιομάζας, δηλαδή της καύσης οργανικών υλικών για την παραγωγή ενέργειας, συμβάλλει επίσης στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, αν και η περιβαλλοντική βιωσιμότητα αυτής της τεχνολογίας εξαρτάται από τις μεθόδους παραγωγής και διαχείρισης των πρώτων υλών (Björklund & Finnveden, 2005).

Η αυξανόμενη χρήση των ΑΠΕ επιφέρει σημαντικά οφέλη, τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Η μείωση των εκπομπών άνθρακα και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και στη μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Παράλληλα, η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια των χωρών, μειώνοντας την εξάρτησή τους από εισαγόμενα καύσιμα και διασφαλίζοντας μεγαλύτερη αυτονομία στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάπτυξη του τομέα των ΑΠΕ δημιουργεί επίσης νέες θέσεις εργασίας και ευκαιρίες για οικονομική ανάπτυξη, μέσω της κατασκευής, της συντήρησης και της διαχείρισης των ανανεώσιμων εγκαταστάσεων. Ωστόσο, η αυξημένη χρήση των ΑΠΕ δημιουργεί και νέες προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση του τέλους ζωής του εξοπλισμού και την ενσωμάτωσή τους στα υφιστάμενα ενεργειακά δίκτυα. Η διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελεί ζήτημα αυξανόμενης σημασίας, καθώς τα απόβλητα αυτά περιέχουν πολύτιμα υλικά, αλλά και ορισμένα δυνητικά επικίνδυνα στοιχεία. Η ανάπτυξη βιώσιμων στρατηγικών ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των υλικών αυτών είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της βιωσιμότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος (Demirbas, 2011).

1.2. Σκοπός Εργασίας

Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει αναδειχθεί σε έναν από τους σημαντικότερους στρατηγικούς στόχους για τη βιώσιμη ανάπτυξη και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν τεχνολογίες που συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην ενεργειακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, η ραγδαία ανάπτυξη και εγκατάστασή τους έχει οδηγήσει στην ανάγκη αντιμετώπισης μιας νέας περιβαλλοντικής πρόκλησης, η οποία αφορά τη διαχείριση των αποβλήτων που παράγονται κατά την απόσυρση αυτών των τεχνολογιών (Seif et

al., 2024). Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση των προκλήσεων και των μεθόδων διαχείρισης των αποβλήτων που προκύπτουν από τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, αναδεικνύοντας τη σημασία της ανακύκλωσης, της επαναχρησιμοποίησης και της βιώσιμης διάθεσης των υλικών τους.

Η ανάγκη για ανάπτυξη αποδοτικών και βιώσιμων στρατηγικών διαχείρισης των αποβλήτων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πιο επιτακτική από ποτέ. Η λειτουργική διάρκεια ζωής των περισσότερων ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών πάνελ κυμαίνεται μεταξύ 20 και 30 ετών, γεγονός που σημαίνει ότι τα επόμενα χρόνια αναμένεται να παραχθούν τεράστιες ποσότητες αποβλήτων από την απόσυρση του εξοπλισμού αυτών των τεχνολογιών. Τα υλικά που περιέχονται στις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά πάνελ, όπως οι ίνες γυαλιού, τα σύνθετα πολυμερή, το αλουμίνιο, το πυρίτιο και τα σπάνια μέταλλα, έχουν διαφορετικές ιδιότητες και βαθμό ανακυκλωσιμότητας, καθιστώντας τη διαχείρισή τους σύνθετη και πολυδιάστατη (Eriksson et al., 2014).

Ιδιαίτερη πρόκληση παρουσιάζουν τα πτερύγια των ανεμογεννητριών, τα οποία κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά που δεν μπορούν εύκολα να ανακυκλωθούν με τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ανακύκλωση αυτών των υλικών είναι είτε πολύπλοκη είτε οικονομικά ασύμφορη, με αποτέλεσμα να οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής ή να αποθηκεύονται χωρίς να αξιοποιούνται. Αντίστοιχα, τα φωτοβολταϊκά πάνελ περιέχουν υλικά υψηλής αξίας, όπως το πυρίτιο, το αλουμίνιο και διάφορα βαρέα μέταλλα, τα οποία μπορούν να ανακτηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν. Παρόλα αυτά, η διαδικασία ανακύκλωσής τους απαιτεί εξειδικευμένες τεχνικές και υποδομές, οι οποίες σε πολλές χώρες δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί σε μεγάλη κλίμακα (Ceglia et al., 2022).

Η παρούσα έρευνα επιδιώκει να αναλύσει τις μεθόδους διαχείρισης των αποβλήτων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να εντοπίσει τις βέλτιστες πρακτικές που μπορούν να εφαρμοστούν για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος αυτών των τεχνολογιών. Ειδικότερα, εξετάζονται οι υπάρχουσες τεχνικές ανακύκλωσης, όπως η μηχανική επεξεργασία, η θερμική επεξεργασία και οι χημικές μέθοδοι ανάκτησης υλικών, με στόχο την αξιολόγηση της αποδοτικότητάς τους και των προοπτικών βελτίωσής τους. Επιπλέον, διερευνάται η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών και των

φωτοβολταϊκών πάνελ, είτε μέσω της επέκτασης του κύκλου ζωής τους είτε μέσω της αξιοποίησής τους σε άλλες εφαρμογές.

Η σημασία της έρευνας αυτής είναι ιδιαίτερα μεγάλη, καθώς η διαχείριση των αποβλήτων από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για τη συνολική βιωσιμότητα των τεχνολογιών αυτών. Η αδυναμία ανάπτυξης αποδοτικών λύσεων για τη διαχείριση των αποβλήτων θα μπορούσε να περιορίσει τα περιβαλλοντικά οφέλη των ΑΠΕ, δημιουργώντας νέα προβλήματα που σχετίζονται με τη ρύπανση και την υπερφόρτωση των χώρων υγειονομικής ταφής. Επιπλέον, η έρευνα συμβάλλει στην κατανόηση των οικονομικών και κοινωνικών πτυχών της διαχείρισης αποβλήτων, καθώς η εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών μπορεί να δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για τη βιομηχανία ανακύκλωσης και να ενισχύσει την κυκλική οικονομία (Brunner & Rechberger, 2015).

Η εξέταση των μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά αποτελεί ένα πεδίο έρευνας με ιδιαίτερη σημασία για το παρόν και το μέλλον της ενεργειακής μετάβασης. Η ανάπτυξη και εφαρμογή καινοτόμων λύσεων που να ενισχύουν την ανακύκλωση, να μειώνουν το κόστος διαχείρισης και να περιορίζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας των ανανεώσιμων τεχνολογιών (Demirbas, 2011). Μέσω της έρευνας αυτής, επιχειρείται η ανάδειξη των κύριων προκλήσεων και των πιθανών λύσεων που μπορούν να συμβάλουν στην αποτελεσματικότερη και πιο υπεύνη διαχείριση των αποβλήτων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη μέγιστη αξιοποίηση των πόρων και τη μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου (Sadeh et al., 2016).

1.3. Δομή της Εργασίας

Η εργασία δομείται σε έξι βασικά κεφάλαια. Στην Εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), παρουσιάζεται το θέμα, η σημασία της διαχείρισης αποβλήτων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και ο σκοπός της μελέτης. Το Κεφάλαιο 2 παρέχει μια γενική επισκόπηση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά, αναλύοντας τις προκλήσεις και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στο Κεφάλαιο 3, εξετάζονται οι μέθοδοι διαχείρισης των αποβλήτων ανεμογεννητριών, με έμφαση στην ανακύκλωση των πτερυγίων, τις τεχνολογικές καινοτομίες και την κυκλική οικονομία. Το

Κεφάλαιο 4 επικεντρώνεται στη διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων, παρουσιάζοντας το νομοθετικό πλαίσιο και τις διαθέσιμες μεθόδους ανακύκλωσης. Στο Κεφάλαιο 5, γίνεται συγκριτική ανάλυση των μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών, ενώ το Κεφάλαιο 6 συνοψίζει τα βασικά συμπεράσματα, αναδεικνύει τους περιορισμούς της έρευνας και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντικές μελέτες.

2. Γενική Επισκόπηση της Διαχείρισης Αποβλήτων στις ΑΠΕ

2.1. Τύποι Αποβλήτων από Ανεμογεννήτριες και Φωτοβολταϊκά

Η διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί κρίσιμη πρόκληση για τη βιωσιμότητα των τεχνολογιών αυτών. Οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, παρά τη συμβολή τους στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη στροφή προς καθαρότερες μορφές ενέργειας, δημιουργούν απόβλητα τα οποία απαιτούν αποτελεσματικές στρατηγικές ανακύκλωσης και διάθεσης. Τα απόβλητα αυτά προέρχονται κυρίως από την αποσυναρμολόγηση του εξοπλισμού και τα ανταλλακτικά που απορρίπτονται μετά το πέρας του κύκλου ζωής τους, επιβάλλοντας την ανάγκη υιοθέτησης βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης σύμφωνα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας (Seif et al., 2024).

Η αποσυναρμολόγηση του εξοπλισμού των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει την αποσύνθεση των επιμέρους συστατικών τους, τα οποία αποτελούνται από διαφορετικά υλικά, με ποικίλους βαθμούς ανακυκλωσιμότητας. Οι ανεμογεννήτριες, λόγω του μεγέθους και της σύνθετης δομής τους, περιέχουν μια ευρεία γκάμα υλικών, όπως χάλυβα, αλουμίνιο, σκυρόδεμα, πλαστικά και σύνθετα πολυμερή (Jasińska & Dutkiewicz, 2025). Τα περισσότερα από τα υλικά αυτά είναι δυνητικά ανακυκλώσιμα, ωστόσο η διαδικασία αποσυναρμολόγησης συχνά απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και τεχνικές, ώστε να διαχωριστούν τα επιμέρους στοιχεία με τρόπο που να επιτρέπει την αποτελεσματική επαναχρησιμοποίησή τους. Στα αιολικά πάρκα, οι ανεμογεννήτριες συνήθως αποσυναρμολογούνται επιτόπου, και τα εξαρτήματά τους μεταφέρονται για ανακύκλωση ή διάθεση, ανάλογα με την κατάστασή τους και τις διαθέσιμες τεχνολογίες επεξεργασίας (Eriksson et al., 2014).

Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, η αποσυναρμολόγηση αφορά την αφαίρεση των πλαισίων, των κυψελών, των καλωδίων και άλλων συνοδευτικών στοιχείων. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες περιέχουν γυαλί, πλαστικά, μέταλλα, όπως αλουμίνιο και χαλκό, καθώς και ημιαγωγικά υλικά, όπως το πυρίτιο. Το γυαλί και το αλουμίνιο ανακυκλώνονται σχετικά εύκολα, όμως η ανάκτηση των πολύτιμων μετάλλων και των ημιαγωγών απαιτεί πιο περίπλοκες διαδικασίες, οι οποίες

ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Επιπλέον, ορισμένα υλικά που περιέχονται στις φωτοβολταϊκές μονάδες, όπως το κάδμιο και το μόλυβδος, ενδέχεται να δημιουργήσουν περιβαλλοντικές και υγειονομικές ανησυχίες, εάν δεν διαχειριστούν σωστά κατά την αποσυναρμολόγηση και την τελική διάθεση των πάνελ (Kollmann et al., 2017).

Ένα σημαντικό ζήτημα στη διαχείριση των αποβλήτων αυτών είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης επιμέρους ανταλλακτικών των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών αποτελούν ένα από τα πιο προβληματικά απόβλητα, λόγω της σύνθετης δομής τους και της δυσκολίας ανακύκλωσής τους. Κατασκευάζονται κυρίως από σύνθετα υλικά, όπως ίνες γυαλιού ή άνθρακα σε συνδυασμό με ρητίνες, γεγονός που καθιστά δύσκολη την αποδόμηση και την ανάκτηση υλικών υψηλής αξίας. Οι συνήθεις μέθοδοι διαχείρισης των πτερυγίων περιλαμβάνουν τη μηχανική θραύση για τη δημιουργία δευτερογενών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλες εφαρμογές, τη θερμική επεξεργασία, όπως η πυρόλυση, για την ανάκτηση ενέργειας, ή την αποθήκευσή τους σε χώρους υγειονομικής ταφής, επιλογή που δεν είναι περιβαλλοντικά βιώσιμη. Τα τελευταία χρόνια, γίνονται προσπάθειες για την ανάπτυξη νέων τεχνικών ανακύκλωσης που θα επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση των ινών γυαλιού και άνθρακα, καθώς και την αξιοποίηση των υλικών των πτερυγίων σε νέες εφαρμογές, όπως η κατασκευή δομικών στοιχείων για την οικοδομική βιομηχανία (Eriksson et al., 2014).

Τα υπόλοιπα εξαρτήματα των ανεμογεννητριών, όπως οι πύργοι, τα κιβώτια ταχυτήτων και οι γεννήτριες, κατασκευάζονται κυρίως από μέταλλα, τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν με υψηλά ποσοστά ανάκτησης. Ο χάλυβας και το αλουμίνιο από τους πύργους των ανεμογεννητριών συλλέγονται και ανακυκλώνονται για τη δημιουργία νέων προϊόντων, ενώ τα έλαια και τα λιπαντικά από τα κιβώτια ταχυτήτων υπόκεινται σε ειδική επεξεργασία για την αποφυγή περιβαλλοντικής ρύπανσης. Η σωστή διαχείριση αυτών των υλικών συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ανεμογεννητριών και επιτρέπει τη μέγιστη αξιοποίηση των πόρων τους (Sadef et al., 2016).

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα μεταλλικά και πλαστικά στοιχεία που περιλαμβάνονται στις βάσεις στήριξης και στις καλωδιώσεις αποτελούν επίσης

σημαντική κατηγορία αποβλήτων. Το αλουμίνιο και ο χαλκός από τις βάσεις και τις καλωδιώσεις μπορούν να ανακυκλωθούν με μεγάλη απόδοση, ενώ τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται ως μονωτικά υλικά απαιτούν ειδική διαχείριση για να αποφευχθεί η απόρριψή τους σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η πρόοδος στην τεχνολογία ανακύκλωσης επιτρέπει πλέον την ανάκτηση πολύτιμων υλικών από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, όπως το πυρίτιο και τα σπάνια μέταλλα, όμως η διαδικασία αυτή παραμένει ενεργοβόρα και απαιτεί βελτιώσεις ώστε να καταστεί οικονομικά βιώσιμη σε μεγάλη κλίμακα (Brunner & Rechberger, 2015).

Η διαχείριση των αποβλήτων από τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη συνολική βιωσιμότητα αυτών των τεχνολογιών. Η ανάπτυξη και εφαρμογή καινοτόμων μεθόδων ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης είναι απαραίτητη για τη μείωση του όγκου των αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, καθώς και για την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας (Jasińska & Dutkiewicz, 2025). Παράλληλα, οι πολιτικές διαχείρισης αποβλήτων πρέπει να προσαρμόζονται στις εξελίξεις της τεχνολογίας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσο και τις οικονομικές δυνατότητες ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης των υλικών. Οι τάσεις της έρευνας εστιάζουν στη βελτίωση των μεθόδων ανακύκλωσης για τα σύνθετα υλικά, στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών για τα απόβλητα και στη διαμόρφωση ρυθμιστικών πλαισίων που θα ενισχύουν την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών στον κλάδο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Ceglia et al., 2022).

2.2. Προκλήσεις Ανακύκλωσης και Επαναχρησιμοποίησης

Η διαχείριση των αποβλήτων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα αυτών των τεχνολογιών. Η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση των υλικών που προκύπτουν από την αποσυναρμολόγηση των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών συστημάτων αναγνωρίζονται ως βασικές στρατηγικές για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας. Ωστόσο, η υλοποίηση αυτών των στρατηγικών αντιμετωπίζει πολλαπλές προκλήσεις, οι οποίες σχετίζονται με τη φύση των υλικών, τις διαθέσιμες τεχνολογίες ανακύκλωσης, το κόστος επεξεργασίας, καθώς και τα θεσμικά και ρυθμιστικά πλαίσια που διέπουν τη διαχείριση των αποβλήτων από ΑΠΕ (Chen et al., 2019).

Μία από τις κύριες προκλήσεις που ανακύπτουν στη διαδικασία της ανακύκλωσης αφορά τη σύνθεση των υλικών που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών κατασκευάζονται από σύνθετα πολυμερή υλικά, όπως ίνες γυαλιού και άνθρακα σε συνδυασμό με ρητίνες, τα οποία δεν είναι εύκολα διαχωρίσιμα και ανακυκλώσιμα με τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας αποβλήτων. Η δομή αυτών των σύνθετων υλικών καθιστά δύσκολη την ανάκτηση πολύτιμων πόρων και οδηγεί συχνά στη διάθεση των πτερυγίων σε χώρους υγειονομικής ταφής, επιλογή που δεν είναι περιβαλλοντικά βιώσιμη. Παράλληλα, οι υπάρχουσες τεχνικές ανακύκλωσης, όπως η μηχανική θραύση και η θερμική επεξεργασία, δεν έχουν ακόμα βελτιστοποιηθεί σε επίπεδο βιομηχανικής κλίμακας, με αποτέλεσμα να υπάρχει χαμηλή απόδοση ανακύκλωσης και σημαντικές απώλειες υλικών (Eriksson et al., 2014).

Αντίστοιχες προκλήσεις συναντώνται και στη διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων, όπου τα πλαίσια των πάνελ αποτελούνται από γυαλί, αλουμίνιο, ημιαγωγικά υλικά και πλαστικά. Το γυαλί και το αλουμίνιο μπορούν να ανακυκλωθούν σχετικά εύκολα, όμως η ανάκτηση πολύτιμων ημιαγωγικών υλικών, όπως το πυρίτιο και τα σπάνια μέταλλα, απαιτεί εξειδικευμένες και δαπανηρές τεχνολογίες (Fonte & Xydis, 2021). Επιπλέον, ορισμένα από τα υλικά που περιέχονται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, όπως το κάδμιο και ο μόλυβδος, ενδέχεται να δημιουργήσουν περιβαλλοντικές και υγειονομικές ανησυχίες, εάν δεν διαχειριστούν σωστά κατά τη διαδικασία ανακύκλωσης ή διάθεσης. Ο χειρισμός αυτών των επικίνδυνων υλικών απαιτεί αυστηρούς ελέγχους και ειδικές διαδικασίες ασφαλείας, γεγονός που αυξάνει το κόστος και περιορίζει τη βιωσιμότητα των υφιστάμενων λύσεων ανακύκλωσης (Seif et al., 2024).

Το υψηλό κόστος των διαδικασιών ανακύκλωσης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους περιοριστικούς παράγοντες στην εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων από ΑΠΕ. Οι απαιτήσεις για εξειδικευμένο εξοπλισμό, η ενεργοβόρα φύση των διαδικασιών επεξεργασίας και η ανάγκη διαχωρισμού σύνθετων υλικών καθιστούν τη διαδικασία ανακύκλωσης οικονομικά ασύμφορη σε πολλές περιπτώσεις. Πολλές εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον τομέα της ανακύκλωσης διστάζουν να επενδύσουν σε νέες τεχνολογίες λόγω της αβεβαιότητας που επικρατεί σχετικά με τη ζήτηση για δευτερογενή υλικά και τις μεταβολές στις

τιμές των πρώτων υλών. Ως αποτέλεσμα, τα απόβλητα από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά συστήματα συχνά καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής ή αποθηκεύονται προσωρινά μέχρι να βρεθούν οικονομικά βιώσιμες λύσεις ανακύκλωσης (Ceglia et al., 2022).

Μια ακόμα σημαντική πρόκληση αφορά την έλλειψη αποτελεσματικών πολιτικών και ρυθμιστικών πλαισίων που να ενισχύουν την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των υλικών. Παρότι σε ορισμένες χώρες έχουν θεσπιστεί νομοθετικές πρωτοβουλίες που επιβάλλουν συγκεκριμένα ποσοστά ανακύκλωσης για τα απόβλητα από ΑΠΕ, η εφαρμογή αυτών των πολιτικών παραμένει περιορισμένη. Σε πολλές περιπτώσεις, δεν υπάρχουν σαφείς κατευθυντήριες οδηγίες για τη διαχείριση των αποβλήτων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γεγονός που αφήνει περιθώρια για ανεπαρκή ή μη βιώσιμη διαχείριση (Tota-Maharaj & McMahon, 2021). Επιπλέον, η απουσία οικονομικών κινήτρων για τη βιομηχανία ανακύκλωσης καθιστά δύσκολη την ανάπτυξη τεχνολογιών που θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη διαδικασία ανάκτησης πολύτιμων υλικών και να μειώσουν το κόστος των σχετικών διαδικασιών (Kollmann et al., 2017).

Η επαναχρησιμοποίηση των εξαρτημάτων που προέρχονται από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζει επίσης σημαντικές προκλήσεις, καθώς απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και έλεγχο ποιότητας. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών, λόγω της φθοράς που υφίστανται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, συχνά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά σε άλλες ανεμογεννήτριες και καταλήγουν σε εναλλακτικές χρήσεις, όπως στην κατασκευή δομικών στοιχείων ή στη δημιουργία σύνθετων υλικών (Rathore & Panwar, 2023). Ωστόσο, η εύρεση αγορών για τα ανακυκλωμένα προϊόντα που προέρχονται από αυτά τα υλικά δεν είναι πάντα εύκολη, καθώς πολλές εφαρμογές απαιτούν αυστηρές προδιαγραφές αντοχής και ποιότητας. Επιπλέον, οι περιορισμοί που σχετίζονται με τη μεταφορά και την αποθήκευση των αποβλήτων αυτών καθιστούν δύσκολη τη δημιουργία μιας εφοδιαστικής αλυσίδας που να υποστηρίζει την επαναχρησιμοποίηση σε μεγάλη κλίμακα (Brunner & Rechberger, 2015).

Αντίστοιχα, η επαναχρησιμοποίηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξαρτάται από την κατάσταση και την απόδοσή τους μετά την αφαίρεσή τους από ενεργές εγκαταστάσεις. Σε πολλές περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά πάνελ που αποσύρονται

λόγω μειωμένης απόδοσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές χαμηλότερης ενεργειακής ζήτησης, όπως σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε μικρές εγκαταστάσεις με περιορισμένες ανάγκες. Ωστόσο, η έλλειψη οργανωμένων προγραμμάτων για την επαναχρησιμοποίηση αυτών των πλαισίων περιορίζει την αξιοποίησή τους και οδηγεί στην άμεση απόρριψή τους ως απόβλητα, παρά το γεγονός ότι σε αρκετές περιπτώσεις η απόδοσή τους παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα (Sadeh et al., 2016).

Οι προκλήσεις που σχετίζονται με την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων από ΑΠΕ καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη και εφαρμογή καινοτόμων λύσεων που θα επιτρέψουν τη βελτίωση των διαδικασιών διαχείρισης των αποβλήτων αυτών. Η ενίσχυση της έρευνας για νέες τεχνολογίες ανακύκλωσης, η διαμόρφωση ρυθμιστικών πλαισίων που θα προωθούν την κυκλική οικονομία και η δημιουργία οικονομικών κινήτρων για τη βιομηχανία αποτελούν κρίσιμα βήματα για την επίτευξη μιας βιώσιμης προσέγγισης στη διαχείριση των αποβλήτων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Shen et al., 2023).

2.3. Οικονομικές και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Η διαχείριση των αποβλήτων που προέρχονται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί ένα ζήτημα με σημαντικές οικονομικές και περιβαλλοντικές προεκτάσεις. Παρά το γεγονός ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, η αποσυναρμολόγηση και διαχείριση των αποβλήτων τους δημιουργεί νέες προκλήσεις που επηρεάζουν τόσο την οικονομία όσο και το περιβάλλον (Psomopoulos et al., 2019). Οι οικονομικές επιπτώσεις σχετίζονται με το κόστος ανακύκλωσης και επεξεργασίας των αποβλήτων, την ανάγκη ανάπτυξης εξειδικευμένων τεχνολογιών και τις επενδύσεις που απαιτούνται για τη διαμόρφωση βιώσιμων στρατηγικών διαχείρισης. Από την άλλη πλευρά, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αφορούν τη διαχείριση των επικίνδυνων ή μη ανακυκλώσιμων υλικών, τη χρήση χώρων υγειονομικής ταφής και τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των υλικών, σύμφωνα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας (Demirbas, 2011).

Μία από τις κύριες οικονομικές προκλήσεις της διαχείρισης των αποβλήτων από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι το υψηλό κόστος που συνεπάγεται η διαδικασία

ανακύκλωσης και διάθεσης. Η αποσυναρμολόγηση των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών συστημάτων απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό και τεχνολογικό εξοπλισμό, ενώ οι διαδικασίες διαχωρισμού των υλικών είναι χρονοβόρες και ενεργοβόρες. Επιπλέον, η ανάπτυξη βελτιωμένων μεθόδων ανακύκλωσης, όπως η ανάκτηση ινών γυαλιού από τα πτερύγια των ανεμογεννητριών ή η εξαγωγή σπάνιων μετάλλων από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, προϋποθέτει σημαντικές επενδύσεις σε έρευνα και τεχνολογία. Παρόλο που σε ορισμένες περιπτώσεις η ανακύκλωση αυτών των υλικών μπορεί να αποδειχθεί κερδοφόρα, σε πολλές περιπτώσεις το κόστος των διαδικασιών παραμένει υψηλότερο από την αξία των ανακτηθέντων υλικών, γεγονός που αποθαρρύνει τις εταιρείες από την υιοθέτηση πρακτικών κυκλικής οικονομίας (Ceglia et al., 2022).

Το ζήτημα της χρηματοδότησης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την προώθηση βιώσιμων λύσεων στη διαχείριση των αποβλήτων από ΑΠΕ. Σε πολλές περιπτώσεις, οι κυβερνήσεις και οι διεθνείς οργανισμοί επιδιώκουν να ενισχύσουν τις επιχειρήσεις ανακύκλωσης μέσω επιδοτήσεων και φορολογικών κινήτρων, προκειμένου να αντισταθμίσουν το υψηλό κόστος των διαδικασιών (Hao et al., 2020). Ωστόσο, η έλλειψη ομοιογενούς ρυθμιστικού πλαισίου σε διεθνές επίπεδο δυσχεραίνει την αποτελεσματική εφαρμογή τέτοιων μέτρων, με αποτέλεσμα οι στρατηγικές ανακύκλωσης να ποικίλλουν σημαντικά από χώρα σε χώρα. Οι αγορές των δευτερογενών υλικών, όπως τα ανακυκλωμένα μέταλλα και τα σύνθετα υλικά, δεν είναι πάντοτε σταθερές, γεγονός που δημιουργεί αβεβαιότητα ως προς την οικονομική βιωσιμότητα των επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται στον τομέα της ανακύκλωσης αποβλήτων από ΑΠΕ (Fonte & Xydis, 2021).

Η οικονομική διάσταση της διαχείρισης αποβλήτων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνδέεται και με τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών πάνελ. Ορισμένα εξαρτήματα, όπως οι πυλώνες των ανεμογεννητριών ή τα πλαίσια των φωτοβολταϊκών, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε νέες εγκαταστάσεις, μειώνοντας έτσι το κόστος παραγωγής νέου εξοπλισμού. Παρόλα αυτά, η επαναχρησιμοποίηση προϋποθέτει την ύπαρξη οργανωμένων συστημάτων συλλογής και αξιολόγησης των υλικών, τα οποία δεν έχουν αναπτυχθεί σε μεγάλη κλίμακα. Η έλλειψη κινήτρων και υποδομών για τη δημιουργία μιας κυκλικής αλυσίδας εφοδιασμού έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές

ποσότητες αποβλήτων να καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής ή να αποθηκεύονται για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να αξιοποιούνται (Seif et al., 2024).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαχείρισης των αποβλήτων από ΑΠΕ είναι εξίσου σημαντικές και σχετίζονται με τη διατήρηση των φυσικών πόρων, τη ρύπανση του περιβάλλοντος και τη μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπως οι ίνες γυαλιού και οι ρητίνες, έχουν περιορισμένες δυνατότητες ανακύκλωσης και, σε αρκετές περιπτώσεις, η διάθεσή τους σε χώρους υγειονομικής ταφής αποτελεί τη μόνη εφικτή λύση (Lichtenegger et al., 2020). Η συσσώρευση αυτών των αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς ορισμένα υλικά είναι μη βιοδιασπώμενα και παραμένουν στο περιβάλλον για δεκαετίες, συμβάλλοντας στην αύξηση του όγκου των στερεών αποβλήτων (Eriksson et al., 2014).

Ένα από τα βασικά ζητήματα που προκύπτουν στη διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων αφορά την πιθανότητα έκλυσης επικίνδυνων ουσιών κατά τη διάρκεια της διάθεσης των πάνελ. Ορισμένα φωτοβολταϊκά πάνελ περιέχουν βαρέα μέταλλα, όπως κάδμιο και μόλυβδο, τα οποία, εάν διαρρεύσουν στο περιβάλλον, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στα οικοσυστήματα. Για τον λόγο αυτό, απαιτούνται αυστηροί κανονισμοί για τη διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων, οι οποίοι να διασφαλίζουν ότι οι επικίνδυνες ουσίες δεν διαφεύγουν στο έδαφος ή στα υδάτινα συστήματα (Sadef et al., 2016).

Η ανακύκλωση των υλικών που προέρχονται από ΑΠΕ μπορεί να συμβάλει στη μείωση της εξόρυξης πρώτων υλών, γεγονός που έχει θετικές επιπτώσεις στη διατήρηση των φυσικών πόρων και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η εξόρυξη και επεξεργασία των πρωτογενών υλικών, όπως το πυρίτιο και τα σπάνια μέταλλα που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά πάνελ, απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας και παράγει σημαντικές εκπομπές ρύπων. Η ανάκτηση αυτών των υλικών μέσω ανακύκλωσης μπορεί να μειώσει την ανάγκη για περαιτέρω εξορύξεις, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής ανανεώσιμων συστημάτων ενέργειας (Brunner & Rechberger, 2015).

Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα ανάπτυξης ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων που να ελαχιστοποιούν τις αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και να ενισχύουν την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση των υλικών. Η προώθηση καινοτόμων τεχνολογιών, η εφαρμογή αποτελεσματικών πολιτικών διαχείρισης αποβλήτων και η υιοθέτηση πρακτικών κυκλικής οικονομίας αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ΑΠΕ και την ενίσχυση της βιώσιμης ανάπτυξης (Demirbas, 2011).

3. Διαχείριση Αποβλήτων από Ανεμογεννήτριες

3.1. Εισαγωγή στη Διαχείριση Αποβλήτων Ανεμογεννητριών

Η ραγδαία ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας ως βασικού πυλώνα της ενεργειακής μετάβασης έχει οδηγήσει σε αυξημένη εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε παγκόσμια κλίμακα. Ωστόσο, η διαχείριση των ανεμογεννητριών που φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους αναδεικνύεται σε ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά και διαχειριστικά ζητήματα της βιομηχανίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα επόμενα χρόνια, αναμένεται να αποσυρθούν μεγάλες ποσότητες ανεμογεννητριών, με τα πτερύγιά τους να αποτελούν την κύρια πρόκληση στη διαδικασία ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης. Σύμφωνα με τη μελέτη των Lichtenegger et al. (2020), έως το 2050 η συνολική ποσότητα αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών στην Ευρώπη εκτιμάται ότι θα φτάσει τους 325.000 τόνους ετησίως, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την υιοθέτηση αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων.

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών κατασκευάζονται από σύνθετα πολυμερή υλικά, κυρίως θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες ενισχυμένες με ίνες υάλου ή άνθρακα, με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολο να ανακυκλωθούν μέσω παραδοσιακών μεθόδων (Tota-Maharaj & McMahon, 2021). Οι μηχανικές, θερμικές και χημικές διαδικασίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα παραμένουν δαπανηρές, ενώ η ταφή εξακολουθεί να είναι η κυρίαρχη μέθοδος διάθεσης των πτερυγίων σε πολλές χώρες (Tazi et al., 2019). Παράλληλα, η απουσία εξειδικευμένων υποδομών και ρυθμιστικών πλαισίων περιορίζει τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων ανεμογεννητριών, αυξάνοντας τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της αιολικής βιομηχανίας.

Η αυξανόμενη ανησυχία για την περιβαλλοντική βιωσιμότητα του τομέα της αιολικής ενέργειας έχει οδηγήσει στην αναζήτηση εναλλακτικών στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων. Η επαναχρησιμοποίηση πτερυγίων ανεμογεννητριών σε αρχιτεκτονικές και αστικές εφαρμογές, όπως γέφυρες, στάσεις λεωφορείων και στοιχεία αστικού σχεδιασμού, αποτελεί μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση που μπορεί να συμβάλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Mishnaevsky, 2021). Επιπλέον, η συνεπεξεργασία των αποβλήτων σε τσιμεντοβιομηχανίες έχει προταθεί ως μια προσωρινά αποδοτική λύση, δεδομένου ότι επιτρέπει την αξιοποίηση των πτερυγίων

ως εναλλακτική πρώτη ύλη στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου, μειώνοντας την ανάγκη για πρωτογενείς φυσικές πρώτες ύλες (Nagle et al., 2020).

Η κυκλική οικονομία διαδραματίζει επίσης καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη νέων προσεγγίσεων για τη διαχείριση αποβλήτων ανεμογεννητριών. Σύμφωνα με τους Fonte & Xydis (2021), η ενσωμάτωση ανακυκλωμένων υλικών από πετεργία ανεμογεννητριών σε νέα σύνθετα πολυμερή ή γεωπολυμερή μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους και στην προώθηση μιας βιώσιμης βιομηχανίας σύνθετων υλικών. Ωστόσο, παρά τη δυναμική των αναδυόμενων τεχνολογιών ανακύκλωσης, παραμένουν σημαντικές προκλήσεις, όπως η ενεργειακή αποδοτικότητα των μεθόδων, το υψηλό κόστος και η έλλειψη καθιερωμένων αγορών για τα ανακυκλωμένα υλικά (Sorte et al., 2023).

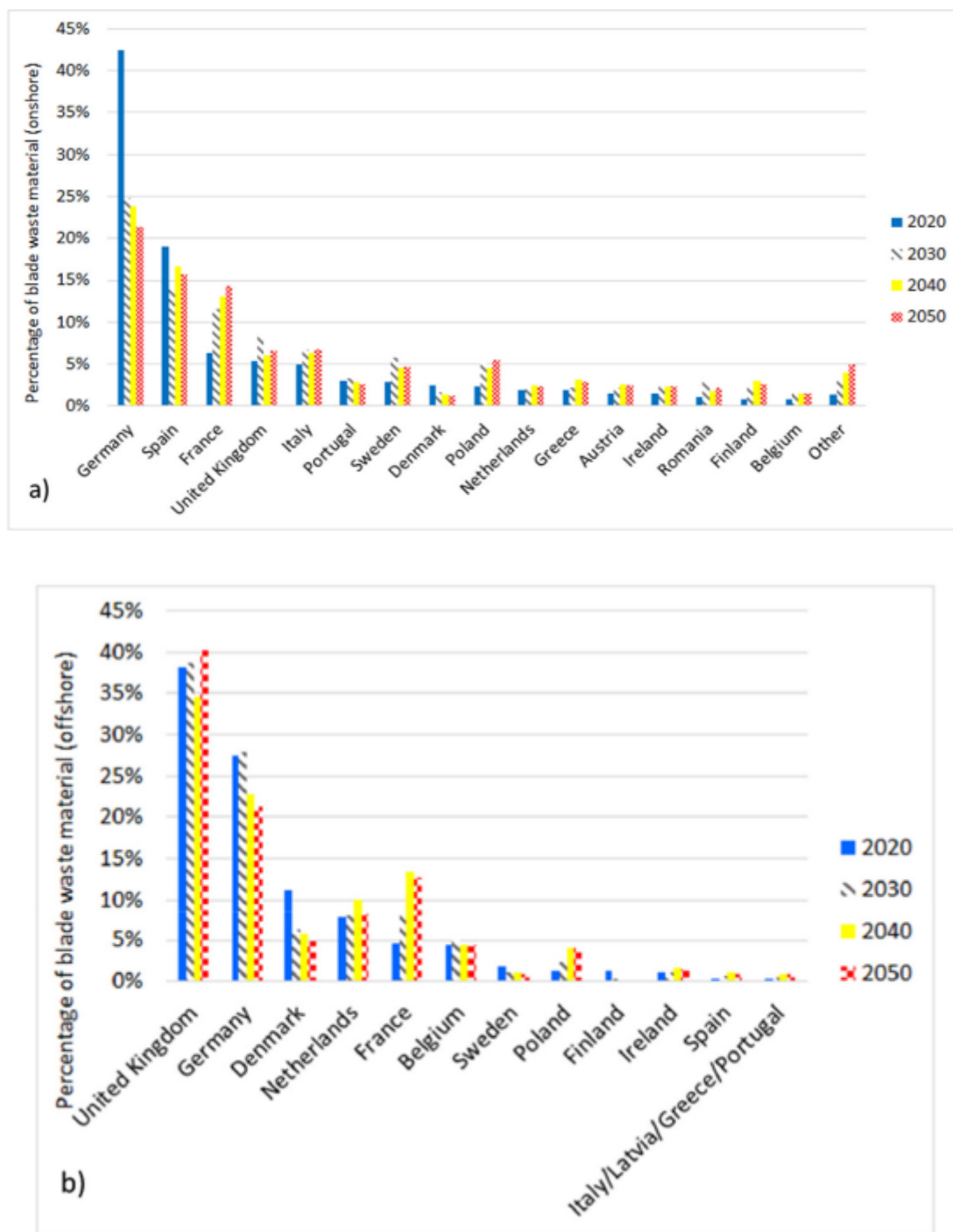
Μια από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές ανησυχίες που σχετίζονται με τα απόβλητα των ανεμογεννητριών είναι η πιθανή δημιουργία μικροπλαστικών από τη διάβρωση των πετεργίων, η οποία μπορεί να επηρεάσει τη χερσαία και θαλάσσια οικολογία (Tayebi et al., 2024). Η ανακύκλωση μέσω χημικών διαδικασιών, όπως η *solvolysis*, αναδεικνύεται ως μία από τις πλέον βιώσιμες λύσεις, καθώς επιτρέπει την ανάκτηση ινών υψηλής ποιότητας, μειώνοντας παράλληλα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διαδικασίας (Beauson et al., 2022). Η εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών, σε συνδυασμό με πολιτικές που ενθαρρύνουν την καινοτομία και την ανάπτυξη αγορών ανακυκλωμένων προϊόντων, μπορεί να συμβάλει στην αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες στο πλαίσιο μιας κυκλικής και βιώσιμης οικονομίας.

Η διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει η βιομηχανία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τις επόμενες δεκαετίες. Η προώθηση στρατηγικών ανακύκλωσης, η ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων επαναχρησιμοποίησης και η εφαρμογή πολιτικών που ενισχύουν τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων είναι απαραίτητες για την επίτευξη ενός βιώσιμου μοντέλου ανάπτυξης. Η μελλοντική έρευνα και οι τεχνολογικές εξελίξεις θα κρίνουν σε μεγάλο βαθμό τη δυνατότητα της αολικής βιομηχανίας να ανταποκριθεί στις προκλήσεις της κυκλικής οικονομίας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

3.2. Ποσοτικοποίηση και Πρόβλεψη Παραγωγής Αποβλήτων

Η αυξανόμενη εξάπλωση των ανεμογεννητριών ως βασικού μέσου παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας συνοδεύεται από μια παράλληλη πρόκληση: τη διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν κατά την απόσυρση των ανεμογεννητριών. Η ποσοτικοποίηση και η πρόβλεψη της παραγωγής αποβλήτων είναι κρίσιμες για τον σχεδιασμό βιώσιμων στρατηγικών διαχείρισης, καθώς η ανάγκη για ανακύκλωση και ανάκτηση υλικών αυξάνεται διαρκώς. Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται μελέτες που αναλύουν το ζήτημα σε ευρωπαϊκό επίπεδο, εστιάζοντας στις εκτιμήσεις για τον όγκο των αποβλήτων, τις προκλήσεις διαχείρισής τους και τις πιθανές λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν για τη βιώσιμη ανάπτυξη του κλάδου της αιολικής ενέργειας.

Στη μελέτη των Lichtenegger et al. (2020), πραγματοποιήθηκε ανάλυση πρόβλεψης των αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών στην Ευρώπη έως το 2050. Η έρευνα ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη τόσο τις χερσαίες (onshore) όσο και τις υπεράκτιες (offshore) ανεμογεννήτριες, ενώ έκανε χρήση στοχαστικών κατανομών για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μέχρι το 2050, η συνολική ισχύς των ανεμογεννητριών στην Ευρώπη θα φτάσει τα 450 GW, ενώ η ετήσια παραγωγή αποβλήτων από πτερύγια θα αγγίξει τους **325.000 τόνους**. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, η Γερμανία θα έχει τη μεγαλύτερη παραγωγή αποβλήτων από πτερύγια χερσαίων ανεμογεννητριών, ενώ το Ηνωμένο Βασίλειο θα κυριαρχήσει στα απόβλητα από υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.



Εικόνα 1. Απόβλητα από πτερύγια ανεμογεννητριών ανά χώρα ως ποσοστό του συνόλου (α) στην ξηρά και (β) στην ανοικτή θάλασσα. Πηγή: (Lichtenegger et al., 2020)

Η μελέτη των Lichtenegger et al. (2020) αναδεικνύει τη σημασία της κυκλικής οικονομίας για τη διαχείριση των αποβλήτων αυτών και προτείνει τη δημιουργία τοπικών μονάδων ανακύκλωσης για την επαναχρησιμοποίηση των ινών γυαλιού. Επιπλέον, τονίζει ότι η ανακύκλωση παραμένει περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους επεξεργασίας και των νομοθετικών περιορισμών που διαφέρουν μεταξύ των

ευρωπαϊκών χωρών. Η μελέτη των Lichtenegger et al. (2020) υπογραμμίζει την ανάγκη ανάπτυξης νέων τεχνολογιών και κανονισμών για την αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών.

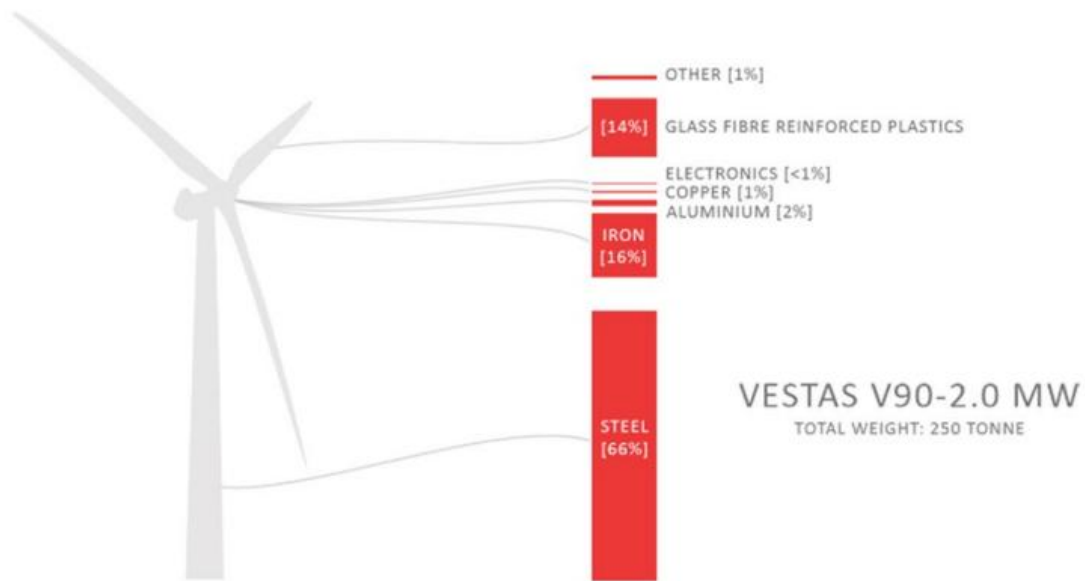
Σύμφωνα με τους Tayebi et al. (2024), η διαχείριση των αποβλήτων από τα πτερύγια ανεμογεννητριών αποτελεί κρίσιμη περιβαλλοντική πρόκληση, ιδίως λόγω της πιθανότητας παραγωγής μικροπλαστικών. Η εργασία παρέχει μια εκτενή επισκόπηση των διαθέσιμων τεχνολογιών ανακύκλωσης και αξιολογεί τις επιπτώσεις των διαφορετικών μεθόδων ως προς τη βιωσιμότητα και το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Η μελέτη επισημαίνει ότι η παραδοσιακή απόρριψη των πτερυγίων μέσω υγειονομικής ταφής ή καύσης μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Τα μικροπλαστικά που παράγονται από τη διάβρωση των πολυμερών υλικών στα πτερύγια μπορούν να εισχωρήσουν στο περιβάλλον, επηρεάζοντας τόσο τη χερσαία όσο και την υδάτινη οικολογία. Σύμφωνα με τους ερευνητές, ορισμένα μοντέλα προβλέπουν ότι η συνολική παραγωγή μικροπλαστικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση θα μπορούσε να αυξηθεί σημαντικά έως το 2050 αν δεν αναπτυχθούν αποτελεσματικές στρατηγικές ανακύκλωσης. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, η εργασία εξετάζει εναλλακτικές λύσεις, όπως η χρήση θερμοπλαστικών πολυμερών που είναι πιο εύκολο να ανακυκλωθούν, καθώς και την ανάπτυξη νέων σύνθετων υλικών με βάση βιοδιασπώμενα πολυμερή. Η μελέτη καταλήγει ότι η επαναχρησιμοποίηση των πτερυγίων για αστικές και κατασκευαστικές εφαρμογές, όπως καταφύγια στάθμευσης, γέφυρες και έπιπλα πόλης, μπορεί να μειώσει σημαντικά την περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Tota-Maharaj & McMahon (2021), η αποξήλωση ανεμογεννητριών στο Ηνωμένο Βασίλειο δημιουργεί ολοένα και περισσότερα απόβλητα, καθώς ο αριθμός των ανεμογεννητριών που φτάνουν στο τέλος της διάρκειας ζωής τους αυξάνεται ραγδαία. Η μελέτη αναλύει τη σύνθεση των ανεμογεννητριών διαφόρων μεγεθών και σχεδίων, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο η εξέλιξη της βιομηχανίας επηρεάζει τον ρυθμό παραγωγής αποβλήτων. Χρησιμοποιώντας αναλύσεις δεδομένων αποβλήτων για πενταετείς περιόδους από το 2000 έως το 2039, οι συγγραφείς αναπτύσσουν έξι εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης αποβλήτων, εστιάζοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μέσω επαναχρησιμοποίησης, ανακατασκευής, ανακύκλωσης και ενεργειακής ανάκτησης

από καύση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι κατά την περίοδο 2015-2019, παράχθηκαν 35 κιλοτόνοι αποβλήτων ετησίως, ενώ ο αριθμός αυτός αναμένεται να ξεπεράσει τους 1.200 κιλοτόνους ετησίως μέχρι το 2039.

Η μελέτη των Tota-Maharaj & McMahon (2021) επισημαίνει ότι τα θεμέλια των ανεμογεννητριών συνεισφέρουν στο μεγαλύτερο ποσοστό των αποβλήτων. Στην αρχική φάση αποξήλωσης, το σκυρόδεμα αποτελεί περίπου 80% του συνολικού βάρους των αποβλήτων, αλλά καθώς αυξάνεται η εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών, το χάλυβας θα φτάσει να αποτελεί το 50% των αποβλήτων μέχρι το 2035-2039. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η σύνθεση υλικών μιας ανεμογεννήτριας τύπου *Vestas V90-2.0 MW*, συνολικού βάρους 250 τόνων. Όπως φαίνεται, το μεγαλύτερο ποσοστό αποτελείται από χάλυβα (66%), ακολουθούμενο από σίδηρο (16%) και ενισχυμένα με ίνες γυαλιού πλαστικά (14%). Τα υπόλοιπα υλικά περιλαμβάνουν αλουμίνιο (2%), χαλκό (1%), ηλεκτρονικά (<1%) και άλλα υλικά (1%). Ο χάλυβας αποτελεί τη συντριπτική πλειονότητα των υλικών, γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη για αποδοτικές μεθόδους ανακύκλωσης μετά το τέλος του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών. Παράλληλα, τα ενισχυμένα πλαστικά και τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις στη διαχείριση αποβλήτων, καθώς δεν διατίθενται ακόμα ευρέως αποδοτικές τεχνολογίες επαναχρησιμοποίησης ή ανακύκλωσης.

Οι Tota-Maharaj & McMahon (2021) προτείνουν εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης αποβλήτων, τα οποία περιλαμβάνουν την αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης των μεταλλικών μερών και την ανάπτυξη τεχνολογιών επαναχρησιμοποίησης των συνθετικών υλικών των πτερυγίων και παράλληλα υπογραμμίζουν την ανάγκη για πιο αυστηρά ρυθμιστικά πλαίσια και καινοτόμες λύσεις ανακύκλωσης, ώστε να αντιμετωπιστεί το αυξανόμενο πρόβλημα της απόσυρσης ανεμογεννητριών με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον.



Εικόνα 2. Η σύνθεση υλικών μιας ανεμογεννήτριας τύπου Vestas V90-2.0 MW. Πηγή: (Tota-Maharaj & McMahon, 2021)

Σύμφωνα με τη μελέτη των Tazi et al. (2019), η διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες αποτελεί σημαντική περιβαλλοντική και οικονομική πρόκληση στη Γαλλία, καθώς ο αριθμός των ανεμογεννητριών που φτάνουν στο τέλος της ζωής τους αυξάνεται ραγδαία. Η εργασία εστιάζει στην ποσοτικοποίηση των ροών υλικών που σχετίζονται με την αποσυναρμολόγηση ανεμογεννητριών στην περιοχή της Champagne-Ardenne, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ανάλυσης ροών υλικών (MFA) για την περίοδο 2002-2020. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι περισσότερα από 1 εκατομμύριο τόνοι αποβλήτων θα παραχθούν κατά την απόσυρση των ανεμογεννητριών στην περιοχή. Τα βασικά υλικά που πρέπει να διαχειριστούν περιλαμβάνουν 523.227 τόνους χάλυβα και σιδήρου, 6.617 τόνους χαλκού, 28.179 τόνους αλουμινίου και 734.230 τόνους σκυροδέματος από θεμελιώσεις. Σημαντική πρόκληση αποτελεί η διαχείριση των 27.000 τόνων αποβλήτων από πτερύγια και σύνθετα υλικά, καθώς οι συμβατικές μέθοδοι διάθεσης, όπως η ταφή, δεν είναι βιώσιμες μακροπρόθεσμα.

Η μελέτη των Tazi et al. (2019), επισημαίνει ότι μόνο το 73% μιας μέσης ανεμογεννήτριας μπορεί να ανακυκλωθεί, εάν δεν ληφθεί υπόψη το σκυρόδεμα των θεμελιώσεων. Ωστόσο, στη Γαλλία δεν υπάρχουν ακόμα εξειδικευμένες εγκαταστάσεις αποσυναρμολόγησης και ανακύκλωσης ανεμογεννητριών, γεγονός

που επιβραδύνει την ανάπτυξη μιας κυκλικής οικονομίας στον τομέα αυτό. Οι Tazi et al. (2019) υπογραμμίζουν ότι η έλλειψη κατάλληλων υποδομών ανακύκλωσης και το υψηλό κόστος αποσυναρμολόγησης καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για πολιτικές παρεμβάσεις και επενδύσεις σε τεχνολογίες επαναχρησιμοποίησης. Οι Tazi et al., (2019) καταλήγουν στο γεγονός ότι η διαχείριση των αποβλήτων των ανεμογεννητριών απαιτεί ολοκληρωμένες στρατηγικές που θα ενισχύσουν την περιβαλλοντική βιωσιμότητα του τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη Γαλλία.

Στην περίπτωση της Ελλάδας, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1, η παραγωγή αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών παραμένει συγκριτικά χαμηλή σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες (onshore), το ποσοστό αποβλήτων κυμαίνεται γύρω στο 3% του συνολικού όγκου το 2020, με σταδιακή αύξηση έως περίπου 5% έως το 2050. Αντίστοιχα, για τις υπεράκτιες (offshore) ανεμογεννήτριες, η Ελλάδα διατηρεί επίσης χαμηλό ποσοστό, κάτω του 3% σε όλα τα έτη πρόβλεψης. Ωστόσο, σύμφωνα με τη μελέτη των Kiriakidis et al. (2024), η Ελλάδα αναδεικνύεται ως μία από τις χώρες με τη μεγαλύτερη τεχνική απόδοση στην παραγωγή ενέργειας από χερσαίες ανεμογεννήτριες, καταγράφοντας 705 MWh ανά ανεμογεννήτρια ετησίως, και 3370 MWh για τις υπεράκτιες. Αυτή η υψηλή απόδοση υποδηλώνει ότι, παρά το σχετικά μικρό ποσοστό συμμετοχής στα ευρωπαϊκά απόβλητα, ο συνολικός όγκος αποβλήτων στη χώρα θα αυξηθεί σημαντικά λόγω της εντατικής εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού. Επιπλέον, η Ελλάδα παρουσιάζει εντυπωσιακή σταθερότητα στην παραγωγή αιολικής ενέργειας κατά τη διάρκεια όλων των εποχών, γεγονός που καθιστά πιο εύκολη την ενσωμάτωσή της στο δίκτυο, χωρίς την ανάγκη σύνθετων μηχανισμών εξισορρόπησης. Σύμφωνα με τους Kiriakidis et al. (2024), η Ελλάδα κατατάσσεται στις τρεις χώρες με τις λιγότερες ημέρες χαμηλής απόδοσης (34 ημέρες) και τις περισσότερες ημέρες υψηλής συνδυασμένης απόδοσης ηλιακής και αιολικής ενέργειας (66 ημέρες), ενώ η μεταβλητότητα (IQR) της παραγωγής ανά τουρμπίνη είναι μόλις 0.40 MWh. Τα δεδομένα αυτά καταδεικνύουν ότι η Ελλάδα, αν και δεν συγκαταλέγεται στους κύριους "παραγωγούς αποβλήτων" σε ευρωπαϊκό επίπεδο, ενδέχεται να αντιμετωπίσει αυξημένες ανάγκες διαχείρισης αποβλήτων πτερυγίων στο μέλλον, λόγω της εντεινόμενης ανάπτυξης του αιολικού τομέα. Συνεπώς, απαιτείται εγκαίρως σχεδιασμός για την εγκατάσταση εγχώριων

υποδομών ανακύκλωσης και την προώθηση πολιτικών κυκλικής οικονομίας, προκειμένου να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα του τομέα.

Ένα κρίσιμο στοιχείο στη συνολική εκτίμηση της παραγωγής αποβλήτων από ανεμογεννήτριες είναι και το οικονομικό κόστος που σχετίζεται με την αποσυναρμολόγηση, τη μεταφορά και τη διαχείριση των υλικών στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Σύμφωνα με ανάλυση της Διεθνούς Υπηρεσίας Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA), το κόστος αποσυναρμολόγησης και διαχείρισης των πτερυγίων ανεμογεννητριών κυμαίνεται μεταξύ 400 και 800 ευρώ ανά τόνο (IRENA, 2021), ενώ τα συνολικά έξοδα αποξήλωσης μιας πλήρους ανεμογεννήτριας μπορεί να φτάσουν τα 100.000 ευρώ για εγκαταστάσεις 2–3 MW (Leon, 2023). Η δυσκολία ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών, σε συνδυασμό με την έλλειψη οργανωμένων αγορών για δευτερογενή προϊόντα, καθιστούν την οικονομική βιωσιμότητα της διαδικασίας ιδιαίτερα αβέβαιη. Ως εκ τούτου, ο ακριβής ποσοτικός προσδιορισμός των μελλοντικών αποβλήτων πρέπει να συνοδεύεται από ανάλυση κόστους, ώστε να διαμορφωθούν ρεαλιστικά επιχειρηματικά μοντέλα και να ενισχυθούν επενδύσεις σε υποδομές ανακύκλωσης.

3.3. Υφιστάμενες Μέθοδοι Διαχείρισης Αποβλήτων

Η διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της αιολικής βιομηχανίας, καθώς ο αυξανόμενος αριθμός εγκαταστάσεων οδηγεί σε σημαντικές ποσότητες αποβλήτων στο τέλος της διάρκειας ζωής τους. Τα πτερύγια ανεμογεννητριών, κατασκευασμένα κυρίως από θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά και υαλονήματα, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ανακυκλωθούν, γεγονός που καθιστά επιτακτική την αναζήτηση βιώσιμων λύσεων διαχείρισης. Η παρούσα ενότητα εξετάζει τις υφιστάμενες μεθόδους διάθεσης και επεξεργασίας των αποβλήτων αυτών, καθώς και τις περιβαλλοντικές και οικονομικές προεκτάσεις τους. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Ramirez-Tejeda et al., 2017; Nagle et al., 2020; Beauson et al., 2022), η πιο διαδεδομένη πρακτική διαχείρισης είναι η υγειονομική ταφή, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους της. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση θεωρείται μη βιώσιμη μακροπρόθεσμα, καθώς συμβάλλει στην αύξηση των στερεών αποβλήτων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

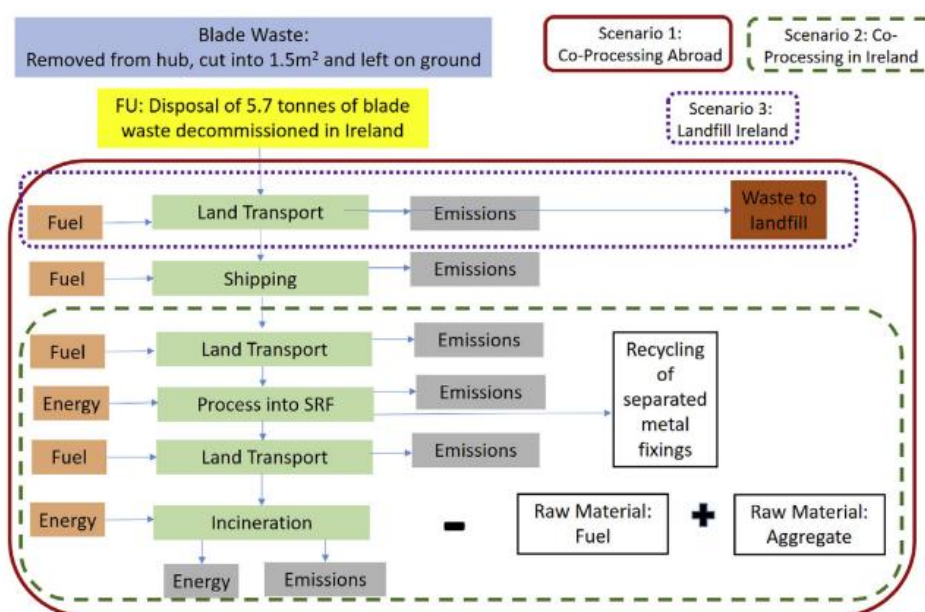
Εναλλακτικές μέθοδοι, όπως η συν-επεξεργασία των αποβλήτων σε τσιμεντοβιομηχανίες, η πυρόλυση και η μηχανική ανακύκλωση, προσφέρουν περιβαλλοντικά αποδοτικότερες λύσεις, αλλά αντιμετωπίζουν προκλήσεις σχετικές με το υψηλό κόστος και τις τεχνικές δυσκολίες εφαρμογής σε μεγάλη κλίμακα. Παράλληλα, η ανάγκη για αυστηρότερα ρυθμιστικά πλαίσια και η προώθηση καινοτόμων τεχνολογιών ανακύκλωσης καθίστανται κρίσιμοι παράγοντες για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Στη συνέχεια αναλύονται εμπειρικές μελέτες που εστιάζουν στη σύγκριση διαφορετικών μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων, τις περιβαλλοντικές και οικονομικές τους επιπτώσεις και τις προοπτικές εξέλιξης του τομέα, αναδεικνύοντας την ανάγκη για ένα ολοκληρωμένο και βιώσιμο σύστημα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των υλικών από ανεμογεννήτριες.

Η μελέτη των Nagle et al. (2020) εξέτασε την περιβαλλοντική επίδραση της διάθεσης των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες στην Ιρλανδία μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA). Οι ερευνητές συνέκριναν τρεις διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων: (1) υγειονομική ταφή στην Ιρλανδία, (2) συν-επεξεργασία σε τσιμεντοβιομηχανίες στη Γερμανία και (3) συν-επεξεργασία σε τσιμεντοβιομηχανίες στην Ιρλανδία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συν-επεξεργασία στην Ιρλανδία είχε τον χαμηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, καθώς μειώθηκαν τόσο οι εκπομπές από τη μεταφορά αποβλήτων όσο και η χρήση πρωτογενών υλικών στην παραγωγή τσιμέντου. Αντίθετα, η υγειονομική ταφή αναδείχθηκε ως η λιγότερο βιώσιμη λύση, δεδομένου ότι δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα, ενώ έχει υψηλό κόστος διάθεσης, που φτάνει τα 113 ευρώ/τόνο. Σημαντικό εύρημα ήταν ότι η χρήση των αποβλήτων από τα πτερύγια ανεμογεννητριών στην τσιμεντοβιομηχανία συμβάλλει στην αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων, μειώνοντας τις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3 της μελέτης, η διάθεση αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών στην Ιρλανδία μπορεί να ακολουθήσει τρεις διαφορετικές στρατηγικές, καθεμία με διαφορετικές περιβαλλοντικές και ενεργειακές επιπτώσεις. Το πρώτο σενάριο αφορά την υγειονομική ταφή εντός της Ιρλανδίας, όπου τα πτερύγια απορρίπτονται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία, οδηγώντας σε άμεσες εκπομπές ρύπων και απώλεια χρήσιμων υλικών. Αυτή η μέθοδος θεωρείται η λιγότερο βιώσιμη, καθώς δεν συμβάλλει στην κυκλική οικονομία και εντείνει τα

περιβαλλοντικά προβλήματα. Το δεύτερο σενάριο περιλαμβάνει τη συν-επεξεργασία των αποβλήτων σε τσιμεντοβιομηχανίες στο εξωτερικό, διαδικασία που απαιτεί μεταφορά των πτερυγίων μέσω χερσαίων και θαλάσσιων δικτύων. Παρά το γεγονός ότι αξιοποιεί τα απόβλητα ως εναλλακτικό καύσιμο και πρώτη ύλη στην παραγωγή τσιμέντου, η επιπρόσθετη μεταφορά συνεπάγεται αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Το τρίτο σενάριο προβλέπει τη συν-επεξεργασία των αποβλήτων σε τσιμεντοβιομηχανίες εντός Ιρλανδίας. Σε αυτή την περίπτωση, τα πτερύγια μετατρέπονται σε δευτερογενές καύσιμο (SRF) πριν χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο ορυκτών καυσίμων στη βιομηχανία τσιμέντου. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων μεταλλικών στοιχείων και μειώνει την ανάγκη για εισαγωγή πρωτογενών πρώτων υλών, καθιστώντας την την πιο βιώσιμη λύση από περιβαλλοντική και οικονομική άποψη. Συνολικά, η ανάλυση υπογραμμίζει τη σημασία της βελτιστοποίησης της διαχείρισης αποβλήτων για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. (Nagle et al., 2020).



Εικόνα 3. Σενάρια διάθεσης αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών στην Ιρλανδία, περιλαμβάνοντας υγειονομική ταφή, συν-επεξεργασία στο εξωτερικό και συν-επεξεργασία εντός της χώρας. Πηγή: (Nagle et al., 2020)

Σύμφωνα με τη μελέτη των Ramirez-Tejeda et al. (2017), η διαχείριση των αποβλήτων από τα πτερύγια ανεμογεννητριών στις Ηνωμένες Πολιτείες αποτελεί

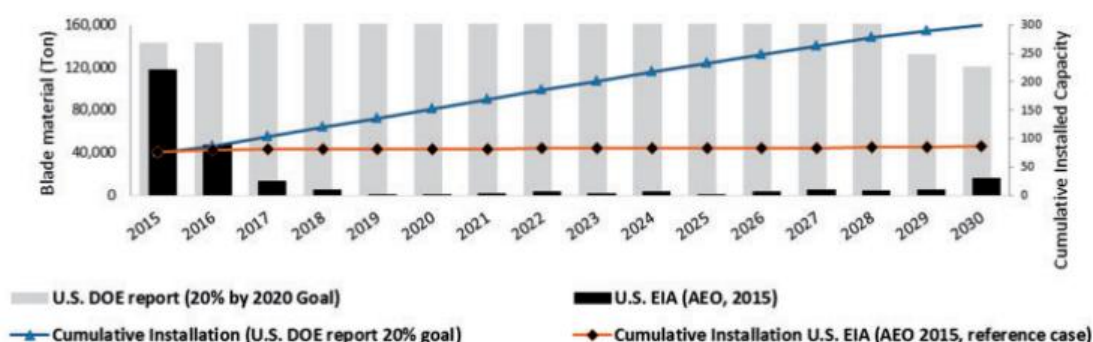
σημαντική περιβαλλοντική πρόκληση, καθώς ο όγκος των αποβλήτων αυτών αναμένεται να αυξηθεί δραματικά τις επόμενες δεκαετίες. Η μελέτη εστιάζει στις υφιστάμενες πρακτικές απόρριψης και εξετάζει την ανάγκη για πολιτικές παρεμβάσεις και τεχνολογικές καινοτομίες που θα καταστήσουν τη διαχείριση των αποβλήτων αυτών πιο βιώσιμη. Η έρευνα αναφέρει ότι μέχρι το 2040, περισσότερες από 418.000 τόνοι σύνθετων υλικών από πτερύγια ανεμογεννητριών θα χρειαστούν διάθεση παγκοσμίως. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι η πιο διαδεδομένη μέθοδος απόρριψης στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι η υγειονομική ταφή, λόγω του χαμηλού κόστους της, παρά τις σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Το υψηλό θερμοσκληρυνόμενο περιεχόμενο των πτερυγίων καθιστά τα απορρίμματα αυτά ανθεκτικά στη φυσική αποδόμηση, οδηγώντας σε δεκαετίες ή και αιώνες σταθερότητας σε χώρους υγειονομικής ταφής. Οι συγγραφείς εξετάζουν εναλλακτικές τεχνολογίες διάθεσης, όπως η πυρόλυση, η μηχανική θραύση και η χημική αποικοδόμηση, αλλά επισημαίνουν ότι καμία από αυτές τις μεθόδους δεν είναι πλήρως οικονομικά βιώσιμη σε μεγάλη κλίμακα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, η μελέτη παρουσιάζει την ποσοτική εκτίμηση των αποβλήτων πτερυγίων που θα συσσωρευτούν στις ΗΠΑ μέχρι το 2040, αναδεικνύοντας την ανάγκη για ανάπτυξη νέων λύσεων. Συγκεκριμένα, η παραγωγή αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών στις Ηνωμένες Πολιτείες αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά έως το 2030, ανάλογα με το ρυθμό εγκατάστασης και απόσυρσης ανεμογεννητριών. Η γραφική απεικόνιση συγκρίνει δύο διαφορετικά σενάρια ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας: το σενάριο του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE), που θέτει ως στόχο το 20% της ηλεκτροπαραγωγής από αιολική ενέργεια έως το 2020, και το βασικό σενάριο αναφοράς της Υπηρεσίας Ενεργειακών Πληροφοριών των ΗΠΑ (EIA, 2015).

Η γκρι στήλη αντιπροσωπεύει την προβλεπόμενη ποσότητα αποβλήτων πτερυγίων σε κάθε έτος, η οποία αυξάνεται σταθερά καθώς οι ανεμογεννήτριες φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Οι μαύρες στήλες δείχνουν την ποσότητα αποβλήτων που καταγράφεται σύμφωνα με τα δεδομένα της EIA, τα οποία είναι χαμηλότερα από τις εκτιμήσεις του DOE. Οι δύο γραμμές δείχνουν τη σωρευτική εγκατεστημένη ισχύ (GW) σε κάθε σενάριο, με το μπλε χρώμα να αντιστοιχεί στο αισιόδοξο σενάριο του DOE και το πορτοκαλί στο πιο συντηρητικό σενάριο της EIA. Η σύγκριση των σεναρίων δείχνει ότι η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας οδηγεί σε αυξημένη

παραγωγή αποβλήτων από πτερύγια, κάτι που ενισχύει την ανάγκη για βιώσιμες λύσεις διαχείρισης. Οι μελλοντικές πολιτικές για τη διαχείριση των αποβλήτων αυτών θα πρέπει να συνυπολογίσουν τόσο την περιβαλλοντική όσο και την οικονομική διάσταση, προκειμένου να περιοριστούν οι επιπτώσεις της ανεξέλεγκτης απόρριψης πτερυγίων.

Η εργασία των Ramirez-Tejeda et al. (2017) καταλήγει ότι απαιτείται άμεση πολιτική παρέμβαση για τη μείωση της εξάρτησης από την ταφή και την ενίσχυση της ανακύκλωσης μέσω κινήτρων και νέων κανονιστικών πλαισίων. Οι Ramirez-Tejeda et al. (2017) τονίζουν επίσης τη σημασία των νέων υλικών, όπως οι βιοδιασπώμενες ρητίνες και τα θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά, τα οποία θα μπορούσαν να διευκολύνουν τη μελλοντική ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των πτερυγίων ανεμογεννητριών.



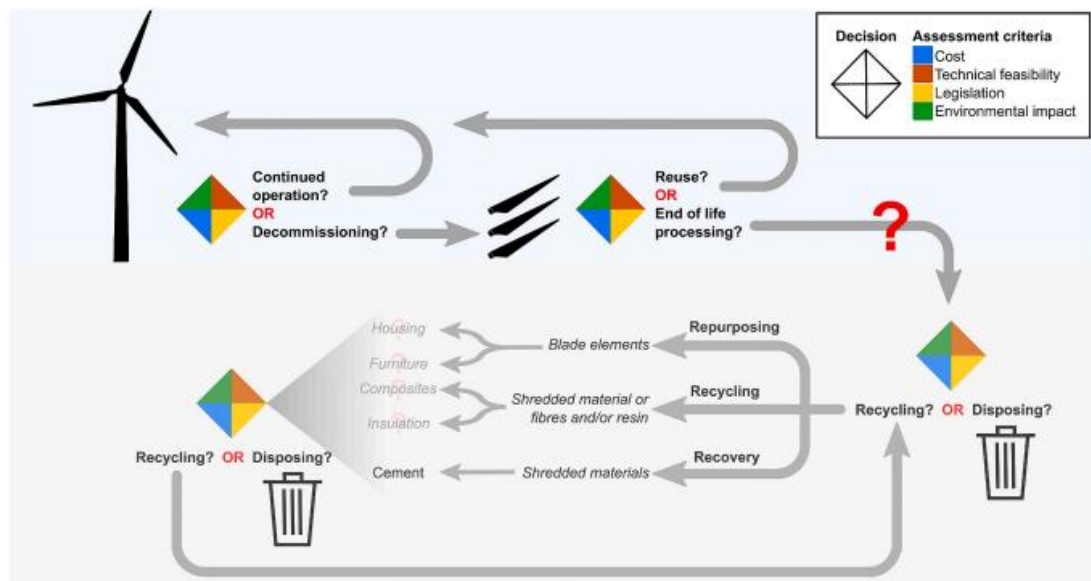
Εικόνα 4. Πρόβλεψη παραγωγής αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών και σωρευτική εγκατεστημένη ισχύς στις ΗΠΑ βάσει διαφορετικών σεναρίων. Πηγή: (Ramirez-Tejeda et al., 2017)

Σύμφωνα με τη μελέτη των Beauson et al. (2022), η διαχείριση των πτερυγίων ανεμογεννητριών στο τέλος της ζωής τους αποτελεί σημαντική πρόκληση λόγω της σύνθετης κατασκευής τους, η οποία περιλαμβάνει θερμοσκληρυνόμενες πολυμερικές μήτρες ενισχυμένες με υαλονήματα. Η εργασία παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της αλυσίδας αξίας για την απόσυρση των πτερυγίων, εξετάζοντας παράγοντες όπως οι εκτιμήσεις για την ποσότητα των αποβλήτων, οι νομοθετικές ρυθμίσεις, οι διαθέσιμες τεχνολογίες ανακύκλωσης και οι κοινωνικές αντιλήψεις για την αιολική ενέργεια. Η μελέτη υπογραμμίζει ότι οι προβλέψεις δείχνουν πως μέχρι το 2050, τα απόβλητα πτερυγίων ανεμογεννητριών στην Ευρώπη θα ξεπεράσουν τους 325 κιλοτόνους ετησίως. Οι κύριες χώρες που θα αντιμετωπίσουν το πρόβλημα αυτό

είναι η Γερμανία, η Ισπανία, η Γαλλία και η Σουηδία, με τις μεγαλύτερες ποσότητες αποβλήτων να συγκεντρώνονται στις περιοχές με εκτεταμένες εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η Ευρώπη αναμένεται να είναι υπεύθυνη για το 25% του συνολικού όγκου αποβλήτων πτερυγίων, ενώ η Κίνα θα έχει το μεγαλύτερο ποσοστό (40%).

Οι Beauson et al. (2022) αναλύουν τις τεχνολογίες ανακύκλωσης, επισημαίνοντας ότι οι περισσότερες προσπάθειες εστιάζουν στη διαχωριστική ανακύκλωση των ινών υάλου και στη μηχανική αποικοδόμηση των συνθετικών ρητινών. Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή αυτών των μεθόδων παραμένει περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους και των τεχνικών δυσκολιών. Στην Εικόνα 5, παρουσιάζεται το συνολικό μοντέλο της αλυσίδας αξίας για την ανακύκλωση πτερυγίων, καταδεικνύοντας ότι η έλλειψη ολοκληρωμένων λύσεων οδηγεί σε υψηλά ποσοστά απόρριψης σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η διαχείριση των πτερυγίων ανεμογεννητριών στο τέλος της ζωής τους περιλαμβάνει μια σειρά αποφάσεων που επηρεάζονται από παράγοντες όπως το κόστος, η τεχνική εφικτότητα, η νομοθεσία και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αρχικά, εξετάζεται εάν μια ανεμογεννήτρια μπορεί να συνεχίσει τη λειτουργία της ή εάν απαιτείται απόσυρση. Εφόσον αποφασιστεί η αποξήλωση, προκύπτει το ερώτημα της επαναχρησιμοποίησης ή της επεξεργασίας των πτερυγίων στο τέλος της ζωής τους. Στη συνέχεια, τα πτερύγια μπορούν είτε να επαναχρησιμοποιηθούν σε νέες εφαρμογές, όπως σε κατασκευές και έπιπλα, είτε να υποβληθούν σε επεξεργασία για ανακύκλωση.

Οι βασικές διαθέσιμες επιλογές περιλαμβάνουν την επαναχρησιμοποίηση ολόκληρων τμημάτων των πτερυγίων, την ανακύκλωση των συνθετικών υλικών τους ή την ανάκτηση ενέργειας μέσω αποτέφρωσης. Εάν καμία από αυτές τις επιλογές δεν είναι εφαρμόσιμη, τα πτερύγια καταλήγουν ως απόβλητα προς διάθεση, συχνά σε χώρους υγειονομικής ταφής. Οι Beauson et al. (2022) προτείνουν την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας με την ανάπτυξη εναλλακτικών τεχνολογιών ανακύκλωσης και τη νομοθετική ρύθμιση της διαχείρισης αποβλήτων, ώστε να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να αυξηθεί η βιωσιμότητα της αιολικής ενέργειας.



Εικόνα 5. Διαδικασία λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση πτερυγίων ανεμογεννητριών στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Πηγή: (Beauson et al., 2022)

Στην Ελλάδα, η διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες βρίσκεται σε αρχικό στάδιο, με περιορισμένες εξειδικευμένες υποδομές και εμπειρία στη διαχείριση των σύνθετων υλικών των πτερυγίων. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί σημαντικές πρωτοβουλίες για τη βελτίωση της κατάστασης. Η ΔΕΗ Ανανεώσιμες, για παράδειγμα, έχει προχωρήσει στην αποξήλωση παλαιών ανεμογεννητριών σε διάφορα νησιά και στην πλήρη ανακύκλωση των περισσότερων υλικών τους, όπως μεταλλικά μέρη, νασέλες και καλώδια. Τα πτερύγια, τα οποία παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη διαχείριση λόγω της σύνθεσής τους, διαχειρίστηκαν μέσω συνεργασιών με ειδικά αδειοδοτημένες εταιρείες. Επιπλέον, αρκετές εταιρείες του αιολικού τομέα, σε συνεργασία με οργανισμούς όπως η ΕΛΕΤΑΕΝ, έχουν αναπτύξει πιλοτικά προγράμματα για την επαναχρησιμοποίηση παροπλισμένων πτερυγίων σε εφαρμογές όπως η δημιουργία επίπλων ή εξοπλισμού αναψυχής (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2022).

Παράλληλα, το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) τονίζει την ανάγκη προώθησης της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης διαχείρισης των αποβλήτων από τεχνολογίες ΑΠΕ, περιλαμβάνοντας τις ανεμογεννήτριες. Στο πλαίσιο αυτό, προβλέπεται η ενίσχυση της έρευνας και η δημιουργία υποδομών που θα επιτρέψουν την ανάκτηση χρήσιμων υλικών και τη μείωση του όγκου των αποβλήτων. Παρά τις προσπάθειες αυτές, η απουσία συστηματικών πολιτικών, το

υψηλό κόστος ανακύκλωσης και η έλλειψη εξειδικευμένων κέντρων επεξεργασίας αποτελούν ακόμη σημαντικά εμπόδια. Η Ελλάδα, λόγω της υψηλής απόδοσης των χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών της πάρκων (Παπασταματίου, 2023), θα χρειαστεί σύντομα να επενδύσει πιο συστηματικά στη διαχείριση των αποβλήτων του κλάδου, ώστε να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα της αιολικής ενέργειας.

3.4. Ανακύκλωση Πτερυγίων Ανεμογεννητριών

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παγκοσμίως, συνεισφέροντας σημαντικά στη μείωση των εκπομπών άνθρακα και στην ενεργειακή μετάβαση. Ωστόσο, η διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες –ιδιαίτερα των πτερυγίων τους– αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο κλάδος. Τα πτερύγια ανεμογεννητριών είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά, όπως πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού ή άνθρακα, γεγονός που καθιστά την ανακύκλωσή τους ιδιαίτερα δύσκολη και δαπανηρή. Καθώς η πρώτη γενιά ανεμογεννητριών φτάνει στο τέλος του κύκλου ζωής της, οι περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις της απόρριψης των πτερυγίων γίνονται ολοένα και πιο εμφανείς.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι διάθεσης, όπως η υγειονομική ταφή και η αποτέφρωση, δημιουργούν σοβαρά ζητήματα βιωσιμότητας, ενώ οι υφιστάμενες τεχνικές ανακύκλωσης δεν είναι ακόμη πλήρως αποδοτικές. Ως αποτέλεσμα, η ερευνητική κοινότητα και η βιομηχανία επιδιώκουν να αναπτύξουν καινοτόμες λύσεις που θα επιτρέψουν τη βιώσιμη διαχείριση αυτών των αποβλήτων, είτε μέσω της επαναχρησιμοποίησης, είτε μέσω της ανάκτησης πολύτιμων υλικών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται πρόσφατες επιστημονικές μελέτες που διερευνούν τεχνολογικές και στρατηγικές προσεγγίσεις για την ανακύκλωση των πτερυγίων ανεμογεννητριών. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι προκλήσεις που σχετίζονται με τη σύνθεση των υλικών τους, οι μέθοδοι ανακύκλωσης και οι δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Castaldo et al. (2019), η διαχείριση των αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών αποτελεί σημαντική πρόκληση λόγω της σύνθετης φύσης των υλικών που χρησιμοποιούνται. Τα πτερύγια κατασκευάζονται κυρίως από πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP), γεγονός που καθιστά την

ανακύκλωσή τους δύσκολη. Η μελέτη ανέλυσε διάφορες κατηγορίες αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων και των αποβλήτων ανεμογεννητριών, χρησιμοποιώντας προηγμένες μεθόδους χαρακτηρισμού, όπως φασματοσκοπία FTIR, μικροσκοπία SEM-EDX και θερμοβαρυμετρική ανάλυση TG-FTIR. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι τα πτερύγια περιέχουν ακαθαρσίες και προσμείξεις που μπορούν να παρεμποδίσουν τη διαδικασία ανακύκλωσης. Για παράδειγμα, ανιχνεύθηκαν υπολείμματα μετάλλων όπως το ασβέστιο, το πυρίτιο και ο σίδηρος, τα οποία προέρχονται είτε από την κατασκευή είτε από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Επιπλέον, η θερμική ανάλυση αποκάλυψε ότι η πυρόλυση των GFRP υλικών παράγει αέρια όπως CO και CO₂, γεγονός που μπορεί να έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Οι Castaldo et al. (2019) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι υπάρχουσες τεχνολογίες ανακύκλωσης, όπως η μηχανική άλεση και η θερμική επεξεργασία, δεν είναι επαρκείς για την αποτελεσματική αξιοποίηση των αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών. Αντίθετα, απαιτούνται καινοτόμες προσεγγίσεις, όπως η χρήση των υλικών αυτών σε σύνθετα πολυμερή ή η ανάπτυξη νέων χημικών μεθόδων για την ανάκτηση ινών.

Η μελέτη των Pławecka et al. (2021) εξετάζει τη δυνατότητα αξιοποίησης ανακυκλωμένων πτερυγίων ανεμογεννητριών ως πληρωτικό υλικό σε γεωπολυμερή σύνθετα. Στόχος της έρευνας ήταν να διερευνηθεί αν τα αλεσμένα απόβλητα πτερυγίων μπορούν να ενσωματωθούν σε γεωπολυμερή χωρίς να μειώνεται σημαντικά η μηχανική τους αντοχή. Στην έρευνα χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές κλάσεις αποβλήτων από πτερύγια, οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως προς τη μορφολογία και τη χημική τους σύνθεση με τη βοήθεια SEM και EDS. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν πειράματα αντοχής σε θλίψη και κάμψη, καθώς και μετρήσεις απορροφητικότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη 5%-15% αλεσμένων αποβλήτων δεν επηρέασε σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των γεωπολυμερών. Αντίθετα, η προσθήκη 30% πληρωτικού είχε αρνητικό αντίκτυπο στη δομή του σύνθετου, αυξάνοντας την πορώδη φύση του.

Σύμφωνα με τους Pławecka et al. (2021) η χρήση των αποβλήτων από πτερύγια στις γεωπολυμερείς μήτρες μπορεί να συμβάλει στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας. Παρά το γεγονός ότι η προσθήκη αυτών των υλικών μπορεί να μειώσει ελαφρώς τις μηχανικές ιδιότητες, η

έρευνα καταλήγει στο ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές χαμηλών φορτίων, όπως πλακίδια και οικοδομικά υλικά.

Σύμφωνα με τη μελέτη του Mishnaevsky (2021), η διαχείριση των αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα βιωσιμότητας της αιολικής ενέργειας. Επί του παρόντος, υπολογίζεται ότι έως το 2050 θα έχουν παραχθεί 43 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων πτερυγίων παγκοσμίως, εκ των οποίων το 25% στην Ευρώπη. Επιπλέον, εκτιμάται ότι κάθε μεγαβάτ εγκατεστημένης ισχύος αντιστοιχεί σε 9,57 έως 15 τόνους αποβλήτων σύνθετων υλικών.

Οι Mishnaevsky (2021) παρουσιάζουν τις τρέχουσες στρατηγικές διαχείρισης, οι οποίες περιλαμβάνουν την υγειονομική ταφή, την αποτέφρωση, την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις "αντιδραστικές" στρατηγικές, που στοχεύουν στη διαχείριση των ήδη εγκατεστημένων ανεμογεννητριών, καθώς και στις "προδραστικές" στρατηγικές, οι οποίες αφορούν την ανάπτυξη νέων, ανακυκλώσιμων υλικών, όπως θερμοπλαστικές μήτρες, φυσικά σύνθετα (ξύλο, μπαμπού) και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή με δυνατότητα ανακύκλωσης. Η Εικόνα 6 παρουσιάζει παραδείγματα δημιουργικής επαναχρησιμοποίησης πτερυγίων ανεμογεννητριών, μετατρέποντάς τα σε στοιχεία αστικού σχεδιασμού. Στην πρώτη φωτογραφία, τα πτερύγια χρησιμοποιούνται ως σκίαστρα σε δημόσιο χώρο, ενώ στη δεύτερη έχουν ενσωματωθεί σε παιδική χαρά, αποδεικνύοντας την πρακτική εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας στην αιολική ενέργεια.

Οι Mishnaevsky (2021) υποστηρίζουν ότι η υγειονομική ταφή και η αποτέφρωση εξακολουθούν να αποτελούν τις κυρίαρχες μεθόδους διάθεσης, ιδίως στις ΗΠΑ, όπου 3800 πτερύγια απορρίπτονται κάθε χρόνο. Ωστόσο, στην Ευρώπη οι κανονισμοί γίνονται ολοένα και πιο αυστηροί, προωθώντας την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση. Η ανακύκλωση μέσω πυρόλυσης ή υγρής διάλυσης (solvolysis) επιτρέπει την ανάκτηση ινών υάλου και άνθρακα, όμως οι μέθοδοι αυτές βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Τέλος, η μελέτη υπογραμμίζει την ανάγκη για βελτιωμένη συντήρηση και επισκευή των πτερυγίων, καθώς η επιμήκυνση του χρόνου ζωής τους μπορεί να μειώσει σημαντικά τον όγκο των αποβλήτων. Παρότι έχουν αναπτυχθεί αυτο-επουλωτικά πολυμερή και τεχνολογίες

αποκατάστασης επιφανειών, οι περισσότερες από αυτές βρίσκονται σε χαμηλό τεχνολογικό επίπεδο ετοιμότητας.



(a)



Εικόνα 6. Επαναχρησιμοποίηση πτερυγίων ανεμογεννητριών σε αρχιτεκτονικές και αστικές εφαρμογές.. Πηγή: (Mishnaevsky et al., 2021)

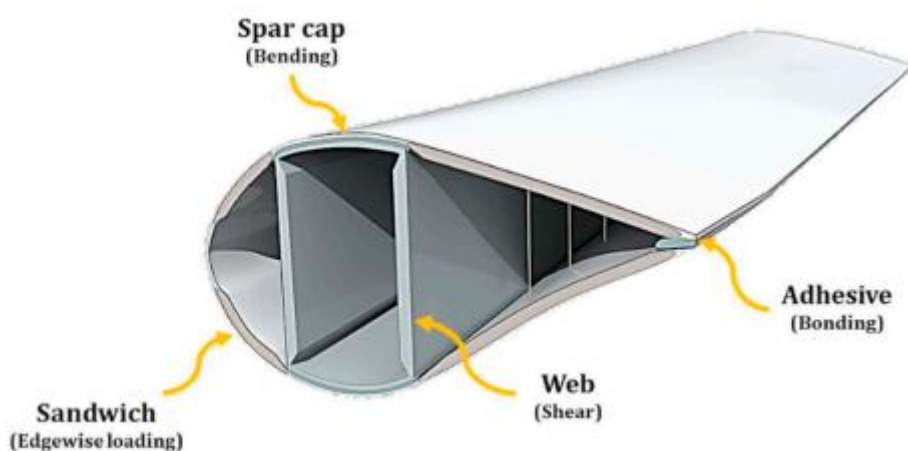
Σύμφωνα με τη μελέτη των Sorte et al. (2023), η ραγδαία ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των αποβλήτων πτερυγίων ανεμογεννητριών, δημιουργώντας προκλήσεις ως προς την ανακύκλωσή τους λόγω των σύνθετων υλικών κατασκευής τους. Οι συγγραφείς αξιολογούν διάφορες τεχνικές

ανακύκλωσης, συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών, θερμικών και χημικών μεθόδων, με στόχο τον προσδιορισμό της πιο αποτελεσματικής προσέγγισης. Η μελέτη παρουσιάζει μια συστηματική ανασκόπηση των διαθέσιμων διαδικασιών ανακύκλωσης πτερυγίων ανεμογεννητριών, εξετάζοντας την οικονομική, τεχνική και περιβαλλοντική τους απόδοση. Μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών, η πυρόλυση με μικροκύματα αναδεικνύεται ως η πιο υποσχόμενη μέθοδος για την ανακύκλωση μεγάλων ποσοτήτων πτερυγίων, παρότι παρουσιάζει προκλήσεις και αβεβαιότητες ως προς τη βιομηχανική της εφαρμογή. Ωστόσο, η βέλτιστη τεχνική ανακύκλωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η σύνθεση του πτερυγίου, η επιθυμητή περιβαλλοντική επίδραση και η οικονομική βιωσιμότητα της διαδικασίας.

Από την ανάλυση των τεχνικών, η μηχανική ανακύκλωση φαίνεται να είναι πιο ενεργειακά αποδοτική, ενώ η ανακύκλωση μέσω ρευστοποιημένης κλίνης εμφανίζει χαμηλότερη πρωτογενή ενεργειακή απαίτηση, μικρότερο δυναμικό συμβολής στην υπερθέρμανση του πλανήτη και μειωμένη κατανάλωση ισχύος. Επιπλέον, η μελέτη παρέχει αριθμητικά δεδομένα σχετικά με τη διανομή των αποβλήτων πτερυγίων ανά περιοχή. Εκτιμάται ότι έως το 2050 η συνολική ποσότητα αποβλήτων θα αγγίξει τους 43 εκατομμύρια τόνους, με την Κίνα να ευθύνεται για το 40%, την Ευρώπη για το 25% και τις ΗΠΑ για το 16% (Sorte et al., 2023).

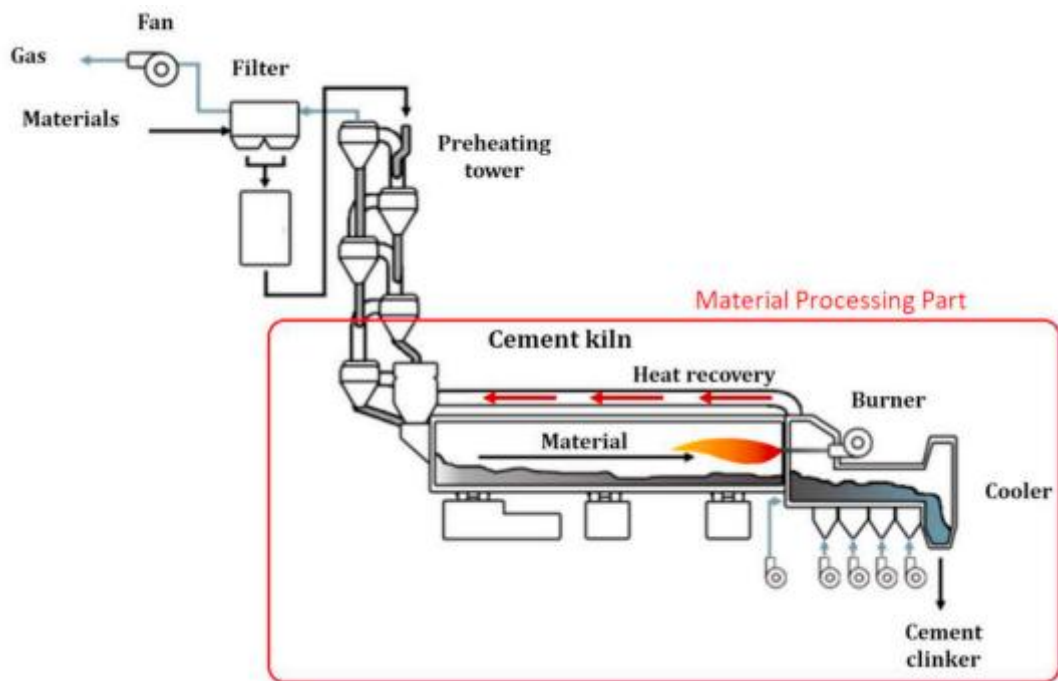
Στη μελέτη των Fonte και Xydis (2021), αναλύεται η τρέχουσα κατάσταση και οι μελλοντικές προοπτικές στη διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες, με έμφαση στη σύνδεση της ανακύκλωσης με την κυκλική οικονομία. Οι συγγραφείς αναδεικνύουν ότι η αυξανόμενη αποδοχή της αιολικής ενέργειας έχει οδηγήσει σε σημαντική συσσώρευση αποβλήτων, με εκτιμήσεις που δείχνουν ότι έως το 2050 θα προκύψουν περισσότερα από 2,5 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων από πτερύγια παγκοσμίως. Η έρευνα προτείνει ότι η κυκλική οικονομία μπορεί να αποτελέσει βασικό εργαλείο στη διαχείριση αυτών των αποβλήτων, προωθώντας λύσεις όπως η επαναχρησιμοποίηση υλικών, η ανάπτυξη βιοαποικοδομήσιμων συνθέσεων και η αξιοποίηση ανακυκλωμένων ινών για νέες εφαρμογές. Παρουσιάζονται επίσης δεδομένα που δείχνουν ότι η ενσωμάτωση ανακυκλωμένων ινών άνθρακα σε νέες κατασκευές μπορεί να μειώσει το κόστος παραγωγής έως και 30% και να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά 40%.

Η χρήση προηγμένων τεχνολογιών ανακύκλωσης, όπως η αποδόμηση πολυμερών με ενζυματικές διεργασίες, προσφέρει νέες δυνατότητες στη βιώσιμη διαχείριση των πτερυγίων ανεμογεννητριών. Η έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η επιτυχής εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας μπορεί να οδηγήσει σε ένα νέο μοντέλο διαχείρισης αποβλήτων, ελαχιστοποιώντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της αιολικής ενέργειας και δημιουργώντας νέες ευκαιρίες για την επαναχρησιμοποίηση των ανακυκλωμένων υλικών (Fonte & Xydis, 2021). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, τα πτερύγια ανεμογεννητριών είναι σύνθετες κατασκευές που αποτελούνται από διάφορα δομικά στοιχεία, καθένα από τα οποία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μηχανική αντοχή τους. Ο κεντρικός πυρήνας αποτελείται από ένα σύστημα δοκών και διαφραγμάτων (web), που διαχειρίζονται τις διατμητικές δυνάμεις, ενώ τα εξωτερικά στρώματα είναι σχεδιασμένα για να αντέχουν σε καμπτικές καταπονήσεις. Η χρήση συγκολλητικών υλικών εξασφαλίζει τη συνοχή της δομής, ενώ οι πολυμερικές και ινώδεις συνθέσεις προσφέρουν ανθεκτικότητα και μειωμένο βάρος.



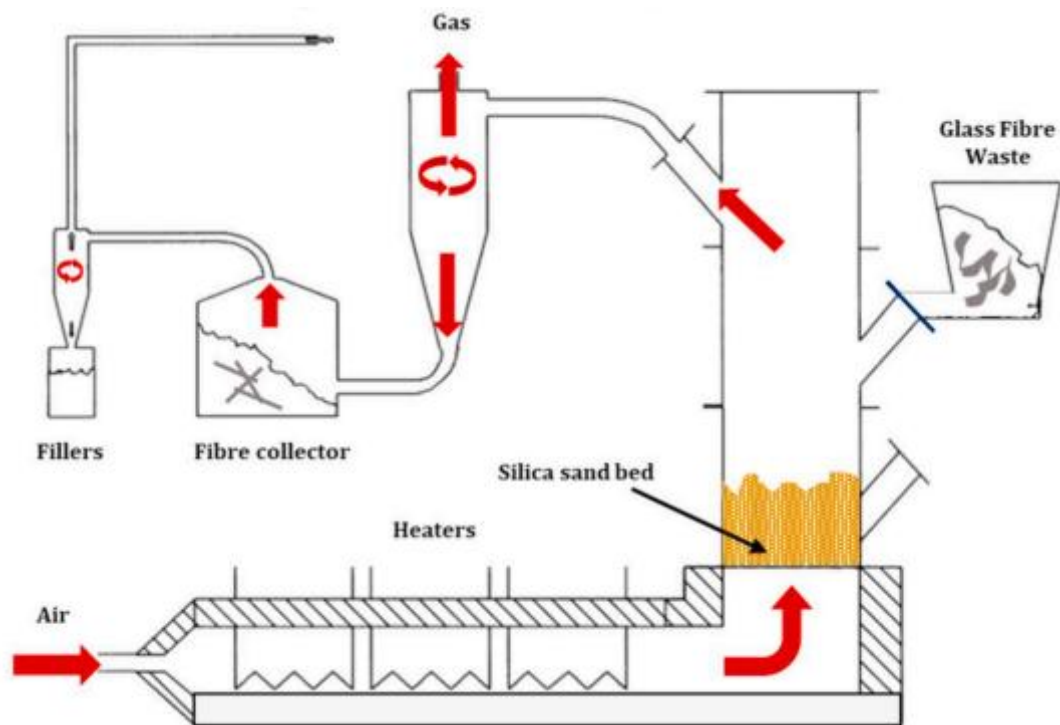
Εικόνα 7. Δομή πτερυγίου ανεμογεννήτριας. Πηγή: (Fonte & Xydis, 2021)

Στην Εικόνα 8, η μέθοδος της συμπαραγωγής (co-processing) σε τσιμεντοκλίβανο αξιοποιείται για την ενεργειακή ανάκτηση και την επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων πτερυγίων ανεμογεννητριών. Τα υλικά, αφού υποστούν προθέρμανση, εισέρχονται στον κλίβανο όπου υπό υψηλές θερμοκρασίες υφίστανται χημικές και φυσικές μεταβολές. Η διαδικασία επιτρέπει την ανάκτηση ενέργειας από τα σύνθετα υλικά και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην παραγωγή τσιμέντου (Fonte & Xydis, 2021).



Εικόνα 8. Διεργασία συμπαραγωγής σε τσιμεντοκλίβανο. Πηγή: (Fonte & Xydis, 2021)

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η κυκλωνική διαδικασία διαχωρισμού αποτελεί μια τεχνολογική λύση για την ανακύκλωση των ινών γυαλιού από περύγια ανεμογεννητριών. Τα απόβλητα ινών εισέρχονται στο σύστημα, όπου μέσω θερμικής και μηχανικής επεξεργασίας διαχωρίζονται τα διαφορετικά συστατικά. Η παρουσία ενός στρώματος διοξειδίου του πυριτίου (silica sand bed) διευκολύνει τη διαδικασία ανάκτησης, ενώ οι κυκλωνικές ροές διαχωρίζουν τις ελαφρύτερες ίνες από τα υπόλοιπα υλικά (Fonte & Xydis, 2021).



Εικόνα 9. Διαδικασία κυκλωνικής διαχωριστικής ανακύκλωσης. Πηγή: (Fonte & Xydis, 2021)

Τέλος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10, η διαδικασία της πυρόλυσης αποτελεί μια μέθοδο θερμικής επεξεργασίας που επιτρέπει την αποδόμηση των πολυμερών υλικών και την ανάκτηση ινών από πτερύγια ανεμογεννητριών. Στην αριστερή εικόνα, το πτερύγιο διατηρεί την αρχική του δομή, ενώ στη δεξιά, μετά από θερμική κατεργασία, παρατηρείται η αποδόμηση του πολυμερούς και η αποκάλυψη του ενισχυτικού πλέγματος. Η μέθοδος αυτή είναι πολλά υποσχόμενη για τη μείωση των αποβλήτων και την αξιοποίηση των ανακυκλώσιμων υλικών.



Εικόνα 10. Πτερυγίου ανεμογεννήτριας πριν και μετά από πυρόλυση. Πηγή: (Grove-Nielsen, 2004)

3.5. Κυκλική Οικονομία και Επαναχρησιμοποίηση Υλικών

Η κυκλική οικονομία αποτελεί έναν από τους βασικούς άξονες της σύγχρονης βιώσιμης ανάπτυξης, επιδιώκοντας τη μείωση των αποβλήτων και την παράταση του κύκλου ζωής των υλικών. Στον τομέα της αιολικής ενέργειας, η ταχεία αύξηση της εγκατάστασης ανεμογεννητριών έχει δημιουργήσει την ανάγκη εύρεσης βιώσιμων λύσεων για τη διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από την απόσυρσή τους. Τα πτερύγια ανεμογεννητριών, λόγω της σύνθετης κατασκευής τους από πολυμερή ενισχυμένα με ίνες υάλου και άνθρακα, αποτελούν μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στον τομέα της ανακύκλωσης.

Η επαναχρησιμοποίηση των υλικών των ανεμογεννητριών σε νέες εφαρμογές αποτελεί μια στρατηγική που ενισχύει τη βιωσιμότητα του κλάδου. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα παροπλισμένα πτερύγια μπορούν να αξιοποιηθούν σε αστικές κατασκευές, στη βιομηχανία των δομικών υλικών και σε νέα σύνθετα πολυμερή, προσφέροντας οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη (Psomopoulos et al., 2019; Karavida & Peponi, 2023). Παράλληλα, τεχνολογικές εξελίξεις στη μηχανική, θερμική και χημική ανακύκλωση συμβάλλουν στη βελτίωση της ανάκτησης χρήσιμων υλικών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μελέτες σχετικά με την κυκλική οικονομία στον τομέα της αιολικής ενέργειας, εστιάζοντας σε καινοτόμες μεθόδους επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των αποβλήτων πτερυγίων ανεμογεννητριών. Οι μελέτες που ακολουθούν αναλύουν τόσο τις προκλήσεις όσο και τις προοπτικές της βιώσιμης διαχείρισης αυτών των υλικών, προτείνοντας λύσεις που ενισχύουν τη μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο και ανθεκτικό ενεργειακό σύστημα.

Η μελέτη των Karavida και Peponi (2023) εισάγει ένα καινοτόμο εννοιολογικό πλαίσιο για την επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών στο πλαίσιο της αστικής αναγέννησης. Η βασική ιδέα της έρευνας είναι ότι τα παροπλισμένα πτερύγια μπορούν να ενσωματωθούν σε αρχιτεκτονικές κατασκευές, όπως αστικά καταφύγια, γέφυρες και δημόσια έπιπλα, προωθώντας τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Στη μελέτη αναλύθηκαν διαφορετικές τεχνικές ανακύκλωσης, συμπεριλαμβανομένων των μεθόδων πυρόλυσης, μηχανικής επεξεργασίας και χημικής αποικοδόμησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, ενώ η ανακύκλωση των πτερυγίων παραμένει δαπανηρή, η επαναχρησιμοποίησή τους σε αστικές δομές

μπορεί να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και να ενισχύσει την ανθεκτικότητα των πόλεων. Όπως φαίνεται στις Εικόνες που ακολουθούν, η ενσωμάτωση των πτερυγίων σε αρχιτεκτονικά έργα όχι μόνο μειώνει τα απόβλητα αλλά δημιουργεί και νέες κοινωνικές και οικονομικές ευκαιρίες. Η έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η επαναχρησιμοποίηση των υλικών ανεμογεννητριών μπορεί να αποτελέσει μια εναλλακτική λύση στη χωματερή, ενισχύοντας την κυκλική οικονομία και τη βιώσιμη ανάπτυξη (Karavida & Peroni, 2023).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 11, η αξιοποίηση παροπλισμένων πτερυγίων ανεμογεννητριών μπορεί να συμβάλει στην κατασκευή βιώσιμων υποδομών, όπως πεζογέφυρες. Στην αριστερή εικόνα παρουσιάζεται η υπάρχουσα κατάσταση μιας γέφυρας σε φυσικό περιβάλλον, ενώ στη δεξιά εικόνα προτείνεται ένα καινοτόμο σχέδιο αντικατάστασής της με μια νέα κατασκευή που ενσωματώνει πτερύγια ανεμογεννητριών ως κύρια δομικά στοιχεία. Η προσέγγιση αυτή όχι μόνο επεκτείνει τη διάρκεια ζωής των σύνθετων υλικών αλλά και μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής νέων κατασκευαστικών υλικών (Leahy et al., 2021).



Εικόνα 11. Επαναχρησιμοποίηση πτερυγίων ανεμογεννητριών για τη δημιουργία πεζογέφυρας. Πηγή: (Leahy et al., 2021)

Στην Εικόνα 12, η επαναχρησιμοποίηση πτερυγίων ανεμογεννητριών μπορεί να βρει εφαρμογή σε αστικές υποδομές, όπως χώρους στάθμευσης ποδηλάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στέγαστρο ποδηλάτων στη Δανία, το οποίο έχει κατασκευαστεί από ένα μεταχειρισμένο πτερύγιο ανεμογεννήτριας. Η πρωτοποριακή αυτή χρήση προωθεί τη βιώσιμη αρχιτεκτονική, μειώνοντας τα απόβλητα και συμβάλλοντας στην αστική αισθητική. Το εργονομικό σχήμα του πτερυγίου προσφέρει φυσική προστασία

από τις καιρικές συνθήκες, ενώ η κατασκευή του αξιοποιεί στο έπακρο την αντοχή και την αεροδυναμική σχεδίαση των υλικών (Krauklis et al., 2021).



Εικόνα 12. Στέγαστρο στάθμευσης ποδηλάτων από πτερύγιο ανεμογεννήτριας. Πηγή: (Krauklis et al., 2021).

Άλλη μια προσέγγιση όπου τα πτερύγια ανεμογεννητριών μπορούν να αξιοποιηθούν ως βασικά φέροντα στοιχεία στη δημιουργία πεζογεφυρών φαίνεται στην Εικόνα 13. Στην αριστερή εικόνα, ένα παροπλισμένο πτερύγιο χρησιμοποιείται ως κεντρική υποστήριξη μιας ξύλινης πεζογέφυρας, ενώ στη δεξιά εικόνα τα πτερύγια ενσωματώνονται σε μια αντηριδωτή γέφυρα, όπου λειτουργούν ως κατακόρυφα στηρίγματα. Οι εφαρμογές αυτές αναδεικνύουν τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης των σύνθετων υλικών, παρέχοντας ανθεκτικές, οικονομικές και περιβαλλοντικά βιώσιμες λύσεις για τις υποδομές των πόλεων και των φυσικών τοπίων.



Εικόνα 13. Πτερύγια ανεμογεννητριών ως φέρουσες κατασκευές πεζογεφυρών. Πηγή: (Karavida & Peroni, 2023)

Η μελέτη των Psomopoulos et al. (2019) επικεντρώνεται στις δυνατότητες ανάκτησης υλικών από απόβλητα πτερυγίων ανεμογεννητριών, προκειμένου να ενισχυθεί η κυκλική οικονομία στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια ανεμογεννητριών προσφέρουν υψηλή αντοχή και χαμηλό βάρος, όμως η ανακύκλωσή τους είναι περιορισμένη λόγω της σύνθετης φύσης τους. Σύμφωνα με τους Psomopoulos et al. (2019) η ζήτηση για σύνθετα υλικά αυξάνεται σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς, με τον τομέα της αιολικής ενέργειας να αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσοστό. Σημαντική είναι η συμβολή της κυκλικής οικονομίας, καθώς υπολογίζεται ότι το 30% της ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ έως το 2030 θα προέρχεται από αιολικά πάρκα, με επενδύσεις ύψους 239 δισεκατομμυρίων ευρώ.

Η μελέτη των Psomopoulos et al. (2019) εξετάζει διάφορες μεθόδους διαχείρισης των αποβλήτων, δίνοντας έμφαση στην ανάγκη για ανάπτυξη αγορών ανακυκλωμένων σύνθετων υλικών. Επισημαίνεται ότι τα μέταλλα των ανεμογεννητριών ανακυκλώνονται ήδη σε υψηλά ποσοστά, όμως τα σύνθετα υλικά των πτερυγίων παρουσιάζουν προκλήσεις λόγω της δομικής ακεραιότητάς τους. Οι μέθοδοι που εξετάζονται περιλαμβάνουν μηχανική, θερμική και χημική ανακύκλωση. Η μηχανική ανακύκλωση περιλαμβάνει την κοπή και τη θραύση των πτερυγίων σε μικρότερα κομμάτια, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δομικά υλικά, όπως το σκυρόδεμα. Η πυρόλυση και η αποτέφρωση επιτρέπουν την ανάκτηση ινών υάλου και άνθρακα, αν και η ποιότητα των παραγόμενων υλικών μειώνεται σημαντικά. Η

χημική ανακύκλωση, μέσω της διαδικασίας solvolysis, μπορεί να οδηγήσει στην ανάκτηση υψηλής ποιότητας ινών, όμως απαιτεί περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Andersen et al. (2016), η διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες πρέπει να εξεταστεί στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, προκειμένου να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να ενισχυθεί η βιωσιμότητα της αιολικής ενέργειας. Οι συγγραφείς προτείνουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανακύκλωσης που θα εστιάζει τόσο στην ανάκτηση υλικών όσο και στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών επαναχρησιμοποίησης. Η μελέτη αναλύει τη σύνθεση των αποβλήτων που παράγονται από την αποσυναρμολόγηση ανεμογεννητριών και καταγράφει ότι τα πτερύγια και τα σύνθετα πολυμερή υλικά αποτελούν τη μεγαλύτερη πρόκληση για την ανακύκλωση, λόγω της δομής τους. Τα δεδομένα δείχνουν ότι το 85% του συνολικού βάρους μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να ανακυκλωθεί, με εξαίρεση τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά των πτερυγίων, που παραμένουν δύσκολα στην επεξεργασία.

Οι Andersen et al. (2016) εξετάζουν διαφορετικές μεθόδους ανακύκλωσης και διαπιστώνει ότι οι πιο αποτελεσματικές προσεγγίσεις είναι οι μηχανικές και θερμοχημικές μέθοδοι, οι οποίες επιτρέπουν την ανάκτηση υαλονημάτων και άλλων χρήσιμων υλικών. Η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας αποβλήτων ανεμογεννητριών, αποδεικνύει ότι η χημική αποικοδόμηση των σύνθετων υλικών μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO₂ κατά 40% σε σύγκριση με την υγειονομική ταφή. Οι Andersen et al. (2016), προτείνουν επίσης οικονομικά κίνητρα για την υιοθέτηση πιο βιώσιμων πρακτικών ανακύκλωσης, καθώς και την ανάγκη για νομοθετικές ρυθμίσεις που θα υποχρεώνουν τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών να ενσωματώνουν ανακυκλώσιμα υλικά στα νέα μοντέλα. Οι Andersen et al. (2016) καταλήγουν ότι η κυκλική οικονομία μπορεί να αποτελέσει τον κύριο μηχανισμό μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη μαζική ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, συμβάλλοντας στην αειφορία του τομέα.

Η μελέτη των Jensen & Skelton (2018) εστιάζει στην ανακύκλωση των πτερυγίων ανεμογεννητριών και στις προκλήσεις που σχετίζονται με τα σύνθετα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένα. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι ενώ τα περισσότερα μέρη των ανεμογεννητριών, όπως οι βάσεις και οι πύργοι, είναι ήδη ανακυκλώσιμα, τα πτερύγια εξακολουθούν να αποτελούν σημαντική πρόκληση λόγω της σύνθετης

κατασκευής τους από πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP). Οι Jensen & Skelton (2018) παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του δανικού προγράμματος GENVIND, το οποίο είχε ως στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων για την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση των πτερυγίων. Οι εφαρμογές που μελετήθηκαν περιλάμβαναν τη χρήση των ανακυκλωμένων υλικών σε αρχιτεκτονικές κατασκευές, καταναλωτικά αγαθά και βιομηχανικά υλικά πληρώσεως. Ένας από τους βασικούς άξονες της έρευνας ήταν η ενσωμάτωση της ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών σε ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας, όπως φαίνεται και στο προσαρμοσμένο διάγραμμα της Ellen MacArthur. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι μέθοδοι επεξεργασίας των πτερυγίων περιλάμβαναν την επαναχρησιμοποίηση, την ανακατασκευή και την πλήρη ανακύκλωση μέσω μηχανικών και θερμικών διαδικασιών. Σημαντικές προκλήσεις περιλαμβάνουν το υψηλό κόστος ανακύκλωσης και την απουσία μιας ισχυρής αγοράς για τα ανακυκλωμένα υλικά. Οι συγγραφείς προτείνουν ότι η μετάβαση από την ευθύνη του παραγωγού στην ευθύνη της βιομηχανίας μπορεί να επιτρέψει τη δημιουργία πιο βιώσιμων λύσεων για τη διαχείριση των αποβλήτων των ανεμογεννητριών (Jensen & Skelton, 2018).

Η μελέτη των Karavida & Nõmmik (2015) εστιάζει στη διαχείριση των ανεμογεννητριών που φτάνουν στο τέλος της ζωής τους και στη δυνατότητα εφαρμογής μοντέλων κυκλικής οικονομίας για τη βιώσιμη αξιοποίησή τους. Η εργασία παρουσιάζει το ζήτημα της ανεπάρκειας φυσικών πόρων και την ανάγκη ανάπτυξης στρατηγικών επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης. Με βάση δεδομένα από ευρωπαϊκές και διεθνείς πηγές, αναλύει τον κύκλο ζωής των ανεμογεννητριών, ο οποίος διαρκεί 20-30 χρόνια. Μετά τη λήξη της λειτουργίας τους, οι τουρμπίνες είτε επανεπεξεργάζονται (repowering), είτε αποσυναρμολογούνται. Η μελέτη προτείνει κατευθυντήριες οδηγίες ανακύκλωσης, με έμφαση στη διαχείριση χαλύβδινων εξαρτημάτων, ινών υάλου, ηλεκτρονικών συστημάτων και σπανίων γαιών.

Σύμφωνα με τους Karavida & Nõmmik (2015), τα περισσότερα μεταλλικά στοιχεία ανακυκλώνονται εύκολα, ενώ οι σύνθετες ίνες παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες προκλήσεις. Επιπλέον, διερευνούν την έννοια της βιομηχανικής συμβίωσης, όπου τα απόβλητα μιας βιομηχανίας μπορούν να αξιοποιηθούν ως πρώτη ύλη για άλλη. Ένα επιτυχημένο παράδειγμα είναι η χρήση των πτερύγων ανεμογεννητριών ως πρόσθετο σε τσιμεντοειδή μίγματα, προσφέροντας μηχανικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Οι

Karavida & Nõmmik (2015) καταλήγουν ότι η εφαρμογή στρατηγικών κυκλικής οικονομίας, σε συνδυασμό με την προώθηση κανονιστικών ρυθμίσεων και φορολογικών κινήτρων, μπορεί να ενισχύσει τη βιωσιμότητα της διαχείρισης των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες.

3.6. Τεχνολογίες και Καινοτόμες Προσεγγίσεις στην Ανακύκλωση

Η διαχείριση των πτερυγίων ανεμογεννητριών που φτάνουν στο τέλος της ζωής τους αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Τα πτερύγια κατασκευάζονται κυρίως από θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά, όπως ίνες υάλου (GFRP) και ανθρακονήματα (CFRP), τα οποία διαθέτουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, αλλά είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ανακυκλωθούν. Μέχρι το 2050, εκτιμάται ότι πάνω από 40 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων πτερυγίων θα έχουν παραχθεί παγκοσμίως, καθιστώντας αναγκαία την ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα έχει επικεντρωθεί σε μια σειρά καινοτόμων τεχνικών ανακύκλωσης, οι οποίες περιλαμβάνουν τη μηχανική, τη θερμική και τη χημική ανακύκλωση. Η μηχανική ανακύκλωση περιλαμβάνει τον τεμαχισμό των πτερυγίων και την ενσωμάτωση των υλικών αυτών σε νέα σύνθετα πολυμερή ή δομικά προϊόντα, όπως τσιμεντοειδή μίγματα. Η θερμική ανακύκλωση, μέσω διαδικασιών όπως η πυρόλυση, επιτρέπει την ανάκτηση ανθρακονημάτων και άλλων ινωδών ενισχυτικών υλικών, αν και συχνά με μείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Παράλληλα, η χημική ανακύκλωση, η οποία χρησιμοποιεί διαλύτες ή υδρόλυση, στοχεύει στην ανάκτηση ινών υψηλής ποιότητας, αλλά εξακολουθεί να είναι μια δαπανηρή και ενεργοβόρα διαδικασία.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Jasińska & Dutkiewicz (2025), η διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τα πτερύγια ανεμογεννητριών αποτελεί μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές προκλήσεις του τομέα της αιολικής ενέργειας. Τα πτερύγια, κατασκευασμένα κυρίως από θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά, υαλονήματα και ανθρακονήματα, είναι δύσκολο να ανακυκλωθούν λόγω της πολυπλοκότητας της δομής τους. Η μελέτη παρουσιάζει ότι η συνολική ποσότητα αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών αναμένεται να ξεπεράσει 40 εκατομμύρια τόνους μέχρι το 2050, με τις μεγαλύτερες ποσότητες να συσσωρεύονται στη Γερμανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Τα ετήσια απόβλητα εκτιμάται ότι θα φτάσουν 400.000 τόνους έως το 2030 και 800.000 τόνους ετησίως

μέχρι το 2050. Οι Jasińska & Dutkiewicz (2025) αναλύουν τις διαθέσιμες μεθόδους διαχείρισης, εστιάζοντας στη μηχανική, θερμική και χημική ανακύκλωση. Η μηχανική ανακύκλωση περιλαμβάνει τη σύνθλιψη των πτερυγίων και τη χρήση των τεμαχισμένων υλικών σε κατασκευαστικά υλικά, όπως τσιμεντοειδή σύνθετα. Σύμφωνα με την έρευνά τους, η προσθήκη θρυμματισμένων ινών από πτερύγια ανεμογεννητριών σε τσιμεντοειδή μίγματα μπορεί να βελτιώσει τη μηχανική αντοχή και τη βιωσιμότητα των υλικών κατασκευής. Η προσθήκη των τεμαχισμένων ινών σε ποσοστό μέχρι 20% βελτιώνει τη συνοχή και την αντοχή του σκυροδέματος, ενώ η χρήση των πτερυγίων ως αδρανές υλικό σε συνθετικά μίγματα μπορεί να μειώσει την ανάγκη για πρωτογενή υλικά. Οι Jasińska & Dutkiewicz (2025) καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι, αν και η ανακύκλωση των πτερυγίων ανεμογεννητριών βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο, η ενσωμάτωσή τους σε δομικά υλικά αποτελεί μία υποσχόμενη λύση για τη μείωση των αποβλήτων και την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας (Jasińska & Dutkiewicz, 2025).

Η μελέτη των Rani et al. (2021) εξετάζει τις βέλτιστες μεθόδους ανακύκλωσης σύνθετων ινών από ανεμογεννήτριες, δίνοντας έμφαση στην ανάκτηση ανθρακονημάτων (CF) και ινών γυαλού (GF). Οι ίνες αυτές είναι υλικά υψηλής αντοχής, τα οποία όμως παράγονται με υψηλό ενεργειακό κόστος, καθιστώντας την ανακύκλωσή τους κρίσιμη για τη βιωσιμότητα της βιομηχανίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η μελέτη συγκρίνει μηχανικές, θερμικές, χημικές και υβριδικές μεθόδους ανακύκλωσης. Η μηχανική ανακύκλωση περιλαμβάνει τη σύνθλιψη και την άλεση των πτερυγίων, με τα προκύπτοντα υλικά να χρησιμοποιούνται σε τσιμέντο, πολυμερή και συνθετικά υλικά. Ωστόσο, οι ανακυκλωμένες ίνες παρουσιάζουν μείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων, γεγονός που περιορίζει τις εφαρμογές τους. Η θερμική ανακύκλωση περιλαμβάνει διαδικασίες όπως η πυρόλυση και η θερμική αποδόμηση σε ρευστοποιημένη κλίνη.

Η μέθοδος της πυρόλυσης μπορεί να ανακτήσει έως 70% των ινών, αλλά οδηγεί σε μείωση της αντοχής τους κατά 50%. Οι χημικές μέθοδοι, όπως η γλυκόλυση και η υδρόλυση, έχουν τη δυνατότητα ανάκτησης ινών με υψηλότερη μηχανική αντοχή, αλλά απαιτούν υψηλό κόστος και εξειδικευμένο εξοπλισμό. Η μελέτη των Rani et al. (2021) επισημαίνει ότι δεν υπάρχει μία μοναδική βέλτιστη μέθοδος ανακύκλωσης, καθώς κάθε διαδικασία έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ωστόσο, η

συνδυαστική χρήση διαφορετικών τεχνικών, καθώς και η βελτίωση των μηχανικών και χημικών διαδικασιών, μπορεί να οδηγήσει σε πιο βιώσιμες πρακτικές για την ανακύκλωση σύνθετων ινών από ανεμογεννήτριες.

Η μελέτη των Chen et al. (2019) παρέχει μια συνολική επισκόπηση των τεχνικών ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών από τα πτερύγια ανεμογεννητριών και των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης των ανακτημένων υλικών. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, οι υπάρχουσες μέθοδοι ανακύκλωσης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: μηχανική, θερμική και χημική ανακύκλωση. Η μηχανική ανακύκλωση περιλαμβάνει τη θραύση των πτερυγίων σε μικρότερα κομμάτια, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πληρωτικά υλικά σε τσιμέντο ή πολυμερή. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή μειώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των ινών. Από την άλλη, η θερμική ανακύκλωση, η οποία περιλαμβάνει πυρόλυση ή τη χρήση ρευστοποιημένης κλίνης, μπορεί να αποδώσει ίνες με καλύτερη ποιότητα, αλλά με σημαντική ενεργειακή κατανάλωση και πιθανές εκπομπές ρύπων.

Μια από τις πιο προηγμένες τεχνικές που εξετάστηκε από τους Chen et al. (2019) είναι η χημική ανακύκλωση, η οποία χρησιμοποιεί διαλύτες ή υπερκρίσιμα ρευστά για τη διάλυση της πολυμερικής μήτρας και την ανάκτηση των ινών. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα της υψηλής απόδοσης, αλλά παραμένει σε πειραματικό στάδιο. Οι συγγραφείς τονίζουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη μεθόδων που θα επιτρέψουν την εμπορική εφαρμογή της ανακύκλωσης των σύνθετων υλικών των πτερυγίων ανεμογεννητριών.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Korniejenko et al. (2021), η κυκλική οικονομία αποτελεί έναν από τους βασικούς μηχανισμούς διαχείρισης αποβλήτων σύνθετων υλικών, όπως τα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Η εργασία εστιάζει στην ανάλυση των υφιστάμενων τεχνολογιών ανακύκλωσης και στις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι κλάδοι που βασίζονται στη χρήση σύνθετων υλικών, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η μελέτη παρουσιάζει τρία βασικά παραδείγματα εφαρμογής τεχνικών ανακύκλωσης: τα μεταχειρισμένα ελαστικά, τα πτερύγια ανεμογεννητριών και τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις δυσκολίες ανακύκλωσης των σύνθετων πολυμερών υλικών, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή και δυσκολία διαχωρισμού των επιμέρους συστατικών τους. Σύμφωνα με τα στοιχεία της έρευνας, ο κύριος περιορισμός των σημερινών μεθόδων ανακύκλωσης είναι η

απώλεια των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, γεγονός που μειώνει την οικονομική τους αξία και τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης.

Οι Korniejenko et al. (2021) αναλύουν τις διαφορετικές προσεγγίσεις ανακύκλωσης, οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε μηχανικές, θερμικές και χημικές μεθόδους. Οι μηχανικές τεχνικές περιλαμβάνουν τον τεμαχισμό και τη σύνθλιψη των υλικών, ενώ οι θερμικές μέθοδοι, όπως η πυρόλυση και η καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη, στοχεύουν στην ανάκτηση ινών και άλλων δευτερογενών προϊόντων. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Korniejenko et al. (2021) οι θερμικές μέθοδοι οδηγούν σε εκπομπές επικίνδυνων αερίων, γεγονός που τις καθιστά περιβαλλοντικά αμφισβητούμενες. Η συγγραφείς προτείνουν την υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών, όπως η ανάπτυξη βιοδιασπώμενων πολυμερών, τα οποία θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στα πτερύγια ανεμογεννητριών. Παράλληλα, τονίζεται η ανάγκη ανάπτυξης κανονιστικών πλαισίων που θα υποχρεώνουν τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών να σχεδιάζουν τις τουρμπίνες τους με γνώμονα την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των υλικών. Οι Korniejenko et al. (2021) υπογραμμίζουν τη σημασία της διασύνδεσης βιομηχανίας, ακαδημαϊκής έρευνας και κρατικών πολιτικών για την προώθηση της κυκλικής οικονομίας και την επίτευξη βιώσιμων λύσεων στη διαχείριση αποβλήτων ανεμογεννητριών.

Η έρευνα των Sommer & Walther (2021) εξετάζει τις υπάρχουσες και μελλοντικές υποδομές ανακύκλωσης και ανάκτησης αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών στην Ευρώπη, με έμφαση στα υλικά από ίνες γυαλιού (GFRP) και ανθρακονήματα (CFRP). Η μελέτη ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης του κόστους για τον σχεδιασμό μελλοντικών συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων σε επίπεδο EU-28. Η ανάλυση των Sommer & Walther (2021) έδειξε ότι, επί του παρόντος, η κύρια μέθοδος διάθεσης των GFRP είναι η αποτέφρωση σε εργοστάσια τσιμέντου, ενώ τα CFRP δεν έχουν ανεπτυγμένες δευτερογενείς αγορές ανακύκλωσης. Σύμφωνα με τις προβλέψεις, έως το 2050, ο όγκος των αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών θα αυξηθεί δραματικά, καθιστώντας αναγκαία την ανάπτυξη πιο αποδοτικών μεθόδων ανακύκλωσης.

Οι Sommer & Walther (2021) τονίζουν ότι οι κυβερνήσεις της ΕΕ θα πρέπει να παρέχουν κίνητρα για την ανάπτυξη δευτερογενών αγορών ανακυκλωμένων ινών,

καθώς και να εφαρμόσουν ποσοστώσεις ανακύκλωσης που να περιορίζουν τη διάθεση αποβλήτων σε χώρους ταφής. Παράλληλα, προτείνεται η χρηματοδότηση έρευνας για την ανάπτυξη τεχνολογιών που να διατηρούν την αντοχή των ανακυκλωμένων ινών, καθιστώντας τις πιο ελκυστικές για βιομηχανική χρήση (Sommer & Walther, 2021).

Στη μελέτη του Mishnaevsky (2021), αναλύονται οι κυριότερες τεχνολογίες ανακύκλωσης που έχουν αναπτυχθεί για τα πτερύγια ανεμογεννητριών, χωρίζοντάς τις σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: πρωτογενής (επαναχρησιμοποίηση), δευτερογενής (μηχανική ανακύκλωση), τριτογενής (χημική ανακύκλωση) και τεταρτογενής (ενεργειακή ανάκτηση). Η πρωτογενής ανακύκλωση περιλαμβάνει την επαναχρησιμοποίηση των πτερυγίων σε αρχιτεκτονικές και κατασκευαστικές εφαρμογές, όπως καταφύγια και έπιπλα πόλης. Η δευτερογενής μέθοδος βασίζεται στη μηχανική διάσπαση των σύνθετων υλικών και τη μετατροπή τους σε ενισχυτικά υλικά για νέες πολυμερείς κατασκευές. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η δευτερογενής ανακύκλωση μειώνει το ενεργειακό κόστος κατά 40% σε σύγκριση με την παραγωγή νέων σύνθετων υλικών. Στην τριτογενή ανακύκλωση, η μελέτη εξετάζει τη χρήση χημικών διεργασιών, όπως η πυρόλυση και η διάλυση με οργανικούς διαλύτες, για την ανάκτηση ινών υψηλής ποιότητας. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του 80% των ανακτημένων ινών, καθιστώντας την μια βιώσιμη εναλλακτική λύση. Η σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών δείχνει ότι οι διαδικασίες που χρησιμοποιούν μηχανική ανακύκλωση είναι πιο αποδοτικές από την καύση και την υγειονομική ταφή, καθώς παράγουν λιγότερες εκπομπές CO₂. Η μελέτη του Mishnaevsky (2021) καταλήγει ότι οι μελλοντικές έρευνες θα πρέπει να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη βιοδιασπώμενων πολυμερών που να επιτρέπουν την πλήρη κυκλικότητα των πτερυγίων ανεμογεννητριών.

3.7. Θερμική και Χημική Ανακύκλωση των Σύνθετων Υλικών

Η ανακύκλωση των πτερυγίων ανεμογεννητριών αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη βιομηχανία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς τα σύνθετα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται καθιστούν δύσκολη τη διάθεσή τους στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Τα πτερύγια ανεμογεννητριών αποτελούνται κυρίως από θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες υάλου ή άνθρακα, τα οποία έχουν εξαιρετική μηχανική αντοχή αλλά είναι δύσκολο να διαχωριστούν και να

επαναχρησιμοποιηθούν μέσω παραδοσιακών μεθόδων ανακύκλωσης. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, η επιστημονική κοινότητα έχει αναπτύξει καινοτόμες μεθόδους θερμικής και χημικής ανακύκλωσης. Οι θερμικές μέθοδοι, όπως η πυρόλυση και η καύση σε ελεγχόμενες συνθήκες, επιτρέπουν τη διάσπαση των πολυμερών και την ανάκτηση των ινών, αν και συχνά συνοδεύονται από ενεργειακές απαιτήσεις και εκπομπές ρύπων. Από την άλλη, οι χημικές μέθοδοι, όπως η διάλυση με οργανικούς διαλύτες ή η υδρόλυση, προσφέρουν τη δυνατότητα ανάκτησης υλικών υψηλής ποιότητας, αλλά εξακολουθούν να βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο λόγω του υψηλού κόστους τους.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Du et al. (2022), η πυρόλυση των αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών αποτελεί μια υποσχόμενη τεχνολογία για την ανάκτηση πολύτιμων υλικών και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κλάδου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η έρευνα επικεντρώθηκε στη θερμική αποδόμηση των σύνθετων υλικών ινών-εποξειδικής ρητίνης, τα οποία αποτελούν βασικό στοιχείο των πτερυγίων ανεμογεννητριών, χρησιμοποιώντας ατμόσφαιρες με και χωρίς οξυγόνο. Η ανάλυση έδειξε ότι τα βασικά συστατικά των ινών/ρητίνης περιλαμβάνουν οξείδια του πυριτίου (SiO_2), ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) και εποξειδική ρητίνη. Κατά τη διαδικασία πυρόλυσης, η αποικοδόμηση της εποξειδικής ρητίνης ξεκίνησε στους 350°C , με συνολική απώλεια βάρους 11%, ανεξάρτητα από την παρουσία οξυγόνου. Ωστόσο, η παρουσία οξυγόνου σε υψηλότερες θερμοκρασίες επηρέασε σημαντικά τη σύνθεση των προϊόντων πυρόλυσης.

Σημαντικό εύρημα της μελέτης των Du et al. (2022) ήταν ότι τα προϊόντα πυρόλυσης που προέκυψαν σε αδρανείς ατμόσφαιρες βελτίωσαν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες εύκαμπτων σύνθετων υλικών, αυξάνοντας την ελαστική τους παραμόρφωση. Τα σύνθετα αυτά υλικά χρησιμοποιήθηκαν σε δοκιμές απόφραξης μεγάλων καναλιών σε σωλήνες γεμάτους με άμμο, με το ποσοστό απόφραξης να φτάνει το 81,1% για όγκο έγχυσης 5.0 PV. Σύμφωνα με τους Du et al. (2022), η αποτελεσματικότητα της απόφραξης παρέμεινε υψηλή ακόμα και σε συνθήκες υψηλής αλατότητας νερού, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο αυτή ελκυστική για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Η έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η πυρόλυση μπορεί να αποτελέσει μια αποτελεσματική και περιβαλλοντικά φιλική μέθοδο διαχείρισης των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες, επιτρέποντας τη μετατροπή τους

σε χρήσιμα υλικά με υψηλή μηχανική αντοχή, ενισχύοντας την κυκλική οικονομία του κλάδου (Du et al., 2022).

Σύμφωνα με τη μελέτη των Hao et al. (2020), η διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες αποτελεί βασικό ζήτημα βιωσιμότητας, καθώς το υλικό των πτερυγίων, που αποτελείται από σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, είναι ιδιαίτερα δύσκολο στην ανακύκλωση. Η έρευνα των Hao et al. (2020), εξετάζει την προσέγγιση της κυκλικής οικονομίας για την ανάκτηση αυτών των υλικών, εστιάζοντας στην τεχνολογία πυρόλυσης ως βασική μέθοδο επεξεργασίας. Η μελέτη δείχνει ότι η θερμική πυρόλυση μπορεί να οδηγήσει στην ανάκτηση ινών άνθρακα υψηλής ποιότητας, μειώνοντας παράλληλα το υπολειμματικό φορτίο άνθρακα που επηρεάζει την επαναχρησιμοποίηση. Διαπιστώνεται ότι η ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας και η ρύθμιση της ροής αδρανούς αερίου συμβάλλουν στη μείωση των υπολειμμάτων άνθρακα στις ανακτημένες ίνες. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία των 550°C αποδείχθηκε πιο αποδοτική για την απομάκρυνση της πολυμερικής μήτρας, ενώ η αύξηση της ροής αερίου βελτίωσε περαιτέρω την καθαρότητα των ανακτημένων ινών.

Οι Hao et al. (2020) τονίζουν ότι η ανακύκλωση των πτερυγίων ανεμογεννητριών μέσω πυρόλυσης μπορεί να μειώσει σημαντικά το ενεργειακό αποτύπωμα της βιομηχανίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι για να καταστεί οικονομικά βιώσιμη αυτή η τεχνική, απαιτείται η ανάπτυξη αγορών για ανακυκλωμένες ίνες άνθρακα. Επιπλέον, οι Hao et al. (2020) προτείνουν βελτιώσεις στις συνθήκες πυρόλυσης για την περαιτέρω αύξηση της ποιότητας των ανακτημένων υλικών, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά σε βιομηχανικές εφαρμογές υψηλής απόδοσης.

Στη μελέτη των Kalkanis et al. (2019), αναλύονται οι διαθέσιμες μέθοδοι επεξεργασίας των πτερυγίων ανεμογεννητριών στο τέλος του κύκλου ζωής τους, εστιάζοντας στις προκλήσεις που παρουσιάζει η ανακύκλωσή τους. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες, αν και εξασφαλίζουν υψηλή αντοχή και μικρό βάρος, δυσχεραίνουν την ανακύκλωση λόγω της πολυπλοκότητας της σύνθεσής τους. Η μελέτη επισημαίνει ότι οι υπάρχουσες τεχνικές ανακύκλωσης, όπως η μηχανική επεξεργασία (θραύση και άλεση), η θερμική επεξεργασία (καύση και πυρόλυση) και η χημική ανακύκλωση (διάλυση με διαλύτες), έχουν πλεονεκτήματα

αλλά και περιορισμούς. Συγκεκριμένα, η μηχανική μέθοδος παράγει χαμηλής ποιότητας ανακυκλωμένο υλικό, η θερμική επεξεργασία μπορεί να οδηγήσει σε εκπομπές ρύπων, ενώ η χημική ανακύκλωση παραμένει ακριβή και μη διαθέσιμη σε μεγάλη κλίμακα.

Οι Kalkanis et al. (2019) υπογραμμίζουν ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει απαγορεύσει την ταφή σύνθετων υλικών, ενισχύοντας έτσι την ανάγκη ανάπτυξης αποδοτικότερων μεθόδων ανακύκλωσης. Μια σημαντική πρόταση της έρευνας είναι η υιοθέτηση του κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment - LCA) ως εργαλείο αξιολόγησης της βιωσιμότητας των διαφορετικών μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων. Τέλος, σύμφωνα με τους Kalkanis et al., (2019), η χρήση της ανάλυσης κύκλου ζωής επιτρέπει την ποσοτική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κάθε μεθόδου και βοηθά στην επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής για την ανακύκλωση των πτερυγίων ανεμογεννητριών.

3.8. Προοπτικές και Κατευθύνσεις για τη Βιώσιμη Διαχείριση

Η ταχεία ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχει οδηγήσει σε σημαντικές περιβαλλοντικές και διαχειριστικές προκλήσεις, ιδιαίτερα όσον αφορά την απόσυρση και ανακύκλωση των ανεμογεννητριών στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Με δεδομένο ότι η διάρκεια ζωής μιας ανεμογεννήτριας κυμαίνεται από 20 έως 30 χρόνια, οι προβλέψεις δείχνουν ότι έως το 2050, εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων θα πρέπει να διαχειριστούν, με ιδιαίτερη έμφαση στα πτερύγια, τα οποία λόγω της σύνθετης κατασκευής τους είναι δύσκολο να ανακυκλωθούν. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) έχει αναδειχθεί ως ένα σημαντικό εργαλείο για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ανεμογεννητριών, επιτρέποντας τη σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων. Μέσα από τέτοιες αναλύσεις, έχει διαπιστωθεί ότι το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ανεμογεννητριών προέρχεται από τη φάση της κατασκευής τους, κυρίως λόγω της παραγωγής χάλυβα, σκυροδέματος και σύνθετων υλικών. Ωστόσο, η βελτίωση των μεθόδων ανακύκλωσης και η επαναχρησιμοποίηση υλικών μπορούν να μειώσουν σημαντικά το περιβαλλοντικό φορτίο και να συμβάλουν στη βιώσιμη ανάπτυξη του τομέα. Στη συνέχεια εξετάζονται προοπτικές και κατευθύνσεις που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία για τη βιώσιμη διαχείριση των ανεμογεννητριών, εστιάζοντας σε

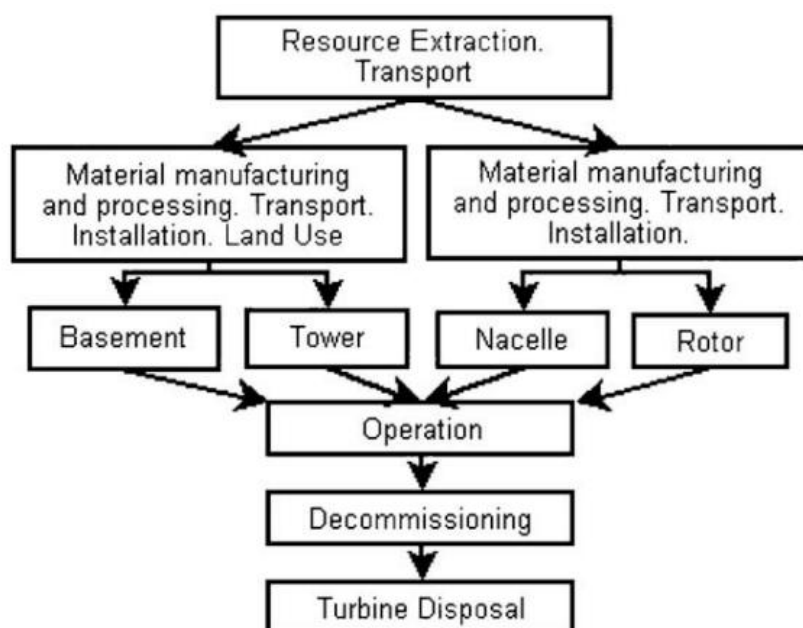
καινοτόμες τεχνολογίες ανακύκλωσης, την κυκλική οικονομία και την ανάπτυξη πολιτικών που προωθούν τη βιώσιμη απόσυρση και αξιοποίηση των υλικών.

Η μελέτη των Martínez et al. (2009) επικεντρώθηκε στην εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μιας πολυ-μεγαβάτ ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια όλου του κύκλου ζωής της, από την κατασκευή έως την αποσυρμολόγηση. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε ανεμογεννήτρια Gamesa G8X ισχύος 2 MW, εγκατεστημένη στην Ισπανία, και εφάρμοσε τη μεθοδολογία Life Cycle Assessment (LCA) σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα προέρχεται από το στάδιο της κατασκευής, κυρίως λόγω των εκπομπών από την παραγωγή υλικών όπως χάλυβας, σκυρόδεμα και ίνες γυαλιού. Για παράδειγμα, η θεμελίωση της ανεμογεννήτριας περιείχε 700 τόνους σκυροδέματος και 25 τόνους οπλισμού, ενώ ο πύργος της ανεμογεννήτριας είχε συνολικό βάρος 143 τόνους.

Στην Εικόνα 14, παρουσιάζεται ο κύκλος ζωής μιας ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει μια σειρά από στάδια, ξεκινώντας από την εξόρυξη των φυσικών πόρων και τη μεταφορά τους, έως την τελική διάθεση των αποβλήτων. Αρχικά, οι πρώτες ύλες εξορύσσονται και επεξεργάζονται για την κατασκευή των διαφόρων μερών της ανεμογεννήτριας, όπως η βάση (basement), ο πύργος (tower), η νασέλα (nacelle) και ο ρότορας (rotor). Κάθε ένα από αυτά τα τμήματα απαιτεί διαφορετικά υλικά, όπως χάλυβα, σκυρόδεμα και σύνθετα πολυμερή, που συμβάλλουν στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ανεμογεννήτριας. Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή και εγκατάσταση, η ανεμογεννήτρια εισέρχεται στη φάση λειτουργίας (operation), κατά την οποία παράγει ενέργεια για περίπου 20-30 χρόνια. Μετά τη λήξη του κύκλου ζωής της, ακολουθεί η διαδικασία αποξήλωσης (decommissioning), όπου τα διάφορα εξαρτήματα αφαιρούνται και προωθούνται για ανακύκλωση ή διάθεση.

Η τελευταία φάση, η διαχείριση των αποβλήτων της ανεμογεννήτριας (turbine disposal), είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς τα μεταλλικά μέρη μπορούν να ανακυκλωθούν σε μεγάλο βαθμό, ενώ τα πτερύγια, λόγω της σύνθετης σύστασής τους, καταλήγουν συχνά σε χώρους υγειονομικής ταφής. Το διάγραμμα αυτό αποτυπώνει τη σημασία της κυκλικής οικονομίας και της βελτίωσης των τεχνολογιών ανακύκλωσης, προκειμένου να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ανεμογεννητριών στο τέλος της ζωής τους. Αξιοσημείωτο είναι ότι το 85% των

αποβλήτων του πύργου και του μηχανισμού της ανεμογεννήτριας μπορούν να ανακυκλωθούν, ενώ αντίθετα τα περύγια από ίνες γυαλιού καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης έδειξε ότι ο χρόνος αποπληρωμής της ενέργειας ανέρχεται σε 4 χρόνια, με το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα να είναι σημαντικά χαμηλότερο από άλλες μορφές ενέργειας (Martínez et al., 2009).



Εικόνα 14. Διάγραμμα κύκλου ζωής μιας ανεμογεννήτριας, από την κατασκευή έως την απόσυρση.

Πηγή: (Martínez et al., 2009)

Η μελέτη των Alsaleh και Sattler (2019) διεξήγαγε μια εκτενή Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) για μεγάλες χερσαίες ανεμογεννήτριες στις Ηνωμένες Πολιτείες, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα στάδια της ζωής τους, από την απόκτηση πρώτων υλών έως την απόσυρση. Το κύριο εύρημα της μελέτης ήταν ότι η κατασκευαστική φάση είχε τον μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, κάτι που συνάδει με άλλες παρόμοιες έρευνες. Εξετάστηκαν έξι βασικές φάσεις: απόκτηση υλικών, κατασκευή, μεταφορά, εγκατάσταση, λειτουργία-συντήρηση και τέλος κύκλου ζωής. Η μελέτη επικεντρώθηκε στις ανεμογεννήτριες Gamesa 2-MW, οι οποίες βρίσκονται στο Lone Star Wind Farm στο Τέξας. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SimaPro8 για την ανάλυση, ενώ η μεθοδολογία ακολούθησε τα πρότυπα ISO 14040.

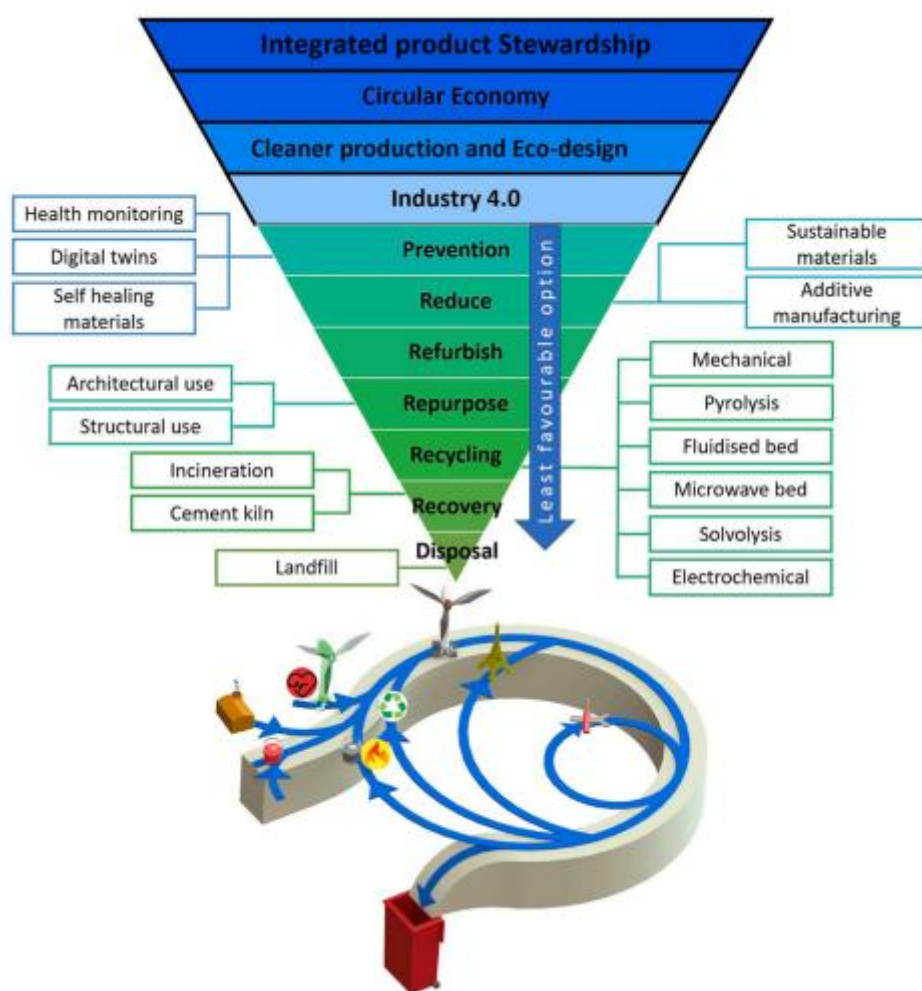
Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εκτιμήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση μεταφοράς των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών, τα φορτηγά μεταφοράς και τις διαδικασίες διάθεσης. Ένα ενδιαφέρον εύρημα ήταν ότι η τελική διάθεση των ανεμογεννητριών είχε τον μικρότερο αντίκτυπο στο συνολικό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Αυτό σημαίνει ότι είτε η υγειονομική ταφή είτε η καύση των πτερυγίων που δεν ανακυκλώνονται έχουν μικρή επίδραση στη συνολική ανάλυση. Ωστόσο, η έρευνα υπογραμμίζει την ανάγκη βελτίωσης των μεθόδων ανακύκλωσης, ώστε να μειωθεί περαιτέρω η περιβαλλοντική επιβάρυνση στο τέλος του κύκλου ζωής των ανεμογεννητριών (Alsaleh & Sattler, 2019).

Σύμφωνα με τη μελέτη των Shen et al. (2023), η ανακύκλωση και ανάκτηση σύνθετων πολυμερών ινών από πτερύγια ανεμογεννητριών αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων του κλάδου. Οι ερευνητές εξετάζουν τις κυρίαρχες μεθόδους διαχείρισης, εστιάζοντας στις τρεις βασικές στρατηγικές: επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και ανάκτηση υλικών. Η επαναχρησιμοποίηση των πτερυγίων είναι η βέλτιστη επιλογή, καθώς διατηρεί τη μέγιστη αξία των υλικών. Ωστόσο, η μεγάλη κλίμακα των αποβλήτων καθιστά την ανακύκλωση και την ανάκτηση πιο ρεαλιστικές επιλογές. Οι ερευνητές διαπιστώνουν ότι η πυρόλυση και η συν-επεξεργασία σε τσιμεντοβιομηχανίες έχουν τη μεγαλύτερη προοπτική για εμπορική εφαρμογή.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 15, η διαχείριση των αποβλήτων από πτερύγια ανεμογεννητριών ακολουθεί μια ιεραρχική προσέγγιση, όπου οι πιο βιώσιμες επιλογές βρίσκονται στην κορυφή και οι λιγότερο επιθυμητές στο κάτω μέρος. Στην κορυφή του διαγράμματος, στρατηγικές όπως η ολοκληρωμένη περιβαλλοντική διαχείριση προϊόντων, η κυκλική οικονομία και ο οικολογικός σχεδιασμός αποτελούν τα θεμέλια μιας βιώσιμης προσέγγισης. Αυτές οι στρατηγικές βασίζονται στην υιοθέτηση έξυπνων τεχνολογιών, όπως η παρακολούθηση της υγείας των υλικών μέσω ψηφιακών διδύμων (digital twins) και η χρήση αυτο-επιδιορθούμενων υλικών για τη μείωση της ανάγκης αντικατάστασης. Η πυραμίδα δείχνει ότι οι πλέον επιθυμητές επιλογές περιλαμβάνουν την πρόληψη, την επαναχρησιμοποίηση (structural and architectural use), και την ανακύκλωση των πτερυγίων. Στο επίπεδο της ανακύκλωσης, εξετάζονται διαφορετικές τεχνολογίες, όπως η μηχανική, η πυρόλυση, η υγρή διάλυση (solvolysis) και οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι, που

συμβάλλουν στην ανάκτηση πολύτιμων πρώτων υλών. Χαμηλότερα στην ιεραρχία, οι λιγότερο βιώσιμες επιλογές περιλαμβάνουν τη συν-επεξεργασία των υλικών σε κλιβάνους τσιμέντου και, ως τελευταία λύση, την ταφή των περυγίων σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Το διάγραμμα υπογραμμίζει την ανάγκη μετάβασης προς πιο βιώσιμες λύσεις, μειώνοντας τη χρήση των λιγότερο ευνοϊκών επιλογών, όπως η αποτέφρωση και η ταφή, και ενισχύοντας πρακτικές ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.. Η χημική ανακύκλωση μέσω solvolysis αναδεικνύεται ως η πλέον κυκλική και χαμηλού άνθρακα λύση, καθώς επιτρέπει την ανάκτηση μονομερών και υψηλής ποιότητας.



Εικόνα 15. Ιεραρχία διαχείρισης αποβλήτων περυγίων ανεμογεννητριών και στρατηγικές κυκλικής οικονομίας. Πηγή: (Martínez et al., 2009)

Η μελέτη των Yang et al. (2023) εστιάζει στις προκλήσεις που σχετίζονται με την ανακύκλωση των πτερυγίων ανεμογεννητριών στην Κίνα, μια χώρα με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ αιολικής ενέργειας παγκοσμίως. Σύμφωνα με την έρευνα, τα απορριφθέντα πτερύγια αναμένεται να φτάσουν από 7,7 έως 23,1 εκατομμύρια τόνους έως το 2050, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη αποτελεσματικών λύσεων διαχείρισης αποβλήτων. Η μελέτη προβλέπει την ποσότητα και τη σύνθεση των αποβλήτων χρησιμοποιώντας ένα υψηλής ανάλυσης μοντέλο που λαμβάνει υπόψη 14 διαφορετικές κατηγορίες τουρμπίνων και 104 μοντέλα. Στη συνέχεια, αξιολογεί το περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος διαφορετικών τεχνολογιών επεξεργασίας, όπως η συν-επεξεργασία σε κλιβάνους τσιμέντου, η μηχανική ανακύκλωση και η πυρόλυση. Ένα από τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης είναι ότι, αν και υπάρχουν διαθέσιμες τεχνολογίες για την ανακύκλωση των πτερυγίων, αυτές δεν είναι πάντα εμπορικά βιώσιμες ή περιβαλλοντικά βιώσιμες. Συγκεκριμένα, η πυρόλυση είναι μια από τις πιο αμφιλεγόμενες μεθόδους, καθώς παράγει σημαντικές εκπομπές αερίων, ενώ η μηχανική ανακύκλωση φαίνεται να είναι η πιο βιώσιμη περιβαλλοντικά επιλογή. Η έρευνα των Yang et al. (2023) επισημαίνει επίσης τη σημασία των τοπικών κανονισμών, όπως οι υψηλές επιβαρύνσεις ταφής αποβλήτων, οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν ως κίνητρο για την ανάπτυξη καλύτερων λύσεων ανακύκλωσης.

4. Διαχείριση Αποβλήτων από Φωτοβολταϊκά Συστήματα

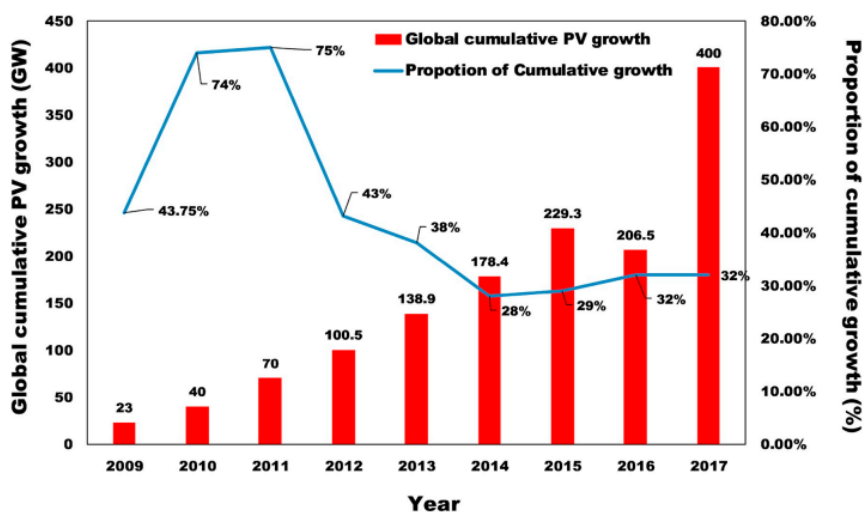
4.1. Εισαγωγή στη Διαχείριση Αποβλήτων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Η ραγδαία ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων τα τελευταία χρόνια έχει συμβάλει σημαντικά στη μετάβαση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος συνεπάγεται και αντίστοιχη αύξηση των αποβλήτων που προκύπτουν από τα πάνελ στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Τα Φ/Β πάνελ περιέχουν διάφορα υλικά, όπως γυαλί, πυρίτιο, μέταλλα και πολυμερή, τα οποία καθιστούν τη διαχείρισή τους σύνθετη και απαιτούν εξειδικευμένες τεχνολογίες ανακύκλωσης. Η ανακύκλωση των Φ/Β πάνελ είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος και την επαναχρησιμοποίηση πολύτιμων υλικών. Παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις, πολλές χώρες εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν προκλήσεις ως προς τη διαχείριση αυτών των αποβλήτων, είτε λόγω έλλειψης ρυθμιστικών πλαισίων είτε λόγω ανεπάρκειας ανακυκλωτικών υποδομών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει κανονισμούς που προωθούν την υποχρεωτική ανακύκλωση, ωστόσο η εφαρμογή αυτών των πολιτικών διαφέρει από χώρα σε χώρα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαχείριση των αποβλήτων Φ/Β συστημάτων, αναλύοντας τις τεχνολογικές μεθόδους ανακύκλωσης και τις ρυθμιστικές προκλήσεις. Μέσα από τη μελέτη διαφορετικών περιπτώσεων, αναδεικνύεται η σημασία της ανακύκλωσης ως βασικού παράγοντα για τη βιώσιμη ανάπτυξη του κλάδου των Φ/Β συστημάτων.

Η μελέτη των Chowdhury et al. (2020) παρέχει μια συνολική εικόνα της διαχείρισης των αποβλήτων των φωτοβολταϊκών πάνελ στο τέλος του κύκλου ζωής τους, εστιάζοντας στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και στις διαθέσιμες τεχνολογίες ανακύκλωσης. Σύμφωνα με τις προβλέψεις, έως το 2050, περισσότερες από 78 εκατομμύρια τόνοι Φ/Β πάνελ θα έχουν απορριφθεί, καθιστώντας την ανακύκλωση ζωτικής σημασίας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει αυστηρούς κανονισμούς για την ανακύκλωση μέσω της Οδηγίας WEEE, η οποία απαιτεί από τους κατασκευαστές να χρηματοδοτούν τη συλλογή και ανακύκλωση των Φ/Β αποβλήτων. Παρόμοιες πρωτοβουλίες δεν είναι ακόμα διαδεδομένες σε παγκόσμια κλίμακα, γεγονός που δυσχεραίνει τη βιώσιμη διαχείριση αυτών των αποβλήτων. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 16, η παγκόσμια σωρευτική ανάπτυξη φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων παρουσίασε εκρηκτική άνοδο μεταξύ 2009 και 2017, ακολουθώντας μια σταθερά

αυξητική πορεία. Οι κόκκινες στήλες αποτυπώνουν τη συνολική σωρευτική ισχύ των εγκατεστημένων Φ/Β συστημάτων (σε GW), ενώ η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει το ποσοστό ετήσιας αύξησης αυτής της ισχύος. Το 2009, η παγκόσμια ισχύς Φ/Β ήταν μόλις 23 GW, ενώ έως το 2017 είχε φτάσει τα 400 GW. Τα υψηλότερα ποσοστά ετήσιας αύξησης καταγράφηκαν μεταξύ 2010 και 2011, φτάνοντας το 75%. Ωστόσο, από το 2013 και μετά, το ποσοστό αύξησης παρουσίασε σταδιακή πτώση, αγγίζοντας το 28% το 2014, το 29% το 2015 και το 32% το 2017. Παρά τη μείωση του ρυθμού ανάπτυξης, η συνολική ισχύς συνέχισε να αυξάνεται με σημαντικούς ρυθμούς. Αυτή η αλματώδης αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος αναμένεται να οδηγήσει σε αντίστοιχη αύξηση των αποβλήτων φωτοβολταϊκών πάνελ στο τέλος του κύκλου ζωής τους.

Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη βιώσιμων στρατηγικών ανακύκλωσης και διαχείρισης αποβλήτων, όπως επισημαίνεται στη μελέτη των Chowdhury et al. (2020). Οι κύριες τεχνολογίες ανακύκλωσης που περιγράφονται είναι η φυσική, η θερμική και η χημική επεξεργασία. Οι φυσικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τον διαχωρισμό και τη μηχανική καταστροφή των υλικών, ενώ οι χημικές διεργασίες χρησιμοποιούν διαλύτες ή οξέα για την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων, όπως το ασήμι και το πυρίτιο. Η μελέτη των Chowdhury et al. (2020) υπογραμμίζει την ανάγκη για περαιτέρω βελτιώσεις στην οικονομική βιωσιμότητα και στην περιβαλλοντική απόδοση των μεθόδων ανακύκλωσης, ώστε να καταστεί δυνατή η ανάκτηση των πολύτιμων πρώτων υλών με πιο αποδοτικό τρόπο.

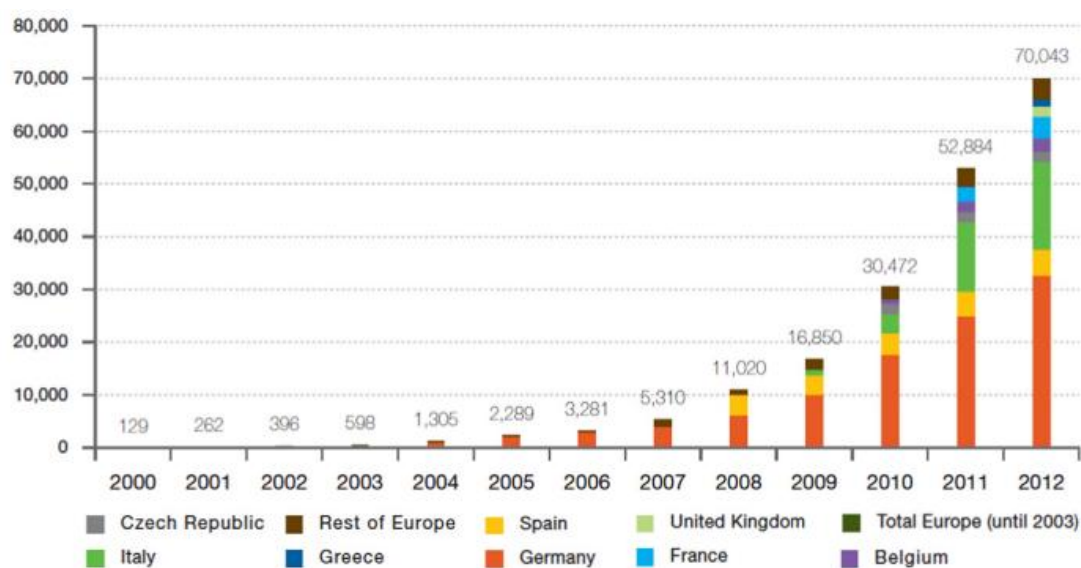


Εικόνα 16. Παγκόσμια σωρευτική ανάπτυξη φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων και ετήσιο ποσοστό αύξησης (2009-2017). Πηγή: (Chowdhury et al., 2020)

Η μελέτη του Paiano (2015) χρησιμοποιεί ένα υπολογιστικό μοντέλο βασισμένο στον κύκλο ζωής των πάνελ, ο οποίος εκτιμάται στα 25 έτη, και εκτιμά την παραγωγή αποβλήτων σε δύο περιόδους: 2012–2038 και 2039–2050. Στην πρώτη περίοδο, τα απόβλητα υπολογίζεται ότι θα φτάσουν τους 2 εκατομμύρια τόνους, ενώ μέχρι το 2050 η ποσότητα αυτή θα αυξηθεί σε 8 εκατομμύρια τόνους. Η μελέτη αναλύει την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2012/19/EU, η οποία θέτει στόχους για την ανάκτηση του 85% των υλικών και την ανακύκλωση του 75% των φωτοβολταϊκών αποβλήτων από το 2018 και μετά. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 17, η σωρευτική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (PV) συστημάτων στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2000-2012 παρουσίασε μια εντυπωσιακή αύξηση, με τις πιο έντονες τάσεις ανάπτυξης να καταγράφονται από το 2008 και έπειτα. Στην αρχή της περιόδου, το 2000, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ήταν μόλις 129 MW, ενώ το 2012 έφτασε τα 70.043 MW, καταδεικνύοντας έναν ραγδαίο ρυθμό ανάπτυξης του φωτοβολταϊκού τομέα στην Ευρώπη.

Η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στη συμβολή συγκεκριμένων χωρών, όπως η Γερμανία, η Ιταλία και η Ισπανία, οι οποίες υιοθέτησαν πολιτικές στήριξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η Γερμανία, που αποτυπώνεται με κόκκινο χρώμα, είχε τον πρωταγωνιστικό ρόλο στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, ενώ από το 2010 και μετά, η Ιταλία (πράσινο) παρουσίασε επίσης μεγάλη αύξηση. Οι υπόλοιπες ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Τσεχία, συνεισέφεραν επίσης στην ανάπτυξη, αλλά με μικρότερα ποσοστά. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι από το 2008 έως το 2012 παρατηρείται εκθετική αύξηση, με την εγκατεστημένη ισχύ να υπερτριπλασιάζεται από 11.020 MW το 2008 σε 30.472 MW το 2010 και να εκτοξεύεται στα 70.043 MW το 2012. Αυτή η ραγδαία αύξηση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων έχει άμεσες επιπτώσεις στη διαχείριση των αποβλήτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους, καθιστώντας αναγκαία την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών ανακύκλωσης και διαχείρισης αποβλήτων. Ο Paiano (2015) υπογραμμίζει ότι η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων αποτελεί όχι μόνο περιβαλλοντική ανάγκη αλλά και οικονομική ευκαιρία, λόγω της δυνατότητας ανάκτησης πολύτιμων υλικών, όπως το πυρίτιο και τα μέταλλα. Η διαχείριση αυτών

των αποβλήτων πρέπει να ενσωματώνει βιώσιμες πρακτικές και να συνδυάζει τεχνολογικές λύσεις με θεσμικά και οικονομικά κίνητρα.

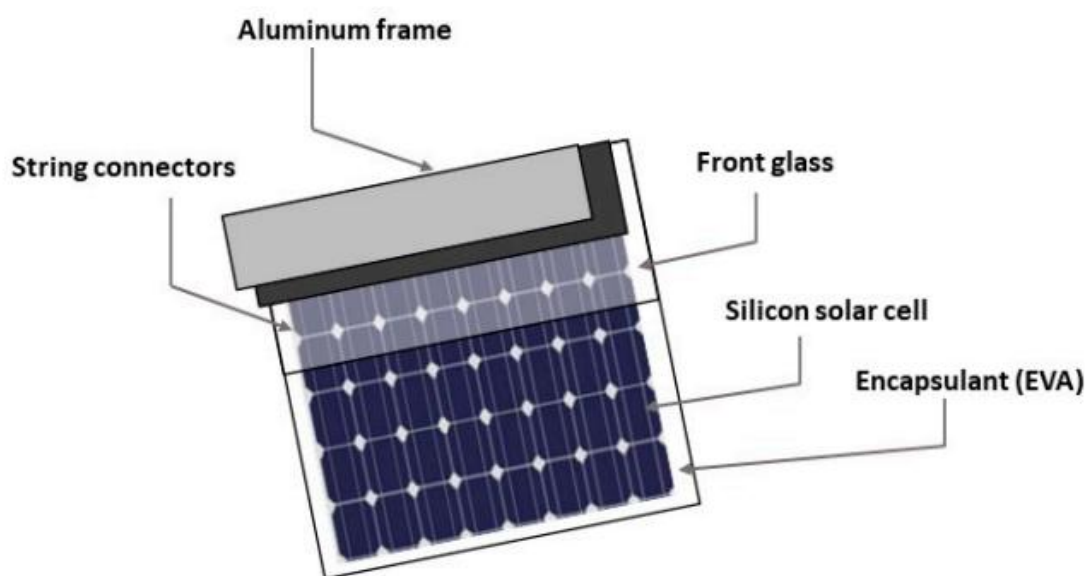


Εικόνα 17. Σωρευτική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη (2000-2012), με εντυπωσιακή αύξηση από το 2008 και μετά. Πηγή: (Paiano, 2015)

Στην Εικόνα 18, φαίνεται ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελείται από διάφορα δομικά στοιχεία, τα οποία συμβάλλουν στην απόδοσή του και επηρεάζουν τις δυνατότητες ανακύκλωσής του στο τέλος του κύκλου ζωής του. Το πλαίσιο αλουμινίου παρέχει δομική σταθερότητα, ενώ το μπροστινό γυαλί προστατεύει τα φωτοβολταϊκά κύτταρα από εξωτερικές συνθήκες. Στην εσωτερική δομή, οι ηλιακές κυψέλες πυριτίου είναι υπεύθυνες για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, με τη βοήθεια συνδετικών στοιχείων. Επιπλέον, η πολυμερική ενθυλάκωση (Encapsulant - EVA) εξασφαλίζει τη συνοχή των στρωμάτων και προστατεύει τις κυψέλες από μηχανικές καταπονήσεις και υγρασία. Αυτή η σύνθεση καθιστά την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ πολύπλοκη, καθώς απαιτείται ο διαχωρισμός των διαφόρων υλικών, ώστε να καταστεί δυνατή η αξιοποίησή τους μέσω ανακύκλωσης (Włodarczyk, 2022).

Η μελέτη του Włodarczyk (2022) εστιάζει στη διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών αποβλήτων, εξετάζοντας τις ρυθμιστικές διατάξεις, τις τεχνολογικές επιλογές και τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η Πολωνία ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σύμφωνα με τη μελέτη, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β στην Πολωνία αυξήθηκε ραγδαία, φτάνοντας τα 1.950 MW τον Μάιο του 2020, με την

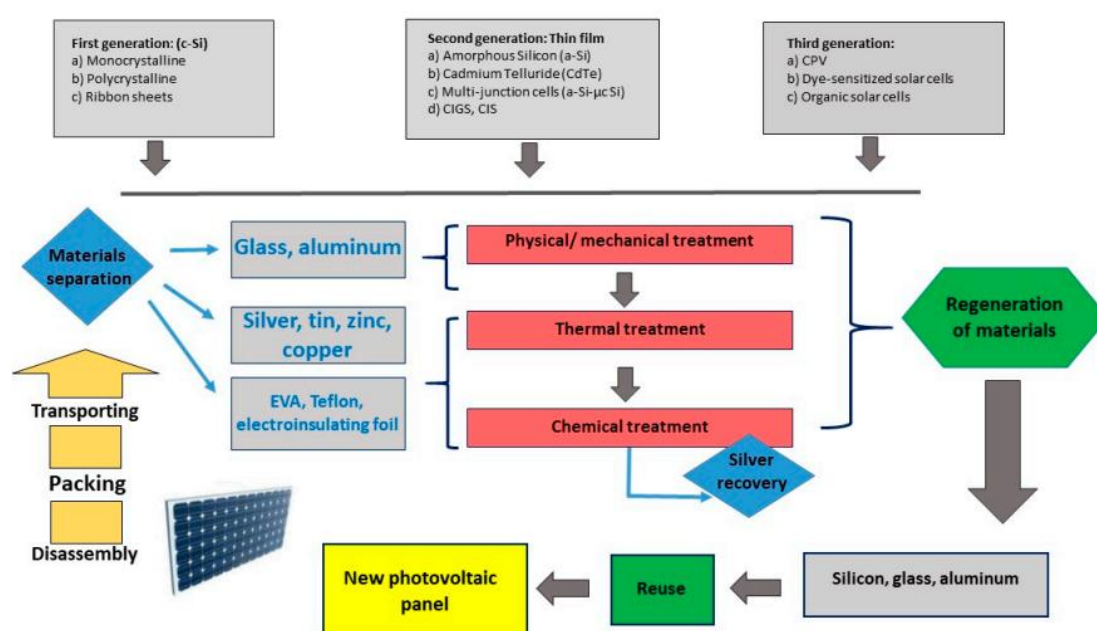
αντίστοιχη μάζα των εγκατεστημένων μονάδων να εκτιμάται στις 120.000 τόνους (Włodarczyk, 2022). Η εφαρμογή της Οδηγίας 2012/19/EU για τη διαχείριση αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (WEEE) έχει οδηγήσει στην εισαγωγή ρυθμιστικών μέτρων για τη συλλογή και ανακύκλωση των Φ/Β αποβλήτων. Η μελέτη αναλύει τις υφιστάμενες τεχνολογίες ανακύκλωσης, εστιάζοντας στις θερμικές και χημικές μεθόδους διάσπασης των φωτοβολταϊκών μονάδων. Οι πιο αποτελεσματικές τεχνικές περιλαμβάνουν τη θερμική αποδόμηση της EVA, την ανάκτηση μετάλλων μέσω υδρομεταλλουργίας και τη μηχανική διαχωριστική επεξεργασία για την απομάκρυνση του γυαλιού. Παρόλο που η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει στόχους ανάκτησης 85% και ανακύκλωσης 80% για τα Φ/Β απόβλητα από το 2018, η Πολωνία αντιμετωπίζει δυσκολίες στην ανάπτυξη των απαιτούμενων υποδομών. Η μελέτη καταλήγει ότι η βελτίωση των εθνικών στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων και η ενίσχυση των συνεργασιών με τη βιομηχανία αποτελούν κρίσιμες προϋποθέσεις για την επιτυχή υλοποίηση της ανακύκλωσης των Φ/Β στην Πολωνία.



Εικόνα 18. Δομή και βασικά εξαρτήματα ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Πηγή: (Włodarczyk., 2022)

Στην Εικόνα 19, ο Włodarczyk., (2022) παρουσιάζει τη διαδικασία ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πάνελ περιλαμβάνει διάφορα στάδια, ξεκινώντας από τη μεταφορά, τη συσκευασία και την αποσυναρμολόγηση των πάνελ. Αρχικά, γίνεται διαχωρισμός των υλικών, όπου το γυαλί και το αλουμίνιο απομακρύνονται ξεχωριστά, ενώ τα μέταλλα όπως το ασήμι, ο κασσίτερος, ο ψευδάργυρος και ο χαλκός συλλέγονται για περαιτέρω επεξεργασία. Στη συνέχεια, τα οργανικά υλικά όπως το EVA, το Teflon

και τα μονωτικά φύλλα υποβάλλονται σε εξειδικευμένες διαδικασίες επεξεργασίας. Η ανακύκλωση γίνεται μέσω τριών βασικών μεθόδων: φυσικομηχανικής, θερμικής και χημικής επεξεργασίας. Η φυσικομηχανική επεξεργασία περιλαμβάνει το θρυμματισμό και τον διαχωρισμό των επιμέρους υλικών, η θερμική αποδόμηση επιτρέπει την απομάκρυνση οργανικών ενώσεων, ενώ η χημική μέθοδος χρησιμοποιείται για την ανάκτηση μετάλλων υψηλής αξίας, όπως το ασήμι. Όπως φαίνεται στη διαδικασία, τα ανακτηθέντα υλικά, όπως το γυαλί, το αλουμίνιο και το πυρίτιο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για την κατασκευή νέων φωτοβολταϊκών πάνελ είτε να επαναχρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία.



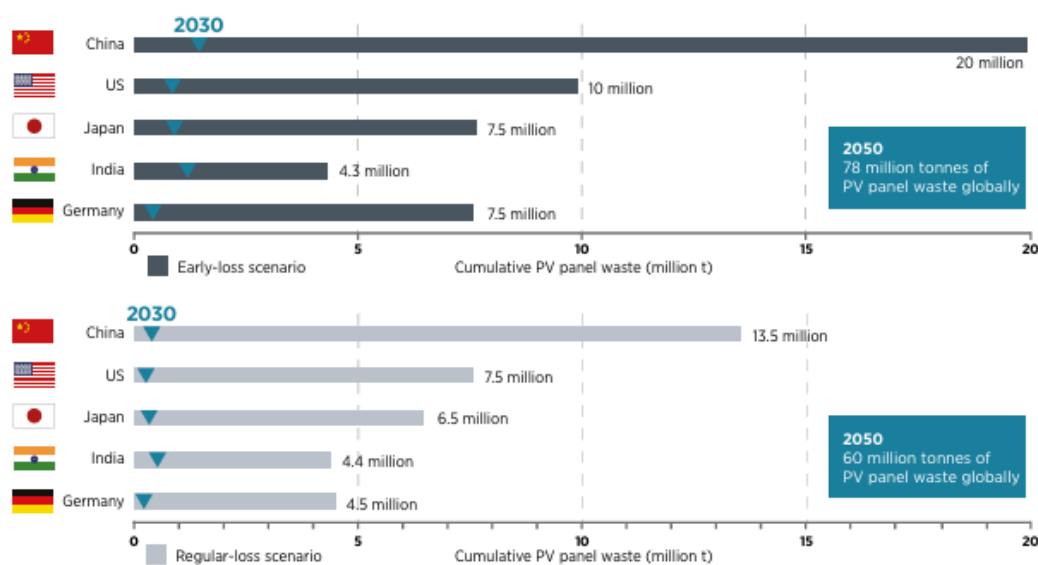
Εικόνα 19. Διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ και ανάκτηση υλικών. Πηγή: (Włodarczyk, 2022)

4.2. Ποσοτικοποίηση και Πρόβλεψη Παραγωγής Αποβλήτων

Η ραγδαία ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών (PV) τεχνολογιών από τις αρχές του 21ου αιώνα έχει συνεισφέρει καθοριστικά στην ενεργειακή μετάβαση προς ανανεώσιμες πηγές. Παράλληλα, η αλματώδης αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών παγκοσμίως συνεπάγεται και τη δημιουργία ολοένα μεγαλύτερων ροών αποβλήτων, καθώς τα πάνελ φθάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Σύμφωνα με τη μελέτη των IRENA & IEA-PVPS (2016), η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς PV από 222 GW το 2015 προβλέπεται να εκτοξευθεί στα 4.500 GW έως το 2050. Η παράλληλη αύξηση των αποβλήτων PV είναι αναπόφευκτη: από 43.500 τόνους το 2016,

εκτιμάται ότι τα απόβλητα θα αγγίξουν τους 60 έως 78 εκατομμύρια τόνους μέχρι το 2050, ανάλογα με το σενάριο πρόωρης ή κανονικής απώλειας (early-loss vs regular-loss scenario).

Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 20, η Κίνα αναμένεται να συγκεντρώσει τον μεγαλύτερο όγκο αποβλήτων με 13,5–20 εκατομμύρια τόνους έως το 2050, ακολουθούμενη από τις Ηνωμένες Πολιτείες, την Ιαπωνία, την Ινδία και τη Γερμανία. Η αύξηση αυτή προκύπτει τόσο από αστοχίες υλικών (π.χ. ρωγμές σε κρυσταλλικά πάνελ, διάβρωση) όσο και από την ολοκλήρωση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής των πάνελ, η οποία κυμαίνεται κατά μέσο όρο στα 25–30 έτη. Η πρόκληση πλέον εστιάζεται στη δημιουργία κατάλληλων μηχανισμών επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης, ώστε να μετατραπεί το εν δυνάμει περιβαλλοντικό πρόβλημα σε ευκαιρία ανάκτησης υλικών και δημιουργίας νέων αγορών (IRENA & IEA-PVPS, 2016).



Εικόνα 20. Εκτιμώμενοι σωρευτικοί όγκοι αποβλήτων φωτοβολταϊκών πάνελ έως το 2050 παγκοσμίως, ανά σενάριο και χώρα.

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Ε.Ε. αποτελεί τη μόνη παγκόσμια οντότητα που έχει θεσπίσει συγκεκριμένο νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των αποβλήτων φωτοβολταϊκών πάνελ. Βασισμένο στην αρχή της διευρυνμένης ευθύνης του παραγωγού (Extended Producer Responsibility - EPR), το νομοθετικό πλαίσιο της Οδηγίας για τα Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (WEEE)

απαιτεί από όλους τους παραγωγούς που δραστηριοποιούνται στην αγορά της Ε.Ε. να χρηματοδοτούν την αποκομιδή και ανακύκλωση των πάνελ στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Όπως επισημαίνεται στη μελέτη των IRENA & IEA-PVPS (2016), αυτό το ρυθμιστικό πλαίσιο παρέχει σαφείς στόχους συλλογής και ανάκτησης και έχει συμβάλει καθοριστικά στην ανάπτυξη εξειδικευμένων υποδομών και βιομηχανιών επεξεργασίας PV αποβλήτων. Στη Γερμανία, για παράδειγμα, η οποία αποτελεί ώριμη αγορά στον τομέα των φωτοβολταϊκών, αναμένονται 4,5 έως 7,5 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων μέχρι το 2050, βάσει των προβλέψεων των δύο σεναρίων.

Η Ελλάδα, παρόλο που δεν βρίσκεται ανάμεσα στις χώρες με το υψηλότερο προβλεπόμενο όγκο αποβλήτων, ακολουθεί επίσης την κοινοτική στρατηγική. Όπως καταγράφεται στη μελέτη των Skarkos et al. (2024), η εγχώρια δυναμική στη χρήση φωτοβολταϊκών τεχνολογιών —κυρίως μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου— είναι σημαντική, με διάρκεια ζωής 20–25 έτη. Η ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) που πραγματοποιήθηκε για το ελληνικό παράδειγμα καταδεικνύει ότι η φάση τέλους ζωής (End-of-Life – EOL) των πάνελ είναι κρίσιμη για την επίτευξη περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Στο πλαίσιο αυτό, προτείνονται στρατηγικές μείωσης (μείωση επικίνδυνων υλικών), επαναχρησιμοποίησης (re-use) και ανακύκλωσης (recycle), με έμφαση στη χρήση υδρομεταλλουργικών μεθόδων ανάκτησης υλικών, ανάλογα με τη διαλυτότητα και επιφανειακή συμπεριφορά των επιμέρους στοιχείων (Skarkos et al., 2024).

Η δυνατότητα δημιουργίας προστιθέμενης αξίας είναι σημαντική: σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των IRENA & IEA-PVPS (2016), τα τεχνικά ανακτήσιμα υλικά από τα απόβλητα φωτοβολταϊκών πάνελ θα μπορούσαν να αποδώσουν 450 εκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2030 και 15 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2050, προσφέροντας επενδυτικές ευκαιρίες και δημιουργία θέσεων εργασίας τόσο στον δημόσιο όσο και στον ιδιωτικό τομέα.

4.3. Νομοθετικό και Κανονιστικό Πλαίσιο για την Ανακύκλωση των Φ/Β Αποβλήτων

Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων έχει οδηγήσει σε αυξημένη παραγωγή αποβλήτων, καθιστώντας απαραίτητη τη δημιουργία ενός ισχυρού νομικού και κανονιστικού πλαισίου για τη βιώσιμη διαχείρισή τους. Η ανάγκη ανακύκλωσης

των Φ/Β μονάδων προκύπτει από τη σύνθετη χημική τους σύσταση, η οποία περιλαμβάνει υλικά υψηλής αξίας, όπως το πυρίτιο και το ασήμι, αλλά και δυνητικά επικίνδυνα στοιχεία, όπως το κάδμιο και ο μόλυβδος. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει υιοθετήσει προοδευτικές πολιτικές για τη διαχείριση των Φ/Β αποβλήτων, ενσωματώνοντάς τες στην Οδηγία WEEE, η οποία απαιτεί την υποχρεωτική συλλογή και ανακύκλωσή τους. Άλλες χώρες, όπως οι ΗΠΑ, η Κίνα και η Ιαπωνία, έχουν θεσπίσει αντίστοιχες ρυθμίσεις, αν και η εφαρμογή τους παρουσιάζει διακυμάνσεις. Η εισαγωγή νέων μοντέλων διαχείρισης, όπως η κυκλική οικονομία, προωθεί την επαναχρησιμοποίηση υλικών και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των Φ/Β πάνελ. Στη συνέχεια αναλύονται οι ρυθμιστικές προσεγγίσεις που έχουν υιοθετηθεί διεθνώς, τις προκλήσεις εφαρμογής τους και τις προτεινόμενες στρατηγικές για τη βελτίωση της διαχείρισης των Φ/Β αποβλήτων, με στόχο τη διαμόρφωση ενός βιώσιμου και αποδοτικού συστήματος ανακύκλωσης.

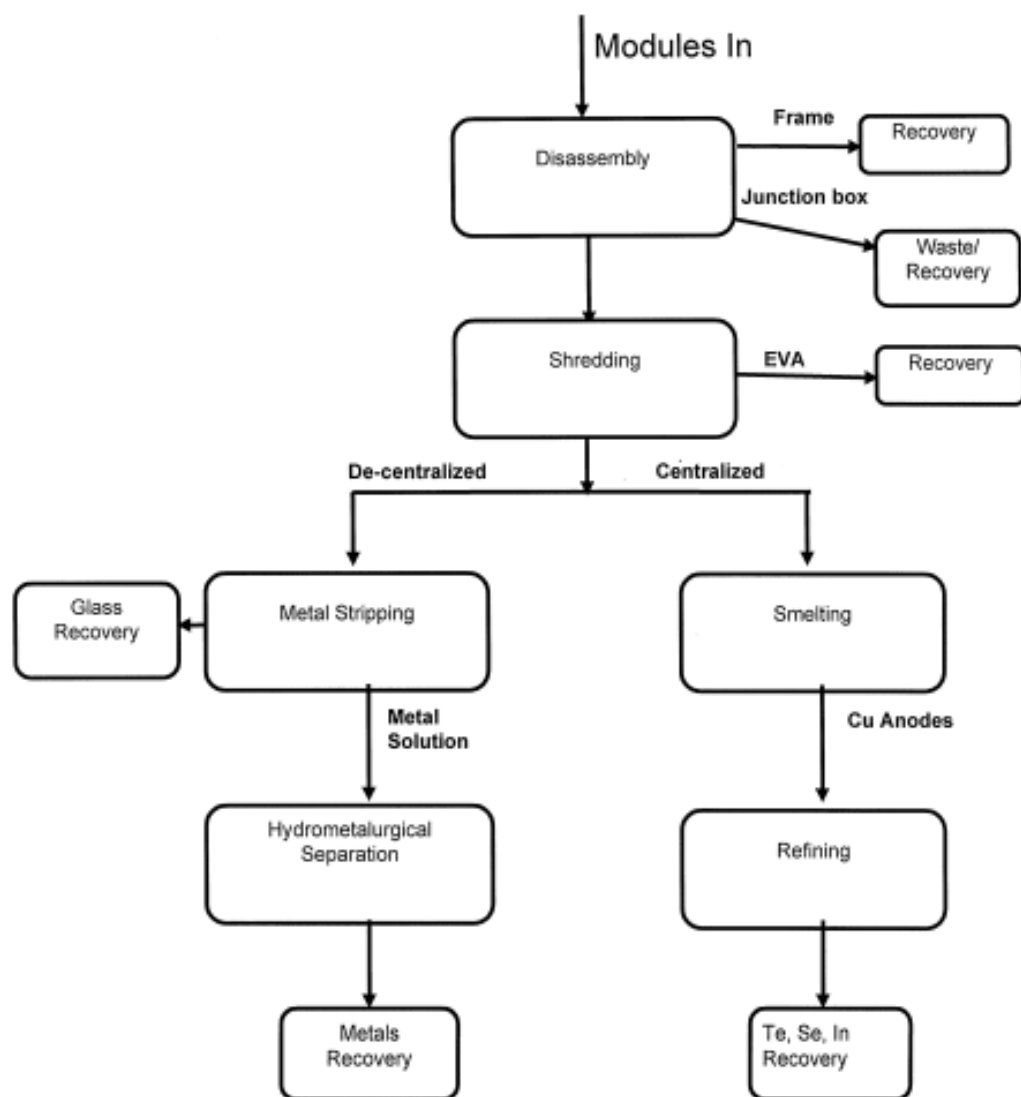
Η μελέτη του Fthenakis (2000) επικεντρώνεται στη διαχείριση του τέλους ζωής των Φ/Β μονάδων και στη βιωσιμότητα της ανακύκλωσής τους. Αν και τα Φ/Β πάνελ έχουν σαφή περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας, η απόρριψή τους χωρίς σωστή διαχείριση μπορεί να οδηγήσει σε περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω της παρουσίας βαρέων μετάλλων, όπως το κάδμιο και το μόλυβδο.

Η μελέτη εξετάζει τη βιωσιμότητα της ανακύκλωσης των Φ/Β πάνελ και παρουσιάζει τρία μοντέλα συλλογής και επεξεργασίας αποβλήτων: το μοντέλο των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας, το μοντέλο της ηλεκτρονικής βιομηχανίας και το μοντέλο των μπαταριών NiCd. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η πιο βιώσιμη προσέγγιση περιλαμβάνει τη συλλογή των πάνελ μέσω δικτύων αντιστροφής εφοδιαστικής (reverse logistics) και την ανακύκλωση σε κεντρικές εγκαταστάσεις. Η διαδικασία ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών μονάδων περιλαμβάνει διάφορα στάδια, ξεκινώντας από την αποσυναρμολόγηση των πάνελ (Εικόνα 21). Σε αυτή τη φάση, το πλαίσιο αλουμινίου και τα κιβώτια σύνδεσης είτε ανακτώνται είτε διατίθενται ως απόβλητα. Στη συνέχεια, τα πάνελ υπόκεινται σε διαδικασία τεμαχισμού, η οποία μπορεί να είναι αποκεντρωμένη ή κεντρική, ανάλογα με την προσέγγιση διαχείρισης.

Στην αποκεντρωμένη διαδικασία, πραγματοποιείται διαχωρισμός μετάλλων μέσω απογύμνωσης, ενώ ακολουθεί η υδρομεταλλουργική επεξεργασία για την ανάκτηση μετάλλων υψηλής αξίας. Στην κεντρική διαδικασία, το τεμαχισμένο υλικό εισέρχεται

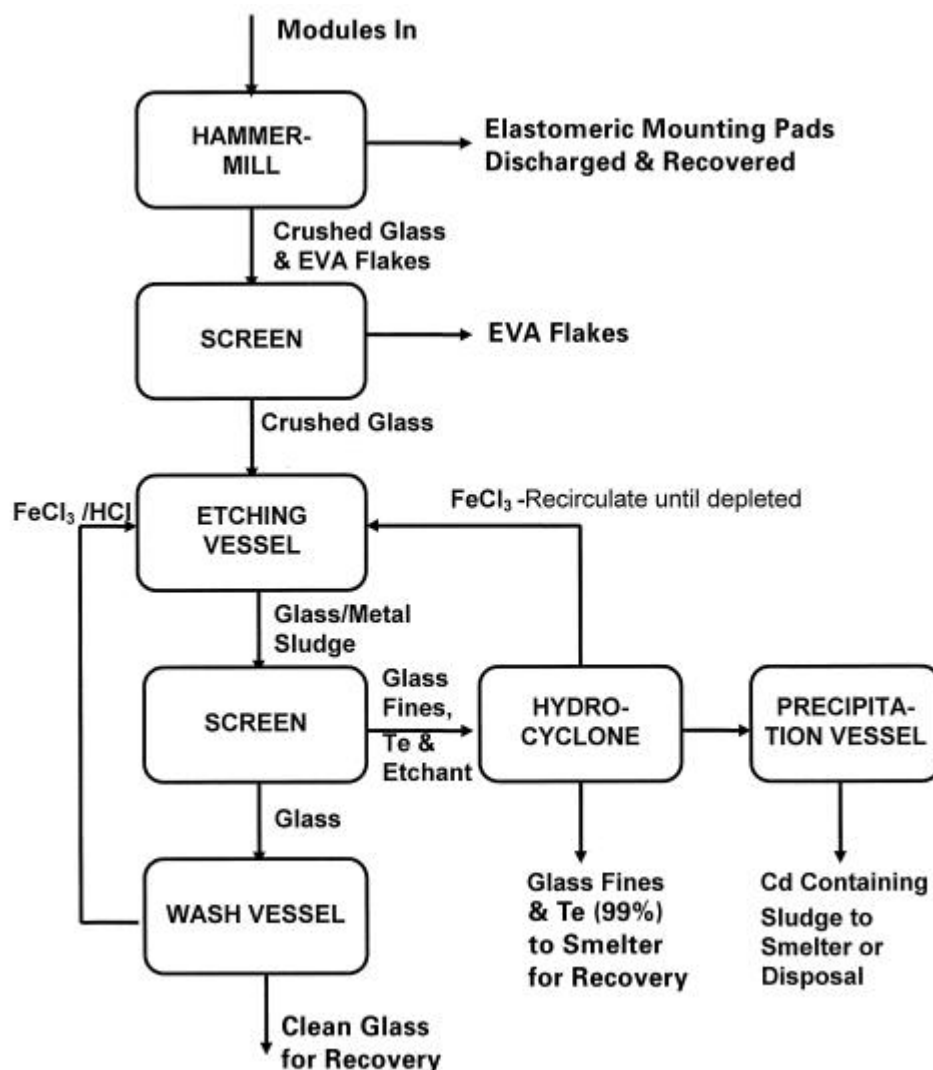
σε διαδικασία τήξης, όπου παράγονται χάλκινοι άνοδοι, οι οποίοι στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία καθαρισμού, επιτρέποντας την ανάκτηση στοιχείων όπως το τελλούριο (Te), το σελήνιο (Se) και το ίνδιο (In). Η Εικόνα 22 αναδεικνύει τις διαφορετικές τεχνολογικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πάνελ και την αξιοποίηση πολύτιμων υλικών, μειώνοντας τα απόβλητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η αποκεντρωμένη διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια μηχανικής και χημικής επεξεργασίας (Εικόνα 22). Η διαδικασία ξεκινά με μηχανική άλεση (hammer mill), κατά την οποία τα πάνελ θρυμματίζονται σε μικρότερα κομμάτια, απομακρύνοντας ελαστομερή και πολυμερή υλικά. Το θρυμματισμένο γυαλί και τα υπολείμματα του EVA περνούν από σύστημα διαλογής, όπου τα EVA flakes διαχωρίζονται από το υπόλοιπο υλικό. Στη συνέχεια, το θρυμματισμένο γυαλί υπόκειται σε χημική επεξεργασία με χλωριούχο σίδηρο (FeCl_3) και υδροχλωρικό οξύ (HCl) σε δοχείο χάραξης, με στόχο τη διάλυση των μετάλλων. Τα διαχωρισμένα υπολείμματα μετάλλων και γυαλιού περνούν από περαιτέρω διαλογή, όπου το γυαλί καθαρίζεται και αποθηκεύεται για επαναχρησιμοποίηση.

Τα μεταλλικά υπολείμματα οδηγούνται σε διαδικασία υδροκυκλωνισμού (hydrocyclone) για τον διαχωρισμό λεπτόκοκκων σωματιδίων τελλουρίου (Te), ενώ τα βαρέα μέταλλα, όπως το κάδμιο (Cd), καταλήγουν σε δοχεία καθίζησης για ασφαλή αποθήκευση ή επεξεργασία. Αυτό το διάγραμμα αναδεικνύει την πολυπλοκότητα της αποκεντρωμένης ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ, εστιάζοντας στη μηχανική και χημική επεξεργασία που απαιτείται για την απομόνωση και ανάκτηση πολύτιμων υλικών. Η μελέτη του Fthenakis, (2000) καταλήγει ότι, παρά τις υπάρχουσες τεχνικές ανακύκλωσης, η οικονομική βιωσιμότητα παραμένει πρόκληση. Προτείνεται η θέσπιση ρυθμιστικών πλαισίων που θα επιβάλουν την ανακύκλωση και θα ενισχύσουν την ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών επεξεργασίας των αποβλήτων Φ/Β συστημάτων.



Εικόνα 21. Διαδικασίες και επιλογές ανακύκλωσης απορριμμάτων και φωτοβολταϊκών μονάδων.

Πηγή: (Fthenakis, 2000)



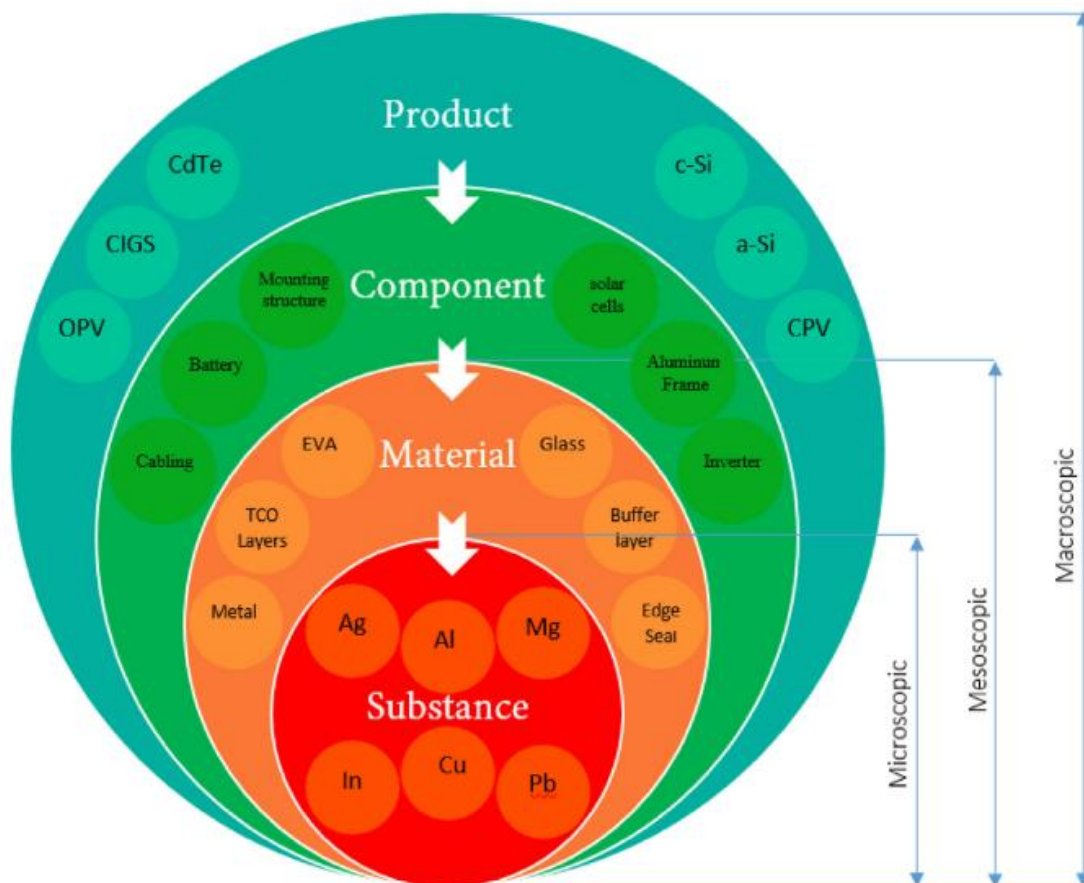
Εικόνα 22. Διάγραμμα ροής ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ σε αποκεντρωμένη εγκατάσταση.

Πηγή: (Fthenakis, 2000)

Η μελέτη των Mahmoudi et al. (2021) αναπτύσσει ένα πολυεπίπεδο πλαίσιο για τη διαχείριση των αποβλήτων φωτοβολταϊκών πάνελ, εστιάζοντας στην κυκλική οικονομία και στη βιώσιμη ανάκτηση των υλικών. Σύμφωνα με την ανάλυση, έως το 2050 ο όγκος των αποβλήτων των Φ/Β συστημάτων αναμένεται να φτάσει τους 60-80 εκατομμύρια τόνους, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη στρατηγικού σχεδιασμού για τη διαχείρισή τους. Το προτεινόμενο πλαίσιο βασίζεται σε τρία επίπεδα διαχείρισης: μακροσκοπικό (επίπεδο προϊόντος και εξαρτημάτων), μεσοσκοπικό (υλικό) και μικροσκοπικό (ουσίες). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 23 της μελέτης, η διαχείριση των αποβλήτων των φωτοβολταϊκών πάνελ μπορεί να ταξινομηθεί σε τρία επίπεδα: μακροσκοπικό, μεσοσκοπικό και μικροσκοπικό. Στο μακροσκοπικό επίπεδο,

τα απόβλητα εξετάζονται με βάση το προϊόν ως σύνολο, δηλαδή το είδος του φωτοβολταϊκού πάνελ, όπως πυριτικά (c-Si), άμορφα (a-Si), οργανικά (OPV) και σύνθετα πάνελ τελουριούχου καδμίου (CdTe) ή χαλκού-ινδίου-γαλλίου-σεληνίου (CIGS). Στο μεσοσκοπικό επίπεδο, η ανάλυση εστιάζει στα επιμέρους εξαρτήματα του φωτοβολταϊκού πάνελ, όπως η κατασκευαστική δομή, οι ηλιακές κυψέλες, το πλαίσιο αλουμινίου και ο μετατροπέας.

Σε αυτή τη φάση, γίνεται προσπάθεια ανακύκλωσης των συστατικών που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, μειώνοντας την ανάγκη για πρωτογενή υλικά. Τέλος, στο μικροσκοπικό επίπεδο, η διαχείριση αφορά τα επιμέρους υλικά και ουσίες που απαρτίζουν το πάνελ, όπως το γυαλί, το EVA, τα μέταλλα και τα πολυμερή. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις κρίσιμες πρώτες ύλες, όπως το ασήμι (Ag), το αλουμίνιο (Al), ο χαλκός (Cu) και ο μόλυβδος (Pb), τα οποία μπορούν να ανακτηθούν μέσω εξειδικευμένων τεχνολογιών ανακύκλωσης. Αυτό το μοντέλο πολυεπίπεδης διαχείρισης βοηθά στη βελτιστοποίηση της ανάκτησης πολύτιμων υλικών, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών αποβλήτων και προωθώντας την ένταξή τους στην κυκλική οικονομία. Η ανάλυση πολιτικών και κανονισμών καταδεικνύει ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει υιοθετήσει τις πιο προοδευτικές στρατηγικές, θέτοντας στόχους ανάκτησης 85% και ανακύκλωσης 80% για τα Φ/Β απόβλητα. Αντίστοιχα, άλλες χώρες, όπως οι ΗΠΑ, η Κίνα και η Ιαπωνία, έχουν εισαγάγει νομοθετικές ρυθμίσεις που επιδιώκουν να βελτιώσουν τη διαχείριση των αποβλήτων Φ/Β συστημάτων. Η μελέτη των Mahmoudi et al. (2021) προτείνει την ανάπτυξη υποδομών για την ανακύκλωση και τη δημιουργία οικονομικών κινήτρων που θα ενθαρρύνουν τη συμμετοχή των παραγωγών στην κυκλική οικονομία.



Εικόνα 23. Διαβάθμιση των αποβλήτων φωτοβολταϊκών σε τρία επίπεδα διαχείρισης: μακροσκοπικό, μεσοσκοπικό και μικροσκοπικό. Πηγή: (Mahmoudi et al. 2021)

4.4. Φυσικές Μέθοδοι Ανακύκλωσης

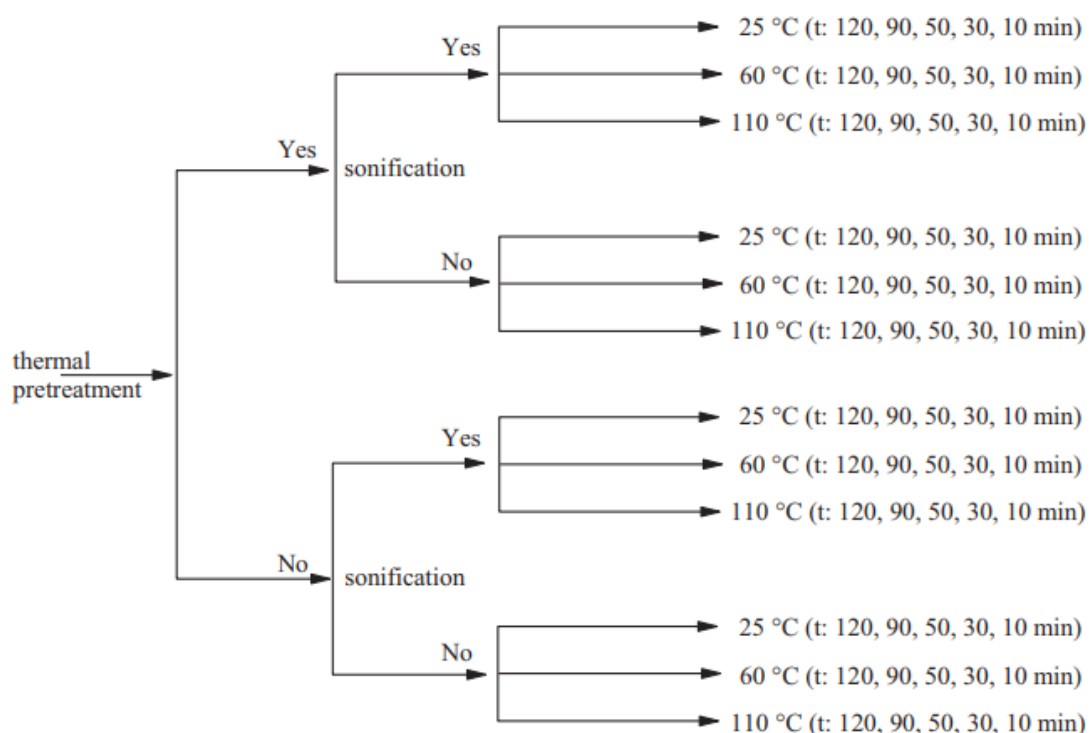
Η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ αποτελεί κρίσιμη πρόκληση για τη βιωσιμότητα της ηλιακής ενέργειας, καθώς η αυξανόμενη εγκατάστασή τους συνεπάγεται την παραγωγή μεγάλου όγκου αποβλήτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Η πολυσύνθετη δομή των πάνελ, που περιλαμβάνει υλικά όπως γυαλί, πυρίτιο, πλαστικά και μέταλλα υψηλής αξίας, καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη αποτελεσματικών τεχνολογιών ανακύκλωσης. Οι υπάρχουσες μέθοδοι ανακύκλωσης μπορούν να διαχωριστούν σε φυσικές, θερμικές και χημικές διεργασίες. Οι φυσικές μέθοδοι περιλαμβάνουν μηχανικές διαδικασίες, όπως σύνθλιψη και διαχωρισμό υλικών, επιτρέποντας την ανάκτηση του γυαλιού και των μετάλλων. Από την άλλη, οι θερμικές και χημικές τεχνικές στοχεύουν στην αποδόμηση των πολυμερών και την ανάκτηση κρίσιμων πρώτων υλών. Η παρούσα ενότητα εξετάζει τις κύριες τεχνολογικές προσεγγίσεις που εφαρμόζονται στην ανακύκλωση φωτοβολταϊκών

πάνελ, με έμφαση στις φυσικές μεθόδους, οι οποίες αποτελούν το πρώτο στάδιο επεξεργασίας και ανακύκλωσης των Φ/Β αποβλήτων.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Azeumo et al. (2019), οι φωτοβολταϊκές (Φ/Β) μονάδες στο τέλος της ζωής τους μπορεί να ταξινομηθούν ως επικίνδυνα απόβλητα, λόγω της παρουσίας τοξικών υλικών και της χαμηλής βιοδιασπασιμότητας των απορριμμάτων. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται ειδική επεξεργασία πριν την τελική διάθεση, σύμφωνα με τη νομοθεσία. Η μελέτη επικεντρώθηκε στην ανακύκλωση πολυκρυσταλλικών πυριτικών Φ/Β μονάδων μέσω φυσικών και χημικών διεργασιών. Η φυσική μέθοδος στόχευσε στην ανάκτηση του γυαλιού, των μετάλλων και της πολυβινυλοφθοριδικής (PVF) μεμβράνης. Οι μονάδες θρυμματίστηκαν με μαχαίρι άλεσης και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε διαδικασίες διαχωρισμού με βαρέα μέσα, άλεση και κοσκίνισμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ανακτήθηκε το 76% του γυαλιού και το 100% των μετάλλων, με καθαρότητα περίπου 100% και 67% αντίστοιχα. Η χημική διαδικασία είχε στόχο την απομάκρυνση του EVA (αιθυλένιο-βινυλοξικό αιθυλεστέρα), το οποίο συνδέει τα διάφορα στρώματα της μονάδας. Οι δοκιμές έδειξαν ότι η καλύτερη μέθοδος διάλυσης του EVA ήταν η χρήση τολουολίου ως διαλύτη σε θερμοκρασία 60°C, σε συνδυασμό με υπερήχους ισχύος 200 W.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 24, η διάλυση του EVA σε αυτές τις συνθήκες ολοκληρώθηκε μέσα σε λιγότερο από 60 λεπτά. Συγκεκριμένα, η διαδικασία απομάκρυνσης του EVA από φωτοβολταϊκά πάνελ περιλαμβάνει διάφορα στάδια θερμικής και υπερηχητικής προεπεξεργασίας. Αρχικά, τα δείγματα υποβάλλονται ή όχι σε θερμική προεπεξεργασία, γεγονός που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της επόμενης φάσης. Στη συνέχεια, εξετάζεται η χρήση υπερήχων (sonification) ως επιπλέον μέτρο διάλυσης του EVA, καθώς μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία αποσύνθεσης. Η τελική απομάκρυνση πραγματοποιείται σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (25°C, 60°C και 110°C), ενώ κάθε πείραμα εκτελείται για διαφορετικά χρονικά διαστήματα (120, 90, 50, 30 και 10 λεπτά). Αυτή η δομή επιτρέπει τη σύγκριση των διαφορετικών συνθηκών και την αξιολόγηση της αποδοτικότερης μεθόδου διάλυσης του EVA. Η ανάλυση αυτής της διαδικασίας είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ, καθώς η πλήρης απομάκρυνση του EVA επιτρέπει την εύκολη ανάκτηση πολύτιμων υλικών, όπως το γυαλί και τα μέταλλα, μειώνοντας την περιβαλλοντική επιβάρυνση. Τα ευρήματα της

μελέτης των Azeumo et al. (2019) δείχνουν ότι η φυσική ανακύκλωση είναι αποτελεσματική για την ανάκτηση πρώτων υλών, αλλά η χημική προσέγγιση μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην πλήρη αποσύνθεση των Φ/Β μονάδων και στη βελτίωση της ανακύκλωσης των πολύτιμων μετάλλων.



Εικόνα 24. Διαβάθμιση των αποβλήτων φωτοβολταϊκών σε τρία επίπεδα διαχείρισης: μακροσκοπικό, μεσοσκοπικό και μικροσκοπικό. Πηγή: (Azeumo et al. 2019)

Σύμφωνα με τη μελέτη των Granata et al. (2014), η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πάνελ αποτελεί βασική πρόκληση για την αειφόρο ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας. Η μελέτη επικεντρώθηκε στη φυσική προεπεξεργασία και στον διαχωρισμό των υλικών από διάφορους τύπους Φ/Β μονάδων, συμπεριλαμβανομένων των πολυκρυσταλλικών, άμορφου πυριτίου και τελουριούχου καδμίου (CdTe). Δύο εναλλακτικές φυσικές μέθοδοι ανακύκλωσης εξετάστηκαν: η σύνθλιψη με περιστροφικές λεπίδες και στη συνέχεια θερμική επεξεργασία, καθώς και η σύνθλιψη με περιστροφικές λεπίδες ακολουθούμενη από σύνθλιψη με σφυριά. Οι αναλύσεις των τελικών προϊόντων πραγματοποιήθηκαν μέσω διανομής μεγέθους κόκκων, περίθλασης ακτίνων X (XRD) και φθορισμού ακτίνων X (XRF). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συνδυασμένη μέθοδος περιστροφικής σύνθλιψης και σύνθλιψης με σφυριά ήταν η πλέον αποδοτική για την ανάκτηση γαλιού, επιτυγχάνοντας ποσοστό

ανάκτησης 85%. Σύμφωνα με τους Granata et al. (2014), η θερμική επεξεργασία στους 650°C για μία ώρα αποσυνέθεσε το EVA, απελευθερώνοντας καθαρό γυαλί και μειώνοντας το ποσοστό ακαθαρσιών. Επιπλέον, η ανάλυση των παραγόμενων κλασμάτων έδειξε ότι τα λεπτόκοκκα υλικά περιείχαν πυρίτιο και άλλα μέταλλα, τα οποία θα μπορούσαν να ανακτηθούν μέσω περαιτέρω επεξεργασίας. Οι Granata et al. (2014) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι φυσικές μέθοδοι επεξεργασίας μπορούν να προσφέρουν μια οικονομικά και περιβαλλοντικά αποδοτική λύση για την ανακύκλωση των Φ/Β πάνελ, με υψηλή αποδοτικότητα στην ανάκτηση γυαλιού και τη μείωση των αποβλήτων.

4.5. Χημικές και Θερμικές Μέθοδοι Ανακύκλωσης

Η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ αποτελεί μια από τις βασικότερες προκλήσεις στη διαχείριση των αποβλήτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς τα πάνελ περιέχουν πολύτιμα αλλά και δυνητικά επικίνδυνα υλικά. Οι χημικές και θερμικές μέθοδοι ανακύκλωσης παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανάκτηση αυτών των υλικών, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίησή τους και τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Οι χημικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τη χρήση υδρομεταλλουργικών και πυρομεταλλουργικών τεχνικών για την απομάκρυνση πολύτιμων μετάλλων και ημιαγωγών, ενώ οι θερμικές μέθοδοι βασίζονται στη θερμική αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων, διευκολύνοντας τον διαχωρισμό των υλικών. Παρότι αυτές οι μέθοδοι είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές, η εφαρμογή τους συνοδεύεται από προκλήσεις, όπως το υψηλό κόστος επεξεργασίας και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη χρήση χημικών διαλυτών ή την εκπομπή τοξικών αερίων. Ωστόσο, η βελτίωση των τεχνολογιών επεξεργασίας και η αυστηροποίηση των κανονισμών για τη διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων καθιστούν τις χημικές και θερμικές μεθόδους ολοένα και πιο αναγκαίες στη σύγχρονη κυκλική οικονομία.

Η μελέτη των Padoan et al. (2019) εστιάζει στις χημικές μεθόδους ανακύκλωσης των Φ/Β πάνελ στο τέλος του κύκλου ζωής τους, αναλύοντας τη βιωσιμότητα διαφορετικών τεχνολογιών από οικονομική και περιβαλλοντική σκοπιά. Οι ερευνητές αναλύουν διάφορες υδρομεταλλουργικές και πυρομεταλλουργικές διεργασίες για την ανάκτηση πολύτιμων υλικών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η χρήση θειικού οξέος (H_2SO_4) και υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) ως διαλύτες επιτρέπει την

αποτελεσματική ανάκτηση αργύρου (Ag) και πυριτίου (Si). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης των Padoan et al. (2019), η διαδικασία αυτή αποφέρει ποσοστό ανάκτησης 92% για το ασήμι και 85% για το πυρίτιο. Παρά την αποτελεσματικότητα αυτών των μεθόδων, οι Padoan et al. (2019) επισημαίνουν τις προκλήσεις που σχετίζονται με το υψηλό κόστος των διαλυτών και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Προτείνεται η ανάπτυξη λιγότερο τοξικών εναλλακτικών, καθώς και η ενίσχυση πολιτικών κινήτρων για την ενσωμάτωση των χημικών διεργασιών ανακύκλωσης στην κυκλική οικονομία.

Η μελέτη των Savvilotidou et al. (2017) διερευνά την τοξικότητα και τις δυνατότητες ανακύκλωσης για τα φωτοβολταϊκά πάνελ άμορφου πυριτίου (a-Si) και χαλκού-ινδίου-σεληνίου (CIS), εστιάζοντας σε χημικές μεθόδους διαχωρισμού και ανάκτησης πολύτιμων υλικών. Η έρευνα περιλαμβάνει πειράματα με χημική αποικοδόμηση των πάνελ χρησιμοποιώντας διαφορετικά οξέα (θειικό, γαλακτικό και υδροχλωρικό) για τη διάλυση της ρητίνης EVA, επιτρέποντας την ανάκτηση των υλικών του πάνελ. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης των Savvilotidou et al. (2017), η θειική και γαλακτική οξύ παρουσίασαν την καλύτερη απόδοση, επιτυγχάνοντας αποτελεσματική διάλυση της EVA σε ήπιες θερμοκρασίες, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας. Η ανάλυση των αποβλήτων μέσω ICP-MS έδειξε ότι τα CIS πάνελ περιέχουν σημαντικές ποσότητες ινδίου και γαλλίου, τα οποία θεωρούνται κρίσιμα υλικά.

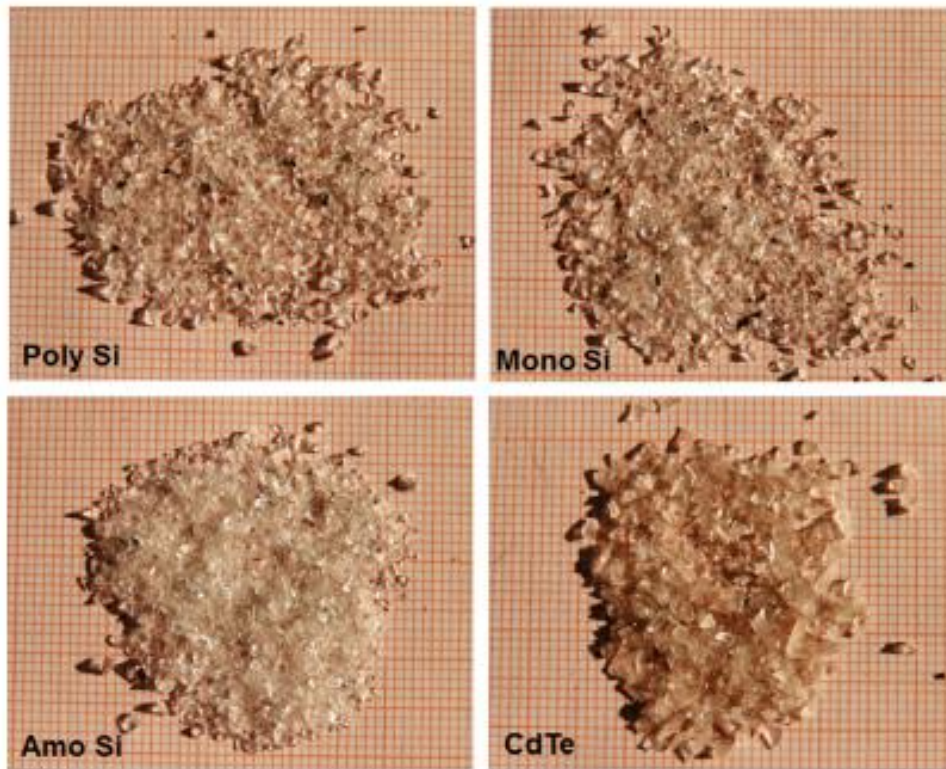
Οι Savvilotidou et al. (2017) εκτιμούν ότι μέχρι το 2035, τα απόβλητα των φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη θα φτάσουν τους 3.000.000 τόνους, εκ των οποίων 45.000 τόνοι θα ανήκουν στην κατηγορία των CIS πάνελ. Συνεπώς, οι Savvilotidou et al. (2017) υπογραμμίζουν την ανάγκη ανάπτυξης βιώσιμων στρατηγικών ανακύκλωσης που θα συνδυάζουν την υψηλή απόδοση ανάκτησης υλικών με τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

Η μελέτη των Pagnanelli et al. (2017) αναλύει μια ολοκληρωμένη, αυτοματοποιημένη μέθοδο ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ, εφαρμόσιμη σε διαφορετικές τεχνολογίες (πυριτίου, CdTe, CIS). Η μέθοδος περιλαμβάνει φυσική και χημική επεξεργασία, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ανάκτησης υλικών. Η διαδικασία περιλαμβάνει τριπλή σύνθλιψη, θερμική επεξεργασία και χημική εκχύλιση. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 25, τα ανακτηθέντα υλικά από διαφορετικούς τύπους

φωτοβολταϊκών πάνελ ποικίλλουν σε υφή και σύσταση, ανάλογα με τη φύση των υλικών κατασκευής τους.

Η Εικόνα 25 παρουσιάζει τέσσερις κατηγορίες φωτοβολταϊκών αποβλήτων μετά από τριπλή σύνθλιψη: πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (Poly Si), μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (Mono Si), άμορφο πυρίτιο (Amo Si) και τελουριούχο κάδμιο (CdTe). Η φυσική επεξεργασία μέσω σύνθλιψης επιτρέπει τον διαχωρισμό των υλικών σε διαφορετικά μεγέθη κόκκων, γεγονός που διευκολύνει την περαιτέρω διαδικασία ανάκτησης πολύτιμων στοιχείων μέσω χημικών και θερμικών μεθόδων. Η ανάλυση αυτών των κλασμάτων δείχνει ότι το ποσοστό ανάκτησης του γυαλιού είναι ιδιαίτερα υψηλό, ενώ τα μικρότερα σωματίδια περιέχουν πολύτιμα μέταλλα που μπορούν να εξορυχθούν μέσω υδρομεταλλουργικών ή πυρομεταλλουργικών διεργασιών. Η διαφοροποίηση στην εμφάνιση και τη δομή των υλικών αντικατοπτρίζει την ποικιλία των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά πάνελ και την ανάγκη προσαρμοσμένων μεθόδων επεξεργασίας για τη βέλτιστη αξιοποίηση των αποβλήτων. Τα αποτελέσματα της μελέτης των Pagnanelli et al. (2017) έδειξαν ότι η διαδικασία σύνθλιψης παράγει τρεις διαφορετικές κατηγορίες αποβλήτων: γυαλί (17% κ.β.), χονδροειδή κλάσματα (>1mm, 62% κ.β.) και λεπτόκοκκα κλάσματα (<0.4mm, 20% κ.β.).

Η θερμική επεξεργασία επέτρεψε την ανάκτηση επιπλέον 52% γυαλιού, ενώ η χημική εκχύλιση των λεπτόκοκκων αποβλήτων πέτυχε την ανάκτηση 91% των πολύτιμων μετάλλων. Οι Pagnanelli et al. (2017) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ο συνδυασμός φυσικών και χημικών μεθόδων επιτρέπει υψηλή απόδοση ανάκτησης υλικών, μειώνοντας τα απόβλητα που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικούς τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ, παρέχοντας μια ευέλικτη λύση για τη διαχείριση των αποβλήτων.

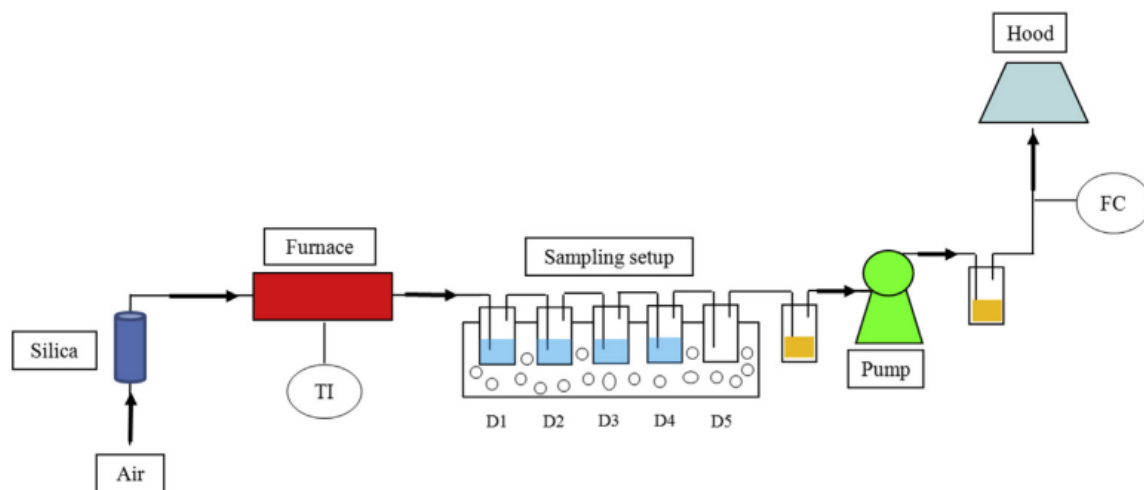


Εικόνα 25. Ενδιάμεσα κλάσματα (0.4-1 mm) που ανακτήθηκαν μετά από τριπλή σύνθλιψη διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών πάνελ. Πηγή: (Pagnanelli et al., 2017)

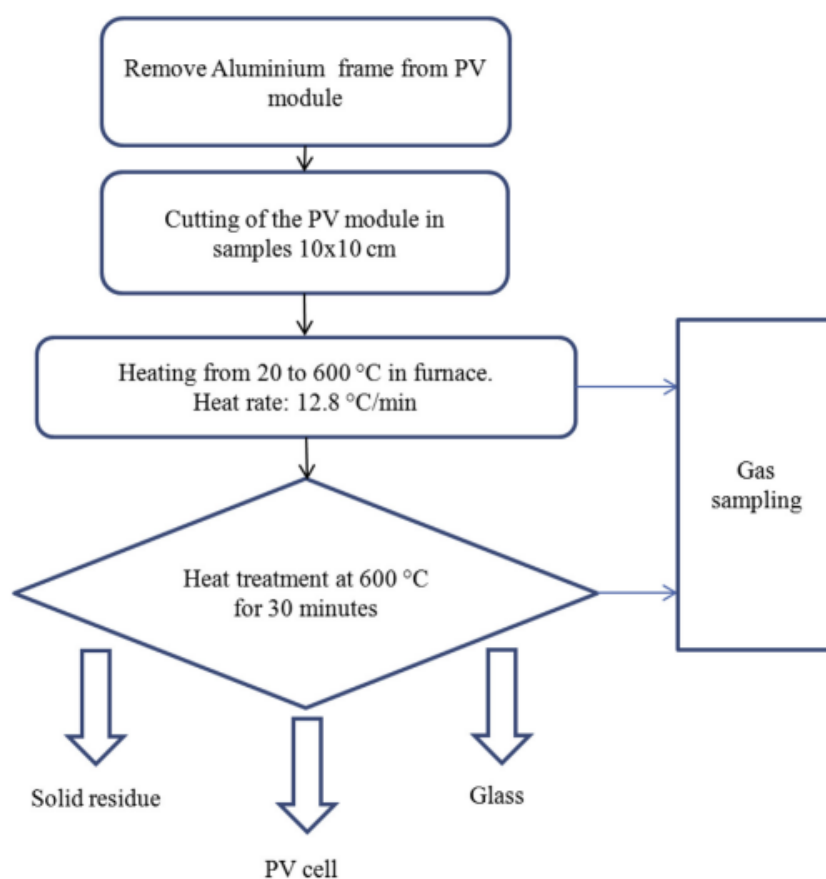
Η μελέτη των Tammaro et al. (2015) εξετάζει τη θερμική επεξεργασία των αποβλήτων φωτοβολταϊκών πάνελ ως μέθοδο ανάκτησης υλικών, εστιάζοντας στις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε τρία δείγματα πάνελ που θερμάνθηκαν σε φούρνο στους 600°C για 30 λεπτά, προκειμένου να επιτευχθεί η πλήρης αποδόμηση της EVA. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμική επεξεργασία επιτρέπει την απομάκρυνση της EVA και τη διαχωριστική ανάκτηση των υλικών, ωστόσο συνοδεύεται από την εκπομπή επικίνδυνων μετάλλων, όπως κάδμιο (Cd), μόλυβδο (Pb) και χρώμιο (Cr) (Tammaro et al., 2015). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 26, η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει έναν φούρνο (Furnace) όπου πραγματοποιείται η θερμική επεξεργασία των φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Ο αέρας εισέρχεται μέσω μιας δεξαμενής με διοξείδιο του πυριτίου (Silica) και στη συνέχεια διέρχεται από τον φούρνο, όπου θερμαίνεται σε ελεγχόμενη θερμοκρασία, όπως δείχνει ο δείκτης θερμοκρασίας (TI). Μετά τη θέρμανση, τα αέρια προϊόντα δειγματοληπτούνται μέσω ενός συστήματος συλλογής που περιλαμβάνει πέντε Drechsel φιάλες (D1-D5), ενώ μια αντλία (Pump) ρυθμίζει τη ροή των αερίων προς έναν μετρητή ροής (FC) πριν διοχετευθούν προς το απαγωγικό σύστημα (Hood).

Αυτή η διάταξη επιτρέπει τη μελέτη της σύστασης των αερίων που εκπέμπονται κατά την επεξεργασία των φωτοβολταϊκών πάνελ, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για την πιθανή περιβαλλοντική επιβάρυνση. Η διαδικασία της θερμικής επεξεργασίας των φωτοβολταϊκών πάνελ περιλαμβάνει διάφορα στάδια (Εικόνα 27). Αρχικά, το αλουμινένιο πλαίσιο αφαιρείται από το φωτοβολταϊκό πάνελ και το υπόλοιπο τμήμα κόβεται σε δείγματα διαστάσεων 10x10 cm.

Στη συνέχεια, τα δείγματα θερμαίνονται σταδιακά από τους 20°C στους 600°C σε φούρνο, με ρυθμό θέρμανσης 12,8°C ανά λεπτό. Αφού επιτευχθεί η θερμοκρασία των 600°C, πραγματοποιείται θερμική επεξεργασία διάρκειας 30 λεπτών, κατά την οποία τα πάνελ διασπώνται σε στερεά κατάλοιπα, γυαλί και διαχωρισμένες ηλιακές κυψέλες. Παράλληλα, πραγματοποιείται δειγματοληψία των παραγόμενων αερίων, ώστε να αναλυθούν οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκπομπή επιβλαβών ουσιών. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων υλικών, όπως το γυαλί και το πυρίτιο, συμβάλλοντας στη βελτίωση της απόδοσης της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Σύμφωνα με τους Tammaro et al. (2015), η ανάλυση των αερίων εκπομπών κατέδειξε την παρουσία βαρέων μετάλλων, υπογραμμίζοντας την ανάγκη χρήσης αποτελεσματικών φίλτρων στις εγκαταστάσεις ανακύκλωσης. Επιπλέον, η τεχνική αυτή επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων, όπως το ασήμι (Ag), το οποίο βρέθηκε σε υψηλές συγκεντρώσεις στα κατάλοιπα της τέφρας. Παράλληλα, τα επικίνδυνα στοιχεία στις εκπομπές καθιστούν απαραίτητη την εφαρμογή αυστηρών περιβαλλοντικών πρωτοκόλλων. Τέλος, οι Tammaro et al. (2015) προτείνουν τη συνδυαστική χρήση θερμικών και χημικών μεθόδων για την ανακύκλωση των Φ/Β πάνελ, καθώς και τη βελτίωση των συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων ώστε να μειωθεί η ρύπανση και να βελτιστοποιηθεί η ανάκτηση υλικών.



Εικόνα 26. Πειραματική διάταξη για τη θερμική επεξεργασία των φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Πηγή: (Tammaro et al., 2015)



Εικόνα 27. Διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας θερμικής επεξεργασίας φωτοβολταϊκών πάνελ. Πηγή: (Tammaro et al., 2015)

4.6. Καινοτόμες Μέθοδοι Ανακύκλωσης

Η διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που σχετίζονται με τη βιωσιμότητα της ηλιακής ενέργειας. Καθώς η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συνεχίζει να αυξάνεται, η ανάγκη για αποδοτικές και βιώσιμες μεθόδους ανακύκλωσης γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική. Οι παραδοσιακές μέθοδοι ανακύκλωσης, όπως η μηχανική σύνθλιψη και η θερμική επεξεργασία, αν και αποδοτικές στην ανάκτηση βασικών υλικών, παρουσιάζουν περιορισμούς ως προς τη συνολική απόδοση και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της διαδικασίας. Η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών ανακύκλωσης στοχεύει στη βελτίωση της αποδοτικότητας ανάκτησης πολύτιμων υλικών, όπως το πυρίτιο, το ασήμι και ο χαλκός, ενώ παράλληλα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαδικασίας. Νέες τεχνολογίες, όπως οι υβριδικές μέθοδοι που συνδυάζουν τη χρήση λέιζερ με παλμούς υψηλής τάσης, οι βελτιωμένες υδρομεταλλουργικές διεργασίες και η εφαρμογή οικολογικού σχεδιασμού (eco-design), δίνουν τη δυνατότητα για πιο βιώσιμες λύσεις στην ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Οι μελέτες που παρουσιάζονται στη συνέχεια εστιάζουν σε σύγχρονες καινοτόμες προσεγγίσεις, οι οποίες μπορούν να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα της ανακύκλωσης και να καταστήσουν τη διαδικασία πιο οικονομικά βιώσιμη. Η ερευνητική κοινότητα προτείνει τη σταδιακή μετάβαση προς βιομηχανικά εφαρμόσιμες μεθόδους, οι οποίες θα επιτρέψουν την αξιοποίηση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων ως δευτερογενών πρώτων υλών, συμβάλλοντας στην κυκλική οικονομία και στη μείωση της εξάρτησης από νέες πρώτες ύλες.

Η μελέτη των Ali et al. (2024) εξετάζει τις διαθέσιμες μεθόδους μηχανικής ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών αποβλήτων και προτείνει έναν νέο υβριδικό συνδυασμό λέιζερ και παλμών υψηλής τάσης (Laser and High Voltage Pulse - L&HVP) για την αποτελεσματικότερη ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ. Η ανάλυση των Ali et al. (2024) έδειξε ότι οι υπάρχουσες μηχανικές μέθοδοι, όπως η άλεση, ο ηλεκτροστατικός διαχωρισμός και η κοπή με υδροβολή, δεν επαρκούν από μόνες τους για την ολοκληρωμένη ανάκτηση υλικών. Η προτεινόμενη υβριδική μέθοδος συνδυάζει τη χρήση λέιζερ για την απομάκρυνση του EVA, διευκολύνοντας έτσι τον διαχωρισμό των υλικών. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η τεχνική των παλμών

υψηλής τάσης, η οποία επιτρέπει την αποδοτικότερη διάσπαση των υλικών και την ελαχιστοποίηση των προσμείξεων. Σύμφωνα με τις προβλέψεις των Ali et al. (2024), η μέθοδος αυτή έχει τη δυνατότητα να αυξήσει σημαντικά την αποδοτικότητα ανάκτησης των υλικών, μειώνοντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 28 της μελέτης, η διαδικασία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ μέσω της μεθόδου Laser and High Voltage Pulse (L&HVP) αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση που συνδυάζει τεχνολογίες αφαίρεσης υλικών και μηχανικής διάσπασης για τη βελτιστοποίηση της ανάκτησης πολύτιμων στοιχείων. Στο αρχικό στάδιο, αφαιρούνται μηχανικά τα βασικά εξαρτήματα του πάνελ, όπως το αλουμινένιο πλαίσιο, η καλωδίωση, το κουτί διασύνδεσης και οι συνδετήρες. Στη συνέχεια, η χρήση λέιζερ επιτρέπει την απορρόφηση ενέργειας από το συγκολλητικό υλικό, αδυνατίζοντας τη σύνδεσή του με τα υπόλοιπα υλικά και διευκολύνοντας την αποκόλληση του EVA. Ακολουθεί η διαχωριστική επεξεργασία των επιμέρους υλικών, διαχωρίζοντας το γυαλί από τα υπόλοιπα συστατικά. Στο επόμενο στάδιο, εφαρμόζεται η τεχνολογία των παλμών υψηλής τάσης, η οποία επιτρέπει την αρχική θραύση των υλικών και τον σταδιακό διαχωρισμό μέσω τεχνικών πυκνότητας.

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια πυκνής μέσης διαχωρισμού (Dense Medium Separation - DMS), όπου επιτυγχάνεται η ανάκτηση μετάλλων και αργύρου με υψηλή καθαρότητα. Ο συνδυασμός της χρήσης λέιζερ με την τεχνολογία υψηλής τάσης καθιστά τη διαδικασία πιο αποδοτική, μειώνοντας τις προσμείξεις και αυξάνοντας το ποσοστό ανάκτησης των πολύτιμων υλικών από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Σύμφωνα με τους Ali et al. (2024), η εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου αναμένεται να επιτύχει υψηλότερα ποσοστά ανάκτησης σε σχέση με τις υπάρχουσες τεχνικές. Επίσης, προτείνουν περαιτέρω πειραματική έρευνα για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, καθώς και τη δυνατότητα εμπορικής εφαρμογής της μεθόδου σε βιομηχανική κλίμακα. Εάν αποδειχθεί αποτελεσματική, η νέα τεχνολογία θα μπορούσε να συμβάλει σημαντικά στη βιώσιμη διαχείριση των φωτοβολταϊκών αποβλήτων στο μέλλον.

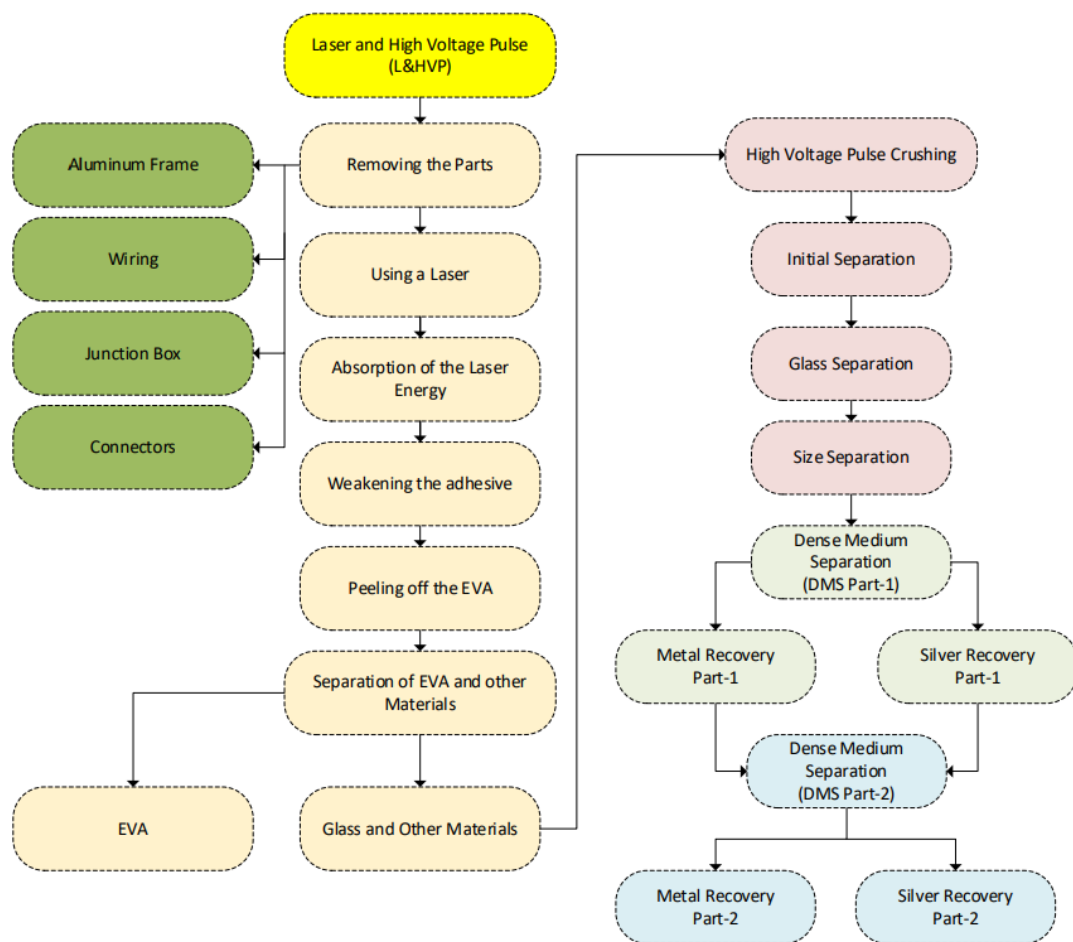


Figure 22. L&HVP Crushing Process.

Εικόνα 28. Διάγραμμα της διαδικασίας θραύσης L&HVP για την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πάνελ.

Πηγή: (Ali et al. 2024)

Η μελέτη των Tao & Yu (2015) διερευνά τις βιώσιμες διαδρομές ανακύκλωσης και τις διαθέσιμες τεχνολογίες για τη διαχείριση των αποβλήτων φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων. Οι ερευνητές κατηγοριοποιούν τις διαδρομές ανακύκλωσης σε τρεις κύριες κατηγορίες: ανακύκλωση αποβλήτων παραγωγής, ανακατασκευή και επαναχρησιμοποίηση μονάδων και ανακύκλωση πάνελ στο τέλος του κύκλου ζωής τους (Tao & Yu, 2015). Οι Tao & Yu (2015) υπογραμμίζουν ότι η ανακύκλωση των αποβλήτων παραγωγής Φ/Β μπορεί να είναι αποτελεσματική, δεδομένου ότι πολλά από τα απόβλητα που παράγονται κατά τη διαδικασία κατασκευής είναι καθαρά και εύκολα επεξεργάσιμα. Επιπλέον, εξετάζουν την ανακύκλωση των Φ/Β πάνελ στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Παρουσιάζουν παραδείγματα εμπορικά διαθέσιμων τεχνολογιών, όπως η μηχανική επεξεργασία (σύνθλιψη και διαχωρισμός), η θερμική αποδόμηση της EVA (Ethylene Vinyl Acetate) και η υδρομεταλλουργική ανάκτηση

μετάλλων, όπως το ασήμι και ο χαλκός. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της μελέτης τους, η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών σε βιομηχανική κλίμακα εξακολουθεί να είναι οικονομικά δύσκολη, λόγω του υψηλού κόστους επεξεργασίας και της έλλειψης κατάλληλων δικτύων συλλογής. Οι Tao & Yu (2015) επισημαίνουν ότι η οικονομική βιωσιμότητα της ανακύκλωσης των Φ/Β μονάδων εξακολουθεί να είναι αρνητική χωρίς κρατικές επιδοτήσεις ή ρυθμιστικές πολιτικές που να υποχρεώνουν τους κατασκευαστές να διαχειρίζονται τα απόβλητά τους.

4.7. Οικονομική και Περιβαλλοντική Ανάλυση Ανακύκλωσης

Η ραγδαία ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων έχει οδηγήσει σε μια αυξανόμενη ανησυχία σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων τους, καθώς ο αριθμός των πάνελ που φτάνουν στο τέλος της ζωής τους αυξάνεται σημαντικά. Η ανάγκη για βιώσιμες πρακτικές ανακύκλωσης δεν περιορίζεται μόνο στην περιβαλλοντική διάσταση του ζητήματος, αλλά επεκτείνεται και στις οικονομικές προκλήσεις που συνοδεύουν τη διαδικασία ανάκτησης υλικών. Οι διάφορες τεχνολογίες ανακύκλωσης που έχουν αναπτυχθεί παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις τόσο ως προς το κόστος τους όσο και ως προς την αποτελεσματικότητά τους στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ανακύκλωση των Φ/Β πάνελ μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων και στη μείωση της τοξικότητας των αποβλήτων. Ωστόσο, η οικονομική βιωσιμότητα της ανακύκλωσης παραμένει μια ανοιχτή πρόκληση, καθώς οι υφιστάμενες διαδικασίες συχνά συνεπάγονται υψηλό κόστος και απαιτούν τεχνολογικές επενδύσεις.

Παράλληλα, το νομοθετικό πλαίσιο διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην προώθηση ή την επιβράδυνση των πρωτοβουλιών ανακύκλωσης, με ορισμένες χώρες να έχουν θεσπίσει υποχρεωτικά συστήματα ανάκτησης υλικών, ενώ άλλες βρίσκονται ακόμη στα πρώτα στάδια ανάπτυξης τέτοιων στρατηγικών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μελέτες που διερευνούν την οικονομική βιωσιμότητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαφορετικών μεθόδων ανακύκλωσης Φ/Β πάνελ. Συγκεκριμένα, αναλύεται η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων, το κόστος και η αποδοτικότητα των διαθέσιμων τεχνολογιών, καθώς και οι προτάσεις για τη βελτίωση των υπαρχόντων συστημάτων μέσω κινήτρων και πολιτικών υποστήριξης.

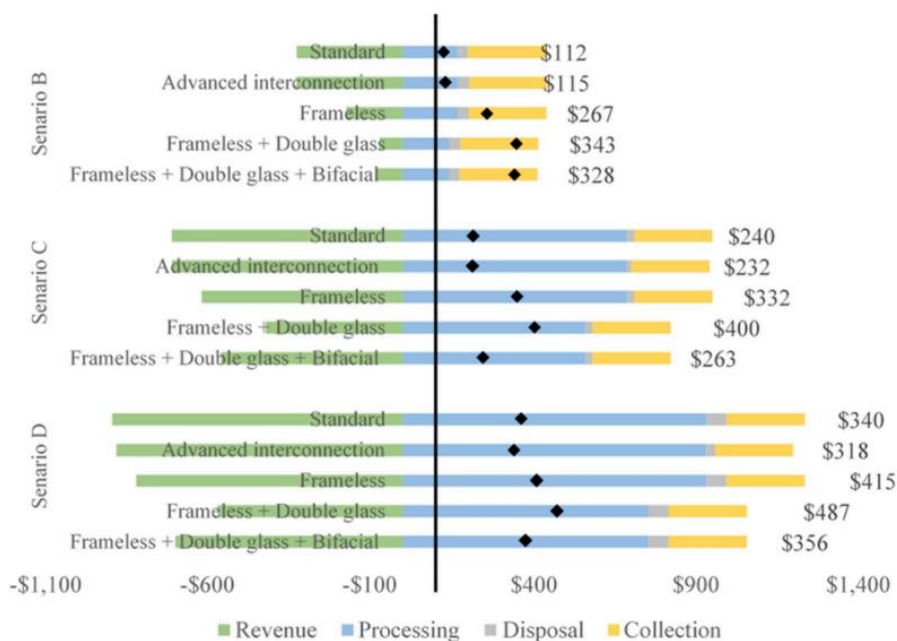
Σύμφωνα με τη μελέτη των Deng et al. (2019), η διαχείριση των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) αποβλήτων αποτελεί κρίσιμη περιβαλλοντική πρόκληση λόγω της ταχείας ανάπτυξης της ηλιακής ενέργειας. Παρά τη διάρκεια ζωής των Φ/Β μονάδων που κυμαίνεται μεταξύ 25-30 ετών, η ανάλυση κύκλου ζωής δείχνει ότι η απόρριψή τους μέσω υγειονομικής ταφής δεν είναι βιώσιμη, καθώς προβλέπεται ότι έως το 2050 ο όγκος των αποβλήτων θα φτάσει τους 60-78 εκατομμύρια τόνους.

Η μελέτη των Deng et al. (2019), επικεντρώθηκε στη σύγκριση τριών κύριων μεθόδων ανακύκλωσης: ανακύκλωση γυαλιού, μηχανική ανακύκλωση και θερμική επεξεργασία. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ανακύκλωση του γυαλιού αποτελεί τη λιγότερο δαπανηρή επιλογή, καθώς το γυαλί ανακτάται σε ποσοστό 85-90%. Ωστόσο, η αξία των ανακτηθέντων υλικών είναι χαμηλή, καθιστώντας τη μέθοδο αυτή μη ελκυστική από οικονομική σκοπιά. Η μηχανική ανακύκλωση περιλαμβάνει τεμαχισμό και διαχωρισμό των εξαρτημάτων των μονάδων, με στόχο την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων, όπως το ασήμι και το αλουμίνιο. Η διαδικασία αυτή προσφέρει υψηλότερη οικονομική αξία, αλλά συνοδεύεται από αυξημένο κόστος επεξεργασίας. Η θερμική επεξεργασία, από την άλλη, περιλαμβάνει την καύση πολυμερών και τη χρήση υψηλών θερμοκρασιών για την ανάκτηση υλικών, μειώνοντας έτσι τον όγκο των αποβλήτων, αλλά με σημαντικό περιβαλλοντικό κόστος.

Στην Εικόνα 29, παρουσιάζεται μια αναλυτική σύγκριση του κόστους και των εσόδων από την ανακύκλωση πέντε διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών πάνελ πυριτίου (Si PV) μέσω τριών διαφορετικών μεθόδων (Σενάρια B-D). Τα δεδομένα περιλαμβάνουν τέσσερις βασικές συνιστώσες κόστους: συλλογή (γκρι χρώμα), επεξεργασία (μπλε χρώμα), διάθεση (κίτρινο χρώμα) και έσοδα από την ανάκτηση υλικών (πράσινο χρώμα). Επιπλέον, τα μαύρα διαμάντια αντιπροσωπεύουν το καθαρό κόστος ανακύκλωσης για κάθε περίπτωση, ενώ η κάθετη μαύρη γραμμή στα -100\$/τόνο αποτελεί το κόστος ταφής, το οποίο χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς. Στο Σενάριο B, το συνολικό κόστος ανακύκλωσης είναι σχετικά χαμηλό, με τις περισσότερες περιπτώσεις να κυμαίνονται κάτω από τα 350\$. Για παράδειγμα, τα τυπικά πάνελ (Standard) αποφέρουν 112\$ έσοδο, ενώ τα πάνελ με προηγμένο διασυνδεδεμένο σύστημα (Advanced interconnection) αποφέρουν 115\$. Τα πλαίσια χωρίς γυαλί (Frameless) έχουν μεγαλύτερο καθαρό κόστος, με ανακυκλωμένα υλικά να αποδίδουν 267\$, ενώ τα διπλού γυαλιού + bifacial επιτυγχάνουν 343\$ και 328\$

αντίστοιχα. Στο Σενάριο C, το συνολικό κόστος ανακύκλωσης αυξάνεται σημαντικά, ξεπερνώντας σε αρκετές περιπτώσεις τα 400\$. Το κόστος για τα τυπικά πάνελ (Standard) είναι 240\$, ενώ τα προηγμένα διασυνδεδεμένα (Advanced interconnection) κοστίζουν 232\$. Αντίστοιχα, τα πλαίσια χωρίς γυαλί (Frameless) έχουν σημαντικά υψηλότερο κόστος, αγγίζοντας τα 400\$, και τα διπλού γυαλιού + bifacial κοστίζουν 263\$. Στο Σενάριο D, το κόστος ανακύκλωσης είναι το υψηλότερο σε σύγκριση με τα άλλα δύο σενάρια. Τα τυπικά πάνελ (Standard) φτάνουν τα 340\$, ενώ τα προηγμένα διασυνδεδεμένα πάνελ έχουν κόστος 318\$.

Τα πλαίσια χωρίς γυαλί (Frameless) παρουσιάζουν το μεγαλύτερο κόστος επεξεργασίας και διάθεσης, αγγίζοντας τα 415\$, ενώ τα διπλού γυαλιού + bifacial έχουν κόστος 487\$ και 356\$ αντίστοιχα. Η εικόνα 29 καταδεικνύει ότι η οικονομική βιωσιμότητα της ανακύκλωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του φωτοβολταϊκού πάνελ και τη μέθοδο επεξεργασίας. Το Σενάριο B φαίνεται να είναι το πιο οικονομικά αποδοτικό, με σχετικά χαμηλό καθαρό κόστος, ενώ το Σενάριο D οδηγεί σε αυξημένα κόστη επεξεργασίας και διάθεσης, καθιστώντας την ανακύκλωση πιο δαπανηρή. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη ανάπτυξης βελτιωμένων τεχνολογιών ανακύκλωσης που θα μειώσουν το κόστος και θα αυξήσουν την αξία των ανακτηθέντων υλικών.



Εικόνα 29. Σύγκριση κόστους και εσόδων από την ανακύκλωση διαφόρων τύπων φωτοβολταϊκών πάνελ με διαφορετικές μεθόδους. Πηγή: (Deng et al. 2019)

Τέλος, η μελέτη των Faircloth et al. (2019) διερευνά τις περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις της διαχείρισης των αποβλήτων των Φ/Β μονάδων στην Ταϊλάνδη, όπου η πλειονότητα των απορριφθέντων πάνελ καταλήγει σε χωματερές. Οι ερευνητές συνέκριναν τρεις εναλλακτικές στρατηγικές διαχείρισης: υγειονομική ταφή, ανακύκλωση μέσω εγκαταστάσεων ανακύκλωσης λαμιναρισμένου γυαλιού (LGRF) και ανακύκλωση σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις πλήρους ανάκτησης υλικών (FRELP). Η ανάλυση έδειξε ότι η ταφή των πάνελ συνεπάγεται υψηλό περιβαλλοντικό κόστος, καθώς επιτρέπει τη διαρροή τοξικών μετάλλων στο έδαφος και τα υπόγεια ύδατα. Από την άλλη πλευρά, η ανακύκλωση μέσω LGRF μπορεί να επιτύχει ανάκτηση έως και 85% του γυαλιού και 100% των μεταλλικών εξαρτημάτων, ωστόσο δεν μπορεί να ανακτήσει τα πολύτιμα μέταλλα των ηλιακών κυψελών. Η τεχνολογία FRELP, η οποία στοχεύει στην ανάκτηση όλων των υλικών των πάνελ, συμπεριλαμβανομένου του ασημιού και του πυριτίου, θεωρήθηκε η πιο περιβαλλοντικά βιώσιμη λύση. Σύμφωνα με τους Faircloth et al. (2019), η FRELP ανακύκλωση μειώνει τις εκπομπές CO₂ και εξοικονομεί ενέργεια. Ωστόσο, οικονομικά, καμία από τις δύο μεθόδους ανακύκλωσης δεν είναι επί του παρόντος κερδοφόρα, καθώς το κόστος ανακύκλωσης εκτιμάται στα 0,03 \$/kg. Τέλος, οι Faircloth et al. (2019) προτείνουν την υιοθέτηση πολιτικών κινήτρων και επιδοτήσεων για την προώθηση της βιώσιμης διαχείρισης των Φ/Β αποβλήτων στην Ταϊλάνδη, δεδομένης της αναμενόμενης αύξησης των απορριφθέντων πάνελ τα επόμενα χρόνια.

5. Συζήτηση - Σύγκριση Μεθόδων Διαχείρισης και Ανακύκλωσης

5.1. Σύγκριση Μεθόδων Διαχείρισης και Ανακύκλωσης Αποβλήτων από Ανεμογεννήτριες

Η σύγκριση των μεθόδων ανακύκλωσης και διάθεσης αποβλήτων ανεμογεννητριών αναδεικνύει σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς την αποδοτικότητα, την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και το κόστος εφαρμογής. Τα υλικά που συνθέτουν τις ανεμογεννήτριες, ιδίως τα πτερύγια, παρουσιάζουν ιδιαίτερες προκλήσεις στη διαχείρισή τους λόγω της χρήσης θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού ή άνθρακα (Tota-Maharaj & McMahon, 2021). Οι κύριες μέθοδοι διάθεσης περιλαμβάνουν την υγειονομική ταφή, τη συν-επεξεργασία σε τσιμεντοβιομηχανίες, τη μηχανική ανακύκλωση, την πυρόλυση και τις χημικές διεργασίες, με κάθε προσέγγιση να παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Η υγειονομική ταφή εξακολουθεί να αποτελεί την επικρατούσα πρακτική σε πολλές χώρες λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας εφαρμογής της. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή συνδέεται με σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς τα θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά των πτερυγίων δεν διασπώνται εύκολα, οδηγώντας σε μακροχρόνια ρύπανση (Tazi et al., 2019). Σύμφωνα με τους Ramirez-Tejeda et al. (2017), η ταφή των πτερυγίων στις Ηνωμένες Πολιτείες εξακολουθεί να είναι η κυρίαρχη μέθοδος διάθεσης, με περισσότερους από 418.000 τόνους αποβλήτων να αναμένεται να χρειαστούν διαχείριση μέχρι το 2040. Παρόμοιες προβλέψεις έχουν διατυπωθεί για την Ευρωπαϊκή Ένωση, όπου η απαγόρευση της ταφής σύνθετων υλικών σε ορισμένες χώρες δημιουργεί πιέσεις για την ανάπτυξη εναλλακτικών λύσεων (Kalkanis et al., 2019).

Η συν-επεξεργασία των πτερυγίων σε τσιμεντοβιομηχανίες έχει προταθεί ως βιώσιμη εναλλακτική, καθώς επιτρέπει τη χρήση τους ως δευτερογενές καύσιμο ή πρώτη ύλη στην παραγωγή τσιμέντου. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα της μείωσης της χρήσης ορυκτών καυσίμων και της μείωσης των εκπομπών CO₂, ενώ παράλληλα αξιοποιεί τα απόβλητα σε έναν παραγωγικό κύκλο (Nagle et al., 2020). Σύμφωνα με τη μελέτη των Nagle et al. (2020), η συν-επεξεργασία αποβλήτων πτερυγίων στην Ιρλανδία επέτρεψε τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, με την εγχώρια επεξεργασία να είναι πιο αποδοτική από τη μεταφορά των αποβλήτων σε άλλες χώρες. Παρόλο που η συν-επεξεργασία μειώνει τις ανάγκες ταφής, δεν αποτελεί

μέθοδο πραγματικής ανακύκλωσης, καθώς τα υλικά δεν επαναχρησιμοποιούνται αλλά καταναλώνονται ενεργειακά.

Η μηχανική ανακύκλωση περιλαμβάνει τον τεμαχισμό των πτερυγίων και τη χρήση των παραγόμενων υλικών ως πληρωτικά σε νέες πολυμερείς ή τσιμεντοειδείς συνθέσεις. Σύμφωνα με τη μελέτη των Pławecka et al. (2021), η προσθήκη 5%-15% ανακυκλωμένων αποβλήτων πτερυγίων σε γεωπολυμερή δεν επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές τους ιδιότητες, προσφέροντας μια βιώσιμη εναλλακτική. Ωστόσο, η χρήση μεγαλύτερων ποσοστών οδηγεί σε αυξημένη πορώδη φύση του υλικού, περιορίζοντας τις εφαρμογές του. Η μηχανική ανακύκλωση παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά το χαμηλό ενεργειακό κόστος και τη δυνατότητα βιομηχανικής εφαρμογής, αλλά το ζήτημα της ποιότητας των ανακυκλωμένων ινών παραμένει πρόκληση.

Η πυρόλυση αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο θερμικής επεξεργασίας, επιτρέποντας την ανάκτηση ινών υάλου και άνθρακα από πτερύγια ανεμογεννητριών. Σύμφωνα με τη μελέτη των Du et al. (2022), η πυρόλυση υπό ελεγχόμενες συνθήκες μπορεί να οδηγήσει σε ανακτημένα υλικά υψηλής ποιότητας, τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε σύνθετες εφαρμογές. Οι Hao et al. (2020) αναφέρουν ότι η χρήση της πυρόλυσης για την ανακύκλωση ινών άνθρακα μειώνει σημαντικά το ενεργειακό αποτύπωμα της βιομηχανίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας επεξεργασίας μπορεί να βελτιώσει την καθαρότητα των ανακτημένων ινών. Ωστόσο, το υψηλό κόστος της διαδικασίας και οι ενεργειακές απαιτήσεις της περιορίζουν την ευρεία εφαρμογή της.

Οι χημικές μέθοδοι ανακύκλωσης, όπως η solvolysis και η γλυκόλυση, επιτρέπουν την αποδόμηση της πολυμερικής μήτρας των πτερυγίων και την ανάκτηση ινών υψηλής ποιότητας. Σύμφωνα με τους Beaumont et al. (2022), η χρήση διαλυτών για τη διάλυση της εποξειδικής ρητίνης μπορεί να οδηγήσει σε αποδοτικότερη ανάκτηση ινών από ό,τι οι θερμικές μέθοδοι. Παρόλο που οι χημικές διεργασίες παρουσιάζουν υψηλή απόδοση, η εμπορική εφαρμογή τους παραμένει περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους και της ανάγκης διαχείρισης των παραγόμενων αποβλήτων.

Συγκριτικά, η υγειονομική ταφή παραμένει η λιγότερο βιώσιμη λύση, ενώ η συνεπεξεργασία σε τσιμεντοβιομηχανίες αποτελεί μια ενδιάμεση προσέγγιση που μειώνει τον όγκο των αποβλήτων αλλά δεν προάγει την κυκλική οικονομία. Η μηχανική

ανακύκλωση είναι ενεργειακά αποδοτική αλλά περιορίζεται από τη χαμηλή ποιότητα των ανακυκλωμένων υλικών. Η πυρόλυση και οι χημικές μέθοδοι παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες προοπτικές για τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων ανεμογεννητριών, αλλά απαιτούν βελτιώσεις σε επίπεδο κόστους και εφαρμογής μεγάλης κλίμακας. Σύμφωνα με τη μελέτη των Sorte et al. (2023), η αποτελεσματικότητα κάθε μεθόδου εξαρτάται από παράγοντες όπως το κόστος, η τεχνολογική ετοιμότητα και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συνεπώς, η ανάπτυξη ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης που θα συνδυάζουν διαφορετικές τεχνολογίες και θα ενσωματώνουν τις αρχές της κυκλικής οικονομίας αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την αντιμετώπιση του προβλήματος των αποβλήτων ανεμογεννητριών.

5.2. Σύγκριση Μεθόδων Διαχείρισης και Ανακύκλωσης Αποβλήτων από Φωτοβολταϊκά

Η ανακύκλωση και η διάθεση των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πάνελ στο τέλος του κύκλου ζωής τους αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα για τη βιωσιμότητα του τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με την εκρηκτική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, η οποία έφτασε τα 400 GW το 2017 και αναμένεται να αγγίξει τους 4,500 GW έως το 2050 (Chowdhury et al., 2020), ο όγκος των αποβλήτων φωτοβολταϊκών συστημάτων θα αυξηθεί σημαντικά, ξεπερνώντας τους 78 εκατομμύρια τόνους. Αυτή η ραγδαία ανάπτυξη καθιστά αναγκαία τη βελτιστοποίηση των μεθόδων ανακύκλωσης, τόσο για την ανάκτηση πολύτιμων υλικών όσο και για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Οι κύριες τεχνικές ανακύκλωσης περιλαμβάνουν τη φυσική, τη θερμική και τη χημική επεξεργασία, ενώ πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί καινοτόμες μέθοδοι που στοχεύουν στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της οικονομικής βιωσιμότητας της διαδικασίας.

Η φυσική ανακύκλωση αποτελεί την πρώτη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδο επεξεργασίας των Φ/Β αποβλήτων. Περιλαμβάνει μηχανικές διεργασίες, όπως ο τεμαχισμός και η διαλογή, οι οποίες επιτρέπουν την ανάκτηση βασικών υλικών, όπως το γυαλί και τα μέταλλα. Η μελέτη των Granata et al. (2014) έδειξε ότι η μηχανική άλεση μπορεί να οδηγήσει σε ανάκτηση του 85% του γυαλιού, γεγονός που καθιστά αυτή τη μέθοδο ιδιαίτερα αποδοτική. Ωστόσο, η φυσική επεξεργασία δεν επιτρέπει την ανάκτηση των πολύτιμων μετάλλων, όπως το ασήμι και το πυρίτιο, τα οποία βρίσκονται εγκλωβισμένα στα εσωτερικά στρώματα των πάνελ. Επιπλέον, η

σύνθλιψη των πάνελ μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες λόγω της μόλυνσης των ανακτηθέντων υλικών, γεγονός που μειώνει την εμπορική τους αξία.

Η θερμική ανακύκλωση, από την άλλη, επιτρέπει την αποδόμηση των οργανικών υλικών, όπως το EVA (Ethylene Vinyl Acetate), που χρησιμοποιείται για την ενθυλάκωση των ηλιακών κυψελών. Σύμφωνα με τους Tammaro et al. (2015), η θερμική επεξεργασία στους 600°C για 30 λεπτά επιτρέπει την απομάκρυνση του EVA και τη διαχωριστική ανάκτηση των υλικών. Ωστόσο, η τεχνική αυτή συνοδεύεται από περιβαλλοντικές ανησυχίες, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε εκπομπή τοξικών αερίων, όπως διοξείδια του θείου και βαρέα μέταλλα, εάν δεν εφαρμοστούν κατάλληλα μέτρα ελέγχου των ρύπων. Παρά την αποτελεσματικότητά της, η θερμική επεξεργασία δεν θεωρείται η πλέον βιώσιμη επιλογή, καθώς έχει υψηλό ενεργειακό κόστος και απαιτεί εξειδικευμένες εγκαταστάσεις.

Οι χημικές μέθοδοι ανακύκλωσης έχουν αναδειχθεί ως η πιο αποτελεσματική τεχνική για την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων, όπως το ασήμι, ο χαλκός και το ίνδιο. Οι Padoan et al. (2019) ανέφεραν ότι η υδρομεταλλουργική επεξεργασία με χρήση θειικού οξέος (H_2SO_4) και υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) μπορεί να επιτύχει ανάκτηση 92% για το ασήμι και 85% για το πυρίτιο. Αντίστοιχα, οι Savvilatidou et al. (2017) διαπίστωσαν ότι η χρήση γαλακτικού και θειικού οξέος επιτρέπει την απομάκρυνση της EVA χωρίς την ανάγκη υψηλών θερμοκρασιών, μειώνοντας έτσι το ενεργειακό αποτύπωμα της διαδικασίας. Ωστόσο, οι χημικές μέθοδοι έχουν υψηλό λειτουργικό κόστος και απαιτούν αυστηρό έλεγχο των αποβλήτων, ώστε να αποτραπεί η ρύπανση των υδάτινων πόρων.

Η οικονομική βιωσιμότητα των διαφορετικών μεθόδων ανακύκλωσης αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια για την ευρεία εφαρμογή τους. Σύμφωνα με τους Deng et al. (2019), η ανακύκλωση γυαλιού από τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι η λιγότερο δαπανηρή επιλογή, καθώς το κόστος συλλογής και επεξεργασίας κυμαίνεται μεταξύ 100-150\$/τόνο, ενώ η αξία των ανακτηθέντων υλικών είναι χαμηλή. Η μηχανική ανακύκλωση, αν και προσφέρει υψηλότερα έσοδα από την ανάκτηση μετάλλων, έχει αυξημένο κόστος, που κυμαίνεται από 200-400\$/τόνο. Η θερμική επεξεργασία είναι η πιο δαπανηρή μέθοδος, με το συνολικό κόστος να ξεπερνά τα 500\$/τόνο, γεγονός που καθιστά δύσκολη την οικονομική της βιωσιμότητα χωρίς κρατικές επιδοτήσεις.

Προκειμένου να ξεπεραστούν οι οικονομικές και τεχνικές προκλήσεις, οι πρόσφατες έρευνες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων ανακύκλωσης. Οι Ali et al. (2024) παρουσίασαν μια υβριδική τεχνική που συνδυάζει τη χρήση λέιζερ με παλμούς υψηλής τάσης (Laser and High Voltage Pulse - L&HVP), επιτρέποντας την αποδοτικότερη διάσπαση των υλικών και την αύξηση της απόδοσης ανάκτησης. Η τεχνική αυτή έχει τη δυνατότητα να μειώσει το ενεργειακό κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθιστώντας την ανακύκλωση πιο βιώσιμη σε βιομηχανική κλίμακα. Παράλληλα, η ανάπτυξη νέων πολιτικών κινήτρων, όπως η υποχρεωτική ανάκτηση του 85% των Φ/Β αποβλήτων στην ΕΕ (Paiano, 2015), αναμένεται να ενισχύσει την ανάπτυξη των υποδομών ανακύκλωσης.

Η σύγκριση των μεθόδων ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών πάνελ αναδεικνύει σημαντικές διαφορές ως προς την αποδοτικότητα, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η φυσική ανακύκλωση είναι η λιγότερο δαπανηρή αλλά δεν επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων. Η θερμική επεξεργασία είναι αποδοτική αλλά συνοδεύεται από υψηλό ενεργειακό κόστος και περιβαλλοντικούς κινδύνους. Οι χημικές μέθοδοι προσφέρουν τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην ανάκτηση υλικών, αλλά απαιτούν εξειδικευμένες εγκαταστάσεις και αυστηρούς ελέγχους. Οι καινοτόμες τεχνικές, όπως η υβριδική ανακύκλωση με λέιζερ και παλμούς υψηλής τάσης, αποτελούν υποσχόμενες λύσεις για τη μελλοντική διαχείριση των Φ/Β αποβλήτων. Παρά τις τεχνικές προκλήσεις, η αυξανόμενη ζήτηση για δευτερογενείς πρώτες ύλες και η ενίσχυση των ρυθμιστικών πλαισίων αναμένεται να διαμορφώσουν ένα πιο βιώσιμο μοντέλο διαχείρισης των φωτοβολταϊκών αποβλήτων τις επόμενες δεκαετίες.

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία εξέτασε τη διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), με έμφαση στις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Η μελέτη ανέδειξε τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες που σχετίζονται με την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση αυτών των υλικών, τονίζοντας τη σημασία της βιώσιμης διαχείρισης στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

Η ταχεία ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει οδηγήσει στην εκτεταμένη εγκατάσταση ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών πάνελ παγκοσμίως. Ωστόσο, καθώς ο κύκλος ζωής αυτών των τεχνολογιών φτάνει στο τέλος του, καθίσταται απαραίτητη η υιοθέτηση αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης των αποβλήτων. Οι ανεμογεννήτριες, για παράδειγμα, περιέχουν σύνθετα πολυμερή και άλλα υλικά που καθιστούν δύσκολη την ανακύκλωσή τους, ενώ τα φωτοβολταϊκά πάνελ περιέχουν πολύτιμα αλλά και δυνητικά επικίνδυνα στοιχεία, τα οποία απαιτούν εξειδικευμένες διαδικασίες ανάκτησης.

Ένα από τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας είναι η ανάγκη ανάπτυξης και εφαρμογής πιο αποδοτικών τεχνολογιών ανακύκλωσης. Οι υφιστάμενες μέθοδοι διαχείρισης, όπως η υγειονομική ταφή, δεν είναι βιώσιμες μακροπρόθεσμα, καθώς οδηγούν σε σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση. Ειδικότερα, για τις ανεμογεννήτριες, η συν-επεξεργασία σε τσιμεντοβιομηχανίες προσφέρει μια μερικώς αποδοτική λύση, αλλά δεν συμβάλλει στην κυκλική οικονομία. Αντίθετα, η μηχανική ανακύκλωση, η πυρόλυση και οι χημικές διεργασίες ανακύκλωσης των πτερυγίων των ανεμογεννητριών αποτελούν πιο ελπιδοφόρες μεθόδους, αν και απαιτούν περαιτέρω τεχνολογικές βελτιώσεις και μείωση του κόστους εφαρμογής.

Η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ παρουσιάζει επίσης σημαντικές προκλήσεις. Ενώ η φυσική ανακύκλωση επιτρέπει την ανάκτηση βασικών υλικών, όπως το γυαλί και το αλουμίνιο, δεν εξασφαλίζει την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων, όπως το ασήμι και το πυρίτιο. Οι θερμικές και χημικές μέθοδοι ανακύκλωσης, αν και αποδοτικές, συνοδεύονται από υψηλό ενεργειακό κόστος και περιβαλλοντικές ανησυχίες. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών, όπως η χρήση λέιζερ και παλμών υψηλής τάσης, αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας που θα

μπορούσε να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της ανακύκλωσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Ένα ακόμη σημαντικό εύρημα της έρευνας είναι ο ρόλος των πολιτικών και νομοθετικών πλαισίων στη διαχείριση των αποβλήτων από ΑΠΕ. Παρά τις προσπάθειες που έχουν γίνει σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο για τη βελτίωση της ανακύκλωσης, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά εμπόδια, όπως η έλλειψη υποδομών και το υψηλό κόστος επεξεργασίας. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει συγκεκριμένους στόχους για την ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πάνελ, αλλά απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση των πολιτικών κινήτρων και των υποχρεωτικών προτύπων για τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων.

Η κυκλική οικονομία αποτελεί έναν από τους βασικούς άξονες που μπορούν να συμβάλουν στη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων από ΑΠΕ. Η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση των υλικών δεν αφορούν μόνο τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, αλλά και τη δημιουργία νέων αγορών και επιχειρηματικών ευκαιριών. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών ανακύκλωσης, σε συνδυασμό με οικονομικά κίνητρα και πολιτικές υποστήριξης, μπορεί να βελτιώσει τη βιωσιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και να διασφαλίσει ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις τεχνολογίες δεν θα καταλήγουν ως απόβλητα, αλλά θα επαναξιοποιούνται σε νέα προϊόντα.

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι η διαχείριση των αποβλήτων από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και άλλες ΑΠΕ είναι μια σύνθετη και πολυδιάστατη διαδικασία που απαιτεί τη συνεργασία πολλών τομέων, από την έρευνα και την τεχνολογία μέχρι την πολιτική και τη βιομηχανία. Οι σύγχρονες τεχνικές ανακύκλωσης, παρά τις προόδους τους, εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν προκλήσεις όσον αφορά την αποδοτικότητα, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Παράλληλα, η νομοθεσία πρέπει να προσαρμοστεί στις ανάγκες του τομέα, ενισχύοντας τις υποχρεώσεις ανακύκλωσης και δημιουργώντας κατάλληλα οικονομικά κίνητρα.

Η βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν αποτελεί απλώς μια περιβαλλοντική αναγκαιότητα, αλλά και μια σημαντική ευκαιρία για την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας και της βιομηχανίας ανακύκλωσης. Η υιοθέτηση ολοκληρωμένων στρατηγικών, η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών και η

ενίσχυση του θεσμικού πλαισίου θα διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης. Η έρευνα στον τομέα της ανακύκλωσης των ΑΠΕ πρέπει να συνεχιστεί, ώστε να εξευρεθούν ακόμα πιο αποδοτικές λύσεις, συμβάλλοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και στην αποτελεσματική διαχείριση των ενεργειακών πόρων στο μέλλον.

6.1. Περιορισμοί της Έρευνας

Η παρούσα έρευνα βασίστηκε αποκλειστικά σε δευτερογενείς πηγές, γεγονός που επιφέρει ορισμένους περιορισμούς. Η χρήση βιβλιογραφικής μεθόδου σημαίνει ότι τα δεδομένα και τα συμπεράσματα αντλήθηκαν από ήδη δημοσιευμένες μελέτες, χωρίς τη δυνατότητα πρωτογενούς ανάλυσης ή επιβεβαίωσης των ευρημάτων μέσω πρωτογενών πειραμάτων ή ερευνών. Αυτό ενδέχεται να επηρεάζει τη γενίκευση των αποτελεσμάτων, καθώς οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν ενδέχεται να αντικατοπτρίζουν συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, χρονικές περιόδους ή επιστημονικές προσεγγίσεις. Επιπλέον, η έλλειψη πρόσβασης σε ορισμένες εξειδικευμένες ή νεότερες μελέτες περιορίζει την πληρότητα της ανάλυσης, καθώς ορισμένα δεδομένα μπορεί να έχουν εξελιχθεί ή επικαιροποιηθεί από πιο πρόσφατες έρευνες που δεν συμπεριλήφθηκαν. Οι μελέτες που εξετάστηκαν μπορεί επίσης να διαφέρουν ως προς τις μεθοδολογικές τους προσεγγίσεις, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Τέλος, η αξιολόγηση της βιωσιμότητας και της αποδοτικότητας των μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων βασίστηκε κυρίως σε θεωρητικά και εργαστηριακά δεδομένα, χωρίς άμεση ανάλυση πραγματικών εφαρμογών σε βιομηχανική κλίμακα. Συνεπώς, τα ευρήματα της παρούσας έρευνας παρέχουν ένα συνολικό πλαίσιο για το θέμα, αλλά απαιτούν περαιτέρω εμπειρική διερεύνηση.

6.2. Κατευθύνσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει στην εμπειρική αξιολόγηση των υφιστάμενων πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μέσω ποσοτικών και ποιοτικών μελετών που θα εξετάζουν την αποτελεσματικότητά τους στην πράξη. Συγκεκριμένα, η ανάλυση δεδομένων από πραγματικές εγκαταστάσεις ανακύκλωσης ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών πάνελ θα μπορούσε να προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την οικονομική και

περιβαλλοντική βιωσιμότητα των διαφορετικών τεχνικών. Επιπλέον, η ανάπτυξη και αξιολόγηση καινοτόμων τεχνολογιών, όπως οι βελτιωμένες χημικές μέθοδοι ανάκτησης πολύτιμων υλικών ή η χρήση τεχνητής νοημοσύνης στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης αποβλήτων, θα μπορούσε να συμβάλει στη βελτίωση της ανακύκλωσης και στην ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας. Παράλληλα, οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης των ΑΠΕ, όπως η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και η μείωση της εξάρτησης από πρώτες ύλες, αποτελούν έναν τομέα που αξίζει περαιτέρω μελέτη. Τέλος, η εξέταση του ρυθμιστικού πλαισίου και των πολιτικών κινήτρων που ενθαρρύνουν τη βιώσιμη διαχείριση αποβλήτων θα μπορούσε να αποκαλύψει πιθανά εμπόδια και ευκαιρίες για την ανάπτυξη πιο ολοκληρωμένων στρατηγικών ανακύκλωσης. Η σύγκριση των πολιτικών διαφορετικών χωρών θα μπορούσε να προσφέρει χρήσιμες προτάσεις για τη βελτίωση των νομοθετικών και οικονομικών μηχανισμών που στηρίζουν την κυκλική διαχείριση των αποβλήτων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- Ali, A., Shahid, M., Qadir, S. A., Islam, M. T., Khan, M. W., & Ahmed, S. (2024). Solar PV End-of-Life Waste Recycling: An Assessment of Mechanical Recycling Methods and Proposed Hybrid Laser and High Voltage Pulse Crushing Method. *Resources*, 13(12), 1-29.
- Alsaleh, A., & Sattler, M. (2019). Comprehensive life cycle assessment of large wind turbines in the US. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 887-903.
- Andersen, N., Eriksson, O., Hillman, K., & Wallhagen, M. (2016). Wind turbines' end-of-life: Quantification and characterisation of future waste materials on a national level. *Energies*, 9(12), 999.
- Azeumo, M. F., Germana, C., Ippolito, N. M., Franco, M., Luigi, P., & Settimio, S. (2019). Photovoltaic module recycling, a physical and a chemical recovery process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 193, 314-319.
- Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D. P., & Jensen, J. P. (2022). The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155, 111847.
- Björklund, A., & Finnveden, G. (2005). Recycling revisited—life cycle comparisons of global warming impact and total energy use of waste management strategies. *Resources, Conservation and Recycling*, 44(4), 309-317.
- Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2015). Waste to energy—key element for sustainable waste management. *Waste management*, 37, 3-12.
- Castaldo, R., De Falco, F., Avolio, R., Bossanne, E., Cicaroni Fernandes, F., Cocca, M., ... & Avella, M. (2019). Critical factors for the recycling of different end-of-life materials: Wood wastes, automotive shredded residues, and dismantled wind turbine blades. *Polymers*, 11(10), 1604.
- Ceglia, F., Esposito, P., Faraudello, A. L. E. S. S. A. N. D. R. A., Marrasso, E., Rossi, P., & Sasso, M. (2022). An energy, environmental, management and economic analysis of energy efficient system towards renewable energy community: The case study of multi-purpose energy community. *Journal of Cleaner Production*, 369, 133269.

- Chen, J., Wang, J., & Ni, A. (2019). Recycling and reuse of composite materials for wind turbine blades: An overview. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(12), 567-577.
- Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., ... & Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, 27, 100431.
- Demirbas, A. (2011). Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1280-1287.
- Deng, R., Chang, N. L., Ouyang, Z., & Chong, C. M. (2019). A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 532-550.
- Du, C., Jin, G., Zhang, L., Tong, B., Wang, B., Zhang, G., & Cheng, Y. (2022). Zero-waste recycling of fiber/epoxy from scrap wind turbine blades for effective resource utilization. *Polymers*, 14(24), 5408.
- ELETAEN. (2022). *Η πρόοδος στην ανακύκλωση των ανεμογεννητριών*. Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας. Διαθέσιμο στο: <https://eletaen.gr/wp-content/uploads/2024/03/2024-03-27-arthro-papastamatiou-karra-efsyn-anakiklosi.pdf> Ανάκτηση στις 26/05/25.
- Eriksson, O., Bisailon, M., Haraldsson, M., & Sundberg, J. (2014). Integrated waste management as a mean to promote renewable energy. *Renewable Energy*, 61, 38-42.
- Faircloth, C. C., Wagner, K. H., Woodward, K. E., Rakkwamsuk, P., & Gheewala, S. H. (2019). The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand. *Resources, Conservation and Recycling*, 143, 260-272.
- Fonte, R., & Xydis, G. (2021). Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. *Journal of environmental management*, 287, 112269.
- Fonte, R., & Xydis, G. (2021). Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials. *Journal of environmental management*, 287, 112269.

- Fthenakis, V. M. (2000). End-of-life management and recycling of PV modules. *Energy Policy*, 28(14), 1051-1058.
- Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., & Toro, L. J. S. E. M. (2014). Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 123, 239-248.
- Hao, S., Kuah, A. T., Rudd, C. D., Wong, K. H., Lai, N. Y. G., Mao, J., & Liu, X. (2020). A circular economy approach to green energy: Wind turbine, waste, and material recovery. *Science of the Total Environment*, 702, 135054.
- IRENA (2020), Wind Energy: A Gender Perspective. IRENA, Abu Dhabi. Διαθέσιμο στο: <https://www.irena.org/Publications/2020/Jan/Wind-energy-A-gender-perspective> Ανάκτηση στις 27/05/25.
- IRENA and IEA-PVPS (2016), “End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels,” International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems. Διαθέσιμο στο: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf Ανάκτηση στις 25/03/25.
- Jasińska, D., & Dutkiewicz, M. (2025). Waste Management of Wind Turbine Blades—A Review of Recycling Methods and Applications in Cementitious Composites. *Sustainability*, 17(3), 805.
- Jensen, J. P., & Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 165-176.
- Kalkanis, K., Psomopoulos, C. S., Kaminaris, S., Ioannidis, G., & Pachos, P. (2019). Wind turbine blade composite materials-End of life treatment methods. *Energy Procedia*, 157, 1136-1143.
- Karavida, S., & Nõmmik, R. (2015). Waste management of end-of-service wind turbines. *Aalborg University: Aalborg, Denmark*.
- Karavida, S., & Peponi, A. (2023). Wind turbine blade waste circularity coupled with urban regeneration: A conceptual framework. *Energies*, 16(3), 1464.

- Kiriakidis, P., Christoudias, T., Kushta, J., & Lelieveld, J. (2024). Projected wind and solar energy potential in the eastern Mediterranean and Middle East in 2050. *Science of The Total Environment*, 927, 172120.
- Kollmann, R., Neugebauer, G., Kretschmer, F., Truger, B., Kindermann, H., Stoeglehner, G., ... & Narodoslawsky, M. (2017). Renewable energy from wastewater-Practical aspects of integrating a wastewater treatment plant into local energy supply concepts. *Journal of Cleaner Production*, 155, 119-129.
- Korniejenko, K., Kozub, B., Bąk, A., Balamurugan, P., Uthayakumar, M., & Furtos, G. (2021). Tackling the circular economy challenges—Composites recycling: Used tyres, wind turbine blades, and solar panels. *Journal of Composites Science*, 5(9), 243.
- Krauklis, A. E., Karl, C. W., Gagani, A. I., & Jørgensen, J. K. (2021). Composite material recycling technology—state-of-the-art and sustainable development for the 2020s. *Journal of Composites Science*, 5(1), 28.
- Leahy, P. G., Zhang, Z., Nagle, A. J., Ruane, K., Delaney, E., McKinley, J., ... & Gentry, T. R. (2021). Greenway pedestrian and cycle bridges from repurposed wind turbine blades.
- Leon, M. J. (2023). Recycling of wind turbine blades: Recent developments. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 39, 100746.
- Lichtenegger, G., Rentizelas, A. A., Trivyza, N., & Siegl, S. (2020). Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050. *Waste management*, 106, 120-131.
- Liu, P., Meng, F., & Barlow, C. Y. (2019). Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison. *Journal of Cleaner Production*, 212, 1268-1281.
- Mahmoudi, S., Huda, N., & Behnia, M. (2021). Multi-levels of photovoltaic waste management: A holistic framework. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126252.
- Martínez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jiménez, E., & Blanco, J. (2009). Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable energy*, 34(3), 667-673.

- Martínez, M., Barrueto, Y., Jimenez, Y. P., Vega-Garcia, D., & Jamett, I. (2024). Technological Advancement in Solar Photovoltaic Recycling: A Review. *Minerals*, 14(7), 638.
- Marwede, M., Berger, W., Schlummer, M., Mäurer, A., & Reller, A. (2013). Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste—Current feasible processes. *Renewable Energy*, 55, 220-229.
- Mishnaevsky, L. (2021). *Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions. Materials 2021; 14: 1124.*
- Nagle, A. J., Delaney, E. L., Bank, L. C., & Leahy, P. G. (2020). A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123321.
- Padoan, F. C., Altimari, P., & Pagnanelli, F. (2019). Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development. *Solar Energy*, 177, 746-761.
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Granata, G., Atia, T. A., Altimari, P., Havlik, T., & Toro, L. (2017). Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies. *Waste management*, 59, 422-431.
- Paiano, A. (2015). Photovoltaic waste assessment in Italy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 99-112.
- Pławecka, K., Przybyła, J., Korniejenko, K., Lin, W. T., Cheng, A., & Łach, M. (2021). Recycling of mechanically ground wind turbine blades as filler in geopolymer composite. *Materials*, 14(21), 6539.
- Psomopoulos, C. S., Kalkanis, K., Kaminaris, S., Ioannidis, G. C., & Pachos, P. (2019). A review of the potential for the recovery of wind turbine blade waste materials. *Recycling*, 4(1), 7.
- Ramirez-Tejeda, K., Turcotte, D. A., & Pike, S. (2017). Unsustainable wind turbine blade disposal practices in the United States: A case for policy intervention and

- technological innovation. *NEW SOLUTIONS: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, 26(4), 581-598.
- Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., & Zafar, S. (2021). A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades. *Composites part B: engineering*, 215, 108768.
- Rathore, N., & Panwar, N. L. (2023). Environmental impact and waste recycling technologies for modern wind turbines: An overview. *Waste Management & Research*, 41(4), 744-759.
- Sadeq, Y., Nizami, A. S., Batool, S. A., Chaudary, M. N., Ouda, O. K. M., Asam, Z. U. Z., ... & Demirbas, A. (2016). Waste-to-energy and recycling value for developing integrated solid waste management plan in Lahore. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 11(7), 569-579.
- Savvilitidou, V., Antoniou, A., & Gidarakos, E. (2017). Toxicity assessment and feasible recycling process for amorphous silicon and CIS waste photovoltaic panels. *Waste management*, 59, 394-402.
- Seif, R., Salem, F. Z., & Allam, N. K. (2024). E-waste recycled materials as efficient catalysts for renewable energy technologies and better environmental sustainability. *Environment, development and sustainability*, 26(3), 5473-5508.
- Shen, Y., Apraku, S. E., & Zhu, Y. (2023). Recycling and Recovery of Fiber-reinforced Polymer Composites for End-of-Life Wind Turbine Blades Management. *Green Chemistry*.
- Skarkos, N., Menti, A., Kalkanis, K., Chronis, I., & Psomopoulos, C. S. (2024). Impact Assessment of Photovoltaic Panels with Life Cycle Analysis Techniques.
- Sommer, V., & Walther, G. (2021). Recycling and recovery infrastructures for glass and carbon fiber reinforced plastic waste from wind energy industry: A European case study. *Waste Management*, 121, 265-275.
- Sorte, S., Martins, N., Oliveira, M. S., Vela, G. L., & Relvas, C. (2023). Unlocking the potential of wind turbine blade recycling: assessing techniques and metrics for sustainability. *Energies*, 16(22), 7624.

- Tammaro, M., Rimauro, J., Fiandra, V., & Salluzzo, A. (2015). Thermal treatment of waste photovoltaic module for recovery and recycling: Experimental assessment of the presence of metals in the gas emissions and in the ashes. *Renewable Energy*, 81, 103-112.
- Tao, J., & Yu, S. (2015). Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 141, 108-124.
- Tayebi, S. T., Sambucci, M., & Valente, M. (2024). Waste Management of Wind Turbine Blades: A Comprehensive Review on Available Recycling Technologies with A Focus on Overcoming Potential Environmental Hazards Caused by Microplastic Production. *Sustainability*, 16(11), 4517.
- Tazi, N., Kim, J., Bouzidi, Y., Chatelet, E., & Liu, G. (2019). Waste and material flow analysis in the end-of-life wind energy system. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 199-207.
- Tota-Maharaj, K., & McMahon, A. (2021). Resource and waste quantification scenarios for wind turbine decommissioning in the United Kingdom. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 3(2), 117-144.
- Włodarczyk, R. (2022). *Analysis of the Photovoltaic Waste-Recycling Process in Polish Conditions—A Short Review*. *Sustainability* 2022, 14, 4739.
- Yang, J., Meng, F., Zhang, L., McKechnie, J., Chang, Y., Ma, B., ... & Cullen, J. M. (2023). Solutions for recycling emerging wind turbine blade waste in China are not yet effective. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 466.
- Zhao, X., Pakuła, D., Frydrych, M., Konieczna, R., Sztorch, B., Kozera, R., ... & Przekop, R. E. (2025). Treatment and Valorization of Waste Wind Turbines: Component Identification and Analysis. *Materials*, 18(2), 468.
- Παπασταματίου, Π. (2023, Ιούνιος 9). Διαχείριση πτερυγίων ανεμογεννητριών: Το επόμενο βήμα της πράσινης μετάβασης. Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΑΕΥ). Διαθέσιμο στο: <https://www.raaey.gr/energeia/wp-content/uploads/2023/06/002-%CE%A0-%CE%A0%CE%B1%CF%80%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B1%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%AF%CE%BF%CF%85-Green-Forward-9.6.23.pdf>
Ανάκτηση στις 18/05/25.